

Bsc Civil Engineering
Bachelor Thesis

Ontwikkeling van een effectief handelingsperspectief voor geschikte noodmaatregelen bij bressen in waterkeringen

J.P. Tannemaat

Infram Hydren supervisors: ir. R. Joustra, ir. W. Maat
University of Twente supervisor: ir. L. S. Besseling
Second assessor: dr. J. T. Voordijk

4 juli 2024

Department of Civil Engineering and Management
Faculty of Technology Engineering,
Civil Engineering,
University of Twente

Voorwoord

Dit onderzoek is gedaan voor het afstuderen van de bacheloropleiding Civiele techniek aan Universiteit Twente. Dit is daarmee de afsluiting van een drie-jaar-durende studie, begeleid vanuit de universiteit zelf door ir. Leon S. Besseling voor het behoeden van vele moeilijkheden en problemen. Vanuit Infram hebben ir. Rinse Joustra en ir. Wouter Maat begeleid in mijn eerste onderzoek gedeeltelijk buiten de universiteit om.

Enschede, Juli 2024

Jeroen Pieter Tannemaat

Summary

The threat of breaches in flood defenses is a growing problem in the Netherlands. Taking the right emergency measures quickly and effectively is crucial to minimize the consequences. The recent problems in Limburg showed that it was difficult to find these suitable emergency measures due to the confusion and abundance of information. This thesis therefore focuses on the development of an effective action perspective to support decision makers in choosing the most effective emergency measure for the Wiki-noodmaatregelen website, the website that exists for this purpose.

To investigate this, a number of research questions were drawn up, in which the potentially suitable emergency measures, assessment factors and action perspectives that could be used were first investigated through literature research. Interviews were then held with experts in which these researched points were assessed and their inclusion in the final action perspective was examined.

It was thereby investigated which important assessment factors influence the choice of emergency measures, such as the flood defense material, the breach phases, breach height, breach width, flow through the breach, subsurface (evenness), flood defense carrying capacity, flood defense lateral force, location accessibility, weather conditions, geographical location, emergency measure application location and flood defense height were found to be.

It was then investigated which emergency measures are suitable for closing breaches and limiting breach growth, some plastic cloth or tarpaulin, immediately available materials for use of emergency measures, sandbags, big bags, plastic grid flood wall, rock berm, rock bags, sheet pile wall, pipes-piles-tubes-masts, water-filled barrier, water-filled pipes, portable dam structures, gabions, container, (inland waterway)ship and controlled-breach forcing were found to be.

Finally, the most effective action perspective for decision makers was examined, which turned out to consist of two parts. This first revealed a decision tree suitable for the selection of suitable emergency measures based on the most important assessment factors. Then it was further assessed with an MCDA table for a clear evaluation of the other relevant factors. Using the results from these three research questions, an integrated end result was developed that incorporates these points.

This study does involve a number of discussions and recommendations, such as the use of relatively old sources due to a lack of new literature, and the difficulty of determining exact values for the suitability of emergency measures. It was emphasized that the need for further studies into breach growth and the effectiveness of emergency measures, as well as the further development and simplification of the action perspective, are still important recommendations.

All in all, the final action perspective appears to be able to relatively effectively support dike managers and flood defense specialists in choosing the most suitable emergency measures in the event of breaches. By making this information available on the Wiki emergency measures website, decision makers can better respond to emergency situations, which contributes to better protection of flood defenses and thus to a safer Netherlands.

Samenvatting

De dreiging met het ontstaan van bressen in waterkeringen is een groeiend probleem in Nederland. Het daarbij snel en effectief de juiste noodmaatregelen is cruciaal om de gevolgen te minimaliseren. De recente problemen in Limburg toonden aan dat het moeilijk was om deze geschikte noodmaatregelen te vinden vanwege de wirwar en overvloed aan informatie. Dit onderzoek richt zich dan ook op de ontwikkeling van een effectief handelingsperspectief om besluitvormers te ondersteunen bij het kiezen van de meeste effectieve noodmaatregel voor op de Wiki-noodmaatregelen website, de website die bestaat voor dit doel.

Om dit te onderzoeken zijn een aantal onderzoeksvragen opgesteld waarbij door middel van literatuuronderzoek eerst de potentieel geschikte noodmaatregelen, beoordelingsfactoren en handelingsperspectieven die gebruikt zouden kunnen worden zijn onderzocht. Vervolgens zijn interviews met experts gehouden waarin deze onderzochte punten werden beoordeeld en het meenemen voor het uiteindelijke handelingsperspectief werd onderzocht.

Daarbij is eerst onderzocht welke belangrijke beoordelingsfactoren van invloed op de keuze van noodmaatregelen zijn, wat het waterkering materiaal, de bres fases, bres hoogte, bres breedte, stroming door bres, ondergrond (effenheid), waterkering draagkracht, waterkering zijwaartse kracht, bereikbaarheid locatie, weersomstandigheden, geografische locatie, noodmaatregel toepaslocatie en waterkering hoogte bleken te zijn.

Vervolgens is onderzocht welke noodmaatregelen geschikt voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei zijn, wat plastic doek of zeil, meteen beschikbare materialen inzet noodmaatregelen, zandzakken, big bags, kunststof roostervloedwand, rots berm, rock bags, damwand, pijpen-palen-buizen-masten, met water gevulde barrière, met water gevulde buizen, draagbare dam constructies, gabions, container, (binnenvaart)schip en gecontroleerde-doorbraak-forceren bleken te zijn.

Als laatste was het meest effectieve handelingsperspectief voor besluitvormers onderzocht wat uit twee delen bleek te bestaan. Hieruit bleek eerst een beslisboom geschikt voor de selectie van geschikte noodmaatregelen op basis van de belangrijkste beoordelingsfactoren. Vervolgens was het verder beoordelen met een MCDA-tabel voor een overzichtelijke evaluatie van de verdere relevante factoren. Met de resultaten uit deze drie onderzoeksvragen is vervolgens een geïntegreerd eindresultaat ontwikkeld waarin deze punten verwerkt zitten.

Aan dit onderzoek zitten wel een aantal discussies en aanbevelingen vast, zoals het gebruik van relatief oude bronnen vanwege een gebrek aan nieuwe literatuur, de moeilijkheid van het vaststellen van exacte waarden voor de geschiktheid van noodmaatregelen. Daarbij is benadrukt dat de noodzaak van verdere studies naar bresgroei en de effectiviteit van noodmaatregelen, evenals het verder uitwerken en vereenvoudigen van het handelingsperspectief nog belangrijke aanbevelingen zijn.

Alles bij elkaar lijkt het uiteindelijke handelingsperspectief eindresultaat relatief effectief dijkbeheerders en waterkeringsspecialisten te kunnen ondersteunen bij het kiezen van de meest geschikte noodmaatregelen bij bressen. Door deze informatie op de Wiki-noodmaatregelen website beschikbaar te maken, kunnen besluitvormers beter reageren op noodsituaties, wat bijdraagt aan een betere bescherming van waterkeringen en zo aan een veiliger Nederland.

Inhoudsopgave

Lijst van figuren	7
1 Introductie	1
1.1 Ontstaan bressen	1
1.2 Bresvormingtijd en implementatie van noodmaatregelen	2
1.3 Aanleiding onderzoek	4
1.4 Probleembeschrijving	6
1.5 Leeswijzer	6
2 Onderzoeksdoelstelling	7
2.1 Onderzoeksdoel	7
2.2 Onderzoeksvragen	7
2.3 Afbakening onderzoek	8
3 Methodologie	10
3.1 Wat zijn belangrijke beoordelingsfactoren die van invloed zijn op de keuze van noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?	10
3.1.1 Literatuuronderzoek	10
3.1.2 Expert interview	10
3.2 Wat zijn geschikte noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?	11
3.2.1 Literatuuronderzoek	11
3.2.2 Expert interview	12
3.3 Wat is het meest effectieve handelingsperspectief voor besluitvormers voor op de Wiki Noodmaatregelen-website?	12
3.3.1 Literatuuronderzoek	12
3.3.2 Expert interview	13
3.4 Uitwerking uiteindelijke handelingsperspectief resultaat	13
4 Onderzoeksresultaten	14
4.1 Beoordelingsfactoren bressen onderzoek	14
4.1.1 Bresgroei beoordelingsfactor	14
4.1.2 Noodmaatregel inzet factoren	17
4.1.3 Effectieve beoordelingsfactoren expert interviews	21
4.2 Bres noodmaatregelen	25
4.2.1 Noodmaatregelen bronnen onderzoek	25
4.2.2 Noodmaatregelen experts uitkomsten	34
4.2.3 Geschikte noodmaatregelen uitwerkingen	38
4.3 Effectief handelingsperspectief	45
4.3.1 Handelingsperspectief opties	45
4.3.2 Handelingsperspectief expert analyse	48
5 Handelingsperspectief resultaat	50
5.1 Beslisboom	50
5.1.1 Belangrijke beoordelingsfactoren experts	50
5.1.2 Volgorde met belangrijkste beoordelingsfactoren in beslisboom	51
5.1.3 Onderverdeling beoordelingsfactoren in stappen	52

5.1.4	Vereenvoudigingen en veranderingen beslisboom	53
5.1.5	Eindresultaat beslisboom deel 1 handelingsperspectief	54
5.2	Multi Criteria Decision Analysis	57
5.2.1	MCDA tabellen werking met beoordelingsfactoren	57
5.2.2	MCDA tabellen situaties uitgewerkt	57
6	Discussie	61
7	Conclusie	64
8	Aanbevelingen	66
9	Referenties	69
10	Bijlage	73
10.1	Interview Format	73
10.2	Expert interview personen	74
10.2.1	Expert 1	74
10.2.2	Expert 2	74
10.2.3	Expert 3	74
10.2.4	Expert 4	74

Lijst van figuren

1	<i>Bres initiatie scenario's in waterkeringen [NLSG, 2024].</i>	1
2	<i>Verduidelijking waterkering termen scriptie [STOWA and PIW, 2018].</i>	2
3	<i>De fases in de ontwikkeling van de bres geïllustreerd [Moore et al., 2014].</i>	2
4	<i>Noodmaatregelen reactietijd strategie [Janssen et al., 2021].</i>	3
5	<i>De locatie van de bres met sterke stroming zichtbaar met op de achtergrond de woonboot die tegen de brug in Maastricht botste [Dijkstra, 2024].</i>	4
6	<i>Onderzoeksaanleiding en noodmaatregel-inzet locatie [Dijkstra, 2024].</i>	5
7	<i>Potentiële faal-mechanismen waterkeringen [NLSG, 2024].</i>	16
8	<i>De fases in de ontwikkeling van de bres geïllustreerd [Moore et al., 2014].</i>	17
9	<i>Foto van een tabel met meningen van experts aan waardes gekoppeld over de verschillende noodmaatregelen.</i>	21
10	<i>Noodmaatregel toepaslocatie opties in of bij een bres [Dagher et al., 2016].</i>	23
11	<i>Doek of zeil als noodmaatregel bij bressen [Trapbag, 2021] [Moore et al., 2014].</i>	25
12	<i>Matten of lappen noodmaatregel [Joore, 2004].</i>	26
13	<i>Zandzakken-wand met plastic (a) en schematisch (b) noodmaatregel, zandzakken-wand zonder plastic (c) en schematisch (d) [Masolle et al., 2018].</i>	26
14	<i>Big bags noodmaatregel [Moore et al., 2014].</i>	27
15	<i>Kunststof roostervloedwand met open cellen [Moore et al., 2014].</i>	27
16	<i>Rots blokken noodmaatregel [PembinaValley, 2011].</i>	27
17	<i>Rock bags noodmaatregel [Rockbags, 2024].</i>	28
18	<i>Gabions noodmaatregel [Moore et al., 2014].</i>	28
19	<i>Damwand noodmaatregel [PileBuck, 2023].</i>	28
20	<i>Gebruik maken van pijpen, palen, buizen of masten als noodmaatregel.</i>	29
21	<i>Steiger noodmaatregel [of the River Gods, 2001].</i>	29
22	<i>Voorgefabriceerde bres plug noodmaatregel [Jiao et al., 2022].</i>	29
23	<i>Bresdefender noodmaatregel foto (a) en (b) schematisch [Janssen et al., 2024].</i>	30
24	<i>Met water gevulde barrière flutschutz doppelkammerschlauch (DKS) noodmaatregel [Masolle et al., 2018].</i>	30
25	<i>Met water gevulde buizen (tiger dam) noodmaatregel [Masolle et al., 2018].</i>	31
26	<i>Worsten gevuld met zand en of water noodmaatregel [Taylor, 2016].</i>	31
27	<i>PLUG noodmaatregel [Resio and Boc, 2011].</i>	31
28	<i>Draagbare opklapbare noodmaatregel foto (links) en schematische weergave (rechts) [Masolle et al., 2018].</i>	32
29	<i>Caisson noodmaatregel [Albers, 2014].</i>	32
30	<i>Container noodmaatregel [Mitchell, 2019].</i>	33
31	<i>(Binnenvaart)schip noodmaatregel [Albers, 2014].</i>	33
32	<i>Gecontroleerde doorbraak forceren noodmaatregel [NLSG, 2024].</i>	33
33	<i>Foto van een tabel met meningen van de verschillende experts aan waardes gekoppeld over de verschillende noodmaatregelen.</i>	34
34	<i>Beslisboom voorbeeld als handelingsperspectief voor de keuze naar de juiste uiteindelijk toe te passen maatregel [Mallet et al., 2018].</i>	45
35	<i>MCDA voorbeeld met beoordelingsfactoren en noodmaatregelen gekoppeld en beoordeeld van zeer goed (++) tot zeer slecht (-) zonder wegingsfactoren [Joore, 2004].</i>	46
36	<i>Noodmaatregelen beoordeeld op verschillende beoordelingsfactoren door middel van een beoordeling tabel [Dagher et al., 2016].</i>	47
37	<i>Handelingsperspectief deel 1 beslisboom opzet.</i>	49

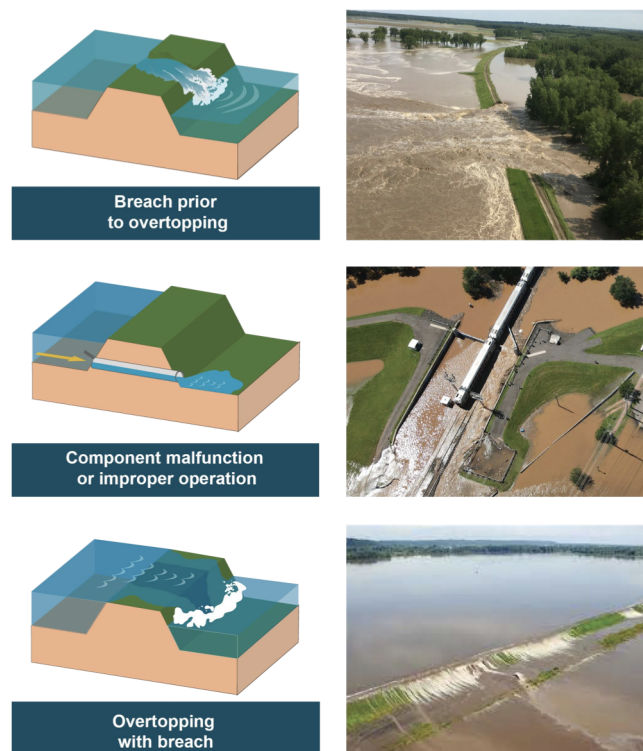
38	<i>Handelingsperspectief deel 2 MCDA opzet.</i>	49
39	<i>Handelingsperspectief resultaat deel 1.1 beslisboom fase 1.</i>	55
40	<i>Handelingsperspectief resultaat deel 1.2 beslisboom vast materiaal waterkering.</i>	55
41	<i>Handelingsperspectief resultaat deel 1.3 beslisboom klei-waterkering.</i>	56
42	<i>Handelingsperspectief resultaat deel 1.4 beslisboom zand-waterkering.</i>	56
43	<i>Handelingsperspectief resultaat deel 2 MCDA situatie 1 aanleiding.</i>	58
44	<i>Handelingsperspectief resultaat deel 2 MCDA situatie 2.</i>	59
45	<i>Handelingsperspectief resultaat deel 2 MCDA situatie 3.</i>	60

1 Introductie

In deze introductie is achtergrondinformatie en de aanleiding van het onderzoek beschreven, waarna de beschrijving van het probleem gegeven. Verder is er een leeswijzer toegevoegd die de structuur van dit onderzoek aangeeft.

1.1 Ontstaan bressen

Nederland en vele andere landen voeren al eeuwenlang een strijd tegen het water. De dreiging van bressen in waterkeringen en daaropvolgende overstromingen van een deel van het land ligt voortdurend op de loer. Een bres is de vorming van een opening in een waterkering, zoals een dijk, waar water ongecontroleerd doorheen kan stromen. Vóórdat een bres verder kan doorgroeien moet een bres natuurlijk eerst ontstaan, wat ook wel initiatie wordt genoemd [NLSG, 2024]. Dit kan om te beginnen vóór overtopping plaatsvinden, wat het overlopen of overslaan van water over een waterkering waardoor het water op het achterliggende land terechtkomt betekend. [Alkholossi, 2021a]. In dit eerste scenario stroomt het water ongecontroleerd het dijkgebied in voordat de waterkering wordt overschreden door water (bovenste rij plaatjes figuur 1) of functioneert de waterkering niet naar behoren waardoor een bres ontstaat (figuur 1 middelste rij plaatjes). Het tweede is de overtopping van een waterkering met daarop volgende bres-initiatie waarbij water over de waterkering heen stroomt en dit erosie veroorzaakt (figuur 1 onderste rij plaatjes).

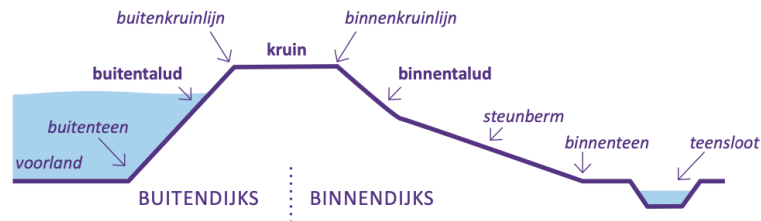


Figuur 1: Bres initiatie scenario's in waterkeringen [NLSG, 2024].

Het risico op het ontstaan van deze bressen met bijbehorende gevolgen door klimaatverandering en snelle bevolkingsgroei nemen steeds verder toe [Van Gerven, 2004]. Klimaatverandering vergroot het risico op bressen door stijgende waterstanden en de hoeveelheid water in de rivieren. De steeds verdergaande bevolkingsgroei zorgt voor nog grotere gevolgen in termen van schade en slachtoffers bij een mogelijke dijkdoorbraak [Van Gerven, 2004].

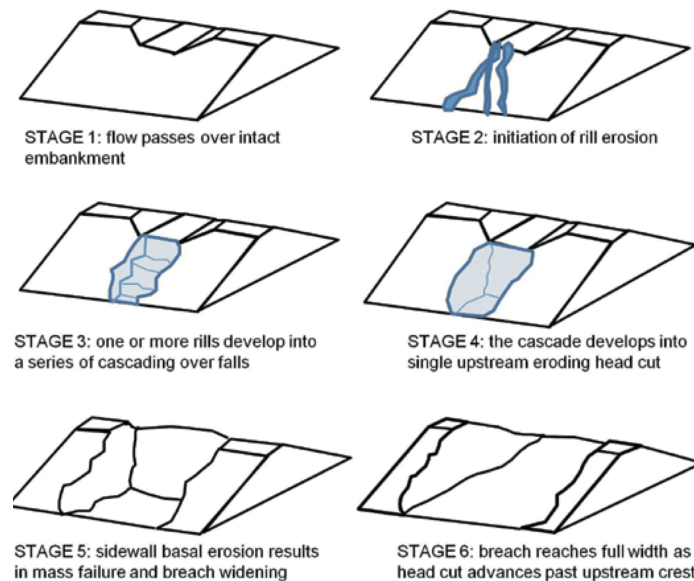
1.2 Bresvormingstijd en implementatie van noodmaatregelen

Na het initiëren van een bres groeit de bres steeds verder, waarbij ook de bresvormingstijd van belang is. In deze paragraaf (en later in het onderzoek) zijn bepaalde rivier-kering gerelateerde termen gebruikt die in figuur 2 duidelijk zijn weergegeven.



Figuur 2: Verduidelijking waterkering termen scriptie [STOWA and PIW, 2018].

Tijdens het verder groeien van een bres vormt een bres zich voornamelijk volgens een aantal fases (figuur 3) [Moore et al., 2014] en [Janssen et al., 2021]. In de vroege fases begint erosie aan de oppervlakte, meestal aan de stroomafwaartse kant of bij de teen(sloot) (term te vinden in figuur 2). Water stroomt hierbij door de geïnitieerde bres en het binnentalud (term te vinden in figuur 2) evolueert langzaam naar het buitentalud (figuur 2), terwijl de oppervlakte van de bres hetzelfde blijft. In de verdere fases nemen de breedte en diepte van de bres aanzienlijk toe [Moore et al., 2014] en [Janssen et al., 2021]. De snelheid van bresgroei met bijbehorende fases wordt bepaald door diverse factoren, die later in het onderzoek (paragraaf 4.1) zullen worden onderzocht.



Figuur 3: De fases in de ontwikkeling van de bres geïllustreerd [Moore et al., 2014].

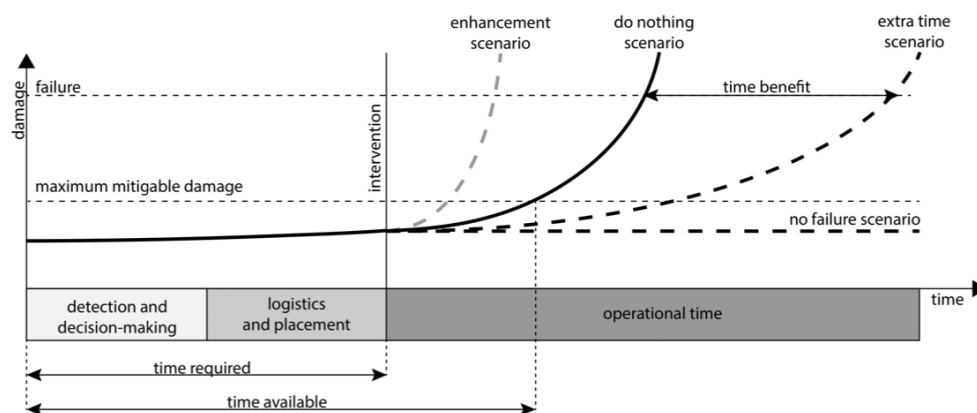
Bij de bresgroei is ook de bresvormingstijd van belang op eventuele bijbehorende implementatie van noodmaatregelen. Een noodmaatregel is een materiaal of middel dat bij nood snel kan worden ingezet bij het dichten van bressen of bij het beperken tot voorkomen van de groei van bressen. De tijd dat een bres zicht vormt wordt bepaald door de snelheid van de bresgroei (bepaald door vele verschillende factoren die in dit onderzoek worden onderzocht) en de tijdsduur tussen de initiatie van de bres en het moment waarop de bres zijn volledige geometrie (grootte) heeft bereikt.

De beschikbare tijd voor het implementeren van noodmaatregelen is het tijdvenster totdat de implementatie van een noodmaatregel overbodig wordt. Na het toepassen van een noodmaatregel kan bresvorming worden stopgezet, uitgesteld, of in het meest ongunstige geval worden versneld (figuur 4) [Janssen et al., 2021]. Het succes van een noodmaatregel hangt hiermee af van de mate waarin de bresgroei factoren worden beperkt. Een noodmaatregel dient daarnaast in aanvulling ook technisch haalbaar te zijn om ingezet te kunnen worden. Alles bij elkaar levert de goede toepassing van een noodmaatregel een tijds-voordeel op ten opzichte van het 'niets doen' scenario, waarin vervolgens aanvullende (evacuatie) noodmaatregelen kunnen worden uitgevoerd [Janssen et al., 2024].

Het proces met bresvorming tot aan de implementatie van een noodmaatregel bestaat uit een aantal stappen. Deze stappen van bres identificatie tot en met de uitvoering van de te nemen effectieve noodmaatregel uitgelegd. De zes volgende stappen worden genomen bij het implementeren van noodmaatregelen in de warme fase [Noodmaatregelen, 2024].

1. **Waarneming van de schade:** Hieronder valt het constateren van een (beginnende) bres, vaak door een dijk-inspecteur bij hoogwater, maar op vele manieren mogelijk.
2. **Analyse van het probleem:** hieronder valt het onderzoeken van de aard en het stadium van de bres, met daarbij het analyseren van relevante beoordelingsfactoren.
3. **Afweging en besluit van het type noodmaatregel:** Hieronder zal op basis van de analyse een geschikte noodmaatregel worden gekozen, veelal door de dijkbeheerder van de waterkering waarin de bres ontstaan is.
4. **Ontwerp van de noodmaatregel:** Ontwerpen van de noodmaatregel met kentallen en vuistregels, voornamelijk door de dijkbeheerder in samenspraak met de uitvoerende aannemers van de noodmaatregel.
5. **Werkvoorbereiding en uitvoering:** Voorbereiden en uitvoeren noodmaatregel.
6. **Monitoren en waarnemen:** Monitoren en waarnemen geplaatste noodmaatregel.

Hieronder is de strategie van het inzetten van noodmaatregelen te zien (figuur 4). Deze komt overeen met de hierboven beschreven stappen 1 tot en met 5 van het en laat overzichtelijk de inzet met bijbehorende gevolgen zien van de (juiste) inzet van noodmaatregelen.



Figuur 4: Noodmaatregelen reactietijd strategie [Janssen et al., 2021].

1.3 Aanleiding onderzoek

In deze paragraaf wordt de aanleiding van dit onderzoek met bijbehorende context beschreven. De locatie waarop dit onderzoek is gebaseerd is iets ten noorden van Maastricht, een stad in Zuid-Limburg, en iets ten zuiden van de stad Borgharen (figuur 5). Als gevolg van de hevige regenval in Nederland en in de bovenstroomse landen van de Maas was het water in de rivieren hoog gestegen. Hierbij ontstond een groot waterpeil-verschil tussen de stroom-opwaartse en stroom-afwaartse kant van de overlaatdam door een slecht functionerende stuw-Borgharen. Dit zorgde er uiteindelijk voor dat een deel van een 120-meter brede overlaatdam instabiel werd en door de sterkte van de stroming over een breedte van 50 meter is weggespoeld (figuur 5) [Laurens, 2024]. Een overlaatdam is een verhoogde wand bedoeld om het water tegen te houden, maar waar bij hoogwater wel water overheen mag lopen. Hierdoor stroomde het water sneller de Maas in en brak een in het gebied aangemeerde woonboot los, dicht bij de plaats waar een deel van de overlaatdam was weggespoeld [Albers, 2024]. Deze woonboot botste vervolgens tegen een brug aan de Stuwweg, die daarmee dermate beschadigd raakte dat er instortingsgevaar ontstond (figuur 5). Daarnaast ontstond een groot risico op snelle drooglegging van de Maas door de sterke stroming in de smalle overlaat, wat het waterpeil snel en drastisch deed dalen. Zonder adequate geschikte noodmaatregelen in te zetten had dit kunnen leiden tot een onbevaarbare Maas met grote negatieve gevolgen voor deze belangrijke vaarweg [Boon and Kaspersma, 2022].



Figuur 5: De locatie van de bres met sterke stroming zichtbaar met op de achtergrond de woonboot die tegen de brug in Maastricht botste [Dijkstra, 2024].

Om deze verdere gevolgen tot een minimum te beperken was een effectieve toepassing van noodmaatregelen noodzakelijk. Het eenvoudig toepassen en plaatsen van noodmaatregelen was lastig vanwege de slechte bereikbaarheid van de bres-locatie. Daarom riep Rijkswaterstaat de hulp in van het Ministerie van Defensie. In samenwerking hebben deze partijen twee methoden ingezet om de uiteindelijke schade zo effectief mogelijk te beperken. De eerste methode was het dichten van de bres met behulp van twee helikopters van het Defensie Helikopter Commando (Chinooks). Deze helikopters lieten rockbags (netten met zware stenen) in het water zakken. Op deze manier werd geprobeerd de bres gedeeltelijk te dichten en op die manier voorkomen dat de bres zich zou uitbreiden [Dijkstra, 2024]. De locatie waar deze rock bags geplaatst werden is vijf meter stroomopwaarts van de oorspronkelijke overlaat-locatie [Dijkstra, 2024], aangegeven in figuur 6 met de tekst 'Overlaatdam'. Daarbij neemt bij de plaatsing van de rock bags in de bres de stroming aan het begin van de overlaat af, waar als tweede methode een tijdelijke dam zou worden aangelegd [Dijkstra, 2024]. Door de sterke stroming was het zonder de rock bags technisch namelijk niet mogelijk om de hierna beschreven dam met lichtere materialen te plaatsen.

Met de door de rock bags verminderde stroming door de bres kon een nooddam met (grote) losse stenen worden geplaatst [Dijkstra, 2024]. Deze tijdelijke nooddam is aangelegd op de locatie zoals weergegeven in figuur 6 met de tekst 'Tijdelijke dam'. Zonder de bouw van deze hiervan zou het risico bestaan dat het water nog steeds vrij ongecontroleerd via de overlaat naar buiten zou stromen. Om de werkzaamheden aan deze nooddam uit te kunnen voeren is een soort tijdelijke brug over de Maas gebouwd met behulp van pontons van defensie, een soort sterke drijvende vloten. Op deze manier konden machines benodigd bij de plaatsing van de stenen naar de moeilijk bereikbare locatie overgebracht worden. Zo kon deze nooddam goed worden aangelegd en waren de risico's op verdere problemen opgelost, waarna de uiteindelijke herstelwerkzaamheden rustig konden beginnen [Dijkstra, 2024].



Figuur 6: Onderzoeksaanleiding en noodmaatregel-inzet locatie [Dijkstra, 2024].

De situatie met de overlaat in Maastricht laat zien dat Nederland kwetsbaar is voor bressen in waterkeringen, ook al is de kans hierop klein. Zonder waterkeringen zou ongeveer zestig procent van het land regelmatig onder water komen te staan [Rijkswaterstaat, 2023b]. In dat gebied wonen ongeveer negen miljoen mensen en wordt ongeveer zeventig procent van het Nederlandse nationale product verdiend [Dijkstra et al., 2022]. De huidige waterkeringen zijn zo ontworpen dat ze bestand zijn tegen vele omstandigheden met een relatief hoog beschermingsniveau vergeleken met andere landen, maar met een zeker overschrijdingsrisico. Onder de ontwerp-omstandigheden kunnen zich echter extreme situaties voordoen met onverwachte storingen. Dit toont dan ook het belang van onderzoek naar noodmaatregelen bij bressen aan met het beschermen van Nederland tegen dit mogelijke falen, zeker gezien de gevolgen van klimaatverandering [Dijkstra et al., 2022]. Deze noodmaatregelen zullen de preventie door middel van waterkeringen niet vervangen, maar ondersteunen deze door catastrofale bres-breuken tijdens extreme scenario's te voorkomen [De Leeuw et al., 2012]. De vraag naar de beste aanpak en strategie bij bressen neemt daarom toe om de directe schade bij overstromingen en de daaropvolgende herstelkosten te beperken. Dit onderzoek richt zich dan ook niet op alle stappen van de bres identificatie tot het monitoren van de ingezette noodmaatregelen, maar voornamelijk op de stappen 2 en 3 van dit proces (in paragraaf 1.2 beschreven). Hierbij gaat het voornamelijk over een strategie voor het verbeteren van de afweging en het besluit van het type te nemen noodmaatregel met het daarbij efficiënt vaststellen en analyseren van het probleem met bepalende factoren.

Dit onderzoek gaat daarmee over de beste aanpak en strategie bij bressen. De belangrijkste partij in dit onderzoek is Infram Hydren, een adviesbedrijf gespecialiseerd in de watertak van de civiele techniek. Dit onderzoek wordt uitgevoerd als aanvulling voor de Wiki-noodmaatregelen website, waarop samen kennis en ervaringen worden ontwikkeld om nieuwe kennis en werkinstructies over noodmaatregelen bij hoogwater effectief toe te passen [Noodmaatregelen, 2024]. Deze website is opgericht door Rijkswaterstaat Water Verkeer & Leefomgeving en de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). De Wiki-noodmaatregelen website wordt beheerd door de Wiki-werkgroep met leden werkzaam bij Rijkswaterstaat en waterschappen, waar Infram Hydren een belangrijke rol in heeft. Daarnaast werkt Deltares, net als Infram, als onafhankelijk kennisinstituut aan innovatieve oplossingen op ditzelfde gebied voor de website Wiki-noodmaatregelen.

