

Zijn STBU berekeningen te conservatief?

SCHEMATISATIES VAN HOOGWATERGOLVEN MET
BETREKKING TOT BUITENWAARTSE MACROSTABILITEIT
(STBU) BEREKENINGEN

Voorwoord

Op 8 april 2019 ben ik begonnen met mijn afstudeerstage bij ingenieurs- en adviesbureau Sweco in De Bilt. Gedurende de daaropvolgende tien weken heb ik onderzoek gedaan naar de schematisaties van hoogwatergolven, die buitenwaartse macrostabiliteit kunnen veroorzaken.

In dijkversterkingsprojecten in Nederland is er momenteel discussie hoe om te gaan met buitenwaartse stabiliteit. Er is sprake van falen als gevolg van macrostabiliteit buitenwaarts indien een afschuiving optreedt aan de buitenwaartse zijde van een grondlichaam én er vervolgens binnen de hersteltijd een hoogwatergolf optreedt, die tot een overstroming leidt. De reden dat er momenteel veel discussie is over dit faalmechanisme, is omdat er conservatieve aannames zitten in de kans dat de waterkering niet binnen de daarvoor beschikbare hersteltijd kan worden gerepareerd, nadat een afschuiving heeft plaats gevonden. Daarnaast kan de wijze waarop hoogwatergolven worden geschematiseerd het faalmechanisme aanzienlijk beïnvloeden. De mate van conservatisme in die kans en de mate waarin de schematisatie van hoogwatergolven buitenwaartse macrostabiliteit beïnvloedt, vormen de aanleidingen voor het schrijven van dit verslag. Dit verslag is geschreven ter afronding van de bachelor Civiele Techniek.

Deze opdracht heb ik uitgevoerd bij Sweco. Vanuit de Universiteit Twente ben ik begeleid door Jord Warmink. Voor het schrijven van mijn voorverslag miste ik veel kennis op het gebied van buitenwaartse macrostabiliteit. Jord heeft mij destijds een paar nuttig rapportages aanbevolen, die een goede basis hebben gevormd voor het onderzoek. Ook is hij gedurende mijn opdracht actief betrokken geweest met mijn voortgang en heeft hij mij voorzien van bruikbare feedback. Ik wil hem bedanken voor zijn betrokkenheid bij mijn opdracht.

Bij Sweco ben ik begeleid door Ruud Raaijmakers en Jana Steenbergen-Kajabová. Ruud is betrokken geweest bij het schrijven van mijn voorverslag en van het grootste deel van mijn scriptie. Jana heeft mij de eerste drie weken van mijn onderzoek begeleid, omdat Ruud afwezig was. Van beiden heb ik veel geleerd. Ze hebben mij goede feedback gegeven op mijn voortgang. Ook heeft Ruud mij in contact gebracht met een dijkbeheerder, die een paar vragen van mij, die ik niet uit literatuur kon afleiden, heeft beantwoord. Ik wil hen bedanken voor hun deel in dit onderzoek.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting.....	4
1. Inleiding	6
1.1. Proces macrostabiliteit buitenwaarts	6
1.2. Aanleiding.....	9
1.3. Doel	10
1.4. Onderzoeksvragen.....	11
1.5. Locatie	11
1.6. Globale methodologie	11
2. Kenmerken van enkele hoogwatergolven.....	13
2.1. Drempelwaarde.....	13
2.2. Piekafvoer.....	13
2.3. Enkele hoogwatergolven selecteren	14
2.4. Conclusie	15
3. Verschillende types enkele hoogwatergolven	16
3.1. Verschillende golfvormen	16
3.2. Van afvoeren naar waterstanden.....	17
3.3. Schematisaties van verschillende golfvormen	17
3.4. Verschillende types enkele hoogwatergolven	20
3.5. Resultaten uit Matlab script.....	21
3.6. Conclusie	21
4. Dubbele hoogwatergolven	23
4.1. Afschuiving	23
4.2. Hersteltijd	24
4.3. Dubbele hoogwatergolven selecteren	24
4.4. Resultaten en schatting ordegrootte voorwaardelijke overstromingskans STBU	26
4.5. Conclusie	26
5. Gevoeligheidsanalyse	28
5.1. Opzet	28
5.2. Uitvoering en resultaten	29
5.2.1. Piekafvoer.....	29
5.2.2. Tijd snelle val	32
5.2.3. Window	33
5.2.4. 100% afschuiving bij snelle val	34
5.3. Conclusie	35

6.	Discussie	37
6.1.	Categorisatie van types hoogwatergolven	37
6.2.	Tijd afschuiving	38
6.3.	Hersteltijd	39
6.4.	Validatie	39
7.	Conclusie en aanbevelingen	42
7.1.	Conclusie	42
7.2.	Aanbevelingen	43
7.2.1.	Categorisatie van types hoogwatergolven	43
7.2.2.	Tijd afschuiving	44
7.2.3.	Hersteltijd	45
8.	Verwijzingen	46
9.	Bijlagen	48
	Bijlage A – voorbeeld identificatie enkele hoogwatergolven	48
	Bijlage B – berekening window volgens (Trul, 2016)	50
	Bijlage C – interview met dijkbeheerder	52
	Bijlage D – voorbeeld identificatie dubbele hoogwatergolven	53
	Bijlage E – flowchart types hoogwatergolven	55
	Bijlage F – Matlab Script	56
	Bijlage G – Gevoeligheidsanalyse	66

Samenvatting

Een dijk kan op verschillende manieren bezwijken, onder andere door buitenwaartse macrostabiliteit. Wanneer water tegen de buitenkant van een dijk staat, infiltreert het door de dijk heen. Door infiltratie van water in de dijk ten gevolge van een hoogwatergolf, stijgen de waterspanningen in de dijk. Het geïnfiltreerde water in de dijk wordt 'de freatische lijn' genoemd. Wanneer vervolgens de buitenwaterstand plotseling daalt, zal het in de dijk geïnfiltreerde water niet meteen zakken. Bij een plotselinge val (daling) van hoogwater, zal de freatische lijn niet direct kunnen volgen en blijven de waterspanningen in eerste instantie hoog. Door de hoge waterspanningen in de dijk en het wegvallen van het tegenwerkende moment van de hoge waterstand, kan een afschuiving plaatsvinden. Als vervolgens een tweede hoogwatergolf optreedt binnen de hersteltijd van het afgeschoven dijktraject, dan zou de dijk kunnen bezwijken en kan een overstroming plaatsvinden. Dit proces staat bekend als 'buitenwaartse macrostabiliteit'.

Buitenwaartse macrostabiliteit is een indirect faalmechanisme van een dijk, omdat het niet optreedt in combinatie met een hoge waterstand. Er is immers een tweede hoogwatergolf nodig om daadwerkelijk dijkfalen teweeg te brengen. Momenteel is er veel discussie over hoe groot de kans is dat er binnen de hersteltijd van een dijktraject een tweede hoogwatergolf voorkomt. Er wordt nu aangenomen, dat deze kans 10% is, maar experts stellen dat dit erg conservatief is.

In dit onderzoek is gekeken naar de schematisaties van hoogwatergolven, die betrekking kunnen hebben op buitenwaartse macrostabiliteit. Hoogwatergolven zijn maatgevend voor de freatische lijn in de dijk en zullen bepalen wanneer een afschuiving plaatsvindt. Een medestudent, Nick van de Voort, heeft onderzoek gedaan naar freatische lijnen in dijken; daarom valt de daadwerkelijke uitwerking daarvan buiten dit onderzoek. Wel kunnen de schematisaties van hoogwatergolven gebruikt worden als invoer voor zijn onderzoek. Het onderzoek is algemeen toepasbaar op alle bovenrivieren in Nederland. Bij bovenrivieren zijn getijden niet van invloed op de rivieren.

Er is allereerst onderzoek gedaan naar enkele hoogwatergolven. Enkele hoogwatergolven kunnen herkend kunnen worden aan de hand van twee factoren: drempelwaarde en de minimaal benodigde piekafvoer. De drempelwaarde is de afvoer waarbij water van het zomerbed de uiterwaarden instroomt en dus de dijk zal belasten. Alle afvoermetingen van een hoogwatergolf dienen boven de drempelwaarde te liggen. Daarnaast dient elke hoogwatergolf een minimale piekafvoer te hebben, zodat het daadwerkelijk een effect kan hebben op de freatische lijn in de dijk.

Vervolgens is gekeken naar dubbele hoogwatergolven die een effect kunnen hebben op buitenwaartse macrostabiliteit. Bij een dubbele hoogwatergolf is bij de eerste hoogwatergolf sprake van een grote kans op een afschuiving. Deze afschuiving kan plaatsvinden door een snelle val (snelle val) van hoogwater. Vervolgens moet een tweede hoogwatergolf binnen de hersteltijd van een dijktraject komen.

Met behulp van dit deel van het onderzoek kan aan de hand van historische data worden bepaald of de kans op dijkfalen gegeven macro-instabiliteit daadwerkelijk conservatief is. Er is een schatting gemaakt van de ordegrootte van deze factor. Deze analyse of basis van de historische data geeft een indicatie van de ordegrootte, maar kan niet gebruikt worden om een exacte waarde te berekenen, omdat de steekproef te klein is.

De hoogwatergolven in dit onderzoek zijn ook gecategoriseerd in verschillende types. Aan de hand van deze analyse kan gekeken worden welke hoogwatergolven het meeste voorkomen. Dit is relevante informatie om een schatting te maken van hoe vaak buitenwaartse macrostabiliteit voorkomt.

In het onderzoek zijn een aantal aannames gedaan en onzekerheden meegenomen. In een gevoeligheidsanalyse is onderzocht wat het effect van veranderingen in deze onzekerheden op uitkomsten van het model is. Uiteraard zijn er ook nog voldoende andere verbeterpunten, waar verder onderzoek naar gedaan kan worden. De beperkingen van het onderzoek zijn opgenomen in de 'discussie' en de mogelijke verbeterpunten in de 'aanbevelingen.'

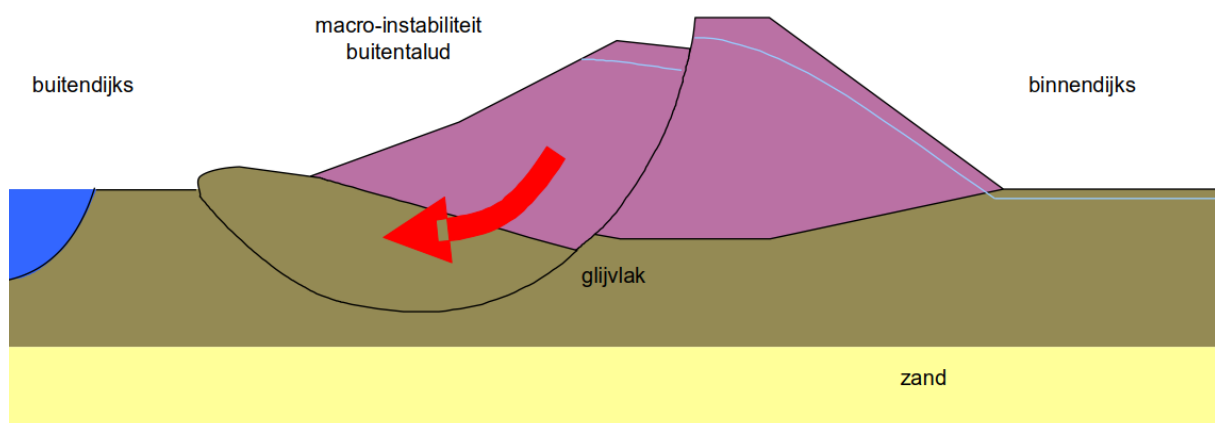
1. Inleiding

Buitenwaartse macrostabiliteit is een faalmechanisme dat zorgt voor instabiliteit van de dijk en kan daardoor leiden tot een overstroming. Het faalmechanisme van een dijk is de wijze waarop de constructie bezwijkt (Deltares, 2018) en macrostabiliteit buitenwaarts een specifieke manier waarop dat kan gebeuren. In dit hoofdstuk worden allereerst een aantal fundamentele begrippen voor dit onderzoek gedefinieerd. Vervolgens worden de aanleiding en het doel van het onderzoek beschreven. Daarnaast zal worden benoemd welke onderzoeksvragen beantwoord zullen worden en op welke manier dat globaal is aangepakt. In hoofdstuk 2 tot 5 van het verslag zal dieper ingegaan worden op de methodologie.

1.1. Proces macrostabiliteit buitenwaarts

Niet iedere instabiliteit hoeft direct te leiden tot verlies van het waterkerend vermogen van de dijk (ENW, 2007). Instabiliteit van het buitentalud valt niet samen met het optreden van hoogwater, omdat buitenwaartse macrostabiliteit (STBU) een indirect faalmechanisme is. Het is een indirect faalmechanisme, omdat hoogwater niet de directe oorzaak is van instabiliteit. Het optreden van buitenwaartse macrostabiliteit kan ontstaan door een waterstandsval (daling van de waterstand) na een hoogwatergolf. Op het moment van afschuiven is er dan geen sprake van hoogwater (ENW, 2007) en het falen van de waterkering zal daarom niet direct plaatsvinden. Het vergroot de kans op falen door een vervolgmecanisme wel (Ham, 2010).

Bij macrostabiliteit buitenwaarts, als gevolg van een lage waterstand voor de waterkering of extreme neerslag, in combinatie met andere belastingen, neemt de sterkte af. De sterkte is in feite de schuifweerstand van de grond. Als de sterkte onvoldoende is, kunnen grote delen van het grondlichaam langs glijvlakken afschuiven (Zwaneburg, et al., 2013). Voor de stabiliteit van het buitentalud is een ongunstige combinatie van hoge grondwaterstand (hoog freatisch vlak) in de dijk bij een snelle val van de buitenwaterstand vanaf maatgevend hoogwater of de situatie bij extreme neerslag, bepalend (Zwaneburg, et al., 2013). Het globale proces rondom macrostabiliteit buitenwaarts is weergegeven in het onderstaande figuur 1.



Figuur 1 - macrostabiliteit buitenwaarts ('t Hart, et al., 2016)

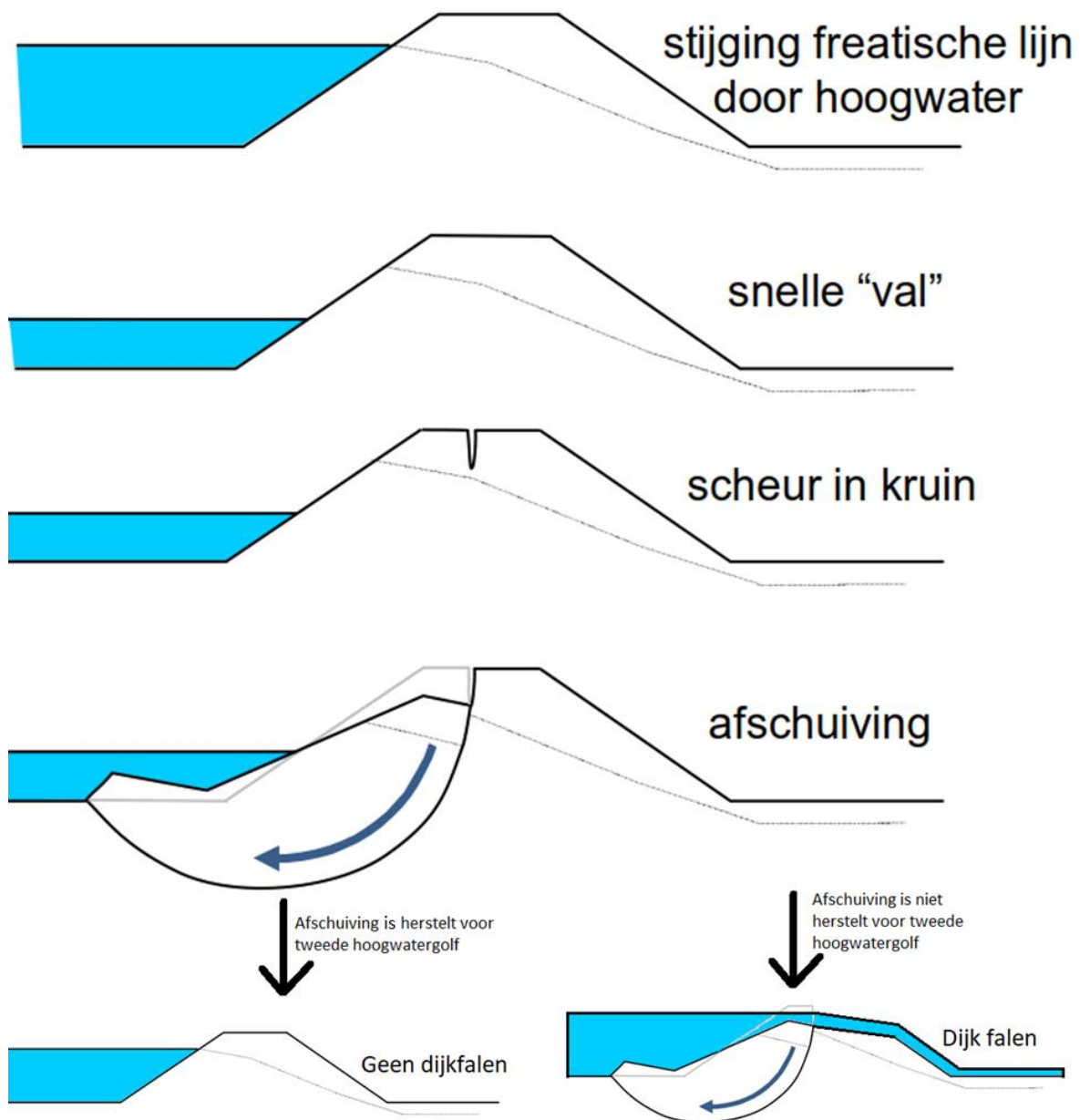
Het geïnfilterde water in de dijk wordt 'de freatische lijn' genoemd. Gedurende een hoogwatergolf stijgt de freatische lijn in de dijk, omdat water infiltreert via het buitentalud en via de ondergrond vanuit aanwezige tussenzandlagen ('t Hart, et al., 2016). De freatische lijn zou ook kunnen stijgen door extreme neerslag. In de beoordeling van macrostabiliteit wordt aangenomen, dat er geen verband bestaat tussen het optreden van een hoogwatergolf en het optreden van extreme neerslag.

Als de freatische lijn stijgt, zal de waterspanning toenemen en als gevolg daarvan, de schuifsterkte van de ondergrond afnemen ('t Hart, et al., 2016). Hierdoor neemt de stabiliteit van de dijk af. Tijdens een hoogwatergolf is de kans van optreden van buitenwaartse macrostabiliteit erg gering, omdat het hoge water tegen de buitenzijde van de dijk een tegenwerkend moment levert, waardoor de waterkering in evenwicht blijft.

De stabiliteit van de dijk komt pas in gevaar wanneer er een zogenaamde 'val' optreedt van de buitenwaterstand ('t Hart, et al., 2016). De buitenwaterstand daalt dan dusdanig snel, dat de freatische lijn niet voldoende tijd heeft om te volgen. Doordat de freatische lijn nog hoog is, is de schuifsterkte in de verzadigde dijk nog relatief laag. Daarnaast is het tegenwerkende moment van de buitenwaterstand plotseling verdwenen. Ook draagt het relatief hoge gewicht van de verzadigde grond in het dijklichaam bij aan het aandrijvend moment. Hierdoor kan het buitentalud afschuiven.

Vanwege het feit dat macrostabiliteit buitenwaarts vaak optreedt na een val van hoogwater, zorgt een afschuiving meestal niet voor het verlies van de waterkerende functie van de dijk. In de meeste gevallen is er tijd om de schade te herstellen voordat een tweede hoogwatergolf zich voordoet ('t Hart, et al., 2016).

Als een buitenwaartse afschuiving plaatsvindt, zullen er eerst scheuren ontstaan in het buitentalud, binnentalud of in de kruin van dijk. De eerste scheur van een afschuiving wordt het intredepunt genoemd. Daarna zal het maaiveld aan de buitendijkse zijde van de scheur verzakken, waarna de eigenlijke afschuiving plaatsvindt ('t Hart, et al., 2016). Het proces waarbij een afschuiving en dijkfalen plaats kan vinden als gevolg van macrostabiliteit buitenwaarts is weergegeven in het onderstaande figuur 2.



Figuur 2 - proces buitenwaartse macrostabiliteit ('t Hart, et al., 2016)

De belangrijkste factoren, die van belang zijn voor het optreden en de snelheid van een afschuiving van het buitentalud, zijn de dijkgeometrie, de waterspanningen en de opbouw van de ondergrond ('t Hart, et al., 2016). De factoren, die invloed hebben op verschillende verzetten van macrostabiliteit buitenwaarts, zijn hieronder weergegeven. Deze factoren komen overeen met de factoren die binnenwaartse macrostabiliteit veroorzaken (van Montfoort, 2018).

- **Initiatie**
 - Freatisch vlak in de dijk en de stijghoogte in de ondergrond zullen tijdens hoogwater stijgen als gevolg van infiltratie via het buitentalud van de dijk en infiltratie via de ondergrond. Deze processen zorgen voor het verhogen van de waterspanningen in de dijk en de ondergrond ('t Hart, et al., 2016). Het freatische vlak kan tevens ook verhoogd worden door neerslag.
 - Toename van waterspanning zorgt voor een afname in effectieve spanningen ('t Hart, et al., 2016).

- De stabiliteit van het dijklichaam neemt af.
- Dijken met voorland hebben een kleinere kans op buitenwaartse macrostabiliteit. Een voorland zorgt namelijk voor een extra tegenwerkend moment in het geval van evenwichtsverlies ('t Hart, et al., 2016).
- Scheurvorming
 - Wanneer de schuifsterkte, die de grond in de dijk en in de ondergrond kan mobiliseren, onvoldoende is, zal een instabiliteit optreden ('t Hart, et al., 2016).
 - Een beginnende instabiliteit manifesteert zich met deformaties, die pas zichtbaar worden als er scheuren optreden in het buitentalud, binnentalud of kruin van de dijk. Deze scheuren worden het intredepunt genoemd.
 - Het ontstaan van de scheur hangt af van de materiaaleigenschappen van de topklaag. De tijd tussen het ontstaan van een scheur en de volledige afschuiving zal bij een zandige dijk korter zijn dan bij een kleiige dijk (van Montfoort, 2018).
 - Niet alle scheuren leiden tot een afschuiving. De scheuren kunnen vaak gerepareerd worden voordat een afschuiving plaatsvindt.
- Afschuiving
 - Een afschuiving kan zich binnen enkele uren tot enkele dagen voltrekken (van Montfoort, 2018). De eerste uren gaat het afschuiven snel en vervolgens steeds langzamer.
 - Na het afschuiven is er sprake van een nieuwe evenwichtssituatie, waarbij het kernmateriaal van de dijk niet meer afgedekt is door de bekleding. Hierdoor kan dijkfalen optreden.

1.2. Aanleiding

Het optreden van buitenwaartse macrostabiliteit wordt berekend op basis van de overstromingskansnorm. De overstromingskansnormen uit de Waterwet (2009) hebben betrekking op de 'kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor het door het dijktraject beschermde gebied zodanig overstroomt, dat dit leidt tot dodelijke slachtoffers of substantiële economische schade' (Waterwet, 2009). Dit betekent dat een waterkering pas 'faalt' door macrostabiliteit buitenwaarts als daadwerkelijke schade is aan het achterland. Een dijk kan echter ook schade oplopen door een afschuiving van het buitentalud zonder dat er vervolgens een overstroming optreedt in de zin van de Waterwet. De normen uit de Waterwet hebben geen betrekking op de kans op schade van de dijk (Jongejan, 2019). Vanuit economisch perspectief mag de kans op schade aan de dijk ook vele malen groter zijn dan de kans op een overstroming (Jongejan, 2019).

Dijk falen door buitenwaartse macrostabiliteit treedt op wanneer er na een afschuiving - die vaak het gevolg is van een snelle val van hoogwater - binnen de hersteltijd van een dijktraject een tweede hoogwatergolf optreedt. Omdat macrostabiliteit een indirect faalmechanisme is, is er bij de beoordeling van macrostabiliteit van het buitentalud een nuancering mogelijk.

De faalkanseis voor macrostabiliteit buitenwaarts wordt daarom gelijk genomen aan 10 maal die voor macrostabiliteit binnenwaarts (STBI). De faalkanseis voor STBU is minder streng dan voor STBI, omdat STBI vaak wel optreedt in combinatie met een hoge buitenwaterstand. Wanneer er dus sprake is van een binnenwaarts instabiliteit en een afschuiving optreedt, zal de dijk falen. Bij buitenwaartse macrostabiliteit is dit niet het geval. De overige parameters voor het bepalen van de faalkanseis voor macrostabiliteit buitenwaarts zijn gelijk aan die voor macrostabiliteit binnenwaarts (WBI, 2016). De faalkanseis wordt uiteindelijk gebruikt om de minimaal vereiste stabiliteitsfactor voor macrostabiliteit buitenwaarts te berekenen (Maris, 2019).

De faalkanseis wordt bepaald aan de hand van de volgende formule (WBI, 2016):

$$P_{eis,dsn} = \frac{f \times P_{norm}}{\left(1 + \frac{a \times L}{b}\right) \times P_{f|inst}} \quad \text{Formule 1}$$

Waarin:

- $P_{eis,dsn}$ Faalkanseis voor buitenwaartse macrostabiliteit in een doorsnede [per jaar].
- f Faalkansruimtefactor voor macrostabiliteit [-] (met waarde 0,04 = faalkansbudget voor STBU)
- P_{norm} Overstromingskans voor het dijktraject [per jaar]
- a constante met waarde 0,033 [-]
- L Totale lengte van het dijktraject [m]
- b Representatieve lengte voor analyse in een doorsnede [m]
- $P_{f|inst}$ Kans op falen gegeven instabiliteit [-]

Deze factor 10 in de faalkanseis voor STBU staat bekend als de schadefactor voor buitenwaartse stabiliteit. Deze schadefactor is niet onderbouwd met empirische data (STOWA, 2015). De voorwaardelijke kans op overstromingen gegeven buitenwaartse macrostabiliteit is gelijk aan de 1/schadefactor. In dit geval is de voorwaardelijke overstromingskans dus 0,1. Dit wordt aangeduid door $P_{f|inst}$ in de formule.

