

Quickscan Lijnvormige Kerende Elementen

**Onderzoek naar de modellering van bresgroei en
standzekerheid van Lijnvormige Kerende Elementen
Waterschap Rijn en IJssel**

20 oktober 2021

Contactpersoon



RIMMER KOOPMANS

Projectleider

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland

Inhoudsopgave

1	Introductie	4
1.1	Aanleiding project	4
1.2	Doel van het rapport	4
1.3	Vraagstelling opdrachtgever	4
1.4	Uitgangspunten en werkwijze	5
1.5	Referenties	6
1.6	Leeswijzer	7
2	Bresvorming	8
2.1	Bresinitiatie	8
2.2	Bresgroei	9
3	Analyse modellering bresgroei	10
3.1	Werkwijze modelleren van overstromingen	10
3.2	Bresgroei	10
3.3	Bresgroei in D-Hydro	12
3.4	Bresgroei in D-Hydro	19
3.5	Ontwikkelingen in bresgroei modellering	21
3.6	Discussie	24
4	Analyse standzekerheid lijnvormige kerende elementen	26
4.1	Introductie	26
4.2	Casus 1: Oude Rijngebied	28
4.3	Casus 2: Stroomkanaal van Hackfort	32
4.4	Casus 3: Schipbeek	34
4.5	Discussie	37
5	Conclusies en aanbevelingen	39
5.1	Conclusies	39
5.2	Aanbevelingen	48
	Colofon	49

1 Introductie

1.1 Aanleiding project

Waterschap Rijn en IJssel heeft in 2018 het bronhouderschap voor overstromingsinformatie overgenomen van de Provincie Gelderland. Dat betekent dat het waterschap nu nieuwe overstromingsmodellen heeft en gaat opstellen in D-HYDRO om een groot aantal overstromingsscenario's te bepalen. In het model worden aannames gedaan voor het moment van ontstaan van een bres, de bresgroeisnelheid (op de vooraf opgelegde breslocaties) en worden met een beheerdersoordeel aannames gedaan over de standzekerheid van lijnvormige kerende elementen (dijkjes, wegen, etc.) in het achterland, die de overstroming vertragen of tegenhouden. Voor het Waterschap Rivierenland geldt dat zij op hoofdlijnen dezelfde achtergrond en vragen hebben. Daarom is deze studie uitgevoerd onder medebegeleiding en financiering van het Waterschap Rivierenland.

Volgens de opdrachtgever zijn deze aannames op sommige situaties, zoals ter hoogte van het Oude Rijn-gebied of langs het Stroomkanaal van Hackfort, erg bepalend voor de berekende overstromingsomvang. Voor lijnvormige kerende elementen in het achterland wordt vaak aangenomen dat deze niet bezwijken. Het is echter onzeker of deze aanname tegenwoordig nog van toepassing is of dat er op basis van nieuwere informatie een andere aanname gedaan kan worden.

1.2 Doel van het rapport

Dit rapport beschrijft de werkzaamheden en resultaten van een onderzoek dat het Waterschap Rijn en IJssel ondersteunt met hun aannames op het gebied van overstromingssimulaties. Meer specifiek is gekeken naar twee onderdelen van een overstromingssimulatie met een relatief grote onzekerheid. Het vermoeden is dat op basis van recente inzichten en modellen betere aannames gedaan kunnen worden die deze onzekerheid verkleinen.

Het eerste onderwerp in dit rapport richt zich op de formulering van **bresgroei**. In het D-HYDRO model, dat op het moment gebruikt wordt door het Waterschap Rijn en IJssel, wordt hiervoor gebruik gemaakt van een breed toepasbare, maar relatief eenvoudige Verheij-van der Knaap formule. In dit rapport onderzoeken we de nieuwe ontwikkelingen op dit vlak en worden extra aannames en uitgangspunten geformuleerd voor het simuleren van bresgroei in D-HYDRO, wanneer meer detail gewenst is.

Hiernaast zijn ook de aannames rond **standzekerheid van lijnvormige, kerende element** onderzocht en getest. Hierbij wordt op het moment uitgegaan van de aannames zoals genoemd in het Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties. Echter, in het gebied van Waterschap Rijn en IJssel zijn enkele situaties van toepassing waarbij dergelijke elementen een relatief grote impact hebben op het overstromingsrisico van de omgeving. Om deze reden zullen voor een aantal representatieve situaties de stabiliteit en standzekerheid verder onderzocht worden, met als doel de aannames hiervoor te controleren en waar nodig te verbeteren.

1.3 Vraagstelling opdrachtgever

Het Waterschap Rijn en IJssel heeft enkele vragen geformuleerd met betrekking tot de simulatie van bresgroei binnen D-Hydro en de standzekerheid van lijnvormige, kerende elementen.

Bresgroei

Welke formule/parameters kan het waterschap het beste gebruiken om de bresgroei in D-Hydro op vooraf in het overstromingsmodel opgelegde breslocaties in lijnvormige kerende elementen te bepalen?

- Voldoet de Verheij-Van der Knaap formulering? De in te voeren waterhoogte is afhankelijk van de locatie tot de bres. Deze afweging valt buiten de scope van dit onderzoek.
- Welke parameter waarden kunnen het best gebruikt worden?
- Zijn er “betere” bresgroeimodellen beschikbaar? Welke en hoe werken deze? Welke input-parameters zijn noodzakelijk? Is het model complex of is veel input vereist?
- Is een uitspraak mogelijk of meerdere bressen in een dijk of lijnvormige elementen tijdens één hoogwater kunnen ontstaan?
- Beïnvloedt een stroomkuil (wiel) het bresdebiet/bresgroei? Wielen ontstaan in het geval dunne deklagen aanwezig zijn.

Standzekerheid lijnvormige kerende elementen

Welke aannames in het overstromingsmodel zijn realistisch voor de standzekerheid van kerende lijnvormige elementen in het overstroombare achterland?

- Is de aanname van standzekerheid correct, zoals genoemd in “Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties”, d.d. 17 mei 2017, kenmerk 11200537-007-ZWS-004?
- Zo nee, welke hydraulische belasting leidt tot bezwijken?
- Wat is de invloed van specifieke objecten, zoals een verharding (asfalt) en (funderingen van) geluidschermen op deze lijnvormige elementen?
- Welke informatie over het kerende lijnvormige element is hiervoor nodig?
- Hoe kan dit (in theorie) in D-Hydro worden opgenomen?

Deze vragen zijn in de conclusies specifiek benoemd en beantwoord. Verdere onderbouwing is terug te vinden in Hoofdstuk 3 en 4, met name de discussie gedeeltes in beide hoofdstukken.

1.4 Uitgangspunten en werkwijze

In de huidige manier van werken worden overstromingssimulaties opgezet volgens de uitgangspunten en aannames zoals beschreven in de Leidraad tot het maken van overstromingssimulaties. Bij het Waterschap Rijn en IJssel wordt hierbij gebruik gemaakt van het D-HYDRO model, ontwikkeld door Deltares. In dit onderzoek wordt deze werkwijze als startpunt gezien. Enige locatie specifieke aanpassingen die eerder al zijn toegepast ten aanzien van het werkgebied van Waterschap Rijn en IJssel zijn hierbij niet meegenomen.

Het onderzoek naar bresgroei en standzekerheid van lijnvormige, kerende elementen is uitgevoerd op drie manieren: door middel van een literatuurstudie, simulaties van representatieve casussen, een expertsessie en een uitgebreide review van de concept-rapportage door een tweetal experts op het gebied van bresvorming: Myron van Damme (Rijkswaterstaat) en Patrik Peeters (Waterloopkundig Laboratorium Vlaanderen).

De literatuurstudie heeft zich vooral gericht op de beschrijving van bresvorming (bresinitiatie en bresgroei) en ontwikkelingen van bresgroeimodellen. Een actualisering van de beschikbare kennis rond bresgroei en de manieren waarom dit gemodelleerd wordt zal meer licht werpen op de huidige methodes in D-HYDRO en eventuele manieren waarop dit verbeterd kan worden. In mindere mate zullen ook nieuwe ontwikkelingen op het gebied van standzekerheid onderzocht worden.

De invloed van aannames rond de standzekerheid van lijnvormige kerende elementen zijn vooralsnog onderzocht aan de hand van drie casussen die representatief zijn voor de meest invloedrijke situaties:

- Primaire waterkering/dijken rondom het Oude Rijn-gebied;
- Regionale keringen langs het Stroomkanaal van Hackfort;
- Kaden langs de Schipbeek, Berkel en Baakse Beek.

Deze casussen zijn nader onderzocht door middel van een stabiliteitsberekening met D Geo-Stability, een piping-berekening aan de hand van gangbare rekenregels (Bligh) en een bresgroei-simulatie met het BRAM-model [D 7]. Dit model is ontwikkeld aan de TU Delft om de verschillende stappen van bresvorming beter te benaderen. Het model geeft zowel een indicatie van de tijd die nodig is om de gras- en kleibekleding te eroderen (bresinitiatie) inclusief de bresgroei die hierna begint. Het is specifiek ontwikkeld voor zanddijken met een kleibekleding en grasmat. Het model kon zonder aanpassing worden toegepast omdat de genoemde casussen/keringen uit een zandkern bestaan.

De resultaten van de literatuurstudie en de casussen zijn besproken met enkele experts (Myron van Damme – Rijkswaterstaat en Patrik Peeters (Departement Mobiliteit en Openbare Werken Vlaanderen) op het gebied van bresgroei. De bevindingen van beiden zijn meegenomen in de eindrapportage.

1.5 Referenties

- [D 1] Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties
- [D 2] Verheij, 2003. Aanpassen van het bresgroeimodel in HIS-OM
- [D 3] Visser, 1998. Breach erosion process
- [D 4] Zhu, 2006. Breach growth process in clay-dikes
- [D 5] Van Damme, M. 2020. An analytical process-based approach to predicting breach width in levees constructed from dilatant soils.
- [D 6] Prinsen, G., Hutten, R., Verhoeven, G. 2020. Modelling dijkkring 48 met D-HYDRO. Deltares
- [D 7] Verbeek, B. 2019. Modelling dike breach formation due to head-cut erosion.
- [D 8] Morris, 2009. Breaching Process, a state-of-the-art review.
- [D 9] Morris, 2011. Breaching of earth embankments and dams. HR Wallingford
- [D 10] West, M. Morris, M. Hassan, M. 2018. A Guide to Breach prediction. HR Wallingford
- [D 11] Van Rhee, C. 2010. Sediment Entrainment at High Flow Velocities.
- [D 12] Bisschop, R. 2018. Erosion of sand at high flow velocities. An experimental study. TU Delft
- [D 13] D'Eliso, C. 2007. Breaching of sea dikes initiated by wave overtopping. TU Delft
- [D 14] Winterwerp, J.C., van Kesteren W.G.M. 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment.
- [D 15] Koopmans, R., Kuipers, J.J. 2006. Regionale waterkeringen Waterschap Rijn en IJssel. Geotechnisch onderzoek en pilot toetsing Oude Rijngebied en Stroomkanaal van Hackfort
- [D 16] De Groot, J., Koopmans, R. 2014. Kadverbetering Stroomkanaal van Hackfort Geotechnisch onderzoek. Arcadis Nederland.
- [D 17] De Groot, J. 2016. Stabiliteitsonderzoek niet genormeerde waterkeringen. Arcadis.
- [D 18] Peeters, P., van Hoestenbergh, T., Vincke, L. and Visser, P. 2011. SWOT Analysis of breach models for common dike failure mechanisms.
- [D 19] Van Damme, 2019. Detachment of dilatant soil due to high hydraulic shear stresses explained.
- [D 20] Deltares, 2020, D-Flow Flexible Mesh, User Manual.

- [D 21] Peeters, P., van Looveren, R., Vincke, L. and Blanckaert, J. 2008. Analysis of Dike Breach Sensitivity using a Conceptual Method followed by a Comprehensive Statistical Approach to end up with Failure Properties.

Niet direct-geraadpleegde literatuur:

- [D 22] Rijkswaterstaat, 2021. Schematiseringshandleiding grasbekleding.
- [D 23] Whitehead, E., Bull, W. Schiele, M., 1976. A guide to the use of grass in hydraulic engineering practice. Technical report, HR Wallingford.
- [D 24] Temple, D.M., Robinson, K.M., Ahring, R.M., Davis, A.G., 1987. Stability design of grass-lined open channels. Technical report, USDA Agricultural handbook.
- [D 25] R.J.S. Whitehouse, R. Soulsby, W. Roberts, and H.J. Mitchener. 2000. Dynamics of Estuarine Muds—A Manual for Practical Applications.
- [D 26] B. C. Van Prooijen and J. C. Winterwerp. 2010. A stochastic formulation for erosion of cohesive sediments. Journal of Geophysics

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een korte beschrijving van het ontstaan (bresinitiatie) en groeien van een bres (bresgroei). In Hoofdstuk 3 is ingegaan op de modellering van bresgroei in D-Hydro, de randvoorwaarden en beperkingen van de Verheij-van der Knaap formuleringen en de nieuwe ontwikkelingen hierin. Hoofdstuk 4 geeft aan de hand van een drietal casussen een inschatting van de standzekerheid en de groei van een eventuele bres. Op basis van genoemde hoofdstuk is in Hoofdstuk 5 per deelvraag een antwoord geformuleerd.

2 Bresvorming

[D 18] geeft een goede beschrijving van de processen die een rol spelen bij bresvorming. Hierbij zijn twee fases onderscheiden:

- Bresinitiatie;
- Bresgroei.

Tabel 1 geeft een goede samenvatting van de relevante mechanismen die een rol spelen in beide fasen.

Tabel 1 - Beschrijving bresvorming [D 18]

BREACH INITIATION		→	BREACH GROWTH
Initial failure mechanism	Secondary failure mechanism(s)		
<ul style="list-style-type: none"> - Erosion of cover of inner slope - Erosion of embankment surface by overflow - Cap or Slip failure in dike slope - Sliding of cover/embankment - Seepage - Overflow/Overtopping - Toe erosion - Overturning/Rotation failure - <i>Initiation of piping: cracking of the covering layer and the creation of boils</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion of cover of inner slope - Erosion of embankment surface by overflow - Cap or Slip failure in dike slope - Sliding of cover/embankment - Seepage - Overflow/Overtopping - Toe erosion - Overturning/Rotation failure - <i>Pipe formation</i> 	→	<ul style="list-style-type: none"> - Overflow - Lowering of crest - Lateral growth - <i>Pipe growth</i>

2.1 Bresinitiatie

Bresvorming begint in het geval de kering en/of het grondlichaam bezwijkt of onderdelen daarvan falen en de kering zijn standzekerheid verliest: bresinitiatie. Mechanismen die tot bresinitiatie kunnen leiden zijn weergegeven in Tabel 1. Geotechnische mechanismen als macro-stabiliteit, afschuiven van bekleding en piping spelen hierbij een rol. Daarnaast spelen andere mechanismen een rol, zoals erosie van de grasbekleding en kleibekleding. Bresgroei begint als genoemde mechanismen leiden tot een verlaging van de kruin in combinatie met het bloot komen te liggen van het kernmateriaal. Bij een voldoende hoge waterstand zal dan water door een eerste geul/opening in de kruin over de kering gaan stromen. In deze rapportage wordt met “standzekerheid” bresinitiatie bedoeld. De term “standzekerheid” of beter verlies van standzekerheid is in deze rapportage gehanteerd omdat deze term ook in de Leidraad [D 1] wordt gebruikt. Hiermee wordt hetzelfde bedoeld als bresinitiatie.

De sterkte van de bekleding, de cohesie van een eventuele kleilaag en de algehele stabiliteit geven weerstand tegen de belasting van het water aan de buitenzijde. Dit geeft een grote onzekerheid t.a.v. de standzekerheid, aangezien deze eigenschappen ruimtelijk veel kunnen variëren, bijvoorbeeld door de impact van graverij. Door middel van stabiliteit- en/of piping berekeningen kan er een inschatting gemaakt worden welke faalmechanismes maatgevend zijn en bij welke belasting de bres zal ontstaan. Mocht piping of macrostabiliteit niet maatgevend zijn, dan kan de bres ook ontstaan als door overloop de grasbekleding en/of kleibekleding faalt of erodeert.

Deze mechanismen zullen tijdens een hoogwatersituatie niet direct optreden. Er zit een tijdseffect aan vast. In het geval van bijvoorbeeld macro-instabiliteit zal het enige tijd duren voordat de waterspanningen in de ondergrond en in de kering zelf zodanig zijn toegenomen dat de kering voldoende verzwakt is om te bezwijken. Hetzelfde speelt een rol bij piping, maar ook het bezwijken van een gras- en/of kleibekleding is tijdsafhankelijk. In het geval van overloop kan de gras- en/of kleibekleding eroderen, wat met een zekere erosiesnelheid gepaard gaat. In het geval van een goede grasbekleding – waar ook moet worden gekeken naar de aanwezigheid van gravende beesten – kan de benodigde tijd een erg grote invloed kunnen hebben op een eventuele overstroming.

2.2 Bresgroei

Bresgroei treedt op na bresinitiatie en bestaat uit het groeien van de bres in de diepte waarna deze in de breedte gaat groeien. Oppervlakte en head-cut erosie zijn hierbij de belangrijkste mechanismen die de snelheid van bresgroei bepalen. Bresgroei is meer gedetailleerd beschreven in Hoofdstuk 3. Er zijn verschillende modellen beschikbaar, waarmee de snelheid van bresgroei bepaald kan worden. In sommige gevallen zijn deze modellen ook uitgebreid met de mechanismen die aanleiding geven tot bresinitiatie, zoals de erosie van de gras- en kleibekleding.

3 Analyse modellering bresgroei

3.1 Werkwijze modelleren van overstromingen

Het simuleren van overstromingen kan voor allerlei doeleinden nodig zijn. Dit is terug te zien in de grote variatie van type modelleringen en gangbare modellen. De Leidraad tot het maken van overstromingssimulaties [D 1] benoemt daarom een algemeen stappenplan voor het opzetten en uitvoeren van overstromingssimulaties:

1. Bepaal het doel van het project en vertaal dit in eisen aan het model:
 - a. Welke informatie moet de simulatie opleveren? Maximale waterdieptes en stijgsnelheden voor bijvoorbeeld de ROR, of een schadeberekening of ook een tijdsverloop voor bijvoorbeeld crisismanagement?
 - b. Bepaal de aanpak en kies het modeltype;
2. Bepaal de door te rekenen overstromingsscenario's met behulp van een gebeurtenissenboom;
3. Verzamel de benodigde informatie;
4. Bouw de schematisatie;
5. Bereken de scenario's, controleer de uitkomsten en interpreteer deze;
6. Tenslotte worden de uitkomsten en de gegevens omtrent het modelleerproces, de metadata, keuzes en kwaliteitscontroles opgeslagen.

Deze methodiek pleit voor het gebruik van een gebeurtenissenboom, waarbij de aanloop tot een overstroming en de stappen van een overstroming gestructureerd weergegeven wordt. In het geval dat een overstroming plaatsvindt door een doorbraak van een grondlichaam en/of kering, zal het verloop van de overstroming sterk afhangen van de schematisatie van de standzekerheid van het grondlichaam en de vorm en groei van de bres.

3.2 Bresgroei

Het beschrijven van de ontwikkeling van het ontstaan en de ontwikkeling van een bres is complex vanwege de enorme variatie in de doorsnede, grondopbouw, bekledingsmaterialen en (neven-)functies van het grondlichaam, plus alle omgevingsfactoren zoals de hydraulische belasting, klimaat, en de aanwezigheid van objecten en dieren. Vooral nog is dit in D-Hydro analytisch benaderd door middel van een empirische formule: de Verheij-van der Knaap formule.

Het groeien van de bres betreft de tijd hierna, waarin een bres over de hele doorsnede is gevormd en verder lateraal groeit door het eroderen van het dijklichaam. Aangezien de grootste stroomsnelheden en debieten in deze fase bereikt worden, is de bresgroei-fase erg belangrijk voor het analyseren van het overstromingsrisico.

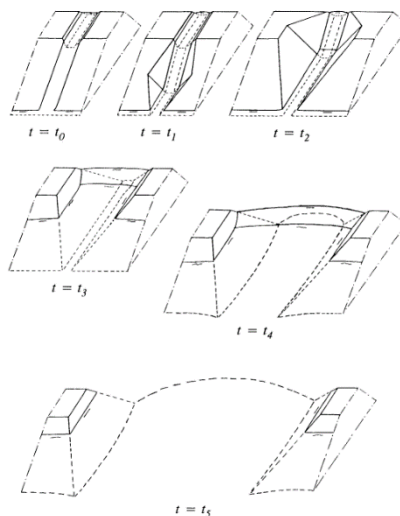
Vanaf het ontstaan van de eerste erosie tot aan het einde van de overstroming doorloopt de vorm van de bres en het type erosie een aantal fases. Deze worden gekenmerkt door verschillende fysische processen, welke in sommige gevallen lastig te schematiseren zijn. Hier zijn door de jaren heen veel verschillende modellen voor ontwikkeld, eerst voornamelijk schattingen op basis van historische data, later zijn modellen ontwikkeld die de fysische processen beter proberen te benaderen.

Een goede beschrijving van het groeien van een bres in een zanddijk is beschreven door Visser [D 3]. Voor een kleidijk kan uitgegaan worden van de beschrijving die opgesteld is door Zhu [D 4]. De kwaliteit van de grasbekleding en/of dikte en sterkte van de kleibekleding speelt hier dus (nog) geen rol. Recent is door Verbeek [D 7] een meer proces georiënteerd model ontwikkeld voor het bresgedrag van een zanddijk met een kleibekleding. Dit model neemt de invloed van de gras- en kleibekleding op het bresgedrag mee. Strikt genomen vallen deze mechanismen onder bresinitiatie. Omdat de aanwezigheid van een gras- en kleibekleding het bresgedrag beïnvloed en ook van invloed is op de totale tijdsduur van bresvorming, zijn deze in dit model meegenomen. Hiervoor is uitgegaan van bestaande empirische stand-tijdlijnen voor de sterkte van de grasmat en empirische modellen voor de erosiesnelheid van de kleibekleding.

3.2.1 Bresgroei zand- of kleikern

Na de bresinitiatie-fase en/of verlies van standzekerheid van de kering de bres in de diepte en daarna in de breedte. Het vormen en groeien van een bres in een grondlichaam kan over het algemeen worden verdeeld in vijf fases, zoals beschreven voor een zanddijk in Visser[D 3]:

1. De eerste fase ($t = t_0$) begint op het moment de kruin van een dijklichaam wordt aangetast en hierdoor water begint te stromen over het binnentalud. Hierbij erodeert grondmateriaal van het binnentalud van het grondlichaam. Door de versnelling en de impuls van het water zijn de belastingen bij de knik tussen het talud en het maaiveld het hoogst. Zonder noemenswaardige verzwakkingen langs het talud zal de erosie nabij de binnenteen het snelst eroderen waardoor de helling steiler wordt.
2. Door erosie vormen zich head-cuts, waarbij het water als een cascade over het binnentalud stroomt. Als het binnentalud bestaat uit niet cohesieve grond zorgen micro-instabiliteiten ervoor dat de head-cuts bezwijken zodat er een kritieke helling wordt bereikt ($t = t_1$). Tijdens deze fase schrijdt het binnentalud terug in de richting van het buitenwater. Dit heeft als gevolg dat de breedte van de kruin vermindert, totdat de gehele kruin weg is geërodeerd.
3. Zodra het buitentalud is bereikt ($t = t_2$), verlaagt praktisch de kruinhoogte van het grondlichaam ter plaatse van de bres. De bresgroei is voornamelijk in de diepte. Hierdoor wordt de overlaathoogte van de dijk verlaagd en stijgt het stromend volume. De stroomsnelheid neemt hierdoor toe waardoor ook de erosiesnelheid toeneemt. De zijkant van de bres erodeert ook waarbij erosie het dijklichaam ondergraaft totdat deze instabiel wordt. Hierdoor wordt de bres breder terwijl deze verdiept. In deze fase is het bresdebiet nog beperkt.
4. Deze fase van het proces begint op het moment dat het diepste punt van de bres is bereikt en de bres voornamelijk in de breedte groeit ($t = t_3$). Op dit moment is over de hele lengte van de bres (van buitentalud tot binnentalud) de grond is geërodeerd tot aan het diepste punt. Dit punt is afhankelijk van de grondopbouw en een eventuele erosiebestendige teenbescherming of kern. De stroom door de bres is een kritieke stroming door het gebrek aan waterniveau in de ontvangende polder. Erosie is voornamelijk lateraal. Hierbij houdt de zijkant van de bres een kritieke helling welke wordt bepaald door de geotechnische stabiliteit van de zijtaluds. In deze fase neemt het bresdebiet significant toe. Door het grote instromend volume stijgt het binnendijkse waterpeil.
5. Zodra het binnenwaterpeil zodanig is gestegen dat het instromend volume wordt beïnvloed en afzwakt tot sub-kritische stroming ($t = t_4$), neemt ook de snelheid van de erosie af. Deze houdt wel dezelfde richting als in de vierde fase (lateraal), waardoor de bres verder verbreed. Aan het einde van deze fase is de stroomsnelheid zodanig verlaagd dat er geen erosie meer plaatsvindt en de breedte van bres gelijk blijft ($t = t_5$). Het water blijft echter stromen totdat ofwel het buitenwaterniveau gelijk is aan het binnenwaterniveau of het buitenwater niveau is gedaald tot onder de bodem van de bres.