1.4 Probleembeschrijving

In de nasleep van de problemen met de overlaat in Limburg is de behoefte aan een effectieve strategie die toegepast zou kunnen worden bij geïnitieerde bressen. Hierbij zouden bressen in waterkeringen snel en effectief moeten kunnen worden gedicht of zou de groei van de bres zoveel mogelijk moeten worden beperkt om schade en slachtoffers te minimaliseren. Hoewel er al onderzoeken zijn gedaan naar noodmaatregelen bij bressen, is de informatie hierover veelal wijd-verspreid bij vele verschillende instanties en organisaties en moeilijk snel toegankelijk. Dit maakt het lastig om snel de meest geschikte effectieve maatregelen te vinden en daarmee handelingsperspectief te creëren in noodsituaties. Voor een effectieve aanpak moet alle relevante informatie namelijk snel en eenvoudig toegankelijk te zijn om bij een bres snel de juiste keuze voor een noodmaatregel te kunnen maken.

1.5 Leeswijzer

In deze leeswijzer wordt een overzicht van de inhoud van de hoofdstukken in dit onderzoek gegeven. In het eerstvolgende hoofdstuk 2 wordt het doel met de uiteindelijke doelstelling van dit onderzoek (paragraaf 2.1) gegeven. Om dit doel te helpen bereiken, zijn een drietal onderzoeksvragen opgesteld (paragraaf 2.2), waarna de afbakening van het onderzoek is gegeven (paragraaf 2.3). In het daaropvolgende hoofdstuk 3 worden de onderzoekstechnieken die in deze scriptie gebruikt zijn verder toegelicht per opgestelde onderzoeksvraag.

In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de onderzoeksvragen gepresenteerd door middel van drie paragrafen. In paragraaf 4.1 zijn de belangrijke beoordelingsfactoren gegeven die van invloed zijn op de inzet van noodmaatregelen bij bressen. In de daaropvolgende paragraaf 4.2 zijn de geschikte noodmaatregelen voor de bressen die door deze eerdere beoordelingsfactoren kunnen worden beoordeeld gegeven. In de derde en laatste paragraaf 4.3 worden geschikte handelingsperspectieven besproken waarna de keuze voor het uiteindelijke handelingsperspectief resultaat verder zal worden toegelicht. Deze drie paragrafen kunnen later samen worden gebruikt in de vorming van het uiteindelijke handelingsperspectief met de daar-bijhorende noodmaatregelen en beoordelingsfactoren in hoofdstuk 5.

In de discussie in hoofdstuk 6 is kritisch gereflecteerd op de resultaten, mogelijke beperkingen en opmerkelijke bevindingen van dit onderzoek, waarin is gekoppeld aan de resultaten van dit onderzoek. In de conclusie in hoofdstuk 7 wordt het resultaat van het onderzoek beschreven en antwoord gegeven op de onderzoeksvragen. In het laatste hoofdstuk van dit onderzoek, het aanbevelingen hoofdstuk 8, worden bruikbare adviezen aan de opdrachtgevers van dit onderzoek en suggesties voor verder onderzoek gegeven.

2 Onderzoeksdoelstelling

In dit hoofdstuk wordt het doel met de uiteindelijke doelstelling, gebaseerd op de probleem beschrijving (paragraaf 1.4), van het onderzoek gegeven (paragraaf 2.1). Om het doel te helpen bereiken, zijn een drietal onderzoeksvragen opgesteld (paragraaf 2.2). Verder is de afbakening van het onderzoek gegeven (paragraaf 2.3) waarin specifiek de wel en niet onderzochte punten in dit onderzoek worden beschreven.

2.1 Onderzoeksdoel

Het doel van dit onderzoek is ontwikkelen van een effectief handelingsperspectief voor het aanpakken van bressen in waterkeringen. Daarbij is het van belang te onderzoeken welke beoordelingsfactoren de inzet van een noodmaatregel bij bressen kunnen beïnvloeden. Verder is het benodigd te onderzoeken welke noodmaatregelen bij het dichten van bressen of het beperken van de groei van bressen gebruikt kunnen worden. Hierbij is het beoordelen van deze noodmaatregelen op de verschillende beoordelingsfactoren noodzakelijk om de geschikte inzet voor verschillende bressen vast te stellen. Het doel is om deze informatie op een goed toepasbare manier samen te brengen op de Wiki-Noodmaatregelen website, zodat de dijkbeheerder en waterkeringsspecialisten snel de meest effectieve noodmaatregelen kunnen toepassen.

Op basis hiervan is het einddoel bepaald:

"Ontwikkeling van een handelingsperspectief om uiteindelijke besluitvormers effectief te ondersteunen bij het dichten van bressen door effectieve noodmaatregelen en beoordelingsfactoren te vinden, en deze om te zetten in een handelingsperspectief dat past op de Wiki-noodmaatregelen website".

2.2 Onderzoeksvragen

Om het probleem in het onderzoek te ondersteunen met oplossen, zijn een drietal verschillende onderzoeksvragen geformuleerd. Deze onderzoeksvragen helpen de problemen te verklaren en te komen tot een plan van aanpak met het werken naar het uiteindelijke doel van dit onderzoek.

Wat zijn belangrijke beoordelingsfactoren die van invloed zijn op de keuze van noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?

Deze eerste onderzoeksvraag in dit onderzoek richt zich op de factoren die van invloed zijn op de keuze en uitvoering van noodmaatregelen bij bressen. Onderzocht wordt welke factoren en beperkingen belangrijk zijn voor besluitvormers bij het inzetten van noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van bresgroei. Hierbij is het doel het vinden van de effectief noodzakelijke beoordelingsfactoren die in het uiteindelijke handelingsperspectief mee genomen kunnen worden waarop een noodmaatregel wordt beoordeeld.

Wat zijn geschikte noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?

Deze tweede onderzoeksvraag richt zich op welke noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei kunnen worden gebruikt. Hierbij wordt onderzocht welke maatregelen er bestaan, zijn gebruikt of zijn ontwikkeld die effectief zouden kunnen worden toegepast. Deze noodmaatregelen zullen vervolgens worden beoordeeld op

de in de vorige hoofdvraag gevonden beoordelingsfactoren. Hierbij kan de toepasbaarheid van de verschillende maatregelen voor deze factoren worden bepaald en daarbij de effectieve inzet per scenario worden bepaald.

Wat is het meest effectieve handelingsperspectief voor besluitvormers voor op de Wiki Noodmaatregelen-website?

Voor deze laatste onderzoeksvraag wordt onderzocht hoe de eerder gevonden beoordelingsfactoren en noodmaatregelen effectief kunnen worden gebruikt door de uiteindelijke besluitvormers. Het doel is hierbij het creëren van een handelingsperspectief die goed aansluit bij wat deze waterkering-specialisten en dijkbeheerder nodig hebben. Dit zou vervolgens passend op de Wiki-noodmaatregelen website kunnen worden gezet.

Het samenvoegen van dit effectieve handelingsperspectief met de daarboven beschreven onderzoeksresultaten zal vervolgens als eindresultaat moeten leiden tot een uiteindelijk effectief handelingsperspectief resultaat. Dit resultaat zou door de dijkbeheerder of waterkeringsspecialisten gebruikt moeten kunnen worden voor het bepalen van de meest effectieve noodmaatregel bij een bres.

2.3 Afbakening onderzoek

In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op de afbakening van het onderzoek. Nederland heeft duizenden kilometers aan waterkeringen om ons land te beschermen, te onderscheiden in primaire en regionale waterkeringen. Primaire waterkeringen beschermen ons land tegen buitenwater uit de zee, grote rivieren en en grote meren (IJssel- en Markermeer) [Rijkswaterstaat, 2023b]. Regionale waterkeringen beschermen ons land tegen binnenwater uit de vele meren, kleine rivieren en kanalen [Rijkswaterstaat, 2023b]. Dit onderzoek richt zich op gebieden met bressen in regionale waterkeringen in Nederland, zoals die zich in de Maas in Limburg hebben voorgedaan (onderzoek context 1.3). Het eindresultaat van dit onderzoek zou ook voor primaire waterkeringen kunnen werken in de beginfase, maar daar focust dit onderzoek zich niet op en dit zal dus ook niet verder worden uitgewerkt.

De dijkbeheerder en waterkeringsspecialisten bij overheidsinstanties zoals waterschappen en Rijkswaterstaat zijn de doelgroep van dit onderzoek. Het uiteindelijke handelingsperspectief dient daarom door deze besluitvormers effectief te kunnen worden toegepast, waarbij met creëren ervan vooral met deze besluitvormers rekening zal worden gehouden.

In dit onderzoek is bij de keuze van beoordelingsfactoren ook het meenemen van factoren belangrijk bij gebieden vergelijkbaar met de onderzoek context in Limburg van belang (paragraaf 1.3). Hierbij wordt dus niet alleen gekeken naar welke noodmaatregelen er puur theoretisch geschikt bij bressen kunnen worden toegepast, maar ook naar de haalbaarheid, beschikbaarheid in Nederland, en de meer logistieke omstandigheden van de noodmaatregelen. Hierbij is een noodmaatregel alleen een noodmaatregel wanneer het binnen 1 dag ingezet kan worden [Duivendijk, 2024]. Een plaatsing van een noodmaatregel in het uiteindelijke handelingsperspectief zou immers daadwerkelijk toegepast moeten kunnen worden waarbij na het toepassen van 1 dag later veelal geen geval van (beheersbare) nood meer is. Dit valt dan ook buiten de afbakening van dit onderzoek. Daarbij zijn maatregelen die een voor-ingebrachte (sluit)constructie in de waterkering bevatten niet meegenomen, omdat er vanuit wordt gegaan dat deze vóór de inzet van een noodmaatregel worden gebruikt. Bij het toepassen van een noodmaatregel zal er vanuit worden gegaan dat er geen voor-ingebrachte constructie is of dat deze constructie niet (voldoende) werkt.

De focus van dit onderzoek is voornamelijk gericht op factoren die de daadwerkelijke inzet van een noodmaatregel beïnvloeden, waarbij de snelheid waarmee de bres groeit minder van belang is. Voor het juist vaststellen van deze factoren is namelijk veel meer tijd nodig dan in de tien-weken durende scriptie hierin kan worden besteed. Het aan elkaar gelijkstellen van de exacte bresgroei en de tijd benodigd voor het inzetten van noodmaatregelen valt buiten de afbakening van dit onderzoek. Sommige van de factoren die de snelheid van de bresgroei bepalen kunnen wel een dermate invloed hebben op de inzet van noodmaatregelen. Hiermee zullen alleen de dermate bepalende factoren worden meegenomen in het uiteindelijke handelingsperspectief, die niet of nauwelijks van los van de noodmaatregel inzet kan worden gezien, verder uitgelegd in paragraaf 4.1.

Verder zullen aanvullende noodmaatregelen voor het uitbreiden van de huidige Wiki-noodmaatregelen website worden onderzocht door succesvol ingezette of geavanceerde noodmaatregelen te onderzoeken. Hierbij ligt de nadruk op noodmaatregelen die geschikt zijn voor het dichten van bressen en het beperken van bresgroei voor de Nederlandse context. Deze noodmaatregelen zouden op het moment van publicatie van het eindresultaat van dit onderzoek in Nederland toepasbaar moeten kunnen zijn om meegenomen te worden in dit onderzoek, waarbij deze dus ook fysiek aanwezig dient te zijn. Hierbij zullen voornamelijk vrij recente onderzoeken worden bekeken, waarin ook verwijzingen naar oudere en in eerdere onderzoeken (geteste) noodmaatregelen worden meegenomen. Eventuele innovatieve noodmaatregelen in een (te) verre beginfase (zonder getest te zijn) zullen niet verder in dit onderzoek worden meegenomen.

Verdere validatie, van bijvoorbeeld het uiteindelijke handelingsperspectief resultaat, valt grotendeels buiten de afbakening van dit onderzoek. De verschillende noodmaatregelen en beoordelingsfactoren zullen wel ter validatie van dit onderzoek met experts op het gebied van onderzoek naar- en de inzet van noodmaatregelen bij bressen worden besproken (waarover meer in hoofdstuk 3). Wel zal de case in de aanleiding van dit onderzoek (besproken in paragraaf 1.3) in het uiteindelijke handelingsperspectief worden uitgewerkt. Hiermee zal worden gekeken of de noodmaatregelen die in deze case zijn uitgevoerd ook als uitkomst van het uiteindelijke handelingsperspectief effectief lijken.

3 Methodologie

In dit hoofdstuk worden de onderzoekstechnieken die in deze scriptie gebruikt zijn verder toegelicht. De gebruikte technieken voor het onderzoek zijn het uitvoeren van een literatuur onderzoek en het interviewen van experts, wat hieronder per onderzoeksvraag verder zal worden toegelicht.

3.1 Wat zijn belangrijke beoordelingsfactoren die van invloed zijn op de keuze van noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?

Voor het beantwoorden van deze eerste onderzoeksvraag is een tweetal onderzoekstechnieken gebruikt. De gebruikte technieken zijn het uitvoeren van een literatuur onderzoek en het doen van expert interviews, wat hieronder verder zal worden toegelicht.

3.1.1 Literatuuronderzoek

Voor het beantwoorden van deze eerste onderzoeksvraag zal als eerste een literatuuronderzoek worden gedaan. Hierbij zal door middel van eerdere uitgevoerde onderzoeken worden onderzocht welke beoordelingsfactoren de inzet van noodmaatregelen bij een bres bepalen en beïnvloeden. Deze beoordelingsfactoren kunnen bijvoorbeeld omstandigheden, technische haalbaarheid, praktische beschikbaarheid, veiligheid enzovoort zijn en zullen dus met eerder uitgevoerde onderzoeken worden onderzocht. Deze beoordelingsfactoren zullen vervolgens op invloed en relevantie verder worden geëvalueerd door middel van expert interviews zoals hierbeneden verder besproken (in sub-paragraaf 3.1.2). Het doel is uiteindelijk om de meest effectieve noodmaatregel per bres te identificeren door te bepalen welke beoordelingsfactoren cruciaal zijn. Deze factoren kunnen vervolgens worden gecombineerd met de noodmaatregelen (zoals beschreven in de volgende paragraaf 3.2) en vervolgens in het uiteindelijke handelingsperspectief worden toegevoegd.

De focus van dit onderzoek naar beoordelingsfactoren is voornamelijk gericht op het bepalen van de factoren die aangeven wanneer welke noodmaatregel daadwerkelijk ingezet kan worden. Hierbij is de toepasbaarheid van een noodmaatregel bij verschillende soorten bressen (zoals later in sub-paragraaf 4.1.2, denk hierbij aan bijvoorbeeld technische en praktische haalbaarheid) voornamelijk van belang. Hierbij kunnen bepaalde bresgroei factoren (denk hierbij aan een volledig uit zand bestaande waterkering) drastisch voor een bepaalde snelheid waarin de bres zich uitbreidt zorgen. Hierdoor zal het onderzoeken van deze bresgroei factoren dus wel gebeuren via literatuur onderzoek en zullen later de eventueel van grote invloed factoren verder worden meegenomen, bepaald door middel van expert interviews.

3.1.2 Expert interview

In aanvulling op het literatuuronderzoek zullen interviews met experts worden gebruikt voor het beantwoorden van deze eerste onderzoeksvraag. Het interview format met de bijbehorende vragen aan deze experts zijn opgenomen in bijlage (bijlage 10.1). De interviews zullen met in totaal 4 experts, waarvan twee experts (experts 1 en 4) gespecialiseerd op het gebied van onderzoek naar noodmaatregelen bij bressen en de twee andere experts (experts 2 en 3) op het gebied van de inzet van noodmaatregelen bij bressen (zie bijlage 10.2). Hiervoor zal als eerste met een van de Wiki-noodmaatregelen-opzetter van Deltares worden gepraat (expert 1), en als laatste met een zeer ervaren promovendus van onderzoek naar

noodmaatregelen bij bressen (expert 4). Daarbij zullen ook experts van verschillende belangrijke Nederlandse waterverdediging instanties (Waterschap Drents Overijsselse Delta (expert 2) en Rijkswaterstaat (expert 3)) worden gevraagd om een zo divers mogelijke blik op het onderzoek te krijgen. Hierbij zijn experts 2 en 3 dijkbeheerders, de doelgroep voor wie het resultaat van dit onderzoek bedoeld is.

Deze experts zullen voor de eerste hoofdvraag van de in het literatuuronderzoek geïdentificeerde beoordelingsfactoren worden bevraagd. Hierbij kunnen de experts aangeven of ze alle, in het literatuuronderzoek gevonden, beoordelingsfactoren van invloed achten op de inzet van noodmaatregelen bij bressen. Vervolgens zal aan de experts worden gevraagd of ze, voor de volledigheid van het onderzoek, nog aanvullende factoren hebben van invloed op de inzet van noodmaatregelen. Daarna zal de mate van invloed van al deze beoordelingsfactoren worden besproken. Deze input helpt bij het opstellen van een lijst met beoordelingsfactoren en bijbehorende mate van invloed op de inzet van noodmaatregelen. Die invloed kan later in het uiteindelijke handelingsperspectief worden gebruikt om zo effectief mogelijk tot de meest geschikte noodmaatregel te komen. Daarbij zullen de eventuele beïnvloedende bresgroei beoordelingsfactoren hierbij worden gevonden die niet los van de noodmaatregel inzet factoren gezien kunnen worden, die dan verder meegenomen zullen worden in het onderzoek.

3.2 Wat zijn geschikte noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?

Voor het beantwoorden van deze tweede onderzoeksvraag zijn net als in de vorige hoofdvraag een tweetal onderzoekstechnieken gebruikt. De gebruikte technieken zijn het uitvoeren van een literatuuronderzoek en het doen van expert interviews, wat hieronder verder zal worden toegelicht.

3.2.1 Literatuuronderzoek

Voor het beantwoorden van deze tweede onderzoeksvraag over noodmaatregelen bij bressen zal veelal een literatuuronderzoek worden uitgevoerd. In het verleden zijn, zoals eerder besproken (in paragraaf 1.4), eerdere onderzoeken gedaan naar noodmaatregelen bij bressen die echter op veel verschillende plekken weinig gecentraliseerd zijn. Hierdoor is het lastig op een snelle effectieve manier de meest geschikte noodmaatregel in te zetten. In het literatuuronderzoek zal worden geprobeerd deze wijd-verspreide informatie over potentiële noodmaatregelen bij bressen geschikt voor dit onderzoek hieruit te filteren. Deze noodmaatregelen zullen worden onderzocht binnen de eerder in het onderzoek gegeven afbakening (paragraaf 2.3). De hierin gevonden potentiële noodmaatregelen zullen vervolgens door middel van expert interviews worden beoordeeld op daadwerkelijke geschiktheid voor het onderzoek, zoals verder beschreven in sub-paragraaf 3.2.2. Deze lijst met daadwerkelijk geschikte noodmaatregelen zal vervolgens met literatuuronderzoek, in combinatie met de expert interview resultaten (hieronder verder besproken), op de in de vorige onderzoeksvraag gevonden beoordelingsfactoren worden beoordeeld. Hierbij zal de effectiviteit en geschiktheid met bijbehorende voor- en nadelen van deze maatregelen voor verschillende situaties van beoordelingsfactoren blijken.

3.2.2 Expert interview

In aanvulling zullen ook voor het beantwoorden van deze onderzoeksvraag expert interviews worden gehouden (met de in sub-paragraaf 3.2.2), ter ondersteuning van het literatuuronderzoek. Het format voor de interviews met de bijbehorende vragen aan de experts is opgenomen in bijlage (bijlage 10.1). Experts zullen daarbij na het uitvoeren van het eerste literatuuronderzoek, zoals beschreven hierboven (sub-paragraaf 3.2.1), de potentiële geschikte noodmaatregelen beoordelen. Hierbij zal aan de experts als eerste worden gevraagd of ze deze gevonden noodmaatregelen allemaal realistisch en geschikt achten. Verder zal in aanvulling op de door de experts gegeven mening over de eerder gevonden noodmaatregelen worden gevraagd of er nog aanvullende, voor het onderzoek relevante, noodmaatregelen zijn die meegenomen zouden moeten worden in het onderzoek.

Met de door de experts gegeven informatie over de mate van geschiktheid per noodmaatregel zal vervolgens een selectie worden gemaakt. Dit zal gedaan worden door het koppelen aan een waarde die de mate van geschiktheid aangeeft bij bressen. De informatie van alle experts zal vervolgens in een tabel samen worden gevoegd, waarin een onderscheid tussen geschikte, twijfelachtig-geschikte en ongeschikte noodmaatregelen worden onderscheiden. De ongeschikte noodmaatregelen zullen niet verder in het onderzoek worden meegenomen. De twijfelachtig-geschikte noodmaatregelen zullen daarna specifiekere worden onderzocht en toegelicht naar mogelijke aanvulling voor het onderzoek. Hierbij zal de achtergrond, ervaring en expertise van de verschillende experts in combinatie met informatie uit de verschillende expert interviews worden meegenomen. Daarbij zullen deze verder onderzochte twijfelachtige noodmaatregelen in de ongeschikte of geschikte groepen worden geselecteerd, waarbij de ongeschikte niet verder zullen worden meegenomen.

De geschikte noodmaatregelen zullen daarbij verder worden uitgewerkt en worden onderzocht op effectiviteit en toepasbaarheid voor de verschillende beoordelingsfactoren. Bij het bepalen hiervan zal voornamelijk gebruik van literatuuronderzoek worden gemaakt, zoals hierboven beschreven (sub-paragraaf 3.2.1). De door de experts gegeven informatie over de mate van geschiktheid per noodmaatregel voor bressen zal hiervoor ook ondersteunend worden gebruikt. Hierbij zal namelijk ook worden besproken wanneer en op welke manier deze noodmaatregel geschikt is. Dit zal later de meest effectieve inzet van een noodmaatregel voor de verschillende beoordelingsfactoren bepalen in het uiteindelijke handelingsperspectief resultaat (hoofdstuk 5).

3.3 Wat is het meest effectieve handelingsperspectief voor besluitvormers voor op de Wiki Noodmaatregelen-website?

Voor het beantwoorden van deze derde en laatste onderzoeksvraag zijn wederom een tweetal onderzoekstechnieken gebruikt. De gebruikte technieken zijn het uitvoeren van een relatief klein literatuur onderzoek en voornamelijk het doen van expert interviews, wat hieronder verder zal worden toegelicht.

3.3.1 Literatuuronderzoek

Voor deze laatste onderzoeksvraag is het doel om het meest effectief toe te passen handelingsperspectief te creëren die op de Wiki Noodmaatregelen-website geplaatst zou kunnen worden. Dit zou de besluitvormers ondersteunen om snel de meest effectieve noodmaatregel te kiezen. Het literatuuronderzoek zal bij het vinden van geschikte handelingsperspectieven voor vergelijkbare situaties zoals bij bressen in dit onderzoek. Hierbij dient de toepassing

van het handelingsperspectief realistisch en volledig, maar ook zeker effectief toepasbaar te zijn. Handelingsperspectieven die hiervoor geschikt zouden kunnen zijn worden daarmee onderzocht en in het onderzoek uitgelicht. Daarbij zullen de voor- en nadelen voor deze gevonden potentiële effectieve handelingsperspectieven verder worden toegelicht.

3.3.2 Expert interview

De expert interviews zullen voornamelijk bij het beantwoorden van deze derde onderzoeksvraag worden gebruikt. Het interview format met de bijbehorende vragen die aan de experts zullen worden gesteld zijn opgenomen in de bijlage van dit onderzoek (bijlage 10.1). In deze interviews met onder andere dijk-beheerders (benoemd in sub-paragraaf 3.1.2) zal als eerste worden gevraagd naar wat de experts benodigd hebben in een handelingsperspectief bij bressen. Hierbij zal worden gevraagd wat essentieel is om effectief een juiste keuze voor een noodmaatregel te maken. De voorkeur voor de volledigheid en uitgebreidheid van een effectief handelingsperspectief, met bijbehorende hoeveelheid functies waaruit deze bij voorkeur zou moeten bestaan, zou hieruit moeten blijken. Vervolgens zal ook naar de of er een voorkeur voor een bepaald handelingsperspectief is aan de experts worden gevraagd. Hierna zullen de in het literatuuronderzoek gevonden handelingsperspectieven aan de experts worden voorgelegd, waarna de meningen zullen worden gepeild. De verschillende uitkomsten van de verschillende vragen zullen, met de achtergrond en ervaring van de verschillende experts (voornamelijk gefocust op experts 2 en 3, beide dijkbeheerder), worden uitgewerkt. Hierbij zal de voorkeur voor het formaat en de daar bijhorende van het handelingsperspectief vorm(en) moeten blijken, wat als eindresultaat voor dit onderzoek zal worden gebruikt (weergegeven in hoofdstuk 5).

3.4 Uitwerking uiteindelijke handelingsperspectief resultaat

Voor de uitwerking van het uiteindelijke handelingsperspectief resultaat zullen de hierboven beschreven hoofdvragen worden samengevoegd tot één uiteindelijk handelingsperspectief resultaat. In de door de experts als voorkeur aangegeven handelingsperspectief-vorm zullen de relevante effectieve beoordelingsfactoren worden gezet. De volgorde van deze beoordelingsfactoren in het handelingsperspectief zal worden bepaald door wat de experts hebben aangegeven over de mate van invloed van deze factoren op de inzet van een noodmaatregel. Daarbij zullen de geschikt geachte noodmaatregelen voor dit onderzoek gebruikt worden en zijn deze beoordeeld op basis van deze in het handelingsperspectief vastgestelde beoordelingsfactoren. Bij het afwerken van dit handelingsperspectief zou zo efficiënt de meest effectieve noodmaatregel moeten kunnen worden gevonden voor een bres in een waterkering, die vervolgens snel voorbereid en ingezet kan worden.

4 Onderzoekresultaten

In dit hoofdstuk worden de onderzoeksresultaten gegeven door middel van drie paragrafen. In paragraaf 4.1 zijn de belangrijke beoordelingsfactoren gegeven die van invloed zijn op de inzet van noodmaatregelen bij bressen. In paragraaf 4.2 zijn de geschikte noodmaatregelen voor de verschillende bres scenario's die door deze eerdere beoordelingsfactoren kunnen worden beoordeeld gegeven. In de derde en laatste paragraaf van dit hoofdstuk (paragraaf 4.3) worden geschikte handelingsperspectieven besproken waarna de keuze voor het uiteindelijke handelingsperspectief resultaat verder zal worden toegelicht. Deze drie paragrafen kunnen later samen worden gebruikt in de vorming van het uiteindelijke handelingsperspectief met de daar-bijhorende noodmaatregelen en beoordelingsfactoren in hoofdstuk 5.

4.1 Beoordelingsfactoren bressen onderzoek

In deze paragraaf zijn de beoordelingsfactoren besproken die van invloed zijn op de inzet van noodmaatregelen en op de groei van de bres. Door inzicht te krijgen in de factoren die dit beïnvloeden, kunnen betere beslissingen worden genomen bij de inzet van noodmaatregelen. Hierbij kunnen deze geïdentificeerde beïnvloedende factoren in het uiteindelijke handelingsperspectief worden geplaatst om efficiënt de meest effectieve noodmaatregel per situatie te bepalen.

De beoordelingsfactoren die de inzet van noodmaatregelen beïnvloeden, kunnen in twee hoofdgroepen worden onderverdeeld. De eerste groep betreft de bresgroei, waarin het proces van de groei van de bres is beschreven wat helpt bij het inschatten van de benodigde noodmaatregelen. Dit wordt verder toegelicht in de sub-paragraaf over bresgroei factoren (sub-paragraaf 4.1.1). De tweede groep richt zich op de factoren die bepalen welke noodmaatregel wanneer het meest geschikt is. Deze groep wordt besproken in de sub-paragraaf over noodmaatregel-inzet factoren (sub-paragraaf 4.1.2). De factoren uit beide groepen zijn vervolgens aan experts op het gebied van onderzoek naar noodmaatregelen bij bressen of de inzet van noodmaatregelen bij bressen (in sub-paragraaf 4.1.3). Hierbij is de relevantie, volledigheid en invloed van de verschillende beoordelingsfactoren onderzocht voor de toevoeging in het uiteindelijke handelingsperspectief.

4.1.1 Bresgroei beoordelingsfactor

Het inschatten van de bresgroei is belangrijk voor de identificatie en inzet van de meest geschikte noodmaatregel. De gekozen noodmaatregel dient niet op het moment dat deze wordt gekozen, maar op het moment van inzet de meest effectieve noodmaatregel te zijn. Zoals eerder over de bresvorming tijd besproken (paragraaf 1.2) is dit afhankelijk van de tijd benodigd voor de inzet van noodmaatregelen bepaald door verschillende factoren. In deze tijd dat het duurt ontwikkeld en groeit de bres steeds verder. Voor het bepalen van de noodmaatregel inzet kan het weten van (bepaalde) bresgroei factoren belangrijk zijn om de ernst en snelheid van het groeien van de bres te begrijpen en daarmee een geschikte noodmaatregel. Daarvoor zullen eerst alle factoren van invloed op de bresgroei worden onderzocht door middel van een literatuuronderzoek. Hierover zullen de experts later hun mening (geven paragraaf 4.1.3) waarop potentieel de echt bepalende bresgroei factoren aanvullend voor dit onderzoek zouden kunnen worden meegenomen.

Stromingen door een bres

Om te beginnen zijn de stromingen door de bres heen van invloed op de groei van de bres. Wanneer water met een hoge snelheid door de bres heen stroomt zal de erosie van de waterkering sneller gaan, waardoor de bresgroei sneller toeneemt. Bij een relatief lage stroomsnelheid zou de bresgroei minder snel gaan [Janssen et al., 2021].

Waterkering materiaal

Het materiaal waaruit de waterkering bestaat is een andere factor die de snelheid van de bresgroei beïnvloed. In Nederland is onderscheid te maken in een aantal verschillende materialen waaruit een dijk-waterkering bestaat [Albers, 2014]. Een waterkering kan volledig uit klei bestaan, uit klei versterkt met zand op het binnentalud (figuur 2), uit zand bedekt met klei, of uit een versterkte kering met een oude klei kering als buitenberm (figuur 2) en een zandkern bedekt met klei [Albers, 2014]. Daarnaast zijn er ook waterkeringen zoals een overlaatdam (of sluis of stuw) die voornamelijk uit een hardere nauwelijks erodeerbaar materiaal bestaan [Rijkswaterstaat, 2023a]. Deze waterkeringen kunnen ook falen en afbreken, maar dat is sterker afhankelijk van de stroming en minder van de tijd in combinatie met de stroming.

Erodeerbare vooroever

De aanwezigheid van een erodeerbare vooroever kan ook het bresgroei proces beïnvloeden [Van den Berg, 2024]. Tijdens experimenten werden alleen de eerste drie fasen van het bresgroei proces waargenomen (zoals later beter zal worden besproken in de bres fasen met figuur 3), waardoor het effect van de vooroever in latere bresfasen niet kon worden vastgesteld [Van den Berg, 2024].

Watergehalte effect

Het watergehalte van de waterkering zou ook invloed op de bresgroei kunnen hebben. Bij eerdere onderzoeken naar taluderosie (term, zie 2) bleek dat bij een afname van het vochtgehalte met 24% de migratiesnelheid van de headcut (het terugschrijden van een kuil in stroomopwaartse richting) verhoogt [Verma et al., 2023]. Verdere verlaging (tot 50% had weinig verder effect). Bij het hoogste vochtgehalte was de erosie het sterkste [Verma et al., 2023].

Beschadigingen, oude reparaties en leidingen

Een potentiële factor die de bresgroei vermoedelijk kan beïnvloeden zijn oude reparaties, beschadigingen of leidingen die in of aan een waterkering zitten. Dit zijn veelal zwakkere plekken waardoor een bres vermoedelijk sneller kan uitbreiden en een bres dus sneller groeit als normaal [Noodmaatregelen, 2024].