In de ‘Redeneerlijn buitenwaartse stabiliteit (STBU)’ wordt voorgesteld om de voorwaardelijke overstromingskans van een dijkdoorsnede na een buitenwaartse afschuiving gelijk te stellen aan 0,01 (Waterschap Rivierenland, 2018). Hiermee wordt afgeweken van de grondslagen van de overstromingskansbenadering, waarbij de voorwaardelijk overstromingskans dus gelijk is aan 0,1 (STOWA, 2015). Binnen de overstromingskansbenadering is deze kans een subjectief waarschijnlijkheidsoordeel (ENW, 2017). De aanname dat de voorwaardelijke overstromingskans gelijk is aan 0,1 wordt gezien als conservatief (Risicobenadering Kennisplatform, 2018). Op basis van een conservatieve analyse kan onmogelijke worden gesteld dat een overstromingskansnorm wordt overschreden. Uiteraard kan wel worden bewezen dat een norm wordt onderschreden. De overstromingskansnormen zijn gebaseerd op het idee dat parameters geen onnodige conservatieve aannames bevatten (Jongejan, 2019). Daarom dient er te worden aangetoond of de voorwaardelijke overstromingskans uit de overstromingskansbenadering daadwerkelijk conservatief is.

De voorwaardelijke overstromingskans is gerelateerd aan het voorkomen van hoogwatergolven. Voor een overstroming moet er eerst een afschuiving plaatsvinden. Dit kan veroorzaakt worden door een val van hoogwater en is dus gerelateerd aan de vorm van een hoogwatergolf. De vorm van de hoogwatergolven heeft namelijk een significant effect op de manier waarop water infiltreert in de dijk. Dit wordt ook wel de freatische lijn genoemd (Risicobenadering Kennisplatform, 2018). Als kort nadat er een afschuiving plaats heeft gevonden, sprake is van een tweede hoogwatergolf, dan is er een risico voor falen door STBU. Het is echter niet bekend hoe vaak zulke dubbele hoogwatergolven voorkomen. Op basis van dit gegeven kan er wellicht worden bevestigd dat de voorwaardelijke overstromingskans conservatief is.

1.3. Doel

Het doel van het onderzoek is om, met behulp van historische data en representatieve schematisaties van verschillende types hoogwatergolven, te controleren of de hypothese dat de voorwaardelijke overstromingskans, die momenteel 10% is, daadwerkelijk conservatief is of niet.

Het doel is niet om een nieuwe kans voor te stellen, want omdat gebruik wordt gemaakt van historische data, is er een grote statische onzekerheid. Wel zal een indicatie van de ordegrrootte gegeven worden.

1.4. Onderzoeksvragen

Om het doel van het onderzoek te bereiken, is er aan het begin van het onderzoekstraject een onderzoeksvraag opgesteld: *wat zijn schematisaties van verschillende types hoogwatergolven, representatief voor de kans op falen met betrekking tot buitenwaartse macro (in)stabiliteit?*

Deze hoofdvraag is opgedeeld in verschillende deelvragen, om het onderzoek meer behapbaar te maken. De deelvragen zijn als volgt:

1. *Op welke manier kunnen enkele hoogwatergolven, die relevant zijn voor buitenwaartse macrostabiliteit, geïdentificeerd worden in historische afvoermetingen?*
2. *Hoe kunnen representatieve schematisaties van verschillende types enkele hoogwatergolven worden opgesteld?*
 - a. *Wat zijn de gekwantificeerde definities van een langzame, gemiddelde en snelle stijging bij een enkele hoogwatergolf? En van een langzame, gemiddelde en snelle val?*
3. *Wanneer de schematisaties van deelvraag twee vergeleken worden met de historische data, welke type enkele hoogwatergolf komt het meeste voor?*
4. *Wat zijn de eigenschappen van dubbele hoogwatergolven, die dijkfalen, als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit, kunnen veroorzaken?*
 - a. *Hoe vaak komt van een enkele hoogwatergolf, die instabiliteit kan veroorzaken, voor in de historische data?*
 - b. *Hoe vaak is er sprake van een dubbele hoogwatergolf, die dijkfalen, als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit, kan veroorzaken?*
 - c. *Wat is een goede schatting van de kans op dijkfalen gegeven instabiliteit op basis van historische data?*

1.5. Locatie

Het onderzoek is representatief voor het bovenrivierengebied in Nederland. De bovenrivier is het gedeelte van een rivier waarop de invloeden van eb en vloed niet meer merkbaar zijn. Het grootste deel van het water in de Nederlandse rivieren komt Nederland binnen via de Rijn bij Lobith. Omdat de metingen van dit meetstation relevant zijn voor bijna alle rivieren in Nederland – met uitzondering van de Maas – worden de data van dit meetstation gebruikt in het onderzoek.

1.6. Globale methodologie

De globale methodologie van het onderzoek per onderzoeksvraag is hieronder weergegeven. In de hierop volgende hoofdstukken zal de methodologie uitgebreider omschreven worden.

1. Er is literatuuronderzoek gedaan naar de eigenschappen van enkele hoogwatergolven. Vervolgens is deze informatie gebruikt in het maken van een model om automatisch enkele hoogwatergolven uit historische afvoerreksen te filteren. Dit model is gebouwd in Matlab.
2. De definities van langzame, gemiddelde en snelle vallen en stijgingen van hoogwater zijn ook afgeleid aan de hand van een literatuuronderzoek. In Excel zijn er representatieve schematisaties van verschillende types hoogwatergolven opgesteld, aan de hand van de definities van deelvraag drie.
3. De representatieve schematisaties zijn geïmporteerd in het model van deelvraag één. Het model is vervolgens uitgebreid om elke enkele hoogwatergolf een type toe te kennen. Als gevolg hiervan, kan er worden gesteld welk type hoogwatergolf het meeste voorkomt.

4. Er is literatuuronderzoek gedaan naar de eigenschappen van dubbele hoogwatergolven, die betrekking kunnen hebben op buitenwaartse macrostabiliteit. Daarnaast zijn er vragen gesteld aan een dijkbeheerder over het herstelproces nadat een afschuiving heeft plaatsgevonden. Ook deze informatie is geïmplementeerd in hetzelfde script als dat van de enkele hoogwatergolven en de verschillende types hoogwatergolven. Op deze wijze kunnen dubbele hoogwatergolven die buitenwaartse macrostabiliteit kunnen veroorzaken herkend worden in de historische data. Uiteindelijk kan er op deze wijze ook een schatting worden gemaakt van de kans op falen gegeven macrostabiliteit. Er kan aangetoond worden of de huidige kans daadwerkelijk conservatief is of niet.

2. Kenmerken van enkele hoogwatergolven

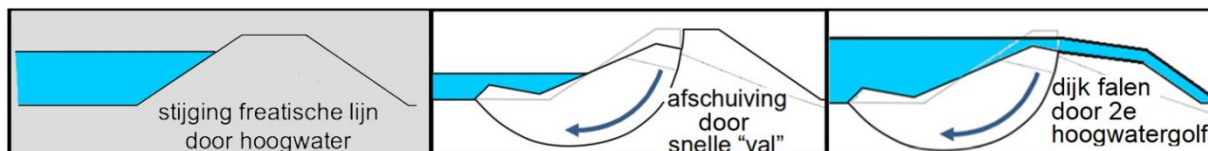
In dit hoofdstuk zal er aandacht worden geschonken aan de beantwoording van de eerste deelvraag:

Deelvraag 1: Op welke manier kunnen enkele hoogwatergolven, die relevant zijn voor buitenwaartse macrostabiliteit, geïdentificeerd worden in historische afvoermetingen?

Het waterschap Peel en Maasvallei (2017) omschrijft een hoogwatergolf als tijdelijk verhoogde waterstanden in een rivier door een vergrote rivierafvoer. Met deze definitie kunnen hoogwatergolven echter nog niet in dataserieën worden herkend. Daarvoor moeten de onderstaande criteria worden vastgesteld:

- De minimale rivierafvoer bij Lobith die overschreden wordt als er een hoogwatergolf optreedt. Dit wordt de drempelwaarde genoemd (Trul, 2016).
- De rivierafvoer bij Lobith die ten minste een keer bereikt wordt als er een hoogwatergolf optreedt. Dit wordt de piekafvoer genoemd.

De hoogwatergolven, zoals hierboven gedefinieerd, zorgen voor een stijging van de freatische lijn. Hierdoor zullen de waterspanningen in de dijk toenemen en dit zou uiteindelijk kunnen leiden tot buitenwaartse macro-instabiliteit van de dijk. Dit is weergegeven in het onderstaande stroomschema in figuur 3:



Figuur 3 - stroomschema STBU, stijging freatische lijn door hoogwater

2.1. Drempelwaarde

Bij een bepaalde afvoer is er sprake van een hoogwatergolf. Daarom is er voor gekozen om alle afvoerwaarden boven een drempelwaarde in eerste instantie onderdeel te laten zijn van een afvoergolf. Om het onderzoek algemeen toepasbaar te maken, moet er op een logische wijze een drempelwaarde worden geselecteerd. Een laagland rivier stroomt het grootste gedeelte van het jaar door het zomerbed en dus zullen de dijken, grenzend aan het winterbed niet belast worden. Echter, bij hoge afvoeren stromen de uiterwaarden van de rivier mee. Een logische drempelwaarde zou dus de afvoer zijn waarbij inundatie (onderwaterzetting) van de uiterwaarden plaatsvindt, omdat afvoeren boven deze waarde invloed hebben op de dijk.

Voor de Rijn bij Lobith is de drempelwaarde $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Walker, 1993). Trul (2016) geeft echter het advies om een iets lagere waarde aan te nemen, omdat niet alle bovenstroomse deelstroomgebieden uiterwaarden hebben. Hij stelt voor om een afvoer, die statistisch gezien 5% van de tijd overschreden wordt, te gebruiken als drempelwaarde. Voor de Rijn bij Lobith is deze waarde $4545 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.2. Piekafvoer

Elke hoogwatergolf heeft een piekafvoer. Bij de piekafvoer is de gemeten afvoer het grootste. Trul noemt deze factor niet als een maatgevende factor voor het identificeren van enkele hoogwatergolven. Vanuit het oogpunt van buitenwaartse macrostabiliteit is het wel relevant dat deze factor wordt gezien als maatgevend, omdat water moet infiltreren in de dijk om bij te dragen aan het faalmechanisme. Wanneer water niet of nauwelijks infiltreert in de dijk, zullen de freatische lijn en waterspanningen in de dijk niet veranderen en zal buitenwaartse macrostabiliteit niet aan de orde zijn.

Kortom, een hoogwatergolf heeft een bepaalde duur en minimale hoogte (piekafvoer) om te kunnen bijdragen aan STBU.

In een rapport van Deltares, door Chbab (2017), zijn de herhalingstijden voor bepaalde debieten (afvoeren) bij Lobith gegeven. De laagste herhalingstijd in tabel 2.7 van dit rapport is twee jaar, en omdat het wenselijk is om zoveel mogelijk hoogwatergolven te identificeren, wordt de afvoer die bij deze herhalingstijd hoort, gebruikt als piekafvoer. Deze afvoer is 5940 m³/s (Chbab, 2017). Dit is de minimale piekafvoer voor hoogwatergolven bij Lobith.

2.3. Enkele hoogwatergolven selecteren

Aan de hand van de bovenstaande definities zijn hoogwatergolven uit de historische data gehaald. De gefilterde data is vervolgens geanalyseerd om de nauwkeurigheid van de methode te bepalen. De volgende data zijn beschikbaar:

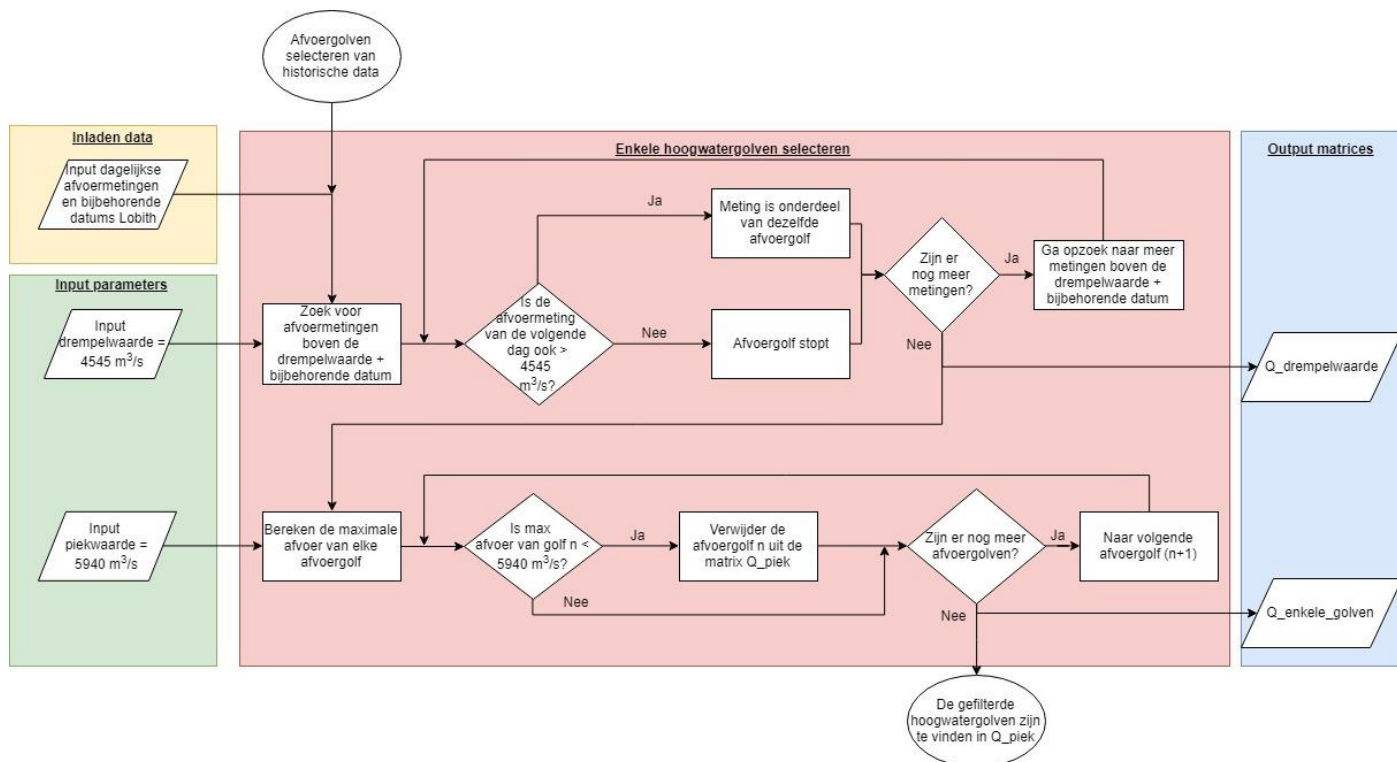
Tabel 1 - beschikbare data (Rijkswaterstaat, 2019)

Locatie	Eenheid	Tijdsperiode	Frequentie van metingen
Lobith	Waterhoogte	01-01-1901 – 31-12-1988	Dagelijks
		01-01-1989 – 24-10-1996	Geen data
		25-10-1996 – 31-12-2012	Elke uur
		01-01-2013 – heden	Elke 10 minuten
	Afvoer	01-01-1901 – 31-12-1988	Dagelijks
		01-01-1989 – 24-10-1996	Geen data
		25-10-1996 – 31-12-2012	Elke uur
		01-01-2013 – heden	Elke 10 minuten

Zoals blijkt uit de bovenstaande tabel 1 zijn data tussen 1989 en 1996 niet beschikbaar. Voor de uniformiteit van de data, is het gemiddelde van elke dag berekend voor de data vanaf 1996 tot heden. Dit is uitgevoerd met Excel.

De data uit tabel 1 zijn geïmporteerd in Matlab. Er is een script geschreven om automatisch hoogwatergolven te herkennen, aan de hand van de twee bovengenoemde factoren. Eerst worden alle afvoerwaarden boven de drempelwaarde geselecteerd. Aaneengesloten meetreeksen boven de drempelwaarde zijn onderdeel van dezelfde afvoergolf. Vervolgens wordt per afvoergolf de piekafvoer berekend. Wanneer de piekafvoer van een golf boven de minimale piekafvoer is, dan wordt de afvoergolf opgeslagen en geïdentificeerd als een enkele hoogwatergolf. Dit is geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld, die is weergegeven in bijlage A.

Er zijn uiteindelijk negentig enkele hoogwatergolven geïdentificeerd in de historische data tussen 1901 en 2019. De onderstaande flowchart in figuur 4 geeft een overzicht van alle stappen die worden genomen in het Matlab script:



Figuur 4 - flowchart enkele hoogwatergolven

De stappen in de bovenstaande script zijn allemaal geïmplementeerd in een Matlab script. Het script is te vinden in bijlage F. De delen 'enkele hoogwatergolven selecteren (drempelwaarde)' en 'enkele hoogwatergolven selecteren (piekwaarde)' gaan over de identificatie van enkele hoogwatergolven zoals geïllustreerd in de flowchart in figuur 4.

2.4. Conclusie

In dit hoofdstuk is er aandacht geschonken aan de beantwoording van de eerste deelvraag:

Deelvraag 1: Op welke manier kunnen enkele hoogwatergolven, die relevant zijn voor buitenwaartse macrostabiliteit, geïdentificeerd worden in historische afvoermetingen?

De enkele hoogwatergolven die relevant zijn voor STBU zijn geïdentificeerd in historische afvoermetingen met behulp van een Matlab script. In dit Matlab script wordt er gekeken of een bepaalde afvoerreeks voldoet aan twee criteria:

- 1) Alle afvoermetingen moeten boven de drempelwaarde zijn.
- 2) De hoogste afvoermeting van een aaneensloten reeks afvoermetingen boven de drempelwaarde moet boven de minimaal benodigde piekafvoer liggen.

Als een reeks afvoermetingen voldoet aan deze voorwaarden, dan wordt het bestempeld als een enkele hoogwatergolf. Op deze wijze zijn er 90 enkele hoogwatergolven gevonden in de historische data van het meetstation bij Lobith.

3. Verschillende types enkele hoogwatergolven

In dit hoofdstuk wordt beoordeeld welke enkele hoogwatergolven een afschuiving kunnen veroorzaken en dus relevant zijn voor het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts. Daarvoor is het zeer interessant en relevant een grondige analyse te doen naar de verschillen tussen bepaalde hoogwatergolven. In dit hoofdstuk zal er aandacht worden geschonken aan de beantwoording van de deelvragen twee en drie:

Deelvraag 2: Hoe kunnen representatieve schematisaties van verschillende types enkele hoogwatergolven worden opgesteld?

a. Bij een enkele hoogwatergolf, wat zijn de gekwantificeerde definities van een langzame, gemiddelde en snelle stijging? En van een langzame, gemiddelde en snelle daling?

Deelvraag 3: Wanneer de schematisaties van deelvraag twee vergeleken worden met de historische data, welke type enkele hoogwatergolf komt het meeste voor?

In dit hoofdstuk zullen de hoogwatergolven worden ingedeeld in verschillende types. Eerst zullen er standaard representatieve schematisaties van hoogwatergolven worden opgesteld, die gebruikt zullen worden als basis van deze indeling. Deze schematisaties kunnen vervolgens ook gebruikt worden als invoergegevens voor berekeningen met betrekking tot buitenwaartse macrostabiliteit.

3.1. Verschillende golfvormen

Bij bovenrivieren wordt er onderscheid gemaakt tussen drie verschillende golfvormen: een smalle, een gemiddelde en een brede golfvorm. Deze verschillende golfvormen vormen de basis voor de verschillende types hoogwatergolven. Het gemiddelde waterstandsverloop kan worden afgeleid van de waterstandsverloop tool van Hydra-NL. De representatieve brede en de smalle golven kunnen worden verkregen door helling van de voor- en achterflank van de gemiddelde golf met juiste factoren te vermenigvuldigen. De voorflank loopt van de drempelwaarde tot de piekwaarde en de achterflank van de piekwaarde tot de drempelwaarde. Voor de Rijn worden de volgende factoren gebruikt (Geerse, et al., 2007):

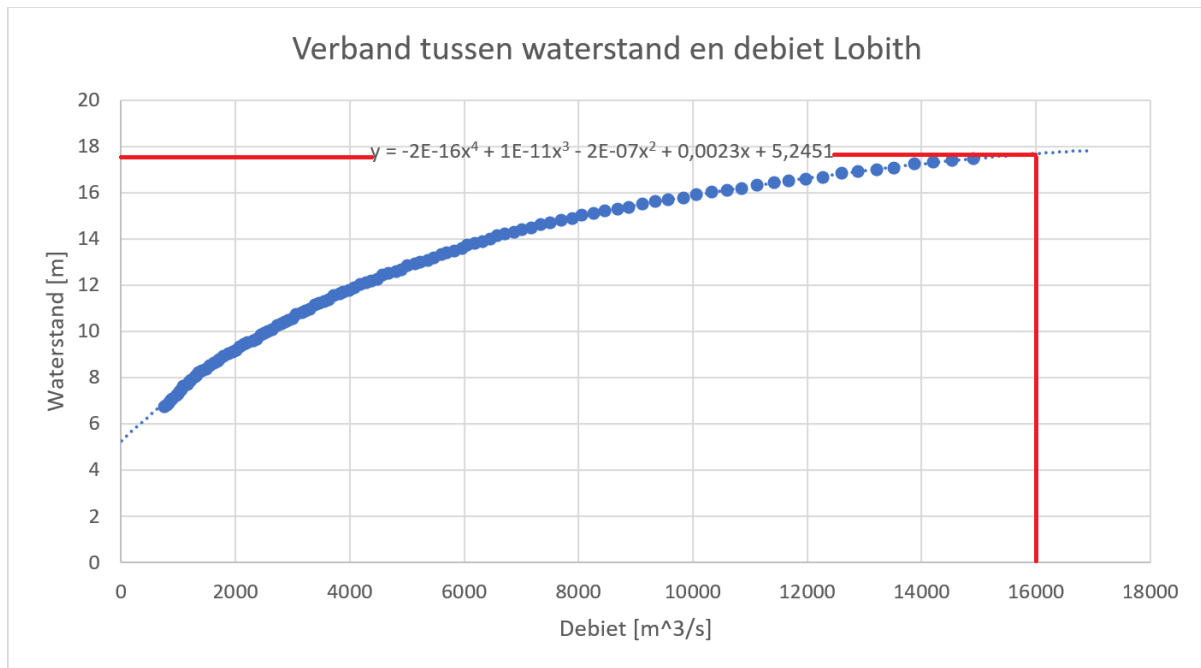
- Smalle golf Voorflank * 0.6
 Achterflank * 0.8
- Brede golf Voorflank * 1.4
 Achterflank * 1.5

Uit een analyse van Geerse (2005) blijkt dat deze factoren op enigszins pragmatische wijze zijn bepaald. Ze hebben namelijk alleen betrekking op tijdsverlopen van debieten in plaats van waterstanden. Op basis van een gevoeligheidsanalyse concludeert Geerse (2005) echter dat hij de factoren wel voldoende nauwkeurig acht om ook voor verlopen van waterstanden te gebruiken.

Bij Lobith dient de uit Hydra-NL afkomstige maatgevende afvoergolf, met piekwaarde 16000 m³/s als uitgangspunt (Geerse C. , 2005). Golven met een andere piekwaarde worden hieruit geconstrueerd door een verticale vermenigvuldiging. Stel bijvoorbeeld dat een golf een piekwaarde heeft van 12000 m³/s. De afvoer op ieder tijdstip wordt dan vermenigvuldigd met 12000/160000. De minimale afvoer waarop dit kan worden toegepast is 2450 m³/s (Geerse C. , 2005). Dit is tevens de gemiddelde Rijnaafvoer in winterhalfjaren.

3.2. Van afvoeren naar waterstanden

De maatgevende afvoer is dus 16000 m³/s. Echter, om het waterstandsverloop te bepalen is er een maatgevende waterstand, waarbij de maatgevende afvoer optreedt, nodig. Deze maatgevende waterstand wordt ook wel het toetspeil genoemd. Het toetspeil is de waterstand die wordt gebruikt voor het beoordelen van de toestand van waterkeringen, met overschrijdingsfrequentie conform de waterwet en is dus de waterstand, als een afvoer van 16000m³/s wordt gemeten bij Lobith. De helpdesk water levert een Excel bestand met de debieten bij Lobith en de bijbehorende waterhoogtes van verschillende meetstations in Nederland, waaronder Lobith (2010). Het maximale debiet in dit bestand is 14889 m³/s. De data is geëxtrapoleerd om de waterstand bij een debiet van 16000 m³/s (zie figuur 5).



Figuur 5 - verband tussen waterstand en afvoer bij Lobith

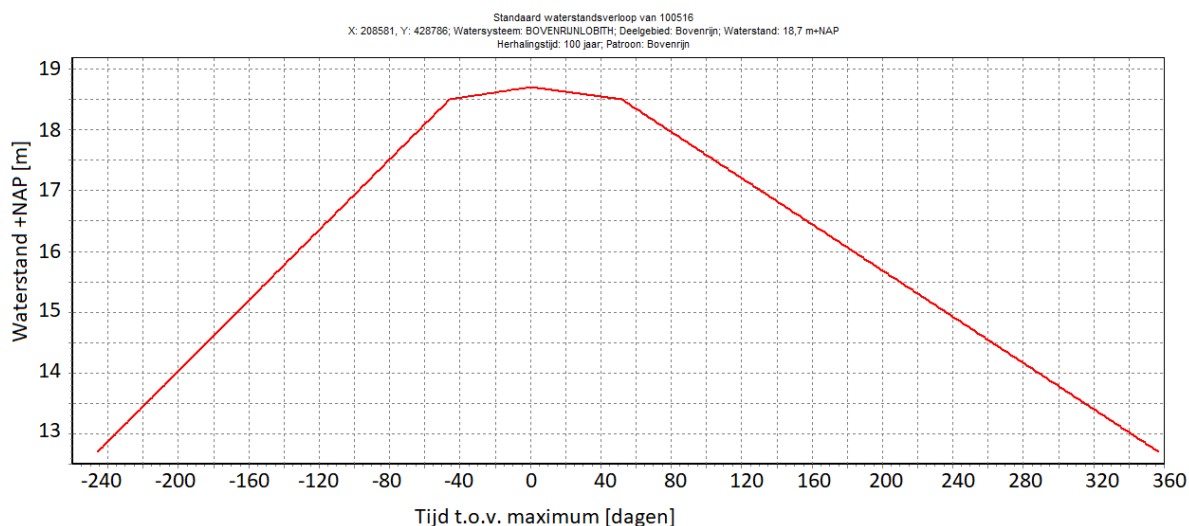
Om waterstanden aan bepaalde debieten te koppelen bij Lobith geldt de vierde graads polynoom:
$$y = (-2 * 10^{-16})x^4 + (10^{-11}x^3) - (2 * 10^{-7})x^2 + 0.0023x + 5.2451$$

Deze polynoom is afgeleid door Excel: de formule van de trendlijn (stippellijn in figuur 5) is automatisch afgeleid. Aan de hand van deze formule is de het toetspeil (debiet van 16000 m³/s) 18,7 meter +NAP. De drempelwaarde wordt bereikt bij een waterstand van 12,42 m +NAP.