Figuur 1 - Schematische weergave van een bres op verschillende momenten van het bresgroeiproces. De momenten t_0 tot en met t_5 corresponderen met de uitleg hierboven.

Dit proces, uiteengezet door Visser [D 3], is generiek voor alle dijken zonder bekleding. Eén van de onzekerheden van het door Visser [D 3] ontwikkelde model betrof de beschrijving van het erosiegedrag van zand. Tijdens de ontwikkeling van het model bleek dat bestaande erosieformuleringen voor de beschrijving van het erosiegedrag van zand niet goed toepasbaar waren voor de beschrijving van het bresgedrag van een zanddijk. Bestaande empirische erosieformuleringen waren gebaseerd op stroomsnelheden tot 1 á 1,5 m/s, terwijl de werkelijke stroomsnelheden eerder richting 3 m/s en meer gaan. Recent zijn hiervoor nieuwe formuleringen ontwikkeld die ook bij deze hoge stroomsnelheden van toepassing zijn van Rhee [D 11], Bisschop [D 12], en Van Damme [D 19]. Deze nieuwe ontwikkelingen hebben tot een verbetering geleid van de beschrijving van het erosiegedrag bij hogere stroomsnelheden. Eén van de fysische processen de genoemde modellen gemeen hebben, betreft het meenemen van het dilatatie gedrag van zand. Dit zorgt ervoor dat niet alleen de korrelgrootte een rol speelt bij erosie, maar ook de doorlatendheid en relatieve dichtheid van het zand.

In 2006 is er specifiek gekeken naar dit proces voor kleidijken door Zhu [D 4]. In grote lijnen volgt de bres dezelfde fases, al kan er een groot verschil zijn in de vorm van het erosieproces. Waar dit voor zanddijken vaker het gevolg is van een overschrijding van de schuifspanningen – oppervlakte-erosie ('flow shear erosion') – groeit een bres in een kleidijk vooral door het afbreken van grote stukken grond als gevolg van lokale stuwdrukken ('slope mass failure'). Dit is een gevolg van de cohesie van klei, dat het beter bestand maakt tegen erosie door schuifspanning. Schuifspanning zijn op een microschaal voor te stellen als een afwisseling van duw- en trekspanningen, en cohesie vergroot het vermogen van de grond om deze krachten te weerstaan. Water dat van de kruin stroomt oefent door middel van impuls een extra kracht uit op oneffenheden langsheen het talud – en schuurt dit punt extra uit ('jet scour'). Eens vorming van een klif treedt terug schrijdende kliferosie op, aangevuld met stapsgewijze ondermijning van deze klif. In vergelijking met bresgroei in zanddijken is dit een veel onregelmatiger proces, wat moeilijker te beschrijven en modelleren is.

3.3 Bresgroei in D-Hydro

Als we het hebben over het modelleren van de bresgroei, dan betekent dat praktisch het benaderen van het verloop van de vorm en grootte van een bres over de tijd. Deze benadering kan bijvoorbeeld gedaan worden door de bresgroei toename te voorspellen als functie van de stroomsnelheid of het verval over de bres. In D-Hydro wordt dit geschematiseerd met behulp van de Verheij-Van der Knaap formule [D 2].¹ Dit is een eenvoudig bresgroeimodel gebaseerd op het verval over de bres, dat rekening houdt met materiaaleigenschappen van de dijk (klei of zand). Hierin is het proces van bresgroei vereenvoudigd naar drie fases:

- De nul-fase, wat duidt op ontstaan van de bres;
- De verdiepingfase, waarin de initiële geul zich voornamelijk verdiept tot een bepaald niveau;
- De verbredingsfase, waarin de bres niet meer in diepte groeit, maar uitsluitend in de breedte.

De hier gedefinieerde nul-fase kan vergeleken worden met bresinitiatie. Hoelang deze fase duurt is vooral afhankelijk van de ondergrond onder de kering, kern- en bekledingsmateriaal en de afmetingen in het dwarsprofiel van de kering. De invloed van het type dijk materiaal wordt op een eenvoudige wijze meegenomen in de kritieke stroomsnelheid of twee empirisch bepaalde, grondafhankelijke constanten (1,3 en 0,04 in de formule hieronder). Overigens wordt deze nul-fase niet meegenomen in de Verheij-van der Knaap formule. Deze is gebaseerd op eindbreedtes en bijbehorende tijdsduur. Als beginpunt wordt hierbij vaak het moment van falen gekozen, waardoor de laatste twee fases impliciet meegenomen worden.

¹ Overigens geeft de handleiding van D-Hydro [D 20] aan dat voor de modellering van de bresgroei in de breedte in D-Hydro 3 keuzes zijn:

1. Verheij-van der Knaap formule (2002);
2. van der Knaap formule (2000);
3. een gecreëerde tijd-serie van de bresbreedte.

De Verheij-van der Knaap formule is het meest recent ontwikkelde model en geeft meer mogelijkheden verschillende materiaalsoorten van het kernmateriaal mee te nemen. Bij de van der Knaap formule is alleen onderscheid te maken tussen klei en zand en is uitgegaan van een vaste maximale bresbreedte voor klei en zand. Keuze 3 maakt het mogelijk op basis van andere formules een bresbreedtegroei in te voeren.

Bij het berekenen van een instroom als gevolg van een bres, is de verbredingsfase het meest belangrijk, aangezien het instromend volume in de andere twee fases beperkt is. Als er vervolgens wordt gekeken naar welke variabelen de grootste invloed hebben op de instroom in deze situatie, dan zijn dat het waterstandsverschil op het moment dat de bresgroei begint en de kritische stroomsnelheid. Om deze reden is er een formule ontwikkeld en gevalideerd om de breedte van een bres over de tijd te benaderen met:

$$B = 1,3 \frac{g^{0,5} H^{1,5}}{u_c} \log \left(1 + \frac{0,04 \cdot g}{u_c} t \right)$$

Waarin:

B	= bresbreedte (m)
g	= valversnelling (m^2/s)
H	= waterstandsverschil over de bres (m)
u_c	= kritieke stroomsnelheid (m/s)
t	= tijd (s)

Deze formule is een combinatie van twee formules voor een zanddijk en een kleidijk, waarbij de eerste constante (1,3) een gemiddelde is van een waarde specifiek voor zanddijken (1,2) en kleidijken (1,4 á 1,8). Deze formule is de basis voor het algoritme voor bresgroei in gangbare overstromingsmodellen zoals SOBEK.

De waarden van de coëfficiënten in de Verheij-van der Knaap formulering zijn empirisch bepaald aan de hand van een beperkt aantal bronnen en enkele tientallen referentiewaardes voor de bresbreedte, grondsoort, en waterstanden. Deze bronnen zijn verder uitgelegd in [D 2]. Hierbij zijn veel meer referenties beschikbaar voor zanddijken dan voor kleidijken. Ook is informatie over het verloop van de breedte van de bres over de tijd erg beperkt. Het model is empirisch afgeleid op basis van gemeten/ingeschatte eindbreedtes van bressen en het moment waarop deze eindbreedte is bereikt.

De invloed van de grootte van de achterliggende polder is niet expliciet meegenomen, terwijl deze de eindbreedte sterkt zal beïnvloeden. In plaats daarvan zit deze invloed impliciet verwerkt in de gemeten waardes waarop de formule is gefit. Een kleine polder veroorzaakt dat het waterpeil in de polder snel stijgt en het waterstandsverschil over de bres snel afneemt en daarmee de bresgroei sneller vertraagt dan bij een grotere polder. Door deze beperkte achtergrondinformatie kan er geen rekening gehouden worden met locatie-specifieke invloeden (zoals grootte van achterliggende polder, maximale lengte dijklichaam) die een groot effect kunnen hebben op de snelheid van de bresgroei en de uiteindelijke bresbreedte. Overigens wordt in D-Hydro wel gerekend met een tijdsafhankelijk waterstandsverschil over de bres. De empirische Verheij-Van der Knaap formule is niet op deze wijze empirisch afgeleid. Door dit wel in D-Hydro mee te nemen, kan dit leiden tot afwijkingen.

De invloed van de tijdsduur van bresinitiatie is impliciet meegenomen in de Verheij-van der Knaap formulering omdat deze gebaseerd is op de uiteindelijke bereikte bresbreedte en tijdsduur waarop deze breedte is bereikt. Dit geeft wel een extra onzekerheid omdat verschillende mechanismen voor bresinitiatie niet hetzelfde tijdsverloop zullen hebben. Hierdoor zal naar alle waarschijnlijk in het geval van overloop de erosie van een goede gras- en/of kleibekleding onderschat worden. De extra remmende werking hiervan komt niet tot uiting in de Verheij-van der Knaap formulering, terwijl deze fase 1 tot 30 uur in beslag kan nemen.

3.3.1 Snelheid bresgroei volgens Verheij-van der Knaap

In de Verheij-van der Knaap formule zit ook een tijdselement. Dit betekent dat het niet alleen een inschatting kan maken van de uiteindelijke bresbreedte, maar ook van het verloop van de breedte over de tijd. De formule is geijkt op dezelfde data, dat in veel gevallen waarnemingen en metingen achteraf betreft. In deze gevallen is de snelheid van bresgroei niet of nauwelijks vast te stellen. Het gevolg is dat het verloop van de bresbreedte over de tijd minder goed gevalideerd is en daardoor meer onzeker is. Onlangs zijn er een aantal nieuwe tests gedaan en bresgroei-relaties ontwikkeld die nieuw inzicht kunnen bieden over de evolutie van de snelheid van bresgroei in de tijd en in welke mate de Verheij-Van der Knaap formule dit goed benaderd. Hierbij zullen we eerst dieper ingaan op deze formule en de achterliggende data zelf. Hierbij is het wel belangrijk om op te merken dat dit voornamelijk gaat over de verbredingsfase (fase 4 en 5 uit hoofdstuk 3.3), aangezien de nul fase niet wordt meegenomen en de verdiepfingsfase volgens Verheij-van der Knaap relatief erg kort is. Een inschatting voor de tijdsduur van de verdiepfingsfase is volgens

Verheij [D 2] “in de orde van minuten bij zand tot waarschijnlijk maximaal een uur bij klei”. Dit impliceert de afwezigheid van vegetatie op zowel klei als zand en een afdeklaag op het zand.

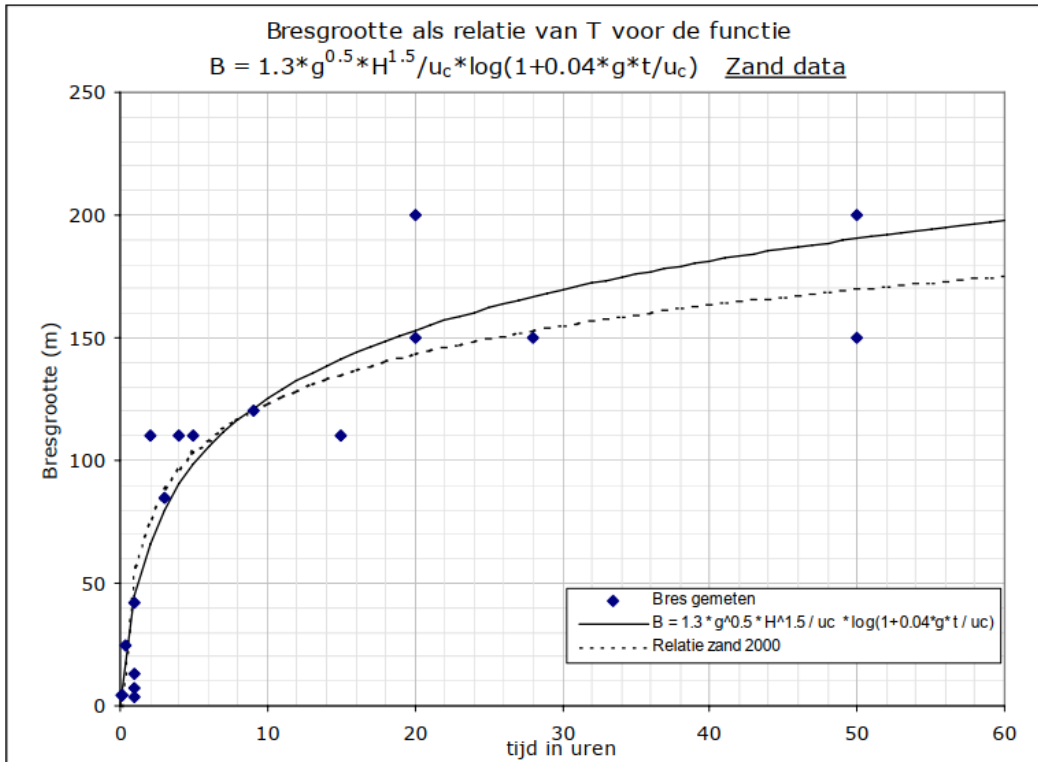
De formule en de validatie met historische data is één van de hoofdpunten in een in 2003 uitgekomen rapport van Verheij zelf [D 2]. Hierin wordt meer informatie gegeven over de gebruikte datasets en het soort data dat er gegeven is. In Figuur 2 en Figuur 3 wordt het verloop van de formule over de tijd afgezet tegen een aantal historische gemeten bressen voor zand- respectievelijk kleidijken. Belangrijk om aan te merken is dat voor deze punten geen verloop over de tijd bekend is. Ieder meetpunt is het eindpunt van een bres bij een zekere eindtijd waarop deze bresgrootte is bereikt. De bresgrootte zal nog redelijk in te schatten zijn geweest op basis van historische data. Voor de eindtijd zal dit een stuk minder nauwkeurig zijn geweest.

De lijn is de weergave van hoe een schatting van de eindbresbreedte volgens de Verheij-van der Knaap formulering evolueert aan de hand van de tijdsduur, maar is niet gegrond op metingen van het verloop. Dit verloop is dus een aanname, wat de toepasbaarheid in gedetailleerde analyses verkleint. De onderliggende data laten wel zien dat per bron een indicatie van een grondafhankelijke constante (t_0) is gegeven, die invloed heeft op de bresgroeisnelheid. Deze constante t_0 maakte deel uit van oudere versies van de Verheij-van der Knaap formulering en heeft een indirecte link met grondeigenschappen zoals de kritieke stroomsnelheid, u_c . Deze snelheid – gemeten in m/s – is een parameter gebaseerd op het dijkmateriaal, wat de mate van erodeerbaarheid karakteriseert, zie Tabel 2. De basis en betrouwbaarheid van de schatting van t_0 is zeer onzeker, ook gezien de aard van de variabele t_0 (een grondafhankelijke constante voor het schatten van bresgroeisnelheid) en het feit dat de data vaak decennia- of eeuwenoud is. De verwachting is dat de waardes van t_0 op zeer weinig informatie gebaseerd zijn en er dus een grote onzekerheid is in het echte verloop van de bres over tijd.

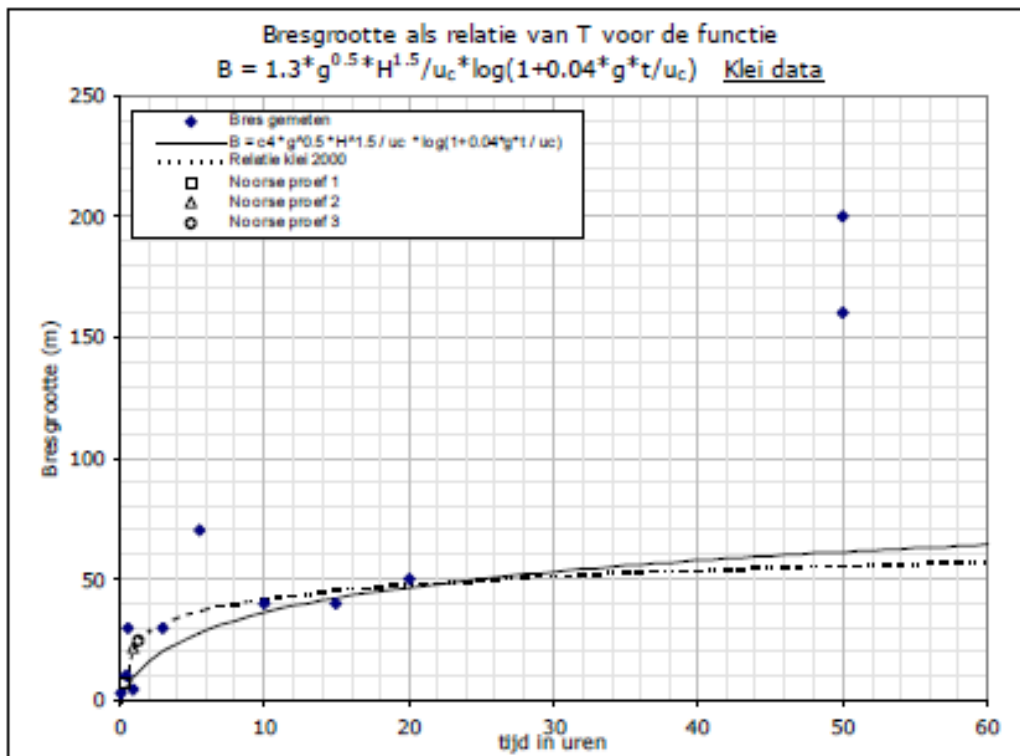
Tabel 2 – Sterkte parameters diverse grondsoorten. Uit Verheij (2013) [D 2].

grondsoort	u_c (m/s)	τ_c (Pa)	c_E (m ² s ⁻²)
gras, goed	7	185	$0,01 \cdot 10^{-4}$
gras, matig	5	92.5	$0,02 \cdot 10^{-4}$
gras, slecht	4	62	$0,03 \cdot 10^{-4}$
klei, zeer goede (compact; $\tau_{ongedraineerd} = 80-100$ kPa)	1.0	4	$0,50 \cdot 10^{-4}$
klei met 60% zand (stevig; $\tau_{ongedraineerd} = 40-80$ kPa)	0.80	2.5	$0,60 \cdot 10^{-4}$
goede klei met weinig structuur	0.70	2	$0,75 \cdot 10^{-4}$
goede klei, sterk gestructureerd	0.60	1.5	$1,5 \cdot 10^{-4}$
slechte klei (slap; $\tau_{ongedraineerd} =$ 20-40 kPa)	0.40	0.65	$3,5 \cdot 10^{-4}$
zand met 17% silt	0.225	0.20	$10 \cdot 10^{-4}$
zand met 10% silt	0.20	0.15	$12,5 \cdot 10^{-4}$
zand met 0% silt	0.16	0.10	$15 \cdot 10^{-4}$

Ook moet opgemerkt worden dat er in de huidige formulering geen onderscheid wordt gemaakt tussen een dijklichaam van zand of klei. In het genoemde rapport worden de verschillen wel uitgelegd en worden verschillende waardes voor de eerste constante gegeven – die in de uiteindelijke formule 1,3 is – die beter passen bij zanddijken of kleidijken. De waarde 1,3 is echter een gemiddelde hiervan. Volgens [D 1] dient voor overstromingssimulaties uitgegaan te worden van de Verheij-van der Knaap formulering, zoals bovenstaand weergegeven voor zowel dijken bestaande uit zand en/of klei. De waarde die aangehouden dient te worden voor de u_c geeft uiteindelijk een verschil tussen de bressnelheid van zand- en kleidijken. Over het algemeen kan gesteld worden dat bij kleidijken de eindbreedte van een bres een factor 3 tot 4 kleiner is dan bij zanddijken (zie Figuur 2 en Figuur 3). In het geval van bijvoorbeeld van een dijk bestaande uit een zandkern en een kleibekleding dient deze beschouwd te worden als een zanddijk. De Verheij-van der Knaap gaat ervan uit dat het kernmateriaal de bresgroei bepaald. De sterkte van de kleibekleding zal wel invloed hebben op het moment waarop de bresgroei begint.



Figuur 2 - Validatie bresgroeiformule Verheij-van der Knaap (zand). De gemeten waarden betreffen eindbreedtes van historische bressen.



Figuur 3 - Validatie bresgroeiformule Verheij-van der Knaap (klei). De gemeten waarden betreffen eindbreedte van historische bressen

Om een idee te krijgen van de relatieve bresgroeisnelheid in de huidige Verheij-van der Knaap formule, laat Tabel 3 voor verschillende situaties zien op welk moment een relatieve breedte behaald is (25, 50, 75 of 100% van de eindbreedte). Hierbij is de eindbreedte en de tijd van meting nagebootst met de Verheij-van der Knaap formule. Hieruit is op te maken dat volgens de Verheij-van der Knaap formule vooral de meeste groei plaatsvindt in het begin van de overstroming, waarbij dit effect groter is voor grotere bressen en bij een langere tijdschaal.

Tabel 3- Tijdsindicatie van bresgroei, waarbij met de Verheij-van der Knaap formule de eindbreedte en tijd van meting van historische punten is nagebootst. Hierdoor kan het gebruikte verval wel in deze tabel verschillen van de originele meting.