Vegetatie

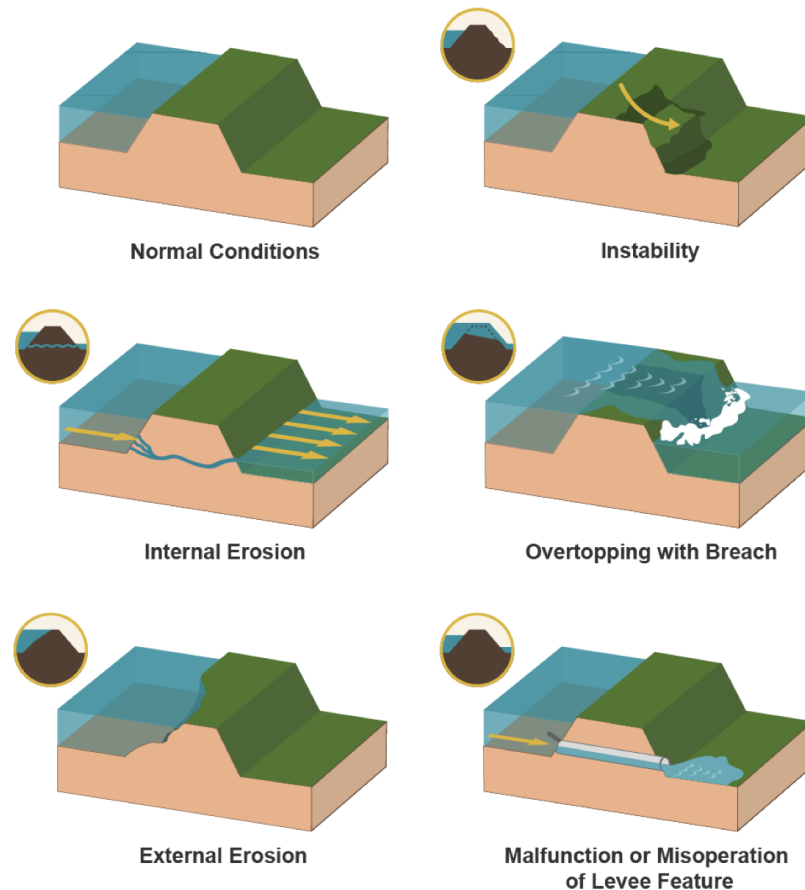
De vegetatie van een waterkering is een andere factor die invloed kan hebben op de bresgroei. Wanneer de vegetatie goed is en een bijvoorbeeld de wortels van de beplanting (van veelal gras) diep rijken zou vooral in een vroege fase de bresvorming langzamer kunnen verlopen in vergelijking wanneer dit niet het geval is [Willemsen, 2023].

Waterdruk

De waterdruk zou ook van invloed is op de bresgroei kunnen zijn. Wanneer er een grote hoeveelheid water tegen de waterkering aandrukt kan wellicht snellere uitbreiding van de bres worden veroorzaakt.

Faalmechanismen

De initiatie van een bres met het falen van een waterkering door een bepaald faalmechanisme zou ook potentieel een verschil in bresgroei kunnen veroorzaken. Deze faalmechanismen (kort besproken in paragraaf 1.1) omvatten een bres door overtopping, bres voorafgaand aan overtopping (externe erosie, interne erosie, instabiliteit) en storingen of onjuiste werking van een waterkering (figuur 7) zoals verder beschreven hieronder [NLSG, 2024].



Figuur 7: Potentiële faal-mechanismen waterkeringen [NLSG, 2024].

Een eerste initiatie faalmechanisme is de bres door overtopping. Dit gebeurt door erosie van de landwaartse helling door stroming over de waterkering, wat kan leiden tot instabiliteit en uiteindelijk tot een bres in de waterkering [NLSG, 2024].

Als tweede hoofdcategorie is de bres-initiatie voorafgaand aan overtopping. Dit komt door een combinatie van externe erosie, interne erosie of instabiliteit. Bij externe erosie heeft een waterstroming of golf werking de oppervlakte bescherming beschadigd, wat leidt tot verdere erosie en instabiliteit [NLSG, 2024]. Bij interne erosie heeft kwelwater gronddeeltjes geërodeerd, wat kan leiden tot instabiliteit en bresvorming [NLSG, 2024]. Ook door instabiliteit kan een bres ontstaan, waarbij problemen met de stabiliteit van de helling of fundering kunnen leiden tot verzakkingen [NLSG, 2024].

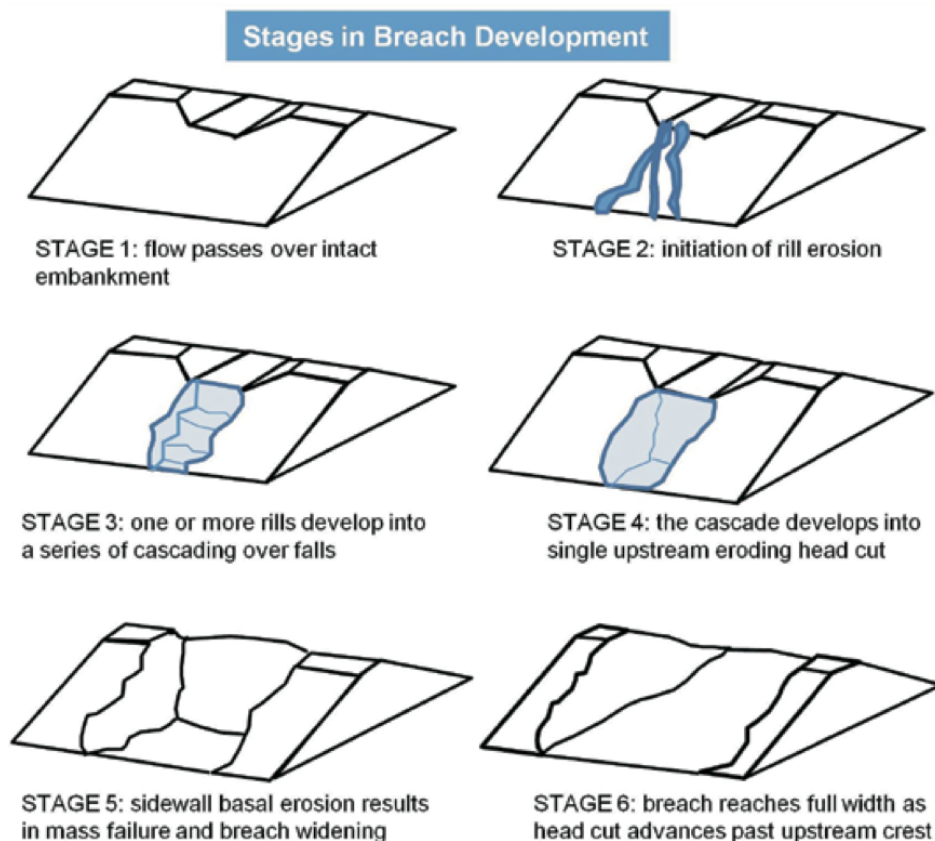
De derde is de initiatie van een bres door storing of onjuiste werking van een waterkering een faalmechanisme. het falen van voorzieningen zoals afsluit-poorten kan tot bressen leiden voordat overtopping plaatsvindt [NLSG, 2024].

4.1.2 Noodmaatregel inzet factoren

Deze tweede groep gaat zoals eerder beschreven over welke factoren zouden kunnen bepalen welke noodmaatregel het meest geschikt is. Hierbij wordt specifiek gefocust op de technische en praktische factoren van invloed zijn bij het kiezen van een noodmaatregel bij bressen. Deze potentiële factoren zullen later op daadwerkelijke invloed bij de inzet worden beoordeeld door de verschillende experts (sub-paragraaf 4.1.3). Hierbij zal de invloed van de verschillende beoordelingsfactoren voor de inzet van noodmaatregelen blijken, waarmee later voor het creëren van het meest effectieve handelingsperspectief voornamelijk zal worden verder gewerkt voor hoofdstuk 5.

Bres fases

De fase waarin bres zich bevindt kan potentieel de inzet van de noodmaatregelen beïnvloeden, wat ook eerder is besproken in paragraaf 1.2). Er zijn verschillende stadia van een bres, die kunnen bepalen welk type noodmaatregel kan worden geïmplementeerd [Moores et al., 2014]. De ontwikkeling van de bres is beschreven in verschillende fasen op basis van variatie in de groei van de bres. Oppervlakte-erosie begint normaal gesproken aan de stroom afwaartse kant of bij de teen(sloot) (figuur 2) [Verma et al., 2023]. Eenmaal geïnitieerd, zal de bres groeien, met een snelheid die wordt bepaald door vele factoren (sub-paragraaf 4.1.1). Voor elke fase van de bres biedt de volgende informatie richtlijnen voor de actie die moet worden ondernomen [Moores et al., 2014]. De verschillende bresfasen zijn te zien in figuur 8 en worden daarna verder besproken in de daaropvolgende kopjes.



Figuur 8: De fasen in de ontwikkeling van de bres geïllustreerd [Moores et al., 2014].

Fase 1

In de eerste fase, die loopt van stage 1 tot het begin van stage 2 (figuur 8), begint de erosie wanneer water over de waterkering stroomt. De landwaartse helling wordt steiler tot een kritische hoek bereikt wordt, met initiële erosie en kleine inkepingen in de waterkering. Er is licht waterverlies door infiltratie van water uit de waterkering en sedimentafzetting, wat de minerale afzettingen die worden gevormd door de ophoping van sedimenten op of nabij het aardoppervlak betekent. Het inzetten van noodmaatregelen in deze fase zouden moeten worden gericht op het dichtmaken van de bres en het beperken van verdere erosie [Janssen et al., 2024] en [Moore et al., 2014].

Fase 2

De tweede fase, die loopt van stage 2 tot het begin van stage 3 (figuur 8), kenmerkt zich als eerste door erosie van de binnentalud richting het buitentalud (zie termen figuur 2) en het verdwijnen van de volledige kam over de breedte van de waterkering. Daarbij is veelal ook versnelde erosie aan de stroomafwaartse zijde door hoge waterdruk. Noodmaatregelen blijven in deze fase gericht op het dichtmaken van de bres en het beperken van erosie om doorbraak te voorkomen [Janssen et al., 2024] en [Moore et al., 2014].

Fase 3

In de derde fase, die loopt van stage 3 tot het begin van stage 3 (figuur 8), treedt laterale erosie (het proces waarbij zijdelingse afbraak en verwijdering van grond aan de oevers van een waterlichaam plaatsvindt) op na kop-erosie, met erosie van de stroomopwaartse kruin (term zie figuur 2). Het topniveau van de dijk vermindert en leidt tot instorting en verbreding van de bres. Erosie aan de zijanten van de bres veroorzaakt verdere instorting. Noodmaatregelen richten zich in deze fase op het beperken van bresgroei en het plaatsen van materialen in de bres [Janssen et al., 2024] en [Moore et al., 2014].

Fase 4

In de vierde fase, die loopt van stage 4 tot het begin van stage 5 (figuur 8), wordt het voorland (zie figuur 2 voor term) van de dijk zichtbaar. Noodmaatregelen richten zich op het plaatsen van materiaal in de bres en het beperken van de bresgroei, hoewel dit lastig kan zijn. Het dichtmaken van de bres is nog redelijk mogelijk [Janssen et al., 2024] en [Moore et al., 2014].

Fase 5

De vijfde en laatste fase, die loopt van stage 5 tot het begin van stage 6 (figuur 8), ziet de stroming door de bres veranderen van superkritisch naar subkritisch, en gaat dus van heel snel naar heel langzaam, met een langzame toename van de bresafmetingen richting een evenwichtsbreedte. Noodmaatregelen kunnen tijdens deze fase moeilijk, voornamelijk vanwege de grootte van de bres, behalve bij kleine bressen of met grote middelen. Noodmaatregelen richten zich op het beperken van de uiteindelijke schade, aangezien bresgroei-beperkende maatregelen weinig tot geen impact hebben [Janssen et al., 2024] en [Moore et al., 2014].

Bres afmetingen

Twee belangrijke beoordelingsfactoren waarop de inzet van een noodmaatregel kan worden beïnvloed gaan over afmetingen van de bres. Hieronder vallen de hoogte en de breedte van de bres, die hieronder verder zullen worden toegelicht [Dagher et al., 2016].

Bres hoogte

De bres hoogte is de verticale afstand van het waterpeil op de plaats waar de noodmaatregel (in of bij de bres) wordt ingezet tot de bodem van de plaats waar de noodmaatregel (in of bij de bres) dient te worden ingezet. Deze hoogte beïnvloed noodmaatregelen doordat de afmeting hiervan bepaald welke noodmaatregel voor die hoogte geschikt is [Abdulrazzaq et al., 2022].

Bres breedte

De breedte van de bres is op een vergelijkbare manier als de hoogte van de bres van invloed op de keuze voor een geschikte noodmaatregel. De breedte van de bres kan op verschillende manieren worden gezien. Voor een effectieve inzet van de noodmaatregel dient deze op het breedste punt geschikt te zijn [Adria et al., 2023]. Het is daarbij van belang dat de bres in de volle breedte kan worden gedicht, waarbij de afmetingen niet kleiner zijn dan de breedte van de bres. Wanneer er nog ruimte is tussen de waterkering met de bres en de toegepaste noodmaatregel kan er hiertussen namelijk een extra sterke stroming ontstaan, met nog snellere bresgroei en een onbeheersbare situatie tot gevolg [Förster, 2011].

Stroming door de bres

Een andere factor die de inzet van de noodmaatregel beïnvloed, naast dat het ook de bresgroei beïnvloed, is de stroming door een bres. De noodmaatregelen variëren in krachten van het stromende water die ze aankunnen [Moores et al., 2014]. Voor het plaatsen van de noodmaatregelen in de bres wordt de locatie gekozen op basis van de bres stroming (waterdruk) door de bres stroming naast de afmetingen van de bres [Dagher et al., 2016]. Waar sommige noodmaatregelen effectief kunnen zijn bij lage stromingen, kunnen deze maatregelen met sterkere stromingen geheel niet passend zijn door weg-spoeling ervan vanwege te lage krachten die deze noodmaatregel aankan [Alkholossi, 2021b].

Draagkracht

Een andere factor die de inzet van noodmaatregelen kan beïnvloeden is de draagkracht van de waterkering waar de bres in zit. Bij een toepassing van een noodmaatregel vanaf de grond dienen vervoersmiddelen en machines in sommige gevallen te worden gebruikt, waarbij de waterkering sterk genoeg moet zijn om dit aan te kunnen [NLSG, 2024]. Ook zou bij het plaatsen van een noodmaatregel in de bres de draagkracht dit aan moeten kunnen.

Waterkering zijwaartse kracht

De toepassing van noodmaatregelen kan worden beïnvloed door de zijwaartse kracht van de waterkering. Een waterkering kan namelijk worden gebruikt als steunpilaar voor de noodmaatregelen, afhankelijk van de inzet van de noodmaatregel op de locatie in, voor of na de bres [NLSG, 2024]. Hierbij worden de uiteinden van de waterkering bij een bres vaak 'schouder-kracht' genoemd waartegen de noodmaatregel steunt. De schouder-kracht dient voor bepaalde noodmaatregelen sterk genoeg te zijn om ingezet te kunnen worden, waarbij een noodmaatregel met een grote breedte een breder deel van de waterkering als schouder gebruikt en dus eerder toegepast kan worden bij minder sterke schouders van de waterkering.

Ondergrond

De ondergrond waar de noodmaatregel op wordt ingezet kan ook de keuze voor een noodmaatregel beïnvloeden. De vorm van de bodem kan de inzet beïnvloeden, waarbij een

vlakke bodem voor bepaalde noodmaatregelen effectief is terwijl die noodmaatregelen niet geschikt zijn bij een oneffen ondergrond [Moores et al., 2014]. Dit kan de effectiviteit van de noodmaatregel op een negatieve wijze sterk beïnvloeden. In aanvulling kan de verkeerde toepassing met het lekkende water de bresgroei verder laten ontwikkelen met een onbeheersbare situatie als gevolg [Förster, 2011]. Noodmaatregelen zouden ook meer of minder geschikt kunnen zijn in de toepasbaarheid in situaties met een harde of juist zachte bodem [Moores et al., 2014].

Bereikbaarheid locatie

Een andere factor die van invloed op de inzet van noodmaatregelen kan zijn is de bereikbaarheid van een locatie. In moeilijk bereikbare gebieden kunnen bepaalde maatregelen beperkt zijn, waardoor alternatieve, eenvoudiger te plaatsen oplossingen nodig zijn. Bij goed bereikbare locaties kunnen vrachtwagens en graafmachines worden gebruikt, terwijl op moeilijk bereikbare plekken helikopters nodig kunnen zijn. De bereikbaarheid bepaalt dus het vervoersmiddel en de inzetbare noodmaatregelen, waarbij sommige maatregelen mogelijk niet inzetbaar zijn op moeilijk bereikbare locaties. Welke noodmaatregelen dit zijn zal later duidelijker worden (sub-paragraaf 4.2.3).

Beter uitgelegd kunnen materialen voor het dichten van een bres kunnen worden getransporteerd via het water (met een boot), over land (met een vrachtwagen in combinatie met een graafmachine of kraan) en door de lucht (met een helikopter) [Dagher et al., 2016]. Watertransport is handig om omvangrijke, zware materialen naar de bres locatie te krijgen. Het gebruik van een helikopter is een praktische oplossing gebleken met de bres in Limburg [Dijkstra, 2024]. Factoren waarmee rekening moet worden gehouden bij het gebruik van helikopters is de capaciteit met het aantal helikopters dat nodig is om vluchten mogelijk maken [Dagher et al., 2016]. Het gebruik van vervoersmiddelen voor transport over land is moeilijker en soms onmogelijk, maar wel veruit de beste manier [Dagher et al., 2016].

Geografische locatie

De geografische locatie van de bres kan de keuze van de noodmaatregel ook beïnvloeden. Capaciteiten bij het inzetten van noodmaatregelen zijn gebiedsgebonden, zo worden er bijvoorbeeld aannemers per dijk segment ingehuurd [De Leeuw et al., 2012]. De keuze voor de noodmaatregel van het sluiten van een bres is sterk afhankelijk van de beschikbare materialen, manieren en hulpbronnen in de regio of in het gebied [Dagher et al., 2016]. Zo moet er bijvoorbeeld ook genoeg personeel snel genoeg zijn om de bepaalde noodmaatregel te plaatsen en is er daarbij materieel voor het plaatsen (zoals een hijskraan) benodigd. Daarbij kan het zijn dat sommige specifieke noodmaatregelen niet snel voorhanden zijn in bepaalde gebieden waardoor deze niet ingezet kunnen worden.

Weersomstandigheden

Een andere factor die invloed kan hebben op de keuze naar een passende noodmaatregel zijn de weersomstandigheden. Bij een bres kan het zijn dat er ook weersomstandigheden zijn die de uitvoering van bepaalde noodmaatregelen niet bevorderen tot heel lastig maken. Een voorbeeld hiervan is het inzetten van chinooks (beschreven in paragraaf 1.3), die niet tegen alle weersomstandigheden inzetbaar zijn. In aanvulling op de in mindere mate toepasbaarheid van materiaal en materieel is de veiligheid van het personeel wat werkt met het aanbrengen van de noodmaatregelen. Een noodmaatregel dient altijd alleen te worden ingezet als de veiligheid van deze mensen kan worden gewaarborgd [Moores et al., 2014].

4.1.3 Effectieve beoordelingsfactoren expert interviews

In deze sub-paragraaf zijn de in vorige onderdelen (sub-paragrafen 4.1.1 en 4.1.2) gegeven beoordelingsfactoren voor de bresgroei en de noodmaatregel inzet aan de experts (paragraaf 10.2) voorgelegd. Hierbij hebben de experts hun analyse op de verschillende factoren gegeven. De meningen over de verschillende factoren zijn, met de analyse van deze experts, beoordeeld op hoe belangrijk ze zijn bij het inzetten van de noodmaatregelen en vervolgens omgezet naar een cijfer. Hier zijn ook nieuwe aanvullende factoren uit gekomen die daarna zullen worden toegelicht. De resultaten hiervan worden in deze sub-paragraaf gegeven.

Expert mening tabel

De meningen die de experts over de invloed van de eerder opgestelde beoordelingsfactoren hebben, met de inzet van een noodmaatregel, zijn voor het overzichtelijk presenteren van de resultaten vertaald naar een cijfer die tussen de 0 en de 4 (figuur 9). Een 0 betekent dat de expert aangeeft dat de factor geen effect heeft op de inzet van een noodmaatregel. Een 1 betekent dat de factor weinig invloed heeft. Een 2 geeft aan dat een factor een gemiddelde invloed heeft. Een 3 geeft aan dat de noodmaatregel een redelijk grote invloed heeft. Een 4 geeft tot slot aan dat de expert een grote invloed van de factor aangeeft op de inzet van een noodmaatregel. De verschillende kleuren in de gemiddelde-waardes kolom geeft aan of de bepaalde beoordelingsfactor wel (groen) of niet (rood) meegenomen zal worden, of eerst verder zal worden bediscussieerd (oranje). De reden met de daar-bijhorende grens van het wel of niet meenemen zal onder de figuur (figuur 9) verder worden toegelicht.

Noodmaatregelen	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Gemiddelde
BRESGROEI FACTOREN					
Faalmechanismen	4	2	4	2	3,0
Watergehalte effect	0	1	2	3	1,5
Erodeerbare vooroever	1	-	1	-	1,0
Beschadigingen of oude reparaties	1	3	1	2	1,8
Waterkering bekleding	3	3	3	3	3,0
Stroming	3	2	3	3	2,8
Vegetatie	2	2	1	2	1,8
Waterdruk	3	2	3	2	2,5
Waterkering materiaal	4	4	4	3	3,8
NOODMAATREGEL INZET FACTOREN					
Bres fases	4	4	4	2	3,5
Bres hoogte	4	4	4	4	4,0
Bres breedte	4	4	4	4	4,0
Stroming door bres	4	4	4	4	4,0
Ondergrond (effenheid)	3	3	3	3	3,0
Waterkering draagkracht	3	3	3	3	3,0
Waterkering zijwaartse kracht	2	3	3	2	2,5
Bereikbaarheid locatie	3	3	3	3	3,0
Weersomstandigheden	2	2	3	3	2,5
Geografische locatie	3	3	4	3	3,3

Figuur 9: Foto van een tabel met meningen van experts aan waardes gekoppeld over de verschillende noodmaatregelen.

Expert resultaten discussie belangrijke beoordelingsfactoren

Uit de figuur (figuur 9) zijn de door de experts beoordeelde belangrijke factoren terug te vinden. Deze factoren zijn terug te vinden met de grootste gemiddelde waarde, waarbij eerst gefocust is op de bresgroei factoren en vervolgens op de noodmaatregel inzet factoren.

Bresgroei factoren

Als eerste wordt hier besproken hoe verder met de bresgroei factoren zal worden gegaan met het meenemen in uiteindelijke handelingsperspectief. De focus is in dit onderzoek is namelijk zoals ook eerder aangegeven in de afbakening van het onderzoek (paragraaf 3.2.2) vooral op de noodmaatregel inzet factoren gericht met het oog op de tijd en focus van dit onderzoek. Het meenemen van bepaalde bresgroei factoren lijkt echter wel noodzakelijk voor een goed werkend handelingsperspectief met de voorspelling en tijd om een noodmaatregel in te zetten (expert 1) Het exact voorspellen van veelal relatief kleine, laag beoordeelde factoren (figuur 9) is lastig en heeft relatief een lage invloed op de bresgroei (expert 1). Hierdoor zou de focus op de factoren waarvan blijkt dat deze wel dermate bepalend zijn in de bresgroei moeten liggen (expert 1, 2 en 3) om het handelingsperspectief effectief te maken. De scheiding van de figuur zal daarmee vanaf het moment waarop een bresgroei beoordelingsfactor van een redelijk grote invloed heeft (vanaf 3,0 en aangegeven met groen in figuur 9) verder worden meegenomen. De in het rood gemarkeerde beoordelingsfactoren voor de bresgroei (met een gemiddelde waarde tot 2,0 in figuur 9) zullen niet verder worden meegenomen. De factoren die tussen de gemiddelde invloed en de relatief grote invloed inzitten zijn twijfelachtige beoordelingsfactoren (in oranje aangegeven in figuur 9) en zullen verder worden bediscussieerd over het wel of niet meenemen in het uiteindelijke handelingsperspectief.

Om te beginnen met het discussiëren over het wel of niet meenemen van de twijfelachtige beoordelingsfactoren voor in het uiteindelijke handelingsperspectief (in oranje aangegeven in figuur 9). Het meenemen van deze voor het onderzoek twijfelachtige factoren zijn de stroming door de bres en de druk van het water tegen de waterkering met daarin de bres. Deze factoren zijn voor een groot deel in overlap met respectievelijk de in de noodmaatregel inzet factoren gegeven stroming door de bres en bres hoogte (expert 2, 3 en 4). Zoals in de figuur te zien is (figuur 9), zijn beide factoren wel van groot belang bij de noodmaatregel inzet (expert 1, 2, 3 en 4) en zullen deze factoren in elk geval verder worden meegenomen in het uiteindelijke handelingsperspectief. Het hierbij meenemen van de invloed van deze factoren op de bresgroei lijkt relatief gezien aanvullend van belang zonder de effectiviteit van het uiteindelijke handelingsperspectief te veel verminderen (door het toevoegen van twee extra factoren). Daarom zal bij het meenemen van de stroming door de bres en bres hoogte ook de verhoogde mate van bresgroei door deze factoren worden meegenomen.

Noodmaatregel inzet factoren

Als tweede wordt hier het meenemen van de noodmaatregel inzet factoren besproken en bediscussieerd. Zoals eerder benoemd ligt de focus meer op deze groep factoren dan op de bresgroei factoren waarbij een lagere score vereist is om meegenomen te worden in het uiteindelijke handelingsperspectief. De grens hierbij ligt op factoren die zijn beoordeeld vanaf een gemiddelde invloed op de noodmaatregel inzet (een gemiddelde score vanaf 2,0 in figuur 9 met groen aangegeven). Alle noodmaatregel inzet factoren benoemd en besproken tijdens de expert interviews blijken hier aan te voldoen en zullen daarmee allen worden meegenomen in het uiteindelijke handelingsperspectief.

Aanvullende factoren

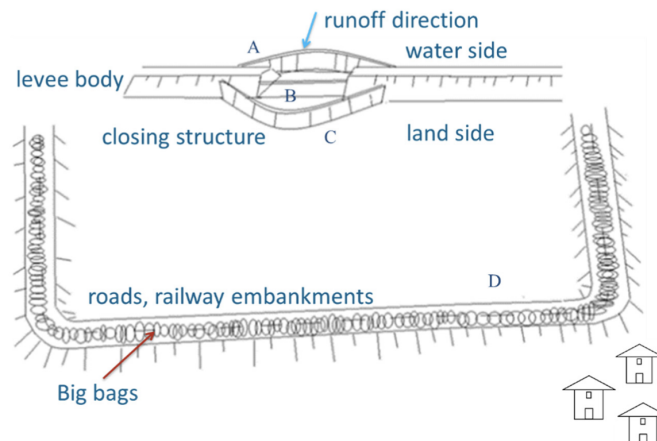
In aanvulling op de aan de experts voorgelegde beoordelingsfactoren is ook ruimte geboden voor het benoemen van aanvullende beoordelingsfactoren. Hierbij zijn een aantal aanvullende factoren benoemd die hieronder verder zijn uitgewerkt.

Waterkering hoogte

De hoogte van de waterkering (of waterpeil) vanaf het achterland gezien kan op twee manieren de inzet van noodmaatregelen beïnvloeden (expert 2). Als eerste kan een groot hoogteverschil tussen het achterland en de waterkering zorgen voor een iets grotere bresgroei door het water wat over de waterkering stroomt. Deze factor is door de overige expert niet benoemd en heeft echter maar een relatief kleine invloed (expert 2) waardoor deze niet verder wordt meegenomen. De hoogte van de waterkering is wel van belang bij het opvangen van water in het achterland (tot aan de waterkering) de stroming door de bres heen te stoppen (expert 1). Een noodmaatregel die dit doel heeft dient hoog genoeg te zijn om op deze manier de bresgroei te stoppen. Deze beoordelingsfactor die de inzet van een noodmaatregel kan bepalen bij het opvangen van water is hiervoor dermate van belang dat dit daarom wel meegenomen zal moeten worden in het uiteindelijke handelingsperspectief.

Noodmaatregel toepaslocatie bij bres

Een andere factor waarmee met het sluiten van een bres rekening gehouden moet worden is de toepaslocatie van de noodmaatregel in of bij de bres (experts 1,3,4). De noodmaatregel toepaslocatie bij een bres kan ook afhangen van bepaalde factoren met bijbehorende voor- en nadelen. Hierbij wordt als toepaslocatie beschreven wat de afweging is om een noodmaatregel stroomopwaarts (A), midden op de locatie van de bres (B), of stroomafwaarts (C) te plaatsen, te zien in figuur 10. De toepaslocatie met het plaatsen van noodmaatregelen in of bij een bres hangt ook sterk af van de gevolgen van een bres en de mogelijkheid tot plaatsen (expert 3) in bijvoorbeeld het achterland, en zal dus daarmee dus verder in het onderzoek worden meegenomen. Daarbij zou een aanvullende manier van schade voorkomen het beschermen van objecten zijn. Daarbij zou gekozen kunnen worden voor het plaatsen van noodmaatregelen op locatie D (figuur 10) door bijvoorbeeld big bags relatief vlakke plaatsen waar bijvoorbeeld wegen of treinsporen liggen waar dan goed een afsluiting gemaakt kan worden [Dagher et al., 2016]. Dit kan als het dichteren van een bres niet of nauwelijks kan om de schade zoveel mogelijk te verminderen (valt verder buiten onderzoek).



Figuur 10: Noodmaatregel toepaslocatie opties in of bij een bres [Dagher et al., 2016].

Bij het stroomopwaarts plaatsen (optie A in figuur 10) kan de noodmaatregel tegen de waterkering aan steunen en daarmee stabiel blijven liggen [Dagher et al., 2016]. Daarbij moet de draagkracht en zijwaartse kracht van de waterkering wel sterk genoeg zijn [Dagher et al., 2016]. Een nadeel bij het stroomopwaarts plaatsen is het afleggen van een langer pad aan noodmaatregelen waarbij veelal meer materiaal nodig is wat ook veelal meer tijd kost met het plaatsen [Moore et al., 2014].

Met het midden in de bres plaatsen (optie B in figuur 10) zijn de veelal ondiepere waterdiepten en het kortste sluitingspad voor het dichten van de bres voordelen [Moore et al., 2014], waarbij veelal minder tijd en materiaal nodig is. Nadelen bij het plaatsen in de bres zijn de veelal hogere stromingen en een lastige toepassing van grote noodmaatregelen die niet goed uitgelijnd kunnen zijn. Deze noodmaatregelen kunnen daarmee interfereren met permanente waterkering [Moore et al., 2014]. Deze noodmaatregel locatie zorgt er in aanvulling hierop voor dat de waterkering niet als steun wordt gebruikt en er dus een minder hoge draag- en waterkering kracht is vereist [Dagher et al., 2016].

Bij het stroomafwaarts plaatsen van noodmaatregelen (optie C in figuur 10) is een voordeel dat de noodmaatregel afgeschermd is van de hoge rivierstromingen [Moore et al., 2014]. Nadelen zijn dat er een langer pad en meer tijd nodig is met het plaatsen wat veelal ook meet materialen vergt [Moore et al., 2014]. Een nadeel van deze optie is dat het lastig te realiseren is als er (hoog) water aan de landzijde staat. Het plaatsen van optie C kan de enige optie zijn als de bres vanaf de landzijde moet worden hersteld [Dagher et al., 2016].

Opsomming belangrijke beoordelingsfactoren

In deze opsomming van beoordelingsfactoren zijn de factoren die allemaal meegenomen zullen worden in het uiteindelijke handelingsperspectief samengevat. Deze factoren zijn de faalmechanismen, waterkering bekleding, waterkering materiaal, bres fases, bres hoogte, bres breedte, stroming door bres, ondergrond (effenheid), waterkering draagkracht, waterkering zijwaartse kracht, bereikbaarheid locatie, weersomstandigheden, geografische locatie, waterkering hoogte en noodmaatregel toepaslocatie.

4.2 Bres noodmaatregelen

De volgende paragraaf om tot het uiteindelijke handelingsperspectief resultaat te komen is de paragraaf over geschikte effectieve noodmaatregelen voor het dichten van een bres of het verminderen van de bresgroei. Voor dit onderzoek zijn noodmaatregelen die geschikt zijn voor gebieden zoals besproken in de onderzoeks-afbakening (paragraaf 2.3) van belang.

Deze paragraaf is onderverdeeld in drie sub-paragrafen. Voor het eerste onderdeel (sub-paragraaf 4.2.1) van de bres noodmaatregelen is onderzocht welke noodmaatregelen potentieel gebruikt kunnen worden voor het dichten van bressen of het verminderen van de bresgroei. Deze noodmaatregelen zijn bij het daaropvolgende onderdeel (sub-paragraaf 4.2.2) voorgelegd aan experts op het gebied van onderzoek naar- of de plaatsing van noodmaatregelen bij bressen. Hierbij is de toepasbaarheid van de potentiële noodmaatregelen onderzocht en zijn de geschikte noodmaatregelen voor het uiteindelijke handelingsperspectief gevonden. Voor het derde onderdeel (sub-paragraaf 4.2.3) zijn deze geschikt geachte noodmaatregelen verder onderzocht om de exacte effectiviteit van de maatregelen voor variërende beoordelingsfactoren te onderzoeken.