Daarnaast wordt deze empirische formule gebruikt in het Matlab script om de vertaalslag van afvoeren naar waterstanden te maken. In het script worden namelijk afvoergegevens bij Lobith gebruikt.

3.3. Schematisaties van verschillende golfvormen

De standaard waterstandsverloop curve, met een piekwaarde die gelijk is aan het toetspeil, is weergegeven in het onderstaande figuur 6 (WBI, 2017):



Figuur 6 - gemiddeld waterstandsverloop bij Lobith

De grafiek in figuur 6 bestaat uit vier rechte lijnen. Om de helling van een rechte lijn te bepalen, moeten de x- en y-coördinaten van twee snijpunten van de lijn worden afgelezen. De benodigde coördinaten, om de hellingen van de lijnen te bepalen, zijn uit de grafiek afgelezen en weergegeven in tabel 2 bij de gemiddelde golf. De tijd ten opzichte van het maximum is vermenigvuldigd met de bovengenoemde factoren om de smalle en brede golfvormen op te stellen. De hellingen van de lijnen veranderen in dezelfde verhouding.

Tabel 2 - coördinaten verschillende golfvormen

	Tijd t.o.v. maximum [uren]				
Waterstand [m]	13,5	18,5	18,7	18,5	13
Gemiddelde golf	-220	-45	0	52	340
Smalle golf	-144	-28,8	0	57,6	284,8
Brede golf	-336	-67,2	0	108	534

Aan de hand van tabel 2 en met behulp van Matlab zijn gemiddelde hellingen van de verschillende golfvormen berekend. Deze hellingen gelden alleen voor het toetspeil en kunnen worden vertaald naar hoogwatergolven met andere piekwaarden zoals eerder in deze paragraaf is beschreven. De helling staan in de onderstaande tabel 3:

Tabel 3 - hellingen van verschillende golfvormen

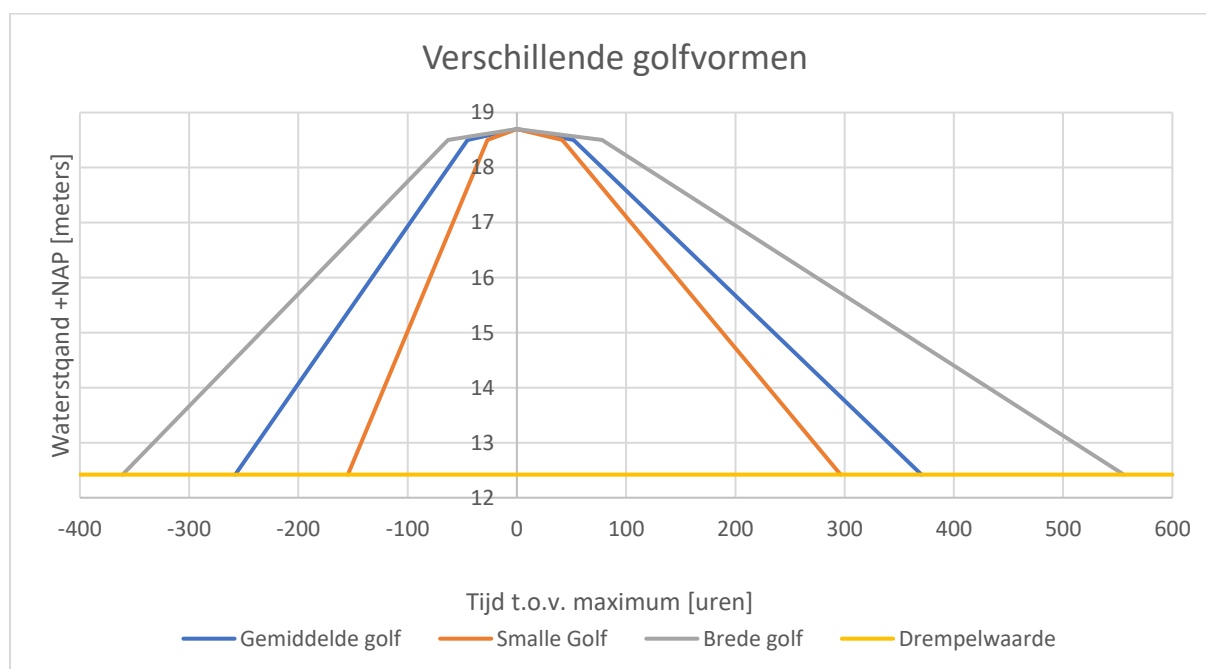
	Helling Voorflank [m/dag]	Helling Achterflank [m/dag]
Small	1.14	-0.57
Gemiddeld	0.69	-0.46
Breed	0.49	-0.31

Hoogwatergolven uit de historische data kunnen nog niet geclassificeerd worden met enkel de gegevens van de hellingen uit tabel 3. De intervallen van de verschillen zullen bepaald worden om dit mogelijk te maken. De hellingen uit tabel 3 worden beschouwd als de gemiddelde van de verschillende intervallen. De begrenzings van de intervallen zijn de gemiddelden van hellingen van de golfvormen die op de grens liggen. De intervallen zijn weergegeven in de onderstaande tabel 4. m is de helling.

Tabel 4 - intervallen van hellingen van verschillende golfvormen

	Interval Helling Voorflank [m/dag]	Interval Helling Achterflank [m/dag]
Small	$m > 0.91$	$m < -0.52$
Gemiddeld	$0.91 \geq m > 0.59$	$-0.52 \leq m < -0.38$
Breed	$m \leq 0.59$	$m \geq -0.38$

Met behulp van Excel zijn er rechte lijnen getrokken tussen de coördinaten uit tabel 2 en dat resulteert in het onderstaande figuur 7:



Figuur 7 - verschillende golven vormen

Een snelle val van hoogwater treedt op wanneer de tijd tussen de piekwaarde en de drempelwaarde (4545 m³/s bij Lobith (helpdesk water, 2010)) tien dagen of minder is (Ministerie van verkeer en waterstaat, 2007). Er wordt aangenomen dat er een afschuiving plaatsvindt als een snelle val van hoogwater optreedt (zie paragraaf 4.1). Met behulp van de empirische Q-h relatie blijkt dat de waterstand bij de drempelwaarde is 12,36 meter +NAP. Deze waterstand wordt aangeduid met de gele lijn in figuur 7. De snijpunten met deze gele lijn zijn weergegeven in tabel 5. Dit is de tijd tussen het maximum en de drempelwaarde.

Tabel 5 - tijd tussen drempelwaarde en piekwaarde voor verschillende golfvormen

Golftype	Tijd van drempel- tot piekwaarde (voorflank) [uren]	Tijd van piek- tot drempelwaarde (achterflank) [uren]
Smal	155	296
Gemiddeld	258	370
Breed	361	556

Hoogwatergolven met een snelle val van hoogwatergolven, waarbij een afschuiving plaats zou kunnen vinden, hebben dus een smalle achterflank. Voor het toetspeil is het criterium voor een snelle val van hoogwater (val van hoogwater binnen 10 dagen, of dus 240 uur (Ministerie van verkeer en waterstaat, 2007)) strenger dan het criterium voor een smalle achterflank (val van hoogwater binnen 296 uur).

3.4. Verschillende types enkele hoogwatergolven

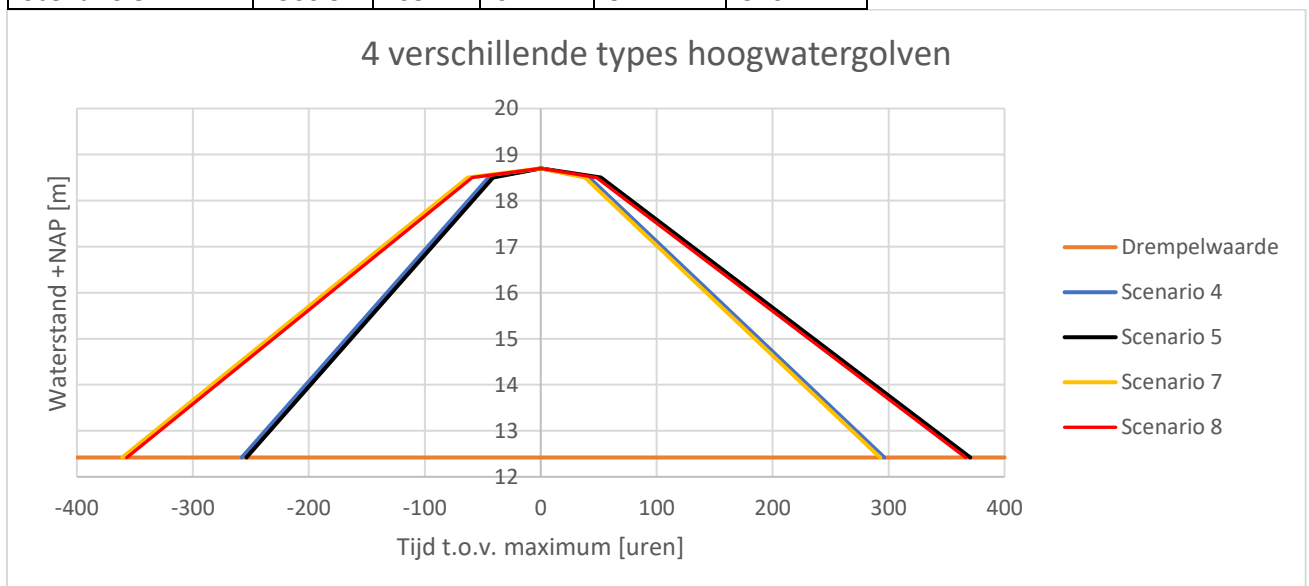
Aan de hand van de gegevens uit figuur 7 en tabel 2, kunnen de definities van langzame, gemiddelde en snelle stijgingen en vallen worden gekwantificeerd. Er kunnen verschillende combinaties worden gemaakt van voor- en achterflanken voor de schematisaties van representatieve types hoogwatergolven. Er kunnen in totaal negen combinaties worden gemaakt:

1. Combinatie van een snelle stijging en een snelle val.
2. Combinatie van een snelle stijging en een gemiddelde val;
3. Combinatie van een snelle stijging en een langzame val;
4. **Combinatie van een gemiddelde stijging en een snelle val;**
5. **Combinatie van een gemiddelde stijging en een gemiddelde val;**
6. Combinatie van een gemiddelde stijging en een langzame val;
7. **Combinatie van een langzame stijging en een snelle val;**
8. **Combinatie van een langzame stijging en een gemiddelde val;**
9. Combinatie van een langzame stijging en een langzame val;

De vier scenario's die vetgedrukt zijn, zijn het meest interessant om te bestuderen, omdat ze in theorie zowel een grote kans op voorkomen, als een groot risico op buitenwaartse macrostabiliteit hebben. De coördinaten waartussen de rechte lijnstukken liggen van deze scenario's zijn weergegeven in de onderstaande tabel 6. Vervolgens zijn de waterstandsverlopen van deze vier golftypen weergegeven in figuur 8.

Tabel 6 - coördinaten waterstandsverlopen voor drie verschillende golftypen

	Tijd t.o.v. maximum [uren]				
Waterstand [m]	12.42	18.5	18.7	18.5	12.42
Scenario 4	-257.8	-45	0	41.6	296.3
Scenario 5	-257.8	-45	0	52	370.4
Scenario 7	-360.9	-63	0	41.6	296.3
Scenario 8	-360.9	-63	0	52	370.4



Figuur 8 - waterstandsverlopen voor drie verschillende types hoogwatergolven

Het onderzoek uit de bovenstaande paragrafen is geïmplementeerd in Matlab en alle enkele hoogwatergolven zijn geanalyseerd. De geïdentificeerde enkele hoogwatergolven uit hoofdstuk 2 zijn vergeleken met welke golfvorm het meeste overeenkomt. Op basis daarvan is een bepaald welk type

hoogwatergolf het meeste voorkomt. Een overzicht van de werking van het script is geïllustreerd in een flowchart in figuur 28 in bijlage E. De Matlab code is weergegeven in bijlage F. De onderstaande gedeeltes van het script zorgen voor de categorisering in types van enkele hoogwater:

- verschillende types hoogwatergolven (gebaseerd op enkele hoogwatergolven) (intervallen standaard hellingen berekenen)
- voorflank berekenen', 'achterflank berekenen
- verschillende types golven groeperen

3.5. Resultaten uit Matlab script

De resultaten van de analyse van het enkele hoogwatergolven bij Lobith staan in de onderstaande tabel 7:

Tabel 7 - aantal observaties per golftype in historische data Lobith

Golfvorm	Golftype	Aantal observaties
1 = smal - smal	Snelle stijging, snelle val	0
2 = smal - gem	Snelle stijging, gemiddelde val	28
3 = smal - breed	Snelle stijging, langzame val	0
4 = gem - smal	Gemiddelde stijging, snelle val	0
5 = gem - gem	Gemiddelde stijging, gemiddelde val	29
6 = gem - breed	Gemiddelde stijging, langzame val	0
7 = breed - smal	Langzame stijging, snelle val	6
8 = breed - gem	Langzame stijging, gemiddelde val	26
9 = breed - breed	Langzame stijging, langzame val	1

Tabel 7 laat zien dat drie types hoogwatergolven vaak voorkomen: 1) een golf met een gemiddelde stijging en een gemiddelde val (29 keer), 2) een golf met een snelle stijging en een gemiddelde val (28 keer), 3) een golf met een langzame stijging en een gemiddelde val (26 keer). Op basis van deze analyse zijn er maar zes afvoergolven geïdentificeerd met een snelle val van hoogwater (scenario 7). Verreweg de meeste golven hebben een gemiddelde val. Van de dikgedrukte types hoogwatergolven komen alleen scenario 5 (gemiddelde stijging en gemiddelde val) en scenario 8 (langzame stijging en gemiddelde val) vaak voor.

3.6. Conclusie

In dit hoofdstuk is er aandacht geschonken aan de beantwoording van de deelvragen twee en drie:

Deelvraag 2: Hoe kunnen representatieve schematisaties van verschillende types enkele hoogwatergolven worden opgesteld?

- a. *Bij een enkele hoogwatergolf, wat zijn de gekwantificeerde definities van een langzame, gemiddelde en snelle stijging? En van een langzame, gemiddelde en snelle daling?*

Deelvraag 3: Wanneer de schematisaties van deelvraag twee vergeleken worden met de historische data, welke type enkele hoogwatergolf komt het meeste voor?

In dit hoofdstuk is er allereerst uitgelegd hoe er representatieve schematisaties zijn opgesteld van verschillende types hoogwatergolven. Om deze schematisaties te bepalen, zijn eerst de definities van een langzame, gemiddelde en snelle stijging en val van hoogwater gekwantificeerd. De schematisaties kunnen gebruikt worden in berekeningen voor buitenwaartse macrostabiliteit van waterkeringen. Ze

kunnen gebruikt worden om de freatische lijn in een dijk te bepalen en uiteindelijk om een inschatting te maken van wanneer een afschuiving plaats zal vinden.

Daarnaast kan er geconcludeerd worden dat golven met een gemiddelde val van hoogwater het meeste voorkomen, gezien de historische data bij Lobith. De meeste van deze golven hebben een snelle of gemiddelde stijging van hoogwater. In overleg met een medestudent Nick van de Voort is er de hypothese gesteld dat het zevende scenario - een hoogwatergolf met een langzame stijging en een snelle val - de grootste kans heeft om macro-instabiliteit te veroorzaken. De freatische lijn is dan namelijk hoog wanneer er een snelle val van hoogwater optreedt. Dit scenario komt echter maar zes keer voor op een totaal van 90 geïdentificeerde hoogwatergolven.

De Matlab tool, die geconstrueerd is, wordt gebruikt om een indicatie te geven van welk type enkele hoogwatergolf het meeste voorkomt. Op basis van de uitkomsten kan een inschatting worden gemaakt van hoe vaak een afschuiving plaats heeft gevonden, wanneer wordt aangenomen dat een afschuiving altijd plaatsvindt bij een snelle val van hoogwater (zie paragraaf 4.1). Op basis van deze analyse zijn er slechts zes hoogwatergolven met een snelle val en waarbij dus sprake geweest kan zijn van een afschuiving. Als er dusdanig weinig enkele hoogwatergolven zijn in de historische data, dan kunnen er geen nuttige uitspraken worden gedaan over enkele hoogwatergolven die betrekking hebben op buitenwaartse macrostabiliteit. Daarom wordt er in het volgende hoofdstuk een ander criterium voor een snelle val van hoogwater toegepast (paragraaf 4.1). Deze verschillende criteria zullen besproken worden in de discussie in paragraaf 6.2.

Er kan momenteel niet met zekerheid worden gesteld welk type hoogwatergolf het meeste voorkomt. Wel blijkt uit de historische data dat een golf met een gemiddelde val het meeste voorkomt bij Lobith tussen 1901 en 2019. Als een soortgelijk onderzoek wordt uitgevoerd op bij meerdere meetstations in Nederland, dan kan er met meer zekerheid worden gesteld hoe groot de kans op voorkomen van de verschillende types hoogwatergolven is.

4. Dubbele hoogwatergolven

In dit hoofdstuk zal er aandacht worden geschonken aan de beantwoording van de vierde deelvraag:

Deelvraag 4: Wat zijn de eigenschappen van dubbele hoogwatergolven, die dijkfalen, als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit, kunnen veroorzaken?

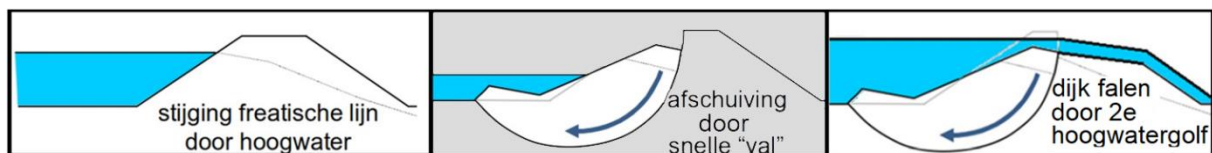
1. *Kijkende naar deelvraag 3, hoe vaak is er sprake van een hoogwatergolf die instabiliteit kan veroorzaken?*
2. *Hoe vaak is er sprake van een dubbele hoogwatergolf, die dijkfalen, als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit, kan veroorzaken?*
3. *Op basis van historische data, wat is een goede schatting van de kans op dijkfalen gegeven instabiliteit?*

Om te bepalen wanneer een dubbele hoogwatergolf voorkomt, moeten de onderstaande factoren vastgesteld worden (Risicobenadering Kennisplatform, 2018):

1. Wanneer vindt een afschuiving van het talud plaats?
2. Wat is de gemiddelde hersteltijd van een dijktraject?

4.1. Afschuiving

Voordat dijkfalen door buitenwaartse macrostabiliteit kan optreden, moet er eerst een afschuiving plaatsvinden. Dit wordt geïllustreerd in het stroomschema in het onderstaande figuur 9:



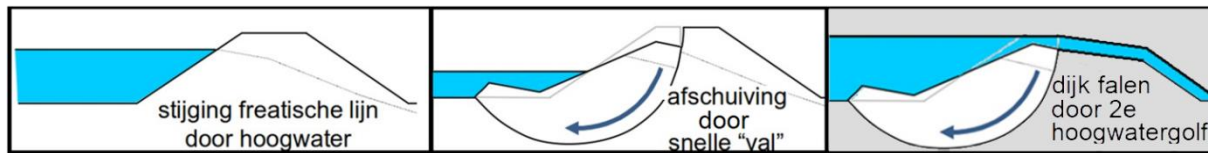
Figuur 9 - stroomschema STBU, afschuiving na snelle val

Afschuiven kan plaatsvinden in de golfklapzone, het taluddeel tussen het toetspeil en het niveau met een kans van overschrijden van 1/10 per jaar (van Hoven, 2016). Beide niveaus worden via Ringtoets beschikbaar gesteld. Er wordt gewerkt met een model, die een empirische rekenregel is, waarin de dikte en het gewicht van de kleilaag, de taludhelling en de significante golfhoogte staan (van Hoven, 2016). Een medestudent, Nick van de Voort, focust zich op de freatische lijnen in dijken en zal in staat zijn te bepalen wanneer een afschuiving precies plaatsvindt. In dit stadium kan daar echter nog geen uitspraak over gedaan worden.

Wel is bekend dat een afschuiving van het buitenwaartse dijktaalud meestal plaatsvindt bij een snelle val van hoogwater. Dit kan als criterium gebruikt worden om dubbele hoogwatergolven, die buitenwaartse macrostabiliteit veroorzaken, te herkennen. Een snelle val treedt op wanneer de tijd tussen de piek van de hoogwatergolf en de drempelwaarde tien dagen of minder bedraagt (Ministerie van verkeer en waterstaat, 2007) of wanneer er sprake is van een steile helling, zoals blijkt uit de analyse in hoofdstuk 3. Uit categorisatie van verschillende types hoogwatergolven in hoofdstuk 3 blijkt dat er slechts zes hoogwatergolven met een snelle val van hoogwater zijn en op basis daarvan zullen er geen zinnige uitspraken over het voorkomen van dubbele hoogwatergolven met betrekking tot buitenwaartse macrostabiliteit gedaan kunnen worden. Daarom is er besloten om in dit hoofdstuk het criterium van 10 dagen tussen piekwaarde en de drempelwaarde te hanteren voor de kwantificatie van een snelle val en dus voor het plaatsvinden van een afschuiving van het talud.

4.2. Hersteltijd

Wanneer er een tweede hoogwatergolf optreedt binnen de hersteltijd, nadat een afschuiving plaats heeft gevonden, kan er sprake zijn van dijkfalen. Het is belangrijk om de gemiddelde hersteltijd van een dijktraject te bepalen, omdat dijkfalen door STBU kan optreden wanneer een afschuiving niet snel genoeg gerepareerd kan worden. Dit wordt geïllustreerd in het stroomschema in het onderstaande figuur 10:



Figuur 10 - stroomschema STBU, hersteltijd

Trul (2016) heeft besloten dat wanneer de drempelwaarde voor een tweede keer binnen een bepaalde tijdsinterval, de window, wordt overschreden, dat deze hoogwatergolven dan onderdeel zijn van dezelfde gebeurtenis: een dubbele hoogwatergolf. Bij Lobith is de window 27 dagen (Trul, 2016), zie bijlage B. Er wordt aangenomen dat de hersteltijd gelijk is aan deze window van 27 dagen. Mocht dit onderzoek worden uitgevoerd op een andere locatie, dan dient de window ook opnieuw te worden berekend.

Om een tweede inschatting te krijgen van de hersteltijd is er een interview gehouden met een dijkbeheerder over gemiddelde hersteltijden van dijktrajecten. Een dijkbeheerder staat dichtbij de uitvoering van het hersteltijdproces en kan daardoor praktische informatie leveren met betrekking tot hersteltijden. In dit gesprek is gevraagd naar het herstelproces van een dijktraject nadat een afschuiving plaats heeft gevonden en om een grove schatting te maken van de gemiddelde hersteltijd. De gedetailleerde resultaten van dit interview zijn te vinden in bijlage C.

Uit het interview blijkt dat wanneer een afschuiving heeft plaatsgevonden en is ontdekt, dat er eerst noodmaatregelen getroffen worden om dijkfalen te voorkomen. Met nieuwe grond wordt de afschuiving gerepareerd en geotextiel zorgt voor de stabiliteit. Het duurt namelijk langer voordat de grasbekleding terug is gegroeid. De implementatie van de noodmaatregelen (nieuwe grond + geotextiel) duurt tussen de 10 en 20 dagen, afhankelijk van de omvang en locatie van afschuiven en de waterstand. De aangenomen hersteltijd van 27 dagen is dus enigszins conservatief. Er is echter toch besloten om een hersteltijd van 27 dagen te gebruiken, omdat deze waarde onderbouwd is met een berekening. Daarnaast is de hersteltijd afhankelijk van veel verschillende factoren (zie interview dijkbeheerder en paragraaf 6.3) en daarom is er een grote onzekerheid. In dit geval is het verstandig om de hersteltijd conservatiever te schatten dan het wellicht in werkelijkheid is.

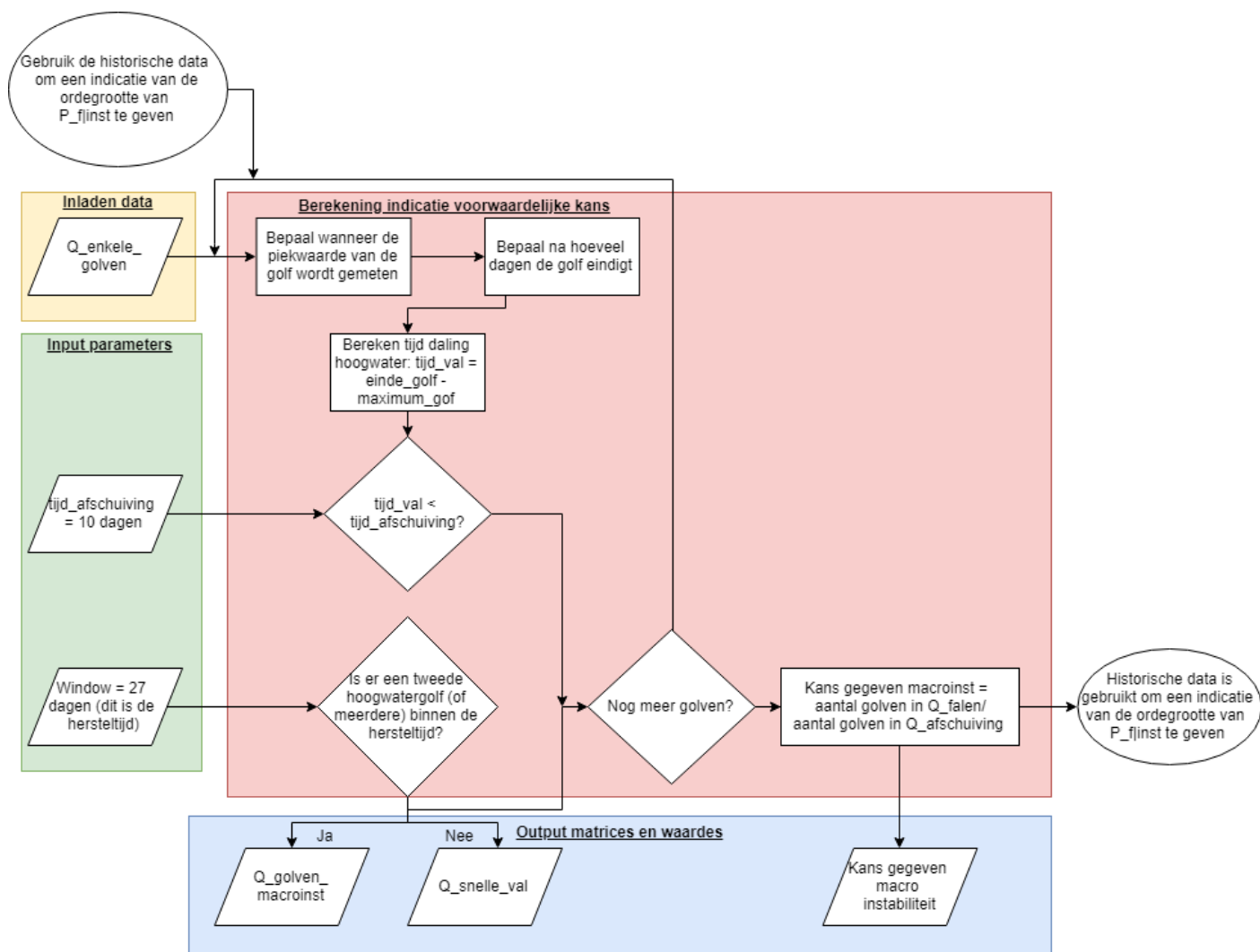
4.3. Dubbele hoogwatergolven selecteren

De enkele hoogwatergolven die zijn geïdentificeerd in paragraaf 2.3 zijn gebruikt om dubbele hoogwatergolven, die betrekking hebben tot buitenwaartse macrostabiliteit, te selecteren van de historische data.

