



Universiteit Utrecht

Faculteit Geowetenschappen
Departement Fysische Geografie

Oeverstabiliteit Rivieren Oost Nederland

Opzet van een conceptueel model en
aanzet tot projectmonitoring

In opdracht van Rijkswaterstaat Oost Nederland

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
1. Inleiding	4
2. Observaties bij al aangelegde natuurvriendelijke oevers	6
2.1 Natuurvriendelijke oevers langs de Maas	6
2.2 Natuurvriendelijke oevers langs de IJssel.....	7
3. Stromingspatroon in kribvakken	13
3.1 Stromingspatroon in kribvakken	13
3.2 Scheepsgeïnduceerde stromingen	14
3.3 Sedimenttransport in kribvakken	15
4. Oevererosie	17
4.1 Oeverstabiliteit	17
4.2 Timing massabewegingen	19
5. Bestaande modellen.....	21
5.1 Bank Stability and Toe Erosion Model.....	21
5.2 RipRoot model.....	22
5.3 WAQBANK	22
6. Ontwikkeling van natuurvriendelijke oevers in de tijd.....	24
6.1 Ontwikkeling van het dwarsprofiel	24
6.2 Oevererosiesnelheid.....	26
6.3 Aanzanding in het zomerbed.....	27
6.4 Langere termijn stabiliteit	28
7. Conceptueel model	29
8. Monitorings- en onderzoeksplan	30
8.1 Isoleren van variabelen door keuzes van locaties.....	30
8.2 Nader onderzoek naar stroming in kribvakken	32
8.3 Afhankelijkheid oevererosie van de stratigrafie van uiterwaarden	33
9. Conclusies	35
Van welke processen en factoren hangt de evenwichtshelling af? Zijn deze variabel langs de IJssel en de Nederrijn-Lek of zijn deze naar verwachting constant?.....	35
Literatuur.....	37

Voorwoord

Het doel van dit rapport is het in beeld krijgen van alle processen die significante invloed hebben op de evenwichtshelling en dynamiek van natuurlijke oevers in kribvakken van grote rivieren, met als doel bij toekomstige aanleg de sedimenttoevoer aan de vaargeul en de terugschrijding van de oever te minimaliseren.

De studie is in vier stappen verricht. Dit rapport verslaat een literatuuronderzoek dat is uitgevoerd naar de relevante oeverprocessen. Daarbij is een aantal bestaande modellen bestudeerd. Bij deze modellen is beschreven welke processen worden gesimuleerd, welke informatie nodig is en wat de tekortkomingen zijn met de focus op de meest relevante processen en de vorm van het projectgebied (kribvakken). Op grond van deze informatie is een conceptueel model geformuleerd, dat aangeeft waar de morfologie van de kribvakken het meest gevoelig voor is. Tevens is geïnterviewd welke data aanwezig is om het conceptuele model, na dit project, te toetsen en te kwantificeren. Tenslotte zijn kennisleemtes beschreven in processen, modellen en gegevens en is een plan voor vervolgonderzoek voorgesteld.

Dit rapport is geschreven in opdracht van Drs. Margriet Schoor van Rijkswaterstaat Oost-Nederland, opdrachtnummer RWS-2014/13113, Zaak ID 31092943, bestelnummer 4500223776. Aan het rapport werkten medewerkers van het departement Fysische Geografie van de Universiteit Utrecht: Anne Baar (MSc), Prof. dr. Maarten Kleinhans en Dr. Esther Stouthamer. De begeleidingscommissie bestond uit Drs. Pieter van Vessem (Rijkswaterstaat Oost-Nederland) en Dr. ir. Arjen Sieben (Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving). Advies werd ingewonnen bij Dr. Wilfried ten Brinke (Bureau Blueland) en Prof. dr. Gerben Ruessink.

1. Inleiding

De Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) verplicht waterbeheerders om ervoor te zorgen dat al het grond- en oppervlaktewater in 2015 van goede chemische en ecologische kwaliteit is. Hierbij gaat het er bij chemische verontreinigingen om beneden de normen te blijven, en bij ecologische kwaliteit om een evenwichtige samenstelling van het ecosysteem te bereiken; in rivieren met vissen, ongewervelden en waterplanten. Omdat de meeste wateren intensief gebruikt worden en daardoor onomkeerbaar van karakter kunnen zijn veranderd, mogen de doelen worden afgestemd op de functies: zo veel mogelijk verbetering van het aquatische ecosysteem, met behoud van belangrijke functies zoals drinkwaterwinning, hoogwaterveiligheidsbescherming en scheepvaart.