4.2.1 Noodmaatregelen bronnen onderzoek

In deze eerste sub-paragraaf van de bres noodmaatregelen is onderzocht welke noodmaatregelen gebruikt kunnen worden voor het dichten van bressen en/of het verminderen van de bresgroei. Dit is gedaan door middel van bronnen onderzoek naar noodmaatregelen die al eerder gebruikt zijn of in een onderzoeksfase zitten die daarbij potentieel tot een goede noodmaatregel zouden kunnen leiden. Voor elke noodmaatregel is hierbij beschreven wat de noodmaatregel inhoud en waar het voor gebruikt zou kunnen worden.

Doek of zeil

Om te beginnen met een doek of zeil als noodmaatregel, wat een doek of zeil van een paar millimeters tot centimeters dik inhoudt, met variërende afmetingen tot grote groottes (figuur 11a). Dit kan gebruikt worden bij een bres om bresgroei te verminderen of voorkomen (eventueel met andere noodmaatregel figuur 14 b waar plaatsing achter de big bags een mogelijkheid zou zijn) [Knotter, 2013]. Ook zou een plastic doek of zeil in combinatie met andere noodmaatregelen effectief kunnen worden toegepast, zoals het over deze noodmaatregelen heen leggen van deze doeken of zeilen om doorsijpelen te verminderen of voorkomen (te zien in bijvoorbeeld figuur 13 in combinatie met een zandzakkenwand) [Masolle et al., 2018]. In potentie zou een doek of zeil aanvullend gebruikt kunnen worden om een bres met minimale stroming en in een hele vroege beginfase te dichten in combinatie met andere materialen noodmaatregelen (zoals in figuur 11b) in combinatie met aarde of ander (iets zwaarder) materiaal.



(a) Tegen bresgroei

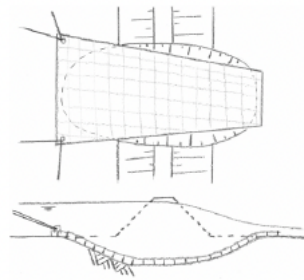


(b) Voor bresdichten

Figuur 11: Doek of zeil als noodmaatregel bij bressen [Trapbag, 2021] [Moores et al., 2014].

Matten of lappen

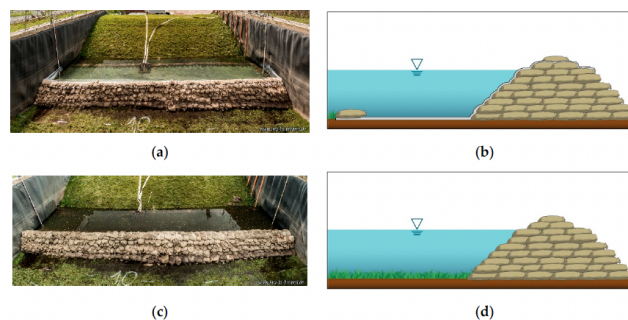
De gebruiken van matten of lappen zou een geschikte noodmaatregel kunnen zijn bij bressen (figuur 12) [Joore, 2004]. Hierbij kan het gebruik maken van folie of hout dat kan worden geplaatst in of bij een bres in combinatie met een andere noodmaatregel voor extra stabiliteit zorgen [Joore, 2004]. Dit kan de inzetbaarheid van de andere noodmaatregelen vergroten. Ook zou een toepassing van waterdichte matten of lappen een deel van de waterkering kunnen afdekken en zo bresgroei verminderen. De afmetingen van de materialen kan sterk verschillen, waarbij ook de gewichten kunnen variëren [Joore, 2004].



Figuur 12: Matten of lappen noodmaatregel [Joore, 2004].

Zandzakken

Het gebruik van zandzakken is een noodmaatregel die gebruikt zou kunnen worden bij het dichten van bressen of verminderen van de bresgroei. Deze noodmaatregel is kort gezegd een zak, vaak gemaakt van stevig materiaal zoals jute of kunststof, die wordt gevuld met zand of grond en vervolgens (vaak) dichtgenaaid. De zandzakken zijn rond de 30 tot 40 centimeter bij 60 centimeter groot en rond de 15 kilogram zwaar [Schmidt, 2014]. Zandzakken zouden als een zandzak afsluiting gebruikt kunnen worden langs een waterkering bij een bres die wordt afgesloten door een zandzak wand (met of zonder plastic, figuur 13). Ook kunnen de zandzakken als ballast worden gebruikt (voor bijvoorbeeld het vasthouden van een doek of zeil) [Knotter, 2013]. In aanvulling zouden zandzakken in potentie in een vroege fase geschikt kunnen zijn voor het dichten van bressen.



Figuur 13: Zandzakken-wand met plastic (a) en schematisch (b) noodmaatregel, zandzakken-wand zonder plastic (c) en schematisch (d) [Masolle et al., 2018].

Big bags

Een andere noodmaatregel voor bressen is het gebruik van big bags. Dit is een grote vorm van gevulde zakken met aarde vergeleken met de zandzakken zoals hierboven beschreven met standaard afmetingen van 90 bij 90 bij 110 centimeter. Big bags kunnen potentieel gebruikt worden bij het dichten van bressen en verminderen van de bresgroei. Big bags zouden daarbij zowel als bresdichting en als bresgroei beperkende noodmaatregel kunnen worden ingezet (figuur 14), maar ook als ballast [NLSG, 2024].



(a) Big bags bredssluiten



(b) Big bags bresgroeibeperken

Figuur 14: Big bags noodmaatregel [Moore et al., 2014].

Roostervloedwand

Een roostervloedwand met open cellen is een andere noodmaatregel die wellicht bij het dichten van bressen gebruikt zou kunnen worden (figuur 15), vergelijkbaar met een big bag (maar dan met een hard stijver materiaal aan de buitenkant). Het is een opvouwbaar kunststof rooster van ongeveer 100 centimeter en kan worden uitgebreid tot afmetingen van 120 bij 120 centimeter of 120 bij 60 centimeter per sectie. Het rooster kan worden vergrendeld en van bovenaf gevuld met bijvoorbeeld zand of andere materiaal [Moore et al., 2014].



Figuur 15: Kunststof roostervloedwand met open cellen [Moore et al., 2014].

Rots blokken

Het concept van deze noodmaatregel is het plaatsen van een bepaalde (grote) hoeveelheid stenen (of eventueel beton) op een locatie in of om de bres om deze te beschermen of om de bres te dichten. Rots kan potentieel een effectieve manier om hellingsbescherming te bieden tegen erosieve krachten zoals stroming, golfjes en puin (figuur 16) [Moore et al., 2014]. Deze blokken zijn in vele verschillende maten te verkrijgen waarbij afhankelijk van de grootte en zwaarte deze noodmaatregel zou kunnen worden toegepast [Joore, 2004].



Figuur 16: Rots blokken noodmaatregel [PembinaValley, 2011].

Rock bags

Een andere noodmaatregel die geschikt zou kunnen zijn is het gebruik van (grote) stevige water-doorlaatbare zakken stenen, rock bags (figuur 17). Deze noodmaatregel is ook in de case study gebruikt bij het dichten van de bres in Limburg begin 2024 (paragraaf 1.3). Het concept is redelijk vergelijkbaar met de rots berm, waarbij een rock bag een zak om de stenen heen zit wat verschillende voor en nadelen met zich mee kan brengen.



Figuur 17: Rock bags noodmaatregel [Rockbags, 2024].

Gabions

Gabions is een noodmaatregel vergelijkbaar met de rock bags, maar dan met stalen harde draad frames en gevuld met veelal iets zwaardere vul-materialen zoals beton, steen of grind (figuur 18) [Joore, 2004]. De ruimte in de draad frames waardoor water stroomt hangt af van de grootte van de vul materialen. Een verschil tussen de gabions en de rock bags is vooral de soepele en flexibelere aanpassing aan de bodem van rock bags.



Figuur 18: Gabions noodmaatregel [Moore et al., 2014].

Damwand

Een andere mogelijke noodmaatregel voor het dichten van een bres is het toepassen van een damwand voor het sluiten van een bres (figuur 19) [Joore, 2004]. Een damwand is een tijdelijke grond- en waterkerende constructie, al of niet voorzien van een verankering of stempeling in de grond. Deze noodmaatregel kan met verschillende materialen worden toegepast, maar voor de sluiting van een bres kan het beste voor staal of beton worden gekozen [Joore, 2004]. Voor het plaatsen van een damwand in de grond zijn verschillende technieken en zijn relatief grote en zware machines benodigd [Moore et al., 2014].



Figuur 19: Damwand noodmaatregel [PileBuck, 2023].

Pijpen, palen, buizen of masten

Het gebruik van pijpen, palen, buizen of masten is een andere noodmaatregel die gebruikt zou kunnen worden voor het dichteren van bressen (figuur 20) [Dagher et al., 2016]. Het concept is het plaatsen van een van deze materialen tegen de 'sterke schouders' van de waterkering aan met als doel het snel dichteren van een (deel van de) bres en het creëren van een constructie in de bres [Dagher et al., 2016]. Met sterke schouders wordt het deel van de waterkering aan beide uiteinden van de bres bedoeld waartegen de constructie steunt. Kleinere minder tegen de stroming gewassen aanvullende noodmaatregelen kunnen zo tegen de constructie steunen en zo de overige plekken afdichten.



(a) Buizen
[Solines, 2024]



(b) Mast
[Hoogspanningsnet, 2024]

Figuur 20: Gebruik maken van pijpen, palen, buizen of masten als noodmaatregel.

Steigers

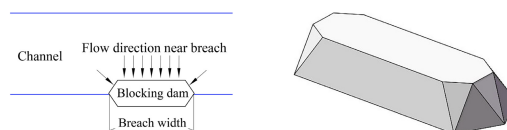
Het gebruik van steigers voor het dichteren van bressen is een andere potentiële noodmaatregel die gebruikt zou kunnen worden voor het dichteren van bressen (figuur 21) [Dagher et al., 2016]. In China is deze vorm al eens gebruikt om een bres te sluiten. Het concept is het steken van palen in de grond en zo van bovenaf de bres te dichteren met het plaatsen van materialen tegen de steigers aan [Dagher et al., 2016].



Figuur 21: Steiger noodmaatregel [of the River Gods, 2001].

Voorgefabriceerde bres plug

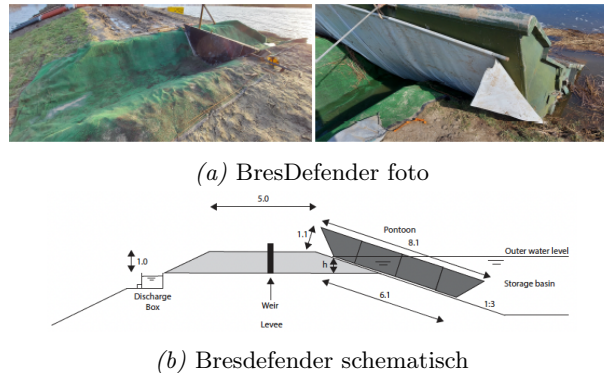
Een andere noodmaatregel voor het dichteren van waterkering bressen is een geprefabriceerd snel-sluit-apparaat (figuur 22). Deze noodmaatregel, die in verschillende gewichten en maten bestaan (zwaar, groot en klein), zouden individueel of gecombineerd kunnen worden gebruikt om een dam te vormen bij een bres om deze zo te dichteren [Jiao et al., 2022]. Dit zou van tevoren gemaakt moeten worden voor variërende groottes en gewichten om tegen vele verschillende mate van bressen te kunnen worden toegepast.



Figuur 22: Voorgefabriceerde bres plug noodmaatregel [Jiao et al., 2022].

BresDefender panton

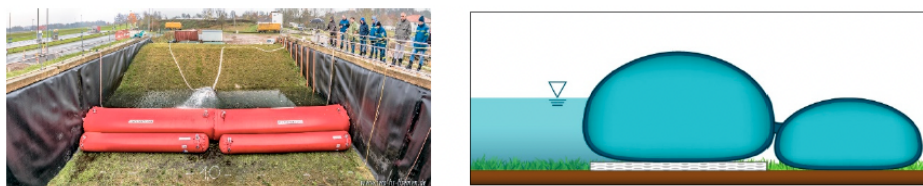
De BresDefender is een nieuwe noodmaatregel in de onderzoeksfase die gebruikt is om het proces van een bres in een waterkering te stoppen of te vertragen [Janssen et al., 2021]. Het betreft een drijvend ponton, oorspronkelijk gebruikt voor het bouwen van tijdelijke drijvende bruggen, met afmetingen van 6,94 meter lang, 8,13 meter hoog en 5450 kilogram zwaar (figuur 23). Het concept van de BresDefender het tegen de waterkering aanleggen op de plek van de bres en met genoeg 'gezonde schouders' van de waterkering om zo de bres te dichten of bresgroei te verminderen [Janssen et al., 2021].



Figuur 23: Bresdefender noodmaatregel foto (a) en (b) schematisch [Janssen et al., 2024].

Met water gevulde barrières

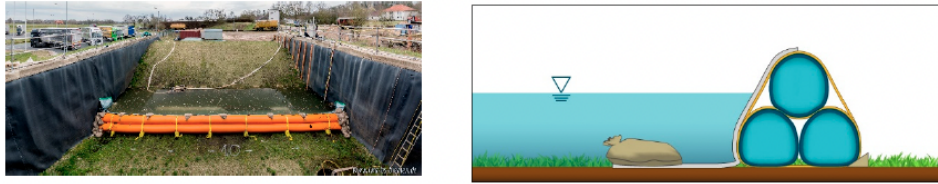
De met water gevulde barrière is een met water gevulde flexibele noodmaatregel voor het dichten van een bres door het water op te vangen aan de buitenzijde (en potentieel voor het in of voor een bres plaatsen van deze noodmaatregel). Deze maatregel maakt gebruik van elke waterbron en is gemaakt van industrieel polyester-membraan materiaal met vinylcoating en kan in verschillende versies voorkomen, waarbij 1 versie hieronder is laten zien (figuur 24) [Moore et al., 2014]. Beschikbare hoogtes van deze noodmaatregel zijn van 0,3 m tot 2,5 m, waarmee het bescherming tot 75% van de hoogte biedt (0,2 m tot 1,8 m). Het systeem is snel inzetbaar en verwijderbaar, met een voetafdruk van een aantal meter breed (afhankelijk van de versie) bij een bescherming van 1,5 m hoog [Moore et al., 2014].



Figuur 24: Met water gevulde barrière flutschutz doppelkammerschlauch (DKS) noodmaatregel [Masolle et al., 2018].

Met water gevulde buizen

Met water gevulde buizen (of met beton gevuld voor extra stabiliteit) is vergelijkbaar met de hierboven besproken barrière met voor opvangen van water binnendijks en bestaat uit flexibele, in elkaar grijpende buizen (figuur 25). Een enkele buis heeft een diameter van 0,5 m en is 15,25 m lang. De buizen kunnen als een piramide worden gestapeld tot 6 m hoog en worden bijgehouden door banden. Ze zijn snel inzetbaar, in 1,5 minuut vanaf een brandkraan of in drie minuten met een pomp. De hoogte kan eenvoudig worden vergroot door meer rijen toe te voegen aan de bestaande structuur [Moore et al., 2014].



Figuur 25: Met water gevulde buizen (tiger dam) noodmaatregel [Masolle et al., 2018].

Worsten met zand of water

De toepassing van worsten, een langwerpige 'zak', veelal gevuld met zand of water is een noodmaatregel die bij bressen zou kunnen worden toegepast (figuur 26) [Joore, 2004]. De worsten dienen bij stevige stromingen goed te worden verankerd of verzwaard wanneer zand of water zelf te weinig effect heeft [Joore, 2004]. Deze worsten zijn in variërende afmetingen te verkrijgen tot 6 meter hoog en 60 meter lang. Het plaatsen van de worst, vooral als die heel groot en lang is, kan lastig zijn vanwege het relatieve snel te beschadigen buitenmateriaal waardoor de noodmaatregel niet tot nauwelijks meer werkt [Joore, 2004].



Figuur 26: Worsten gevuld met zand en of water noodmaatregel [Taylor, 2016].

PLUG

Een andere wellicht geschikte noodmaatregel voor het dichten van bressen is de PLUG (Portable Lightweight Ubiquitous Gasket). De PLUG is een buis van sterke stoffen die gedeeltelijk met water wordt gevuld en in een bres wordt gedreven om de waterstroom te stoppen of verminderen van ongeveer 30 meter lang (figuur 27). Het is ontworpen om binnen de eerste vier tot zes uur na een breuk te werken, bij relatief diepe en smalle doorbraken [Albers, 2014]. Het testen was tot nu toe succesvol voor een bres van ruim 2 meter breed, testen voor 12 meter brede bressen worden voorbereid [Boc, 2022].



Figuur 27: PLUG noodmaatregel [Resio and Boc, 2011].

Draagbare damstelsel constructies

De toepassing van een draagbare damstelsel constructie is een constructie van beton, staal of hout die op de plek van een bres kan worden geplaatst [Moore et al., 2014]. Dit systeem kan hoogtes tussen de 1 tot 3 meter hoog halen en naast elkaar worden vastgeklit (figuur 28). Het gewicht van de constructie is licht en kan door de druk van het water op zijn plek worden gehouden [Moore et al., 2014]. Dit systeem zou kunnen worden gebruikt om water aan de binnenzijde van een bres op te vangen, waar een toepassing van dit systeem in de bres zelf minder lijkt te werken.



Figuur 28: Draagbare opklapbare noodmaatregel foto (links) en schematische weergave (rechts) [Masolle et al., 2018].

Caissons

Caissons zijn betonnen of stalen grote soort holle bakken die verschillende afmetingen kunnen hebben en van te voren dienen te worden gemaakt (figuur 29) [Förster, 2011]. Caissons worden vooral geplaatst met behulp van schepen en hulpconstructies over water [Förster, 2011]. Dit kan, wanneer beschikbaar en te plaatsen, voor grote bressen worden gebruikt met het in een keer afdekken van een groot deel van de bres [Förster, 2011]. De overige gaten kunnen vervolgens met kleiner aanvullende noodmaatregelen worden toegepast [Joore, 2004].



Figuur 29: Caisson noodmaatregel [Albers, 2014].

Container

Een andere noodmaatregel die bij relatief grote bressen ingezet kan worden om deze te dichten is door het gebruik van een (zee)container (figuur 30) [Dagher et al., 2016]. Hierbij zou een (zee)container potentieel in (redelijk) grote bressen worden geplaatst waarna het in een keer een groot deel van een bres kan dichten. Standaard (zee)containers zijn in verschillende maten toe te verkrijgen, variërend van rond de 6 tot 12 meter lang, 2,3 tot 2,6 meter hoog en 2,35 meter breed. De gewichten variëren vooral van tussen de 2180 kilogram tot 3820 kilogram zwaar [Alconet, 2024]. Voor sterke stromingen zou de container verder moeten worden geballast en voor meer stabiliteit zouden containers aan elkaar kunnen worden gekoppeld wanneer meerdere containers zijn geplaatst [Förster, 2011].



Figuur 30: Container noodmaatregel [Mitchell, 2019].

(Binnenvaart) schepen

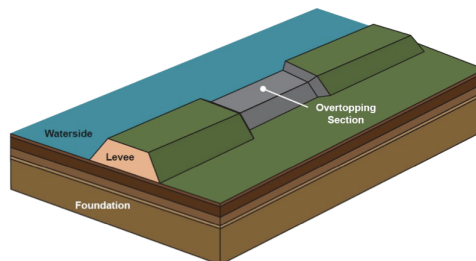
Een aanvullende noodmaatregel die vooral bij grote bressen ingezet kan worden is door het gebruik van (binnenvaart) schepen om een bres te dichtten (figuur 31) [Albers, 2014]. Het gebruik van deze noodmaatregel kan worden geadviseerd als een van de laatste redmiddelen in de latere fases om een grote bres met hoge stromingen proberen zoveel mogelijk te dichtten. Het concept van het toepassen is door het vaartuig naar de plaats van de bres te varen en het daar tot zinken te brengen [Albers, 2014].



Figuur 31: (Binnenvaart)ship noodmaatregel [Albers, 2014].

Gecontroleerde doorbraak forceren

Een potentieel mitigerende noodmaatregel kan een waterkering op een strategische plek gecontroleerd laten doorbreken zijn. Een op deze manier gecontroleerde doorbraak forceren op een waterkering kan ervoor zorgen dat bij een andere locatie als de bres het water over (of deels door) de waterkering stroomt (figuur 32) [Wallace et al., 2024]. Dit kan zorgen voor een vermindering van de gevolgen van een bres en een vermindering van de bresgroei. Dit zou in combinatie met andere noodmaatregelen kunnen worden ingezet om tijd te winnen de inzet succesvol te laten zijn [Wallace et al., 2024].



Figuur 32: Gecontroleerde doorbraak forceren noodmaatregel [NLSG, 2024].

4.2.2 Noodmaatregelen experts uitkomsten

In deze sub-paragraaf zijn de in het vorige onderdeel (sub-paragraaf 4.2.1) gevonden noodmaatregelen aan experts op het gebied van noodmaatregelen bij bressen voorgelegd. Hierbij is gekeken hoe de experts tegenover een potentiële inzet van deze noodmaatregelen staan waarbij de toepasbaarheid bij bressen is onderzocht. Gebaseerd op waardes gekoppeld aan de meningen van de verschillende experts zal worden gekozen welke noodmaatregelen wel en niet geschikt zijn en zo verder worden uitgewerkt (in het expert mening tabel). Bij twijfel over de geschiktheid van bepaalde noodmaatregelen bij bressen om verder uitgewerkt te worden is een nadere analyse gemaakt gebaseerd op de specialistische achtergrond van de experts (in het analyse potentieel aanvullende geschikte noodmaatregelen kopje).

Expert mening tabel

Deze mening van de experts is aan een aantal nummers gekoppeld van 0 tot en met 4 en vervolgens overzichtelijk in een tabel neergezet (figuur 33). Een waarde van 0 betekend dat de expert de noodmaatregel niet goed geschikt acht om toe te passen bij het op een bepaalde manier dichten van een bres of bresgroei beperken. Een waarde van 1 betekend dat een expert twijfelt over de inzetbaarheid van de noodmaatregel bij een bres waarbij variërende lastige condities of een ontwerp wat in de beginfase zit. Een waarde van 2 betekend dat de noodmaatregel potentieel redelijk geschikt zou kunnen zijn onder sommige omstandigheden, maar dat er nog wel twijfels zijn over de inzetbaarheid waarmee deze noodmaatregel geschikt zou zijn. Een waarde van 3 betekend dat de noodmaatregel veel omstandigheden redelijk goed inzetbaar kan zijn. Een waarde van 4 betekend dat de expert de noodmaatregel geschikt acht voor bressen in bepaalde scenario's voor beoordelingsfactoren. De verschillende kleuren in de gemiddelde-waardes kolom geeft aan of de bepaalde beoordelingsfactor wel (groen), verder bediscussieerd (oranje) of niet (rood) mee genomen zal worden, wat hieronder verder zal worden toegelicht.

Noodmaatregelen	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Gemiddelde
Plastic doek of zeil	2	3	2	3	2,5
Matten of lappen	2	-	-	2	2,0
Plastic gevuld met aarde	1	2	1	2	1,5
Zandzakken	2	4	4	4	3,5
Big bag	3	4	4	4	3,8
Roostervloedwand	1	2	2	1	1,5
Rots blokken	2	4	3	4	3,3
Rock bags	4	3	4	3	3,5
Gabions	2	2	-	1	1,7
Damwand	1	1	2	1	1,3
Pijpen, palen, buizen of masten	2	3	2	1	2,0
Steigers	0	0	0	1	0,3
Voorgefabriceerde bres plug	1	1	1	1	1,0
BresDefender	1	3	2	1	1,8
Met water gevulde barriere	2	2	3	1	2,0
Met water gevulde buizen	2	3	3	1	2,3
Worsten met zand of water	2	2	-	1	1,7
PLUG	2	-	-	1	1,5
Draagbare dam constructies	1	2	2	2	1,8
Caissons	1	1	1	0	0,8
Container	2	3	3	3	2,8
(Binnenvaart)schip	1	2	2	1	1,5
Gecontroleerde doorbraak forceren	2	3	3	3	2,8

Figuur 33: Foto van een tabel met meningen van de verschillende experts aan waardes gekoppeld over de verschillende noodmaatregelen.

Noodmaatregelen die als gemiddelde van alle experts lager dan een 1,00 (0-0,99) scoren worden gezien als niet geschikte noodmaatregelen voor bressen. Gemiddelde waarden tussen de 1,00 en de 2,0 zijn potentieel een aanvulling op geschikte noodmaatregelen, waarbij een verdere analyse gedaan zal worden gebaseerd op specifieke achtergrond van de experts. Hierbij zal met nadruk de meningen van de expert(s) die vooral gespecialiseerd zijn in de effectiviteit en toepasbaarheid van de noodmaatregelen bij bressen worden onderzocht om de noodmaatregel eventueel verder te onderzoeken. Van gemiddelde waarden vanaf de 2,01 wordt de noodmaatregel gezien als geschikt en zullen deze verder worden uitgewerkt in de volgende sub-paragraaf (sub-paragraaf 4.2.3).

Analyse potentieel aanvullend geschikte noodmaatregelen

In dit kopje is een verdere analyse gedaan over de potentieel aanvullend geschikte noodmaatregelen. Hierin zijn de twijfelachtige geschikte noodmaatregelen bij bressen met een score tussen de 1,00 en 2,0 van de figuur hierboven (figuur 33) opgenomen. Voor deze noodmaatregelen is verder naar de achtergrond en specialisatie van de experts gekeken. Ook is de inhoud van de interviews meegenomen met de redenen waarom de experts een bepaalde noodmaatregel minder tot niet geschikt acht.

Matten of lappen

het antwoord op de vraag of de matten en lappen een aanvulling zouden zijn voor het meenemen in het uiteindelijke handelingsperspectief is relatief onduidelijk vanwege de weinige ervaringen van experts 2 en 3 hiermee. Expert 1 en 4 gaven aan dat het inzetten van matten of lappen met alleen relatief kleine stromingen in combinatie met andere grotere noodmaatregelen niet tot nauwelijks een aanvulling kan zijn. Daarmee is te onzeker welke daadwerkelijke effecten deze noodmaatregel heeft (expert 3) dat het verder meenemen en gebruiken door de uiteindelijke besluitvormers niet een aanvulling voor dit moment lijkt en dus niet verder wordt meegenomen.

Doek of zeil

Het gebruiken van doek of zeil als noodmaatregel voor bresgroei beperken was goed beoordeeld door experts. Het gebruiken als bresdicht noodmaatregel had echter wel kanttekeningen bij het inzetten in een al geïnitieerde bres (experts 1 en 2). Met een minimale stroming zou de noodmaatregel wellicht snel effectief kunnen worden toegepast, dat is echter alleen mogelijk wanneer deze noodmaatregel direct voor handen is (of in extreem langzame bresgroei gevallen) en daarmee ook direct geplaatst kan worden. Dit scenario is met name door expert 1 als niet waarschijnlijk aangeduid, maar niet als onmogelijk. Expert 4 vond dit wel realistisch genoeg. Hiermee zou een vervorming van deze noodmaatregel met het breder trekken dan opgevulde doek of zeil wel als aanvulling kunnen gelden.

De optie voor het toepassen van noodmaatregelen om bij minimale bressen snel toe te passen lijkt namelijk wel een goede aanvulling voor het uiteindelijke handelingsperspectief. Hierbij is meer naar voren gekomen dat er veel meer materialen meteen effectief kunnen zijn bij een minimale bres (met minimale afmetingen en stromingen), mits de materialen meteen voorhanden zijn (expert 2). Een verandering van opgevulde doek of zeil naar direct beschikbare materialen in de bres toepassen is als her-gevormde noodmaatregel naar voren gekomen (expert 4). Dit zal dus op deze manier verder worden meegenomen in de uitwerking van de noodmaatregelen in de volgende sub-paragraaf (sub-paragraaf 4.2.3). Hieronder valt een breed scala aan materialen of middelen die in de buurt van de bres zijn of met de dijk-inspecteur kunnen worden meegenomen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan

stenen, hout, matten, gereedschap, (auto)banden, zeil, aarde, gevulde (plastic) zakken, of een combinatie van een aantal hiervan.

Roostervloedwand, draagbare dam constructie, water barrière, gabions

De plaatsing van een roostervloedwand, draagbare dam constructie, met water gevulde barrière en gabions lijken een nauwelijks toe te passen noodmaatregel voor in een bres (expert 4). Dit komt door de stijve onderkant van deze noodmaatregelen en benodigde effen ondergrond om deze op te plaatsen (expert 1). Expert 1 denkt hetzelfde over hierboven beschreven punten, alleen acht hij de inzet van gabions wellicht geschikt voor het dichten van een bres in verband met de sterkte van de stroming die deze kan hebben. Hier-tegenin gebracht lijken rock bags vergelijkbaar als gabions alleen zijn deze flexibeler waardoor deze eerder toegepast zullen worden (expert 4). Hierdoor lijkt het altijd eerder toepassen van rock bags het geval, waarbij het extra meenemen van gabions niet effectief lijkt en deze dus niet in de bres gebruikt kunnen worden. De roostervloedwand, draagbare dam constructie, water barrière en gabions noodmaatregelen kunnen echter wel eventueel gebruikt worden voor het opvangen van het water op het achterland van de waterkering van waar de bres heeft plaatsgevonden (expert 2, 3 en 4). Op deze manier kunnen deze maatregelen voor het dichten van een bres worden gebruikt, eventueel met een afdichtend materiaal om doorlekken water tegen te houden. Dit zou wel flink wat tijd kunnen kosten dus zouden deze noodmaatregelen wel in de buurt moeten zijn (expert 4). Naast de vele andere methoden om dit te doen (waarover in sub-paragraaf 4.2.3 meer) kunnen deze methodes wanneer relatief snel beschikbaar zeker een aanvulling zijn (experts 2 en 4). Daarmee zullen deze noodmaatregelen verder worden uitgewerkt en opgenomen in het uiteindelijke handelingsperspectief als opties voor het opvangen van water aan de binnenzijde van de waterkering.

Damwand

De plaatsing van een damwand bij een bres lijkt een geschikte noodmaatregel voor het dichten ervan, maar de plaatsing lijkt vooral een probleem (expert 4). Een groot nadeel van deze noodmaatregel is dat er grote zware machines het materiaal in de grond moeten trillen of duwen (expert 1). Bij een goede sterke draagkracht is dit veelal niet tot nauwelijks een probleem (expert 1). Wanneer er een bres in een waterkering zit dan kan dit tot een sterk verminderde draagkracht en/of een overstroomd achterland leiden. Hiermee is de plaatsing van een damwand lastig mogelijk en dient er op een andere manier een goede toegang tot de locatie te zijn (expert 1). Dit kan echter wel aanwezig zijn in Nederland door een goed aangesloten infrastructurele verbinding (veelal over land, met wegen of een spoor) waarvandaan grote machines toegang tot de bres kunnen hebben (expert 2). Tegen niet al te sterke stromingen en bij de mogelijkheid tot plaatsen kan een damwand wel een aanvulling zijn (expert 4). Voor situaties van bressen die dit wel hebben lijkt een damwand dan wel een geschikte noodmaatregel waardoor deze wel verder in het onderzoek wordt opgenomen.

Pijpen, palen, buizen en masten

De plaatsing van de pijpen, palen, buizen en masten hebben ten opzichte van elkaar een vergelijkbare werking bij een bres. Zoals eerder hebben deze maatregelen als doel het (voor een deel) dichten van een bres en het creëren van een constructie in de bres die stabiliteit biedt voor aanvullende (kleinere) noodmaatregelen (expert 1 en 2). Het snel toepassen van een zo groot mogelijke constructie (die een zo groot mogelijk deel van de bres meteen afdekt) die lang genoeg is heeft hiermee de voorkeur, met name een mast (expert 1). Expert 4 denkt dat er te veel ruimte tussen de noodmaatregel over blijft en acht het toepassen van deze noodmaatregel minder effectief. Aangezien drie experts deze

noodmaatregel (voornamelijk een mast) wel als een goede aanvulling zien wanneer andere noodmaatregelen niet werken (expert 1, 2 en 3), zal dit verder worden meegenomen in het uiteindelijke handelingsperspectief.