Datapunt	Verval	Eindbreedte	Tijd tot 25% breedte	Tijd tot 50% breedte	Tijd tot 75% breedte	Tijd tot 100% breedte
Zwin 1994	2,7 meter	42 meter	10 minuten	22 minuten	38 minuten	1 uur
Nieuwkuijk 1880	3,4 meter	205 meter	47 minuten	2,7 uur	7,6 uur	20 uur
Zalk 1926	2,6 meter	149 meter	50 minuten	3,5 uur	10 uur	28 uur

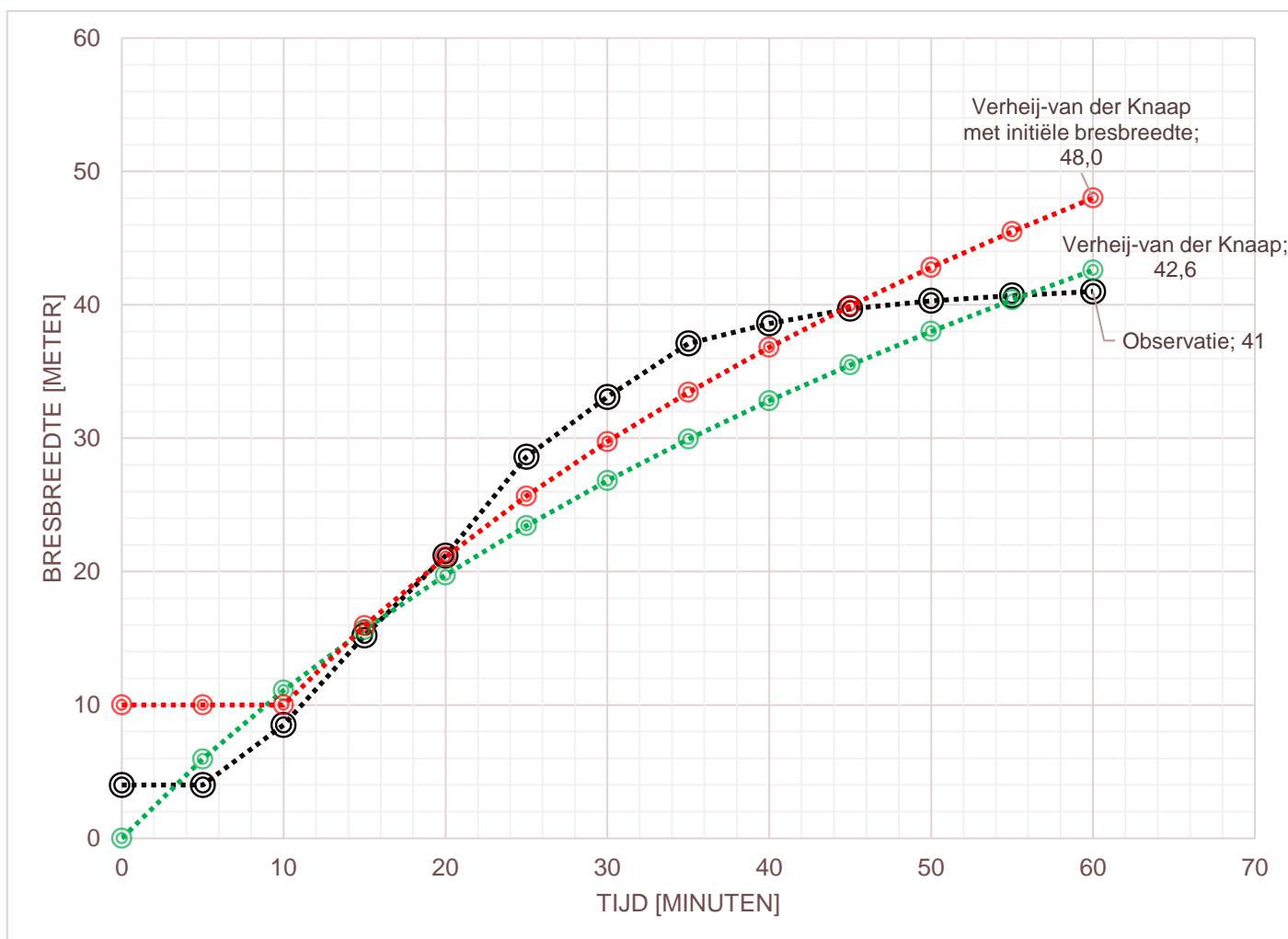
3.3.1.1 Vergelijking Zwin 1994 experiment

Een voorbeeld van een zeer goed gedocumenteerd experiment is het Zwin '94 veldexperiment. Hierbij is in oktober 1994 een bres gemaakt in een zanddam in 'Het Zwin'. De opbouw van de zanddam en het verloop van de bres is vervolgens gedetailleerd bijgehouden. Door de bresgroei met Verheij-van der Knaap formule te simuleren en deze te vergelijken met de werkelijke bresgroei snelheid wordt inzicht verkregen in de juistheid van de Verheij-van der Knaap formule voor met name de bresgroei snelheid.

De Verheij-van der Knaap formule maakt gebruik van de kritieke stroomsnelheid van het zand, wat afhankelijk is van de grondopbouw, welke in het geval van het Zwin '94 experiment relatief simpel is, zie Tabel 4. Voor de berekening van de bresbreedte is een kritieke stroomsnelheid aangenomen van 0,2 m/s, op basis van een zanddijk met 10% silt (Tabel 3.3 uit Verheij, 2003 [D 2]).

Tabel 4- Grondsoorten in de zanddam van het Zwin '94 experiment.

Sand	Sample	D_{10} [mm]	D_{50} [mm]	D_{90} [mm]
'Original' Zwin sand	II, III and VI	0.155	0.185	0.285
Suppletion sand	I, IV and V	0.215	0.315	0.600



Figuur 4 - ontwikkeling bresbreedte Zwin '94 en inschatting bresbreedte volgens Verheij-van der Knaap. Ook is de een inschatting te zien op basis van de Verheij-van der Knaap formule in combinatie met aannames vanuit D-Hydro, namelijk een initiële bresbreedte van 10 meter en een periode van 10 minuten waarna de gehele doorsnede is geërodeerd tot het minimale niveau.

Wanneer de ontwikkeling van de bresbreedte in het Zwin '94 project wordt uitgezet over de tijd, zie Figuur 4, zijn duidelijk een aantal verschillende fases in de bresgroei te zien. Deze corresponderen met de vijf fases zoals uitgelegd in de introductie van dit hoofdstuk. Het benaderen van dit verloop met de Verheij-van der Knaap formulering is lastig, aangezien dit een logaritmische formule is en dus moeilijk vorm kan geven aan een proces dat uit zoveel verschillende fases bestaat. In dit geval, waarin de totale brestijd kort is, geeft de Verheij-van der Knaap formulering een redelijke voorspelling van de ontwikkeling van de bresbreedte, zowel met als zonder gebruik van de aannames vanuit D-Hydro. Met de aannames vanuit D-Hydro wordt de ontwikkeling van de bresbreedte overschat, terwijl zonder deze aannames de Verheij-van der Knaap formulering een goede voorspelling geeft van de ontwikkeling van de bresbreedte. Hierbij dient er wel rekening te worden gehouden dat het een zanddijk betrof zonder gras- en/of kleibekleding.

Daarnaast dient vermeld te worden dat voor de Verheij-van der Knaap formulering is uitgegaan van het initiële waterstandsverschil. Bij het gebruik van deze formule in D-Hydro wordt dit waterstandsverschil voor iedere tijdstip opnieuw bepaald. Dit geeft meteen één van de beperkingen aan van het gebruik van de Verheij-van der Knaap formulering.

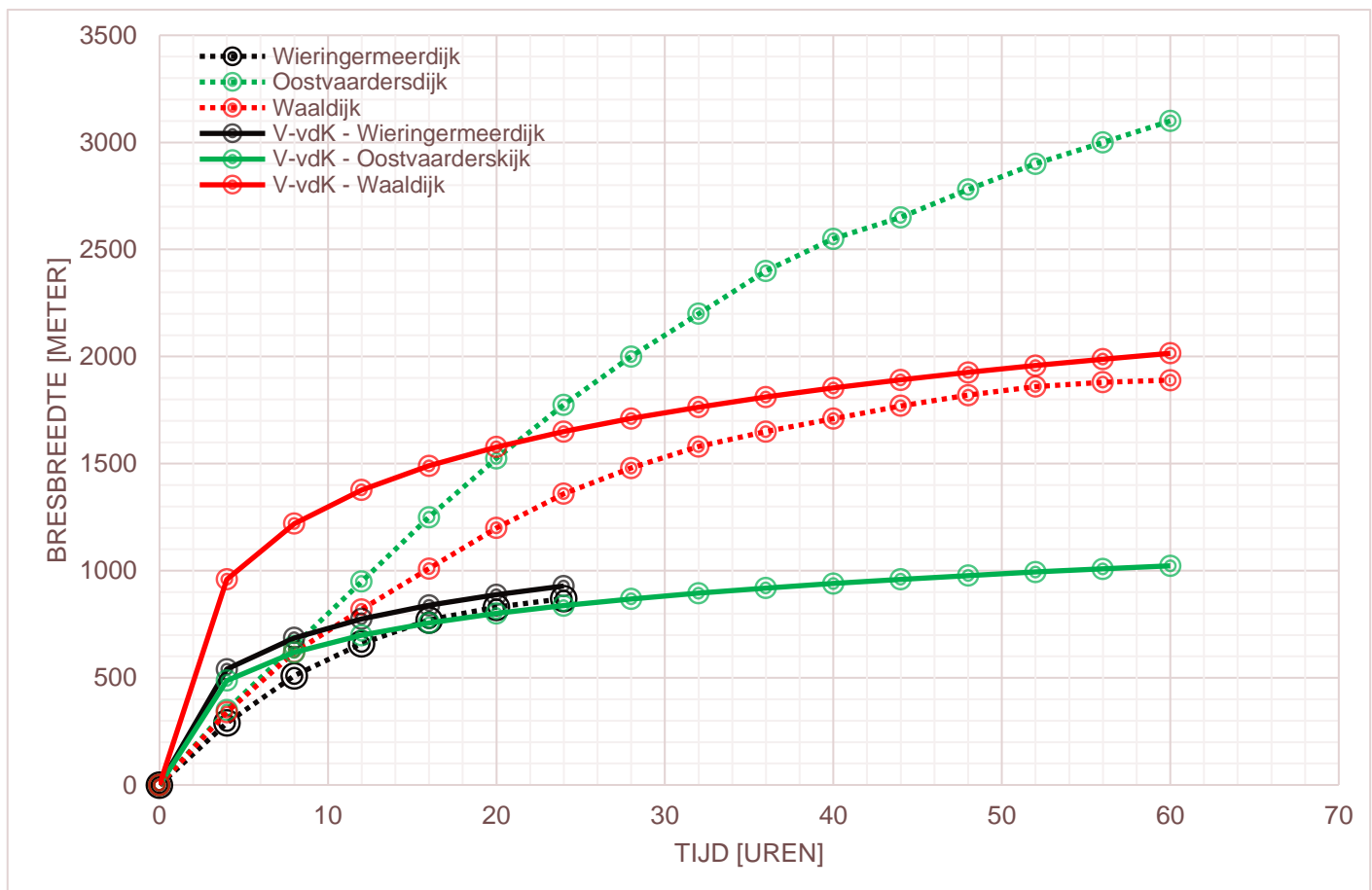
3.3.1.2 Vergelijking BRAM model

De meeste bressen die gebruikt worden als databron door Verheij-van der Knaap [D 2] zijn veel groter, en duren langer, dan het Zwin '94 experiment. Het probleem hierbij is dat vaak geen proeven betreft en deze niet gedetailleerd

gedocumenteerd zijn. Om de Verheij-van der Knaap formulering toch nog verder te kunnen toetsen is deze getoetst aan reeds uitgevoerde berekeningen met het BRAM-model, zoals beschreven in Verbeek [D 7]. Dit model maakt gebruik van verschillende erosiemodellen voor de grasbekleding, de kleilaag en de zandkern een dijklichaam. Voor alle drie de casestudies – respectievelijk de Wieringermeerdijk, de Oostvaardersdijk, en de Waaldijk – bestaat de gemodelleerde dijk uit een zandkern afgedekt met een gras- en kleibekleding. Het BRAM model geeft indicaties van de tijdsduur voor het falen van de verschillende onderdelen, en een inschatting van het verloop van de bresbreedte nadat een bres is gevormd (vergelijkbaar met de resultaten van een Verheij-van der Knaap berekening).

In Figuur 5 is een vergelijking te zien van het BRAM model en de Verheij-van der Knaap formule op deze drie locaties. Opvallend is vooral het verloop van de bresgroei in de eerst paar uur, dat aanzienlijk langzamer oploopt dan aangenomen met de Verheij-van der Knaap formulering. Dit zou het gevolg kunnen zijn van het feit dat de Verheij-van der Knaap formule gebaseerd is op eindbreedtes en er een verschil kan zijn tussen situaties waarin een dergelijke situatie na een paar uur al voorbij zal zijn of de situatie gesimuleerd in het BRAM model, waar de bres nog vele uren langer groeit. Of dit daadwerkelijk de (volledige) verklaring is voor het verschil in de eerste uren van bresgroei, is niet bekend.

Daarnaast is er voor 1 doorsnede, de Oostvaardersdijk een erg groot verschil te zien bij een langere doorbraak, terwijl de resultaten voor de andere twee locaties relatief vergelijkbare eindbreedtes laten zien. Dit heeft vooral te maken met de hoge steilheid van de doorsnede en het relatief grote achterland, die veel groter zijn dan bij de data waar de Verheij-van der Knaap formule waarschijnlijk op gebaseerd is. Hierdoor blijft in het BRAM model de bres sneller en langer doorgroeien, terwijl de Verheij-van der Knaap formule mogelijk gebaseerd is op kleinere polders.



Figuur 5 – Verloop van de bresgroei voor drie dijken, zowel met het BRAM-model als met de Verheij-van der Knaap formule.

3.4 Bresgroei in D-Hydro

D-Hydro is een softwarepakket, ontwikkeld door Deltares, dat gebruikt wordt voor gedetailleerde simulaties van overstromen, stormvloed, orkanen, golven, sediment transport en morfologie, waterkwaliteit en ecologie. Het pakket is gericht op de Nederlandse markt – en internationaal ook bekend onder de naam Delft3D Flexible Mesh – waarbij het op het gebied van hydrodynamische simulaties de opvolger is modellen als SOBEK 2 en Delft 3D 4. In de achterliggende formules heeft het dan ook veel overeenkomsten.

De simulatie van bresgroei in D-Hydro kan op basis van twee verschillende en vergelijkbare formules, maar zoals genoemd in de Leidraad Overstromingssimulaties [D 1] gaat de voorkeur uit naar de Verheij-van der Knaap formule. Een voorbeeld van een dergelijke berekening is in 2020 uitgevoerd in opdracht van Waterschap Rijn en IJssel in dijkkring 48 [D 6]. Hierbij is de bres in 2D gemodelleerd.

Het proces van bresgroei is verdeeld in twee fases. In de eerste fase wordt de dijk verlaagd van de initiële dijkhoogte naar de minimale dijkhoogte en in de tweede fase groeit de bres in de breedte. Hierbij moeten een aantal aannames gedaan worden:

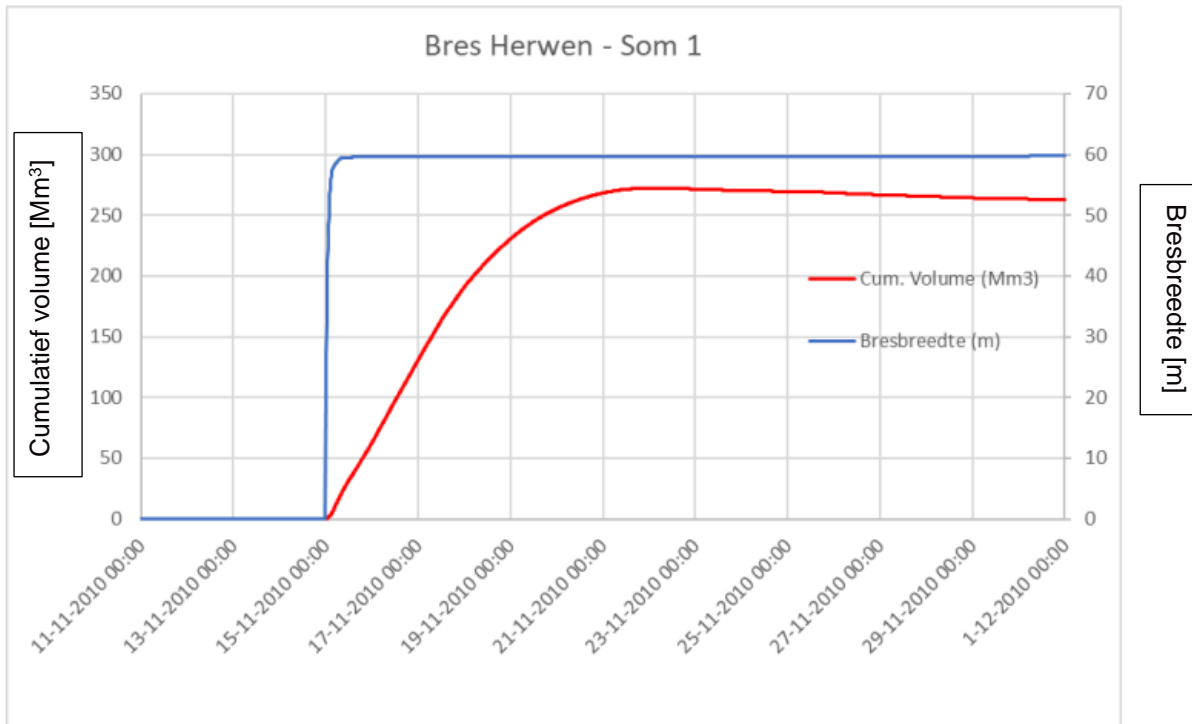
- **Breslocaties:** dit is zeer afhankelijk van het projectgebied.
- **Initiële dijkhoogte en minimale dijkhoogte:** de initiële dijkhoogte kan makkelijk worden bepaald uit de hoogtekaart nadat de breslocatie is gekozen. De minimale dijkhoogte is vaak aangenomen als het niveau van het achterland.
- **Initiële bresbreedte:** dit betreft de breedte van de bres tijdens de eerste verlagingsfase. Een eerste aanname hiervoor is 10 meter.
- **Moment van breken:** dit geeft het moment aan waarop aangenomen wordt dat de bres ontstaat. Hier wordt vaak de leidraad gevolgd, waarbij het hoogste punt van de hoogwatergolf of het moment van de hoogste belasting gekozen.
- **Tijd benodigd voor het verlagen van de dijk in fase 1:** een eerste aanname hiervoor is 10 minuten om te dalen naar de minimale dijkhoogte.
- **Grondsoort van de dijk:** de formule is voornamelijk geijkt op zanddijken en in mindere mate op kleidijken. Voor de toepassing van de Verheij-van der Knaap formulering dient het materiaal in de kern als maatgevend beschouwd te worden.²
- **Kritische stroomsnelheid:** hiervoor kan worden aangenomen 0,2 m/s en 0,5 m/s voor respectievelijk een zand- en kleidijk. Een grotere range is mogelijk, zie [D 1] en [D 20].

Bij deze simulatie zijn een aantal dingen die opvallen:

- Ten eerste zijn de aannames rond de eerste fase – waarin de bres voornamelijk verdiept – gebaseerd is op invoer van de modelleur, en dus niet zelf gemodelleerd wordt. Waarschijnlijk is dit gekozen aangezien de Verheij-van der Knaap formule ook deze fases niet meeneemt en de verdiepende fase ook niet bepalend is voor de hoeveelheid water wat een polder in stroomt. Hiervoor is namelijk de verbredende fase en de tijd hierna veel belangrijker. Echter, zeker als een dijklichaam een andere opbouw heeft dan zand, kan de verdiepende fase wel een sterk vertragend effect hebben, afhankelijk van een eventuele kleilaag en dijkbekleding. Ter vergelijking, het Bram model – dat uitgaat van een kleibekleding en grasbekleding – berekende tijden van 3-7 uur voordat een volledige bres over de hele diepte is ontstaan en de verbredingsfase begint. Uiteraard is dit erg afhankelijk van de dikte van een eventuele kleilaag en de sterkte van de grasmat.
- Ook is er een vaste initiële bresbreedte opgegeven, waar de leidraad een breedte van 10 meter aanraadt. Hoe snel deze breedte bereikt wordt is sterk afhankelijk van de opbouw van het dijklichaam (wat zich vertaalt in verschillende types erosie), de steilheid van het talud, de bekleding, en het verval. Ter illustratie, bij het Zwin '94 experiment werd een breedte van 10 meter bereikt na ongeveer 10 minuten, zie Figuur 4. Dit zal aanzienlijk meer zijn bij een dijk die voor een groter gedeelte bestaat uit cohesief materiaal of met een sterke bekleding.
- Een punt van discussie in de voorbeeldsimulatie in dijkkring 48 was het modelleren van de waterstand. In de simulatie worden hiervoor meetpunten vlak voor en na de dijk gebruikt, terwijl historische metingen vaak

² Voor de modellering van een dijk bestaande uit een zandkern met een kleibekleding kan de Verheij-van der Knaap formulering gehanteerd worden. Hierbij dient uitgegaan te worden van de eigenschappen van het kernmateriaal volgens Tabel 2. Voor het moment van breken dient dan een zekere tijd aangehouden te worden voor de verdiepende fase. Deze tijdsduur hiervoor is sterk afhankelijk van de kwaliteit van de kleibekleding en de mate van overflow over de dijk of het type bezwijkmechanisme van de dijk.

waterstand verder van de bres gebruikten. Verder van de bres wordt vaak een hogere waterstand gemeten, resulterend in een hoger verval en dus grotere bresgroei en bresdebiet. Figuur 6 laat het resultaat zien van een simulatie van een dijkdoorbraak bij Herwen met D-Hydro. Wat hier opvalt is de relatief snelle bresgroei tot aan de maximale bresgrootte van 60 meter. Dit wordt veroorzaakt omdat het achterland beperkt van grootte is, waardoor de waterstand in de achterliggende polder snel stijgt en de stroomsnelheid door de bres snel kleiner wordt. De berekende bresbreedte met de Verheij-van der Knaap formule blijft hierdoor relatief klein, doordat het waterstandverschil over de bres snel kleiner wordt.



Figuur 6 - Gemodelleerde bresgrootte (blauw) en cumulatief volume (rood) door een bres bij Herwen. De doorbraak is een gevolg van een hoogwatergolf. Het cumulatief volume loopt terug vanwege een terugloop van water door de bres.

- Een ander opvallend punt draait om de tweede fase van het model. Hierbij wordt de Verheij-van der Knaap formule gebruikt bij iedere tijdstap om de groei van de breedte van de bres voor die korte tijd in te schatten. Dit is een groot verschil met het bedoelde gebruik van de formule en de data die daarvoor gebruikt is. De Verheij-van der Knaap schat namelijk alleen de eindbreedte van een bres, op basis van het verschil in hoogte aan het begin van de bres en de tijd die de bres heeft kunnen groeien. Het verschil zal vooral leiden tot kleinere bresbreedtes dan vooraf geschat, aangezien in iedere tijdstap van het D-Hydro model het waterniveau in de polder stijgt en het waterverschil (de drijvende kracht achter de bresgroei) daalt. De Verheij-van der Knaap formule neemt deze invloed niet mee. Ter illustratie, de D-Hydro som vermeldt een tijd tot 99% van de maximale bresbreedte van 31 uur. Wanneer we dit combineren met de eigenschappen van het dijklichaam ($H = 18,96 - 13,39 = 5,57m$; $u_c = 0,2 \frac{m}{s}$, $c_1 = 1,2$), dan is de resulterende inschatting met de Verheij-van der Knaap formule:

$$B = c_1 \cdot \frac{g^{0,5} H^{1,5}}{u_c} \log\left(1 + \frac{0,04 \cdot g}{u_c} t\right) = 443 \text{ meter}$$

Dit laat een erg groot verschil zien. Dit kan het resultaat zijn van ofwel een verschil tussen de situatie van de casus en de situaties waarop de Verheij-van der Knaap formule gebaseerd is, ofwel een foute aanname in een van de berekeningen. Het eerste zou het geval kunnen zijn als bijvoorbeeld de verhouding tussen de hoogte van de dijk en de grootte van het achterland erg verschilt van de data waar de formule op gebaseerd is. Als de polder namelijk relatief groot is, maar uit wordt gegaan van dezelfde eindtijd (geen groei meer na 31 uur), dan kan de bresbreedte veel groter uitvallen. Dit kan ook te maken hebben met de aanname voor het moment waarop de maximale bresbreedte is bereikt of een van de dijkparameters.