Allereerst zijn enkele hoogwatergolven met een snelle val van hoogwatergolven (10 dagen) geselecteerd, omdat deze golven de grootste kans hebben om een afschuiving te veroorzaken. Om te bepalen welke enkele hoogwatergolven een snelle val van hoogwater hebben, is er gekeken naar de piekafvoer van de hoogwatergolf en de laatste afvoermeting boven de drempelwaarde. Wanneer de tijd tussen deze twee afvoermetingen tien dagen of minder bedraagt, dan is er sprake van een hoogwatergolf met een snelle val van hoogwater.

Vervolgens is er gekeken of er bij deze golven sprake is van een tweede hoogwatergolf binnen de hersteltijd (window van 27 dagen). Hiervoor is de datum van de laatste afvoermeting boven de drempelwaarde van de hoogwatergolf met een snelle val, vergeleken met startdatum van de eerstvolgende hoogwatergolf. Als de tijd tussen deze twee hoogwatergolven minder dan 27 dagen bedraagt, dan is er sprake van een dubbele hoogwatergolf die dijkfalen als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit kan veroorzaken. De vorm van de tweede hoogwatergolf is niet relevant voor dijkfalen.

Om dit verder te verduidelijken, is dit ook geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Het voorbeeld is weergegeven in bijlage D. De onderstaande flowchart in figuur 11 geeft een overzicht van alle stappen die worden genomen in het Matlab script:



Figuur 11 - flowchart dubbele hoogwatergolven

De stappen in de bovenstaande flowchart zijn allemaal geïmplementeerd in het Matlab script. Het script is te vinden in bijlage F. Het deel 'Dubbele hoogwatergolven selecteren (m.b.t. buitenwaartse macrostabiliteit)' gaat over de identificatie van dubbele hoogwatergolven zoals geïllustreerd in de flowchart in figuur 11.

4.4. Resultaten en schatting ordegröte voorwaardelijke overstromingskans STBU

Met behulp van het Matlab script kan de betrouwbaarheid van de aanname, dat de kans op het plaatsvinden van dijkfalen, gegeven buitenwaartse macro-instabiliteit, 10% is, getest worden. Wanneer er dus een afschuiving plaatsvindt, moet er worden nagegaan in hoeveel gevallen er een tweede hoogwatergolf wordt gemeten binnen de hersteltijd van een dijktraject. Is dit meer of minder dan 10% van het totaal aantal gevallen? Of is bijvoorbeeld 1% een betere inschatting op de waarde van de voorwaardelijke overstromingskans?

Op basis van het onderzoek naar de dubbele hoogwatergolven die buitenwaartse macro-instabiliteit kunnen veroorzaken, kan er een schatting worden gemaakt van de ordegröte van de schadefactor voor macrostabiliteit buitenwaarts (en dus ook de kans op dijkfalen gegeven instabiliteit). Deze kans kan als volgt worden berekend:

$$P_{f|inst} = \frac{\text{aantal dubbele hoogwatergolven die dijk falen kunnen veroorzaken}}{\text{aantal enkele hoogwatergolven waarbij sprake is van een afschuiving}} \quad \text{Formule 2}$$

Deze factor is berekend met behulp van Matlab voor de data bij Lobith. Voor meer details over dit proces, zie de flowchart in figuur 11. Uit deze analyse blijkt dat er in de historische data 75 hoogwatergolven zijn waarbij sprake is van een snelle val en een afschuiving dus voor de hand liggend is. Bij slechts twee van deze hoogwatergolven wordt er echter een tweede hoogwatergolf binnen de hersteltijd van 27 dagen gemeten. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de kans op dijkfalen gegeven instabiliteit circa 2,5% is en dat de vaak gebruikte waarde van 10% dus inderdaad conservatief is.

Als gevolg van dit onderzoek kan er niet worden geconcludeerd dat de waarde van $P_{f|inst}$ dus 0,025 bedraagt. Doordat er gebruik is gemaakt van historische data, is er sprake van een grote statische onzekerheid. In de historische data is er namelijk een zeer beperkte hoeveelheid hoogwatergolven, dus de steekproef is te klein. Bovendien is er sprake van modelonzekerheid in het Matlab script. Daarnaast is de voorwaardelijke overstromingskans alleen berekend aan de hand van waarnemingen bij Lobith en niet met data van andere meetstations; de voorwaardelijke overstromingskans zou heel anders kunnen zijn bij een ander meetstation.

4.5. Conclusie

In dit hoofdstuk is er aandacht geschonken aan de beantwoording van de vierde deelvraag:

Deelvraag 4: Wat zijn de eigenschappen van dubbele hoogwatergolven, die dijkfalen, als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit, kunnen veroorzaken?

- a) Kijkende naar deelvraag 3, hoe vaak is er sprake van een hoogwatergolf die instabiliteit kan veroorzaken?*
- b) Hoe vaak is er sprake van een dubbele hoogwatergolf, die dijkfalen, als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit, kan veroorzaken?*
- c) Op basis van historische data, wat is een goede schatting van de kans op dijkfalen gegeven instabiliteit?*

Allereerst zijn de eigenschappen van dubbele hoogwatergolven, die betrekking kunnen hebben op buitenwaartse macrostabiliteit, omschreven. Voor dubbele hoogwatergolven die dijkfalen als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit kunnen veroorzaken geldt dat:

- 1) Een snelle val van hoogwater zorgt voor een afschuiving.
- 2) Na een afschuiving van het talud, is er sprake van een tweede hoogwatergolf binnen de hersteltijd van het dijktraject.

De dubbele hoogwatergolven die relevant zijn voor STBU zijn geïdentificeerd in historische afvoermetingen met behulp van een Matlab script. Dit gebeurt aan de hand van de twee bovenstaande voorwaarden.

In deze analyse zijn er 75 enkele hoogwatergolven met een snelle val van hoogwater. Er wordt hierbij aangenomen dat er bij al deze gevallen sprake is van een afschuiving van het talud. Vervolgens is er onderzocht hoe vaak er sprake is van een tweede hoogwatergolf binnen de hersteltijd van een dijktraject, nadat een afschuiving plaats heeft gevonden. In dit geval zal de waterkering bezwijken en is er dus sprake van dijkfalen. In de historische data bij Lobith zijn er twee dubbele hoogwatergolven waarbij sprake is van dijkfalen als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit.

Op basis van deze gegevens is een schatting van de ordegrootte van de voorwaardelijke kans op STBU gemaakt. Deze kans is circa 2,5% bij het meetstation bij Lobith. Hieruit blijkt dat de momenteel gehanteerde 10% inderdaad conservatief is. Verder onderzoek is nodig om een realistischere waarde voor de voorwaardelijke overstromingskans te bepalen.

5. Gevoeligheidsanalyse

In de eerste vijf deelvragen is er onderzoek gedaan naar het identificeren van enkele en dubbele hoogwatergolven. Hierin zijn echter bepaalde aannames gemaakt. Wanneer deze aannames onterecht zijn, kunnen ze grote invloed hebben op de betrouwbaarheid van het onderzoek. Hoe groot de invloed is van de gemaakte aannames wordt onderzocht in de gevoeligheidsanalyse.

5.1. Opzet

Allereerst moeten de aannames, die gemaakt zijn in het onderzoek, worden geïdentificeerd. De aannames die worden meegenomen in de gevoeligheidsanalyse zijn hieronder omschreven. De desbetreffende aannames zijn allemaal gemaakt in de input parameters van het Matlab script.

- Piekafvoer – de piekafvoer is de minimale piekwaarde van een hoogwatergolf die bereikt moet worden voordat een afvoerreeks boven de drempelwaarde wordt gezien als een hoogwatergolf. Momenteel is er gekozen voor een afvoerwaarde die eens in de twee jaar voorkomt. Dit is een aanname die niet onderbouwd is. Het is dus interessant om te onderzoeken welk effect variaties in deze parameter heeft op de uitkomsten van het model.
- Tijd snelle val – uit literatuuronderzoek blijkt dat een snelle val plaatsvindt wanneer hoogwater binnen tien dagen zakt. Er wordt aangenomen dat er bij een snelle val van hoogwater sprake is van een afschuiving. Hoe de waarde voor de tijdsduur van een snelle val is afgeleid is niet duidelijk omschreven in de literatuur. Er zal dus een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd op deze parameter.
- Window – de window is gemiddelde hersteltijd van een dijktraject bij Lobith. Hier zit behoorlijk veel onzekerheid en de keuze voor de waarde van 27 dagen voor deze parameter is niet goed onderbouwd. Daarom zal er een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd voor deze parameter.
- 100% afschuiving bij snelle val – er wordt momenteel aangenomen dat wanneer er een snelle val van hoogwater optreedt, dat er dan altijd een afschuiving plaatsvindt. Dit is een versimpeling in het model, die grote gevolgen kan hebben. De gevoeligheid van deze parameter zal dus ook onderzocht worden.

Om een uitspraak te doen over de algemene gevoeligheid van het model, als er variaties in een aantal parameters worden doorgevoerd, moeten er variabelen worden geselecteerd die het model goed representeren. De volgende variabelen zijn geselecteerd om de gevoeligheid te bepalen:

- Aantal enkele hoogwatergolven – de eerste stap in het script is om enkele hoogwatergolven uit de data te selecteren. Daarom is het verstandig om de veranderingen in het aantal enkele hoogwatergolven te meten.
- Aantal enkele hoogwatergolven die afschuiving veroorzaken – nadat de enkele hoogwatergolven zijn geselecteerd, wordt er gesteld dat alle enkele hoogwatergolven met een snelle val van hoogwater een afschuiving veroorzaken. Dit is een relevant gegeven van onder andere de kans op falen gegeven instabiliteit.
- Aantal dubbele hoogwatergolven die dijkfalen veroorzaken door buitenwaartse macrostabiliteit – als er een afschuiving plaats heeft gevonden, dan wordt er gekeken of er binnen de hersteltijd (window) een tweede hoogwatergolf voorkomt. Als dit het geval is, zal dijkfalen optreden. Ook dit is belangrijk voor het bepalen van de kans op falen gegeven instabiliteit.
- Verdeling types hoogwatergolven – de verdeling van de types hoogwatergolven is een andere belangrijke output van het model dat dient te worden gecontroleerd op haar gevoeligheid.

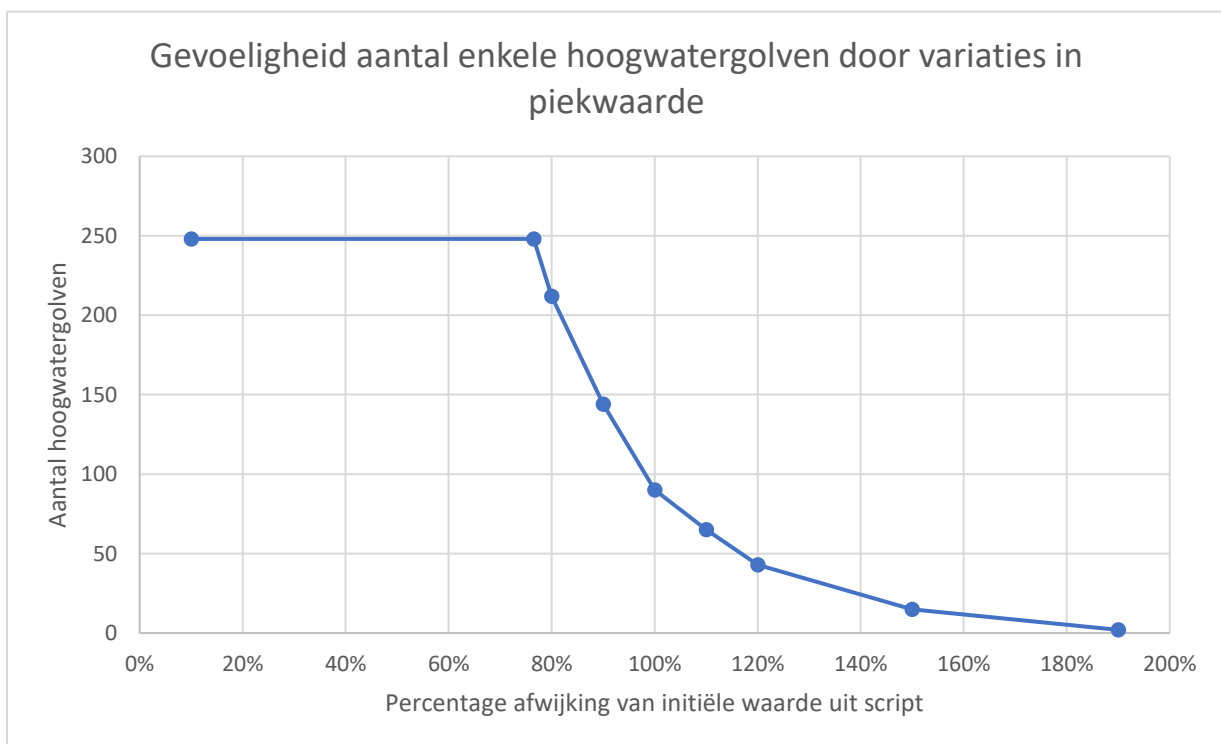
5.2. Uitvoering en resultaten

Nadat de aannames die gemaakt zijn en de variabelen waarop de gevoeligheid van deze aannames wordt gemeten, zijn benoemd, is de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hoe de gevoeligheidsanalyse tot uitvoering is gebracht is omschreven in deze paragraaf. Ook worden de daaropvolgende uitkomsten en resultaten benoemd. Er zal ook benoemd worden welke variabelen afhankelijk zijn van elkaar; welke verbanden er zijn en hoe ze elkaar beïnvloeden. Alle resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven in tabel 13 t/m 16 in bijlage G.

5.2.1. Piekafvoer

In de gevoeligheidsanalyse wordt de initiële piekafvoer veranderd, terwijl alle andere variabelen constant worden gehouden. Echter, wanneer de piekafvoer onder de drempelwaarde komt, zullen alle metingen boven de drempelwaarde onderdeel zijn van een hoogwatergolf en heeft het piekafvoercriterium dus geen invloed meer. Dit scenario is ook doorgerekend, door de piekwaarde gelijk te stellen aan de drempelwaarde ($4545 \text{ m}^3/\text{s} = 77\%$ van piekafvoer).

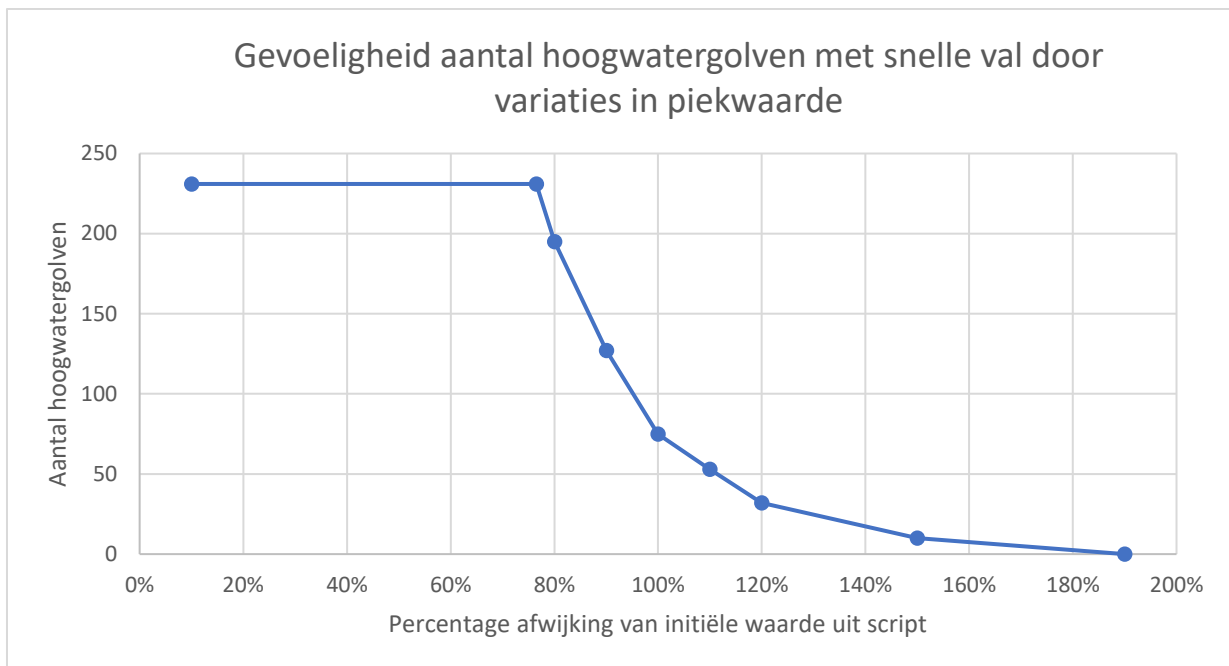
De piekafvoer is een waarde die gebruikt wordt voor het identificeren van enkele hoogwatergolven. Zoals blijkt uit het onderstaande figuur 12 zorgt een toename in de minimaal benodigde piekwaarde voor een afname van de hoeveelheid enkele hoogwatergolven.



Figuur 12 - Gevoeligheid aantal enkele hoogwatergolven door variaties in piekafvoer

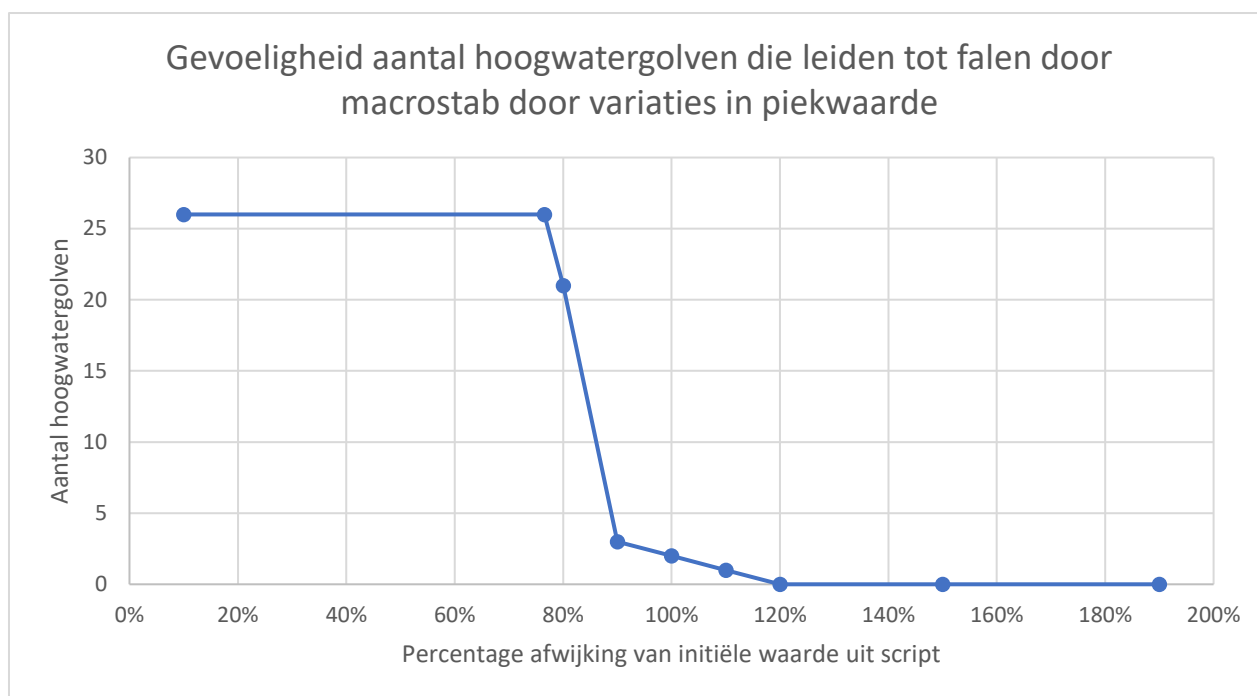
Deze parameter is dusdanig gevoelig, dat er bij een verdubbeling van de minimaal benodigde afvoer er bijna geen enkele hoogwatergolven meer worden geïdentificeerd. Dit is verklaarbaar op basis van literatuur. In een artikel van Chbab (2017) worden namelijk herhalingstijden van bepaalde afvoeren bij Lobith genoemd. Een verdubbelde piekafvoer ($11880 \text{ m}^3/\text{s}$) komt ongeveer eens in de tachtig jaar voor. De afvoermetingen zijn beschikbaar voor ruim honderd jaar. Op basis van dit gegeven kunnen er één of twee afvoergolven worden verwacht, wanneer de piekafvoer wordt verdubbeld. Een relatief kleine afname van de piekafvoer kan daarnaast ook zorgen voor een grote toename in de hoeveelheid enkele hoogwatergolven: bij een afname van 20% is het aantal enkele hoogwatergolven verdubbeld.

In het script wordt er vervolgens gekeken bij welke enkele hoogwatergolven er sprake is van een snelle val van hoogwater en dus een grote kans hebben om een afschuiving te veroorzaken. De piekafvoer heeft dus ook invloed op het aantal hoogwatergolven met een snelle val, zoals blijkt uit het onderstaande figuur 13.



Figuur 13 - Gevoeligheid aantal enkele hoogwatergolven met snelle val door variaties in piekafvoer

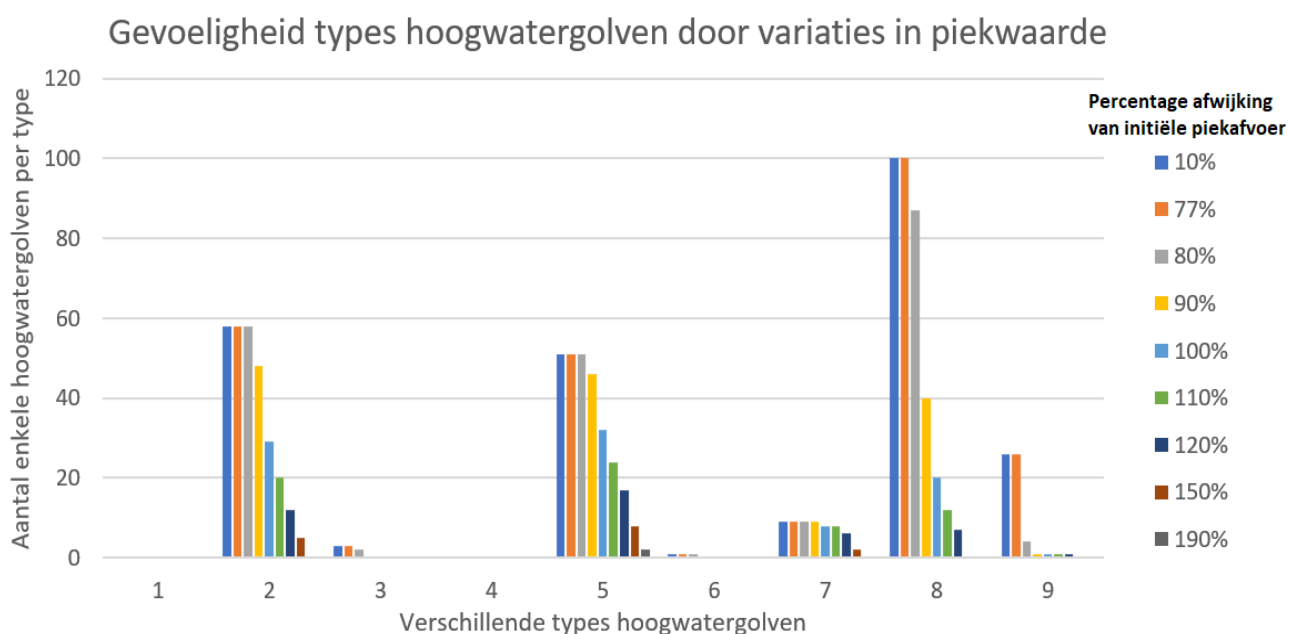
Zoals blijkt uit het bovenstaande figuur 13, hebben veranderingen in de piekwaarde een soortgelijk effect op het aantal enkele hoogwatergolven met een snelle val, als op het aantal enkele hoogwatergolven (met of zonder snelle val). Het aantal dubbele hoogwatergolven, dat kan leiden tot dijkfalen door buitenwaartse macrostabiliteit, zal daarom ook gevoelig zijn voor verandering in de piekwaarde. Dit is weergegeven in het onderstaande figuur 14:



Figuur 14 - Gevoeligheid aantal dubbele hoogwatergolven die leiden tot falen door STBU door variaties in piekafvoer

Bij een afname van de piekafvoer neemt het aantal dubbele hoogwatergolven met betrekking tot macrostabiliteit snel toe. Bij een toename van de piekwaarde wordt de kans kleiner dat er sprake is van een tweede hoogwatergolf als een afschuiving heeft plaatsgevonden, omdat het aantal afvoergolven waarbij er sprake is van een snelle val (en dus een grote kans op afschuiving is) ook afneemt.