BresDefender

De BresDefender is een noodmaatregel die in de ontwikkelingsfase zit en waar nog veel onderzoek mee gedaan moet worden (expert 1 en 4). De noodmaatregel lijkt in zeer specifieke perfecte scenario's wellicht effectief getest zijn, maar de noodmaatregel lijkt nog te vroeg om bewezen effectief te zijn (expert 1). Daarbij is meer onderzoek nodig over de plaatsing tegen niet snel te onderzoeken 'schouderkracht' van de waterkering waartegen de relatief kleine BresDefender steunt. De plaatsing is in aanvulling vrij lastig en niet zonder risico's met het plaatsen over water wat tot gevaarlijke situaties voor personeel kan leiden (expert 1). Hierbij zal de mening van de expert 1 die al vele jaren onderzoek doet naar noodmaatregelen bij bressen worden gevolgd. Expert 2 gaf wel aan een goede kans van slagen te zien in de toekomst, maar ziet ook de tot op heden relatief weinig ge-testte noodmaatregel, waardoor deze niet verder zal worden meegenomen.

Worsten met zand of water, PLUG, Voorgefabriceerde bres plug

De vraag is vooral of de worst met zand of water, PLUG of voorgefabriceerde bres PLUG in Nederland beschikbaar zijn. Het antwoord hierop is dat blijkt dat deze noodmaatregelen waarschijnlijk niet in Nederland zijn (expert 4) omdat deze ook niet tot bijna niet bekend was bij bepaalde experts (experts 2, 3). Daarmee zou deze niet direct een aanvulling kunnen zijn. Expert 1 ziet wel potentieel sommige van deze noodmaatregelen, voornamelijk voor de PLUG. Voor het handelingsperspectief is dit echter momenteel geen aanvulling en daarmee zal deze niet verder worden meegenomen en onderzocht in dit onderzoek.

(Binnenvaart)schip

Het plaatsen van een (binnenvaart)schip in een bres is door de experts als niet eenvoudig gezien (experts 1, 2 en 4). De plaatsing brengt risico's en manoeuvreerskills met zich mee en er zit geen hoge slagingskans aan het plaatsen (expert 1). Daarbij is er vermoedelijk een vaarverbod waardoor schepen en boten in het geval van een bres niet heen kunnen varen (expert 1). Deze noodmaatregel zit dus zeker aan bepaalde eisen vast (expert 1, 2 en 4). Gezien de niet onmogelijkheid om deze noodmaatregel toe te passen en effectief te laten slagen, in combinatie met de relatief weinig andere opties in het geval van een grote brede bres met hoge stromingen, lijkt een laatste redmiddel als deze wel een goede aanvulling. Wanneer hoge risico's zich voor kunnen doen en geen andere noodmaatregelen werken kan het toepassen van deze noodmaatregel wellicht een oplossing zijn. In combinatie met andere aanvullende kleinere noodmaatregelen die door een verankerd (binnenvaart)schip kunnen worden vastgehouden kan dit wellicht een goede aanvulling zijn en zal deze noodmaatregel verder worden onderzocht.

Noodmaatregelen meenemen naar uiteindelijke handelingsperspectief

In dit laatste kopje zijn de noodmaatregelen die verder in het volgende onderdeel (subparagraaf 4.2) meegenomen zullen in het uiteindelijke handelingsperspectief hoofdstuk worden gebruikt (hoofdstuk 5) samengevat. De noodmaatregelen die verder zullen worden meegenomen zijn plastic doek of zeil, meteen beschikbare materialen inzet, zandzakken, big bags, roostervloedwand, rots berm, rock bags, gabions, damwand, pijpen-palen-buizen-masten, met water gevulde barriere, met water gevulde buizen, draagbare dam constructies, container, (binnenvaart)schip en gecontroleerde-doorbraak-forceren.

4.2.3 Geschikte noodmaatregelen uitwerkingen

In deze laatste sub-paragraaf zijn de door de experts geschikt geachte noodmaatregelen (uit sub-paragraaf 4.2.2) verder onderzocht en uitgewerkt. Hierbij is onderzocht in welke situaties voor verschillende beoordelingsfactoren de verschillende variërende noodmaatregelen effectief ingezet kunnen worden waarbij de voor- en nadelen van de noodmaatregelen zijn gegeven. Dit is gedaan door middel van verder bronnen onderzoek en meningen van experts over de verschillende noodmaatregelen.

Bij het toepassen van noodmaatregelen is voornamelijk door de expert aangegeven dat de eerste focus op het beperken van de bresgroei moet liggen (experts 1, 2, 3 en 4). Wanneer dit snel mogelijk is zou dit meteen de voorkeur hebben om snel meer handelingsperspectief te bieden voor aanvullende noodmaatregelen (expert 4). Daarmee is meer kans om de gevolgen zoveel mogelijk te beperken. Dit is daarmee een belangrijke aanbeveling voor het toepassen van de geschikte noodmaatregelen.

Naar aanleiding van de eerste bevindingen uit het literatuur onderzoek in aanvulling met bevindingen uit de interviews zijn de noodmaatregelen in sub-groepen ingedeeld. Deze sub-groepen zijn in met elkaar vergelijkbare noodmaatregelen, op een groot aantal vergelijkbare karakteristieken voor die noodmaatregel, ingedeeld. Deze sub-groepen waarin de noodmaatregelen zijn herverdeeld zijn de additieve, meteen beschikbare materialen inzet, zand opvulling, bulk materialen, stevige blokkade constructie, tegen de waterkering steunende, binnendijkse wateropvang, massieve en gevolgen-verminderende-bresgroei-beperkende noodmaatregelen.

Additieve noodmaatregelen

De eerst besproken groep die onder de noodmaatregelen valt is een additieve bresgroei verminderende noodmaatregel die vooral in combinatie met andere noodmaatregelen effectief kan worden ingezet in beginfasen van een bres met lage stromingen. Hieronder valt een plastic doek of zeil. **Voordelen:** Deze noodmaatregel kan een efficiënte snel te plaatsen noodmaatregel zijn om een waterkering te beschermen tegen bresgroei wanneer geen tot weinig water stroomt [Moore et al., 2014], kan bressen dichten in combinatie met zwaarder aanvullend meteen beschikbaar materiaal (aarde, zand, steentjes)(expert 2 en 3), goed inzetbaar in combinatie met andere noodmaatregelen tegen doorsijpelen van water [Masolle et al., 2018], weinig apparatuur benodigd voor plaatsen en dus goede bereikbaarheid (vanaf land) [Moore et al., 2014], grootte van de bres in hoogte en breedte is nauwelijks een probleem vanwege de hoge beschikbaarheid van dit materiaal met daarbij zandzakken of prikkers als ballast (voor vasthouden doek) [Moore et al., 2014], lage draagkracht benodigd vanwege laag gewicht zeil, zijwaartse kracht nauwelijks van belang, op elke ondergrond te plaatsen. **Nadelen:** Lastig te plaatsen met hogere stroming dan lage stroming (experts 1, 2 en 3), er is ballast is nodig voor vasthouden doek of zeil (expert 1), niet of nauwelijks vanuit de lucht of vanaf water te plaatsen (expert 4), met lastige weersomstandigheden zou de maatregel niet kunnen worden uitgevoerd wanneer veiligheidsproblemen zijn voor personeel of materiaal/voertuigen (daarbij ook lastig te plaatsen) [Moore et al., 2014], toegang tot waterkering benodigd voor personeel [Moore et al., 2014].

Meteen beschikbare materialen inzet noodmaatregelen

Deze soort noodmaatregel maakt gebruik van meteen eenvoudig snel toe te passen materiaal om meteen een bres te dichten of voor beperken bresgroei (expert 2). **Voordelen:**

Geen extra materieel benodigd voor plaatsen (expert 2), ondergrond effenheid niet of nauwelijks van belang, minimale draagkracht benodigd, waterkering zijwaartse kracht niet van belang, noodmaatregel meteen inzetbaar dus goede geografische locatie (expert 4). **Nadelen:** Goede veiligheid voor personeel nodig met goede toegang voor bereikbaarheid van materiaal in bres, ondanks dat het plaatsen met relatief kleine materialen is kan plaatsing en bevestiging lastig en uitdagend zijn in moeilijke en gevaarlijke omstandigheden, alleen met minimale stroomsnelheid en bres grootte in bres beginfase toe te passen (experts 2 en 3), directe beschikbaarheid van noodmaatregel benodigd, eventueel aanvullende noodmaatregelen benodigd (bij veranderende omstandigheden (expert 2)).

Zand opvulling noodmaatregelen

Als derde groep worden hier noodmaatregelen besproken die in de basis veelal voorkomen door gevuld te zijn met zand.

Zandzakken

Kan voor bresdichten, bresgroei beperken en als ballast worden gebruikt. **Voordelen:** Goede toepassing tot trage stroomsnelheden van 1,5 meter per seconde [Förster, 2011], makkelijk op te stapelen tot 60 centimeter hoogte [Schmitz et al., 2021], relatief lichte noodmaatregel en geen enorme machines nodig voor het plaatsen van de noodmaatregel en dus ook goed inzetbaar voor waterkeringen die niet veel draagkracht hebben, eventueel makkelijk op te vullen met ander materiaal in de zakken wat zwaarder of meer voor de hand liggend is voor sterkere stroming [Joore, 2004], waterkering zijwaartse kracht niet van belang, geschikt op oneffen en effen ondergronden, vrij snel leverbaar (afhankelijk van aantal benodigd) dus goede geografische locatie. **Nadelen:** Niet geschikt voor middel tot grote bressen en middel tot hoge waterstroom snelheden [Dagher et al., 2016], dichten van al de zandzakken benodigd voor effectieve toepassing, plaatsing van zandzakken moet goed naast elkaar voor het bereiken van een stabiele constructie [Joore, 2004], redelijke bereikbaarheid van land benodigd voor produceren en leggen zandzakken door personeel of door relatief lichte machines, weersomstandigheden hebben redelijke invloed met plaatsen.

Big bags

Noodmaatregel geschikt voor bresgroei beperken en bres dichten [NLSG, 2024]. **Voordeelen:** Goed geschikt bij laag waterpeil (tot ongeveer 1 meter diep) en lage stroming in kleine bressen [Dagher et al., 2016], goed geschikt bij bressen tot 5 meter [Dagher et al., 2016], op te stapelen wanneer waterpeil stijgt [Dagher et al., 2016], noodmaatregel vanuit de lucht in te zetten, met behulp van zandzakken en geotextiel is een goede extra noodwaterkering te maken [Förster, 2011], redelijk goede geografische locatie door hoge beschikbaarheid zand en bags, bereikbaarheid vanaf lucht en water makkelijker in vergelijking met zandzakken (expert 4). **Nadelen:** Niet geschikt bij hoge stromingen en hoog waterpeil [Dagher et al., 2016], zwaarder en dus minder goed inzetbaar voor lage draagkracht waterkeringen die weinig gewicht kunnen hebben in vergelijking met zandzakken [Dagher et al., 2016], plaatsing van big bags moet goed naast elkaar wat precisiewerk vereist (en vanuit de lucht lang kan duren), kritieke water stroomsnelheid voor 1 vierkante meter is ongeveer 3 meter per seconde [Albers, 2014], bereikbaarheid vanaf land lastiger in vergelijking met zandzakken (expert 4), weersomstandigheden hebben redelijke invloed op inzet noodmaatregel.

Bulk materiaal noodmaatregelen

Een aanvullende vorm van is het gebruik van vast zwaarder opvulling materiaal bij het

dichten of beperken van de groei bij bressen. Een aantal verschillende soorten die hierbij horen zijn hieronder verder toegelicht.

Rots blokken

Effectieve toepassing voor bresdichten en bresgroei beperken. **Voordelen:** Relatief kleine blokken zijn goed te plaatsen bij smalle niet te diepe bressen bij lage stroomsnelheden van 1,5 meter per seconde (grotere zwaardere blokken kunnen meer stroming aan) [Förster, 2011], kan worden gebruikt in gevallen waarin erosie krachten (gedragen door stroming, golven of puin) redelijk laag tot gemiddeld zijn om effectief met andere middelen te worden beheerst [Joore, 2004], maatregel redelijk goed inzetbaar bij oneffen bodem [Joore, 2004], gaten tussen bodem en zijkanten waterkering kunnen leiden tot korte periode hogere stromingen en erosie waarna soepele stapel losse stenen zich vervolgens vormen tot nieuw stabiel evenwicht [Joore, 2004], redelijk veel rotsen beschikbaar en dus redelijk goede geografische locatie, waterkering zijwaartse kracht nauwelijks van belang, kan vanaf de grond en vanaf water goed worden ingezet en dus goede bereikbaarheid daarin. **Nadelen:** Waterkering moet bereikbaar voor grote machines en materieel of een vaartuig nodig (lastig te plaatsen met een helikopter) (expert 1), de waterkering moet het gewicht van grote zware machines kunnen weerstaan (hoge draagkracht benodigd [Moore et al., 2014], deze maatregel kan niet worden uitgevoerd wanneer er veiligheidsproblemen zijn voor personeel of materieel [Moore et al., 2014], plaatsing van te lichte (en kleine) stenen kunnen bij een (sterker wordende stroming) relatief makkelijk wegspoelen waardoor ze dan niet meer effectief zijn [Joore, 2004], lastig via de lucht te plaatsen dus daarin lage bereikbaarheid.

Rock bags

Kan worden gebruikt voor bresdichten en remmen van bresgroei. **Voordelen:** Goed geschikt voor kleine tot middelgrote bressen middel tot grote bressen met middel tot gemiddelde waterstroom snelheden, noodmaatregel naast met kranen en vrachtwagens ook goed vanuit de lucht of met de boot in te zetten en dus goede bereikbaarheid, plaatsing rock bags hoeft minder precies naast elkaar als big bags door meer flexibiliteit van de zakken en dus ook goed geschikt op oneffen bodems, steunt niet tegen de al bestaande waterkering dus goed geschikt bij waterkeringen die weinig tot geen extra zijwaartse kracht van een noodmaatregel tegen de waterkering aankunnen, redelijk goede geografische locatie vanwege vrij hoge hoeveelheid rotsen (wel minder dan rots blokken in verband met benodigde bags daarbij). **Nadelen:** Zwaar materiaal en voertuigen nodig en dus minder goed inzetbaar voor lage draagkracht waterkeringen die weinig gewicht kunnen hebben bij plaatsen vanaf land, bij brede en diepe bressen veel materiaal benodigd, lastig te plaatsen bij hele hoge stroming zonder aanvullende constructie.

Stevige blokkade constructie noodmaatregelen

Onder de stevige blokkade noodmaatregelen vallen stevige grote blokkades voor het dichten van een bres. Hieronder vallen de pijpen, palen, buizen en masten zoals eerder besproken, maar ook het plaatsen van een damwand.

Pijpen, palen, buizen en masten

Pijpen, palen, buizen en masten kan als noodmaatregel voor het dichten van bressen worden gebruikt. **Voordelen:** Vrij snel beschikbaar zijn om een bres snel voor een (groot) deel te dichten dus redelijk goede geografische locatie (expert 1), geschikt voor vooral gemiddelde tot vrij grote bressen, kan goed tegen lage tot grote stromingen mits de sterke

schoulers van de waterkering dit aankunnen waartegen de noodmaatregel steunt (expert 1), kan kleinere noodmaatregel tegen constructie laten steunen voor afdichten kleinere plekken (experts 1 en 2), eventueel vanuit de lucht en vanaf de boot (afhankelijk van lengte en gewicht constructie) te plaatsen, redelijk goed inzetbaar tot diepe bressen, goed inzetbaar op effen ondergrond. **Nadelen:** Plaatsing kan met hijskraan waarbij draagkracht van waterkering vrij sterk moet zijn, risico op onderstroom bij oneffen oppervlakten maar kan met kleinere noodmaatregel worden opgelost wanneer deze snel beschikbaar zijn, hoge waterkering zijwaartse kracht benodigd, weersomstandigheden en bereikbaarheid kunnen inzet sterk beïnvloeden bij plaatsen vanuit voornamelijk de lucht.

Damwand

Een damwand zou in ook een geschikte noodmaatregel kunnen zijn voor die een bres goed kan afsluiten [NLSG, 2024]. **Voordelen:** Kan worden gebruikt om water dat over door de bres stroomt op te vangen en tegelijkertijd erosie of mogelijke doorbraak van de waterkering te voorkomen [NLSG, 2024], goede aansluiting met grond zonder erosie of snelle waterstroming onderdoor en dus goed inzetbaar op oneffen ondergrond [Joore, 2004], waterkering zijwaartse kracht niet van belang, goed geschikt tot gemiddelde stroomsterkte, goed inzetbaar bij niet te diepe bressen. **Nadelen:** Goede toegang en draagkracht waterkering benodigd voor relatief zwaar en groot materieel en materiaal voor damwand benodigd om te plaatsen [NLSG, 2024], in stromende bressen is directe interventie lastig met plaatsen [NLSG, 2024], ervaren personeel met de juiste apparatuur en de opslag van materialen in de buurt nodig dus daarmee matige geografische locatie [NLSG, 2024], hoge diepte is beperkende factoren [Joore, 2004], deze noodmaatregel zou moeten worden vermeden als er veiligheidsrisico's zijn voor personeel en uitrusting [NLSG, 2024], harde bodem kan noodmaatregel toepassen lastig maken [Joore, 2004], het opzetten kost tijd en kan dijkbeschadiging veroorzaken door het gebruik van zwaar materieel op de waterkering [NLSG, 2024], lastig toe te passen via water (of met relatief grote zware machines aan boord) of via de lucht, met lastige weersomstandigheden lastig om te plaatsen, slecht te plaatsen met redelijke stroming door de bres.

Binnendijkse wateropvang noodmaatregelen

Binnendijkse wateropvang noodmaatregelen zijn voor een niet ver gevorderde bres een goed toepasbare noodmaatregel. Het concept hierbij is het opvangen van het water dat door de bres heen stroomt aan de binnenzijde van de waterkering (figuur 2) met behulp een noodmaatregel (expert 1 en 2). Dit kan zijn door een kring (met bijvoorbeeld zandzakken of big bags) of door een stijvere lijn noodmaatregel (bijvoorbeeld door met water gevulde buizen (expert 2)) afhankelijk van de beschikbaarheid van de noodmaatregel. Bij het plaatsen van stijvere minder aansluitende noodmaatregelen aan de waterkering lijkt een aanvullende afsluiting tussen deze minder flexibele noodmaatregel en de waterkering noodzakelijk door middel van bijvoorbeeld big bags.

Het concept hierbij is het opvangen van het water tot aan de hoogte van de waterkering. De sterkte van de stroming door de bres heen wordt hiermee naarmate het binnendijkse gecreëerde afgesloten gebied zich vult, en het water-pijl hierin stijgt, verminderd en uiteindelijk gestopt (expert 1 en 2). Hiermee stopt het water dat door de bres heen stroomt en daarmee is de bres gedicht. Hieronder zijn verschillende noodmaatregelen die op deze manier kunnen worden ingezet verder toegelicht met de daar bijhorende voor- en nadelen.

Roostervloedwand

Voordelen: Gemakkelijk en snel op te bouwen [Moore et al., 2014], zeer stabiel op zachte grond [Moore et al., 2014], 1,8 m brede voetafdruk (bij een structuur van 1,2 m hoog) [Moore et al., 2014]. **Nadelen:** Kans op breuk bij ruwe behandeling [Moore et al., 2014], extra gewicht kan stabiliteit op hellingen verminderen [Moore et al., 2014], vereist machines om te vullen [Moore et al., 2014].

Met water opgeblazen barrières

Voordelen: Maakt gebruik van direct beschikbaar water als vulmateriaal [Moore et al., 2014], zeer snel te positioneren (afhankelijk van grootte) [Moore et al., 2014] en [Förster, 2011], zeer stabiel op zelfs een zachte ondergrond en redelijk oneffen ondergrond [Moore et al., 2014] en [Förster, 2011], leverbaar en inzetbaar vanaf 30 meter (kleine versie) tot bres breedtes tot 100 meter (grote versie) [Förster, 2011], in staat om een waterhoogte van 75 centimeter (kleine versie) tot 4 meter (grote versie) te keren [Förster, 2011], kan met bepaalde uitvoeringen makkelijk en goed gekoppeld worden met waterkeringen of andere barrières [Förster, 2011], kleine versie kan met twee man vervoerd worden, waterkering zijwaartse kracht niet van belang. **Nadelen:** Vereist een relatief breed gebied voor plaatsing en dus grote bereikbaarheid [Moore et al., 2014], extra gewicht kan de stabiliteit van de waterkering verminderen bij plaatsing op een waterkering dus redelijke draagkracht vereist [Moore et al., 2014], kan relatief makkelijk doorboord worden door apparatuur of vanden [Moore et al., 2014], kan bij uitrollen waterkering (bekleding) beschadigen [Förster, 2011], Vereist een breed gebied voor plaatsing [Moore et al., 2014], geografische locatie voornamelijk het probleem door weinig snel beschikbaar materiaal, niet makkelijk te plaatsen met water in achterland bij stroming door bres, lange buizen alleen vanaf land goed te plaatsen waarbij goede bereikbaarheid daarmee nodig is.

Met water gevulde buizen

Voordelen: Maakt gebruik van direct beschikbaar water als vulmateriaal [Moore et al., 2014], gemakkelijk en snel op te bouwen en te verwijderen [Moore et al., 2014], zeer stabiel op zelfs een zachte ondergrond [Moore et al., 2014], maximale waterkeer hoogte 2,60 meter [Förster, 2011], niet al te hoge waterkering draagkracht benodigd vanwege gewicht, waterkering zijwaartse kracht niet van belang. **Nadelen:** Vereist een breed gebied voor plaatsing [Moore et al., 2014], geografische locatie voornamelijk het probleem door weinig snel beschikbaar materiaal, lastig te plaatsen met water in achterland bij stroming door bres, lange buizen alleen vanaf land goed te plaatsen waarbij goede bereikbaarheid daarmee nodig is.

Gabions

Voordelen: Gemakkelijk en snel op te bouwen [Albers, 2014], stapeling van de gabions mogelijk bij hoger wordende waterpeil en stroming [Joore, 2004], stabiel bij effen grond vanwege zwaar vulmateriaal in gabions waarmee deze ook met water in het achterland kunnen worden geplaatst, plaatsing naast door vrachtwagens en hijskranen door de lucht mogelijk, waterkering zijwaartse kracht niet van belang, geografische redelijk goed in vergelijking met de andere constructies bij water opvangen vanwege hogere hoeveelheid stenen. **Nadelen:** Niet toe te passen op oneffen bodem [Joore, 2004], gevaar op snelle erosie onder en aan de uiteinden van de gabions bij oneffenheden [Joore, 2004], minder toepasbaar bij grote bressen vanwege beperkte hoeveelheid materiaal [Joore, 2004], minder stabiel bij oneffen grond [Joore, 2004], redelijke draagkracht van waterkering benodigd bij plaatsen, lastig te plaatsen met water in achterland bij stroming door bres.

Draagbare dam constructies

Voordelen: Deze constructies zijn gemakkelijk en snel op te bouwen [Moore et al., 2014], zijwaartse kracht niet van belang, relatief lichte constructies dus relatief lage draagkracht benodigd, snel een grote breedte kan worden neergezet, geen grote machines benodigd voor plaatsen dus niet al te hoge draagkracht benodigd. **Nadelen:** Goede aanleg aan waterkering randen noodzakelijk maar lastig [Joore, 2004], stabiele vlakke ondergrond benodigd voor goede toepassing zonder stroming tussen ondergrond [Joore, 2004], alleen geschikt om niet weg te spoelen tot en met zachte stroming door de bres heen wanneer er al weinig water al door de bres is gestroomd (ander niet te plaatsen) (expert 1), geografische locatie slecht omdat een constructie die moet voldoen is benodigd wat lang kan duren.

Massieve noodmaatregelen

Massieve noodmaatregelen is een andere onderverdeelde tak van de noodmaatregelen. Hieronder vallen de relatief grote massieve noodmaatregelen die ingezet dienen te worden bij vergevorderde bressen met grote bres afmetingen.

(Binnenvaart) schepen

Voordelen: Goed toepasbaar met hoge stroming en hoog waterpeil bij bressen vanaf 5 meter breed (afhankelijk van (binnenvaart)schip breedte) [Dagher et al., 2016], goed toepasbaar bij gemiddelde water stroming en een gemiddeld waterpeil bij bressen vanaf 25 meter [Dagher et al., 2016], installatie en logistiek goed bij hoge en gemiddelde waterpeil en water hoogte [Dagher et al., 2016], draagkracht waterkering niet van belang, goed geschikt op een effen (vlakke) stabiele bodem, noodmaatregel steunt nauwelijks tegen de waterkering aan bij laten zinken schip en dus is de zijwaartse kracht van de waterkering nauwelijks een beperkende factor, constructie kan worden gebruikt voor toepassen aanvullende kleinere noodmaatregelen. **Nadelen:** Slecht toepasbaar bij hoog waterpeil en stroming tot een bres van 5 meter [Dagher et al., 2016], slecht toepasbaar voor bressen bij een lage stroming en een laag waterpeil [Dagher et al., 2016], toepassing alleen mogelijk bij bereikbaarheid van een (groot) schip [Dagher et al., 2016], voor toepassing is een geschikt schip van met de juiste afmeting benodigd die breder en hoger als de bres moeten zijn dus slechte geografische locatie [Dagher et al., 2016], bij oneffen bodem is er risico op oncontroleerbare verdere erosie [Dagher et al., 2016], toepassing alleen mogelijk met personeel die bereid en geschikt is om goed te manoeuvreren met het vaartuig en het vervolgens tot zinken te laten brengen dus lastig uit te voeren [Albers, 2014], toepassing maatregel niet een garantie op succes, overblijvende punten waar geen dichting is [Joore, 2004], zonder aanvullende noodmaatregelen wordt de bresgroei op bepaalde punten versterkt en groeit de bres verder door sterkere stroming in gaten om het (binnenvaart)schip [Albers, 2014].

Container

Voordelen: Goed toepasbaar bij lage stroomsnelheden en waterpeil bij smalle tot wijde bressen [Dagher et al., 2016], bij zwaardere stroming toepasbaar maar met verzwaring van de container met andere materialen (expert 4), stabiele structuur van de noodmaatregel bij lage stroomsnelheden en waterpeil (en toepasbaar met gemiddelde tot hoge stroming en bres diepte bij verzwaren en afzakken) [Dagher et al., 2016], goed toepasbaar op een effen (vlakke) stabiele bodem, inzet via land, water en lucht mogelijk [Dagher et al., 2016], noodmaatregel steunt lichtelijk tegen de waterkering aan en dus is de zijwaartse kracht van de waterkering lichtelijk een beperkende factor (expert 4), met plaatsing vanaf land of water is de draagkracht niet van invloed, containers redelijk veel beschikbaar en daarmee redelijk goede geografische locatie. **Nadelen:** Bij oneffen bodem is er risico op oncontro-

leerbare verdere erosie [Dagher et al., 2016], plaatsing van meerdere containers naast elkaar benodigd bij wijde bressen met erosie risico tussen de containers door [Dagher et al., 2016], draagkracht bij plaatsing containers vanaf land alleen mogelijk bij een hoge draagkracht van de waterkering vanwege materieel en materiaal gewicht, plaatsing vrij lastig met slechte weersomstandigheden (vooral bij verzwaren en laten zinken container).

Gevolgen-verminderende-bresgroei-beperkende noodmaatregel

Een aanvullende tak van de noodmaatregelen is het gebruik maken van noodmaatregelen die de consequenties van een bres verminderen en kunnen helpen de bresgroei te beperken. Dit laatste kan ondersteunen in het winnen van tijd om een noodmaatregel die effectief een bres kan dichten in te zetten.

Gecontroleerde doorbraak forceren

Deze noodmaatregel kan ondersteunen in het verminderen van de bresgroei (en in een vroeg stadium falen van waterkering voorkomen) **Voordelen:** Snel toe te passen zonder veel materiaal of machines, bijdrage bij verminderd water in grote rivieren beperkt door het vele water in de rivier, in combinatie met andere bresdicht noodmaatregelen goed in te zetten, draagkrachten niet van belang, weersomstandigheden nauwelijks van belang, ondergronden van de waterkering niet van belang, bres afmetingen en stromingen door de bres hebben niet veel invloed op de toepassing van de noodmaatregel (voornamelijk afhankelijk van de risico's van de bres). **Nadelen:** Er moet een gebied of plaats in de buurt zijn waar overtollig water heen kan gaan dus geografische locatie heel lastig te vinden.

4.3 Effectief handelingsperspectief

In dit hoofdstuk is onderzocht wat het meest effectieve handelingsperspectief is waarmee de uiteindelijke besluitvormers de meest geschikte noodmaatregel bij bressen kunnen kiezen. Daarbij is eerst onderzocht welke handelingsperspectieven daarvoor geschikt zouden kunnen zijn (sub-paragraaf 4.3.1). Vervolgens is aan experts gevraagd wat ze in een handelingsperspectief bij bressen zouden willen zien waarna ook de in eerder gevonden opties aan ze zal worden voorgelegd (sub-paragraaf 4.3.2). De conclusie hieruit zullen samen met de eerder gevonden onderzoeksresultaten van paragrafen 4.1 en 4.2 is verder gebruikt om het uiteindelijke handelingsperspectief bij dreigende overstromingen in hoofdstuk 5 te maken.

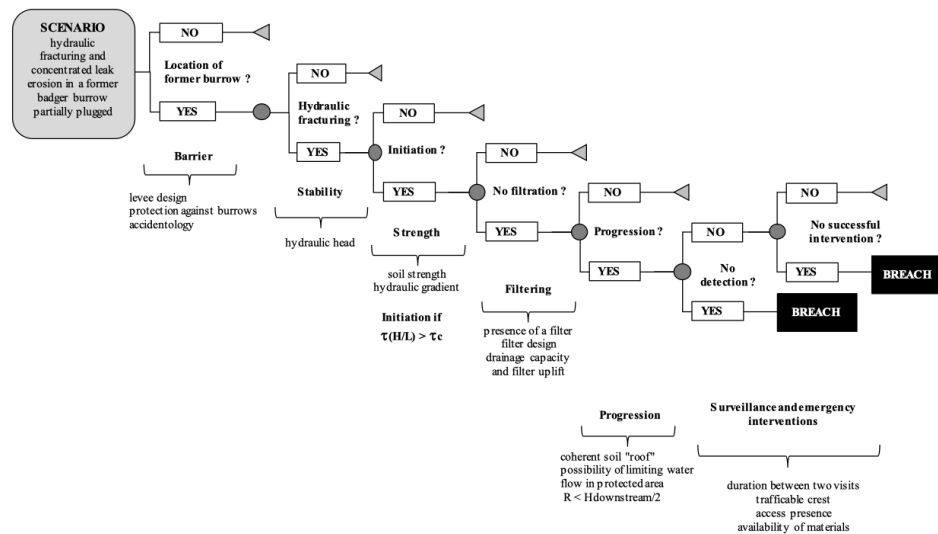
4.3.1 Handelingsperspectief opties

In deze paragraaf is onderzocht wat effectieve handelingsperspectieven zouden kunnen zijn waarmee de uiteindelijke besluitvormers de meest geschikte noodmaatregel bij bressen kunnen kiezen. Dit is gedaan door middel van literatuuronderzoek waarbij drie opties naar voren gekomen die in deze sub-paragraaf verder zullen worden uitgewerkt.

Beslisboom

Een eerste in het literatuuronderzoek naar voren gekomen handelingsperspectief optie voor het kiezen van de meest geschikte noodmaatregel is een beslisboom. Een beslisboom is een overzicht van de mogelijke uitkomsten van een reeks gerelateerde keuzes waarbij voor verschillende beoordelingsfactoren kan worden aangegeven wat de situatie is. Bij het maken van steeds op elkaar volgende keuzes voor de in de boom gezette beoordelingsfactoren kan vervolgens tot een definitieve (set van) noodmaatregel(en) worden gekomen.

In eerdere onderzoeken naar handelingsperspectieven die in vergelijkbare situaties, waar vrij snelle adequate reactie benodigd was, lijkt de beslisboom als een goede uitkomst [Boers, 2019]. Dit lijkt daarom ook een goed geschikte methode om de uiteindelijke dijk-beheerder of waterkering-specialist de meest geschikte noodmaatregel te laten kiezen bij een bres. In eerdere onderzoeken is ook een beslisboom bij processen met bressen te zien. Het voorbeeld hiervan is hier onder dan ook laten zien (figuur 34).



Figuur 34: Beslisboom voorbeeld als handelingsperspectief voor de keuze naar de juiste uiteindelijke toe te passen maatregel [Mallet et al., 2018].