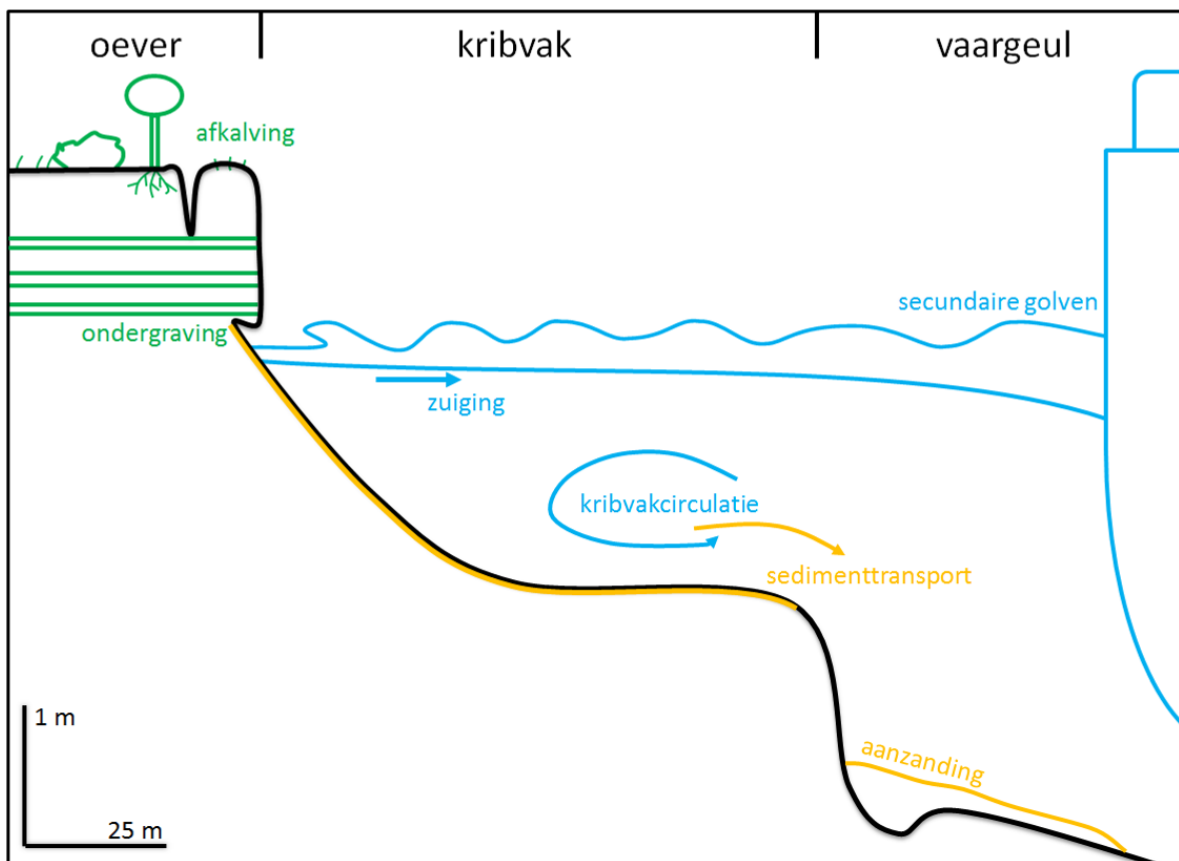
Rijkswaterstaat heeft in 2009 de KRW-doelen en de in de Rijkswateren voorgenomen KRW-maatregelen vastgelegd in het Beheerplan Rijkswateren (BPRW). Voor de grote rivieren (Rijntakken, Maas en Zwarte Water) is het creëren van meer kilometers natuurvriendelijke oevers (NVO's) een belangrijke maatregel om de ecologische ontwikkeling te stimuleren. Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland (RWS-DON) gaat voor 2027 meer natuurlijke oevers realiseren langs de IJssel en de Nederrijn-Lek. Natuurvriendelijke rivieroevers bestaan uit een geleidelijke land-waterovergang in natuurlijk substraat zoals grind, zand en klei. Plaatselijk kunnen stenen en/of hout aanwezig zijn in de oevers. Ook wordt de ontwikkeling van een grote verscheidenheid aan flora en fauna gestimuleerd, zodat de oever weer geschikt is als ecologische verbindingszone (STOWA, 2011). Uitgangspunt is dat de vaargeul vastgelegd blijft met kribben, verdedigde onderwateroevers of vooroevers.

Er zijn meerdere risico's waar rekening mee moet worden gehouden wanneer de oeeververdediging wordt verwijderd. Door oeevererosie gaat land verloren en kan er sediment naar de vaargeul worden getransporteerd. Wanneer de diepte van de rivier lokaal afneemt doordat de oever erodeert, kan scheepvaart hinder ondervinden van lokale ondiepten bij lage waterstanden. Bij hoogwater zal het aandeel water dat door de oeverszone stroomt toenemen. Dit kan een waterstanddalende werking hebben, maar heeft ook morfologisch effect doordat sediment in de vaargeul afgezet kan worden wat weer hinderlijk is voor scheepvaart. Ook zal de hoeveelheid oeversmateriaal die voor de natuurvriendelijke oevers wordt afgezet variëren langs de oever, waardoor er een onregelmatige morfologie ontstaat. Hiervan kan de scheepvaart hinder ondervinden, aangezien bij zekere waterstanden stromingspatronen van de rivier en stromingen rond de schepen ook zullen variëren als gevolg van de onregelmatige bodem. Zo zijn bijvoorbeeld scheepsgeïnduceerde stromingen afhankelijk van waterdiepte. Verder kan erosie van de natuurvriendelijke oevers schade toebrengen aan de kribben zelf, bijvoorbeeld door achterloopsheid bij hoge waterstanden.