Tenslotte, omdat de hoeveelheid enkele hoogwatergolven veranderd door variaties in de piekwaarde, is verdeling van de types hoogwatergolven ook veranderd. Dit wordt geïllustreerd in het onderstaande figuur 15.



Figuur 15 - Gevoeligheid verdeling types hoogwatergolven door variaties in piekafvoer

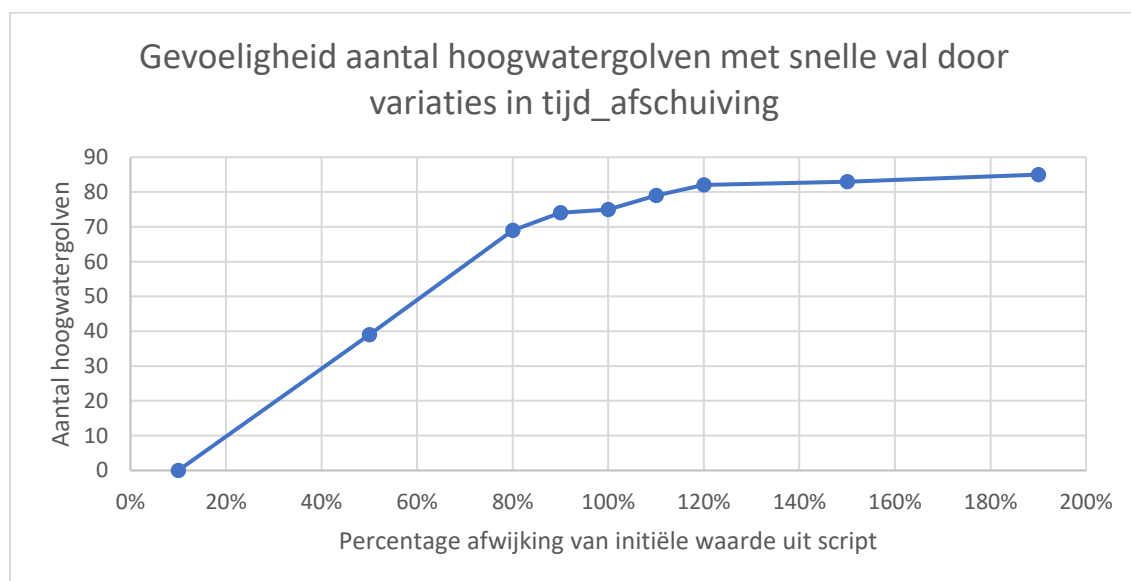
Doordat de hoeveelheid enkele hoogwatergolven afneemt als de piekafvoer toeneemt, nemen de hoogwatergolven per type ook af en vice versa. Dit lijkt echter redelijk evenredig te gebeuren bij alle verschillende types. Hoogwatergolven van type 8 (gemiddelde stijging en langzame val) lijkt wel iets gevoeliger te zijn dan de andere types hoogwatergolven. Vooral als de piekafvoer lager is dan of gelijk is aan de drempelwaarde, neemt het aantal hoogwatergolven van dit type snel toe. Er is hier echter geen logische redenatie voor gevonden; het zou toeval kunnen zijn.

Daarnaast, golven van type 9 (langzame stijging, langzame val) komen bijna niet voor bij de initiële piekafvoer. Wanneer de piekafvoer gelijk is aan de drempelwaarde en dus komt te vervallen (77% van de initiële waarde), worden er plotseling veel meer hoogwatergolven van dit type gemeten (28 hoogwatergolven). Ook hier geldt dat er geen logische redenatie voor gevonden is; het zou toeval kunnen zijn.

5.2.2. Tijd snelle val

De initiële tijd voor een snelle val, van 10 dagen, wordt veranderd. Waardes van 10%, 50%, 80%, 90%, 110%, 120%, 150% en 190% van de initiële waarde worden doorerekend, terwijl alle andere variabelen constant worden gehouden. Vervolgens wordt de invloed op de variabelen die hierboven beschreven zijn om de gevoeligheid te meten, bepaald.

Veranderingen in de tijd voor een snelle val (initiële waarde is 10 dagen) hebben geen invloed op enkele hoogwatergolven. Het snelle val criterium bepaalt juist bij hoeveel van deze hoogwatergolven er sprake is van een snelle val en dus wanneer er een grote kans is op afschuiven. Het onderstaande figuur 16 beeldt de invloed van veranderingen in de tijd voor een snelle val op het aantal hoogwatergolven waarbij een afschuiving plaats zou kunnen vinden af.



Figuur 16 - Gevoeligheid aantal enkele hoogwatergolven met een snelle val door variaties in tijd snelle val

Wanneer de tijd van een snelle val afneemt, neemt het aantal hoogwatergolven waarbij een afschuiving plaatsvindt ook af. Dit is ook verklaarbaar, want als een afschuiving alleen plaatsvindt bij een 'hele snelle val', dan zijn er uiteraard minder hoogwatergolven waarbij deze 'hele snelle val' wordt gemeten. Opvallend is het, wanneer de tijd van een snelle val toeneemt, dat de gemeten hoeveelheid hoogwatergolven minder snel toeneemt. Dit is wederom te verklaren, omdat er in totaal maar enkele 90 hoogwatergolven zijn. Bij een grote toename van de tijd voor een snelle val, wordt er gesteld dat bijna alle enkele hoogwatergolven een snelle val hebben.

Zoals blijkt uit tabel 14 uit bijlage G vinden er kleine veranderingen plaats in de hoeveelheid dubbele hoogwatergolven met betrekking tot macrostabiliteit bij veranderingen in de tijd voor een snelle val. Deze veranderingen zijn echter afhankelijk van het aantal golven waarbij er een afschuiving plaatsvindt: als er geen afschuiving plaatsvindt, zal er ook geen buitenwaartse macro-instabiliteit plaatsvinden.

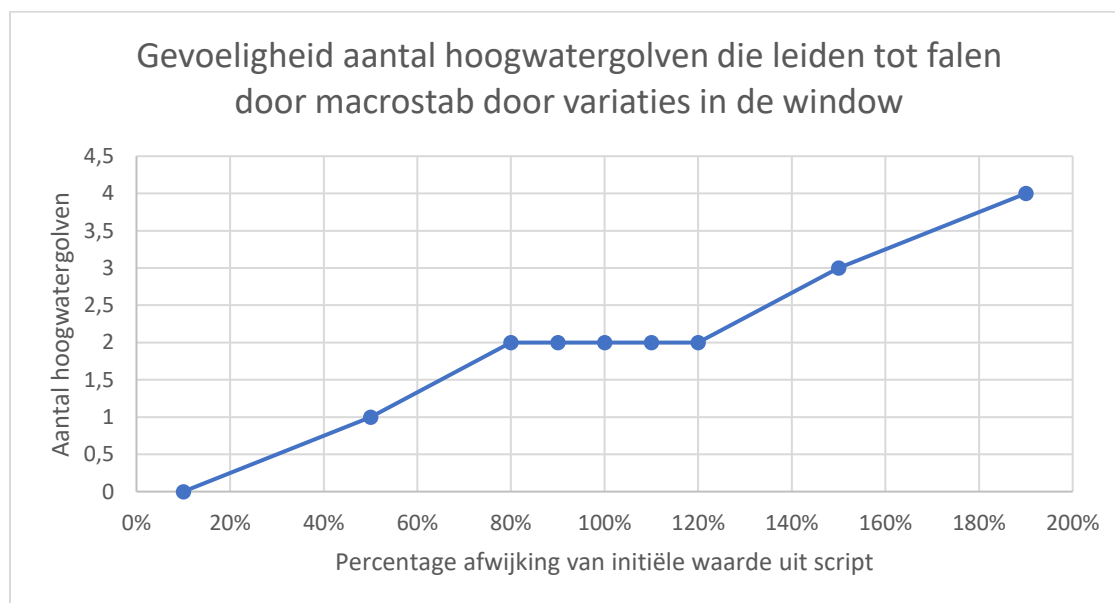
Daarnaast, omdat veranderingen in de tijd voor een snelle val geen invloed hebben op het aantal hoogwatergolven, heeft het geen invloed op de verdeling van de types hoogwatergolven. De geïdentificeerde enkele hoogwatergolven blijven hetzelfde als de tijd voor een snelle val verandert.

5.2.3. Window

De initiële window, ook wel de hersteltijd, van 27 dagen, wordt ook veranderd. Waardes van 10%, 50%, 80%, 90%, 110%, 120%, 150% en 190% van de initiële waarde worden doorgerekend, terwijl alle andere variabelen constant worden gehouden. Vervolgens wordt de invloed op de variabelen die hierboven beschreven zijn om de gevoeligheid te meten, bepaald.

Uit de gevoeligheidsanalyse (zie tabel 15 in bijlage G) blijkt dat veranderingen in de window geen effect op zowel het aantal enkele hoogwatergolven, als het aantal hoogwatergolven waarbij er sprake is van een snelle val en dus een afschuiving plaats kan vinden. Dijkfalen door macrostabiliteit kan pas optreden wanneer er een tweede hoogwatergolf plaatsvindt na een afschuiving binnen de hersteltijd. De window (in andere woorden, hersteltijd) wordt pas relevant nadat er een afschuiving heeft plaatsgevonden. Daarom is de hoeveelheid hoogwatergolven waarbij een afschuiving plaatsvindt dus onafhankelijk van veranderingen in de window.

Zoals blijkt uit het onderstaande figuur 17 is het aantal afvoergolven, waarbij dijkfalen als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit optreedt, wel gevoelig voor veranderingen in de window.



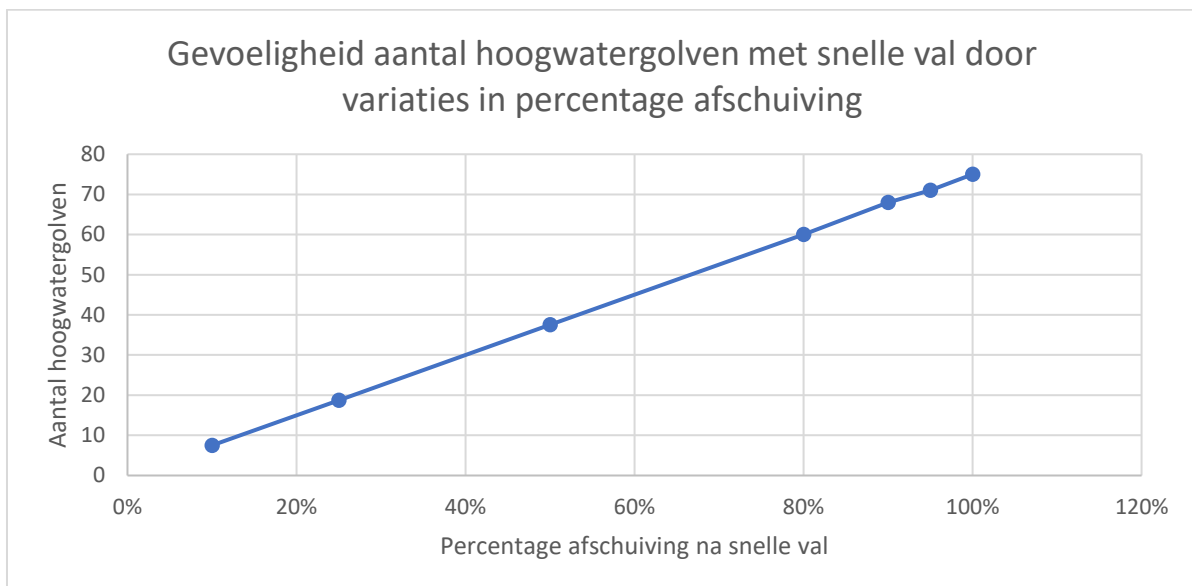
Figuur 17 - Gevoeligheid aantal dubbele hoogwatergolven die leiden tot falen door STBU door variaties in de window

Wanneer de window, dus de benodigde hersteltijd van een dijktraject, toeneemt, dan nemen de hoeveel hoogwatergolven die dijkfalen veroorzaken ook toe. Wanneer de hersteltijd verdubbelt, dan verdubbelt het aantal dubbele hoogwatergolven ook. Dit is logisch, want als de hersteltijd langer is, dan is de kans groter dat er nog een tweede hoogwatergolf komt die dijkfalen veroorzaakt.

Tenslotte, veranderingen in de window hebben geen invloed op de verdeling van de types hoogwatergolven. De categorisering van de types is gebaseerd op enkele hoogwatergolven en de hersteltijd is enkel relevant voor dubbele hoogwatergolven. Daarom zijn er geen veranderingen geobserveerd.

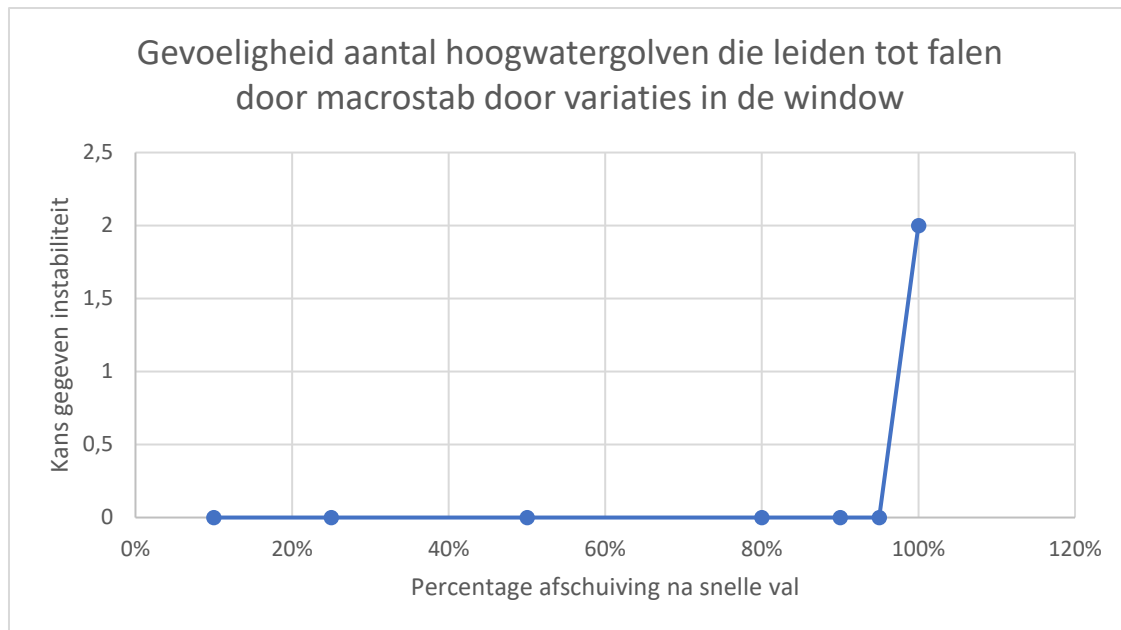
5.2.4. 100% afschuiving bij snelle val

Naar alle waarschijnlijkheid veroorzaken niet alle afvoergolven met een snelle val een afschuiving. In het script is er daarom een functie toegevoegd, om slechts een bepaald percentage van de afvoergolven met een snelle val mee te nemen in het onderzoek naar de grootteorde van de kans op falen gegeven instabiliteit. De tijden tussen de piekwaardes en de drempelwaardes zijn gesorteerd voor alle afvoergolven, van kort naar lang. De x afvoergolven met de langst durende val van hoogwater worden niet meegenomen. x is afhankelijk van het percentage van de afvoergolven met een snelle val waarbij een afschuiving plaatsvindt. Bijvoorbeeld, wanneer er 75 hoogwatergolven zijn met een snelle val, en bij 80% van de golven is er sprake van een afschuiving. Dan worden de 15 golven met de langzaamste val van hoogwater niet meegenomen in de analyse. In figuur 18 is de lineaire afname van de hoeveelheid enkele hoogwatergolven met een snelle val die een afschuiving teweeg brengen geïllustreerd.



Figuur 18 - veranderingen in aantal enkele hoogwatergolven met snelle val die leiden tot een afschuiving

Veranderingen in de hoeveelheid golven met een snelle val, heeft uiteraard weer geen effect op de hoeveelheid enkele hoogwatergolven en dus op de verdeling van de types hoogwatergolven. Wel heeft het invloed op het aantal dubbele hoogwatergolven met betrekking tot macrostabiliteit. Dit is weergegeven in het onderstaande figuur 19:



Figuur 19 - gevoeligheid aantal dubbele hoogwatergolven die leiden tot falen door STBU door veranderingen in percentage afschuiving

Opvallend is dat wanneer er wordt gesteld dat de 5% van de golven met de langzaamste snelle val van hoogwater geen afschuiving veroorzaken, dat er dan al geen hoogwatergolven die dijkfalen kunnen veroorzaken, worden gemeten. Dit is een opvallend gegeven, omdat de hoeveelheid golven die dijkfalen kunnen veroorzaken na een afschuiving, afhankelijk is van de window: komt er een tweede hoogwatergolf binnen de hersteltijd van het dijktraject. Op basis van deze resultaten zal dus geconcludeerd kunnen worden dat er een grotere kans is bij golven met een relatief langzame snelle val dat er een tweede hoogwatergolf komt binnen de hersteltijd. Echter, dit kan onmogelijk met enige zekerheid gezegd worden, aangezien het bij slechts twee golven gebeurt. Er zou verder onderzoek gedaan moeten worden op andere locaties bij meetstations aan bovenrivieren in Nederland om dit te kunnen concluderen.

5.3. Conclusie

In de gevoeligheidsanalyse zijn de effecten van een aantal aannames op de uitkomsten van het model onderzocht: 1) Piekafvoer, 2) Tijd voor een snelle val, 3) Window, 4) 100% afschuiving bij een snelle val. De kans op dijkfalen gegeven instabiliteit is afhankelijk van veel factoren waar een bepaalde onzekerheid inzit. Het aantal enkele en dubbele hoogwatergolven veranderen, maar de verhouding ertussen verandert relatief weinig. Daarom wordt de waarde van 2,5% als voorwaardelijke overstromingskans als voldoende betrouwbaar geacht om te stellen dat de voorheen gebruikte 10% conservatief is.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt ook dat de piekafvoer een grote doorwerkende kracht heeft in het model. De piekafvoer bepaalt namelijk de hoeveelheid enkele hoogwatergolven; de enkele hoogwatergolven bepalen weer de hoeveelheid dubbele hoogwatergolven en de dubbele hoogwatergolven bepalen uiteindelijk de kans op dijkfalen gegeven instabiliteit. Daarnaast, de enkele hoogwatergolven zijn gecategoriseerd in verschillende types. De piekafvoer heeft ook een effect op de hoeveelheid hoogwatergolven van elk type. Het is opvallend dat de verdeling over de types relatief gezien hetzelfde blijft, maar dat hoogwatergolven van type 8 en 9 gevoeliger lijken te zijn dan de andere hoogwatergolven. Hier is echter geen logische verklaring voor gevonden. De types hoogwatergolven met een snelle val van hoogwater, die van groot belang zijn in dit onderzoek, zijn ongevoelig voor veranderingen in de piekwaarde.

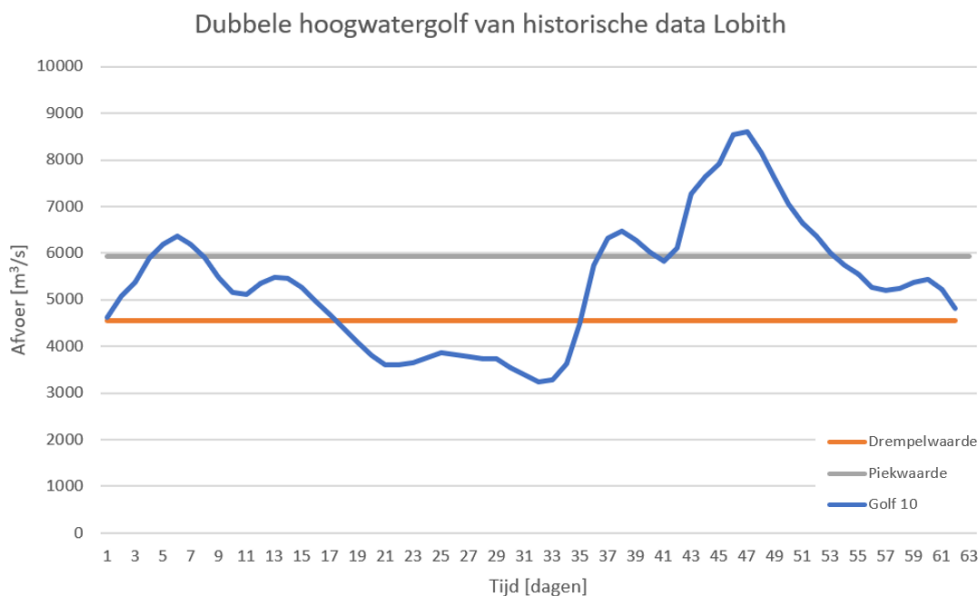
Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het van groot belang is dat de fundamentele aannames zoals de piekwaarde, zorgvuldig moeten worden gekwantificeerd, omdat dit grote gevolgen kan hebben op de uitkomsten van het model. Als een aanname namelijk invloed heeft de selectie van enkele hoogwatergolven, dan heeft het ook doorwerkende kracht op de selectie van dubbele hoogwatergolven.

6. Discussie

In dit hoofdstuk wordt er een kritische blik geworpen op de uitkomsten van het onderzoek. Er wordt toegelicht waar de beperkingen van het onderzoek liggen. Ook worden enkele opmerkelijke resultaten toegelicht.

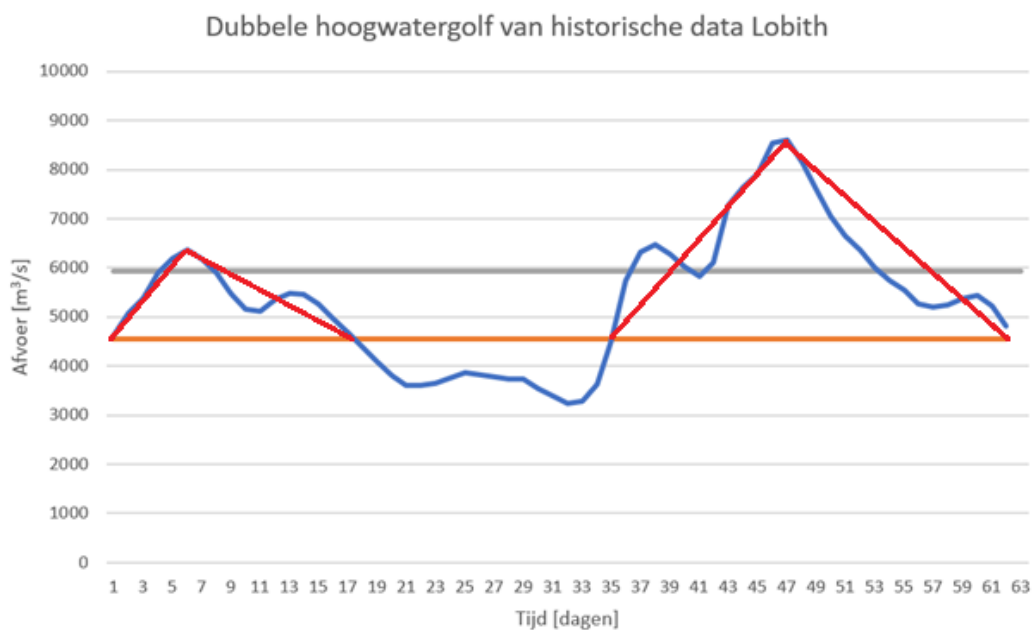
6.1. Categorijsatie van types hoogwatergolven

In het onderstaande figuur 20 wordt een dubbele hoogwatergolf afgebeeld die buitenwaartse macrostabiliteit zou kunnen veroorzaken.



Figuur 20 - hoogwatergolven bij Lobith

Wanneer er met behulp van het script een poging gedaan wordt om de twee hoogwatergolven uit het bovenstaande figuur 20 een type toe te kennen, dan worden de hellingen van de rode lijnen in het onderstaande figuur 21 berekend.



Figuur 21 – huidige methode categorisering types hoogwatergolven

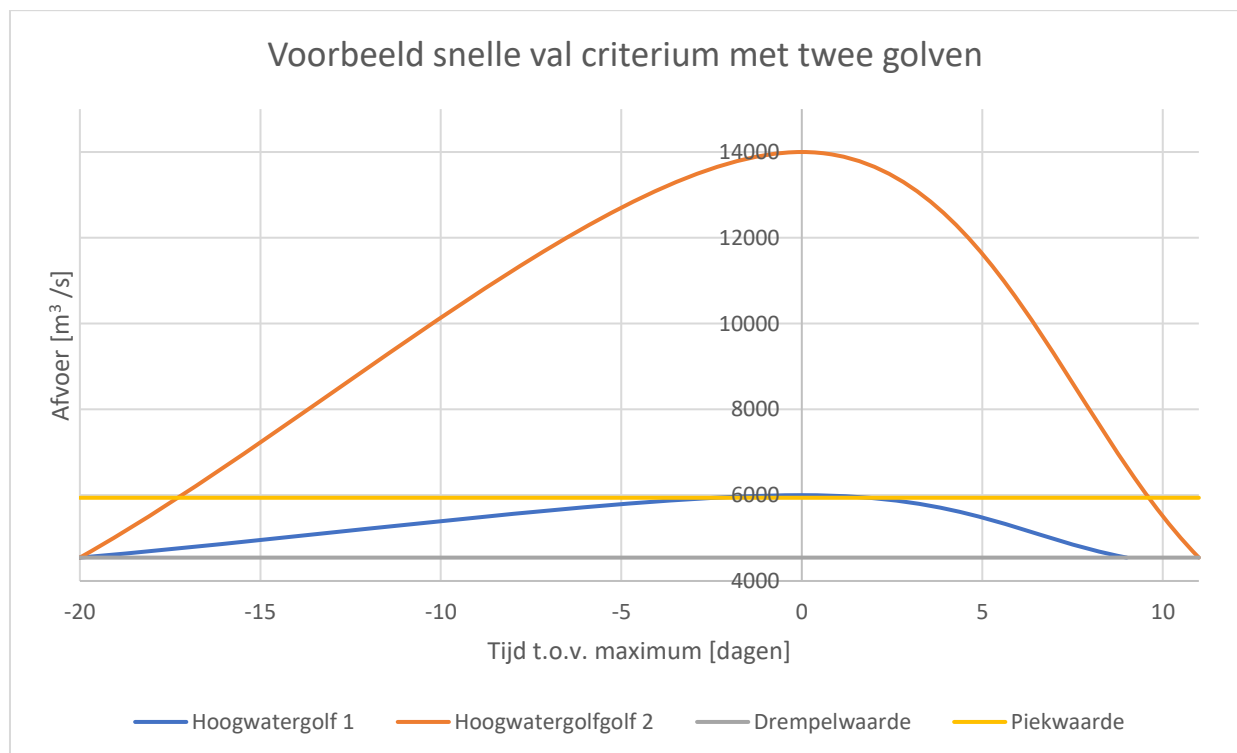
Vooral bij de achterflank van de eerste hoogwatergolf en de voorflank van de twee hoogwatergolf wordt hiermee een grote inschattingsfout gemaakt, door enkel de coördinaten van de piekwaarde en het snijpunt met de drempelwaarde te nemen. De achterflank van de eerste hoogwatergolf kent bijvoorbeeld namelijk twee hellingen die veel steiler zijn de rode lijn. Deze snelle vallen van hoogwater hebben een grote kans om een afschuiving te veroorzaken, terwijl de achterflank nu wellicht wordt geclassificeerd als een langzame val van hoogwater.