Bij het gebruik van een beslisboom zitten verschillende voor- en nadelen vast. Een voordeel bij het gebruik van een beslisboom is dat het een systematisch en gestructureerde aanpak met het doorlopen van bepaalde situaties met beoordelingsfactoren. Daarbij kan deze optie eenvoudig worden toegepast om complexe beslissingen in kleinere, beter beheersbare keuzen te laten uitkomen. De verschillende stappen en daar-bijbehorende gevolgen kunnen in aanvulling ook overzichtelijk worden neergezet. Ongeacht de persoon die de beslisboom gebruikt zal hetzelfde eindresultaat uit de analyse van dit beslismodel komen. In aanvulling zijn de beslissingen en beoordelingsfactoren in het proces transparant, wat helpt bij het uitleggen en verantwoorden van de uiteindelijk gekozen noodmaatregelen.

Nadelen aan het gebruik van een beslisboom is om te beginnen dat het niet flexibel is om op onverwachte of complexe situaties te reageren wanneer plotseling iets veranderd. Bij een hele uitgebreide grote complexe beslisboom kan deze zelf ingewikkeld en lastig te volgen zijn. Daarbij zijn beslisbomen gevoelig voor een over-vereenvoudiging van de beoordelingsfactoren wanneer deze helemaal zou worden uitgewerkt. Ook de kwaliteit van de beslisboom kan zeer sterk afhangen van verkeerde aannames, die zo tot volledig verkeerde beslissingen kunnen leiden. Een ander nadeel bij een beslisboom is dat afgevalen noodmaatregelen niet kunnen worden gezien, die soms (bijna) wel geschikt zouden kunnen zijn in iets veranderende omstandigheden. Bij het gebruiken van de beslisboom is geen ruimte voor eigen interpretatie van de gebruiker, wat ook een nadeel kan zijn. Dit zou door het exact opstellen van de beslisboom met goede precisie moeten worden opgelost om de boom niet (volledig) onbruikbaar te laten zijn, wat lastig kan zijn.

Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)

Een Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) is een andere optie die gebruikt zou kunnen worden als effectief handelingsperspectief bij bressen. Een MCDA is een hulpmiddel dat veel wordt gebruikt voor het evalueren, beoordelen en prioriteren van alternatieven met conflicterende en concurrerende doelstellingen [Zhang and Balakrishnan, 2021]. Een MCDA biedt een systematische procedure voor het behandelen van een complex probleem met een groep eenvoudigere beoordelingsfactoren voor het vinden van de beste optie. Met verschillende beoordelingsfactoren kunnen uiteindelijk de noodmaatregelen hierbij worden onderzocht en gewaardeerd, met daarbij eventueel gebruik maken van een wegingsfactor waarbij bepaalde factoren zwaarder wegen dan andere. Hier dan een uiteindelijke score of overzichtelijke tabel voor al de onderzochte noodmaatregelen waarbij eenvoudig de inzet van een noodmaatregel kan worden afgeleid. Dit is dan de noodmaatregel die het beste scoort en dus de hoogste uiteindelijke score of meeste plusjes heeft gekregen. Een voorbeeld van een MCDA is hieronder weergegeven (figuur 35).

	kosten	stabiliteit	waterticht	bewerkelijk	beschikbaar/ aanwezig	definitief / opruimen	opslag
worsten	-	-	+	-	-	-	-
zakken	+	-	+	--	±	-	--
blokken	-	+	--	-	--	+	--
gabions	--	±	--	--	--	±	--
caissons	-	±	-	+	-	++	-
schepen	±	±	-	++	++	--	++
damwanden	+	+	+	±	+	++	++
palen	-	+	±	-	+	++	++
opklap. deel	--	-	-	--	--	-	+
matten	--	++	--	--	--	±	--
losse grond	--	-	(+)	+	±	++	-

Figuur 35: MCDA voorbeeld met beoordelingsfactoren en noodmaatregelen gekoppeld en beoordeeld van zeer goed (++) tot zeer slecht (-) zonder wegingsfactoren [Joore, 2004].

Voordelen bij het gebruik van een MCDA is dat het een goede overzichtelijke analyse geeft over de toepasbaarheid van noodmaatregelen. In situaties waarbij de inzet van bepaalde noodmaatregelen dicht bij elkaar ligt kan een goede MCDA uitsluitsel geven. Door aan de de beoordelingsfactoren 'gewichten te hangen' die aangeven hoe belangrijk ze zijn kan er per noodmaatregel uiteindelijk een score uit komen die duidelijk uitsluitsel geeft over de meest geschikte noodmaatregel. Een ander voordeel is bij het geven van waardes aan beoordelingsfactoren die genuanceerder liggen als de harde lijn tussen factoren (zoals bij de beslisboom). In aanvulling kan in een MCDA ook meer gekeken worden naar bredere effecten voor de toepassing van een bepaalde noodmaatregel (kans van slagen, inzetbaarheid-snelheid), wat een nog completer beeld geeft over de effecten van een noodmaatregel.

Nadelen van de MCDA is dat het relatief lang kan duren om deze analyse uit te voeren en dat is in situaties zoals deze niet effectief. Daarbij zijn er bepaalde beoordelingsfactoren die technisch uitsluitsel geven over de toepasbaarheid van bepaalde noodmaatregelen waaraan een geschikte noodmaatregel dient te voldoen, wat lastig hierin te plaatsen is. De MCDA zou daarmee zo gebouwd moeten zijn dat de uitkomst altijd resulteert in een geschikte effectieve toepassing van een bepaalde noodmaatregel. Daarbij is het gebruik hiervan als enige handelingsperspectief erg complex om alle beoordelingsfactoren en noodmaatregelen erin verwerkt, waardoor dit onoverzichtelijk en nauwelijks effectief lijkt.

Beoordeling tabel

Een derde optie van een eventueel effectief toepasbaar handelingsperspectief voor bressen is door gebruik te maken van een beoordeling tabel. Een beoordeling tabel (voorbeeld in figuur 36) is een schema met de beoordelingsfactoren beoordeeld per noodmaatregel. Kruisjes kunnen hierin een slechte inzet aangeven, een vinkje een goede inzet en uitroepetekens een inzet die alleen onder bepaalde omstandigheden acceptabel is aan. Dit geeft een overzichtelijk beeld van de verschillende noodmaatregelen per beoordelingsfactor en of deze daarbij wel, niet of misschien geschikt zouden kunnen zijn.

Closing structure	Parameter	Water level and flow velocity	Geometry width of the levee break			Stability of the closing structure	Installation and logistics	
			short	middle	wide			
Massive	Barge	High	⊗	⊙	⊙	⊙	⊙	
		Medium	⊗	⊙	⊙	⊙	⊙	
		Low	⊗	⊗	⊙	⊙	⊙	
	Container	High	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
		Medium	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
		Low	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
divisional	Individual Elements	Wooden Pole	High	⊙	⊗	⊗	⊙	⊙
			Medium	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
			Low	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
		Pipeline	High	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
			Medium	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
			Low	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	Overall Structure	Electricity pylons	High	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
			Medium	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
			Low	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
		Scaffolding	High	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
			Medium	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
			Low	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
Special structures	Big bags, tank trap	High	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
		Medium	⊙	⊙	⊗	⊙	⊙	
		Low	⊙	⊙	⊗	⊙	⊙	
	Inflatable dams (RRLB)	High	⊙	⊗	⊗	⊗	⊗	
		Medium	⊙	⊙	⊗	⊗	⊗	
		Low	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	

Figuur 36: Noodmaatregelen beoordeeld op verschillende beoordelingsfactoren door middel van een beoordeling tabel [Dagher et al., 2016].

Een voordeel bij het gebruiken van dit handelingsperspectief is dat het een goed overzicht geeft van alle verbanden tussen de noodmaatregelen en beoordelingsfactoren. Hiermee kan per beoordelingsfactor makkelijk worden gezien wat een geschikte noodmaatregel kan zijn met technisch onderscheid tussen wel en niet geschikt.

Nadelen van het gebruik van een MCDA zijn onder andere dat het minder overzicht geeft over de uiteindelijk meest geschikte effectieve noodmaatregel. Ook geeft het weinig houvast als er verschillende noodmaatregelen zijn met bijvoorbeeld evenveel vinkjes. In aanvulling zijn bij noodmaatregelen die alleen effectief zijn bij beoordelingsfactoren onder bepaalde omstandigheden dat er aanvullende verduidelijkende uitleg bij moet komen. Dit kan lastig zijn om op een makkelijke goed toe te passen wijze aan de tabel toe te voegen. Ook zijn sommige beoordelingsfactoren belangrijker en bepalender voor een goede inzet van de meest effectieve noodmaatregel wat in een beoordeling tabel niet terug te zien is.

4.3.2 Handelingsperspectief expert analyse

In deze tweede sub-paragraaf over het handelingsperspectief is een analyse gemaakt over wat experts in een handelingsperspectief nodig hebben. Hiervoor zijn de expert interviews gebruikt waarin aan de experts is gevraagd hoe voor hen een ideaal handelingsperspectief eruit ziet en wat ze in een handelingsperspectief zoeken. Vervolgens zijn de in het vorige onderdeel (sub-paragraaf 4.3.1) beschreven handelingsperspectief opties voorgelegd, waarna de meningen hierover zijn gepeild. Hierbij zal voornamelijk op de meningen van experts die de doelgroep van het handelingsperspectief zijn (experts 2 en 3) worden gelet.

Handelingsperspectief benodigheden expert analyse

In de interviews is naar voren gekomen dat er een behoefte is aan een duidelijk handelingsperspectief waarmee alle opties van noodmaatregelen goed worden doorlopen. Hierbij is het noodzakelijk dat er effectief een juiste keuze voor de meest geschikte noodmaatregel gemaakt dient te worden (expert 1) om schade of slachtoffers zoveel mogelijk te voorkomen.

Experts hebben aangegeven dat er veel verschillende situaties zijn met veel verschillende factoren (met variërende invloed) bij bressen (expert 2 en 4). Een aantal effectief door-dachte stappen aan het begin zorgt ervoor dat de dijkbeheerder en waterkeringspecialisten niets over het hoofd zien en helpt bij het afstropen van irrelevante opties (experts 2 en 3). Dit kan zo tot een klein setje geschikte noodmaatregelen leiden (expert 2). Daarbij zal de focus vooral moeten liggen op een uitkomst van een (aantal) noodmaatregel(en) na niet veel meer dan drie tot vier stappen (expert 2) met de meest bepalende en belangrijke beoordelingsfactoren (expert 3). Dit zou daarmee vooral op het meenemen van alle meest bepalende factoren moeten liggen in het handelingsperspectief (expert 4). Hiermee krijgen experts snel een overzicht van mogelijk geschikte noodmaatregelen voor specifiek dat scenario van de meest bepalende beoordelingsfactoren (expert 2, 3 en 4).

Met deze relatief kleine lijst van geschikte noodmaatregelen kan daarna voor de specifieke locatie worden bepaald welke maatregel het beste is, rekening houdend met factoren zoals onder andere bereikbaarheid en logistiek (expert 2), en andere vergelijkbare van invloed beoordeelde factoren. Het later vaststellen van de meest geschikte noodmaatregel is lastig vanwege de hele bak aan kleinere omgevingsfactoren die van invloed zijn (expert 3). Deze factoren zullen voornamelijk door de dijkbeheerder zelf worden meegenomen, waarbij het in een handelingsperspectief zetten niet de focus zou moeten zijn en een stroomschema van mogelijke noodmaatregelen per situatie voldoende zou zijn (expert 3).

Expert analyse voorgelegde handelingsperspectieven met eindresultaat

In lijn met de conclusies hierboven zal het uiteindelijke handelingsperspectief uit twee delen bestaan. Het eerste deel zal voor het selecteren van geschikte noodmaatregelen worden gebruikt waaruit vervolgens in het tweede deel één meest effectieve noodmaatregel kan worden gekozen. Bij het kiezen van de meest effectieve handelingsperspectieven hiervoor is aan de experts eerst gevraagd of ze zelf ideeën hadden daarbij. Vervolgens zijn de eerder gevonden opties (sub-paragraaf 4.3.1) aan hen voorgelegd. De experts gaven aan geen alternatieve handelingsperspectieven te hebben waardoor het uiteindelijke handelingsperspectief een combinatie van de eerder gevonden opties zal zijn.

Handelingsperspectief deel 1 voor selecteren geschikte noodmaatregelen

Als eerste is hier het meest geschikte handelingsperspectief voor de eerste selectie van geschikte noodmaatregelen bediscussieerd. Hierbij is naar voren gekomen dat het gebruiken van een beslisboom of een beoordelingstabel voor een eerste selectie de voorkeur heeft (expert 2). Daarbij vond expert 3 het gebruik van een beoordelingstabel lastig om tot een goede set geschikte noodmaatregelen te komen en leek daardoor een beslisboom beter geschikt hiervoor. Expert 1 zag daarbij ook meer een beslisboom voor zich als handelingsperspectief. Expert 4 had geen duidelijke voorkeur voor één van de handelingsperspectieven. Een MCDA gebruiken had niet de voorkeur voor alle drie de experts en die lijkt daarmee dus niet goed geschikt. Hierbij concluderend lijken experts 1, 2 en 3 allen de beslisboom als goede optie voor de eerste selectie, waarbij alleen expert 2 ook de beoordelingstabel als goede optie lijkt. Daarmee zal voor de eerste selectie van geschikte noodmaatregelen voor het gebruiken van een beslisboom worden gekozen. Deze conclusie in combinatie met de eerder beschreven aantal stappen (3 á 4) leidt tot de opzet van een beslisboom zoals hieronder is laten zien voor het eerste handelingsperspectief (figuur 37). Hierin zijn de bovenste rijen de beoordelingsfactoren (geel) met verschillende situaties (bv. sterk/zwakke stroming) en is de onderste rij de geschikte noodmaatregelen set (groen).



Figuur 37: Handelingsperspectief deel 1 beslisboom opzet.

Handelingsperspectief deel 2 voor selecteren meest effectieve noodmaatregel

Als volgende en laatste handelingsperspectief voor het selecteren van de meest effectieve noodmaatregel uit de geschikt bevonden noodmaatregelen set (groene vakje na doorlopen beslisboom figuur 37), lijkt de meest geschikte manier het gebruik maken van een MCDA. Het uitwerken van de meest effectieve noodmaatregel hiermee heeft namelijk de voorkeur van expert 2. Expert 3 geeft aan dat een verdere analyse over de in het eerste handelingsperspectief gevonden set noodmaatregelen lastig is maar wel aanvullend zou kunnen zijn. Experts 1 en 4 hadden hierop geen andere voorkeur. Hieruit concluderend is de beste optie om de door expert 2 goed geschikt geachte MCDA te gebruiken voor de overige beoordelingsfactoren als in het eerste handelingsperspectief gebruikt (expert 3) (figuur 38).

Noodmaatregel	Beoordelingsfactor 1	Beoordelingsfactor 2	Beoordelingsfactor 3	Beoordelingsfactor 4	Beoordelingsfactor 5	Beoordelingsfactor 6	Gemiddelde
Noodmaatregel 1	5	3	3	3	3	4	3,5
Noodmaatregel 2	4	4	4	2	3	3	3,3
Noodmaatregel 3	4	3	1	3	3	4	3,0
Noodmaatregel 4	2	5	2	2	3	3	2,8
Noodmaatregel 5	2	1	5	2	3	2	2,3

Figuur 38: Handelingsperspectief deel 2 MCDA opzet.

5 Handelingsperspectief resultaat

In dit handelingsperspectief resultaat hoofdstuk wordt het eindresultaat van dit onderzoek gegeven. Hierbij is een effectief handelingsperspectief gecreëerd die de dijkbeheerder en waterkeringspecialisten kunnen gebruiken bij bressen, bestaande uit twee delen zoals in sub-paragraaf 4.3.1 uitgelegd. Dit uiteindelijke handelingsperspectief kan vervolgens worden gebruikt voor het kiezen van de meest geschikte noodmaatregel voor het dichten van een bres of het beperken van de bresgroei, weergegeven in de paragrafen 5.1 en 5.2.

5.1 Beslisboom

Dit eerste deel in het handelingsperspectief, de beslisboom, zal worden gebruikt voor de eerste selectie van een geschikte set noodmaatregelen (zoals uitgelegd in sub-paragraaf 4.3.1). De eerste stap in deze beslisboom begint met de vraag of een bres wel of niet geïnitieerd is, het startpunt van dit onderzoek. Daarbij is de vraag of er wel of geen risico is op een bres in een waterkering wanneer een bres niet geïnitieerd is. Wanneer er geen risico is, zijn geen aanvullende vervolgstappen nodig. Wanneer er wel een risico is, is een aanbeveling om alvast op te starten met het voorbereiden van noodmaatregelen die toegepast kunnen worden, afhankelijk van het risico. Bij een wel geïnitieerde bres zal effectief worden bepaald welke noodmaatregelen voor de belangrijkste eerder gevonden bepalende beoordelingsfactoren (in sub-paragraaf 4.1.3) geschikt en haalbaar zijn. Om het handelingsperspectief effectief te houden zou deze uit niet veel meer dan vier (expert 2) van de belangrijkste bresgroei en noodmaatregel inzet beoordelingsfactoren bestaan (expert 3). Welke factoren dit zijn en in welke volgorde dit zal worden gebracht zal in de volgende onderdelen (sub-paragrafen 5.1.1 en 5.1.2) verder worden toegelicht. Bij het afwerken van de beslisboom met deze beoordelingsfactoren zal een selectie (set) van geschikte noodmaatregelen ontstaan, waarbij de uiteindelijke keuze in paragraaf 5.2 wordt uitgelegd.

5.1.1 Belangrijke beoordelingsfactoren experts

Voor de beslisboom is het meenemen van de meest beïnvloedende beoordelingsfactoren belangrijk mee te nemen, zoals hierboven besproken. Welke beoordelingsfactoren dit zijn zal in deze sub-paragraaf duidelijker worden, waarin de gesprekken met de experts beter zijn uitgelicht. Het uitwerken van de meningen van de experts zal in aanvulling op de resultaten van sub-paragraaf 4.1.3 figuur 9, waarin de meest beïnvloedende beoordelingsfactoren terug te vinden zijn. De beoordelingsfactoren die daarmee verder zijn uitgelicht zijn: het waterkering materiaal (met potentieel de bekleding en faalmechanismen als bresgroei factoren), de bres fases, de bres breedte, de bres stroming en de bres hoogte (zie figuur 9).

Expert 1

Om te beginnen benadrukte expert 1 het belang van de tijd met daarbij de beschikbaarheid van materialen om te reageren. Daarbij gaf hij aan dat het belangrijk is in welke fase de bres zich bevindt. Dit kan, voornamelijk in combinatie met het materiaal van de waterkering en de manier waarop een bres (faalmechanismen, verwerkt in fases) is ontstaan een goed inzicht geven over de groei van de bres en daarmee de inzet van noodmaatregelen. Daarnaast moet een noodmaatregel om toegepast te kunnen worden voornamelijk aan de stroming door de bres, de de bres hoogte en de bres breedte voldoen. Daarna komen vooral de andere beoordelingsfactoren die ook bepalend zijn, maar pas na het weten van de technische mogelijkheid voor het toepassen van een noodmaatregel (te zien in figuur 9, gebruikt in het volgende handelingsperspectief deel 2 paragraaf 5.2).

Expert 2

Expert 2 legt daarbij een vergelijkbare nadruk op het bepalen van de fases van de bres, eventueel in combinatie met voornamelijk het waterkering materiaal om de snelheid van de bresgroei vast te stellen. Een klei-dijk en een zand-dijk reageren namelijk verschillend op een bres. Een fase waarin de kern van een waterkering is blootgelegd aan stromend water kan er bij een waterkering van zand voor zorgen dat de bres zeer snel verder groeit, terwijl dit bij een waterkering van klei veel langer duurt. Bij langzaam groeiende bressen is er meer tijd voor het plannen van noodmaatregelen, terwijl snelgroeiende bressen snel meer massieve interventies vereisen. Vervolgens is het moeilijkste het voldoen en doorstaan van een noodmaatregel aan de sterkte van de stroming door de bres heen. Daarna geeft expert 2 aan dat de hoogte en de diepte van de bres voornamelijk van belang is. Hierna gevolgd door de meer locatie specifieke factoren, besproken in paragraaf 5.2.

Expert 3

Expert 3 gaf aan dat voornamelijk het materiaal van de waterkering (en in mindere mate de waterkering bekleding) een grote rol speelt in de bresgroei en belangrijk is met meenemen. Dit in combinatie met de stroming kan het formaat waarin snel een noodmaatregel gekozen moet worden voor een groot deel veranderen. Bij een lage stroming door een bres in een waterkering van klei kunnen kleine relatief kleine noodmaatregelen geschikt zijn. Bij snelle stroming door de bres met zand als waterkering zijn alleen relatief grote noodmaatregelen die geschikt zijn tegen een sterke stroming geschikt. Hierbij zouden fases ook belangrijk zijn in hoeverre een waterkering beschadigd is, waarmee de groeisnelheid wordt bepaald door of de vraag of de kern van de waterkering al bereikt is. Daarbij is ook de hoogte van belang om technisch de bres te kunnen dichten. Daarnaast is de breedte van de bres ook belangrijk om op te nemen in het handelingsperspectief voor het bepalen van geschikte noodmaatregelen. Het opvangen van water binnendijs kan in de beginfase een goede oplossing zijn, waarbij de hoogte van de waterkering van belang is. Daarbij is eerst van belang te weten of het plaatsen daar mogelijk is door de hoeveelheid water (de stroming door de bres), waarin dit de mogelijke plaatsing hiervan beïnvloed tot onmogelijk maakt (expert 3).

Expert 4

Expert vier benadrukte dat de tijd het meest essentieel is bij het plaatsen van een noodmaatregel. Daarbij gaf hij aan dat een ervaren besluitvormer een paar hoofdpunten van belang vindt, met als eerste de diepte en breedte. Daarna is het belangrijk om te weten hoe snel de bres verder groeit met wat daarbij de optredende stroomsnelheden zijn. Dit zou voornamelijk voor het eerste deel van het handelingsperspectief om tot een aantal geschikte noodmaatregelen te komen benodigd zijn. Vervolgens komen de meer geografische en bereikbaarheid-factoren aan bod bij de definitieve keuze voor een noodmaatregel.

5.1.2 Volgorde met belangrijkste beoordelingsfactoren in beslisboom

In deze sub-paragraaf zal de keuze en volgorde van de belangrijkste beoordelingsfactoren (uit de vorige sub-paragraaf 5.1.1) worden gegeven. Zoals eerder aangegeven zou een effectief handelingsperspectief moeten bestaan uit de belangrijkste beoordelingsfactoren, maar niet bestaan uit veel meer dan vier stappen. Hierbij is in de expert interviews naar voren gekomen welke factoren als meest belangrijk worden gezien. Hieruit concluderend zal worden gekozen voor het meenemen van de meest belangrijke noodmaatregel-inzet beoordelingsfactoren (figuur 9) in dit eerste deel van het handelingsperspectief. Daarbij is om het aantal stappen niet te groot te laten worden in de beslisboom gekozen voor het meenemen van de meest bepalende bresgroei factor.

Bij het bepalen van deze volgorde is voornamelijk gefocust op experts 1 en 4 vanwege hun achtergrond en ervaring van onderzoek naar noodmaatregelen bij bressen. In combinatie met het waterkering materiaal, die een belangrijk deel van de bresgroei snelheid veroorzaakt, zijn de bres fases met de mate waarin een waterkering beschadigd is belangrijk om te benoemen (experts 1, 2 en 3). Hierin is de mate waarin de kern van een waterkering is blootgelegd opgenomen (waarop faalmechanismen een invloed kunnen hebben experts 1 en 4) en is dit dus tot op zeker hoogte meegenomen. Vervolgens is naar voren gekomen dat de stroomsnelheid door de bres daarna van belang omdat een maatregel technisch deze altijd moet kunnen weerstaan om te werken (experts 1 en 2). Daarna komt de diepte van de bres als voornaamste beoordelingsfactor naar boven (experts 3 en 4), waarbij een noodmaatregel niet per definitie zo hoog kan worden gemaakt als gewenst. Zo is er met big bags en rock bags bijvoorbeeld veel ruimte en materiaal extra nodig om in de hoogte te gaan en daarbij stabiel te blijven staan. Ten slotte de breedte van de bres, die de omvang van de benodigde noodmaatregelen bepaalt. Hieruit concluderend zal in de beslisboom als eerste de bres fases, daarna het waterkering materiaal, vervolgens de stroming door de bres, als vierde de bres hoogte en als vijfde de bres breedte worden beoordeeld.

5.1.3 Onderverdeling beoordelingsfactoren in stappen

In dit onderdeel zal nader worden toegelicht uit hoeveel opties elke beoordelingsfactor in de beslisboom bestaat, toegelicht per beoordelingsfactor hieronder.

Bres fases

Het aantal fases waarin een bres zich kan bevinden bestaat uit vijf fases (figuur 8 met uitleg). Hierin kan een onderscheid gemaakt worden tot op het moment de kern van de waterkering wordt bereikt. Deze grens ligt bij de overgang van fase 1 naar fase 2, waarbij dus in fase 1 het waterkering materiaal nog niet van belang is. In de fases 2 tot en met 5 lijkt voornamelijk de verder stroming, diepte en breedte van belang waarop een noodmaatregel ingezet kan worden. Het verder specificeren van de fases zou daarmee leiden tot een vrijwel onnodig grote beslisboom en daarmee minder effectief worden. Hierbij is de keuze gemaakt om met deze vier fases bij elkaar samen genomen verder te gaan in de beslisboom.

Waterkering materiaal

Wanneer de waterkering kern is bereikt (in de fases 2 tot en met 5) groeit de bres afhankelijk van het materiaal hiervan verder. Het materiaal waar een dijk-waterkering in Nederland uit bestaat is voornamelijk zand of klei. In aanvulling zijn er andere waterkeringen met vastere minder erodeerbare materialen, denk hierbij bijvoorbeeld aan een dam (zoals in de aanleiding van dit onderzoek beschreven 1.3). Welke materialen dat precies zijn ligt in dit onderzoek minder de focus op (besproken in de discussie hoofdstuk 6). Het meenemen van deze vastere materialen is wel een aanvulling voor dit onderzoek in combinatie met een zand-en klei-waterkering. Hierbij wordt namelijk uitgegaan dat de tijd nauwelijks van belang is bij het eroderen van de waterkering en het daarmee groeien van de bres. Voornamelijk een sterker wordende stroming heeft hier invloed op, waarmee een waterkering wegspoelt of niet (zoals beschreven in paragraaf 1.3 waar een overlaatdam was weggespoeld). Samengevat zal het materiaal van de waterkering op drie manieren in de beslisboom worden weergegeven, namelijk door zand, klei en door vast materiaal.

Stroming door de bres

De stroming door de bres is lastig op te delen. De stroming zou snelheden van wel 6 meter per seconde kunnen bereiken [Förster, 2011]. Het vaststellen van een goede verdeling

van de stroming in de beslisboom zou de gevonden noodmaatregelen op een goede manier moeten kunnen beoordelen op inzetbaarheid, maar daarbij niet te uitgebreid zijn om effectief te blijven. Daarbij is in eerdere onderzoeken voor het beoordelen van de stroming waaraan een noodmaatregel voldoet gekozen voor het opdelen in een lage, een gemiddelde en hoge stroming [Dagher et al., 2016]. Hierbij lijkt een verdeling van lage (0 tot 2 meter per seconde), gemiddelde (2 tot 4 meter per seconde) en hoge (vanaf 4 meter per seconde) stroming een logische keuze waardoor dit in de beslisboom zal worden gebruikt. Hierbij kunnen de noodmaatregelen die tegen een lage stroming kunnen (sub-paragraaf 4.2.3) daadwerkelijk ook in de beslisboom hierbij worden toegepast. Denk hierbij voornamelijk aan de zandopgevulde noodmaatregelen (big bags, zandzakken (verzwaard), en losse (niet te grote) rotsblokken. De gemiddelde stromingen zouden daarna de meer voor grote rotsblokken of samengepakte rotsblokken in combinatie met een stelling of pijpen kunnen zijn. Bij hoge stromingen zou een forse verzwaaring van containers kunnen worden toegepast of misschien een stevige mast constructie in combinatie met kleinere ertegenaan steunende noodmaatregelen (rock bags) of een (binnenvaart)schip.

Bres diepte

De diepte van een bres onderverdeeld in schalen is het vierde punt wat voor deze beslisboom vastgesteld zal moeten worden. Hierbij lijken voornamelijk relatief kleine zand-gevulde maatregelen tot aan 1 meter een toepasbare groep, waarbij hierboven voornamelijk zand-gevulde noodmaatregelen afvallen voor het plaatsen in een bres. Verder lijken een aantal massieve noodmaatregelen voor hoogtes vanaf ongeveer 3 meter goed geschikt, waarbij een grens is gelegd op 3 meter hoog is gelegd. Bij hogere hoogtes lijkt voornamelijk de grote snel afsluitende constructies als beste geschikt. De grenzen zullen daarmee op 0 tot 1 meter, 1 tot 3 meter en vanaf 3 meter worden gelegd voor de bres diepte.

Bres breedte

Ook over de breedte van de bres verschillende de meningen sterk in hoe dat het beste opgedeeld kan worden. Zo gaf expert 4 aan dat het beste voor een smalle (tot 5 meter) en een brede (5-10 meter) gekozen kan worden, waarbij de grotere afmetingen vele lastiger dicht te krijgen zijn wat buiten de noodmaatregelen valt. Een grotere bres zou echter wellicht het geval kunnen zijn, en ook dat zou een toevoeging van het onderzoek kunnen zijn. Daarom is voor een andere aanpak gekozen in lijn met een bron die vergelijkbare bressen met bijbehorende noodmaatregelen heeft onderzocht [Dagher et al., 2016]. Deze bron gaf aan dat de scheiding tot 5 meter als smal, tussen de 5 tot 25 meter als gemiddeld, en vanaf 25 meter als breed kan worden gezien. Aanvullend onderzoek zou hiermee op zijn plaats zijn, benoemd in de aanbevelingen over het technisch harder onderscheid maken van de beoordelingsfactoren (hoofdstuk 8).

5.1.4 Vereenvoudigingen en veranderingen beslisboom

Om de beslisboom effectief te houden is het noodzakelijk om zoveel mogelijk onnodige stappen eruit te halen en daarmee verdere vereenvoudigingen als hierboven besproken hierin aan te brengen. In deze sub-paragraaf worden vereenvoudigingen voor de beslisboom zoveel mogelijk uitgewerkt.

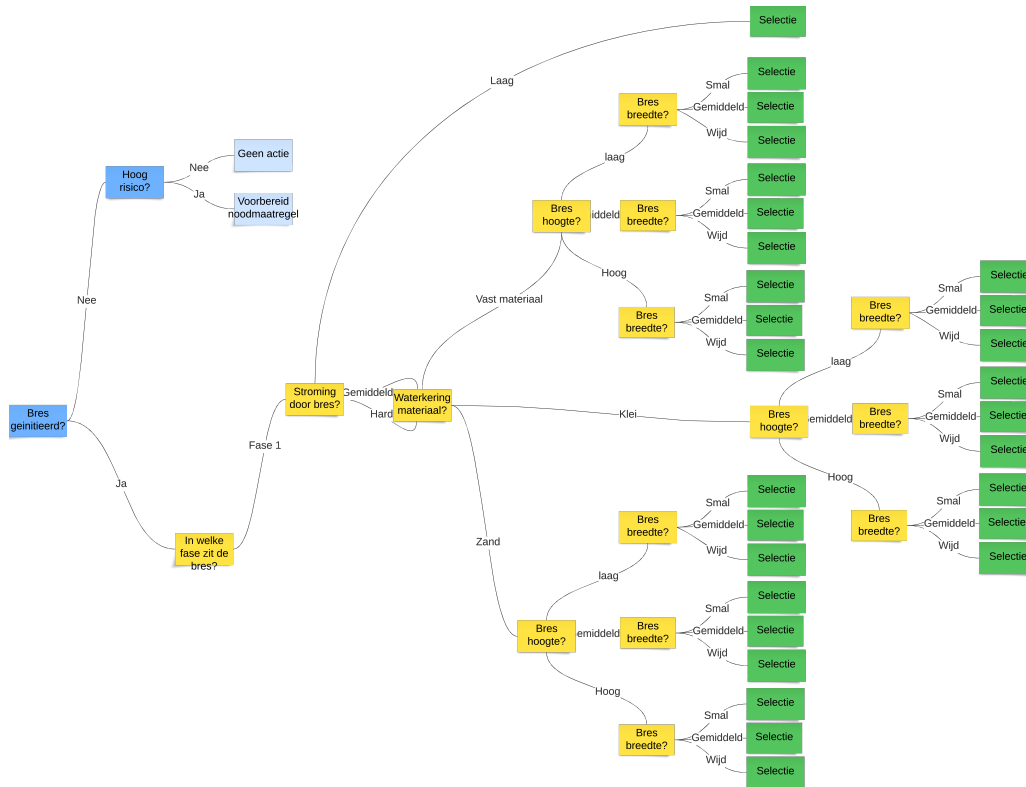
Om te beginnen is het meenemen van het waterkering materiaal voor de eerste fases niet van belang. In deze fases is de kern van de waterkering nog niet beschadigd waarmee de bresgroei nog niet is begonnen. Hierom is het niet effectief om de waterkering bekleding in de eerste fase als tweede beoordelingsfactor te benoemen, maar om meteen over te gaan

naar de stroming door de bres. Voornamelijk deze factor bepaald of meteen beschikbare noodmaatregel inzet of het plaatsen van een dijkkring mogelijk is (door de hoeveelheid water in het achterland). De voorkeur is namelijk aangegeven door vele experts dat wanneer het mogelijk is, het beste voor het opvangen van water binnendijks kan worden gekozen (locatie C heeft dan de voorkeur, paragraaf 4.1.3). Wanneer er een lage stroming is kan daarna meteen worden overgegaan op de MCDA tabel, waarmee de breedte en hoogte van de bres niet relevant zijn. Met een gemiddelde of hoge stroming door de bres zou het plaatsen van een wateropvang binnendijks echter al nauwelijks meer kunnen werken. Daarbij gaat de stroming dan zo snel dat de waterkering al snel verder erodeert, waarbij vervolgens wel het materiaal van de waterkering van belang. Deze zal daarom daarna gevraagd worden, gevolgd door de reguliere bres hoogte en bres breedte.