Voordat de harde oeeververdediging wordt verwijderd, is het dus noodzakelijk om in te kunnen schatten hoeveel de oever zal eroderen per locatie en welke evenwichtshelling zal ontstaan. Hierdoor kan bij de aanleg de hoeveelheid sediment worden geminimaliseerd die naar de vaargeul wordt getransporteerd en kan van tevoren worden ingeschat hoeveel land verloren gaat. Deze kennis kan gebruikt worden om te bepalen op welke precieze locaties de oeeververdediging verwijderd kan worden. Het doel van dit onderzoek is daarom om te bepalen welke processen en variabelen de meeste invloed hebben op de erosie van natuurvriendelijke oevers en dit weer te geven in een conceptueel model. Er wordt gebruik gemaakt van kennis uit literatuur, metingen en modelstudies. In figuur 1.1 zijn de belangrijkste processen geschetst in een dwarsdoorsnede van een kribvak, die de basis vormt voor het conceptuele model. De volgende onderzoeksvragen zijn gedefinieerd:

1. Hoe werkt het complex van processen van oevererosie? Welke processen spelen een belangrijke rol?
2. Van welke factoren is de snelheid van oevererosie afhankelijk en de daarmee samenhangende toevoer van sediment naar de vaargeul?
3. Van welke processen en factoren hangt de evenwichtshelling af? Zijn deze variabel langs de IJssel en de Nederrijn-Lek of zijn deze naar verwachting constant?
4. Welke monitoring en welk onderzoek moet worden verricht om de evenwichtshelling en de erosiesnelheid langs de IJssel en de Nederrijn-Lek betrouwbaarder empirisch te kunnen bepalen?

Eerst wordt een overzicht gegeven van observaties van het erosiepatroon van bestaande natuurvriendelijke oevers langs de Maas en de IJssel (hoofdstuk 2). Daarna wordt de invloed van scheepvaart op het stromingspatroon en het sedimenttransport in een kribvak samengevat (hoofdstuk 3), gevolgd door een uitleg van het proces van oevererosie (hoofdstuk 4) en bestaande oevererosie modellen (hoofdstuk 5). Deze kennis zal uiteindelijk worden toegepast op de verwachte ontwikkeling van natuurvriendelijke oevers, wat resulteert in een conceptueel model en een monitoringsplan.



Figuur 1.1 – Schets van relevante processen die invloed hebben op de ontwikkeling van een kribvak.

2. Observaties bij al aangelegde natuurvriendelijke oevers

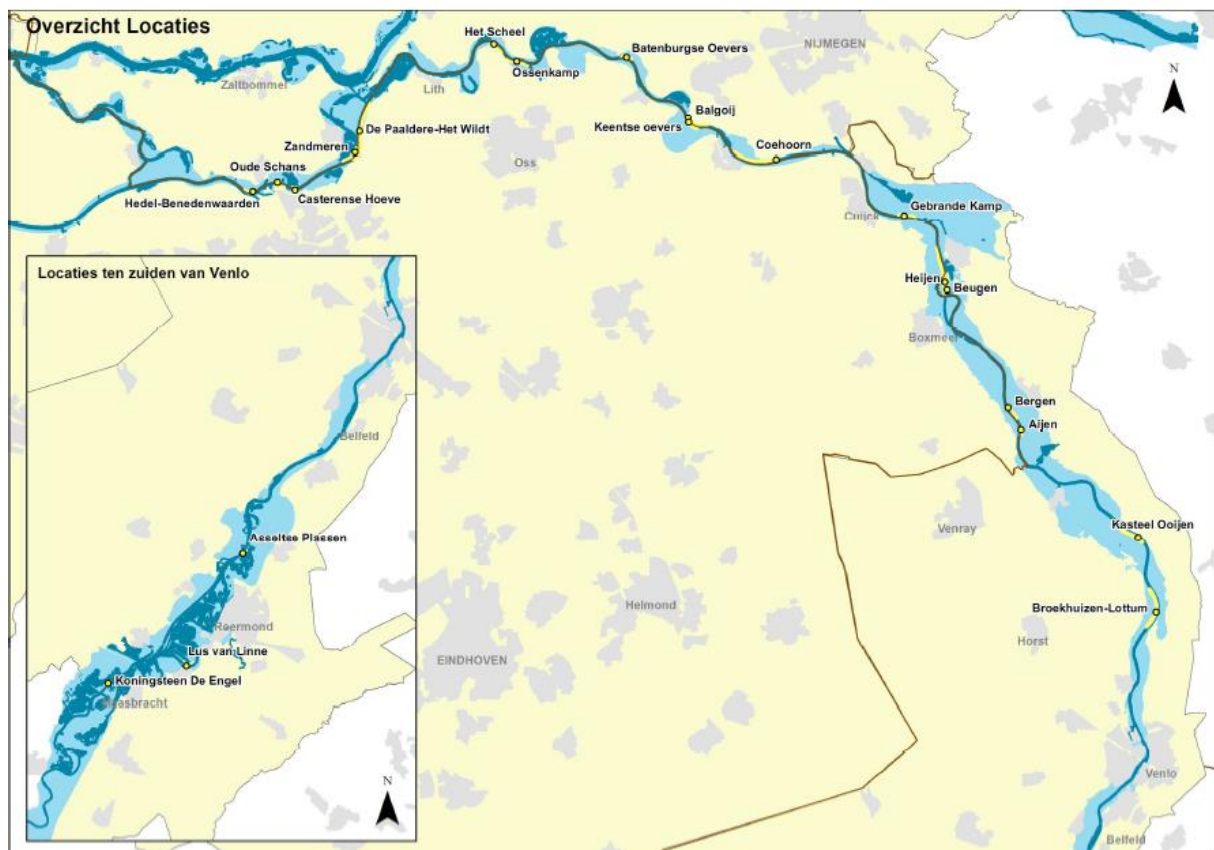
Op verschillende locaties in Nederland zijn al natuurvriendelijke oevers aangelegd, zoals langs de Maas en de IJssel. In dit hoofdstuk wordt samengevat wat vooraf de verwachtingen waren en hoe de oevers zich daadwerkelijk ontwikkeld hebben.