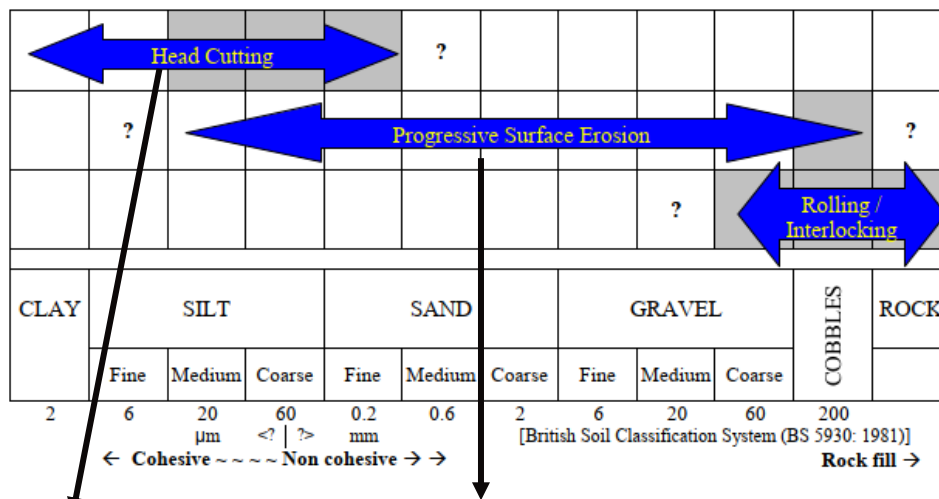
3.5 Ontwikkelingen in bresgroei modellering

Sinds dat de Verheij-van der Knaap formule zijn weg in het hart van simulatiesoftware heeft gevonden, zijn er veel nieuwe en interessante inzichten rond het ontstaan en groeien van bressen ontwikkeld. Deze modellen zijn steeds meer proces-georiënteerd en nemen vaak ook de erosie van de gras- en kleibekleding en de verdiepingsfase mee. Hierbij dient vermeld te worden dat deze processen voorafgaan aan de werkelijke bresbreedtegroei en gezien worden als processen die leiden tot verlies van standzekerheid. Wel dient vermeld te worden dat deze processen ook tijdsafhankelijk zijn en daarmee van invloed zijn op de grootte van de bres als functie van de tijd. Daarom is ook een korte inblik gegeven van modellen die de erosiesnelheid van een gras- en kleibekleding beschouwen.

3.5.1 Nieuwe inzichten in grondopbouw van bressen

De eerste formules voor het simuleren van bresgroei gaan uit van een zanddijk zonder bekleding, wat de simpelste en meest conservatieve schatting is voor het ontstaan en groeien van een bres. Nieuw onderzoek naar andere grondsamenstellingen en bekledingen draaien daarom vooral om het vertragende effect van bijvoorbeeld grasbekleding op het ontstaan van de bres of het vertragende effect van bijvoorbeeld kleilagen in de latere fases van de bresgroei.

Morris [D 8] beschrijft het als volgt: “het bresproces bestaat uit een aantal fases. Deze kunnen worden beschreven in grove termen, en in meer detail voor niet-cohesief, cohesief, en rotsachtig materiaal.” Dit heeft het grootste effect op de manier waarop op de bres groeit. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 7.



Figuur 7 – Verschillende vormen van bresgroei, gebaseerd op het type grond. Bijgevoegd zijn twee voorbeelden van een bres in cohesief (linksonder) en niet-cohesief (rechtsonder) materiaal. Bron: Morris, 2011

De laatste jaren is er vooral veel aandacht geweest – bijvoorbeeld in de vorm van testen – voor het beschrijven van bresgroei in cohesief materiaal, dat plaats vindt door ‘head cutting’. Dit is een vorm van erosie waarbij materiaal niet geleidelijk erodeert, maar grotere gedeeltes materiaal worden ondermijnd en wegvallen, zie H1.3 in Verbeek [D 7]. In 2006 beschreef Zhu [D 4] het proces in grote lijnen. In het werk van Verbeek uit 2019 [D 7] is een meer uitgebreide beschrijving te vinden van de ontwikkelingen op het gebied van bresgroei in cohesief materiaal.

3.5.2 Nieuwe inzichten in het effect van bekledingen

In veel gevallen worden dijklichamen van zand versterkt door een bedekkende laag van klei aan te brengen. Ook is het erg gebruikelijk om het gehele dijklichaam te bedekken met gras, dat niet alleen esthetische waarde heeft, maar ook de weerstand tegen erosie vergroot ten gevolge van afscherming door het blad en verhoging cohesie door wortels. Een dergelijke laag kan – indien goed en overal aangebracht – een grote invloed hebben op de bresinitiatiefase.

In het BRAM model worden deze fases expliciet meegenomen, waarbij de tijd van eroderen van een grasmat of kleibedekking ingeschat wordt aan de hand van formules die zich specifiek richten op het eroderen van een grasmat of een kleibedekking. Voorbeelden van modellen die hiervoor gebruikt zijn, zijn de formules van d’Eliso [D 13] voor de inschatting van het eroderen van een grasbekleding en de formule van Winterwerp en van Kesteren [D 14] voor de erosie van een kleibekleding.

3.5.3 Nieuwe inzichten in benaderingen van bresgroei

Het grote nadeel van de Verheij-van der Knaap formulering is de empirische basis, waarbij geen gebruik gemaakt is van een fysische beschrijving/modellering van het bresproces. Het is zuiver gebaseerd op metingen van de eindbreedte van een bresgroei en inschatting van de tijd waarop deze eindbreedte is bereikt. De groei naar de eindbreedte is niet gebaseerd op metingen en/of een fysische beschrijving/modellering. Daarnaast zijn de metingen gecorreleerd aan het begin waterstandverschil, terwijl in D-Hydro het model gebruikt wordt, waarbij het tijdsafhankelijke waterstandverschil per tijdstap wordt gehanteerd. Dat kan leiden tot grote afwijkingen.

De variatie in processen en materialen die een rol spelen bij het bressen maakt het ingewikkeld om modellen te ontwikkelen die volledig op de fysische processen zijn gebaseerd. Vandaar dat er vooral veel ontwikkeling is geweest op het gebied van een tussenvorm, de proces-georiënteerde modellen. Deze gaan in de basis wel uit van de onderliggende processen, maar gebruiken benaderingen om de simulatie behapbaar en bruikbaar te maken. Hier komen vaak ook empirische bepaalde waarden of trendlijnen bij kijken, maar dan om het fysisch proces te beschrijven in plaats van te vervangen. Denk hierbij aan een empirische formule voor het bepalen van de erosiesnelheid van cohesief materiaal.

Een overzichtelijke lijst van gangbare empirische formules en gangbare proces-georiënteerde modellen is opgesteld door West [D 10] is samengevat door Verbeek [D 7], en is hieronder te zien in Tabel 5 en Tabel 6.

Tabel 5- State-of-the-art empirische bresmodellen.

Parametric model	Time to Breach formation	Average breach width	Side slopes	Peak Outflow	No. case studies	Case types
Froehlich (2008)	$t_f = 0.00176 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^3}}$	$\bar{B} = 0.27 k_0 V_w^{\frac{1}{3}}$ Where: $k_0 = \begin{cases} 1.3, & \text{OT} \\ 1.0, & \text{P} \end{cases}$	$z = \begin{cases} 1.0, & \text{OT} \\ 0.7, & \text{P} \end{cases}$	Not included	74	Overtopping, overflow and internal erosion of homogeneous and composite dikes, both natural and man-made breaches
Zhang et al. (2009)	$\frac{t_f}{t_r} = C_5 \left(\frac{h_{cd}}{h_r}\right)^{0.654} \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{1.246}$ Where: $C_5 = b_5$ $b_5 = \begin{cases} 0.038, & \text{HE} \\ 0.066, & \text{ME} \\ 0.205, & \text{LE} \end{cases}$	$\frac{\bar{B}}{h_b} = 5.543 \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{0.739} e^{C_3}$ Where: $C_3 = b_4 + b_5$ $b_4 = \begin{cases} -1.207, & \text{OT} \\ -1.747, & \text{P} \end{cases}$ $b_5 = \begin{cases} -0.613, & \text{HE} \\ -1.073, & \text{ME} \\ -1.268, & \text{LE} \end{cases}$	Height included in breach width relation	$\frac{Q_p}{\sqrt{g V_w^{2/3}}} = 0.133 \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{-1.276} e^{C_4}$ Where: $C_4 = b_4 + b_5$ $b_4 = \begin{cases} -0.788, & \text{OT} \\ -1.232, & \text{P} \end{cases}$ $b_5 = \begin{cases} -0.089, & \text{HE} \\ -0.498, & \text{ME} \\ -1.433, & \text{LE} \end{cases}$	75	Overtopping, overflow and internal erosion of homogeneous and composite dikes, both natural and man-made breaches
Froehlich (2016a,b)	$t_f = 60 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^3}}$	$\bar{B} = 0.23 k_0 V_w^{\frac{1}{3}}$ Where: $k_0 = \begin{cases} 1.5, & \text{OT} \\ 1.0, & \text{P} \end{cases}$	$z = \begin{cases} 1.0, & \text{OT} \\ 0.6, & \text{P} \end{cases}$	$Q_p = 0.0175 k_0 k_H \sqrt{\frac{g V_w h_w h_b^2}{w}}$ Where: $k_0 = \begin{cases} 1.85, & \text{OT} \\ 1.0, & \text{P} \end{cases}$ And: $k_H = \begin{cases} 1, & h_b < 6.1 \\ (h_b/6.1)^{1/8}, & h_b > 6.1 \end{cases}$	2016a: 111 2016b: 41	Overtopping, overflow and internal erosion of homogeneous and composite dikes, both natural and man-made breaches

Tabel 5 geeft een lijst van empirische bresmodellen, voornamelijk voor het gebruik bij dammen, waarbij V het volume van het water in het reservoir betreft. Hier zijn een aantal nieuwe beschikbaar sinds de ontwikkeling van de Verheijvan der Knaap formulering in 2003. Allemaal hebben ze een type dijk en situatie waar het model voor geschikt is. In Tabel 6 is een aantal modellen te zien die zich meer richten op de fysische processen zelf. Door uit te gaan van de fysische processen wordt het niet mogelijk om de bresinitiatie en bresgroei met een enkele formule te beschrijven. Vaak maakt dit de modellen veel complexer. Ook hier zijn grote verschillen tussen modellen. De keuze hangt hier vaak meer af van het gewenste detailniveau en de beschikbare informatie, dan aan de juiste situatie en doorsnede, zoals vaak het geval is bij empirische modellen.

Een voorbeeld van een proces-georiënteerd model dat interessant zou zijn voor deze toepassing is het AREBA-model, beschreven door Van Damme et al in 2012, wat naast bresgroei ook naar de bresinitiatie-fase kijkt. Dit model is geschikt voor verschillende types doorsnede en grondopbouw en richt zich vooral op een eenvoudige en snelle simulatie. Hierbij moet ook vermeld worden dat veel proces-georiënteerde modellen, zoals het AREBA-model, draaien om een erosierelatie, die de groei van een bres inschat aan de hand van de stroomsnelheid in de bres. Deze stroomsnelheid wordt met een overlaatformule ingeschat, zoals ook het geval is in D-Hydro. Als optie voor een verbetering van het D-Hydro model is dus voornamelijk deze erosierelatie van belang. Het vinden en inbouwen van een betrouwbare erosierelatie is daarom ook een mogelijke optie tot verbetering van de simulatie.

Tabel 6 - State-of-the-art proces-georiënteerde bresmodellen. Deze simuleren zowel de bresinitiatie als de bresgroei.

Process-based model	Breach morphology	Flow over Dike	Transport equation	Geomechanics of breach side-slopes	Limitations	Main publications
BRES	YZ: Trapezoidal XZ: Horizontal channel	Weir formula and Bélanger	Various equations for cohesive and non-cohesive soils	Simple slope stability	Simplified slope stability calculations No effect of waves considered	Visser (1998) Zhu (2006)
AREBA	YZ: Effective shear stress dependent XZ: Exner equation and soil wasting	Variable weir formula	Various equations for cohesive and non-cohesive soils	Simple slope stability	Predefined breach development Does not model seepage flow	van Damme et al. (2012)
FIREBIRD	YZ: Variable trapezoidal XZ: Exner equation	Weir formula	Parametric relations for headcut advance, bottom and lateral erosion	Breach side slope erosion	Predefined breach development	Gyr and Kinzelbach (2003) Wang et al. (2006)
WinDAM	YZ: Headcut development and migration XZ: Rectangular or trapezoidal	Weir formula	Parametric relations for headcut advance, bottom and lateral erosion	Breach side slope erosion	Predefined breach development Does not model seepage flow or slope stability Model needs soil erodability input value Can only model overtopping	Temple et al. (2005) Hanson et al. (2005a,b) Temple et al. (2006)
D'Eliso	YZ: Headcut development and migration XZ: Rectangular to trapezoidal	Wave overtopping and/or overflow – Bernoulli equation	Formulas for erosion rate and headcut advance	Grass cover, clay cover, sand core and breach slope stability	Limited understanding of 2D simplification Instability of non-cohesive soils excluded Assumption on ratio vertical and horizontal erosion rate	d'Eliso (2007)
EMBREA	YZ: Effective shear stress dependent XZ: Exner equation and soil wasting	Variable weir formula and 1D Steady non-uniform flow equations	Various equations for cohesive and non-cohesive soils	Slope and core stability and zones of variable erodibility	Does not model scour holes or seepage flow	Morris (2011)
DL Breach (3D)	Calculated from resulting bed change from suspended and bed-load equations	3D RANS equations using finite-volume method.	3D non-equilibrium transport equations of suspended-load and bed-load	Not included	Large computational requirements associated with running the model Does not model slope stability Focuses more on flood routing rather than breach development	Marsooli and Wu (2014)
Zhong et Al. (2017)		Weir formula		Limit equilibrium method for slope stability	Only considers headcut erosion	Zhong et al. (2017)

3.6 Discussie

In dit hoofdstuk is dieper ingegaan op de bestaande kennis t.a.v. bresinitiatie en bresgroei, hoe dit op het moment in D-Hydro wordt toegepast en wat de nieuwe ontwikkelingen zijn. Het doel is om meer duidelijkheid te bieden voor gebruikers, zoals het Waterschap Rijn en IJssel, hoe deze kennis in D-Hydro ingezet kan worden voor het modelleren van bresgroei en hoe de resultaten kunnen worden gebruikt.

De keuze voor de Verheij-van der Knaap formule in D-Hydro is waarschijnlijk gebaseerd op de snelle rekentijd. Echter, de afgelopen twintig jaar zijn er door constante ontwikkelingen in het onderzoek naar bresgroei meerdere modellen ontwikkeld die breder toepasbaar zijn en betere resultaten leveren. In het geval van empirische formules gaat dit nauwelijks ten koste van extra rekentijd. Omtrent de onzekerheid van de Verheij-van der Knaap formule binnen de simulatie van D-Hydro, zijn er twee factoren die een grote invloed kunnen hebben op het verloop van de bresgroei:

- De Verheij-van der Knaap formule neemt niet de grootte van het achterland mee als variabele. Dit zit impliciet in de onderliggende data (die een bepaalde eindtijd en eindbreedte hebben). Als gevolg hiervan zal de formule waarschijnlijk voor een dijk met een relatief klein achterland de bresbreedte overschatten, en voor een dijk met een relatief groot achterland de bresbreedte onderschatten.
- De Verheij-van der Knaap formule schat de eindbreedte van een bres op basis van de waterstandverschillen op het moment van falen. Een simulatie die deze formule gebruikt in een numeriek model, waarbij voor elke tijdstap de waterhoogtes worden geüpdatet, zal daardoor leiden tot een kleinere bresbreedte.

Ten aanzien van het gebruik van D-HYDRO is het ten eerste belangrijk om vast te stellen welke precisie van het bresgroeimodel gewenst is en welke vraag beantwoord dient te worden. Is de inschatting van de stijgsnelheid voor de bepaling van het aantal slachtoffers van belang of is inzicht noodzakelijk in de tijd die beschikbaar is om nog maatregelen te nemen voordat de bres te groot is. Op basis hiervan kan gekozen worden om ofwel binnen de huidige mogelijkheden van het model de simulaties te optimaliseren door betere aannames, ofwel actief aan te sturen op een betere modellering van bresgroei binnen D-HYDRO.

In het geval er geen aanpassingen aan de huidige formulering gewenst zijn, kan de Verheij-van der Knaap formule beter ingezet worden in combinatie met aannames die specifiek zijn voor bepaalde ondergronden, of bedekkingen. Het belangrijkste hierbij is om verschillende constanten op te stellen voor zanddijken, kleidijken, en zanddijken met een kleibedekking. Ook zijn er speciale aanpassingen nodig voor de aanwezigheid van een grasbekleding. Over het algemeen zal dit leiden tot een significant langere verdiepingsfase en een langzamere initiële bresgroei in vergelijking met de dijken waar de formule op gebaseerd is.

Als er een ander, meer complete formulering gewenst is binnen D-HYDRO, is een belangrijke vervolgvraag of de invloed van de bres op de belastingen van belang is. Dit bepaalt of deze formulering in een los model kan worden ontwikkeld – waarbij geen aanpassingen nodig zijn aan de huidige D-Hydro mogelijkheden – of dat er aanpassingen aan D-Hydro nodig zijn. Indien aanpassingen gewenst zijn, zou een relatief eenvoudige mogelijkheid zijn om de erosierelatie van een bestaand model, zoals het aan de TU Delft ontwikkelde bresgroeimodel voor zand [D 5], als mogelijkheid toe te voegen.

Een nadeel van de toepassing van deze completere modellen is dat meer en gedetailleerd input noodzakelijk is, die vaak niet voorhanden is en daardoor in veel gevallen ingeschat zal moeten worden. Als gekozen wordt deze modellen te gaan implementeren in D-Hydro dient wel een nadere toetsing plaats te vinden van de validiteit van deze modellen op basis van goed gedocumenteerde werkelijke (proef)-dijk/dam doorbraken.

4 Analyse standzekerheid lijnvormige kerende elementen

In dit hoofdstuk wordt de standzekerheid van keringen verder belicht, en met name de standzekerheid van waterkerende objecten die niet als primaire kering beoordeeld worden. Conform Hoofdstuk 2 kan voor de term standzekerheid ook “bresinitiatie” worden gelezen. In het geval van standzekerheid gaat het vaak om lijnvormige elementen die vroeger een waterkerende functie hebben gehad of die vanuit een andere functie – bijvoorbeeld weg, spoorlijn – gebouwd zijn, maar toch invloed hebben op het verloop van overstromingen.

In 3.1 wordt dieper ingegaan op de huidige gang van zaken rond de standzekerheid van kerende objecten. Hierna is aan de hand van een aantal casussen de standzekerheid ingeschat van een aantal lijnvormige kerende elementen. Bij deze casussen zijn de faalmechanismen macro-stabiliteit, piping en overloop geanalyseerd. De overloopsimulatie bestaat hierbij uit het falen van achtereenvolgens een grasbekleding, een kleibekleding, en het kernmateriaal, waarna de bres lateraal (in de breedte) groeit. Belangrijke kanttekening is de interactie met andere faalmechanismen. Mocht de doorsnede namelijk falen door macrostabiliteit of piping, dan zal direct het kernmateriaal bloot komen te liggen, dat een grote invloed heeft op het verloop van de bresbreedte in de tijd. In de simulatie zijn daarom de tijd tot falen van de gras- en kleibekleding apart genoemd.

Deze casussen vertegenwoordigen verschillende keringen, op basis van functie en grondopbouw, die in overleg met de opdrachtgever zijn gekozen. Op basis van deze casussen is een advies geformuleerd over hoe omgegaan dient te worden met dit soort elementen en wat verantwoorde aannames zijn bij het gebruik van overstromingssimulaties.

4.1 Introductie

4.1.1 Standzekerheid van waterkeringen

Het startpunt van een bres is sterk verbonden met het maatgevende faalmechanisme. Mogelijke faalmechanismen zijn overslag/overloop, piping, micro- en macro-stabiliteit, en erosie van het binnentalud (gras- en/of kleibekleding). In sommige gevallen kunnen verschillende faalmechanismen tegelijk ontstaan en elkaar eventueel versterken.

De sterkte van een grondlichaam, gemeten als de hydraulische belasting die het kan verduren voordat dergelijke schade ontstaat, kan erg verschillen. Een eerste ruwe schatting kan worden gemaakt aan de hand van de verhoudingen van het waterniveau en kruinhoogte, de grondopbouw van het dijklichaam en de bekleding. Verschillende proeven hebben laten zien dat een goed onderhouden dijkbekleding, zoals gras, een groot verschil maakt in de capaciteit van het dijklichaam om overslag of overloop te kunnen verdragen zonder dat de grond begint te eroderen. Deze sterkte wordt dan weer beïnvloed door lokale factoren, zie [D 22]. Over de vele kilometers dijk die tijdens een storm of hoogwatergolf worden belast, zijn er doorgaans veel locaties waar de bekleding of grond verzwakt is. Denk hierbij aan looppaden, bomen, graasgebieden, parkeerplaatsen, uitkijpunten, etc. Dit maakt het heel lastig om (1) te bepalen wat de exacte locatie van een bres zal zijn, (2) wat de exacte belasting is waarbij een bres ontstaat, en (3) in hoeverre het positieve effect van de bekleding meegenomen kan worden in de berekening. De eerste twee punten worden kort benoemd in het Leidraad overstromingssimulaties [D 1]:

“Meestal worden scenario’s doorgerekend met een enkele bres. Bij extreme omstandigheden in grotere waterlopen kan het effect van meerdere bressen bepaald worden. Voor het moment van het ontstaan van een bres kunnen in de meeste modellen twee opties gekozen worden:

- *Op een bepaald tijdstip (bijv. het tijdstip waarop de waterstand maximaal is);*
- *Bij een bepaalde rivierwaterstand (bv. de ontwerpwaterstand).*

Wij raden aan hier om sommen te maken voor een bres op de top van de waterstand, conform de aanpak in VNK2. Deze keuze is gemaakt vanwege zijn eenduidigheid en de grote onzekerheid over het moment van doorbreken. In een gevoeligheidsanalyse kan dit gevarieerd worden.”

4.1.2 Beoordeling standzekerheid

Voor de beoordeling van macro-stabiliteit, micro-stabiliteit en/of piping zijn de afgelopen tientallen relatief goed gevalideerde modellen ontwikkeld, die veelvuldig worden ingezet. In het geval van overloop is de tijdsduur die een

stroming nodig heeft voor de erosie van een grasbekleding, kleibekleding en/of de ondergraving van een kleibekleding door erosie van een onderliggende zandlaag minder goed gevalideerd. De verschillende fysische processen die plaatsvinden maken het moeilijk om dit te modelleren. Dit wordt ook complexer gemaakt door de grote onzekerheid rond het de opbouw van de ondergrond en eventuele bekledingen. Hierdoor kan historische data niet gemakkelijk als referentiepunt gebruikt worden. De afgelopen decennia is er wel veelvuldig onderzoek geweest naar de geïsoleerde processen en fases, waardoor door middel van het samenvoegen van dit soort deelmodellen een inschatting van de totale bresgroei gemaakt kan worden. Bresmodellen, zoals enige tijd geleden ontwikkeld door Visser [D3] en Zhu [D4] hebben de invloed van de gras- en kleibekleding niet meegenomen.

Verbeek [D 7] heeft recent een overzicht gemaakt van de fysische processen die zijn optreden voorafgaand aan het bressen van een dijk (bresgroei), zoals beschreven door Visser [D3] voor een zanddijk en Zhu [D4] voor een kleidijk. Hierbij is aandacht besteed aan:

- Erosie van de grasbekleding;
- Erosie van de onderliggende kleibekleding;
- Erosie van de zand en/of klei kern waarbij de bovenliggende kleilaag wordt ondermijnd (head-cut erosie).