Dit kan verklaren waarom er maar 6 hoogwatergolven met een snelle val van hoogwater worden geïdentificeerd in paragraaf 3.5. In praktijk zou er dus veel vaker sprake kunnen zijn van een snelle val van hoogwater. Echter omdat er een rechte lijn wordt getrokken tussen de piek en het snijpunt met de drempelafvoer is de helling van de achterflank (en voorflank) minder steil.

6.2. Tijd afschuiving

Het ministerie van verkeer en waterstaat (2007) stelt dat er bij hoogwatergolven, waarbij de val van hoogwater plaatsvindt in tien dagen of minder, sprake is van een snelle val. Dit wordt echter niet onderbouwd. Is deze waarde empirisch bepaald, berekend met een bepaalde formule, of is dit net als de voorwaardelijke overstromingskans een niet onderbouwde aanname? Het antwoord op deze vraag is onbekend.

Daarnaast, er is dus vastgesteld dat een val van hoogwater moet plaatsvinden binnen tien dagen om beschouwd te worden als een 'snelle val', maar er is niet vastgesteld hoeveel deze val moet bedragen in termen van afvoerafname of waterstandsval. Er wordt momenteel aangenomen dat er altijd een afschuiving, als gevolg van STBU, is, als er sprake is van een snelle val. Momenteel heeft een hoogwatergolf in het script een snelle val, wanneer de tijd tussen de piekafvoer en de drempelwaarde van de golf tien dagen of minder bedraagt. Er wordt vaak een snelle val van hoogwater geconstateerd. Dit is echter vaak het geval bij hoogwatergolven met een lagere piekafvoer. Dit wordt geïllustreerd in het onderstaande figuur 22:



Figuur 22 -Twee hoogwatergolven ter illustratie van snelle val criterium

Wanneer het criterium van 10 dagen voor een snelle val wordt gehanteerd, is er bij hoogwatergolf 1 wel sprake van een snelle val en bij hoogwatergolf 2 niet. De helling van de achterflank (val) van hoogwatergolf twee is echter veel steiler, dan die van hoogwatergolf 1. Daarnaast is de piekafvoer van hoogwatergolf 2 veel groter. Daarom zal er meer water in de dijk infiltreerd zijn bij hoogwatergolf 2, dan bij hoogwatergolf 1, en zal hoogwatergolf 2 sneller een afschuiving veroorzaken als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit. Echter, volgens het script, die het criterium van 10 dagen voor een snelle val hanteert, is er bij hoogwatergolf 1 een afschuiving en bij hoogwatergolf 2 niet. Daarom is de rekenwijze in hoofdstuk 3 (hellingen hoogwatergolven gebruiken) in principe beter dan de methode, die gebruikt is in hoofdstuk 4 (10 dagen voor een snelle val). Echter, door een tekort aan historische data, is er besloten om het criterium 10 dagen voor een snelle val te hanteren in het Matlab script.

Bij het categoriseren van hoogwatergolven in de verschillende types wordt elke enkele hoogwatergolf in de historische data vergeleken met de representatieve standaard hoogwatergolven (figuur 7). Deze hoogwatergolven hebben het maatgevend hoogwater als piekafvoer. De enkele hoogwatergolven worden op basis van hellingen en verhoudingen van de piekafvoeren ingedeeld bij een bepaald type (zie hoofdstuk 3). Een steile helling in deze classificatie van hoogwater blijkt echter niet overeen te komen met een snelle val van hoogwater. Bij de classificatie van enkele hoogwatergolven zijn er immers maar 6 hoogwatergolven met een snelle val van hoogwater, terwijl er bij de selectie van dubbele hoogwatergolven 75 enkele hoogwatergolven zijn waarbij sprake is van een snelle val, doordat het criterium '10 dagen voor een snelle val' wordt gehanteerd. De bovengenoemde factoren zouden kunnen zorgen voor dit grote verschil.

Ook zijn er veel verschillende dijktypes, die zijn opgebouwd uit verschillend materiaal. Elke grondsoort heeft een verschillende doorlatendheid en schuifsterkte. Het zou daarom onverstandig zijn om een generieke waarde voor het tijds criterium voor een afschuiving voor alle dijken te gebruiken.

6.3. Hersteltijd

In paragraaf 4.2 wordt de gemiddelde hersteltijd van een dijktraject bepaald. De hersteltijd schatten is complexer dan in deze paragraaf wordt voorgedaan, omdat het afhankelijk is van heel veel variabelen die ook weer afhankelijk zijn van veel aannames. Een aantal factoren die van belang zijn voor de hersteltijd zijn:

- De grootte van de afschuiving
- De locatie van de afschuiving
- Het materiaal van de dijk
- Het aantal medewerkers dat wordt ingezet om de dijk te herstellen.
- De waterstand
- Etc.

Daarnaast wordt er bij de hersteltijd altijd gekeken naar een dijktraject, en niet naar de doorsnede, zoals bij de rest van het onderzoek wordt gedaan. Deze factoren maken het lastig om de hersteltijd te kwantificeren.

6.4. Validatie

Om te controleren of de methode die gebruikt is algemeen toepasbaar is op andere rivierdoorsnedes in Nederland, zou het goed zijn om het model, om enkele en dubbel hoogwatergolven te identificeren en analyseren, te valideren. Het is wenselijk om de validatie uit te voeren aan de hand van peilbuismetingen en andere data van meetstations tussen Tiel en Waardenburg

Deze meetstations liggen aan de Waal, aan de bovenrivier, dus er is nog steeds geen invloed van getijden. De Waal is een afsplitsing van de Rijn bij Lobith. Dus als er hoogwatergolven bovenstrooms

bij Lobith gemeten worden, dan zou dit ook gemeten moeten worden bij Tiel-Waardenburg. Uiteraard is er, door plaatselijke neerslag en kleine hoeveelheden water dat instroomt van de Maas, variatie in de vorm van de afvoergolven. Echter kan wel worden gesteld dat, wanneer er sprake is van een hoogwatergolf bij Lobith, dat deze hoogwatergolf, na een bepaalde vertragingstijd, ook gemeten zal worden bij Tiel-Waardenburg. Er zijn immers geen sluizen tussen Lobith en Waardenburg.

Daarnaast heeft een medestudent, Nick van de Voort, zijn onderzoek uitgevoerd aan de hand van peilbuismetingen bij Heesselt, omdat daar sprake is van een homogene dijk (opgebouwd uit slechts een grondsoort). Voor zijn onderzoek heeft hij standaard representatieve schematisaties van verschillende types hoogwatergolven bij maatgevend hoogwater nodig. Met dit onderzoek kunnen deze worden afgeleid. Zijn resultaten zouden dit onderzoek ook kunnen bevorderen, doordat zijn onderzoek betrekking heeft tot freatische lijnen in dijken. De freatische lijn bepaalt wanneer een afschuiving van het dijktaalud plaatsvindt.

Bij Heesselt zijn peilbuismetingen gedaan, maar het is geen officieel meetstation, waardoor de afvoeren en waterhoogtes niet bekend zijn. Daarom zijn deze gegevens opgevraagd bij Tiel. Het studiegebied is weergegeven in het onderstaande figuur 23.



Figuur 23 - mogelijke locatie validatie (Tiel-Waardenburg, Waal)

De informatie die nodig was op de locatie tussen Tiel-Waardenburg om de validatie uit te voeren is als volgt:

- Gemiddelde waterstandsverloop – deze is bemachtigd met behulp van de waterstandsverloop van Hydra-NL.
- Toetspeil – de afvoer waarvoor de dijk ontworpen is, is berekend in samenwerking met Nick van de Voort, aan de hand van de hoogte van dijk.
- Drempelwaarde – de afvoer waarbij het water de teen van de dijk raakt is berekend in samenwerking met Nick van de Voort.

- Piekwaarde – de afvoer die eens in de twee jaar voorkomt is geschat aan de hand van de volgende verhouding: $\left(\frac{drempelwaarde_{Heesselt}}{drempelwaarde_{Lobith}}\right) * piekwaarde_{Lobith}$
- Hersteltijd – er is aangenomen dat de hersteltijd hetzelfde is als bij Lobith.
- Tijds criterium snelle val – er is aangenomen dat dit hetzelfde is als bij Lobith.

De validatie is wel uitgevoerd om het onderzoek van Nick te bevorderen, maar wordt momenteel niet betrouwbaar genoeg geacht om te functioneren als validatiemateriaal. Uit de beperkt beschikbare historische data kwamen namelijk maar zeven hoogwatergolven, die allen van hetzelfde type waren. Hierdoor wordt niet de gehele bandbreedte onderzocht en daarom is het ongeschikt voor validatie. Om de validatie beter uit te voeren moet er grondig onderzoek worden gedaan naar de hierboven genoemde missende informatie. Ook dient er voor de betrouwbaarheid voldoende historische data beschikbaar te zijn. Wanneer er voldoende data is, zodat er ten minste 90 hoogwatergolven worden geïdentificeerd, dan wordt de validatie wel betrouwbaar geacht. In het onderzoek bij Lobith zijn er namelijk ook 90 enkele hoogwatergolven en op deze manier zijn de resultaten beter te vergelijken.

7. Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt er een korte samenvatting gegeven van de resultaten van het onderzoek. Op basis van deze resultaten wordt er een aanbeveling gedaan voor het doen van vervolg onderzoek.

7.1. Conclusie

In de conclusie wordt een korte samenvatting van de resultaten gegeven en zal er een terugkoppeling naar het initiële doel van het onderzoek worden gegeven. Dit onderzoek is veelal uitgevoerd bij Lobith, maar de stappen die beschreven zijn in dit verslag kunnen ook worden uitgevoerd op andere locaties in het bovenrivierengebied. Betrouwbare validatie op een andere locatie is echter nog niet uitgevoerd. Als dit wel gebeurt, kan onderzocht worden of het onderzoek daadwerkelijk algemeen toepasbaar voor bovenrivieren in Nederland is.

Het doel van het onderzoek was om aan te tonen dat de kans op falen gegeven instabiliteit daadwerkelijk conservatief is op basis van historische data en de representatieve schematisaties van verschillende types hoogwatergolven. In dit onderzoek is aangetoond dat deze kans inderdaad conservatief is. Op basis van historische data kan er geconcludeerd worden dat de kans circa 2,5% is in plaats van 10%. Volgens het model was er 75 keer sprake van een afschuiving als gevolg van een snelle val van hoogwater. Slechts twee keer werd er binnen de hersteltijd van het dijktraject een tweede hoogwatergolf gemeten, die kon zorgen voor dijkfalen als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit.

De onderzoeksvragen, die aan het begin van het onderzoek zijn opgesteld, worden ook beantwoord in de conclusie. De hoofdvraag is als volgt:

Hoofdvraag: wat zijn schematisaties van verschillende types hoogwatergolven, representatief voor de kans op falen met betrekking tot buitenwaartse macro (in)stabiliteit?

In dit onderzoek zijn eerst de eigenschappen van enkele hoogwatergolven benoemd. Er is een Matlab script geschreven om de enkele hoogwatergolven in de historische data te identificeren. Verder is er onderzoek gedaan naar negen verschillende types hoogwatergolven. Er zijn hiervoor verschillende representatieve schematisaties afgeleid, die gebruikt kunnen worden voor macrostabiliteit berekeningen om de freatische lijn in een dijk te berekenen. De historische data is vervolgens gebruikt om een inschatting te maken van welk van de negen types hoogwatergolven het meeste voorkomt en waar dus het meeste rekening mee dient gehouden te worden. Vooral golven met een gemiddelde val van hoogwater komen vaak voor; het type voor de stijging varieert meer, wanneer er gekeken wordt naar de historische data.

Vervolgens is de gekwantificeerde definitie van een dubbele hoogwatergolf, die dijkfalen als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit kan veroorzaken, opgesteld. Deze informatie is ook geïmplementeerd in het Matlab script om automatisch dubbele hoogwatergolven in de historische data te herkennen. De analyse van de dubbele hoogwatergolven leidt uiteindelijk tot een schatting van de voorwaardelijke overstromingskans van 2,5%.

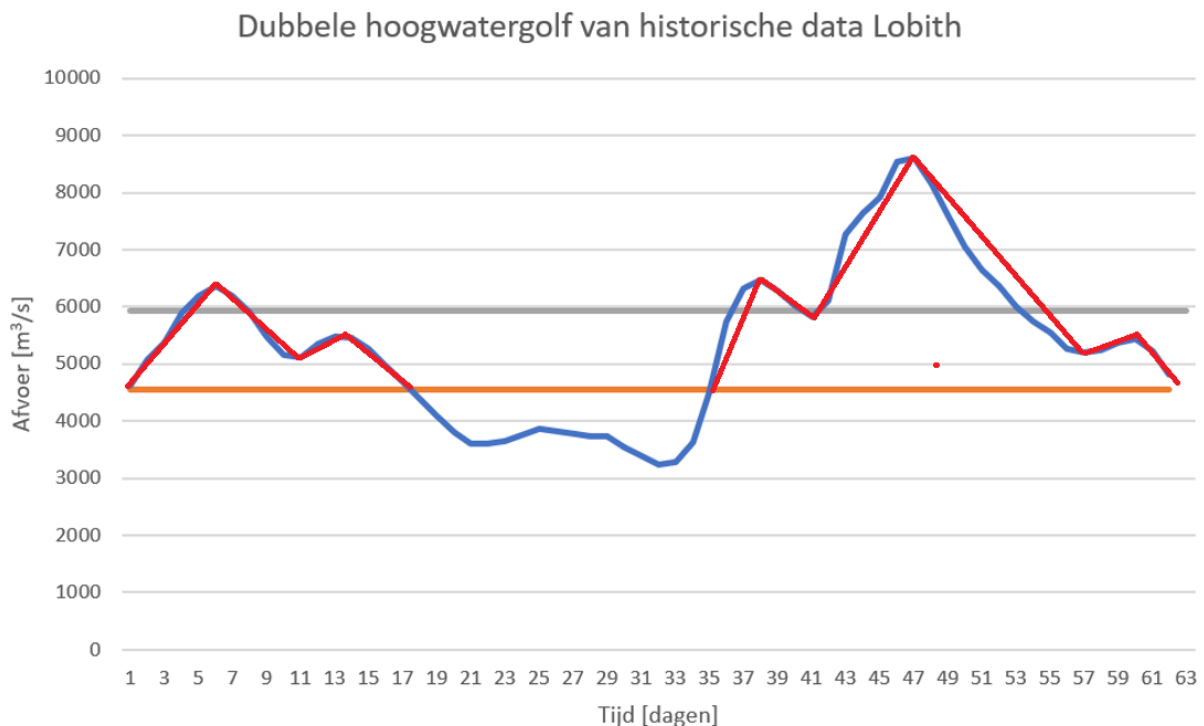
De hoofdvraag en de bijbehorende deelvragen van het onderzoek zijn beantwoord. Er zijn namelijk schematisaties van verschillende types hoogwatergolven opgesteld, die gebruikt kunnen worden om een schatting van de kans op dijkfalen, gegeven een afschuiving als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit, te geven.

7.2. Aanbevelingen

In deze paragraaf zullen er concrete adviezen worden gegeven aan Sweco en andere instanties. Er zullen suggesties worden gedaan voor het doen van eventueel vervolgonderzoek. Uit de discussie blijkt namelijk dat er nog een aantal concrete verbeterpunten zijn op dit onderzoek. In deze paragraaf wordt beschreven hoe deze verbeteringen doorgevoerd kunnen worden.

7.2.1. Categorisatie van types hoogwatergolven

Zoals blijkt uit paragraaf 6.1 van de discussie, zijn er nog verbeterpunten aan de methode die wordt gebruikt om enkele hoogwatergolven te selecteren. Er dient een betere inschatting gemaakt te worden van de hellingen van hoogwatergolven uit de historische data. Een verbetering van deze methode wordt geïllustreerd in het onderstaande figuur 24:



Figuur 24 - voorgestelde methode voor categorisering types hoogwatergolven

Voor de voorflank geldt: bereken de helling van de drempelwaarde tot op het moment dat er een val plaatsvindt voordat de piek van de hoogwatergolf bereikt is. Bereken de volgende helling wanneer de stijging van hoogwater weer begint. Vergelijk de hellingen. De steilste helling is maatgevend voor het bepalen van het type hoogwatergolf.

Voor de achterflank geldt: bereken de helling van de piekwaarde van de hoogwatergolf tot op het moment dat er een stijging plaatsvindt voordat de drempelwaarde bereikt is. Bereken de volgende helling wanneer de val van hoogwater weer begint. Vergelijk de hellingen. De steilste helling is maatgevend voor het bepalen van het type hoogwatergolf.

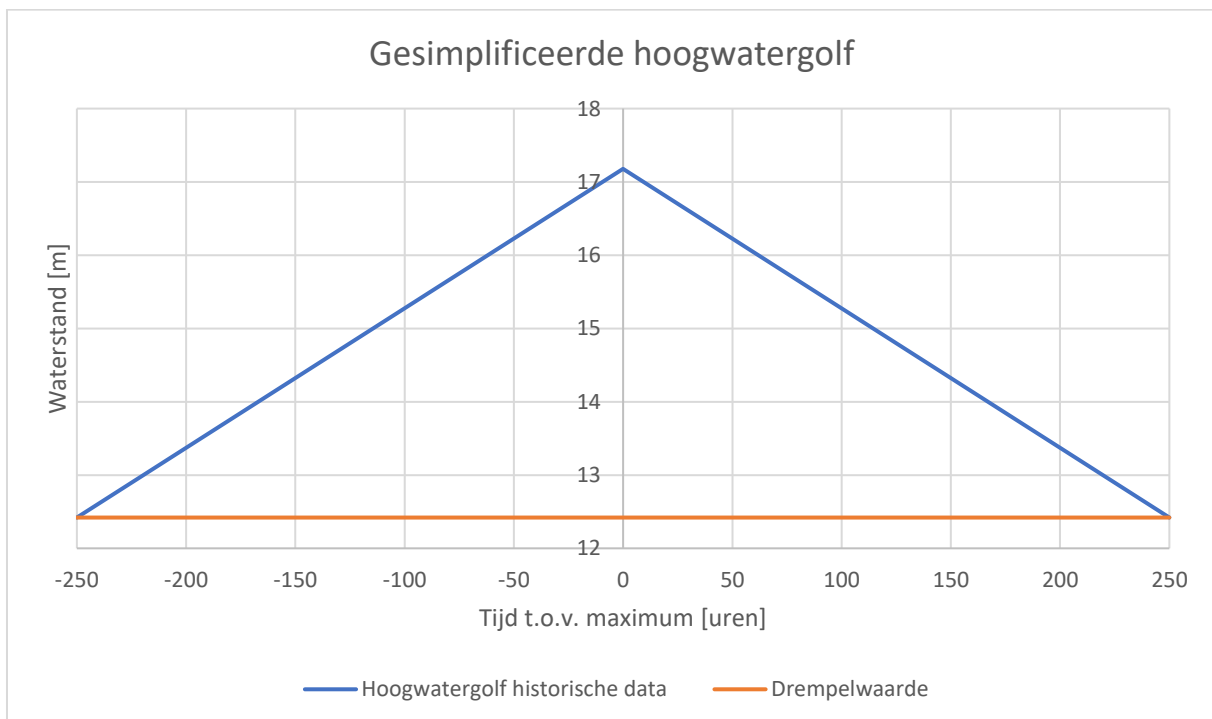
Dit is echter wel een uitdaging om te programmeren in Matlab of andere simulatiesoftware en dat is de reden dat het niet uitgevoerd is. Wanneer er voldoende tijd is, is dit wel degelijk een realistische oplossing. Als dit wordt uitgevoerd kan er een nauwkeurigere schatting worden gemaakt van de verschillende types hoogwatergolven in de historische data. Met name de hoogwatergolven met een snelle val zijn relevant voor dit onderzoek. Deze hoogwatergolven zullen dan vaker geïdentificeerd worden, omdat er sprake kan zijn van twee steile hellingen (smalle golfvorm), in plaats van een

geleidelijke helling (brede golfvorm). Zie hiervoor de helling van een achterflank van de eerste hoogwatergolf in figuur 24.

7.2.2. Tijd afschuiving

Zoals blijkt uit de gevoeligheidsanalyse, hebben veranderingen in het tijds criterium van een snelle val (10 dagen) groot effecten op het aantal enkele hoogwatergolven, waarbij sprake is van een snelle val, en het aantal dubbele hoogwatergolven, waarbij dijkfalen, als gevolg van STBU, kan plaatsvinden. In paragraaf 6.2 van de discussie blijkt dat er veel onzekerheid is omtrent deze parameter en dat het model daardoor onverwachte en onjuiste hoogwatergolven kan bestempelen als hoogwatergolven die de oorzaak zijn van afschuivingen. Het is daarom van belang dat er grondig onderzoek wordt gedaan naar deze parameter.

Op basis van literatuur is er momenteel sprake van een snelle val van hoogwater, wanneer de tijd tussen de piekafvoer en de drempelwaarde van een hoogwatergolf tien dagen of minder bedraagt. De benodigde afvoerafname of waterstandsval wordt niet gespecificeerd. Op basis van dit onderzoek, wordt aanbevolen om dit wel te specificeren, door een snelle val van hoogwater gelijk te stellen aan de helling van de achterflank van een smalle standaardgolfvorm. Deze standaard golfvorm heeft het maatgevend hoogwater als piekwaarde en zal daarom waarschijnlijk nooit gemeten worden in historische data. Daarom zal dezelfde methode als in paragraaf 3.1 worden toegepast: stel dat de piekafvoer van een hoogwatergolf $12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ en MHW $16\,000\text{ m}^3/\text{s}$ is, dan wordt de helling van de smalle standaardgolfvorm vermenigvuldigd met de factor $12000/16000$. Wanneer de helling van de hoogwatergolf uit de historische data kleiner (dus steiler) of gelijk is aan de helling van de smalle standaardgolfvorm vermenigvuldigd met de verhouding van de afvoeren ($12000/16000$), dan is er sprake van een snelle val van hoogwater. Dit wordt geïllustreerd in het onderstaande voorbeeld met een gesimplificeerde hoogwatergolf in figuur 25. De berekeningen zijn weergegeven in het grijze vlak.



Figuur 25 - gesimplificeerde hoogwatergolf voor voorbeeldberekening

Uit de empirisch bepaalde formule uit paragraaf 3.2 blijkt dat:

$$4545 \frac{m^3}{s} = 12,42 m, \quad 12\,000 \frac{m^3}{s} = 17,18 m, \quad 16\,000 \frac{m^3}{s} = 18,70 m$$

De helling van de gesimplificeerde hoogwatergolf wordt als volgt berekent:

$$\text{Helling hoogwatergolf} = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{17,18 m - 12,42 m}{0 \text{ dag} - (\frac{250}{24}) \text{ dag}} = -0,45676 \frac{m}{dag}$$

Uit tabel 4 uit paragraaf 3.3 blijkt dat er sprake is van een smalle golfvorm bij een helling kleiner dan -0.51563 m/dag.

De golfvorm uit deze tabel heeft echter MHW als piekwaterstand. Om de helling van de hoogwatergolf uit de historische data te kunnen vergelijken met deze golfvorm, wordt de onderstaande stap genomen:

$$\text{Helling smalle golfvorm} = \frac{12000}{16000} * -0,52 \frac{m}{dag} = -0,39 \frac{m}{dag}$$

De helling van de hoogwatergolf uit figuur 25 (-0,46 m/dag) is kleiner dan de helling van de smalle golfvorm nadat het vermenigvuldigd is met de factor 12000/16000 (-0,39 m/dag).

Daarom is er bij de hoogwatergolf uit figuur 25 sprake van een **snelle val van hoogwater**.

Let op: de tijd van de val bedraagt meer dan 10 dagen (250 uur), maar er is dus wel sprake van een snelle val van hoogwater!

In dit geval wordt er echter nog steeds aangenomen dat een afschuiving altijd plaatsvindt bij het optreden van een snelle val. Het zou beter zijn om het voorkomen van een afschuiving te koppelen aan de hoogte van de freatische lijn in de dijk, omdat dit de oorzaak is van de daadwerkelijke afschuiving, na een val van hoogwater. Nick van de Voort heeft onderzoek naar freatische lijnen in verschillende dijktypes. Zijn onderzoek kan wellicht gebruikt worden om de onderstaande vragen die betrekking hebben op dit onderzoek te beantwoorden:

- Bij welke waterspanning is de schuifsterkte in de dijk verwaarloosbaar?
- Welk tegenwerkend moment van de dijk is nodig om afschuiven te voorkomen?
- Hoeveel dagen duurt het voordat de freatische lijn dusdanig is gedaald dat de schuifsterkte van de dijk voldoende is om afschuiven te voorkomen zonder dat hier een tegenwerkend moment voor nodig is?

Als deze vragen beantwoord worden, kan er een betere inschatting worden gemaakt van wanneer een afschuiving plaatsvindt. Op deze wijze kunnen dubbele hoogwatergolven, die kunnen leiden tot dijkfalen, als gevolg van een afschuiving na de eerste hoogwatergolf door STBU, beter worden geïdentificeerd.

7.2.3. Hersteltijd

Door een interview met een dijkbeheerder af te nemen, is er een stap in de juiste richting gezet om de gemiddelde hersteltijd van een dijktraject te bepalen. Er zouden echter nog meer dijkbeheerders geïnterviewd kunnen worden om hun expertise te bundelen. Deze data kan dan vergeleken worden met metingen en experimenten. Als resultaat zou er uiteindelijk een (empirische) formule opgesteld kunnen worden, waarin de factoren, die invloed hebben op de hersteltijd van een dijktraject, benoemd worden. De hersteltijd is immers een van de belangrijkste parameters voor het bepalen van het aantal dubbele afvoergolven, die zouden kunnen leiden tot dijkfalen door buitenwaartse macrostabiliteit.