2.1 Natuurvriendelijke oevers langs de Maas

Op verschillende locaties langs de Maas is tussen 2010 en 2014 de oeverbescherming weggehaald om de natuurlijke dynamiek te herstellen en ecologische ontwikkeling te stimuleren (Geerling, 2013). Het doel was om een typerend profiel met flauwe hellingen en steilwanden te ontwikkelen, zonder de scheepvaart te hinderen. In figuur 2.1 zijn de specifieke locaties te zien, waarvan 21 locaties gemonitord worden. Het type natuurvriendelijke oever is verschillend voor diverse locaties, afhankelijk van de lokale omstandigheden. Sieben (2011) noemt bijvoorbeeld het gevaar dat het zomerbed van de rivier zich op natuurlijke wijze kan gaan verplaatsen door erosie in de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht, wanneer alle oeverbescherming wordt verwijderd. Daarom werd er geadviseerd om de oeverbescherming te laten liggen tot één meter beneden de gemiddelde waterstand in buitenbochten van de rivier. Naast het weghalen van de oeverbescherming zijn bij Grave ook enkele kribben verwijderd. Volgens Sieben (2006) was een maximale oevererosie van vijftig meter te verwachten voor zandige oevers, terwijl een maximum van 25 meter werd verwacht voor oevers met meer cohesie. Deze schatting is gebaseerd op duinafslagexperimenten, waarbij een relatie werd gevonden tussen de hoeveelheid erosie en de golfhoogte en een sterkte coëfficiënt die afhangt van het type sediment (Verheij, 2000). Er waren echter geen specifieke omstandigheden meegenomen bij deze berekening, zoals de vegetatiebedekking en de huidige vorm van de oever.

Bij locaties waar de oeververdediging vlak voor de hoge rivierafvoeren in november 2010 en januari 2011 weg was gehaald is significante erosie gemeten. Eén tot twee meter hoge steilwanden werden gevormd op een afstand van één tot vijf meter van de oorspronkelijke oever (Sieben, 2011). In figuur 2.2 zijn een aantal voorbeelden te zien waar significante erosie heeft plaatsgevonden. Bij de locaties in figuur 2.2A en B zijn geen kribben aanwezig. Hier is de meeste landwaartse verplaatsing van de steilwanden geobserveerd. Op verschillende locaties werden stranden gevormd met een flauwe helling, zoals te zien is in figuur 2.2C (Sieben, 2011). De gemiddelde terugschrijding is zoals verwacht bij zandige oevers twee keer zo groot als bij oevers met een relatief hoge klei concentratie. Er heeft zich nog geen evenwicht ingesteld, daarom wordt verwacht dat er nog verdere erosie zal plaatsvinden (Sieben, 2011). Ook lijkt het er op dat de ecologie zich goed ontwikkelt, aangezien er karakteristieke flora en fauna geobserveerd is. Dit is echter een langdurig proces dat nog verdere monitoring behoeft (Geerling, 2013).