Voor de beschrijving van het eroderen van een grasbekleding wordt er vaak uitgegaan van een zwakke plek in de grasmat, of een locatie waar de schuifbelasting op de grasbekleding het grootst is. Een tijd-tot-falen wordt ingeschat aan de hand van een schuifbelasting en de gemiddelde erosie onder invloed van die schuifbelasting. Dergelijke modellen zijn bijvoorbeeld ontwikkeld door Whitehead et al (1976) [D 23], Temple et al. (1987)[D 24] en d'Eliso (2007) [D 13].

De tweede stap betreft vervolgens het eroderen van de kleibekleding. Hierbij moet expliciet rekening gehouden worden met het eroderen van cohesief materiaal. Voorbeelden van modellen die hier geschikt voor zijn, zijn ontwikkeld door Winterwerp en van Kesteren (2004) [D 14], Whitehouse et al. (2000) [D 25], en Van Prooijen en Winterwerp (2010) [D 26].

Vervolgens erodeert het materiaal van de kern onder de bekleding, waarbij erosie minder plaatsvindt aan de hand van impact ("jet impact"). De erosie van het kernmateriaal vindt niet plaats onder invloed van een schuifspanning, maar treedt op als gevolg van een zekere stuwdruk. In het geval van een zandkern veroorzaakt dit ondermijning op van de bovenliggende kleilaag, welke in brokken afbreekt (head-cut erosie). Het model bestaat uit methodieken die de erosie van zand beschrijven bijvoorbeeld door van Rhee (2010) [D 11], Bisschop (2018) [D 12] en van Damme (2019) in combinatie met de methodieken zoals beschreven door D'Eliso (2007) [D 13].

4.1.3 Standzekerheid niet-beoordeelde kerende elementen

In het landschap liggen naast de primaire en secundaire waterkeringen veel andere elementen die invloed kunnen hebben op de verloop en snelheid van een overstroming. Zeker in het geval van grote, lijnvormige elementen kunnen deze een rol vervullen vergelijkbaar met compartimenteringskeringen. Dit kan een voordeel zijn in het geval een gebied met hoge economische of hoge bevolkingsdichtheid hierdoor extra beschermd wordt, maar ook een nadeel voor het gebied tussen de bres en het kerende element, dat hierdoor sneller dan verwacht onder water loopt bij een hogere stijgsnelheid van het water. De stijgsnelheid van water is van grote invloed op het aantal slachtoffers na een dijkdoorbraak.

De Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties maakt hierbij onderscheid tussen een aantal verschillende typen lijnelementen [D 1]:

- *"Spoorwegen zijn standzeker tot maximaal de onderkant van het ballastbed. De maximale waterdiepte die gekeerd kan worden is 1 meter³. Als de waterstand groter is dan de hoogte waarop de grindlaag begint, of de waterdiepte groter dan 1 meter, dan kan de modelleur kiezen voor het ter plaatse laten bezwijken van het lichaam, of tot overlopen van het lijnelement. Meestal wordt het tweede gekozen. De eerste optie is aan te bevelen als het gebied achter de spoorweg het interessegebied is.*

³ Genoemde tekst komt letterlijk uit [D 1]. Verwacht wordt dat met de eerste zin is bedoeld: "Spoorwegen zijn standzeker tot een waterstand van maximaal de onderkant van het ballastbed. Onduidelijk is wat wordt bedoeld met de term "waterdiepte". Mogelijk wordt hiermee de waterdiepte aan de buitenzijde van de spoordijk bedoeld.

- *Voor wegen wordt aangenomen dat deze standzeker zijn. Verhoogde wegen zijn vaak autosnelwegen welke breed en verdicht zijn (Knoeff, 2003). De aannahme wordt daarom realistisch geacht (Provincie ZH handboek p. 15).*
- *Standzekerheid van oude keringen, boezemkades en dijken langs regionale waterlopen dient te worden nagevraagd bij de waterbeheerder.*
- *Geluidswallen langs autowegen worden niet in het hoogtemodel opgenomen, tenzij dit aarden wallen betreft⁴.*
- *Het is belangrijk openingen en onderdoorgangen zoals fietstunnels mee te nemen in de schematisatie.”*

Het uitgangspunt voor spoorwegen lijkt wat aan de conservatieve kant. Ondanks dat spoorwegen/dijken relatief smal zijn, althans t.o.v. Rijkswegen, lijkt het zeer aannemelijk dat deze een maximale waterdiepte (waarschijnlijk wordt hiermee bedoeld “waterhoogte/waterniveau”) van 1 m kunnen weerstaan. Dit uitgangspunt kan aangescherpt worden door een berekeningsmatrix op te zetten om de macro-stabiliteit van spoorwegen in het algemeen beter te kunnen beoordelen. Dit kan opgezet worden op basis van verschillende combinaties van waterniveaus, breedte, hoogte, taluds van de spoordijk etc.

Vooralsnog zijn er geen duidelijke richtlijnen, hoe de stabiliteit van dergelijke keringen en/of grondlichamen beoordeeld dient te worden in het geval er water tot aan de kruin staat. Deze elementen kunnen, in het geval ze als standzeker worden aangenomen, een grote invloed hebben op het verloop van een overstroming. Wel zijn er tools ontwikkeld die hier enigszins in kunnen assisteren, zoals het door Deltares en de STOWA ontworpen DAM (Dijksterkte Analyse Module: <https://www.deltares.nl/nl/software/dam-dijksterkte-analyse-module/>). Hierbij dient vermeld te worden dat DAM gebruik maakt van D-Geo Stability. Voor dit model is veel (specialistische) input nodig.

4.2 Casus 1: Oude Rijngebied

Deze casus richt zijn op het Oude Rijngebied, nabij Zevenaar. Hier zijn nog de restanten te vinden van de Oude Rijn, waar omheen ook dijken staan die als een secundaire verdedigingslinie gelden in het geval van een dijkdoorbraak langs de Rijn of het Pannerdens Kanaal.

Tijdens een eerdere beoordeling in 2007 zijn deze dijken aan de noordkant van de Oude Rijn beoordeeld als regionale keringen, waarbij twee dwarsprofielen zijn getoetst [D 15]. Voor de studie is in overleg met de opdrachtgever gekozen voor de Leuffensedijk.

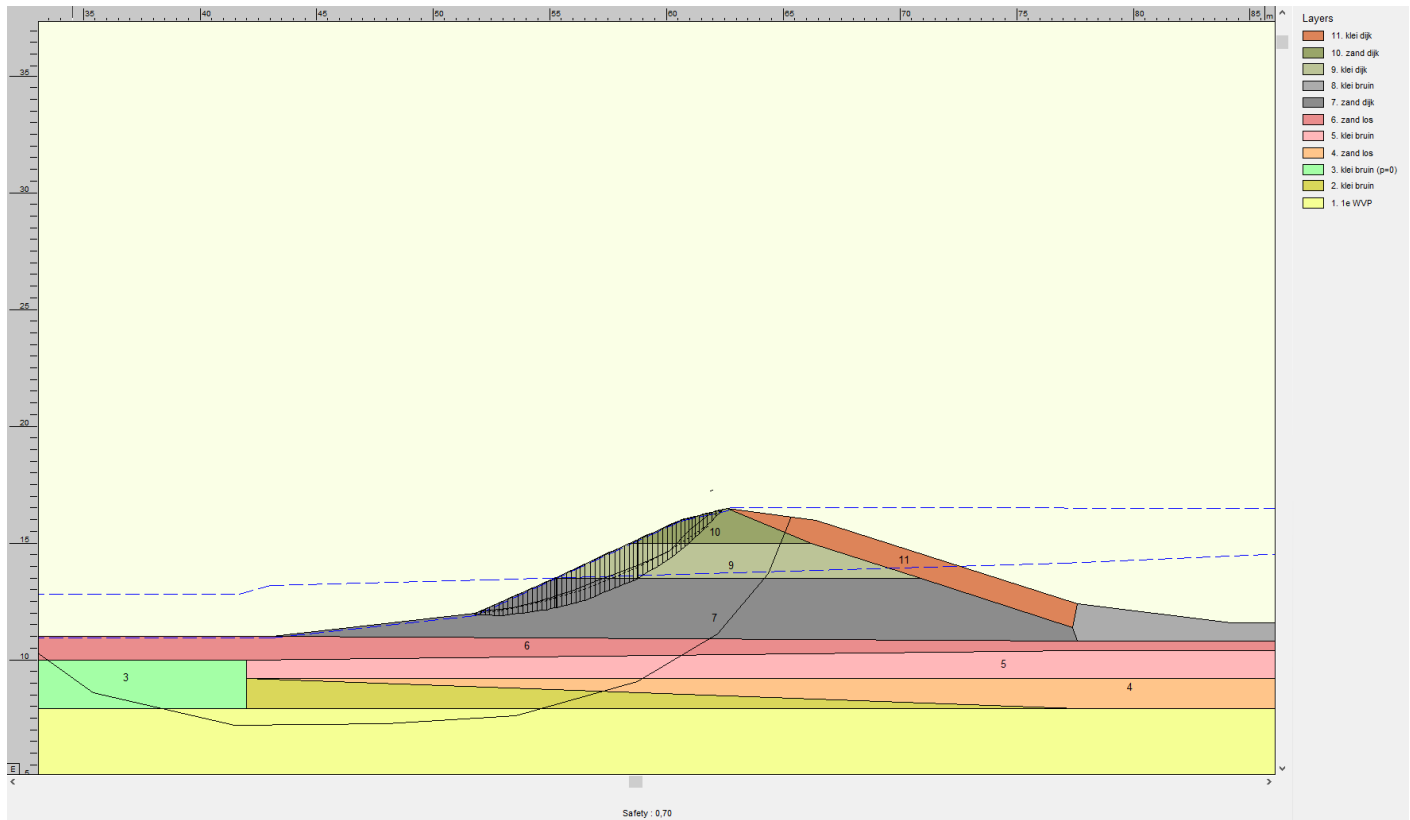
Het Waterschap heeft over de standzekerheid van de Oude Rijn dijken aangegeven dat men twijfelt of deze standzeker zijn bij een waterstand tot aan de kruin en bij overloop.

4.2.1 Stabiliteit

De stabiliteit van de Leuffensedijk is berekend door middel van D-Geo Stability, gebaseerd op een grondopbouw welke is gebruikt in eerdere toetsingen [D 15]. Hier is te zien dat een kleilaag aanwezig is op het buitentalud, maar op het binnentalud de dijkbekleding ontbreekt.

Als maatgevende situatie is aangehouden dat water op kruinniveau staat, dat representatief is voor de extreme situatie waarin de voorliggende primaire kering al bezweken is. Hierbij is rekening gehouden met eventuele overdruk in watervoerende lagen, die is berekend door middel van een interne tool van Arcadis. De stabiliteitsberekening is uitgevoerd volgens de methode van Spencer, welke een glijcirkel geeft aangeeft zoals aangegeven in Figuur 8.

⁴ Op het effect van geluidschermen wordt in de Leidraad niet ingegaan.



Figuur 8 - Stabiliteitsberekening van de Leuffensedijk in het geval van een waterstand tot aan de kruin van de dijk. Lagen: 1 – 1^e Watervoerend pakket; 2,3,5,8,9,11 – Klei; 4,6,7,10 – Zand.

De veiligheidsfactor van de Leuffensedijk onder deze omstandigheden is 0,7. Hierbij is voor alle belasting- en sterkteparameters wel uitgegaan van de rekenwaarden. Om na te gaan of er een gerede kans op falen is, is eigenlijk een berekening noodzakelijk met gemiddelde waarden voor alle parameters. Voor deze quickscan is gekozen voor een pragmatische aanpak: in de stabiliteitsberekeningen is uitgegaan van rekenwaarden, aangezien alleen deze voor ons beschikbaar waren. De berekende veiligheidsfactor dient hiervoor gecorrigeerd te worden. Voor de omrekening van een gemiddelde waarde van de sterkteparameters naar de karakteristieke waarde is uitgegaan van factor 1.2. Dezelfde factor is aangehouden voor het verschil tussen de karakteristieke waarde en de rekenwaarde. Een veiligheidsfactor van 1 op gemiddelde waarden is hiermee vergelijkbaar met een veiligheidsfactor van $1 / (1.2)^2 = 0.69$ op de uitkomst van een berekening gebaseerd op rekenwaarden. Zonder de waarden in de som hierboven aan te passen, kunnen we stellen dat de daadwerkelijke stabiliteit van de Leuffensedijk onder deze omstandigheden onzeker is/net op de grens ligt.

4.2.2 Piping

Voor de beoordeling op piping is uitgegaan van de methode van Bligh. Deze eenvoudige methode linkt de kwelweglengte aan het verval. Met de kwelweglengte wordt hiermee een afstand bedoeld waarover erosie onder het dijklichaam door kan ontstaan. Dit vraagt om een intrede- en uittredepunt. Met het bepalen van deze lengte wordt geen verschil gemaakt tussen de horizontale en verticale afstand, zoals bij latere methodes wel het geval is. De veiligheid is als volgt bepaald:

$$Z_p = \frac{L}{C_{creep}} - \Delta H$$

Waarbij Z_p de mate van veiligheid is voor piping [m], L de kwelweglengte is, C_{creep} een constante is die afhangt van de grondsamenstelling [-], en ΔH het verval is tussen het intrede- en uittredepunt [m]. Voor deze casus is uitgegaan van een constante C_{creep} van 16, gebaseerd op [D 15]. Ook werd er in die analyse uitgegaan van een kwelweglengte van 50 meter, waarvan 20 meter voorland, en een referentie waterstand van 11 m+NAP. Bovenstaande formule geeft een

mate van veiligheid van $Z_p = \frac{50}{16} - (16,5 - 11) = -2,4$. De doorsnede is dus niet veilig voor piping. De maximale waterstand die de Leuffensdijk met betrekking tot piping nog veilig kan keren bedraagt 14,1 m+NAP, terwijl in deze extreme situatie is uitgegaan van een waterstand van 16,5 m+NAP.

4.2.3 Overloop en bresgroei

Voor het simuleren van de bresgroei is gebruik gemaakt van het BRAM-model, die apart het falen van de grasbekleding, het falen van de kleilaag (erosie en head-cut) en de bresgroei in de breedte simuleert. De input parameters zijn hieronder aangegeven. Het BRAM-model is opgebouwd uit bestaande formuleringen voor ieder van de stappen (falen grasbekleding, falen kleibekleding, head-cut erosie en laterale erosie). Voor de input van het model zijn veel specialistische parameters noodzakelijk die zowel de samenstelling, sterkte, en doorlatendheid van de kering en/of grondlichaam beschrijven. Zeker voor elementen die geen onderdeel uitmaken van voormalige toetsingen, zal deze informatie lastig te vinden zijn.

Per parameter is aangegeven waarop de gekozen input voor het BRAM-model is gebaseerd. Dit kan een eerder rapport zijn, een schatting van een expert op basis van de omgeving/type ondergrond/dijkmateriaal of een schatting op basis van eerdere casussen van het BRAM model.

Voor sommige locatie-specifieke informatie is een schatting gevraagd van het Waterschap Rijn en IJssel, waaronder ook de grootte van de polder. Deze bepaald hoe snel het waterniveau stijgt na een bres en daarmee hoe snel er tegendruk ontstaat. Het waterschap is uitgegaan van een relatief grote polder, waarbij er geen tegendruk verwacht kan worden van de stijgsnelheid van het water gedurende de eerste 2-4 dagen. Een langere simulatie zal in de meeste gevallen ook niet nodig zijn omdat de rivierwaterstand over het algemeen na enkele dagen alweer aan het zakken zal zijn.

Tabel 7 - Input waarden BRAM model: falen grasbekleding voor Oude Rijn casus

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid	Bron
Overstroomdebiet	q	0.1	[m ³ /m/s]	Schatting
Talud breedte	x	11	[m]	[D 15]
Lengte gras	L _s	0.15	[m]	Schatting
Plasticiteit index klei	I _p	15	[%]	Schatting
Talud steilheid	[i _b]	0.45	[m/m]	[D 15]
75 ^{ste} percentiel korrelgrootte klei	D _{75,c}	56	[μm]	BRAM model
Gras dekking factor	C _f	0.5	[-]	WRIJ

Tabel 8- Input waarden BRAM model: falen kleilaag voor Oude Rijn casus

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid	Bron
Dikte kleilaag	d _{klei}	0	[m]	[D 15]
Faaldiepte gras	H _{h,i}	0.135	[m]	Schatting
Consolidatie zwelling coëfficiënt	C _{v,sw}	1.1 · 10 ⁻⁹	[m ² /s]	Schatting
Ongedraineerde schuifsterkte	S _u	10.6 · 10 ³	[kN/m ²]	Schatting
Mediaan korrelgrootte klei	D _{50,c}	2.0	[μm]	[D 15]
Klei gedeelte	C _%	0	[kg/kg]	[D 15]

Tabel 9 - Input waarden BRAM model: erosie voor Oude Rijn casus

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid	Bron
Mediaan korrelgrootte kern	D _{50,s}	150	[μm]	Schatting
Porositeit kern	η _s	0.35	[-]	Schatting
Cohesie kleibedekking	c	2	[kN/m ²]	[D 15]
Wrijvingshoek zand	φ _s	35	[°]	[D 15]

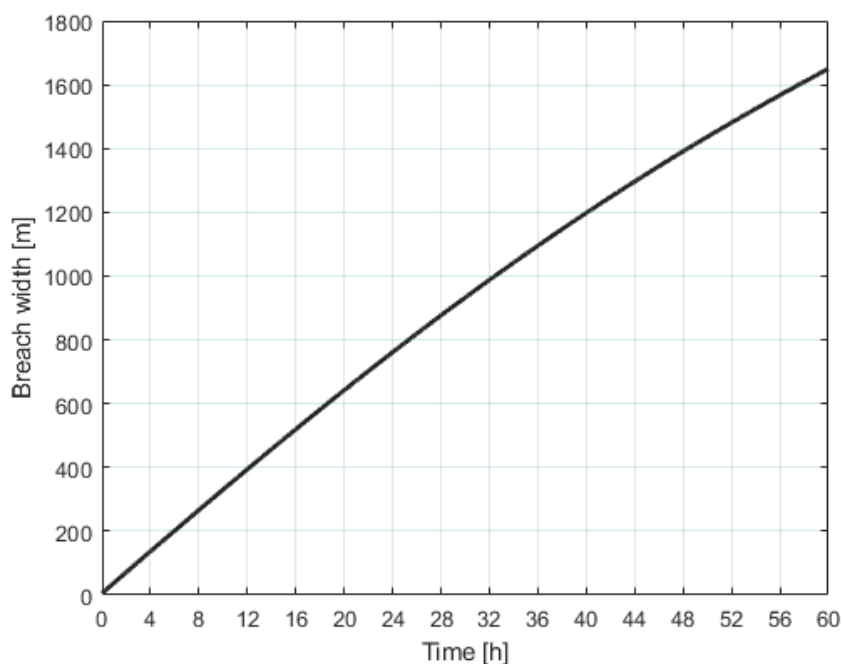
Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid	Bron
Wrijvingshoek klei	ϕ_c	31	[°]	[D 15]
Oppervlakte polder	A_p	1000	[km ²]	WRIJ

Wanneer deze waarden ingevoerd worden in het BRAM-model, kan hiermee de tijdsduur van de verschillende fases van het bresproces worden ingeschat. De resultaten van de berekeningen met het BRAM-model zijn gepresenteerd in Tabel 10. Belangrijke kanttekening hierbij is dat de berekening van de macro-stabiliteit en piping hebben laten zien dat de sterkte tegen macrostabiliteit onzeker/kritisch is en de sterkte tegen piping onvoldoende. Dit betekent dat de doorsnede waarschijnlijk eerder faalt voordat de waterhoogte de kruin bereikt en de eerste stap van erosie (falen grasbekleding) veel sneller zullen plaatsvinden.

Tabel 10 – Samenvatting resultaat beoordeling stabiliteit en piping incl. resultaten BRAM model: Oude Rijn casus

Bezwijkmechanisme	Fase	Resultaat
Standzekerheid	Beheerdersoordeel	Twijfel
Stabiliteit	Waterstand tot aan kruin	0,7 (net niet/net wel stabiel)
Piping	Waterstand tot aan kruin	-2,4 (niet veilig voor piping)
Overloop en bresgroei	Tijd tot falen van de grasbekledingen	5,6 uur
	Tijd tot falen van de kleibekleding	n.v.t.
	Bresbreedte na 48 uur	1400 meter

Figuur 9 laat een inschatting van het verloop van de bresbreedte zien over de tijd. Belangrijk om op te merken hierbij is dat uitgegaan is van een erg grote polder, zoals opgegeven in de opdracht, waardoor er geen binnenwaterstand ontstaat. Aangezien de buitenwaterstand ook niet verandert (de input is niet de hoogwatergolf maar een waterstand), zorgt dit voor een nagenoeg constante aandrijvende kracht en een bijna lineair verloop van de bresgroei. Dit is daarom een hoge schatting.



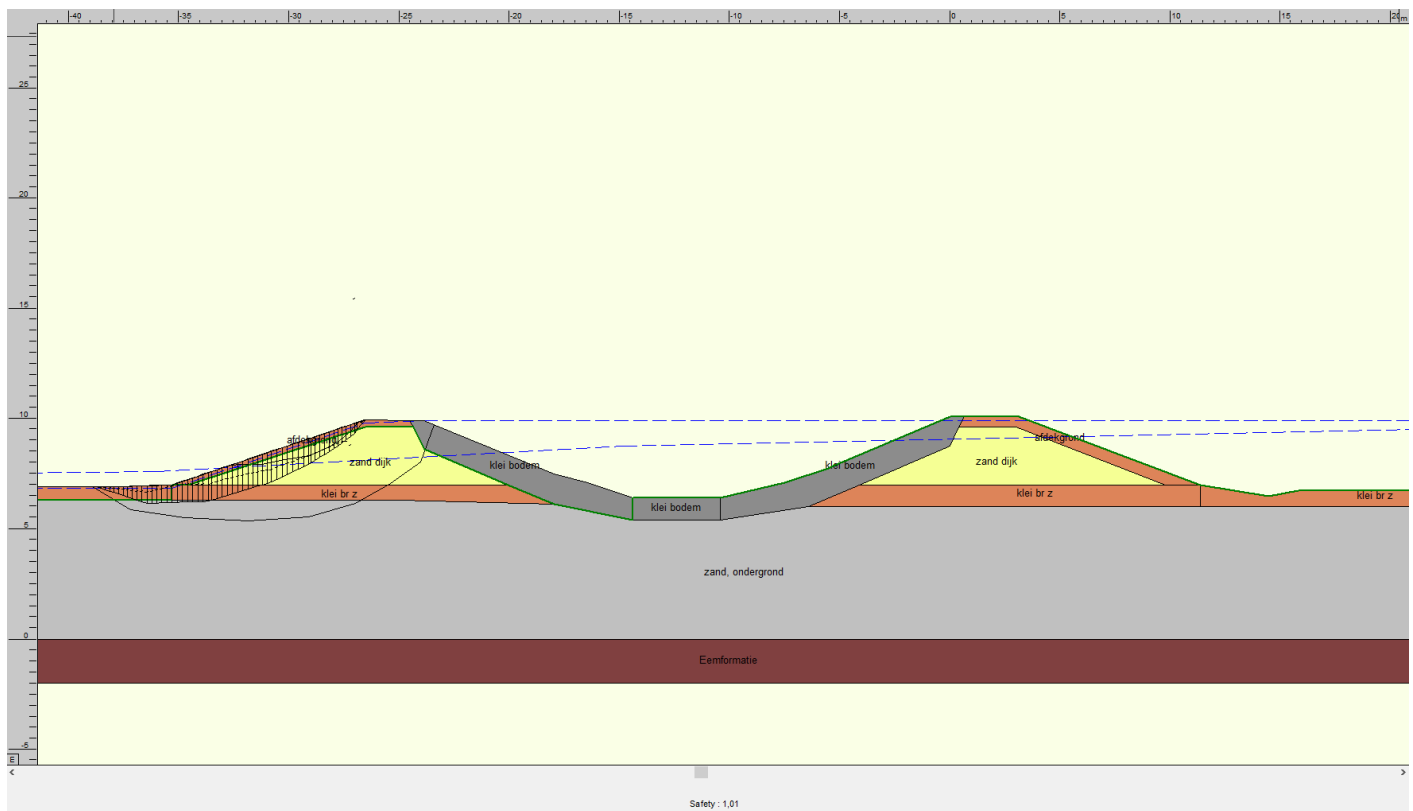
Figuur 9: Resultaat BRAM-berekening Oude Rijngebied

4.3 Casus 2: Stroomkanaal van Hackfort

Deze casus richt zich op het stroomkanaal van Hackfort. Dit kanaal is gegraven voor de lokale afwatering, in het geval van overmatige neerslag. Het kanaal loost het water in de IJssel. De gegevens zijn gebaseerd op de toetsing van een aantal regionale waterkeringen, waar ook de eerste casus op gebaseerd is [D 15]. Ook is er informatie gebruikt uit een geotechnische rapportage van een meer recente kadeverbetering [D 16].