8. Verwijzingen

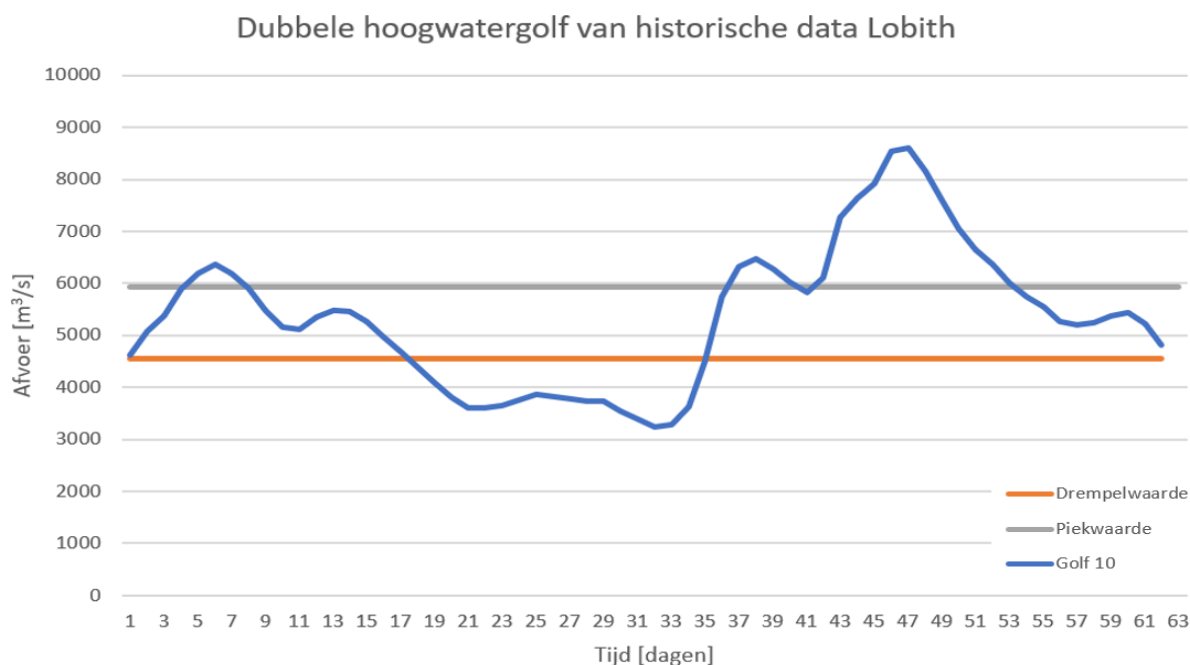
- Chbab, H. (2017). Hydraulische Belastingen Rijntakken en Maas. Opgehaald van https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132669/1230087-003-hye-0001-v4-r-hydraulische_belastingen_rijntakken_en_maas_def3.pdf
- Deltares. (2018). Definities. Opgehaald van <http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Definities>
- Deltares. (2018). Faalmechanisme. Opgehaald van <http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Faalmechanisme>
- ENW. (2007). ADDENDUM BIJ HET TECHNISCH RAPPORT WATERKERENDE GRONDCONSTRUCTIES. Opgehaald van <https://library.wur.nl/ebooks/hydrotheek/1859371.pdf>
- ENW. (2017). Grondslagen voor Hoogwaterbescherming. Opgehaald van <https://www.enwinfo.nl/images/pdf/Grondslagen/Grondslagen-druk2-lowres-spread.pdf>
- Geerse, C. (2005, september). Hydraulische randvoorwaarden 2006 benedenrivierengebied. Opgehaald van <https://docplayer.nl/16241621-Hydraulische-randvoorwaarden-2006-benedenrivierengebied.html>
- Geerse, C. (2005). Hydraulische randvoorwaarden 2006 benedenrivierengebied : toelevering afvoergolven voor bepaling waterstandsverlopen en snelle val. Opgehaald van <http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/15692/2005-125x.pdf>
- Geerse, C., Stijnen, J., & Kolen, B. (2007, december). Richtlijn normering compartimenteringskeringen. Opgehaald van https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/130420/ork_2007-03_richtlijn_normering_compartimenteringskeringen.pdf
- Ham, G. v. (2010). Beoordeling Indirecte faalmechanismen. Opgehaald van <http://edepot.wur.nl/396441>
- helpdesk water. (2010). Uitvoer betrekkinglijnen. Opgehaald van https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132659/uitvoer_betrekkinglijnen2010_h-lobith_670-1750_10_per_peilschaal.xls
- Jongejan, R. (2019, april 2). Probabilistische analyse macrostabiliteit buitenwaarts (STBU).
- Maris, H. (2019, april 24). Factsheet Macrostabiliteit.
- Ministerie van verkeer en waterstaat. (2007). TECHNISCH RAPPORT ONTWERPBELASTINGEN VOOR HET RIVIERENGEBIED. Opgehaald van <https://library.wur.nl/ebooks/hydrotheek/1859367.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2019). Waterinfo. Opgehaald van <https://waterinfo.rws.nl/#!/nav/expert/>
- Risicobenadering Kennisplatform. (2018, maart 15). Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit.
- STOWA. (2015). LEIDRAAD TOETSEN OP VEILIGHEID REGIONALE WATERKERINGEN. Opgehaald van <https://waterwerken.org/wp-content/uploads/2018/04/STOWA-MODULE-introductie-met-bijlagen.pdf>
- 't Hart, R., De Bruijn, H., & de Vries, G. (2016). Fenomenologische beschrijving. *Faalmechanismen WTI*. Deltares. Opgehaald van https://handreikinggrasbekleding.nl/wp-content/uploads/2018/03/WBI2017-fenomenologische_beschrijving.pdf

- Trul, H. (2016, mei). Performance of GRADE in simulating flood wave characteristics in the Rhine basin. Enschede. Opgehaald van <https://www.utwente.nl/en/et/wem/education/msc-thesis/2016/trul.pdf>
- van Hoven, A. (2016, februari). Schematiseringshandleiding voor toetsing grasbekleding. Opgehaald van https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/137027/schematiseringshandleiding_gras_versie_maart_2016.pdf
- van Montfoort, M. (2018, januari). Safety assessment method for macrostability of dikes with high foreshores. Opgehaald van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:39088f9a-acde-4d14-9eef-c63883829766/datastream/OBJ/download>
- VTV. (2006). Voorschrift Toetsen op Veiligheid. *Katern 5 - Dijken en Dammen*. Opgehaald van https://www.grensmaas.nl/wp-content/uploads/2014/10/141202-VTV2006_uitsnede-beschrijving-faalmechanismen.pdf
- Walker, W. (1993, januari 1). Toetsing uitgangspunt rivierdijkversterkingen - deelrapport 1, veiligheid tegen overstromingen. Opgehaald van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A310f8461-50f5-4530-83aa-2cb43712d183>
- Waterschap Peel en Maasvallei. (2017, januari 10). Dijkverbetering & Hoogwaterbescherming. Opgehaald van <https://www.ensie.nl/waterschap-peel-en-maasvallei/hoogwatergolf>
- Waterschap Rivierenland. (2018). Redeneerlijn buitenwaartse stabiliteit (STBU). Opgehaald van https://www.povmacrostabiliteit.nl/wp-content/uploads/2015/03/Eisen-voor-uitvoering-dijkversterkingsprojecten_POVM.pdf
- Waterwet. (2009, januari 2009). art 1.1. Opgehaald van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2018-07-01>
- WBI. (2016, december 1). Schematiseringshandleiding macrostabiliteit. Opgehaald van https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132667/05_shmacrostabiliteit_31jan2017.pdf
- WBI. (2017). Waterstandsverlopen Tool. (H. water, Samensteller) Opgehaald van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/omgevings/omgevings/waterstandsverlopen/contact/download/>
- Zwanenburg, C., van Duinen, A., & Rozing, A. (2013). Technisch Rapport Macrostabiliteit. Opgehaald van <https://edepot.wur.nl/368735>

9. Bijlagen

Bijlage A – voorbeeld identificatie enkele hoogwatergolven

De meetgegevens van de dubbele hoogwatergolf in het onderstaande figuur 26 zijn hiervoor gebruikt. De bijbehorende afvoermetingen zijn weergegeven in tabel 8.



Figuur 26 - hoogwatergolven bij Lobith

Tabel 8 - afvoermetingen bij Lobith

Dag 1 t/m 15	4610	5080	5375	5895	6190	6365	6190	5910	5475	5150	5125	5360	5475	5460	5255
Dag 16 t/m 30	4960	4690	4385	4085	3810	3600	3600	3650	3755	3855	3820	3775	3745	3745	3550
Dag 31 t/m 45	3390	3230	3290	3630	4500	5730	6325	6470	6275	6020	5820	6105	7275	7630	7915
Dag 46 t/m 60	8530	8610	8145	7605	7055	6635	6365	6005	5745	5535	5265	5200	5240	5375	5435
Dag 61 t/m 62	5215	4805													

Allereerst wordt de meetreeks dus getest op het eerste criterium: de drempelwaarde. Als afvoermetingen boven de drempelwaarde ($4545 \text{ m}^3/\text{s}$) liggen, dan kunnen ze onderdeel zijn van een hoogwatergolf. Zodra de afvoer weer onder de drempelwaarde komt, dan is dat het einde van een enkele afvoergolf. Alle metingen boven de drempelwaarde zijn groen gemarkeerd in de onderstaande tabel 9:

Tabel 9 - afvoermetingen bij Lobith boven drempelwaarde in m^3/s

Dag 1 t/m 15	4610	5080	5375	5895	6190	6365	6190	5910	5475	5150	5125	5360	5475	5460	5255
Dag 16 t/m 30	4960	4690	4385	4085	3810	3600	3600	3650	3755	3855	3820	3775	3745	3745	3550
Dag 31 t/m 45	3390	3230	3290	3630	4500	5730	6325	6470	6275	6020	5820	6105	7275	7630	7915
Dag 46 t/m 60	8530	8610	8145	7605	7055	6635	6365	6005	5745	5535	5265	5200	5240	5375	5435
Dag 61 t/m 62	5215	4805													

In de dataset zijn twee tijdsperiodes waar de drempelwaarde wordt overschreden. Deze aaneengesloten metingen worden tijdelijk opgeslagen als twee losse golven. Van deze twee losse golven wordt vervolgens de maximale afvoer bepaald. De maximale afvoeren zijn gemarkeerd in oranje in de onderstaande tabel 10:

Tabel 10 - afvoergolven bij Lobith met piekafvoer

Golf 1	4610	5080	5375	5895	6190	6365	6190	5910	5475	5150	5125	5360	5475	5460	5255
	4960	4690													
Golf 2	5730	6325	6470	6275	6020	5820	6105	7275	7630	7915	8530	8610	8145	7605	7055
	6635	6365	6005	5745	5535	5265	5200	5240	5375	5435	5215	4805			

Wanneer deze maximale afvoer boven de minimaal benodigde piekafvoer is ($5940 \text{ m}^3/\text{s}$), wordt een golf gezien als een hoogwatergolf. Golf 1 en 2 worden dus beiden gezien als een hoogwatergolf in het Matlab script dat hiervoor wordt gebruikt.

Bijlage B – berekening window volgens (Trul, 2016)

The length of the window is estimated for each sub-basin separately. This is done by assessing the correlation between the discharges of subsequent time steps of the flood events. The assumption is that flood waves only exists of discharges that are correlated to each other. This implies that discharges below the threshold can only belong to the flood wave if they are temporarily correlated to the last previous discharge above the threshold. Autocorrelation, which can be calculated using equation (4), is used for this analysis.

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (Q_i - \bar{Q})(Q_{i+k} - \bar{Q})}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

r = autocorrelation

Q = discharge (m³/s)

k = lag (days)

N = total number of discharge time steps

i = index number of the discharge time step

From the autocorrelation a correlation length can be calculated, which indicates from which lag on no significant correlation will be found. The correlation length estimated for discharge values above Q5 is of interest, however autocorrelation can only be calculated for continuous time series. Therefore the correlation length of the whole time series is used to estimate the correlation length for the discharges above Q5.

The way the correlation length can be calculated depends on the function of the autocorrelation. It seems that the autocorrelation, calculated for the continuous discharges of the different sub-basins, decays exponentially, see figure 8. An exponential temporal correlation function can therefore be assumed, because of this a comparable procedure as is used by Booij (2002) is followed. The assumed exponential temporal correlation function can be seen in equation (5).

$$\rho(\tau) = e^{\left(\frac{-\tau}{\lambda}\right)} \quad (5)$$

$\rho(\tau)$ = the autocorrelation value for a specific lag

τ = lag in days

λ = temporal correlation length in days

The temporal correlation length can be found by substituting equation (5) in equation (6) as is done by Whitehouse (2011).

$$\lambda = \int_0^{\infty} |\rho(\tau)| d\tau \quad (6)$$

By doing so the temporal correlation length is found to be the length corresponding to an autocorrelation value of e^{-1} . Therefore the correlation length is the lag for which the autocorrelation becomes smaller than e^{-1} . In figure 8 the correlogram of the discharge at Lobith along with the line representing an autocorrelation of e^{-1} is shown as an example.

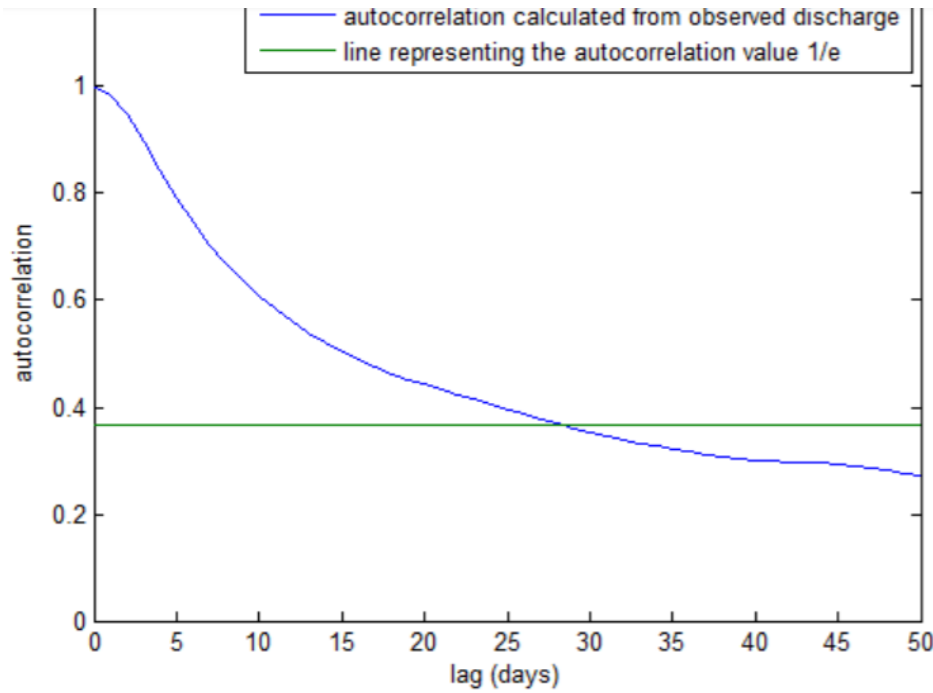


Figure 8 Correlogram of the discharge measured at Lobith

To estimate the correlation length belonging to the discharges above the threshold, it is assumed that the ratio in the standard deviation between the continuous time series and the discharge above Q5 is also the ratio in correlation length. The underlying assumption is that the larger the variability the smaller the autocorrelation. The physical assumption behind this is that more fluctuation in the flow leads to less correlation between discharges at subsequent time steps. This is however not always the case, if for example all discharges in a time series are multiplied by the same value, then the standard deviation increases or decreases, whereas the autocorrelation stays the same. Equation (7) shows how the correlation length and thus the window is estimated.

$$\lambda_{Q_5} \approx \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_5}} * \lambda_Q \quad (7)$$

λ_{Q_5} = estimated correlation length for discharges exceeding Q5

σ_{Q_5} = standard deviation of discharges exceeding Q5

σ_Q = standard deviation of continuous discharge series

λ_Q = correlation length of continuous discharge series

The windows calculated for the different sub-basins are: 27 days at Lobith, 23 days at Andernach, 15 days at Cochem, 18 days at Frankfurt, 5 days at Rockenau, 71 days at Rekingen and 64 days at Untersiggenthal.

Bijlage C – interview met dijkbeheerder

Datum: 6 juni 2019

Locatie: gesprek via skype (ging niet door, uiteindelijk zijn de vragen telefonisch gesteld)

Vragen opgesteld door: Ruben van der Zaag

Vragen gesteld door: Ruben van der Zaag (uiteindelijk toch door Ruud Raaijmakers)

Vragen gesteld aan: een dijkbeheerder

Vraag 1: hoe wordt de afschuiving van een dijktraludesignaleerd?

Bij hoogwater wordt de dijk geschouwd. De dijk wordt dan beoordeeld op mogelijke scheuren in de dijk of het wegdek. Bewoners kunnen ook afschuivingen van het dijktraludesignaleren en doorgeven aan de beheerder.

Vraag 2: als een afschuiving plaats heeft gevonden, hoe ziet het herstelproces van het dijktraject er dan uit?

Allereerst worden er noodmaatregelen getroffen. Een veel voorkomende noodmaatregel is om de afschuiving tijdelijk te herstellen met grond en de dijk te stabiliseren met geotextiel. Vervolgens wordt er gewacht totdat de grasbekleding van de dijk terug groeit. Pas dan zal het geotextiel verwijderd worden. Gras groeit meestal sneller in de zomermaanden.

Vraag 3: wat is de gemiddelde hersteltijd van een dijktraject?

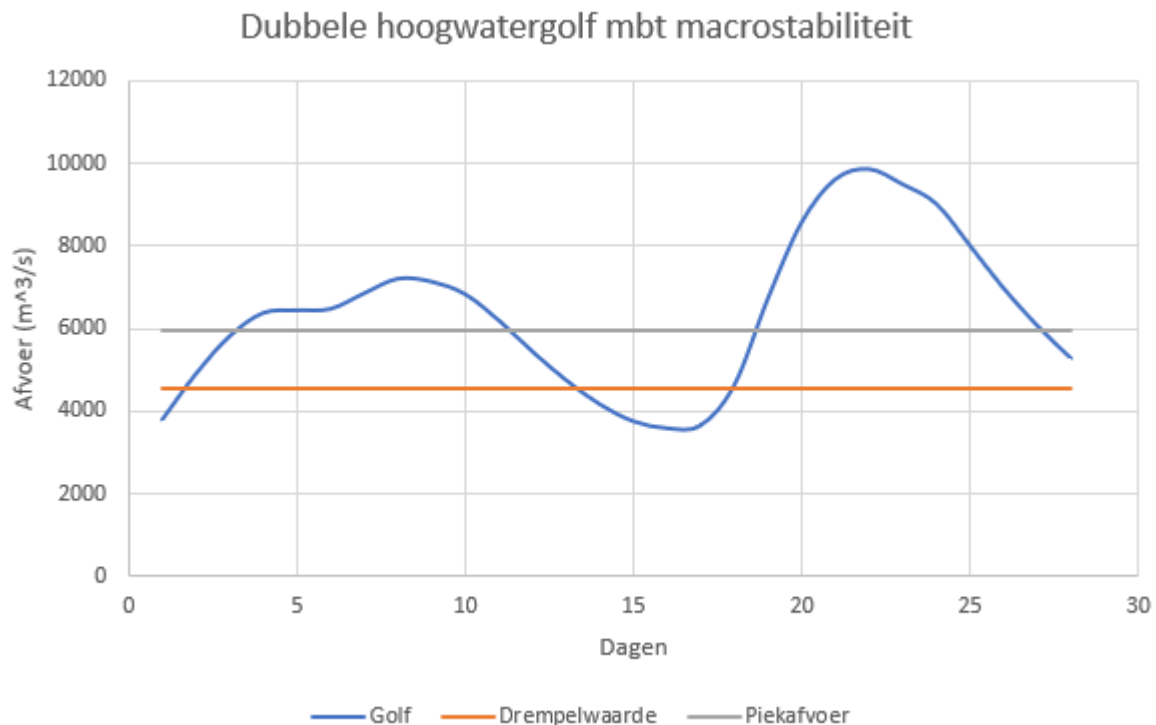
Het kan soms maanden duren voordat de dijk weer helemaal hersteld is, omdat de gras bekleding moet groeien. Echter, noodmaatregelen kunnen ook dijkfalen voorkomen. Het inbrengen van grond en de stabilisatie met geotextiel duurt gemiddeld tussen de 10 en 20 dagen.

Vraag 4: Van welke factoren is deze hersteltijd afhankelijk?

De hersteltijd is afhankelijk van de omvang en de locatie van de afschuiving. Daarnaast is het afhankelijk van de waterstand.

Bijlage D – voorbeeld identificatie dubbele hoogwatergolven

Een dubbele hoogwatergolf is weergegeven in figuur 27. De bijbehorende afvoermetingen staan in tabel 11. In deze tabel zijn alle metingen boven de drempelwaarde weer groen gemarkeerd en de piekafvoer van elke hoogwatergolf oranje.



Figuur 27 - dubbele hoogwatergolf met betrekking tot STBU

Tabel 11 - afvoermetingen dubbele hoogwatergolven in m^3/s

Dag 1 t/m 15	3794	4901	5807	6374	6439	6472	6848	7201	7131	6829	6196	5444	4753	4170	3758
Dag 16 t/m 28	3590	3660	4634	6726	8562	9602	9850	9481	9012	8003	6970	6070	5279		

Door de implementatie van het script van het voorgaande hoofdstuk over enkele hoogwatergolven, worden deze twee hoogwatergolven eerst gezien als enkele hoogwatergolven (zie tabel 12). Er zal eerst worden nagegaan of er sprake is van een snelle val. Er is sprake van een snelle val wanneer de tijd tussen de piekafvoer en de laatste afvoermeting van de golf tien dagen of minder bedraagt.

Tabel 12 - afvoermetingen hoogwatergolven voor bepalen snelle val

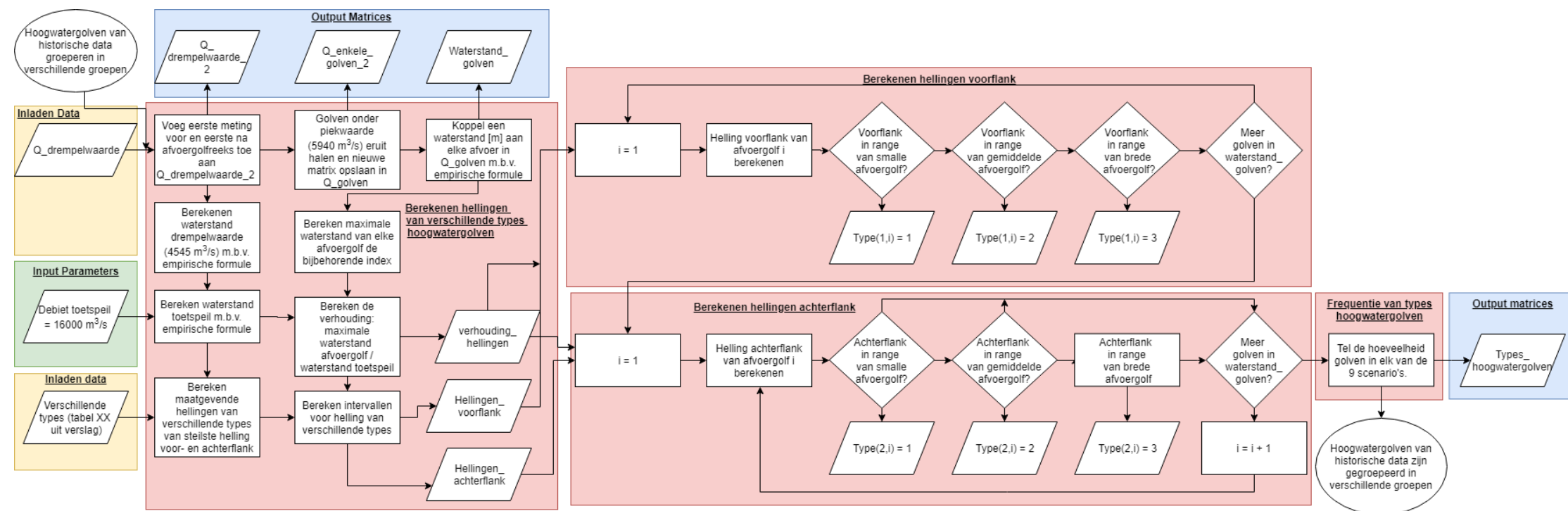
Golf 1	4901	5807	6374	6439	6472	6848	7201	7131	6829	6196	5444	4753
Golf 2	4634	6726	8562	9602	9850	9481	9012	8003	6970	6070	5279	

Bij golf 1 is deze tijd vijf dagen en bij golf 2 is het zes dagen. Bij beide golven is er dus sprake van een snelle val van hoogwater. De kans dat er een afschuiving plaatsvindt bij deze golven die herstelt moet worden, is dus aanwezig.

Er zal vervolgens voor beide golven worden gecontroleerd of er een tweede hoogwatergolf komt binnen de hersteltijd van het dijktraject (window van 27 dagen). Zoals blijkt uit tabel 11, zitten er

slechts vijf dagen tussen golf 1 en golf 2. Dus, golf 1 en 2 zijn onderdeel van een dubbele hoogwatergolf die kan zorgen voor dijkfalen als gevolg van buitenwaartse macrostabiliteit. Golf 1 zorgt dan voor de afschuiving en golf 2 zorgt voor dijkfalen.