Aanzanding in het zomerbed is geobserveerd vlak voor de natuurvriendelijke oevers en benedenstrooms, variërend tussen de 0 en 8 kubieke meter per strekkende meter rivier, afhankelijk van de lokale stroomsnelheden (Sieben, 2011). Dit zorgt voor een onregelmatige morfologie van de bodem langs de oever. Sieben (2011) hypotheetiseerde dat dit patroon veroorzaakt is door de scheepvaart, die het sediment stroomafwaarts heeft verplaatst richting de rivier-as. Er zijn echter ook locaties waar geen aanzanding is geobserveerd, waarvan gedacht wordt dat dit te verklaren is doordat hier de vaargeul verder van de oever aflight (Sieben, 2011).



Figuur 2.1 – Een overzicht van de verschillende locaties van natuurvriendelijke oevers langs de Maas (gele gebieden) (Geerling, 2013).



Figuur 2.2 – Voorbeelden van ontwikkelde morfologie langs natuurvriendelijke oevers, met een steilwand bij Beugen (A), een ingestorte oever bij Coehoorn (B) en een strand bij Broekhuizen met een flauwe helling die eindigt in een hoge steilwand (C) (Geerling, 2013).

2.2 Natuurvriendelijke oevers langs de IJssel

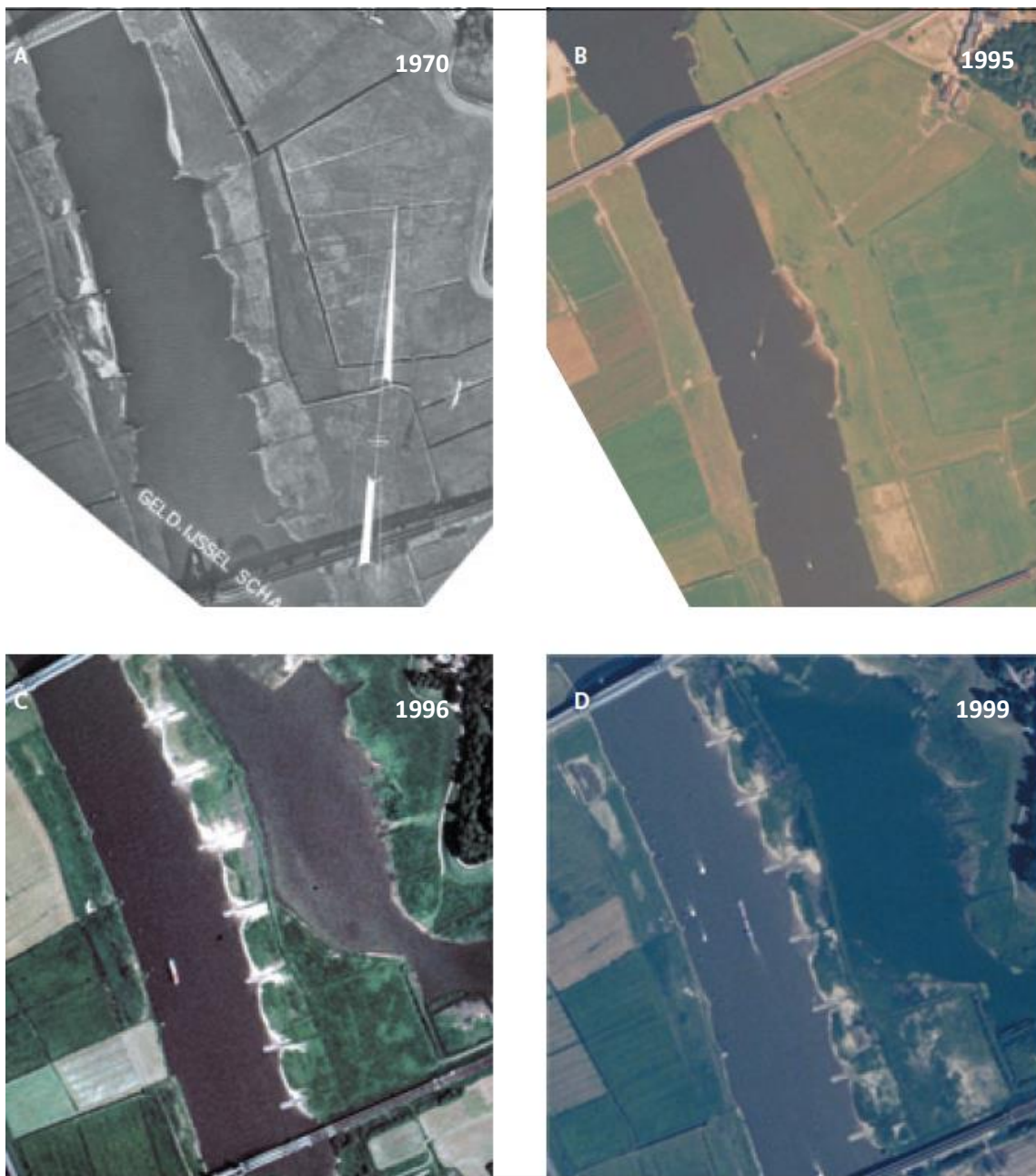
Op dit moment zijn er verschillende locaties langs de IJssel met onbeschermde oevers. Eén van de eerste natuurontwikkelingsprojecten is het Engelse Werk nabij Zwolle, waar in 1995 de oeverbescherming van zeven kribvakken is verwijderd langs de rechteroever. In figuur 2.3 is het projectgebied te zien. Deze locatie ligt naast het park 'het Engelse Werk' en daarom kreeg het project ook deze naam. Het doel van het project was om erosie en sedimentatie tussen de kribben zijn gang te laten gaan en daarmee de ecologie te stimuleren door hydrologische en morfologische processen. Vegetatie in de uiterwaard werd verwijderd aangezien het de doorstroming tijdens hoogwater belemmerde en daardoor een groter overstromingsrisico veroorzaakte. De verwachting was dat zich