4.3.1 Stabiliteit

De stabiliteit van het Stroomkanaal van Hackfort is berekend voor het maatgevende profiel 27+85, aan de zuidkant. E.e.a. is bepaald op basis van een eerdere analyse [D 16]. Hier is te zien dat de doorsnede een zanddijk betreft met een kleilaag, waarbij er een extra dikke kleilaag aanwezig is op de bodem van het stroomkanaal. De berekening is op dezelfde wijze uitgevoerd als voorgaande berekening. Uit de berekening volgt een glijcirkel zoals aangegeven in Figuur 10.



Figuur 10 - Stabiliteitsberekening van het Stroomkanaal van Hackfort in het geval van een waterstand tot aan de kruin van de dijk.

De veiligheidsfactor het Stroomkanaal van Hackfort onder deze omstandigheden is 1,01. Op basis hiervan en de correctie naar gemiddelde waarden, kunnen we stellen dat de daadwerkelijke stabiliteit van het Stroomkanaal van Hackfort relatief veilig is en dat deze niet zal bezwijken in het geval deze tot op de kruin is belast.

4.3.2 Piping

Uitgegaan is van een constante C_{creep} van 16, gebaseerd op [D 15]. Voor de kwelweglengte is voor deze casus uitgegaan van een intredepunt aan de noordkant (rechts in Figuur 10), waardoor de totale wellengte ongeveer 50 meter wordt. Een intredepunt dicht bij de zuidkant is onwaarschijnlijk vanwege de dikke aangelegde kleilaag. De referentiewaterstand is 7,0 m+NAP. Dit geeft een mate van veiligheid van $Z_p = \frac{50}{16} - (9,9 - 7) = 0,3$. De doorsnede is dus veilig voor piping. De maximale waterstand die het stroomkanaal van Hackfort met betrekking tot piping nog veilig kan keren bedraagt 10,1 m+NAP (0,2 m boven de kruinhoogte). Deze marge is relatief klein, ook al staat de methode van Bligh bekend als een conservatieve schatting.

4.3.3 Overloop en bresgroei

Tabel 11 - Input waarden BRAM model: falen grasbekleding voor casus Stroomkanaal van Hackfort

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid	Bron
Overstroomdebiet	q	0.1	[m ³ /m/s]	Schatting
Talud breedte	x	12	[m]	[D 15]
Lengte gras	L _s	0.15	[m]	Schatting
Plasticiteit index klei	I _p	18	[%]	Schatting
Talud steilheid	[i _b]	0.4	[m/m]	[D 15]
75 ^{ste} percentiel korrelgrootte klei	D _{75,c}	56	[μm]	BRAM model
Gras dekking factor	C _f	0.6	[-]	WRIJ

Tabel 12- Input waarden BRAM model: falen kleilaag voor Oude Rijn casus

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid	Bron
Dikte kleilaag	d _{klei}	0,6	[m]	[D 15]
Faaldiepte gras	H _{h,i}	0.135	[m]	Schatting
Consolidatie zwelling coëfficiënt	C _{v,sw}	1.1 · 10 ⁻⁹	[m ² /s]	Schatting
Ongedraineerde schuifsterkte	S _u	10.6	[kN/m ²]	Schatting
Mediaan korrelgrootte klei	D _{50,c}	30	[μm]	[D 15]
Klei gedeelte	C _%	0.3	[kg/kg]	[D 15]

Tabel 13 - Input waarden BRAM model: erosie voor Oude Rijn casus

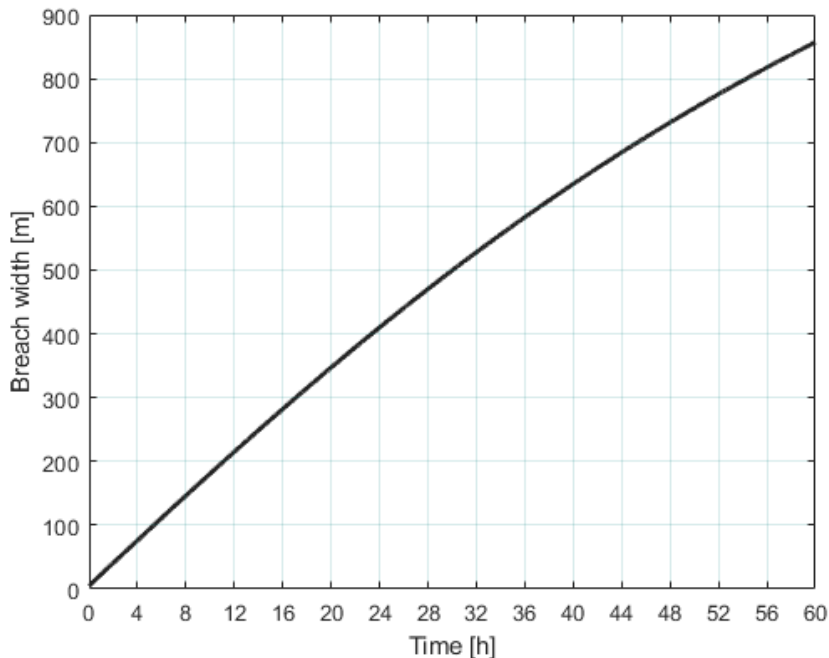
Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid	Bron
Mediaan korrelgrootte kern	D _{50,s}	150	[μm]	Schatting
Porositeit kern	η _s	0.4	[-]	Schatting
Cohesie kleibedekking	c	2	[kN/m ²]	[D 15]
Wrijvingshoek zand	φ _s	34	[°]	[D 15]
Wrijvingshoek klei	φ _c	31	[°]	[D 15]
Oppervlakte polder	A _p	300	[km ²]	WRIJ

De oppervlakte van de polder is gekozen zodanig dat er in 2-4 dagen tijd weinig waterhoogte (en daarmee tegendruk) ontstaat in de polder. Uitgaande hiervan is met het BRAM-model een inschatting gemaakt van de tijd tot falen van de grasbekleding en de kleibekleding en is een simulatie gemaakt van het verloop van de bresbreedte over de tijd. Het resultaat van de berekening is weergegeven in Tabel 14 en Figuur 11.

Tabel 14 - Samenvatting resultaat beoordeling stabiliteit en piping incl. resultaten BRAM model: casus Stroomkanaal van Hackfort

Bezwijkmechanisme	Fase	Resultaat
Standzekerheid	Beheerdersoordeel	Geen
Stabiliteit	Waterstand tot aan kruin	1,01 (stabiel)
Piping	Waterstand tot aan kruin	0,3 (veilig voor piping)
Overloop en bresgroei	Tijd tot falen van de grasbekledingen	5,4 uur
	Tijd tot falen van de kleibekleding	7,8 uur
	Bresbreedte na 48 uur	730 meter

Figuur 11 laat het verloop van de bresbreedte zien over de tijd. Net als in de vorige casus is hier een nagenoeg lineair verloop door de relatief grote polder en de constante waterstand bovenstrooms.



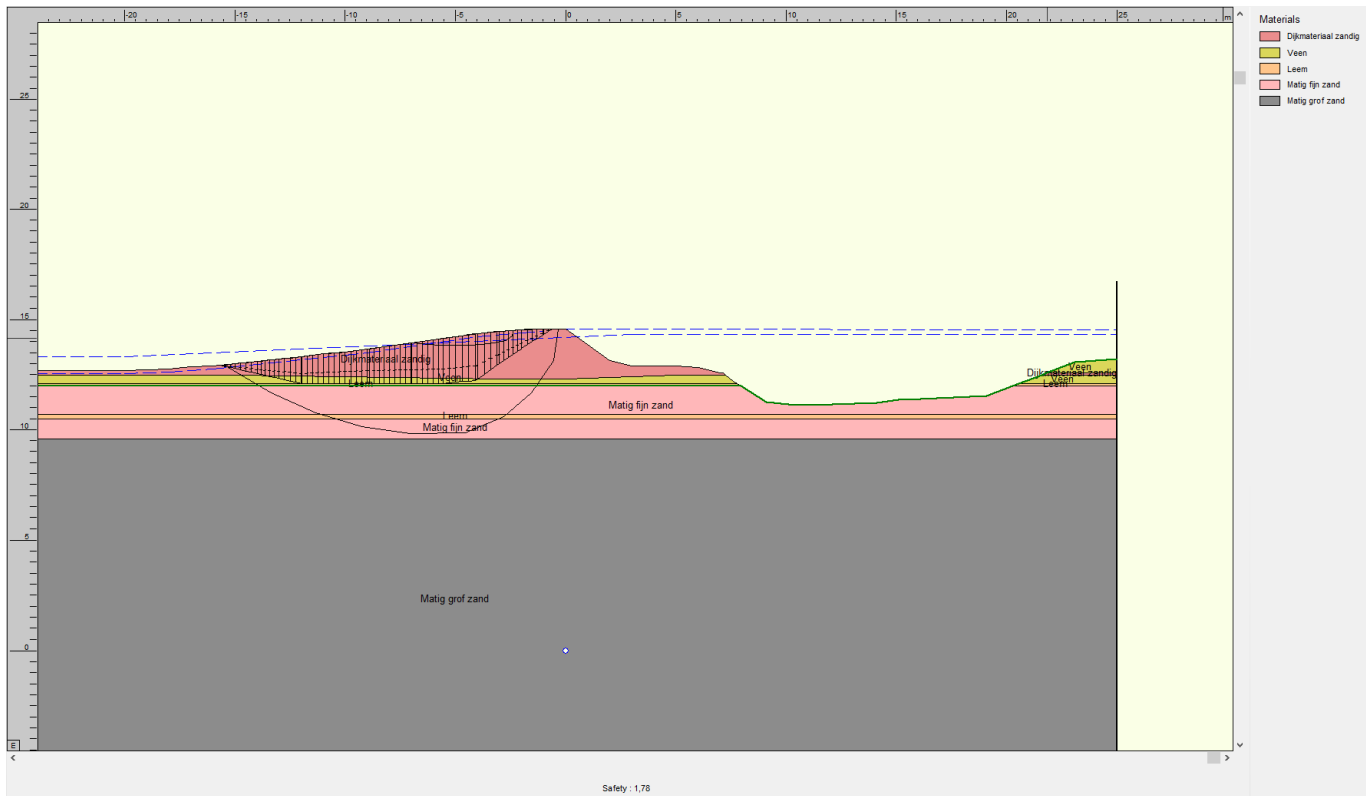
Figuur 11: Resultaat BRAM-berekening casus Stroomkanaal van Hackfort

4.4 Casus 3: Schipbeek

De derde casus betreft de locatie Schipbeek. Deze locatie was deel van een inventarisatie van Waterschap Rijn en IJssel naar de stabiliteit van niet genormeerde waterkeringen[D 17]. Het Waterschap heeft aangegeven dat deze stabiel zal zijn bij een waterstand tot aan de kruin.

4.4.1 Stabiliteit

De stabiliteit van de oever langs de Schipbeek is gebaseerd op het maatgevende traject 9, gebaseerd op een eerdere analyse [D 16]. De dijk bestaat volledig uit zand, op een ondergrond van veen en enkele afwisselende zand- en leemlagen. Uit de stabiliteitsberekening volgt een glijcirkel zoals aangegeven in Figuur 12 .



Figuur 12 - Stabiliteitsberekening van de oever langs de Schipbeek in het geval van een waterstand tot aan de kruin van de dijk.

De veiligheidsfactor van de Schipbeek onder deze omstandigheden is 1,76. Zonder de waarden in de som hierboven aan te passen voor de correctie naar gemiddelde waarden, kunnen we stellen dat de daadwerkelijke stabiliteit van de Schipbeek onder deze omstandigheden veilig is.

4.4.2 Piping

Uitgegaan is van een constante C_{creep} van 16, gebaseerd op de korrelgrootte. Voor de kwelweglengte is uitgegaan van een lengte van 27,5 meter en een referentie waterstand van 12,7 m+NAP [D 17]. Dit geeft een veiligheid van $Z_P = \frac{27,5}{16} - (14,6 - 12,7) = -0,2$. De doorsnede is dus niet veilig voor piping. De maximale waterstand die de oever langs de Schipbeek met betrekking tot piping nog veilig kan keren bedraagt 14,4 m+NAP (0,2 m onder de kruinhoogte). Deze marge is relatief klein, waarbij aangetekend dient te worden dat de methode van Bligh bekend staat als een conservatieve methode.

4.4.3 Overloop en bresgroei

Tabel 15 - Input waarden BRAM model: falen grasbekleding voor casus Stroomkanaal van Hackfort

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid	Bron
Overstroomdebiet	q	0.1	[m ³ /m/s]	Eis
Talud breedte	x	20	[m]	[D 17]
Lengte gras	L_s	0.15	[m]	Schatting
Plasticiteit index klei	I_p	18	[%]	Schatting
Talud steilheid	$[i_b]$	0.11	[m/m]	[D 17]
75 ^{ste} percentiel korrelgrootte klei	$D_{75,C}$	56	[μm]	[D 17]
Gras dekking factor	C_f	0.6	[-]	WRIJ

Tabel 16- Input waarden BRAM model: falen kleilaag voor Oude Rijn casus

Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid	Bron
Dikte kleilaag	d_{klei}	0	[m]	[D 17]
Faaldiepte gras	$H_{h,i}$	0.135	[m]	Schatting
Consolidatie zwelling coëfficiënt	$C_{v,sw}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$	[m ² /s]	Schatting
Ongedraineerde schuifsterkte	S_u	10.6	[kN/m ²]	Schatting
Mediaan korrelgrootte klei	$D_{50,c}$	30	[μm]	Schatting
Klei gedeelte	$C_{\%}$	0	[kg/kg]	Schatting

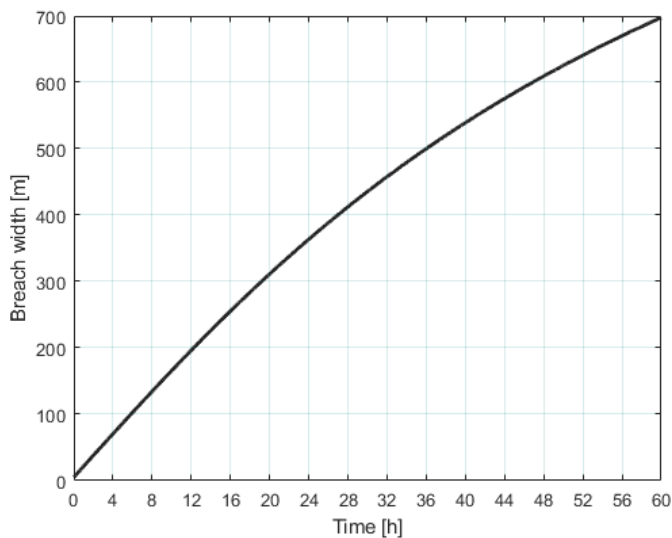
Tabel 17 - Input waarden BRAM model: erosie voor Oude Rijn casus

Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid	Bron
Mediaan korrelgrootte kern	$D_{50,s}$	150	[μm]	Schatting
Porositeit kern	η_s	0.4	[-]	Schatting
Cohesie kleibedekking	c	2	[kN/m ²]	[D 17]
Wrijvingshoek zand	ϕ_s	34	[°]	[D 17]
Wrijvingshoek klei	ϕ_c	31	[°]	[D 17]
Oppervlakte polder	A_p	100	[km ²]	WRIJ

De oppervlakte van de polder is gekozen zodanig dat er in 2-4 dagen tijd weinig waterhoogte (en daarmee tegendruk) ontstaat in de polder. Uitgaande hiervan is met het BRAM-model een inschatting gemaakt van de tijd tot falen van de grasbekleding en is een simulatie gemaakt van het verloop van de bresbreedte over de tijd. Het resultaat van de berekening is weergegeven in Tabel 18 en Figuur 13. Opvallend is hier de veel langere tijd tot falen van de grasbekleding, dat is het gevolg van de zeer flauwe helling.

Tabel 18 - Samenvatting resultaat beoordeling stabiliteit en piping incl. resultaten BRAM model: casus Schipbeek

Bewijkmechanisme	Fase	Resultaat
Standzekerheid	Beheerdersoordeel	Stabiel
Stabiliteit	Waterstand tot aan kruin	1,76 (stabiel)
Piping	Waterstand tot aan kruin	-0,2 (net niet veilig voor piping)
Overloop en bresgroei	Tijd tot falen van de grasbekledingen	36 uur
	Tijd tot falen van de kleibekleding	n.v.t.
	Bresbreedte na 48 uur	600 meter



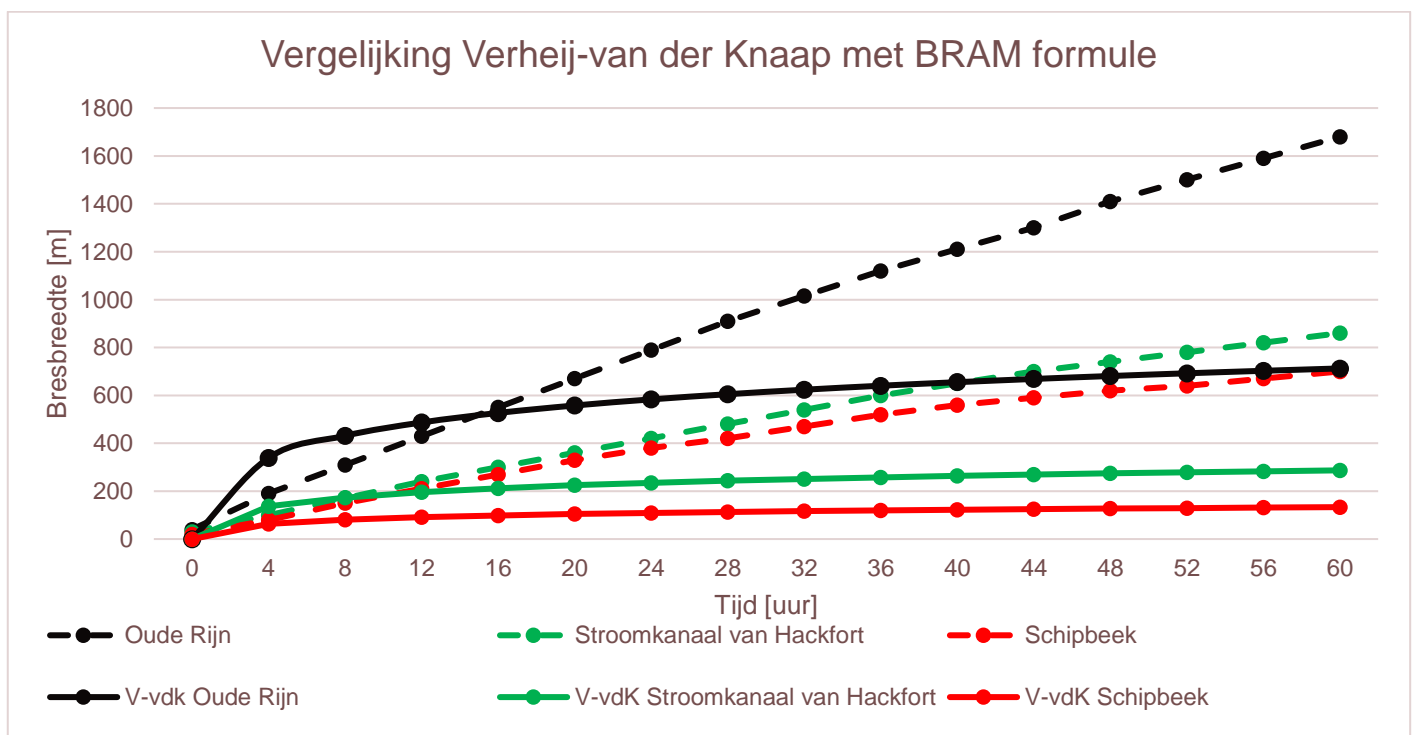
Figuur 13: Resultaat BRAM-berekening casus Schipbeek

4.5 Discussie

In dit hoofdstuk is aan de hand van drie casussen beschouwd wat de beste schatting is van de standzekerheid en de grootte van de bres na enkele dagen.

4.5.1 Bresgroei

Het verloop van de bresgroei is benaderd aan de hand van het BRAM-model. De resultaten daarvan zijn hieronder samengevat en vergeleken met dezelfde simulatie met de Verheij-van der Knaap formule (Figuur 14).



Figuur 14 Vergelijking van de resultaten van de Verheij-van der Knaap formule met het BRAM model voor drie casussen genoemd in dit hoofdstuk.

Uit de analyse en resultaten vallen een aantal punten op. Ten eerste laat het BRAM-model significant grotere bresbreedtes zien. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het relatief grote achterland en de gelijkblijvende waterhoogte bij de bres. Dit laatste is in veel gevallen geen realistische aanname, zeker op een tijdschaal van 60 uur. Een ander verschil is dat in echte situaties, waar de empirische Verheij-van der Knaap formule op gebaseerd is, er eerder een fysieke barrière zal ontstaan die de bresgroei tegenhoudt of remt, zoals een verandering in de dijkdoorsnede die wel stabiel is of een dusdanig verlies van aandrijvende kracht dat de bres stopt met groeien. Ten derde begint de Verheij-van der Knaap formulering sneller, omdat de erosie van de grasbekleding en kleibekleding niet of beperkt impliciet is meegenomen in deze formulering.

Het gebruik van het BRAM-model brengt een aantal randvoorwaarden met zich mee:

- Ten eerste heeft het BRAM-model relatief gedetailleerde grondparameters nodig om een goede inschatting van de bresgroei te kunnen maken. Een aantal van deze parameters, zoals de consolidatie coëfficiënt, de plasticiteit en de korrelgroottes zijn lastig in te schatten zonder laboratoriumonderzoek en hebben een grote invloed op de uitkomsten. Dit maakt het gebruik van dit soort modellen (proces-georiënteerde) minder geschikt om op grote schaal lijnvormige kerende elementen mee te analyseren.
- Daarnaast laat het verloop van de bresbreedte over de tijd een belangrijk verschil tussen de Verheij-van der Knaap formule en het BRAM-model zien. De aandrijvende kracht in de Verheij-van der Knaap formule is het verschil in waterhoogte in de beginsituatie. Hierbij heeft de grootte van de polder dus geen invloed. In D-Hydro wordt dit wel meegenomen door voor ieder tijdstip te rekenen met het actuele waterstandverschil. Deze formulering is hier echter niet op gefit. In het BRAM-model is de poldergrootte een belangrijke variabele aangezien deze bepaalt hoe snel het waterniveau in de polder stijgt en leidt tot tegendruk. Bij een oneindig grote polder ontstaat deze tegendruk niet en blijft de bres – bij gelijke buitenwaterstand – met een constante snelheid groeien. Dit is terug te zien in de resultaten van de berekeningen met het BRAM-model. Als de schematisatie van de bresgroei in het BRAM-model klopt, kan er dus worden gesteld dat de Verheij-van der Knaap formule voor grote polders de bresgrootte onderschat, aangezien impliciet van een beperkte poldergrootte wordt uitgegaan (namelijk de groottes van de onderliggende data waar de empirische formule op gebaseerd is).
- Een ander punt is dat het BRAM-model uitgaat van een intacte grasbekleding en kleibekleding. Mocht de doorsnede bezwijken door een ander faalmechanisme, zoals macrostabiliteit of piping, dan zal de kern meteen bloot komen te liggen en worden de erosiefases van deze lagen overgeslagen. Hiermee dient dan rekening te worden gehouden in de modellering met het BRAM-model.