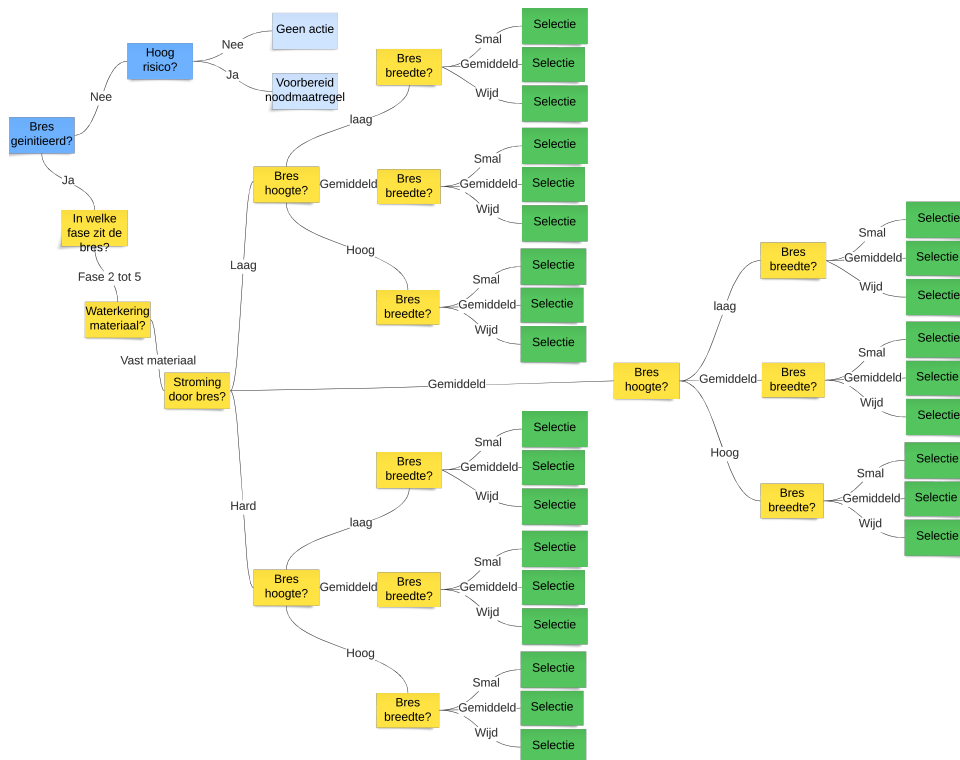
Verder zouden er vele andere versimpelingen en vereenvoudigingen te bedenken zijn bij het omvormen en eventueel omdraaien van verschillende beoordelingsfactoren. Deze zouden het handelingsperspectief nog effectiever maken en daarmee nog beter inzetbaar. Dit is verder in de discussie (hoofdstuk 6 en aanbevelingen (hoofdstuk 8 opgenomen).

5.1.5 Eindresultaat beslisboom deel 1 handelingsperspectief

Met de eerder in deze paragraaf besproken resultaten is uiteindelijk het eerste deel van het handelingsperspectief ontwikkeld. Het resultaat van deze beslisboom is in vier figuren onderverdeeld om deze overzichtelijk te houden. Hierbij is in de eerste figuur het deel van de beslisboom laten zien wanneer de bres zich in de eerste fase begeeft (figuur 39). In handelingsperspectief-deel 1.2 is het deel van de beslisboom laten zien waar de waterkering in de fases 2 to 5 zit en bestaat uit vast materiaal (figuur 40). In handelingsperspectief-deel 1.3 is het deel van de beslisboom laten zien waar de waterkering in de fases 2 to 5 zit en bestaat uit klei materiaal (figuur 41). In handelingsperspectief-deel 1.4 is het deel van de beslisboom laten zien waar de waterkering in de fases 2 to 5 zit en bestaat uit zand materiaal (figuur 40). Na het doorlopen van de beslisboom op de beoordelingsfactoren wordt op een selectie van geschikte noodmaatregelen uitgekomen. Hoe met deze selecties verder zal worden gegaan zal verder in paragraaf 5.2 worden uitgewerkt.



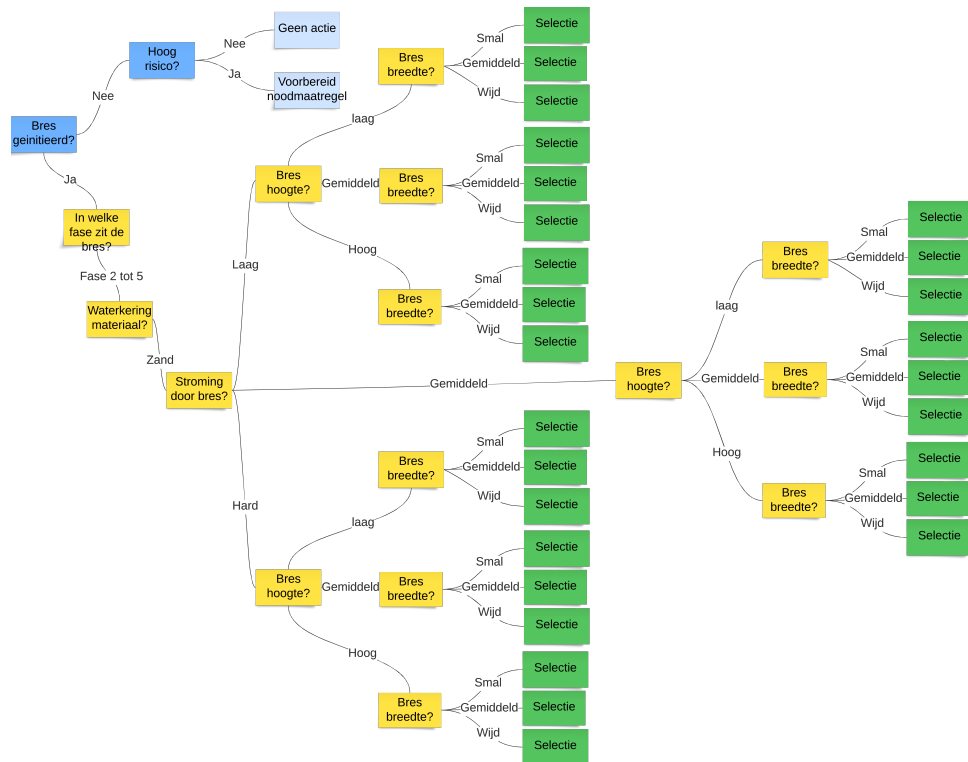
Figuur 39: Handelingsperspectief resultaat deel 1.1 beslisboom fase 1.



Figuur 40: Handelingsperspectief resultaat deel 1.2 beslisboom vast materiaal waterkering.



Figuur 41: Handelingsperspectief resultaat deel 1.3 beslisboom klei-waterkering.



Figuur 42: Handelingsperspectief resultaat deel 1.4 beslisboom zand-waterkering.

5.2 Multi Criteria Decision Analysis

Het tweede deel van het handelingsperspectief is het gebruik maken van een Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) voor het beoordelen van de overgebleven geschikt geachte noodmaatregelen (uit paragraaf 5.1). In deze paragraaf zal worden toegelicht hoe deze MCDA tabellen kunnen worden gebruikt en uit welke factoren deze bestaan (sub-paragraaf 5.2.1). Vervolgens zijn een aantal variërende situaties uitgewerkt om de werking van de MCDA tabellen met een set geschikte noodmaatregelen te laten zien (sub-paragraaf 4.2.3).

5.2.1 MCDA tabellen werking met beoordelingsfactoren

In deze sub-paragraaf zal na deze eerste selectie met de belangrijkste en meest invloedrijke beoordelingsfactoren de keuze voor de meest effectieve noodmaatregel worden vastgesteld. Dit zal gebeuren met behulp van de minder beïnvloedende noodmaatregel inzet beoordelingsfactoren, maar ook met een specifiekere analyse van de eerder hierop uitgesorteerde bres hoogte, bres breedte en stromingen door de bres. De vorige beslisboom heeft namelijk de technische haalbaarheid en realisme onderzocht, maar niet welke noodmaatregel het beste geschikt is. Zo kan onder een gemiddelde bres breedte bijvoorbeeld ook een rock bags worden toegepast, maar lijkt dit wellicht niet de meest voorde-hand-iggende optie. De factoren waarop de noodmaatregelen in de MCDA tabel zullen worden beoordeeld op volgorde van van hoogste waarde in figuur 9 (zonder de eerdere belangrijkste factoren uit de beslisboom) de locatie bereikbaarheid, geografische locatie, ondergrond oneffenheid, waterkering draagkracht, waterkering zijwaartse kracht en weersomstandigheden. De noodmaatregelen zijn aan deze beoordelingsfactoren gekoppeld en beoordeeld van zeer goed (+ +) tot zeer slecht (- -).

De noodmaatregelen zijn daarbij beoordeeld op deze inzet van de noodmaatregel bij het voor deze specifieke locatie, waarbij een een noodmaatregel geschikt voor die bepaalde bres zou moeten passen. Na de geschiktheid van de noodmaatregel op de hoogte, breedte en stroming door de bres is als eerste de noodmaatregel beoordeeld op hoe goed de bereikbaarheid van de locatie de noodmaatregel met het aanbrenge hiervan is. Vervolgens is aangegeven hoe over het algemeen de geografische locatie van deze noodmaatregel is waarbij, een weinig voorkomende methode dus laag scoort (- -) en een simpele noodmaatregel in de buurt dus hoog (+ +). Als derde is de ondergrond van belang met hoe goed een noodmaatregel op de oneffen ondergrond in de bres wordt geplaatst, waarbij een + + aangeeft dat dit goed heel goed geschikt is. Vervolgens is de draagkracht benodigd voor het plaatsen nog van belang waarmee een noodmaatregel op zijn plaats kan worden gezet. Hierbij is de vraag is hoe goed de noodmaatregel door de draagkracht wordt beïnvloed met een + + als dit een lage invloed is (of een lage draagkracht voldoende is). Vervolgens is de noodmaatregel beoordeeld op hoe de zijwaartse kracht van belang is, met een + + als helemaal niet van belang is (of goed geschikt is met een lage zijwaartse waterkering kracht). Daarna is de invloed van het weer (en daarmee ook de veiligheid bij het plaatsen) van belang, waarbij een + + aangeeft dat dit de inzet niet of nauwelijks veranderd waardoor een noodmaatregel goed scoort.

5.2.2 MCDA tabellen situaties uitgewerkt

In deze sub-paragraaf zijn een aantal situaties uitgewerkt waarin de werking van de tabellen in combinatie met de beslisboom is toegelicht. Hierbij zal als eerste de aanleiding van dit onderzoek met de bres in Limburg worden uitgewerkt. Vervolgens is een vergevorderde bres in een klei-waterkering uitgewerkt. Als derde is een bres in een vroeg stadium in een

zand-waterkering toegelicht.

Situatie 1: Aanleiding onderzoek

Als eerste situatie zal de aanleiding van dit onderzoek worden gebruikt. Dit wordt op deze manier gebruikt als validatie van het uiteindelijke handelingsperspectief. Hiermee kan worden gekeken of in de situatie geschetst in de aanleiding dezelfde noodmaatregelen als geschikte optie uit de beslisboom en MCDA tabel blijken. Hierbij zal eerst de situatie worden toegelicht en vervolgens de set met geschikte noodmaatregelen worden gegeven.

Bij de bres van de aanleiding van dit onderzoek (paragraaf 1.3) heeft om te beginnen bres initiatie plaats gevonden, waarop de volgende vraag over de fase waarin de bres zit zal moeten worden beantwoord volgens de beslisboom (beslisboom figuur 40). Daarbij is de stroming door de bres heen vastgesteld op sterk. De diep. Gezien het doorbreken van de bres bevindt deze zich niet in fase 1 en dus wel in een van de andere fases (2 tot en met 5) [Dijkstra, 2024]. De waterkering bestaat uit een soort hard (steen of beton) materiaal, waarbij dit met de vervolgstappen van een vast materiaal waterkering de beslisboom zal vervolgen. Hierbij is de stroming door de bres tussen de 2 en 4 meter per seconde (stroming door bres maximaal 1700 kubieke meter per seconde [Laurens, 2024], breedte bres 50 meter, diepte bres rond 1,5/2 meter) waardoor een gemiddelde stroomsnelheid door de bres wordt aangenomen. Zoals benoemd was de diepte van niet veel hoger als rond de 1,5 tot 2 meter [Laurens, 2024] en de breedte van de bres was rond de 50 meter breed (paragraaf 1.3).

Hier voldoen niet het plaatsen van de noodmaatregelen aan de achterzijde van de waterkering aan vanwege de hoeveelheid water wat het plaatsen hier onmogelijk maakt. De plaatsing van doek of zeil is hierbij ook lastig vanwege de stroming (zie sub-paragraaf 4.2.3). Ook lijken big bags en (verzwaarde) zandzakken niet sterk genoeg voor het dichten van de bres en kunnen deze dus ook niet worden gebruikt. Een (binnenvaart)schip lijkt vanwege de hoogte niet geplaatst te kunnen worden. Noodmaatregelen die hierbij uit de beslisboom als selectie komen die geschikt zouden kunnen zijn, zijn de rots blokken, rock bags, pijpen-palen-masten, container en geforceerde controleerde doorbraak, die allemaal op de verschillende beoordelingsfactoren zijn beoordeeld zoals hieronder weergegeven in figuur 43 voor situatie 1 zoals beschreven hierboven.

Noodmaatregelen	Stroming	Diepte	Breedte	Bereikbaarheid	Geografie	Ondergrond	Draagkracht	Zijwaartse kracht	Weersomstandigheden
Rots blokken	--	+	-	--	++	++	--	++	+
Rock bags	++	++	-	o	+	+	o	++	-
Pijpen, palen, masten	++	++	+	+	o	-	o	--	--
Container	++	++	o	+	-	--	-	+	--
Doorbraak forceren	++	++	++	++	--	++	++	++	o

Figuur 43: Handelingsperspectief resultaat deel 2 MCDA situatie 1 aanleiding.

In de tabel zijn de noodmaatregelen te vinden die ook daadwerkelijk gebruikt zijn bij het sluiten van de bres in de aanleiding van het onderzoek beschreven (paragraaf 1.3). De uiteindelijke besluitvormer die de keuze voor de noodmaatregel maakt zou deze tabel kunnen gebruiken om tot de meest effectieve uiteindelijke noodmaatregel te komen. Hierbij is het oplossen van voornamelijk de 1 of 2 minnetjes in de tabel van belang voor het kunnen toepassen van die noodmaatregel, of moet de situatie dit toelaten. Aangezien het waterkering materiaal niet of nauwelijks verder erodeert en dus niet geleidelijk verder groeit, was de tijd om de bres te dichten niet van groot belang en daarmee de breedte minder relevant (van-

wege de tijd die het duurt om een bres volledig te dichten). Dit kan natuurlijk afhankelijk van de situaties en risico's anders zijn, maar in de uitgangssituatie was het probleem voornamelijk de woonboten die los konden breken (wat al eerder was opgelost) en het leeglopen van de Maas (wat relatief lang kon duren)(paragraaf 1.3). Daarmee lijkt de keuze voor het eerst verminderen van de stroming door het plaatsen van rock bags goed geschikt, waardoor de uiteindelijk rotsblokken (beter) geschikt zijn. Het daarna verstrekken van toegang naar de locatie van de bres door middel van pontons en de hoge draagkracht voor machines van het omliggende gebied zorgen er daarbij voor dat ook rotsblokken goed passen. Daarna is het daadwerkelijk dichten van de bres met rots blokken goed geschikt, wat dan ook gebruikt is. Dit handelingsperspectief lijkt daarmee in elk geval de gebruikte opties als geschikte noodmaatregelen weer te geven. Hiermee schijnt het handelingsperspectief goed te werken.

Situatie 2: Verre fase klei-waterkering

Hier zal scenario 2 waarin een bres in een verre fase worden toegelicht. Hier is als voorbeeld een bres in een klei-waterkering gekozen waarin de kern van de waterkering is beschadigd en de bres dus in fase 2 tot en met 5 zit (beslisboom figuur 41). Daarbij is de stroming door de bres heen vastgesteld op sterk. De diepte van de bres is 4 meter diep en de breedte 15 meter breed. Uit de beslisboom komt een lijst selectie noodmaatregelen, die samen onder elkaar in de tabel worden gezet (zie sub-paragraaf 4.2.3). Noodmaatregelen die hierbij uit de beslisboom als selectie komen zijn de masten, container, (binnenvaart)schip en geforceerde doorbraak, die allemaal op de verschillende beoordelingsfactoren zijn beoordeeld zoals hieronder weergegeven in figuur 44 voor situatie 2. In deze figuur kan vervolgens op een overzichtelijke manier worden afgelezen welke noodmaatregelen geschikt zouden kunnen worden toegepast. Hiermee kan de uiteindelijke besluitvormer beoordelen en zelf de meest geschikte noodmaatregel voor de bres kiezen.

Noodmaatregel	Stroming	Diepte	Breedte	Bereikbaarheid	Geografie	Ondergrond	Draagkracht	Zijwaartse kracht	Weersomstandigheden
Pijpen, palen, masten	-	-	+	+	+	0	-	--	-
Container	--	+	-	+	+	--	-	+	-
(Binnen)vaartschip	+	++	+	-	--	--	+	0	-
Doorbraak forceren	++	++	++	++	--	++	++	++	++

Figuur 44: Handelingsperspectief resultaat deel 2 MCDA situatie 2.

Situatie 3: Vroege fase zand-waterkering

Als derde scenario wordt een bres in een vroege van een zand-waterkering toegelicht. Hierbij is de kern van de waterkering nog niet beschadigd en bevindt de bres zich dus in de eerste fase (beslisboom figuur 39). Daarbij is de stroming door de bres heen vastgesteld op sterk. De diep. Daarbij is de stroming door de bres laag. Daarbij is het formaat van de bres niet van belang, maar wel de hoogte van de waterkering. Hierbij zijn veel mogelijkheden, waarbij wel de grote massieve container en het gebruik van een (binnenvaart)schip afvallen en niet geschikt lijken. De MCDA tabel voor deze situatie is hieronder weergegeven (figuur 45).

Noodmaatregelen	Stroming	Diepte	Breedte	Bereikbaarheid	Geografie	Ondergrond	Draagkracht	Zijwaartse kracht	Weersomstandigheden	
Plastic doek of zeil	-	+	+	+	++	++	+	++	--	
Besch. materiaal inzet	--	-	o	+	++	+	++	++	-	
Zandzak	+	+	o	+	+	+	o	++	o	
Big bag	++	++	+	o	o	-	-	+	-	
Rots berm	++	++	+	-	+	++	--	+	-	
Rock bags	++	++	++	o	o	+	-	+	-	
Doorbraak forceren	++	++	++	++	--	++	++	++	o	
Damwand	-	o	+	--	-	++	--	++	-	
Wateropvang	Stroming	Diepte	Breedte	Bereikbaarheid	Geografie	Ondergrond	Draagkracht	Zijwaartse kracht	Weersomstandigheden	Waterkering hoogte
Gabions	++	+	o	+	o	o	-	++	o	o
Water barriere	+	++	++	-	--	++	-	++	--	+
Water buizen	o	++	+	+	-	-	o	++	--	++
Dam constructie	--	+	o	+	--	--	+	++	-	o

Figuur 45: Handelingsperspectief resultaat deel 2 MCDA situatie 3.

De voorkeur zou voornamelijk naar het opvangen van water aan de binnenzijde van de waterkering moeten gaan aangegeven door experts, waarbij onderin de figuur de verschillende opties hiervoor zijn aangegeven. In aanvulling zouden hierin ook zandzakken en big bags voor het opvangen van water kunnen gelden. Daarbij zou ook de bres meteen gedicht kunnen worden met meteen beschikbaar materiaal, of zou de aandacht naar het beperken van de groei van de bres kunnen gaan door middel van doek of zeil. Mocht dit allemaal niet mogelijk zijn zijn de andere opties ook meteen in de tabel terug te vinden. In de beginfase zou ook een damwand kunnen worden geplaatst waarbij de draagkracht van de waterkering sterk genoeg is de de bereikbaarheid daarbij ook.

6 Discussie

In deze discussie is kritisch gereflecteerd op de resultaten, mogelijke beperkingen en bevindingen van dit onderzoek, waarin is gekoppeld aan de resultaten van dit onderzoek.

Handelingsperspectief uiteindelijke versie

De uiteindelijke versie van het handelingsperspectief met het opdelen in twee handelingsperspectieven lijkt een verbetering op het gebruiken van alleen maar één van deze opties. Op deze manier zijn namelijk de voordelen van de beide handelingsperspectieven meer benut en de nadelen juist minder een probleem, waarmee een effectiever beheersbaar handelingsperspectief resultaat ontstaat. Met het gebruiken van beiden methodes worden de sterke kanten van de beslisboom benut met het op een gestructureerde manier zonder belangrijke factoren niet mee te nemen een relatief snelle schifting maken van een geschikte selectie aan noodmaatregelen. Op deze manier wordt de beslisboom niet te complex en hoeven daarmee niet te veel stappen eerst helemaal worden doorlopen maar alleen de echt noodzakelijke en meest belangrijke stappen. Hierna is het gebruik van een MCDA een overzichtelijke manier om de selectie geschikte noodmaatregelen op meer kleinere factoren te beoordelen. Hiermee kan een dijkbeheerder of waterkeringsspecialist het beste zelf inschatten uit geschikte noodmaatregelen van de beslisboom wat er voor de bres in zijn of haar waterkering het beste werkt en relatief snel voor de hand is. Het nadeel bij het handelingsperspectief op twee manieren uitwerken is wel dat het meer tijd kost om per selectie per situatie de geschikte noodmaatregelen op voorhand uit te werken.

Daarbij zou voor het effectief gebruiken van dit handelingsperspectief resultaat, voornamelijk het eerste deel met de beslisboom, dit nog vereenvoudigd kunnen worden. Het bepalen van welke factoren allemaal samengenomen kunnen worden kost eerst echter veel tijd wat in het kader van dit onderzoek er niet was. Daarbij is een grondige analyse benodigd om goed de verschillen van de noodmaatregelen voor de beoordelingsfactoren te vinden. Daarna zou op een goede manier met name de beslisboom kunnen worden ingekort.

Bresgroei meenemen

Het voorspellen van de bresgroei in een waterkering is lastig en van vele verschillende in het onderzoek besproken factoren afhankelijk. In dit onderzoek is uiteindelijk gekozen voor het alleen meenemen van heel erg bepalende factoren die (bijna) niet los van de inzet van noodmaatregelen gezien kunnen worden. Daarbij zijn een groot deel van deze bresgroei factoren niet meegenomen. De focus in dit onderzoek was vooral gericht op het inzetten van noodmaatregelen voor beoordelingsfactoren die meer de daadwerkelijke inzet van noodmaatregel bepalen (grootte van een bres waar een noodmaatregel geschikt voor kan zijn, stroming waartegen een noodmaatregel moet kunnen, et cetera). De bresgroei is echter wel belangrijk om te weten, waarbij deze veelal kleinere factoren bij elkaar wel de snelheid waarmee een bres groeit flink kunnen beïnvloeden. Daarbij zouden ook meerdere materialen waaruit een waterkering bestaat hierin kunnen worden meegenomen (zoals materialen waar een overlaat uit zou kunnen bestaan zoals beschreven in de aanleiding van het onderzoek paragraaf 1.3). Een inschatting hiervan maken is echter lastig vergt verdere studies en de verdere ontwikkeling van modellen en valt daarmee buiten de scope van dit 10 weken durende onderzoek. Het kiezen van de meest belangrijke en bepalende factoren die de snelheid van de bres beïnvloeden lijkt een grote stap in het meer toepasbaar maken van alleen het uiteindelijke handelingsperspectief (los van verdere modellen, verder besproken in hoofdstuk 8).

Bepalen belangrijke beoordelingsfactoren

Bij het bepalen van de factoren van invloed op de inzet van noodmaatregelen zijn heel veel verschillende factoren van belang. Het plaatsen van de belangrijkste factoren in een handelingsperspectief zoals gedaan in dit onderzoek zou op veel verschillende manieren kunnen afhankelijk van de focus van het onderzoek. Gebaseerd op de meningen van de experts lijken de belangrijkste factoren benoemd in de beslisboom, waarmee tot een goede set geschikte noodmaatregelen kan worden gekomen. Daarbij is het open laten van de MCDA-tabel met een algemene aanbeveling vooral open gelaten om de uiteindelijke keuze van een noodmaatregel bij de besluitvormers te laten. Hierbij dienen vooral de minnetjes in de tabel voor een noodmaatregel opgelost te worden om goed toegepast te kunnen worden. De besluitvormers kunnen namelijk beter zelf inschatten welke van de geschikte noodmaatregelen het meest effectief zou kunnen worden toegepast in de locatie specifieke situatie bij een bres. Samenvattend lijken hiermee de meest belangrijke factoren in voornamelijk de beslisboom benoemd die van belang zijn bij de inzet van noodmaatregelen. Het daarbij in aanvulling meenemen van meer locatiespecifieke factoren als algemene aanbeveling ondersteund de besluitvormers in het niet over het hoofd zien van belangrijke punten zonder het handelingsperspectief te complex te maken.

Daadwerkelijke toepasbaarheid noodmaatregelen lastig te bepalen

Een ander discussiepunt is het bepalen van de daadwerkelijke effectiviteit en toepasbaarheid van de verschillende noodmaatregelen per beoordelingsfactor (breedte, stroming, draagkracht, diepte et cetera). Het vaststellen van de daadwerkelijke inzetbaarheid van de verschillende noodmaatregelen was lastig door middel van literatuuronderzoek te doen. Hierbij zijn in aanvulling de meningen van de experts gebruikt om de inzet in verschillende noodmaatregelen voor verschillende situaties te bepalen. Hiermee is het echter wel lastig een hard technische onderscheid te maken, waarmee voornamelijk in de beslisboom deze noodmaatregelen op beoordelingsfactoren lastig vast te stellen waren. De input van de experts met de daarbijkomende uitkomsten van een selectie geschikte noodmaatregelen voor de variërende bressen beschreven in paragraaf 5.2 lijken wel in lijn met de algemene resultaten uit eerdere onderzoeken.

Meenemen risico en schade bij implementeren noodmaatregelen

De inzet van noodmaatregelen heeft tot op zekere hoogte alleen zin als de baten hoger zijn als de kosten. In het onderzoek is uitgegaan dat een noodmaatregel ingezet wordt in de situaties waarin een bres ontstaat. Wanneer de kosten van het implementeren hoger zijn als de baten van het toepassen van een noodmaatregel kan echter wellicht beter worden gekozen voor het niet dichtn van de bres.

Gebruik relatief oude bronnen

Een belangrijk discussie punt is het gebruik van veel oude bronnen in dit onderzoek, waarnaar toe wel is verwezen in nieuwere onderzoeken. De beschikbaarheid van veel nieuwere bronnen over de noodmaatregel inzet bij bressen leek hierbij haast onvindbaar. In het verleden (10-20 jaar geleden) zijn relatief veel onderzoeken gedaan naar de effecten van verschillende noodmaatregelen bij bressen in dit onderzoek gebruikt in vergelijking met het heden. Hierbij is ook in relatief veel nieuwere secundaire literatuur naar deze oude bronnen verwezen. In deze oude literatuur is vooral de inzet van verschillende noodmaatregelen bij bressen onderzocht, waar in nieuwere literatuur niet een weerlegging van gemaakt is. Hiermee lijkt het gebruik van deze oudere bronnen niet tegenstrijdig met de (mogelijke innovatieve) veranderingen op bepaalde gebieden.

Gebruik secundaire literatuur met citeren

In het onderzoek zijn ook secundaire literaire bronnen gebruikt waarvan het onduidelijk is wat de primaire bron is. Hierbij is de secundaire literatuur gebruikt in het citeren, omdat op geen manier te achterhalen was wat de primaire bron exact inhield.

Vershil in opvattingen experts

Het verschil in opvattingen van de verschillende geïnterviewde experts is ook een discussie punt voor dit onderzoek. Voor de veelzijdigheid van het onderzoek is voor verschillende achtergronden en organisaties van de experts gekozen. Zo is er, zoals besproken eerder in hoofdstuk 3, vanuit verschillende instanties een oordeel over beoordelingsfactoren, noodmaatregelen en handelingsperspectieven gekomen. Bij de verwerking hiervan is bij de twijfelachtig geschikte beoordelingsfactoren en noodmaatregelen een verdiepende analyse gemaakt gebaseerd op de achtergrond van de verschillende experts. Hiermee lijkt dit probleem grotendeels opgelost.

Vertalen van expert meningen naar waardes

Het vertalen van de meningen van de experts naar een waarde in de tabellen is een ander discussiepunt. Aan de experts is niet direct naar een waarde gevraagd, maar de meningen zijn wel nauwkeurig na-geluisterd om de goede waarde, zoals door de experts bedoeld, te geven voor de invloed van de beoordelingsfactoren en de geschiktheid van de noodmaatregelen. Hierbij is ook de verdiepende analyse gedaan met een marge van 1 op de gemiddelde waarde van alle experts bij elkaar, net zoals in het vorige kopje beschreven, waardoor meer de teksten van de experts zijn uitgelicht bij de twijfelachtige gevallen voor het wel of niet verder meenemen in het onderzoek. Hierbij lijkt dit discussie punt van minder grote invloed.

Experts inlezen weinig tijd

Met het afnemen van de interviews is steeds vooraf naar de experts waarmee het interview gehouden is gestuurd wat de verschillende onderwerps-punten waren (dus welke noodmaatregelen en beoordelingsfactoren zouden worden behandeld). Dit is steeds een week van te voren opgestuurd naar de experts opgestuurd (afgezien van expert 2) maar hierbij was dit af en toe te kort om goed in te lezen gaven de experts aan. Daarbij waren bepaalde nieuwere in dit onderzoek onderzochte noodmaatregelen waar een aantal experts niet mee bekend waren en waarvoor ze ook geen tijd hadden om hier navraag naar te doen. Daardoor is voor die noodmaatregelen (PLUG, worsten met zand of water, voorgefabriceerde bres plug) onduidelijk of deze noodmaatregelen een aanvulling zouden zijn. Daarbij is de onduidelijkheid of deze in Nederland zijn meegenomen en gekozen om deze noodmaatregelen dan niet verder in dit handelingsperspectief mee te nemen.

Volledigheid noodmaatregelen

De volledigheid van noodmaatregelen zou een ander discussie punt kunnen zijn. De plaatsing van vergelijkbare noodmaatregel materialen, anders als in het onderzoek gegeven, zouden ook mogelijk zijn. Dit zou kunnen wanneer deze vergelijkbaar in groottes en zwaarte zijn als noodmaatregelen benoemd. In het onderzoek is vooral de focus gelegd op welke maatregelen er geschikt zijn gebaseerd op eerder literair onderzoek (en later besproken met experts). De plaatsing van nauwelijks eerder onderzochte vergelijkbare noodmaatregelen (verder besproken in hoofdstuk 8) zou daarmee een aanvulling kunnen zijn.

7 Conclusie

In deze conclusie wordt het resultaat van het onderzoek beschreven en antwoord gegeven op de onderzoeksvragen.

Wat zijn belangrijke beoordelingsfactoren die van invloed zijn op de keuze van noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?