Bijlage E – flowchart types hoogwatergolven



Figuur 28 - flowchart analyse types hoogwatergolven

Bijlage F – Matlab Script

Inhoud van het script:

- Inladen data
- Parameters
- Enkele hoogwatergolven selecteren (Drempelwaarde)
- Enkele hoogwatergolven selecteren (Piekafvoer)
- Dubbele hoogwatergolven selecteren (m.b.t. buitenwaartse macrostabiliteit)
- Verschillende types hoogwatergolven (gebaseerd op enkele hoogwatergolven) (intervallen standaard hellingen berekenen)
- Voorflank berekenen
- Achterflank berekenen
- Verschillende types golven groeperen
- Gevoeligheidsanalyse

Benodigde bestanden om het script te runnen:

- Q_lobith.txt – afvoergevens Lobith + data
- Verschillende_types.txt – verschillende standaardgolven bij Lobith

```
clear, clc
```

Inladen data

```
Debieten_Lobith = load('Q_lobith.txt'); % Debieten en datums bij Lobith inladen
Q_lobith = Debieten_Lobith(:,2); % Debiet opslaan in vector
delim = '\t'; % tab delimited
fid = fopen('Q_lobith.txt'); % open het tekstbestand
dataIn = textscan(fid,'%s %n','Delimiter',delim); % lees het tekstbestand
fclose(fid); % sluit het tekstbestand
Dates = datenum(dataIn{1},'dd-mm-yyyy'); % omzetten naar matlab datum nummers
verschillende_types = load('verschillende_types.txt'); %Verschillende types
representatieve hoogwatergolven Lobith inladen
```

Parameters

```
drempelwaarde = 4545; %minimale afvoer voor hoogwatergolf in m^3/s
piekwaarde = 5940; %minimale piekafvoer in m^3/s
window = 27; %tijd van afhankelijkheid in dagen
tijd_afschuiving = 10; %tijd in dagen. Maximale tijd tussen piek en einde eerste
afvoergolf voordat een afschuiving plaatsvind.
Q_max = 16000; %maximale afvoer bij Lobith (bij het Toetspeil)
afschuiving_sv = 1; %kans op afschuiving bij een snelle val
```

Enkele hoogwatergolven selecteren (Drempelwaarde)

```
j = 1; %voor hoogwatergolf matrix (volgende meting/dag in hoogwatergolf)
k = 1; %voor hoogwatergolf matrix (volgende hoogwatergolf)
Date_1 = Dates(1);
for i = 1 : length(Q_lobith)
    if Q_lobith(i) >= drempelwaarde
```

```

        if j == 1
            Q_drempelwaarde_2(j,k) = Q_lobith(i-1);      %Meting voordat drempelwaarde
wordt bereikt ook meenemen
            Dates_drempelwaarde_2(j,k) = Dates(i-1)-Date_1 +1;
        end
        Q_drempelwaarde(j,k) = Q_lobith(i);              %Matrix met debieten boven
drempelwaarde (golven gescheiden)
        Q_drempelwaarde_2(j+1,k) = Q_lobith(i);          %Metingen boven drempelwaarde
meenemen
        Dates_drempelwaarde(j,k) = Dates(i)-Date_1 +1;  %Matrix met datums van
debieten van Q_drempelwaarde
        Dates_drempelwaarde_2(j+1,k) = Dates(i)-Date_1 +1;
        j = j + 1;      %naar volgende meting van de hoogwatergolf
        if Q_lobith(i+1) < drempelwaarde
            Q_drempelwaarde_2(j+1,k) = Q_lobith(i+1);%Meting nadat drempelwaarde
wordt bereikt meenemen
            Dates_drempelwaarde_2(j+1,k) = Dates(i+1)-Date_1 +1;
            k = k+1;      %naar volgende hoogwatergolf
            j=1;          %dagen in de hoogwatergolf terugzetten naar 1
        end
    end
end

```

Enkele hoogwatergolven selecteren (Piekafvoer)

```

Q_enkele_golvenwaarde = max(Q_drempelwaarde); % Maximale afvoer van elke golf bepalen
Q_enkele_golven = Q_drempelwaarde;           % matrix Q_drempelwaarde kopiëren naar
een nieuwe (niet overschrijven)
Dates_enkele_golven = Dates_drempelwaarde;   % " "
piek_eruit = 0;                               % begin waarde van het aantal golven dat
eruit gehaald gaat worden vanwege een te lage piek
for i = 1:length(Q_enkele_golvenwaarde)
    if Q_enkele_golvenwaarde(i) < piekwaarde %Als max afvoermeting onder de minimale
piekwaarde is, verwijder deze hoogwatergolf uit de data.
        Q_enkele_golven(:,(i-piek_eruit)) = [];
        Dates_enkele_golven(:,(i-piek_eruit)) = [];
        piek_eruit = piek_eruit + 1;
    end
end

%Waarde van eerste dag -1 en laatste dag +1 ook meenemen. Dat is belangrijk
%voor uiteindelijke helling van lijn.
Q_enkele_golvenwaarde_golven = max(Q_drempelwaarde_2); % Maximale afvoer van elke
golf bepalen
Q_enkele_golven_2 = Q_drempelwaarde_2;           % Matrix Q_drempelwaarde
kopieren naar een nieuwe (niet overschrijven)
Dates_enkele_golven_2 = Dates_drempelwaarde_2;
piek_eruit = 0;                               %begin waarde van het aantal golven dat
eruit gehaald gaat worden vanwege een te lage piek
for i = 1:length(Q_enkele_golvenwaarde_golven)
    if Q_enkele_golvenwaarde_golven(i) < piekwaarde %Alle golven met maximale
waarde onder de piekwaarde eruit halen.
        Q_enkele_golven_2(:,(i-piek_eruit)) = [];
        Dates_enkele_golven_2(:,(i-piek_eruit)) = [];
        piek_eruit = piek_eruit + 1;
    end
end

```

```

end
end

```

Dubbele hoogwatergolven selecteren (m.b.t. buitenwaartse macrostabiliteit)

```

%Eerste enkele hoogwatergolven analyseren op snelle val
%Daarna kijken naar window (hersteltijd)
%Vervolgens verhouding berekenen
maximum_golf = [];
max_golf = [];
einde_golf = [];
for j = 1:size(Q_enkele_golven,2) %alle verschillende golven uit Q_enkele_golven
    maximum_golf(j) = 1; %de dag dat de piekafvoer van een enkele golf optreedt. Dagen
    vanaf het begin van de golf.
    max_golf = 0; %de afvoerwaarde van de maximale golf
    for i =1:size(Q_enkele_golven,1) %alle verschillende dagen van elke golf (eerst
    was 1 een 2.)
        if Q_enkele_golven(i,j) > max_golf %om piekwaarde van golf te vinden.
            maximum_golf(j) = i; %dag wanneer maximale afvoer van enkele
            hoogwatergolf wordt gemeten
            max_golf = Q_enkele_golven(i,j); %Hoe groot de afvoer is.
        end
        if Q_enkele_golven(i,j)>0 %om einde van golf te vinden
            einde_golf(j) = i; %De dag waarop de eerste hoogwatergolf eindigt(als
            geen volgende hoogwatergolf, waarde = 0)
        end
    end
    tijd_val(j) = einde_golf(j) - maximum_golf(j);
end

dubbel_eruit = 0;
n = 0;
Q_snelle_val = Q_enkele_golven; % matrix kopiëren
Dates_snelle_val = Dates_enkele_golven_2; % matrix kopiëren
for j = 1:size(maximum_golf,2) %golven die niet voldoen aan de voorwaarde voor
afschuiving/dubbele hoogwatergolven die macro-stabiliteit kunnen veroorzaken, uit de
data halen
    if tijd_val(j) > tijd_afschuiving %Dubbele hoogwatergolf, maar geen sprake van
    risico op macro-instabiliteit
        Q_snelle_val(:,(j+dubbel_eruit)) = [];
        Dates_snelle_val(:,(j+dubbel_eruit)) = [];
        einde_golf(j+dubbel_eruit) = [];
        dubbel_eruit = dubbel_eruit - 1;
        n = n + 1;
    else
        tijd_val_2(j-n) = tijd_val(j);
    end
end
dubbel_eruit = 0;
[tijd_val_sort, tijd_val_index] = sort(tijd_val_2);
afschuiving_eruit = round((1-afschuiving_sv)*size(tijd_val_2,2));
if afschuiving_eruit > 0
    for i = (size(tijd_val_2,2) - afschuiving_eruit + 1):size(tijd_val_2,2)
        Q_snelle_val(:,tijd_val_index(i)+dubbel_eruit) = [];
        if i < size(tijd_val_2,2)

```

```

        if tijd_val_index(i) < tijd_val_index(i+1)
            dubbel_eruit = dubbel_eruit -1;
        end
    end
end
end
%Nu nog bepalen hoeveel van deze hoogwatergolven een tweede hoogwatergolf
%binnen de hersteltijd hebben liggen! (WINDOW)
dag_1 = [];
dag_2 = [];
dagen_boven_drempel = [];
%De tijdsduur van de verschillende hoogwatergolven bepalen in de matrix
%Q_threshold
for n = 1 : size(Q_snelle_val,2)
    for m = 1: size(Q_snelle_val,1)
        if Q_snelle_val(m,n) > drempelwaarde
            dagen_boven_drempel(n) = m;
        end
    end
end
end

%Afvoergolven die binnen elkaars window liggen samenvoegen
golf_eruit = []; %Data wordt gekopieerd, dus om te voorkomen dat golven dubbel in de
matrix staan, moeten ze er ook weer uitgeknipt worden als blijkt binnen window
for j = 1:size(Q_snelle_val,2)-1
    dag_1(j)=Dates_snelle_val(dagen_boven_drempel(j),j); %de dag dat golf 1 eindigt
    if Dates_snelle_val(1,j+1)-dag_1(j) <=window
        dag_2(j) = Dates_snelle_val(1,j+1)- dag_1(j); %de dag dat golf 2 begint
        golf_eruit = [golf_eruit (j+1)]; %de tweede golf moet uit de data worden
gehaald
    else
        dag_2(j) = 0; %indicatie dat er geen twee hoogwatergolf is binnen de window
    end
end
end
%Als er meer dan twee hoogwatergolven worden samengevoegd:
i = 1;
for i = 1 : length(golf_eruit)-1
    while golf_eruit(i+1) - golf_eruit(i)<=1
        golf_eruit(i) = golf_eruit(i) - 1; %De voorgaande golf eruit halen. (de
laatste golf moet bewaard worden).
    end
end
end

%De laatste waarneming worden nog een eind-waarde toegekend:
dag_1(size(Q_snelle_val,2))=Dates_snelle_val(dagen_boven_drempel(size(Q_snelle_val,
2)),size(Q_snelle_val,2));
dag_2(size(Q_snelle_val,2)) = 0;

%hoogwatergolven binnen de window combineren
j = 1; %telt de verschillende golven in Q_snelle_val
while j < size(Q_snelle_val,2)-1 % zolang niet alle hoogwatergolven geweest zijn.
    if dag_2(j) > 0 %wanneer een meerder hoogwatergolven binnen de window liggen
        l = (dag_1(j)-dagen_boven_drempel(j)+1); %begin golf 1
        k= (dag_1(j)+dag_2(j)+dagen_boven_drempel(j+1)-1); %einde golf 2
    end
end
end

```

```

        while dag_2(j)>0 %zolang volgende dag binnen de window ligt
            for i = 1 : k %van begin golf 1 to einde golf 2
                b = i - 1+1; %positie in matrix (index van dag in golf)
                Q_golven_macroinst(b,j) = Q_lobith(i); %debeten van hoogwatergolf
opslaan
                Dates_golven_macroinst(b,j) = Dates(i); %bijbehorende datums opslaan
            end
            if j < size(Q_snelle_val,2)-1
                j = j +1; % Volgende hoogwatergolf
                k = (dag_1(j)+dag_2(j)+dagen_boven_drempel(j+1)-1); % nieuw einde van
de golf
            end
        end
    else %gekopieer de data uit Q_snelle_val, waar er geen sprake is van twee
hoogwatergolven binnen de window (ook die net gekopieerd zijn).
        for i = 1:size(Q_snelle_val,1)
            Q_golven_macroinst(i,j) = 0;%Q_snelle_val(i,j); %Data kopiëren
            Dates_golven_macroinst(i,j) = 0;%Dates_snelle_val(i,j); %data kopiëren
        end
        j = j +1; %volgende hoogwatergolf
    end
end
% De laatste twee dagen worden niet meegenomen in de bovenstaande loop. De
% onderstaande loop doet dat wel.
for n = j: size(Q_snelle_val,2)
    if dag_2(n) > 0
        k= (dag_1(n)+dag_2(n)+dagen_boven_drempel(n+1)-1);
        l = (dag_1(n)-dagen_boven_drempel(n)+1);
        for i = 1 : k %van begin golf 1 to einde golf 2
            b = i - 1+1; %positie in matrix (index van dag in golf)
            Q_golven_macroinst(b,n) = Q_lobith(i);
            Dates_golven_macroinst(b,n) = Dates(i);
        end
    else %Voor de laatste waarde geldt dit sowieso
        for i = 1:size(Q_snelle_val,1)
            Q_golven_macroinst(i,n) = 0;%Q_snelle_val(i,n);
            Dates_golven_macroinst(i,n) = 0;%Dates_snelle_val(i,n);
        end
    end
end
end

%dubbele gegevens verwijderen
for i = 1 : length(golf_eruit)
    Q_golven_macroinst(:,golf_eruit(i)) = []; %afvoermetingen eruit halen
    Dates_golven_macroinst(:,golf_eruit(i)) = []; %bijbehorende datums eruit halen
    golf_eruit = golf_eruit -1; %er gaat een kolom af, dus de index-posities van de
golven die eruit gehaald moeten worden schuiven een op.
end
gemiddelde_afvoer = mean(Q_golven_macroinst);
golf_eruit = [];
n = 1;
for i = 1:size(Q_golven_macroinst,2)
    if gemiddelde_afvoer(i)<0.01
        golf_eruit(n) = i;
        n = n+1;
    end
end

```

```

    end
end

for i = 1 : length(golf_eruit)
    Q_golven_macroinst(:,golf_eruit(i)) = []; %afvoermetingen eruit halen
    Dates_golven_macroinst(:,golf_eruit(i)) = []; %bijbehorende datums eruit halen
    golf_eruit = golf_eruit -1; %er gaat een kolom af, dus de index-posities van de
    golven die eruit gehaald moeten worden schuiven een op.
end

Kans_gegeven_afschuiving = 100 * size(Q_golven_macroinst,2)/size(Q_snelle_val,2) %een
percentage gebaseerd op statistiek

```

Verschillende types hoogwatergolven (gebaseerd op enkele hoogwatergolven) (intervallen standaard hellingen berekenen)

```

%Aan elke afvoer een waterstand koppelen, met de in excel bepaalde Qh
%relatie (empirische formule)
for j = 1 : size(Q_enkele_golven_2,2)
    for i = 1:size(Q_enkele_golven_2,1)
        Q = Q_enkele_golven_2(i,j);
        if Q > 0
            waterstand_golven(i,j) = (-2*10^-16)*Q^4 + (10^-11)*Q^3 - (2*10^-07)*Q^2
+ 0.0023*Q + 5.2451;
        else
            waterstand_golven(i,j) = 0;
        end
    end
end

%Maximale waterstand en waterstand drempelwaarde vaststellen
waterstand_max = (-2*10^-16)*Q_max^4 + (10^-11)*Q_max^3 - (2*10^-07)*Q_max^2 +
0.0023*Q_max + 5.2451;
waterstand_drempelwaarde = (-2*10^-16)*drempelwaarde^4 + (10^-11)*drempelwaarde^3 -
(2*10^-07)*drempelwaarde^2 + 0.0023*drempelwaarde + 5.2451;

[waterstand_golven_piek,index_Golven_piek] = max(waterstand_golven); %maximale
waterstand en bijbehorende index bepalen van golven historische data
verhouding_hellingen = waterstand_golven_piek/waterstand_max; %verhoudingen
berekenen tov toetspeil
type_gemiddelde = round(verschillende_types(3,+)/24); %in dagen (afgerond), hele rij,
dus 5 punten
type_smal = round(verschillende_types(4,+)/24);
type_breed = round(verschillende_types(5,+)/24);

%Tijd voor verschillende breedtes berekenen
tijd_gemiddeld_voor = verschilende_types(3,1)/24 - verschilende_types(3,2)/24;
tijd_smal_voor = verschilende_types(4,1)/24 - verschilende_types(4,2)/24;
tijd_breed_voor = verschilende_types(5,1)/24 - verschilende_types(5,2)/24;
tijd_gemiddeld_achter = verschilende_types(3,4)/24 - verschilende_types(3,5)/24;
tijd_smal_achter = verschilende_types(4,4)/24 - verschilende_types(4,5)/24;
tijd_breed_achter = verschilende_types(5,4)/24 - verschilende_types(5,5)/24;

%Tijdsintervallen voor verschillende types berekenen
tijd_range_voor_smal_gem = (tijd_gemiddeld_voor + tijd_smal_voor)/2;

```

```

tijd_range_voor_breed_gem = (tijd_gemiddeld_voor + tijd_breed_voor)/2;
tijd_range_achter_smal_gem = (tijd_gemiddeld_achter + tijd_smal_achter)/2;
tijd_range_achter_breed_gem = (tijd_gemiddeld_achter + tijd_breed_achter)/2;

%Maatgevende hellingen berekenen (de intervallen)
Hellingen_voorflank = [(waterstand_drempelwaarde -
verschillende_types(1,2))/tijd_range_voor_smal_gem (waterstand_drempelwaarde -
verschillende_types(1,2))/tijd_range_voor_breed_gem];
Hellingen_achterflank= [(verschillende_types(1,4) -
waterstand_drempelwaarde)/tijd_range_achter_smal_gem (verschillende_types(1,4) -
waterstand_drempelwaarde)/tijd_range_achter_breed_gem];

```

Voorflank berekenen

```

for i = 1 : length(waterstand_golven_piek)
    dag_begin_helling = 1;
    waterstand_begin_helling = waterstand_golven(dag_begin_helling,i);
    Case_voorflank = 1; %smalle voorflank
    if Case_voorflank == 1
        dag_einde_helling = index_Golven_piek(i) + type_smal(2);
        waterstand_einde_helling = waterstand_golven(dag_einde_helling,i);
        helling_voorflank(i) = (waterstand_einde_helling -
waterstand_begin_helling)/(dag_einde_helling - dag_begin_helling);
        if helling_voorflank(i) > verhouding_hellingen(i)*Hellingen_voorflank(1)
            type(1,i) = Case_voorflank;
        else
            Case_voorflank = 2; %gemiddeld proberen
        end
    end
    if Case_voorflank == 2
        dag_einde_helling = index_Golven_piek(i) + type_gemiddelde(2);
        if dag_einde_helling < 1
            dag_einde_helling = 1;
        end
        waterstand_einde_helling = waterstand_golven(dag_einde_helling,i);
        helling_voorflank(i) = (waterstand_einde_helling -
waterstand_begin_helling)/(dag_einde_helling - dag_begin_helling);
        if helling_voorflank(i) > verhouding_hellingen(i)*Hellingen_voorflank(2)
            type(1,i) = Case_voorflank;
        else
            Case_voorflank = 3; %breed proberen (dat is dan de enige overgebleven
mogelijkheid
        end
    end
    if Case_voorflank == 3
        dag_einde_helling = index_Golven_piek(i) + type_breed(2);
        if dag_einde_helling < 1
            dag_einde_helling = 1;
        end
        waterstand_einde_helling = waterstand_golven(dag_einde_helling,i);
        helling_voorflank(i) = (waterstand_einde_helling -
waterstand_begin_helling)/(dag_einde_helling - dag_begin_helling);
        type(1,i) = Case_voorflank;
    end
end

```

```
end
```

Achterflank berekenen

```
%doe bijna hetzelfde als bij de voorflank
for i = 1 : length(waterstand_golven_piek)
    for j = 1:size(Q_enkele_golven_2,1)
        if Q_enkele_golven_2(j,i) == 0
            dag_einde_helling = j;
        end
        if j == size(Q_enkele_golven_2,1)
            dag_einde_helling = j;
        end
    end
    waterstand_einde_helling = waterstand_golven(dag_einde_helling,i);

    Case_achterflank = 1; %smal
    if Case_achterflank == 1
        dag_begin_helling = index_Golven_piek(i) + type_smal(4);
        waterstand_begin_helling = waterstand_golven(dag_begin_helling,i);
        helling_achterflank(i) = (waterstand_einde_helling -
waterstand_begin_helling)/(dag_einde_helling - dag_begin_helling);
        if helling_achterflank(i) < verhouding_hellingen(i)*Hellingen_achterflank(1)
            type(2,i) = Case_achterflank;
        else
            Case_achterflank = 2; %gemiddeld proberen
        end
    end
    if Case_achterflank == 2
        dag_begin_helling = index_Golven_piek(i) + type_gemiddelde(4);
        waterstand_begin_helling = waterstand_golven(dag_begin_helling,i);
        helling_achterflank(i) = (waterstand_einde_helling -
waterstand_begin_helling)/(dag_einde_helling - dag_begin_helling);
        if helling_achterflank(i) < verhouding_hellingen(i)*Hellingen_achterflank(2)
            type(2,i) = Case_achterflank;
        else
            Case_achterflank = 3; %breed proberen
        end
    end
    if Case_achterflank == 3
        dag_begin_helling = index_Golven_piek(i) + type_breed(4);
        waterstand_begin_helling = waterstand_golven(dag_begin_helling,i);
        helling_achterflank(i) = (waterstand_einde_helling -
waterstand_begin_helling)/(dag_einde_helling - dag_begin_helling);
        type(2,i) = Case_achterflank;
    end
end
end
```

Verschillende types golven groeperen

1 = smal – smal, 2 = smal – gem, 3 = smal – breed, 4 = gem – smal, 5 = gem – gem, 6 = gem – breed, 7 = breed – smal, 8 = breed – gem, 9 = breed - breed

```
Types_hoogwatergolven = [0 0 0 0 0 0 0 0 0];
```



```

for i = 1: length(waterstand_golven_piek)
    if type(1,i) == 1
        if type(2,i) == 1
            Types_hoogwatergolven(1) = Types_hoogwatergolven(1) +1; % alle golven van
type een worden bij elkaar opgeteld.
            type_golf(i) = 1; % elke golf krijgt
een type toegekend
        elseif type(2,i) == 2
            Types_hoogwatergolven(2) = Types_hoogwatergolven(2) +1;
            type_golf(i) = 2;
        else
            Types_hoogwatergolven(3) = Types_hoogwatergolven(3) +1;
            type_golf(i) = 3;
        end
    elseif type(1,i) == 2
        if type(2,i) == 1
            Types_hoogwatergolven(4) = Types_hoogwatergolven(4) +1;
            type_golf(i) = 4;
        elseif type(2,i) == 2
            Types_hoogwatergolven(5) = Types_hoogwatergolven(5) +1;
            type_golf(i) = 5;
        else
            Types_hoogwatergolven(6) = Types_hoogwatergolven(6) +1;
            type_golf(i) = 6;
        end
    else
        if type(2,i) == 1
            Types_hoogwatergolven(7) = Types_hoogwatergolven(7) +1;
            type_golf(i) = 7;
        elseif type(2,i) == 2
            Types_hoogwatergolven(8) = Types_hoogwatergolven(8) +1;
            type_golf(i) = 8;
        else
            Types_hoogwatergolven(9) = Types_hoogwatergolven(9) +1;
            type_golf(i) = 9;
        end
    end
end
end

```

Gevoeligheidsanalyse

```

for i = 1:13
    if i == 1
        gevoeligheid(i,1) = size(Q_enkele_golven_2,2);
    elseif i ==2
        gevoeligheid(i,1) = size(Q_snelle_val,2);
    elseif i ==3
        gevoeligheid(i,1) = 0;%size(Q_golven_macroinst,2);
    elseif i ==4
        gevoeligheid(i,1) = 0;%Kans_gegeven_afschuiving;
    elseif i ==5
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);
    elseif i ==6
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);
    elseif i ==7

```

```
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);  
elseif i ==8  
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);  
elseif i ==9  
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);  
elseif i ==10  
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);  
elseif i ==11  
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);  
elseif i ==12  
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);  
else  
        gevoeligheid(i,1) = Types_hoogwatergolven(i-4);  
end  
end
```

Bijlage G – Gevoeligheidsanalyse

Tabel 13 - resultaten gevoeligheidsanalyse piekafvoer

	10%	77%	80%	90%	100%	110%	120%	150%	190%	
Piekafvoer	<drempel	4545	4752	5346	5940	6534	7128	8910	11286	
# enkele hoogwatergolven	248	248	212	144	90	65	43	15	2	Gevoelig
# hoogwatergolven afschuiving	231	231	195	127	75	53	32	10	0	Gevoelig
# hoogwatergolven macrostb	26	26	21	3	2	1	0	0	0	Gevoelig
Types hoogwatergolven [1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Gevoelig
[2]	58	58	58	48	29	20	12	5	0	
[3]	3	3	2	0	0	0	0	0	0	
[4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[5]	51	51	51	46	32	24	17	8	2	
[6]	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
[7]	9	9	9	9	8	8	6	2	0	
[8]	100	100	87	40	20	12	7	0	0	
[9]	26	26	4	1	1	1	1	0	0	

Tabel 14 - resultaten gevoeligheidsanalyse tijd snelle val

	10%	50%	80%	90%	100%	110%	120%	150%	190%	
Tijd snelle val	1	5	8	9	10	11	12	15	19	
# enkele hoogwatergolven	90	90	90	90	90	90	90	90	90	Ongevoelig
# hoogwatergolven afschuiving	0	39	69	74	75	79	82	83	85	Gevoelig
# hoogwatergolven macrostb	0	2	2	2	2	2	2	2	2	Ongevoelig
Types hoogwatergolven [1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Ongevoelig
[2]	29	29	29	29	29	29	29	29	29	
[3]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[5]	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
[6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[7]	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
[8]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
[9]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Tabel 15 - resultaten gevoeligheidsanalyse window

	10%	50%	80%	90%	100%	110%	120%	150%	190%	
Window	3	14	22	24	27	30	32	41	51	
# enkele hoogwatergolven	90	90	90	90	90	90	90	90	90	Ongevoelig
# hoogwatergolven afschuiving	75	75	75	75	75	75	75	75	75	Ongevoelig
# hoogwatergolven macrostb	0	1	2	2	2	2	2	3	4	Gevoelig
Types hoogwatergolven [1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Ongevoelig
[2]	29	29	29	29	29	29	29	29	29	
[3]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[5]	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
[6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[7]	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
[8]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
[9]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Tabel 16 - resultaten gevoeligheidsanalyse percentage afschuiving na snelle val

Percentage afschuiving na snelle val	10%	25%	50%	80%	90%	95%	100%	
# enkele hoogwatergolven	90	90	90	90	90	90	90	Ongevoelig
# hoogwatergolven afschuiving	8	19	38	60	68	71	75	Gevoelig
# hoogwatergolven macrostb	0	0	0	0	0	0	2	Gevoelig
Types hoogwatergolven	0	0	0	0	0	0	0	Ongevoelig
Types hoogwatergolven	29	29	29	29	29	29	29	
	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	
	32	32	32	32	32	32	32	
	0	0	0	0	0	0	0	
	8	8	8	8	8	8	8	
	20	20	20	20	20	20	20	
	1	1	1	1	1	1	1	