Voor twee casussen is door het Waterschap een oordeel gegeven over de standzekerheid van de Oude Rijn dijken en de locatie Schipbeek. Het oordeel van het Waterschap komt voor deze twee casussen goed overeen met de resultaten van de stabiliteitsberekeningen. Alleen het effect van piping lijkt wat onderschat te worden. Bij de beoordeelde Leuffensedijk (onderdeel van de Oude Rijn dijken) wordt ruim niet voldaan aan het criterium wat betreft piping. Het effect van piping lijkt dus in het beheerdersoordeel onderschat te worden. Bij de locatie Schipbeek wordt het criterium tegen piping net overschreden. Bij de beoordeling van het resultaat van de piping-berekening dient ermee rekening gehouden te worden dat de toegepaste rekenmethode (Bligh) conservatief is en dat piping niet direct hoeft te leiden tot verlies van standzekerheid. Hiermee kan gesteld worden dat bij de locatie Schipbeek het beheerdersoordeel overeenkomt met de uitkomsten van de stabiliteit- en pipingberekeningen.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In dit rapport is een quickscan uitgevoerd naar de bresgroei en standzekerheid van lijnvormige elementen. Hiervoor is een korte literatuurstudie uitgevoerd naar de huidige manier waarop bresgroei is geschematiseerd in D-Hydro en de formules die hierin gebruikt worden. Ook is van een aantal representatieve casussen de standzekerheid en het verloop van de bresgroei getest. Op basis van deze informatie zijn de vragen beantwoord die het Waterschap Rijn en IJssel in dit onderzoek heeft voorgelegd omtrent de impact van lijnvormige kerende elementen. Per vraag is omkaderd een bondig antwoord geformuleerd. De onderbouwing en discussie per vraag is daaronder weergegeven.

5.1.1 Bresgroei

- A. Welke formule/parameters kan het waterschap het beste gebruiken om de bresgroei in D-Hydro op vooraf in het overstromingsmodel opgelegde breslocaties in lijnvormige kerende elementen te bepalen?**

Vooralsnog kan het beste uitgegaan worden van de bestaande Verheij-van der Knaap formulering. Het is een eenvoudig model met relatief weinig complexe invoerparameters die is gekijkt op bressen in Nederlandse dijken. Daarbij is onderscheid mogelijk bij bresvorming in een dijk met een kern bestaande uit klei of zand. Er zijn wel wat beperkingen van toepassing (zie conclusie A.1). Deze kunnen ondervangen worden door de handreikingen die onder conclusie A.2 zijn benoemd. Een alternatief kan zijn om gebruik te maken van het aan de TU Delft recent ontwikkelde bresgroeimodel [D 5]. Nadeel is dat dit model alleen van toepassing is voor zanddijken.

De ontwikkeling van een bres in D-Hydro is gebaseerd op de Verheij-van der Knaap formulering. Dit is een empirische formule. Deze is gebaseerd op historische data van bressen in plaats van een fysische beschrijving van het bresproces. Hierdoor zitten er in de formule enkele constanten die sterk afhankelijk zijn van de bressen die als onderliggende data zijn gebruikt. Kijkend naar deze onderliggende data en de huidige aannames in D-Hydro, zijn deze constanten sterk gericht op zanddijken en zijn veel van de gedetailleerde bressen relatief klein en kortdurend (in de meeste gevallen omdat dit bresproeven zijn). Ook is het effect van bekledingen, zoals een beschermende kleilaag of een grasbekleding niet als vaste (vertragingstijd) meegenomen. Een andere opbouw, zoals een kleidijk of een zandkern met een kleibekleding, en de aanwezigheid van een grasbekleding kunnen grote invloed hebben op de tijd waarin een bres ontstaat en de snelheid waarin deze groeit. Uit [Verbeek, 2020] blijkt dat in het geval van een goede gras- en kleibekleding bij een overslagdebiet van 100 l/s/m deze vertragingstijd tussen de 3 en 15 uur kan bedragen. Overigens dient vermeld te worden dat voor het ontstaan van bijvoorbeeld macro-instabiliteit ook enige tijd noodzakelijk is voordat dit mechanisme optreedt. Voordat de kering voldoende verzwakt is en deze faalt, moeten de grondwaterstand in de kering en de stijghoogtes daaronder zich voldoende hebben aangepast aan de buitenwaterstand. Op basis van de recente wateroverlast in Zuid-Limburg kunnen wij bijvoorbeeld aannemen dat de dijken langs de Oude Rijn een belasting tot de kruinhoogte enkele dagen kunnen weerstaan. Overigens geven bovenstaande (vertragingstijd)-mechanismen de beheerder de kans om maatregelen te nemen zodat bres-initiatie niet optreedt of bresinitiatie enkele dagen uitgesteld wordt. Bres-initiatie kan ook geaccepteerd worden ter voorkoming van problemen op andere locaties.

Daarnaast dient vermeld te worden dat de Verheij-van der Knaap formulering gebaseerd is op eindbreedtes, die na een zekere tijd zijn bereikt. De formulering is bijna niet gebaseerd op data waarbij de bresgroeisnelheid is gemeten, terwijl de formulering daar wel een uitspraak over doet. Dit maakt de formulering onbetrouwbaar t.a.v. de snelheid van bresgroei, alhoewel de berekende bresgroeisnelheid goed overeenkomt met de metingen van de bresproef in het 'Zwin. Hierbij dient wel aangetekend te worden dat de Verheij-van der Knaap formulering o.a. op deze metingen gefit is. Het verdient aanbeveling om een nadere studie uit te voeren naar data waarbij de snelheid van de bresgroei in de breedte gemeten is, om de Verheij-van der Knaap formulering nader te toetsen.

Een derde aandachtspunt betreft de schematisatie van de Verheij-van der Knaap formule in D-Hydro. Hier zijn twee factoren die een significante invloed kunnen hebben op het verloop van de bresgroei:

- De Verheij-van der Knaap formule is opgezet om de eindbreedte van een bres in te schatten op basis van de waterstandverschillen op het moment van falen van de kering. Een simulatie die deze formule gebruikt in een numeriek model (e.g. D-Hydro), waarbij voor elke tijdstap de waterhoogtes worden geüpdatet, zal daardoor leiden tot een kleinere bresbreedte dan de waargenomen bresbreedtes waarop de Verheij-van der Knaap formulering is gebaseerd.
- De Verheij-van der Knaap formule neemt niet de grootte van het achterland mee als variabele. Dit zit impliciet in de onderliggende data (die een bepaalde eindtijd en eindbreedte hebben). Als gevolg hiervan zal de formule waarschijnlijk voor een dijk met een relatief klein achterland de bresbreedte overschatten, en voor een dijk met een relatief groot achterland de bresbreedte onderschatten.

Bovenstaande impliceert een nadere analyse van een bresgroeisnelheidsrelatie, waarbij de fit-parameters bepaald worden op basis van de gemeten bresgroei en bijbehorend waterstandverval over de bres in de tijd. Een dergelijke formulering is goed toepasbaar in D-Hydro omdat in D-Hydro de waterstanden en dus het verval over de bres als functie van de tijd worden berekend. Meer geavanceerde modellen zijn beschikbaar, maar hebben meer grondinformatie, rekentijd, en expertise van de gebruiker nodig. Voor specifieke kleinschalige onderzoeken is dit zeker een optie, maar het is de vraag of deze verbeterde simulatie de nadelen waard is in een D-Hydro overstromingssimulatie, wat in de huidige vorm al veeleisend is op het gebied van rekentijd en complexiteit. Voor lijnvormige kerende elementen is het daarom aangeraden om de huidige methode van schematiseren aan te houden, waarbij er duidelijke sets van parameters en constanten zijn gedefinieerd die afhankelijk zijn van het type dijk (zanddijk, kleidijk, kleidijk met zandkern) en het type bekleding (geen, slecht/goed onderhouden grasbekleding, enz.). Gebruik van andere formuleringen, zoals die voor dammen, wordt vooralsnog afgeraden, omdat deze gebaseerd zijn op relatief hoge dammen (hoger dan 5 m) en materialen en bekledingen die niet vergelijkbaar zijn met de Nederlandse situatie.

Recent is aan de TU Delft een geavanceerder bresgroeimodel ontwikkeld [D 5] dat in de basis ook gedetailleerde informatie nodig heeft. Echter door gebruik te maken van een empirisch bepaalde erosierelatie kan een betere schatting gekregen worden van de eindbreedte van een bres dan met de Verheij-van der Knaap formulering. Met genoemd bresgroeimodel kan alleen de breedtegroei bepaald worden voor een dijk opgebouwd uit een zandkern.

Wanneer de bresgroei een belangrijke rol speelt in het verloop van de overstroming en/of een analyse noodzakelijk is van de inzet van noodmaatregelen, is het mogelijk doormiddel van een geavanceerder model (bijv. BRAM-model, d'Eliso, AREBA) de bresgroei in te schatten en de inputparameters van het D-Hydro model zodanig aan te passen dat dit beter benaderd wordt. Ook de tijd voor het falen van de gras- en/of kleibekleding kan dan meegenomen worden. Op de langere termijn wordt aangeraden om een dergelijke meer gedetailleerde schematisatie een keuzemogelijkheid te maken binnen D-Hydro, waardoor dit binnen het model te variëren en controleren is. Als gekozen wordt dit type modellen te gaan implementeren in D-Hydro dient wel een nadere toetsing plaats te vinden van de validiteit van deze modellen op basis van goed gedocumenteerde werkelijke (proef)-dijk/dam doorbraken.

A.1 Voldoet de Verheij-van der Knaap formulering?

De Verheij-van der Knaap formulering heeft de volgende beperkingen:

- **het betreft een empirisch model dat is gebaseerd op bressen in voornamelijk Nederlandse dijken;**
- **het model berekent alleen de breedtegroei van de bres;**
- **de tijdsduur tot de nul-fase (bresinitiatie) wordt niet meegenomen;**
- **de tijdsduur van de verdieplingsfase wordt niet meegenomen. Wel kan in D-Hydro hiervoor een aanname worden gedaan;**
- **de bresgroeisnelheid is gebaseerd op data van de eindbreedte en het moment waarop deze is bereikt, niet op de werkelijke groeisnelheid van een bres;**
- **de formulering is gebaseerd op het initiële waterstandverschil over de bres, terwijl in D-Hydro uitgegaan wordt van het actuele waterstandverschil over de bres. Dit leidt bij toepassing in D-Hydro in het algemeen tot een onderschatting van de bresgroei/eindbreedte;**
- **de grootte van de polder beïnvloedt de grootte van het waterstandverschil over de bres, maar is geen input-parameter. Bij relatief grote en kleine polders zal dit leiden tot grote afwijkingen van de werkelijke bresgroei;**
- **de snelheid bij aanvang van de bresgroei lijkt overschat te worden.**
- **het model kan grote afwijkingen geven van de werkelijke bresgroei bij kleidijken.**

Het gebruik van de Verheij-van der Knaap formule binnen D-Hydro is een compromis, waarbij een zeer complex proces moet worden geschematiseerd in een model dat hier minimale rekentijd aan kwijt mag zijn. Voor veel overstromingssimulaties is de Verheij-van der Knaap formule hiervoor voldoende accuraat. Denk hierbij aan simulaties waarin de interesse vooral ligt bij de omvang van de overstroming of maximale waterdieptes. Ook is deze empirische formule geijkt op een aantal situaties die kenmerkend Nederlands zijn.

Wanneer er behoefte is aan meer detail, of een dijkdoorsnede ongebruikelijke kenmerken vertoont – e.g. een andere grondopbouw, geometrie of een ongebruikelijke grootte van het achterland – kan de Verheij-van der Knaap formule echter snel onvoldoende precies zijn. Hier zijn nauwkeurigere (sub)-modellen voor beschikbaar, maar die hebben al snel veel meer (grond)-parameters en rekentijd nodig. Ook deze modellen hebben natuurlijk hun onzekerheden. Op het moment is het gebruik van deze modellen nog niet mogelijk binnen D-Hydro.

A.2 Welke parameterwaarden kunnen het best gebruikt worden?⁵

Bij toepassing van de Verheij-van der Knaap formulering kan het beste uitgegaan worden van:

- **het initiële waterstandverschil over de bres;**
- **toepassing van de kritieke stroomsnelheid (u_c) conform Tabel 2;**
- **de waarde voor de grondsoort als input voor Tabel 2 en de aanbevelingen in [D 20] dient gebaseerd te zijn op de samenstelling van het kernmateriaal van het waterkerende element;**
- **neem de tijdsduur voordat verlies van standzekerheid (nul-fase, bresinitiatie) optreedt mee. Dit betekent voor:**
 - **macro-instabiliteit:**
 - **tijdsduur verzadiging: 4 tot 12 uur;**
 - **tijdsduur afschuiving: 4 tot 12 uur;**
 - **piping: ca. 2 dagen (zonder noodmaatregelen) en 2 weken (met noodmaatregelen);**
 - **erosie gras- en kleibekleding: 4 tot 24 uur.**
- **voor de tijdsduur van de verdiepingsfase kan een waarde van 0,1 uur (zand) en 1 uur (klei) worden aangehouden nadat verlies van standzekerheid is opgetreden. E.e.a. hangt wel af van de samenstelling van de kleibekleding.**
- **voor de initiële bresbreedte kan een waarde van 10 m aangehouden worden.**

Als uitgegaan wordt van het initiële waterstandverschil over de bres in D-Hydro, blijft wel het risico bestaan dat de bres blijft groeien terwijl er geen water meer door de bres stroomt. Dit kan met name optreden bij kleine polders, waar het waterstandverschil snel zal afnemen.

Wat betreft de tijdsduur voordat verlies van standzekerheid optreedt, kan uitgegaan worden van het moment waarop de maximale waterstand is bereikt. Overigens zal in de praktijk de waterstand in een waterkerend element zich gaan aanpassen voordat deze maximale waterstand is bereikt.

De erosie van de gras- en kleibekleding zal optreden op het moment dat er water over de kruin stroomt. Dit is afhankelijk van waterstand t.o.v. de kruinhoogte van het waterkerende element en de grootte van de golven.

⁵ De genoemde tijdsduren voor het ontstaan van een afschuiving door macro-instabiliteit en/of piping en de erosie van de gras- en kleibekleding betreffen grove indicaties. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen in hoeverre genoemde schattingen realistisch zijn en/of nader gespecificeerd dienen te worden.

A.3 Zijn er “betere” bresgroeimodellen beschikbaar? Welke en hoe werken deze? Welke input-parameters zijn noodzakelijk? Is het model complex of is veel input vereist?

Onderscheid kan worden gemaakt in (empirische) modellen die zich alleen richten op de bresgroeisnelheid en proces-georiënteerde bresmodellen die de erosie en/of het bezwijken van alle onderdelen van een waterkerend element mee nemen. Voor grote regionale overstromingsstudies zal het voldoende zijn om uit te gaan van een eenvoudig empirisch bresgroeimodel en tijdsduur tot bresinitiatie in te schatten op basis van kentallen. Voor specifieke studies waarbij alleen gekeken wordt naar het bresgedrag van een enkel waterkerend element kan overwogen worden uit te gaan van een meer proces-georiënteerd model.

Een eenvoudig bresgroeimodel waarmee een betere/nauwkeurigere voorspelling mogelijk is, is het door de TU Delft ontwikkelde bresgroeimodel. Dit model is theoretisch onderbouwd, maar is door de toepassing van één erosieconstante praktisch toe te passen. Nadeel van dit model is dat dit alleen van toepassing is voor een waterkerend element waarvan het kernmateriaal uit zand bestaat.

In het geval van een waterkerend element waarvan het kernmateriaal uit klei (cohesief materiaal) bestaat, is het niet zo eenvoudig om een goed alternatief te noemen, ook omdat het erosieproces van klei zeer onregelmatig is en er diverse fysische processen een rol spelen. Als eerste start kan het model van Zhu [D 4] verder ontwikkeld worden of gebruik gemaakt worden van een head-cut model voor klei.

Modellen die niet alleen kijken naar de bresgroeisnelheid, maar het gehele erosieproces van een waterkerend element beschouwen zijn het AREBA-model, het model van d'Eliso en het BRAM-model. Dit zijn meer proces-georiënteerde modellen, waardoor het makkelijker is de afmetingen en de samenstelling van de verschillende onderdelen van een waterkerend element mee te nemen. Nadeel van deze modellen is wel dat meer input parameters benodigd zijn.

Er zijn modellen beschikbaar die in staat zijn de mechanismen van bresinitiatie en bresgroei beter te simuleren. Voor een samenvattende lijst van deze modellen en wat ze simuleren, zie hoofdstuk 2.7. Deze modellen zijn vaak proces-georiënteerd en betreffen over het algemeen een combinatie van fysisch gebaseerde en empirische modellen. Dit houdt in dat ze de daadwerkelijke erosieprocessen proberen te schematiseren en in te schatten, in plaats van een inschatting doen op basis van historische data. Het grote voordeel hiervan is dat deze altijd toepasbaar zijn – zolang het proces zich voordoet -, in tegenstelling tot empirische modellen die heel afhankelijk zijn van de omstandigheden van de onderliggende data. Het nadeel van de nieuwere, meer precieze modellen is dat ze veel meer grondparameters nodig hebben. Ook heeft de onzekerheid van een aantal van deze parameters grote invloed op het verloop van de bresgroei. Dit maakt zulke modellen minder geschikt voor keringswerken waar weinig informatie over beschikbaar is. Een eerste stap voor het toepassen van een beter bresgroeimodel, zou kunnen zijn het toepassen van het model dat recent ontwikkeld is aan de TU Delft voor bressen in waterkerende elementen waarvan de kern uit zand bestaat, zoals beschreven in [D 5]. Dit is een theoretisch onderbouwd model, dat in de basis veel en gedetailleerde input parameters nodig heeft, maar door de toepassing van één erosieconstante ook praktisch toe te passen is. Met dit model zijn nauwkeurigere schattingen te maken van de eindbreedte van een bres dan met de Verheij-van der Knaap formulering. Voor de beoordeling van de bresgroeisnelheid zal dit model nog wel verder gevalideerd dienen te worden.

A.4 Is een uitspraak mogelijk of meerdere bressen in een dijk of lijnvormige elementen tijdens één hoogwater kunnen ontstaan?

Over het algemeen kan gesteld worden dat meerdere bressen ontstaan in situaties waarbij de belasting groter is dan de ontwerpbelasting, zoals in 1953 in Zeeland. Deze mate van overbelasting is voor de huidige primaire keringen niet meer aan de orde. Daarnaast ontstaan meerdere bressen eerder in keringen of lijnvormige elementen met een uniforme samenstelling, zoals nieuwe waterkeringen en baanlichamen van bijvoorbeeld spoordijken en/of wegen. Oudere waterkeringen zijn doorgaans erg heterogeen van samenstelling en/of opbouw, waardoor deze eerder zullen bezwijken op één (de zwakste) plek.

De precieze locatie of het ontstaan van meerdere bressen is uiterst onzeker. Wel zijn er een aantal kenmerken die een zwak punt in een kering kunnen markeren, zoals woningen, palen, wandelpaden, overgangen tussen grasbekleding en harde elementen. Door scouring⁶ langs deze objecten kan, lokaal, de sterkte van een kering beïnvloed worden. Als, over de lengte van een kering gezien, zich dus meerdere elementen in de kering bevinden, dan zal de kans dat op meerdere locaties min of meer tegelijkertijd bressen ontstaan groter zijn.

Hiernaast is er een kwalitatieve vergelijking te maken over het ontstaan van meerdere bressen tussen (primaire) dijken en lijnvormige elementen. Bij het ontwerp van dijken worden namelijk een veelvoud aan onzekerheden meegenomen in de risicoanalyse. Een bres in een dergelijke dijk zal alleen ontstaan bij een samenkomst van omstandigheden (veel lagere sterke dan verwacht en hogere belasting dan verwacht). Daarnaast kunnen met name oudere waterkeringen variabel van samenstelling zijn door versterkingen in de tijd. Dit zal leiden tot lokaal zwakkere plekken en tot een relatief grote variatie in sterkte. Dit zorgt ervoor dat deze keringen als eerste op deze zwakke plekken zullen bezwijken. De kans dat dit dus op meerdere locaties voorkomt is in de huidige situatie en met de huidige ontwerpmethodiek erg klein.

Bij andere lijnvormige elementen is waterveiligheid meestal niet een ontwerp criterium, waardoor de sterkte onbekend is en de variatie in waterkerend vermogen groot kan zijn. Dit is vooral het geval omdat overgangen in de doorsnede en objecten (bijvoorbeeld woningen) – vaak de zwakke punten in termen van waterveiligheid – logischerwijs niet hiervoor ontworpen zijn. Hierdoor kunnen makkelijker op meerdere plekken bressen ontstaan. Echter in het geval de lijnvormige elementen spoorwegen en/of baanlichamen voor wegen betreffen dan zijn deze juist weer relatief eenvormig van opbouw. Het betreffen over het algemeen zandlichamen, waarbij deze verdicht zijn conform standaard normen. Dit zou betekenen dat als dit type kering bezwijkt er een gerede kans is dat een aanliggend gedeelte ook moet bezwijken, omdat de sterkte van deze kering over de lengte gezien niet veel zal variëren.

Daarnaast is e.e.a. ook belastingafhankelijk. In 1953 braken de dijken op meerdere plekken door, doordat de belasting veel hoger was dan de ontwerpbelasting. Dit zal in de huidige tijd niet snel van toepassing zijn voor primaire en secundaire waterkeringen, maar kan wel van toepassing in het geval van lijnvormige elementen, niet zijnde waterkeringen. Deze zijn namelijk niet ontworpen op het keren van water.

Bij rivierdijken kan overigens het ontstaan van een bres op één locatie de waterstand in de rivier zodanig beïnvloeden dat het ontstaan van meerdere bressen juist wordt voorkomen.

A.5 Beïnvloedt een stroomkuil (wiel) het bresdebiet/bresgroei?

Een stroomkuil ontstaat alleen als de ondergrond erosiegevoeliger is dan het waterkerende element. Het versnelt bresinitiatie doordat de stroomkuil het element kan ondergraven. Een hogere bresgroeisnelheid kan alleen optreden zolang de stroomkuil nog niet vol is, hetgeen in de praktijk niet zal optreden. Het effect van een stroomkuil (wiel) op de bresgroei is dus onzeker, maar in veel gevallen waarschijnlijk beperkt.

⁶ Onder water erosie van grond door stroming. Deze term wordt met name gebruikt bij de beoordeling van erosie rondom waterbouwkundige kunstwerken.

De meeste modellen nemen aan dat de fundering van een kering niet erodeert. Een stroomkuil achter een bres zal alleen ontstaan als de ondergrond waarop de kering en/of het grondlichaam aanwezig is, erosiegevoeliger of even erosiegevoelig is als het bekledings- en/of kernmateriaal waaruit de waterkering bestaat. Dit zal dus alleen het geval zijn als er sprake is van bijvoorbeeld (grof) zand in de ondergrond en er op de kering een goede gras- en kleibekleding aanwezig is. Een extra aandrijvende kracht voor het ontstaan van een stroomkuil kan daarnaast versterkt worden door de aanwezigheid van een object, zoals een boom, woning o.i.d., waardoor lokaal scouring optreedt.