hier pioniervegetatie zou ontwikkelen in de loop van de tijd. Verder werd er aanzanding van het zomerbed verwacht. Om te voorkomen dat er uiteindelijk water achter te kribben langs zou kunnen stromen, werden de kribben verder landwaarts uitgebouwd (RIZA, 2003).

De resultaten laten zien dat in het eerste jaar na de verwijdering van de oeververdediging, de oever zich gemiddeld 3.5 meter landwaarts heeft verplaatst. De oever van het Engelse Werk is relatief laag. Hierdoor is bijna de hele oever onderhevig aan erosie door golven en kan de oever zich relatief snel verplaatsen (Van Winden, 2011). In de jaren hierna nam de erosie af tot 1.3 meter per jaar in 2000-2001 (RIZA, 2003). Er werden steilwanden gevormd net boven de gemiddelde waterstand, met een gemiddelde hoogte van 0.6 meter in 2000 (figuur 2.4A). Maar er zijn ook kribvakstranden zonder steilwand geobserveerd (figuur 2.4B). Er is nog geen aanzanding in het zomerbed geobserveerd, naast de natuurlijke fluctuaties in erosie en sedimentatie (RIZA, 2003; Bolwidt et al., 2004). De oeverlijn is erg onregelmatig geworden, mede doordat de meeste erosie plaats vond net stroomopwaarts van de kribben (Van Winden, 2011). Daardoor is er een convex strand gevormd vanaf boven gezien (figuur 2.3C,D), terwijl een concave kribvakvorm zoals geobserveerd in de Waal verwacht werd. De erosie van individuele kribvakken is verschillend, met de meeste erosie in de middelste kribvakken. Dit kan niet helemaal verklaard worden door de samenstelling van de oevers, aangezien de bodemsamenstelling vrijwel gelijk is in alle kribvakken. Er werd geconcludeerd dat het verschil in stromingspatronen de belangrijkste factor is, omdat de erosie groter is in kribvakken waar de maximale stroomsnelheden dicht bij de oever liggen. De meeste erosie van de steilwanden is geobserveerd bij hogere rivierafvoeren tussen 1997 en 2000 (RIZA, 2003; Verheij, 2011). RIZA (2003) verwacht dat er niet ingegrepen hoeft te worden en dat de evenwichtshelling uiteindelijk zal liggen tussen de 1:20 en 1:30. Er is echter wel geobserveerd dat sommige kribben achterloops zijn en deze kribben zullen dus in de gaten gehouden moeten worden (figuur 2.4C).

In 2009 is de oever in totaal maximaal 20 meter geërodeerd, maar op het grootste gedeelte van het traject 5 tot 10 meter. Het verschil tussen 2003 en 2009 is gering en het lijkt er dus op dat de oevererosie vrijwel tot stilstand is gekomen (Van Winden, 2011). Op dit moment zijn de steilwanden lager dan in 2000 en alleen geobserveerd op locaties waar nog een kleilaag aanwezig is. Deze locaties zijn minder ver geërodeerd dan de locaties waar geen steilwanden zijn. Erosie bovenaan het kribvak vindt nu vooral plaats bij hoogwater, waarbij de vegetatie een belangrijke rol lijkt te spelen in de bescherming van de oever. Verheij (2011) concludeerde op basis van de ontwikkeling van de kribvakstranden en aanliggende steilwanden dat zich na ongeveer twintig jaar een evenwicht zal instellen. In figuur 2.4D is de typische morfologie zoals geobserveerd in 2014 te zien.

Een andere locatie langs de IJssel met natuurvriendelijke oevers is de Ossewaard tegenover Deventer, waar eind jaren negentig bij 17 kribvakken de oeverbescherming is weggehaald (Van Winden, 2011). Dit traject is anders dan het Engelse Werk, aangezien de oever hier hoger ligt. Dit heeft gezorgd voor het ontstaan van een steiler talud van gemiddeld 1:10. Van Winden (2011) vermeldt dat het gedeelte boven de gemiddelde waterstand zelfs een helling heeft van 1:5, en het gedeelte onder de gemiddelde waterstand dus flauwer is met een helling van gemiddeld 1:15. Ook is er binnen één kribvak minder variatie in de hoeveelheid oevererosie dan bij het Engelse Werk, waardoor de oever regelmatig is. In 15 jaar is hier de oever gemiddeld 12 meter geërodeerd. Er is verder niets bekend over de samenstelling van de oevers en verschillen tussen verschillende kribvakken (Van Winden, 2011). In figuur 2.5 zijn enkele kribvakken te zien.