Om te beginnen zullen de resultaten op deze eerste onderzoeksvraag worden besproken. De onderzochte beoordelingsfactoren die de inzet van de noodmaatregelen bepalen lijken effectief en grotendeels volledig. De belangrijkste beoordelingsfactoren die een grote invloed hebben op de bres groei besproken en meegenomen in het uiteindelijke handelingsperspectief. Dit zijn de faalmechanismen, waterkering bekleding, waterkering materiaal, bres fases, bres hoogte, bres breedte, stroming door bres, ondergrond (effenheid), waterkering draagkracht, waterkering zijwaartse kracht, bereikbaarheid locatie, weersomstandigheden, geografische locatie, waterkering hoogte, noodmaatregel toepaslocatie en de noodmaatregel manier van sluiten. Deze factoren blijken dusdanig de snelheid waarmee de bres groeit te bepalen (uit experts interviews gebleken) dat het meenemen hiervan in het handelingsperspectief nodig lijkt. De andere bres groei factoren leken een minder hoge impact op de bresgroei te hebben en zijn daarom in het kader van de duur van het onderzoek niet meegenomen. Bij de keuze van de noodmaatregel inzet factoren bleken alle voorgelegde factoren tot op zekere hoogte belangrijk bij het bepalen van de inzet van noodmaatregelen.

Wat zijn geschikte noodmaatregelen voor het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei?

In dit kopje worden de resultaten op deze tweede onderzoeksvraag over geschikte noodmaatregelen besproken. De noodmaatregelen die gebruikt zijn in het onderzoek lijken goed bij het dichten van bressen en het beperken van de bresgroei gebruikt te kunnen worden. Na eerst een uitgebreid bronnen onderzoek naar welke noodmaatregelen geschikt bij bressen kunnen worden toegepast bleken veel noodmaatregelen potentieel geschikt. Vervolgens is met een gecombineerde beoordeling door 4 experts op het gebied van onderzoek naar noodmaatregelen of de inzet van noodmaatregelen bij bressen hieruit een schifting van geschikte noodmaatregelen ontstaan. Ook de nieuwe input van de experts over noodmaatregelen, vergeleken met wat andere experts in de interviews aangegeven hebben, is meegenomen in het uiteindelijke handelingsperspectief. Hierbij is ook de achtergrond, specialisatie en ervaring van de verschillende experts meegenomen. Met verder later onderzoek zijn meer onderzoeken geraadpleegd die de specifieke inzet van de noodmaatregelen en geschiktheid van de noodmaatregelen voor de eerder vastgestelde beoordelingsfactoren vast heeft gesteld. Dit lijkt ook in lijn te zijn met wat de experts in de interviews over de noodmaatregelen hebben aangegeven. Hieruit geconcludeerd lijken de noodmaatregelen met de verschillende beoordelingsfactoren effectief.

De noodmaatregelen die geschikt waren geacht voor de bressen zijn plastic doek of zeil, meteen beschikbare materialen inzet, zandzakken, big bags, roostervloedwand, rots berm, rock bags, gabions, damwand, pijpen-palen-buizen-masten, met water gevulde barriere, met water gevulde buizen, draagbare dam constructies, container, (binnenvaart)schip en gecontroleerde-doorbraak-forceren.

Wat is het meest effectieve handelingsperspectief voor besluitvormers voor op de Wiki Noodmaatregelen-website?

Als derde worden hier de resultaten voor het meest effectieve handelingsperspectief voor besluitvormers in dit onderzoek besproken. De keuze voor het handelingsperspectief lijkt goed geschikt voor de uiteindelijke dijkbeheerder en waterkering specialisten die de noodmaatregel bij een bres in dienen te zetten. Om te weten te komen wat gebruikelijke en innovatieve manieren zijn voor een uiteindelijk handelingsperspectief is hiervoor eerst bronnen onderzoek gedaan. Hierbij zijn een drietal manieren naar voren gekomen die geschikt zouden kunnen zijn. Bij de interviews met verschillende dijkbeheerders is vooraf hun mening over wat ze ideaal gezien zouden willen zien in een handelingsperspectief besproken. Hierin is gebleken dat een snelle selectie in mogelijke geschiktheid van noodmaatregelen de voorkeur heeft, waarna vervolgens verschillende overgebleven opties overzichtelijk het beste kunnen worden vergeleken.

Hierna is door dezelfde experts hun mening gevraagd over de drie eerder opgestelde handelingsperspectieven. Hieruit blijkt dat voor de eerste schifting een beslisboom als meest ideaal wordt gezien en voor de tweede overzichtelijke opties een MCDA. Input voor een alternatief handelingsperspectief is hieruit niet gebleken. De keuze voor het opdelen van het uiteindelijke handelingsperspectief resultaat in twee delen lijkt daarmee dus goed geschikt bij de uiteindelijke keuze voor noodmaatregelen bij bressen.

Uiteindelijke handelingsperspectief resultaat

Op basis van de volledigheid van de eerste drie onderzoeksvragen en het hierbij meenemen in het uiteindelijke handelingsperspectief lijkt bevorderend voor het eindresultaat. Hierbij is in het eerste handelingsperspectief een selectie van geschikte noodmaatregelen gevormd op basis van de vijf belangrijkste beoordelingsfactoren, in lijn met wat de experts hebben aangegeven als voorkeur. De belangrijkste factoren hierin zijn, in volgorde van belang: de bres fases, het waterkering materiaal, de stroming door de bres, de bres hoogte en de bres breedte.

Vervolgens is een tweede MCDA handelingsperspectief gebruikt voor het overzichtelijk maken van de noodmaatregelen met al de belangrijk beoordeelde beoordelingsfactoren. Deze zijn in volgorde van belang: Stroming door de bres, bres hoogte, bres breedte, bereikbaarheid locatie, geografische locatie, ondergrond, draagkracht, zijwaartse kracht, weersomstandigheden (en waterkering hoogte voor opvangen water binnendijks).

8 Aanbevelingen

In dit aanbevelingen hoofdstuk worden bruikbare adviezen aan de opdrachtgevers van dit onderzoek en suggesties voor verder onderzoek gegeven.

Samenvoeging partijen met informatie op de Wiki-noodmaatregelen website

Dit onderzoek heeft inzichtig gemaakt wat er nog mist aan de Wiki noodmaatregelen website. Een probleem op dit moment in de Nederlandse waterkering-verdediging is vooral dat dit door heel veel verschillende plaatsen gebeurt door alle waterschappen en Rijkswaterstaat grotendeels apart. Een aanbeveling voor verder onderzoek is hierin de informalisering van de Wiki noodmaatregelen. Hierin is de aanpak vooral gericht op de samenvoeging van aannemers en andere belangrijke ondersteunende partijen in het handelingsperspectief. Bij een koppeling tussen deze partijen kan eerder de meest effectieve keuze voor de meest geschikte noodmaatregel worden toegepast. Hierin zou een koppeling tussen de verwachte toenemende bres-groei, de snelheid van de noodmaatregel in de aanvoering en effectiviteit, en de inzet-snelheid het beste kunnen worden gemaakt. Daarbij is het van belang om de bereikbaarheid van de bres-locatie op te nemen. Bij de juiste koppeling van al deze factoren, die dan ook regelmatig ge-update dienen te worden, kan altijd de meest geschikte noodmaatregel per noodsituatie worden ingezet.

Een aanvullende aanbeveling is het koppelen van de opslaglocatie van noodmaatregelen (zoals bresdefender, gevulde tubussystemen) aan breslocatie om zo de inzetbaarheid direct te toetsen. Hierbij zou wellicht een systeem waarin de actuele locatie van een plaatsgebonden noodmaatregel kunnen worden gezet waarbij de snelheid waarmee deze ingezet zou kunnen worden beter bepaald kan worden.

Bresgroei meenemen en verder onderzoeken

Zoals ook in de discussie besproken is het meenemen van de bresgroei factoren maar tot op zeker hoogte gedaan. Verder onderzoek naar het creëren van een model die de kans op verdere afbreuk en eventuele overstromingen goed berekend lijkt voor het juist inschatten van deze exacte groei nodig. Dit kan zo gebruikt worden om een beter inschatting te maken van mogelijke verergering en aanpassing van de toe te passen noodmaatregel. Hierin kunnen bresgroei factoren worden gebruikt die de dijk geometrie uit de excel-spreadsheets en bres vergelijkingen om de breslengte, maximale bresdiepte en bresvormingstijd te berekenen modelleren [Wallace et al., 2024]. Nu zijn er namelijk veel beoordelingsfactoren die wellicht relatief tijdrovend kunnen zijn om erachter te komen, maar die wel nodig zijn om de juiste inschatting te maken voor een bepaalde noodmaatregel. Zonder model is met de ervaring die de dijkbeheerder en waterkering specialisten hebben over de status van de waterkering (met eerdere beschadigingen of reparaties, vegetatie, stroming en waterdruk) waarover ze een noodmaatregel beslissing nemen van belang. Hiermee kan bij een op deze punten zwak beoordeelde waterkering een keuze voor een set noodmaatregelen die in een verder stadium wordt aanbevolen te gebruiken van belang zijn.

Verder onderzoeken vereenvoudigen handelingsperspectief

Het handelingsperspectief, voornamelijk de beslisboom, zal in verder onderzoek meer vereenvoudigd en versimpeld kunnen worden. Een aanbeveling hierbij is het verder onderzoeken en daarbij ook versimpelen, om zo het handelingsperspectief zo effectief mogelijk te maken. Daarbij is een grondige analyse benodigd om goed de verschillen van de noodmaatregelen voor de beoordelingsfactoren te vinden.

Aanvullend onderzoek afgevallen noodmaatregelen

Aanvullend onderzoek naar de inzet van in het onderzoek afgevallen noodmaatregelen is een goede aanbeveling voor later onderzoek. Hierbij dient bijvoorbeeld de inzet van de BresDefender met aanvullende verankeringen aan de waterkering en het gebruik van aanvullende waterkering afdichtende noodmaatregelen te worden onderzocht. Ook zou verder onderzoek naar de met water gevulde (grote) barrière (zoals besproken in de noodmaatregelen paragraaf 4.2.1) vanwege de flexibele onderkant wellicht ook in een bres kunnen worden gebruikt om een bres te dichten. Ook is de aanwezigheid van verschillende noodmaatregelen (water gevulde buizen, PLUG, Water gevulde barrière) in Nederland nog niet volledig duidelijk. Het uitvinden hiervan zou in combinatie hiervan een toevoeging van de noodmaatregelen (voor dit handelingsperspectief) bij bressen kunnen betekenen.

Verder onderzoek vaststellen exacte waardes onderzoek

Het maken van harder technisch onderscheid van waardes waarop een noodmaatregel zou moeten worden ingezet is een andere aanbeveling voor verder onderzoek (sub=paragraaf 4.2.3). Op dit moment zijn de beoordelingsfactoren van de noodmaatregelen vooral met oude bronnen en de ervaring van experts vastgesteld. Het vaststellen van exacte waardes waartegen een bepaalde noodmaatregel bestand zou kunnen zijn was hiermee lastig. Aanvullend onderzoek voor het verduidelijken van welke beoordelingsfactoren een bepaalde noodmaatregel exact geschikt is voor inzetten (exacte bres afmetingen en bres stroomsnelheden, hoeveel hoger een noodmaatregel kan worden verhoogd, inzet snelheid, water doorlaatbaarheid, effectiviteit in oneffen bodems, etc) zou daarmee een aanbeveling zijn. Daarbij zouden ook de waardes en grenzen waarin een beoordelingsfactor is verdeeld in voornamelijk de beslisboom kunnen worden aangepast. Het is voornamelijk de bedoeling om deze waardes op de meest effectieve wijze vast te stellen en daarmee niet onnodig veel, maar ook zeker niet te weinig stappen (wijde, gemiddelde, smalle bres breedte) te gebruiken.

Inzet vergelijkbare noodmaatregelen

In dit onderzoek zijn veelal eerder gebruikte (succesvolle) methoden voor het sluiten van een bres of het beperken van de bresgroei onderzocht. Echter zijn er veel vergelijkbare materialen die bij bressen gebruikt kunnen worden als in het onderzoek beschreven. Veelal in vergevorderde grote bressen zijn noodmaatregelen geschikt die groot en zwaar zijn en op deze manier een snel een (groot) deel van een bres kunnen dichten, aangevuld met (veelal kleinere) noodmaatregelen die de overige niet gedichte plekken afdichten (expert 1). Wanneer de in dit onderzoek genoemde noodmaatregelen niet werken, niet snel genoeg beschikbaar zijn, of dat er een vergelijkbare noodmaatregel sneller beschikbaar en plaatsbaar is is een aanbeveling om wellicht voor een niet genoemde vergelijkbare noodmaatregel te kiezen.

Innovatie volgen

De vernieuwing van noodmaatregelen is blijvend aan de gang. Een belangrijke aanbeveling hierin is door constant deze innovaties te blijven volgen en waar mogelijk onderzoeken om de Wiki-noodmaatregelen website te blijven verbeteren. Over de hele wereld zijn instanties en organisaties bezig de meest geschikte noodmaatregelen te onderzoeken die ook effectief bij Nederlandse waterkeringen kunnen worden ingezet. Innovaties vinden plaats in materialen en methodes voor veel verschillende schadebeelden. Nu worden de in Nederland gevonden noodmaatregelen bij (Wiki) werkgroep bijeenkomsten al grotendeels besproken

en daarop later onderzocht. Dit gebeurt wellicht met buitenlandse noodmaatregelen minder, waarbij een aanbeveling het verder kijken naar buitenlandse onderzoeken kan zijn. Ook kan er meer samenwerking met buitenlandse organisaties worden gedaan naar verbeteringen in de Nederlandse noodmaatregelen en innovaties.

Noodmaatregelen toepassen en voorbereiden voordat een bres begint

Het ondernemen van actie met de inzet en voorbereiding van noodmaatregelen in de vroege beginfase, bij voorkeur voordat de bres ontstaat, is een aanbeveling. Dit kan het beste met binnendijks het opvangen (met een noodkering of dijkslot) van water om een zwakke plek heen bijvoorbeeld (expert 1). Dit is later ook aangegeven door expert 3 dat voor het optijd kunnen implementeren van een noodmaatregel het van belang is om eerder te beginnen dan wanneer een bres is ontstaan met voorbereiden (en plaatsen) van een noodmaatregel. Daarbij is het zo snel mogelijk beperken van de bresgroei een aanbeveling wanneer dit mogelijk is. Zo kan zoveel mogelijk tijd worden gewonnen voor het voorbereiden van extra noodmaatregelen en het beperken van de gevolgen met het waar-nodig evacueren van gebieden.

Meenemen risico's van een bres

Het inzetten van noodmaatregelen zou alleen moeten worden gedaan wanneer de baten groter zijn dan de kosten bij het inzetten van noodmaatregelen. Daarbij is het meenemen van de gevolgen van een bres met de risico's van een bres van belang. Dit zou de besluitvormer voornamelijk moeten afwegen en was geen onderdeel van dit onderzoek, maar dit is wel een belangrijk onderdeel in het bepalen of een noodmaatregel inzetten nodig is.

Gebruik gecontroleerde doorbraak

In dit onderzoek is een van de veelal geschikte noodmaatregelen het gebruik van de gecontroleerde doorbraak forceren. Deze noodmaatregel kan in eigenlijk alle situaties goed gebruikt worden, alleen is het voornaamste probleem het forceren van de doorbraak op een geschikte locatie. Mocht er een groot risico zijn op een bres waarbij de consequenties (hierboven besproken) groot zijn, dan zou deze noodmaatregel inzetten al snel worden aangeraden. Dit kan ook goed wanneer er een bres ontstaan is. Het doorbreken van een waterkering kan echter wel veel andere gevolgen met zich meebrengen wat lastig in dit onderzoek verwerken was. Het hierbij vooraf grondig nagaan van wat deze gevolgen zijn is een belangrijke aanbeveling voor het gebruik van deze noodmaatregel in tegenstelling tot de andere noodmaatregelen.

Schade beperken wanneer dichten bres niet lukt

Een laatste aanbeveling wat voornamelijk buiten dit onderzoek valt is het beperken van de schade wanneer het dichten van een bres niet kan. Dit kan door middel van zoveel mogelijk water tegen waardoor dit niet door de bres stroomt of door het beschermen van bepaalde gebieden door het plaatsen van afschermdende noodmaatregelen. Voor het verminderen van water door de bres zouden bresgroei-beperkende of deels afdekkende bres noodmaatregelen kunnen worden gebruikt. Voor het beschermen van bepaalde gebieden zouden de noodmaatregelen die in dit onderzoek zijn gebruikt voor het opvangen van water aan de binnenzijde van de waterkering kunnen worden gebruikt. Dit kan op vlakke plekken bijvoorbeeld, zoals ook kort besproken in sub-paragraaf 4.1.3.

9 Referenties

- [Abdulrazzaq et al., 2022] Abdulrazzaq, I. D., Jalut, Q. H., and Abbas, J. M. (2022). Sensitivity analysis for dam breach parameters using different approaches for hamrin dam. <http://148.72.244.84:8080/xmlui/bitstream/handle/xmlui/7214/8-894.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [Adria et al., 2023] Adria, D. A., Ghahramani, N., Rana, N. M., Martin, V., McDougall, S., Evans, S. G., and Take, W. A. (2023). Insights from the compilation and critical assessment of breach and runout characteristics from historical tailings dam failures: Implications for numerical modelling. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-023-00964-0>.
- [Albers, 2024] Albers, M. (2024). Live hoogwater: Defensiehelikopters klaar met storten zware stenen op kapotgeslagen dam maastricht. <https://www.volkskrant.nl/binnenland/liveblog-hoogwater-regenval-dijken-hogewaterstand-bdb42c8d/?referrer=https://www.google.com/>.
- [Albers, 2014] Albers, T. (2014). Emergency closure of dike breaches; the effect and applicability of emergency measures. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8eaea1bb-146b-45b2-aa0d-03b00f6d146c>.
- [Alconet, 2024] Alconet (2024). Zeecontainer afmetingen. <https://www.alconet-containers.nl/afmetingen-zeecontainer/:text=Een>
- [Alkoholossi, 2021a] Alkoholossi, G. (2021a). Rockfill dam breaching experiments with the application of photogrammetry techniques. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2779529/no.ntnu:inspera:67701620:34447759.pdf?sequence=1>.
- [Alkoholossi, 2021b] Alkoholossi, G. E. (2021b). Rockfill dam breaching experiments with the application of photogrammetry techniques. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2779529/no.ntnu:inspera:67701620:34447759.pdf?sequence=1>.
- [Boc, 2022] Boc, S. (2022). Portable lightweight ubiquitous gasket. <https://www.ercd.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476704/portable-lightweight-ubiquitous-gasket/>.
- [Boers, 2019] Boers, M. (2019). Handelingsperspectieven overgangen in de praktijk. https://publications.deltares.nl/11203682_02.pdf.
- [Boon and Kaspersma, 2022] Boon, J. and Kaspersma, J. (2022). 12 veelgestelde vragen over hoogwater op rivieren. <https://www.deltares.nl/verhalen/12-veelgestelde-vragen-over-hoogwater-op-rivieren>.
- [Dagher et al., 2016] Dagher, J., Jupner, R., and Bhaskar, N. (2016). Possibilities of closing levee breaks in flood events from the german experience. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/UW16/UW16025FU1.pdf>.
- [De Leeuw et al., 2012] De Leeuw, S., Vis, I. F., and Jonkman, S. N. (2012). Exploring logistics aspects of flood emergency measures. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1468-5973.2012.00667.x>.

- [Dijkstra, 2024] Dijkstra, T. (2024). Terugblik hoogwater januari 2024 en situatie bosscherveld. <https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/archief/2024/01/hoogwater-2024?sort=descamount=40id1704545979000>.
- [Dijkstra et al., 2022] Dijkstra, T., Vrancken, I., Van der Wal, C., Kentin, M., Gundlach, J., and Poelenjee, R. (2022). Nationaal water programma 2022-2027. https://iplo.nl/publish/pages/198509/nationaal-water-programma-2022-2027_1.pdf.
- [Duivendijk, 2024] Duivendijk, J. v. (2024). Fighting against the current. <https://research.tudelft.nl/en/publications/fighting-against-the-current-restoring-dike-breaches-and-closing->.
- [Förster, 2011] Förster, U. (2011). Kpp meerlaagsveiligheid: Emergency response: Inventarisatie van wereldwijd beschikbare snelle reparatietechnieken en/of noodmaatregelen bij dijkbressen. https://vweb002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/images/0/03/Snelle_reparatietechnieken_bij_dijkbressen.pdf.
- [Hoogspanningsnet, 2024] Hoogspanningsnet (2024). Betonmast. <https://www.hoogspanningsnet.com/techniek/betonmast/>.
- [Janssen et al., 2024] Janssen, D., Jonkman, S., Schmets, A., Hofland, B., and Dado, E. (2024). Bresdefender an experimental study on an emergency response measure for levee breaches. https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/189516766/Thesis_BresDefender_Janssen.pdf.
- [Janssen et al., 2021] Janssen, D., Schmets, A., Hofland, B., Dado, E., and Jonkman, S. (2021). Bresdefender: Emergency measures for dike breaches applying military resources. <https://repositorium.omikk.bme.hu/server/api/core/bitstreams/fd32f17a-0ffc-4299-b086-0db90ea0a04a/content>.
- [Jiao et al., 2022] Jiao, Jongwei and Liu, J., Shao, F., Xie, X., and Chen, X. (2022). Numerical and experimental investigation on longitudinal drift motion of a novel regular tetrahedron closure device in casting process. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447922000946>.
- [Joore, 2004] Joore, I. (2004). Noodsluiting van een dijkdoorbraak bij hoogwater. <https://www.google.com/url?sa=tsource=webrcr=jopi=89978449url=https://repository.tudelft.nl/islandora>
- [Knotter, 2013] Knotter, H. (2013). Calamiteitenbestrijdingsplan van waterschap rivierenland hoogwater op de rivier. https://vweb002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/images/a/a8/PB-CZH-001V4.1CBP_hoogwater_rivier.pdf.
- [Laurens, 2024] Laurens, D. (2024). 105 genie wb inzet maastricht powepoint.
- [Mallet et al., 2018] Mallet, T., Dast, C., Requi, M., Chardes, S., Castagnet, A., and Fry, J. J. (2018). Études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux dans le delta du rhône. https://digues2019.inrae.fr/wp-content/uploads/2019/11/S6_Digues2019_05_2Mo.pdf.
- [Masolle et al., 2018] Masolle, C., Lankenau, L., and Koppe, B. (2018). Emergency flood control: Practice-oriented test series for the use of sandbag replacement systems. https://www.researchgate.net/publication/329649283_Emergency_Flood_Control_Practice_-_Oriented_Test_Series_for_the_Use_of_Sandbag_Replacement_Systems.

- [Mitchell, 2019] Mitchell, E. (2019). Chinook is en route to deliver raft for wet gap crossing exercise during saber guardian 19 [image 5 of 5]. <https://www.dvidshub.net/image/5518031/chinook-en-route-deliver-raft-wet-gap-crossing-exercise-during-saber-guardian-19>.
- [Moore et al., 2014] Moore, A., Bramley, M., Sandham, R., Thomas, R., and Hold, S. (2014). The international levee handbook. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/2-the-international-levee-handbook_tcm30-518061.pdf.
- [NLSG, 2024] NLSG (2024). National levee safety guidelines. https://mmc.sec.usace.army.mil/NLSP_wbsite/NLSGPublicDraft/NationalLeveeSafetyGuidelinesDraft.
- [Noodmaatregelen, 2024] Noodmaatregelen, W. (2024). Wiki noodmaatregelen. <https://www.wikinoodmaatregelen.nl/noodmaatregelen/stabiliteitsverhogend>.
- [of the River Gods, 2001] of the River Gods, R. (2001). Directed by peter george, christopher mccullough. australia: Southern star entertainment pty limited and china. television program agency, broadcasted on national geographic channel.
- [PembinaValley, 2011] PembinaValley (2011). Dike breach along highway 331 being closed. <https://www.peminavalleyonline.com/articles/dike-breach-along-highway-331-being-closed>.
- [PileBuck, 2023] PileBuck (2023). Thoughts on vinyl sheet piling. <https://pilebuck.com/thoughts-vinyl-sheet-piling/>.
- [Resio and Boc, 2011] Resio, D. and Boc, S. (2011). U.s. army engineer research and development center: Rapid repair of levee breaches, oak ridge, united states of america: Oak ridge national laboratory. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA556646.pdf>.
- [Rijkswaterstaat, 2023a] Rijkswaterstaat (2023a). Dammen, sluisen en stuwen. <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/dammen-sluisen-en-stuwen>.
- [Rijkswaterstaat, 2023b] Rijkswaterstaat (2023b). Waterkeringen. <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen>.
- [Rockbags, 2024] Rockbags, B. (2024). Filter unit rockbags provide ideal scour protection solution. <https://rockbags.com/filter-unit-rockbags-provide-ideal-scour-protection-solution/>.
- [Schmidt, 2014] Schmidt, K. (2014). Einsatztaktik für die feuerwehr hinweise zum einsatz von sandsäcken bei hochwasser. https://web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/images/8/84/Hinweise_sandsackverbau.pdf.
- [Schmitz et al., 2021] Schmitz, V., Erpicum, S., Abderrezzak, K. E. k., Rifai, I., Archambeau, P., Pirrotton, M., and Dewals, B. (2021). Overtopping-induced failure of non-cohesive homogeneous fluvial dikes: Effect of dike geometry on breach discharge and widening. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2021WR029660>.
- [Solines, 2024] Solines (2024). Dikwandige stalen buizen. <https://www.solines.nl/dikwandige-stalen-buizen/>.

- [STOWA and PIW, 2018] STOWA and PIW (2018). Handboek dijkbewaking waarnemen 2018. https://www.wikinoodmaatregelen.nl/sites/default/files/2023-08/Handboek_dijkbewaking_metal.pdf.
- [Taylor, 2016] Taylor, A. (2016). 'sand sausages' protect dunedin from coastal erosion. <https://www.newshub.co.nz/home/new-zealand/2016/06/sand-sausages-protect-dunedin-from-coastal-erosion.html>.
- [Trapbag, 2021] Trapbag (2021). How levee systems work during rapid flooding. <https://trapbag.com/levee-systems-rapid-flooding/>.
- [Van den Berg, 2024] Van den Berg, M. (2024). Data underlying the publication: Assessment of in-situ tidal marsh erodibility under high flow velocities. <https://data.4tu.nl/datasets/8dfca93b-ffff-4e1d-b2e3-fe980716c658/1>.
- [Van Gerven, 2004] Van Gerven, K. (2004). Dijkdoorbraken in nederland. ontstaan, voorkomen en bestrijden. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:0b08aa7c-86f0-4de6-bc4c-2be83a88635d/|/datastream/OBJ/download>.
- [Verma et al., 2023] Verma, D., Berwal, P., Gupta, N., M. Alfasal, F., Khan, M. A., Alam, S., and Qadri, J. (2023). Experimental investigation of breach mechanism for overtopped cohesive and non-cohesive embankments. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/17/3030>.
- [Wallace et al., 2024] Wallace, T., Crawford-Flett, K., Wilson, M., and Logan, T. (2024). A framework for modelling the probability of flooding under levee breaching. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jfr3.12988>.
- [Willemsen, 2023] Willemsen, P. (2023). Bijdrage van kweldervegetatie aan het waterkerings-systeem. <https://publications.deltares.nl/112051320020010.pdf>.
- [Zhang and Balakrishnan, 2021] Zhang, Z. and Balakrishnan, S. (2021). Multi-criteria decision analysis. <https://research.tudelft.nl/en/publications/multi-criteria-decision-analysis>.

10 Bijlage

In de bijlages staat informatie die bijdraagt aan het begrip van de tekst, maar niet essentieel is voor de lezer. Naar de bijlage is gerefereerd in het verslag.

10.1 Interview Format

In deze bijlage is het format van het interview met de experts en deskundigen te zien.

1. Beoordelingsfactoren voor noodmaatregelen:

-Vindt u de in het theoretische onderzoek geïdentificeerde beoordelingsfactoren belangrijk bij het beoordelen van noodmaatregelen?

-Ontbreken er kritische factoren die volgens u in het onderzoek moeten worden opgenomen? En waarom is dit een goede aanvulling?

-Hoe zou u de kritische factoren rangschikken in termen van belang voor de besluitvorming tijdens noodsituaties?

2. Effectieve noodmaatregelen:

-Bespreek de reeds geïdentificeerde noodmaatregelen. Vindt u de genoemde noodmaatregelen effectief toepasbaar en realistisch in situaties vergelijkbaar met die in ons onderzoek (regionale waterkeringen, primaire waterkeringen vroeg stadium)?

-Zijn er aanvullende noodmaatregelen die u zou willen voorstellen om op te nemen in het onderzoek? En waarom zijn deze volgens u nodig voor het project, naast de reeds toegelichte noodmaatregelen?

-Hoe zou u de noodmaatregelen rangschikken in termen van prioriteit voor implementatie in het beslissingsmodel?

3. handelingsperspectief voor noodmaatregelen:

-Wat hebben besluitvormers nodig in een definitief handelingsperspectief voor noodmaatregelen?

-Hoe ziet u het handelingsperspectief? Welke functies of componenten zijn essentieel om effectief de juiste noodmaatregel toe te passen?

-Wat vindt u van de in het literatuuronderzoek gevonden handelingsperspectief opties?

10.2 Expert interview personen

In deze bijlage staat een achtergrond met de experts waarmee een interview is af genomen.

10.2.1 Expert 1

Het eerste gesprek wat heeft plaats gevonden was met Ulrich Förster. Ulrich Förster is onderzoeker bij Deltares, een onafhankelijk instituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Bij Deltares is Förster gespecialiseerd in de stabiliteit en het beheer van dijken, waarbij de nadruk ligt op innovatieve oplossingen voor dijkversterking. Zijn werk zorgt ervoor dat deze innovaties niet alleen technische uitdagingen aanpakken, maar ook praktische en haalbare oplossingen integreren voor waterschappen die dijk systemen beheer. Ulrich Förster is daarmee een expert en specialist op het gebied van dijk technologieën en is al vele jaren actief in dit gebied. Verder werkt Ulrich ook al vele jaren (14) aan de Wiki noodmaatregelen website, de website waarop het beoogde handelingsperspectief van dit onderzoek wordt geplaatst.

10.2.2 Expert 2

Het tweede expertinterview was met Wijnand Evers, die na zijn opleiding 17 jaar in de civiele weg- en waterbouw werkte, waarvan een deel als hoofd en projectleider. Sinds 2000 is hij waterkeringbeheerder bij Waterschap Overige Delta. Zijn taken omvatten dagelijks beheer en onderhoud van dijken, inclusief inspecties en vervolgacties bij hoogwater. Wijnand Evers werkt samen met collega's aan inspecties, onderhoud, herstelwerkzaamheden en noodmaatregelen. Hij begeleidt ook de opleiding van dijkwachters en is betrokken bij verschillende kennisgroepen, waaronder het CTW, het kiezers expertteam wateren, PW, WIKI, en internationale teams zoals ITAS. Hij heeft internationale ervaring opgedaan tijdens hoogwaters in Engeland, Amerika, Duitsland, Frankrijk en België.

10.2.3 Expert 3

Het derde interview was met Arjan Krikke die sinds 2003 werkt bij waterschap rivierenland in verschillende functies met waterkeringen. Sinds 2021 coördineert Arjan de dijkbewaking van dit waterschap. Daarbij is hij ook als adviseur betrokken bij het assetmanagement van Waterschap Rivierenland, bij de dijkversterkingen en landelijk overleg. Daarvoor was Arjan al jaren wachtcommandant bij dit waterschap.

10.2.4 Expert 4

Het vierde interview is gehouden met Johannes (Hans) van Duivendijk, geboren op 30 oktober 1934. In 1952 begon hij zijn studie in Delft aan de Technische Hogeschool, Afdeling der Weg- en Waterbouwkunde. Tijdens zijn studie werkte hij als stagiair in Nederland aan getijdenafsluitingen na de stormvloed van 1953, en in Oostenrijk en Canada op waterkrachtbouwlocaties. Deze stages beïnvloedden zijn carrière en proefschrift, waarmee hij in 1958 afstudeerde als burgerlijk ingenieur. Na zijn militaire dienst in 1960 werkte Van Duivendijk tot zijn pensioen in 1999 bij ingenieursbureau Haskoning, vooral aan waterbouwprojecten in meer dan twintig landen. Hij werkte aan stroomgebiedontwikkeling, zeekeringen, havens en rivierafsluitingen, en leidde grote onderzoeksteams in Indonesië, Marokko en Bangladesh. Zijn expertise leidde tot vele publicaties en lidmaatschappen in internationale technische commissies. Na zijn pensioen doceerde hij 23 jaar aan de TU Delft en werd in 2010 benoemd tot Ridder in de Orde van Oranje Nassau.