In het geval een stroomkuil ontstaat kan onderscheid gemaakt worden op de invloed hiervan op het proces van bresinitiatie en de bresgroei in de breedte. Bij de bresinitiatie kan een stroomkuil stabiliteit-verlies veroorzaken van delen van de kering en/of versnelling van het head-cut proces door lokale ondermijning aan de teen van de kering. Dit zal de bresinitiatie versnellen. Maar een stroomkuil kan ook de energie aan de teen van de kering verspreiden, waardoor de bresinitiatie vertraagt. Het zal dus van lokale omstandigheden afhangen, wat het effect van een stroomkuil zal zijn.

De invloed op de groei van de bres in de breedte zal beperkt, zeker als de stroomkuil volledig is gevuld met water en/of deze al volledig onder water staat. Alleen in het begin van de bresgroei, als de stroomkuil nog niet gevuld is met water, zal het waterstandverschil groter zijn waardoor de stroomsnelheid en daarmee het debiet dat de polder instroomt vergroot. Dit laatste zal in de praktijk niet vaak optreden.

Het relatief grote aantal wielen in het rivierengebied kan worden verklaard doordat waterkeringen in het verleden lager en met minder kennis van de geotechnische aspecten werden aangelegd. Zo was men zich niet bewust van het feit dat stroomruggonden het risico op piping vergroten. Het gebruik van klei op korte afstand voor de aanleg van de dijken versterkte dit. Hierdoor ontstonden in het verleden relatief veel overstromingen met stroomkuilen tot gevolg.

5.1.2 Standzekerheid

B. Welke aannames in het overstromingsmodel zijn realistisch voor de standzekerheid van lijnvormige kerende elementen in het overstroombare achterland?⁷

Er zijn verschillende waterkerende elementen waarvoor aannames gedaan moeten worden:

- **Spoordijken:**
 - *Volgens leidraad: worden als instabiel beschouwd bij een waterstand tot onderkant ballastbed. Dit zal alleen het geval zijn bij relatief hoge spoordijken (hoger dan 2 m) met relatief steile taluds (steiler of gelijk aan 1:2);*
 - *de huidige regel geeft geen indicatie of piping tot bezwijken kan leiden, maar dit is ook afhankelijk van de grondopbouw onder de spoordijk en de afstand tot sloten/watergangen;*
 - *in het geval van overflow kan dit relatief snel leiden tot bresinitiatie omdat er geen of nauwelijks sprake is van een gras- en/of kleibekleding;*
- **Wegen:**
 - *Volgens leidraad: worden als stabiel beschouwd;*
 - *in het geval van overloop is de aanname niet correct omdat dit relatief snel zal leiden tot bresinitiatie omdat er geen of nauwelijks sprake zal zijn van een goed ontwikkelde gras- en/of kleibekleding;*
- **(Oude) keringen, boezemkades en dijken langs regionale waterlopen:**
 - *Volgens leidraad: de beheerder dient hier een oordeel over te vormen;*
 - *oordeel is vrij kwalitatief, alleen kwantitatief als gebruik wordt gemaakt van bestaande berekeningen;*
 - *op basis van 2 casussen kan geconstateerd worden dat het oordeel van de beheerder t.a.v. macro-stabiliteit goed overeen kwam met de uitkomsten van de berekeningen;*
 - *t.a.v. piping kan het oordeel van de beheerder het risico op piping onderschatten.*

⁷ De genoemde afmetingen worden min of meer onderbouwd door de effecten van de recente wateroverlast in Zuid-Limburg. Op de spoorlijn Eindhoven – Maastricht is nabij Roermond de spoordijk relatief zwaar belast geweest door het water. Uiteindelijk heeft de spoordijk een waterstandverschil van 2 m weerstaan (water stond tot ca. 2 m onder de kruin) inclusief het gewicht van een voorbijrijdende trein.

De verscheidenheid van mogelijke kerende elementen in het landschap maakt het lastig een eenduidige regel te formuleren. In de huidige leidraad [D 1] worden spoorwegen en wegen apart benoemd aangezien de standzekerheid hiervan eenvoudiger in te schatten zijn. Andere lijnvormige elementen (e.g. oude keringen, boezemkades) worden overgelaten aan het oordeel van de beheerder. Om deze keuzes te ondersteunen zijn enkele casussen onderzocht die representatief zijn voor het soort lijnvormige kerende elementen waar het Waterschap Rijn en IJssel een oordeel over moet vormen.

Een eerste schatting van de standzekerheid van deze keringen is te benaderen op basis van de vorm (hoogte, breedte en grootte taluds) en (historische) functie (weg, oude kade, spoorlijn, fietspad). Bij dit laatste dient ermee rekening te worden gehouden dat de functie van een kerend elementen veranderd kan zijn in de tijd. Een fietspad of weg die nieuw zijn aangelegd zullen anders van opbouw zijn dan in het geval deze zijn aangelegd op een oude kering. Een kerend element wordt vooral belast in het geval een voorliggende (primaire) kering al gefaald is, waardoor het kerende element in de polder al snel tot aan de kruinhoogte of hoger wordt belast. Het ontstaan van een bres is hierbij minder waarschijnlijk bij lagere, bredere elementen. Hierdoor ontstaat relatief snel overloop, maar zorgt voor minder erosie en verschil in waterdruk, waardoor de standzekerheid van het element zelf wordt gewaarborgd. Echter dit element kan op termijn wel falen als gevolg van overloop en het falen/eroderen van de bekleding (erosie gras en klei en head-cut klei/ondergraving kleibekleding). Dit laatste geeft aan dat de standzekerheid per casus ingeschat dient te worden en dat er geen algemene uitgangspunten vastgesteld kunnen worden voor een stabiele vorm van een kerend element. Een laag en breed element kan wel geotechnisch stabiel zijn, echter als deze bestaat uit bijvoorbeeld zand, zonder een kleibekleding dan kan deze wel eroderen waardoor alsnog een initiële bres ontstaat.

Oude dijken, met name oude primaire dijken zoals de casus in het Oude Rijngebied, zijn vaak relatief hoog. Echter, deze zijn niet ontworpen voor een situatie waar het water tot aan de kruin staat. Hierbij is vooral het risico op piping en in mindere mate macrostabiliteit onvoldoende. Hier is een bres dus erg waarschijnlijk, ondanks dat het in vergelijking met andere elementen vaak een relatief sterke grondopbouw heeft. Elementen die niet van nature de functie van het keren van noodwater hebben, zoals de casus in de Schipbeek, zijn doorgaans lager met een veel flauwer talud. Deze lopen relatief snel over, maar blijven constructief wel intact. Uiteindelijk kan hierdoor overloop en het falen/eroderen van de bekleding ook een bres ontstaan. Afhankelijk van de grootte van het overloop debiet kan dit enkele uren tot 1 dag in beslag nemen.

Een belangrijk onderscheid dat te maken valt in deze casussen betreft het faalmechanisme. De casussen zijn geanalyseerd op macro-stabiliteit, piping, en overloop. Bij de simulatie van overloop wordt achtereenvolgens de grasbekleding, kleibekleding en het kernmateriaal geërodeerd, waarna de bres lateraal begin te groeien. Mocht een casus laten zien dat de doorsnede kwetsbaar is voor macro-stabiliteit of piping, dan komt meteen het kernmateriaal bloot te liggen en wordt het falen van de grasbekleding en kleibekleding overgeslagen. Dit dient in het model te worden meegenomen.

Samenvattend wordt aangeraden om lijnvormige elementen op basis van hun vorm (met name de kruinhoogte en talud) en de (historische) functie te beoordelen. De grondopbouw speelt hier relatief een mindere rol. Voor lijnvormige elementen met een (historische) functie van het keren van (nood)water, met name hoge elementen met een steil talud, moet worden aangenomen dat een bres zal ontstaan. Voor elementen die relatief laag en breed zijn, en daardoor vaak ook geen hoogwater-kerende functie hebben gehad, kan worden aangenomen dat deze standzeker zijn op macro-stabiliteit en piping. In een simulatie zullen deze elementen dus overlopen. Doordat bij infrastructuur (spoorlijnen en wegen) geen actief onderhoud wordt uitgevoerd op de (gras)-bekleding, in tegenstelling tot hetgeen bij dijken van toepassing is, bestaat er wel een risico dat deze elementen bezwijken door erosie in het geval van overloop. De aanwezigheid van een verharding bij wegen kan dit effect vertragen. Geadviseerd wordt de grens tussen niet of wel stabiel voor keringen nader te bepalen op basis van kenmerkende profielen, opbouw en de functie(s) en hetzelfde te doen voor lijnvormige (meestal zandige) grondlichamen.

Specifieke objecten, zoals verhardingen, palen en/of geluidschermen op kerende elementen, spelen voornamelijk een negatieve rol in het geval van de eerstgenoemde groep kerende elementen (hoge, secundaire dijken). De overgang van de grasbekleding tot deze elementen zijn vaak zwakke punten waar stroomsnelheden groter zijn en erosie sneller ontstaat en ontwikkeld (scouring). Dit effect is veel kleiner in een situatie waar het element onder water staat. Als er in een dijklichaam veel van dit soort objecten staan, dan kan dit effect worden meegenomen in de simulatie van de bresgroei door een kortere tijd aan te nemen waarin de doorsnede weg-erodeert. Dit zal dan wel nader gekwantificeerd dienen te worden. Bestaande scouring-modellen kunnen hiervoor een indicatie geven. Als alternatief kan de staat van de grasbekleding slechter worden aangenomen, om het effect van het grotere aantal zwakke punten mee te nemen.

B.1 Is de aannname van standzekerheid correct, zoals genoemd in “Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties”?

De aannames t.a.v. spoordijk lijken te conservatief. Niet alle spoordijken zijn zo hoog dat zij bij een waterstand tot aan onderkant ballastbed instabiel worden. Voor wegen kan de beoordeling te positief uit pakken in het geval van smalle weglighamen en erosie door overflow. Voorgesteld wordt een beoordelingsmatrix op te stellen als functie van:

- **de dimensies van een zandlichaam (breedte, hoogte en helling taluds);**
- **de hydraulische belasting;**
- **het bezwijkmechanisme, met name stabiliteit, piping en erosie van de bekleding;**

De leidraad noemt een aantal verschillende situaties waarin de standzekerheid van een element onderzocht kan worden. Voor spoorlijnen wordt aangenomen dat deze standzeker zijn tot de onderkant van het ballastbed, met een maximum van 1 meter. Dit lijkt ons een conservatieve schatting. Dit uitgangspunt kan aangescherpt worden door een beoordelingsmatrix op te zetten om de macro-stabiliteit van spoorwegen in het algemeen beter te kunnen beoordelen. Dit kan opgezet worden op basis van verschillende combinaties van waterniveaus, breedte, hoogte, taluds van de spoordijk etc. Ook worden wegen genoemd, die als standzeker worden aangenomen. Gezien de breedte en verdichting van wegen, lijkt dit realistisch. Alleen bij langere tijden van overloop zou erosie kunnen ontstaan, al dan niet rond objecten, zoals de fundering van geluidschermen, bovenleidingmasten, verkeersinformatie borden en/of verkeersportalen. Deze palen hiervan veroorzaken een verstoring van de stroming, waardoor de standzekerheid niet meer gegarandeerd kan worden. Ook weglighamen zou je kunnen opnemen in bovenstaande beoordelingsmatrix.

Over de beoordeling van de standzekerheid van oude keringen, boezemkades en dijken langs regionale waterlopen wordt geen advies gevormd, maar verwezen naar het oordeel van de waterbeheerder. Deze zal dit bepalen op basis van eerdere toetsingen van deze keringen of andere informatie. Voor twee casussen is door het Waterschap een oordeel gegeven over de standzekerheid van de Oude Rijn dijken en de locatie Schipbeek. Het oordeel van het Waterschap komt voor deze twee casussen goed overeen met de resultaten van de stabiliteitsberekeningen. Alleen het effect van piping lijkt wat onderschat te worden in het beheerdersoordeel van de Leuffensedijk (onderdeel van de Oude Rijn dijken). Bij de locatie Schipbeek wordt het criterium tegen piping net overschreden. Echter de toegepaste rekenmethode (Bligh) is conservatief en piping hoeft niet direct te leiden tot verlies van standzekerheid. Hiermee kan gesteld worden dat bij de locatie Schipbeek het beheerdersoordeel overeenkomt met de uitkomsten van de stabiliteit- en pipingberekeningen.

Een geheel oordeel, zonder rekenkundige onderbouwing, kan dus een te positief beeld geven. Overigens is een negatief beeld natuurlijk ook niet uit te sluiten. Dit onderbouwt de conclusie dat deze beoordeling altijd gebaseerd dient te zijn op de resultaten van (eerdere) toetsingsberekeningen. Hierbij dient wel uitgegaan van gemiddelde waarden van de sterkteparameters en een realistische inschatting van de te verwachten belastingen, waterstanden en stijghoogtes. Om het aantal aanpassingen aan bestaande berekeningen te beperken kan ook gekozen worden voor de pragmatische aanpak die in de rapportage is gehanteerd. Bij deze pragmatische aanpak is uitgegaan van een waterstand tot aan de kruin en inschatting van het verloop van de waterstand in de kering. Daarnaast is uitgegaan van de reeds vastgestelde karakteristieke waarden en gehanteerde partiële materiaalfactoren om de onderzoekstijd te beperken. Door uit te gaan van een veiligheidsfactor van 0,7 bij deze waarden, is min of meer een gemiddelde situatie beschouwd.

B.2 Zo nee, welke hydraulische belasting leidt tot bezwijken?

Hier is geen algemeen geldend antwoord op te geven. Geadviseerd wordt dit in de onder B.1 genoemde beoordelingsmatrix mee te nemen.

Aannames voor de hydraulische belastingen zijn verschillend voor lijnvormige elementen en andere objecten. Voor lijnvormige elementen, zoals spoorlijnen en/of weglighamen kan de toelaatbare hydraulische belasting ingeschat worden op basis van de op te stellen beoordelingsmatrix. Voor bestaande keringen kan dit plaats vinden op basis van bestaande toetsingsberekeningen, als deze beschikbaar zijn. In het geval van bestaande keringen, waar geen of nauwelijks informatie van beschikbaar is kan ook uitgegaan van een op te stellen beoordelingsmatrix.

Voor objecten is de bezwijkbelasting erg afhankelijk van de lokale situatie. Wel zullen specifieke objecten in bijna alle gevallen ervoor zorgen dat een kering bezwijkt voordat de grasbekleding zelf berekend is te bezwijken. Aangezien er vaak vanuit kan worden gegaan dat er dergelijke objecten op een dijk aanwezig zijn, kan hiermee rekening gehouden worden door uit te gaan van een dunnere grasbekleding of een hogere stroomsnelheid over de grasbekleding. Dit laatste is vaak lastig aan te passen in een simulatie.

Voor de beoordeling van het effect van specifieke objecten kan dit effect worden meegenomen in de simulatie van de bresgroei door een kortere tijd aan te nemen waarin de doorsnede weg-erodeert. Dit zal dan wel nader gekwantificeerd kunnen worden. Bestaande scouring-modellen kunnen hiervoor een indicatie geven. Als alternatief kan de staat van de grasbekleding slechter worden aangenomen, om het effect van het grotere aantal zwakke punten mee te nemen.

B.3 Wat is de invloed van specifieke objecten, zoals een verharding (asfalt) en (funderingen van) geluidschermen op deze lijnvormige elementen?

Verhardingen zullen bresinitiatie vertragen in het geval van overflow. Objecten die uit een waterkerend element steken zullen door scouring (lokale erosie versnelt door vernauwing van de stroming) bresinitiatie versnellen.

Asfaltbekledingen en andere verhardingstypes geven meer standzekerheid. Asfaltbekledingen zullen minder snel eroderen dan een gras- en/of kleibekleding, waardoor het moment waarop sprake is van bresinitiatie wordt vertraagd of mogelijk in het geheel niet optreedt, omdat er dan geen sprake meer zal/kan zijn van een hoogwatersituatie. Deels zal dit effect weer teniet worden gedaan, doordat er over het algemeen geen verharding aanwezig is op het binnentalud. Op het binnentalud kan dan erosie optreden, die uiteindelijk de verharding zal ondergraven. Bij dit laatste zal de verharding door zijn relatief hoge sterkte t.o.v. een kleibekleding ook vertragend werken.

Verharding zal lokaal dus de erosie verminderen, maar vormen wel punten waar stroming zich concentreert bij de overgangen. De overgangen van harde naar zachte elementen zijn daardoor vaak zwakke punten waar bressen ontstaan. Dit geldt ook voor lokale verstoringen als (lantaarn)palen, borden, vangrails, bomen, wandelpaden, trappen, etc. Ook ondergrondse objecten zullen een invloed hebben op de stabiliteit of de erosie, afhankelijk van het object. Als deze vrij komen te liggen en de stroming langs deze objecten moet, zal dit verdere erosie versterken en eerder leiden tot bresinitiatie. Funderingen vergroten de lokale stabiliteit en hebben bij plaatsing vaak ook lokaal tot verdichting geleid.

Specifiek voor geluidschermen kan gesteld worden dat de constructie niet waterdicht zal zijn en dat deze snel onderloops zal worden. Mocht er veel water tegen het scherm blijven staan dan kan de constructie of de fundering bezwijken. In het geval de fundering bezwijkt zal dit leiden tot vervormingen en gaten in de dijk. Dit versterkt erosie.

B.4 Welke informatie over het kerende lijnvormige element is hiervoor nodig?

In het algemeen kan gesteld worden dat de afmetingen van het waterkerende element en het materiaal waaruit deze opgebouwd zijn bekend dienen te zijn. Voor de specifieke input wordt verwezen naar onderstaande opsomming.

In het geval een matrix wordt ontwikkeld voor de beoordeling van de standzekerheid van bijvoorbeeld spoordijken of andere lijnvormige elementen, dan is de volgende input minimaal noodzakelijk:

- Waterhoogte;
- Maaiveldhoogte polder;
- Materiaal kering (zand dan wel klei);
- Afmeting kering: breedte en hoogte kruin, helling binnen- en buitentalud.

In [D 21] is een (conceptuele) methode beschreven waarbij op basis van algemene kenmerken van een waterkerende element en voor verschillende bezwijkmechanismen is beschreven in hoeverre verlies van standzekerheid kan optreden. In het geval mechanismen als macro-stabiliteit en/of piping beoordeeld moeten worden met rekenprogramma's, zoals D-Stability, zijn buiten de al genoemde parameters meer parameters benodigd:

- Zand: sterkte-parameters, korrelgrootte, opbouw ondergrond onder kering, polderpeil en stijghoogte ondergrond;

- Klei: sterkte-parameters, dichtheid, opbouw ondergrond onder kering, polderpeil en stijghoogte ondergrond.

Een dergelijke beoordelingsmatrix is moeilijker op te stellen voor objecten. Voor objecten hebben de volgende eigenschappen van een object in een kering invloed op de standzekerheid:

- Afmeting object: de mate van scouring is afhankelijk van de grootte van de turbulentie en daarmee de grootte van het object;
- Aantal objecten: een groter aantal locaties waar scouring kan optreden zal de bresinitiatie versnellen omdat hier de functie van de gras- en kleibekleding eerder teniet zal worden gedaan;
- Locatie van de objecten: een object dat aanleiding geeft tot scouring op de kruin van de kering zal een ander effect hebben dan een object in het talud of aan de teen van de kering;
- Wijze van fundering object: in het geval scouring optreedt, maar het object is bijvoorbeeld gefundeerd op een laag menggranulaat kan dit het effect van scouring beperken doordat het erosieproces daarna vertraagt

B.5 Hoe kan dit (in theorie) in D-Hydro worden opgenomen?

Door de uitkomsten van de beoordelingsmatrix op te nemen in D-Hydro. Voor het opnemen van de invloed van objecten is extra studie noodzakelijk.

Voor relatief eenduidige lijnvormige elementen, zoals spoorlijnen, kan nagegaan worden waar mogelijk bressen ontstaan op basis van de te ontwikkelen beoordelingsmatrix. Dit kan dan ingevoerd of toegevoegd worden aan D-Hydro. Een meer rekenkundige onderbouwing zou mogelijk gemaakt kunnen worden door reeds gemaakte toetsingsberekeningen te koppelen aan D-Hydro of de uitkomsten van deze berekeningen als rapportage te koppelen aan D-Hydro.

Voor het opnemen van de invloed van objecten is extra studie noodzakelijk. Op basis van bestaande scouring modellen kan een sub-model toegevoegd worden, die het effect van scouring op bijvoorbeeld de erosie van een kleibekleding in beeld brengt. Als dit leidt tot een eerdere erosie van de kleibekleding, dan op basis van het beheerdersoordeel of richtgetallen wordt verwacht, zal hiermee de bresinitiatie versneld worden. Dit geeft ook inzicht in hoeverre er op meerdere plaatsen bressen kunnen ontstaan.

5.2 Aanbevelingen

Naast de in de conclusies aangegeven verbeteringen die kunnen plaats vinden om bresgroei beter te modelleren, zijn de volgende aanbevelingen nog van belang:

- de tijdsduur die leidt tot verlies van standzekerheid is onzeker/onduidelijk. Het verdient aanbeveling een workshop te houden met deskundigen van o.a. Deltares, TU Delft over de tijdsduur tot bresinitiatie. Hierbij dienen de verschillende bezwijkmechanismen die leiden tot verlies van standzekerheid en dus bresinitiatie aan de orde te komen. Specifieke vragen hiervoor zijn:
 - hoe lang duurt het voordat een waterkering en/of waterkerend element, die belast is door water tot aan de kruinhoogte, volledig verzadigd is met water en zijn standzekerheid verliest. Zijn hier eenvoudige modellen voor of voor te ontwikkelen;
 - hoe lang duurt het voordat een waterkering en/of waterkerend element, die belast is door water tot aan de kruinhoogte, bezwijkt in het geval van piping. Zijn hier eenvoudige modellen voor of voor te ontwikkelen
 - welk model kan het beste ingebouwd worden in D-Hydro voor een nauwkeurigere schatting van de verdiepingsfase en de initiële bresbreedte;
- de huidige empirische Verheij-van der Knaap formulering kan verbeterd worden door deze te baseren op het werkelijke (in tijd verlopende) waterstandverschil over de bres en de grootte van de achterliggende polder hierin mee te nemen;
- duidelijker opstellen hoe de standzekerheid van spoordijken beschouwd dient te worden.

Colofon

QUICKSCAN LIJNVORMIGE KERENDE ELEMENTEN
ONDERZOEK NAAR DE MODELLERING VAN BRESGROEI EN STANDZEKERHEID VAN LIJNVORMIGE
KERENDE ELEMENTEN

KLANT

Waterschap Rijn en IJssel

AUTEUR

Erik van Berchum

PROJECTNUMMER

30081440

ONZE REFERENTIE

D10029883:257

DATUM

20 oktober 2021

STATUS

Definitief

GECONTROLEERD DOOR

Rik Bisschop
Senior Specialist Geotechniek

VRIJGEGEVEN DOOR

Rimmer Koopmans
Projectleider

Over Arcadis

Arcadis is een toonaangevend wereldwijd ontwerp- en consultancybureau voor de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij maken het verschil voor onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Met 27.000 mensen in meer dan 70 landen genereerden we in 2020 een omzet van €3,3 miljard. Wij ondersteunen UN-Habitat met kennis en expertise om leefomstandigheden te verbeteren in gebieden getroffen door de gevolgen van de klimaatverandering.

www.arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland

T +31 (0)88 4261 261

Arcadis. Improving quality of life

Volg ons op



[arcadis-nederland](https://www.arcadis-nederland.nl)



[arcadis_nl](https://twitter.com/arcadis_nl)



[ArcadisNetherlands](https://www.facebook.com/ArcadisNetherlands)