Figuur 2.3 – De ontwikkeling van het Engelse Werk, met de situatie in 1970 voordat de oever werd vastgelegd (A), de situatie vlak voordat de oeververdediging werd verwijderd (B) en de morfologie van de natuurvriendelijke oevers in 1996 (C) en in 1999 (D). Zoals te zien zijn er convexe stranden gevormd tussen de kribben na het verwijderen van de oeverbescherming (RIZA, 2003).



Figuur 2.4 – Een paar voorbeelden van de typerende morfologie die zich ontwikkelde na het verwijderen van de oeverbescherming, met een steilwand (A) en een strand met een flauwe helling (B) geobserveerd in 2000. Een aantal kribben is beschadigd zodat er water achterlangs kan stromen (C), zoals geobserveerd in 2003 (RIZA, 2003). In D) is de typische morfologie van de kribvakken in 2014 te zien, met een duidelijk verschil in erosie in een kribvak (foto: Margriet Schoor).



Figuur 2.5 – Enkele natuurvriendelijke oevers in de Ossewaard bij Deventer, bij laagwater (A) en hoger water (B). Een verschil in helling is te zien tussen het bovenste deel van de oever, bedekt met vegetatie, en het talud richting de vaargeul. In C) is het verschil te zien tussen een eroderend kribvak en een kribvak dat nog vast ligt. In dit eroderende kribvak is een flauwere helling ontstaan dan in het verdedigde kribvak, eindigend in een steilwand (Van Winden, 2011).

Bij de Duursche Waarden in de gemeente Olst-Wijhe, is in 2006 de oeverbescherming weggehaald van kribvakken in de buitenbocht van de IJssel. Er is een profiel afgegraven met een helling van 1:7 vanaf de oorspronkelijke oever. De kribben zijn verlengd en als experiment lager aangelegd dan gebruikelijk. Bij een recent veldbezoek (augustus 2014) blijkt dat er nog veel puinsteen aanwezig is op het strand, wat de oever op sommige locaties nog beschermt. In het bezochte kribvak is een profiel ontwikkeld met een steiler bovenste deel, wat bedekt is met vegetatie, en een flauwer talud richting de vaargeul (figuur 2.6A). De gemiddelde helling oogt steiler dan bij het Engelse Werk. Op sommige locaties in het kribvak is een lage steilwand te zien van ongeveer tien centimeter, bestaand uit een dunne kleilaag. Deze kleilaag lijkt hoger te liggen dan bij het Engelse werk. Ook hier is te zien dat de meeste erosie plaatsvond net bovenstrooms van de krib. In 2010 zijn iets verder bovenstrooms bij de Welsumer Waarden ook natuurvriendelijke oevers aangelegd. Op deze locatie zijn er duidelijk verschillen te zien. Zo is er een kribvak met een vlakke zandige helling die eindigt in een lage steilwand (figuur 2.6B), terwijl verderop een steilwand van ongeveer een halve meter te zien is, waarbij het water dicht op de oever staat (figuur 2.6C). Deze steilwand wordt ondergraven (figuur 2.6D) en er liggen op verschillende locaties blokken afgekalfd materiaal. De aangelegde helling is flauwer geworden en loopt tot aan de steilwand. Het verschil in hoeveelheid erosie tussen de verschillende kribvakken is niet bekend.

Bij de andere locaties langs de IJssel gaat het maar om een paar kribvakken met natuurlijke oevers, die veelal nooit versterkt zijn geweest. Vergeleken met omliggende kribvakken ligt de oever nooit verder dan 5 à 10 meter naar achter ten opzichte van de oorspronkelijke oever (Van Winden, 2011). Zo ligt er nabij Rheden een oever die van nature onverdedigd is, maar niet veel verder het land in ligt vergeleken met de verdedigde kribvakken ernaast. Deze oever bestaat uit grind gemengd met zand, waarbij het zand tussen de bovenste laag uitgespoeld wordt rond de watergrens. De oever heeft een steile helling, zonder steilwand (figuur 2.7).

Uit alle observaties van natuurvriendelijke oevers langs de IJssel blijkt dat er een grote variatie is in onder andere de helling van het kribvakstrand, de aanwezigheid van een steilwand, de hoeveelheid oevererosie en het erosiepatroon binnen een kribvak. Deze observaties suggereren verschillen in de lokale omstandigheden die de kribvakhelling in belangrijke mate bepalen, zoals een verschil in oevermateriaal, de ligging van het kribvak, de vorm van het kribvak en de intensiteit van de scheepvaart.



Figuur 2.6 – Voorbeelden van kribvakstranden in de Duursche Waarden (A) en in de Welsumer Waarden (B, C). Er is een verschil te zien in de hoogte van de steilwand, die in de Duursche waarden bijna niet aanwezig is en in de Welsumer Waarden verschilt. In de Welsumer Waarden zijn er vlakke oevers die eindigen in een lage steilwand (B) en oevers met een hoge steilwand (C) die ondergraven worden (D) (foto's: Margriet Schoor).



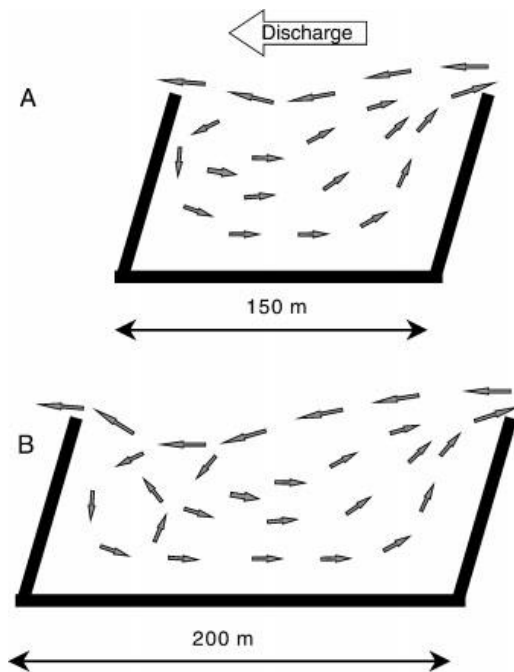
Figuur 2.7 – Een natuurlijke oever nabij Rheden. Het kribvakstrand bestaat uit grind en heeft een relatief steile helling en hoge oever (foto: Margriet Schoor).

3. Stromingspatroon in kribvakken

In het vorige hoofdstuk bleek dat de samenstelling en de locatie van de oever belangrijk kan zijn voor de hoeveelheid oevererosie die plaatsvindt. Oevererosie is afhankelijk van de stabiliteit van de oever en de rivierstroming. Scheepsgeïnduceerde stromingen en golven zorgen voor erosie en sedimenttransport. In dit hoofdstuk zal eerst een samenvatting gegeven worden van de stromingspatronen in een kribvak met en zonder scheepvaart en daarna zal uitgelegd worden wat voor een effect dit heeft op het sedimenttransport en, diensgevolge, de ondergraving van de oevers.

3.1 Stromingspatroon in kribvakken

Kribben worden gebruikt om de rivier op zijn plek te houden en tegelijkertijd zorgen ze ervoor dat de stroming geconcentreerd wordt in het midden van de rivier, zodat de stroming sterk genoeg is om de vaargeul op diepte te houden (Uijttewaal, 2005). In de kribvakken ontstaat desalniettemin ook stroming. Wanneer de kribben niet zijn overstroomd zorgt de rivierafvoer voor het ontstaan van een wervel benedenstrooms van de kribkop. Dit wordt veroorzaakt doordat de rivierstroming de vorm van de krib niet kan volgen en loslaat (Ten Brinke, 2003). In het benedenstroomse deel van het kribvak stroomt een deel van de rivierafvoer het kribvak in met lage stroomsnelheden (Ten Brinke et al., 2004). Door de benedenstroomse krib zal de stroming worden afgebogen richting de oever, waar het richting de bovenstroomse krib wordt gestuurd. Hier zal de stroming het kribvak weer verlaten (Ten Brinke, 2003, 2004). Figuur 3.1A geeft dit stromingspatroon schematisch weer. De laagste stroomsnelheden zijn gemeten in het midden van het kribvak en nemen toe richting de rand (Sukhodolov et al., 2002). Wanneer de afstand tussen de kribben relatief groot is, is dit stromingspatroon iets anders, namelijk met een kleinere en een grotere circulatiecel (figuur 3.1B). Sukhodolov et al. (2002) heeft door middel van experimenten en veldmetingen bepaald dat een systeem met twee duidelijke circulatiecellen ontstaat wanneer de verhouding van kriblengte en de afstand tussen de kribben ongeveer 0.3 of lager is (Fig. 3.1B). Als deze ratio daarentegen ongeveer 0.7 of hoger is, ontstaat een systeem met één circulatiecel (Fig. 3.1A). De kriblengte is hierbij gedefinieerd als de afstand vanaf de kribkop tot aan de waterlijn bij gemiddelde rivierafvoer. De hoogte van de kribben is ongeveer gelijk aan de gemiddelde waterstand, zodat de stroming genoeg geconcentreerd wordt bij lagere waterstanden, terwijl tijdens hoge rivierafvoeren de stromingsweerstand niet te hoog is (Uijttewaal, 2005).



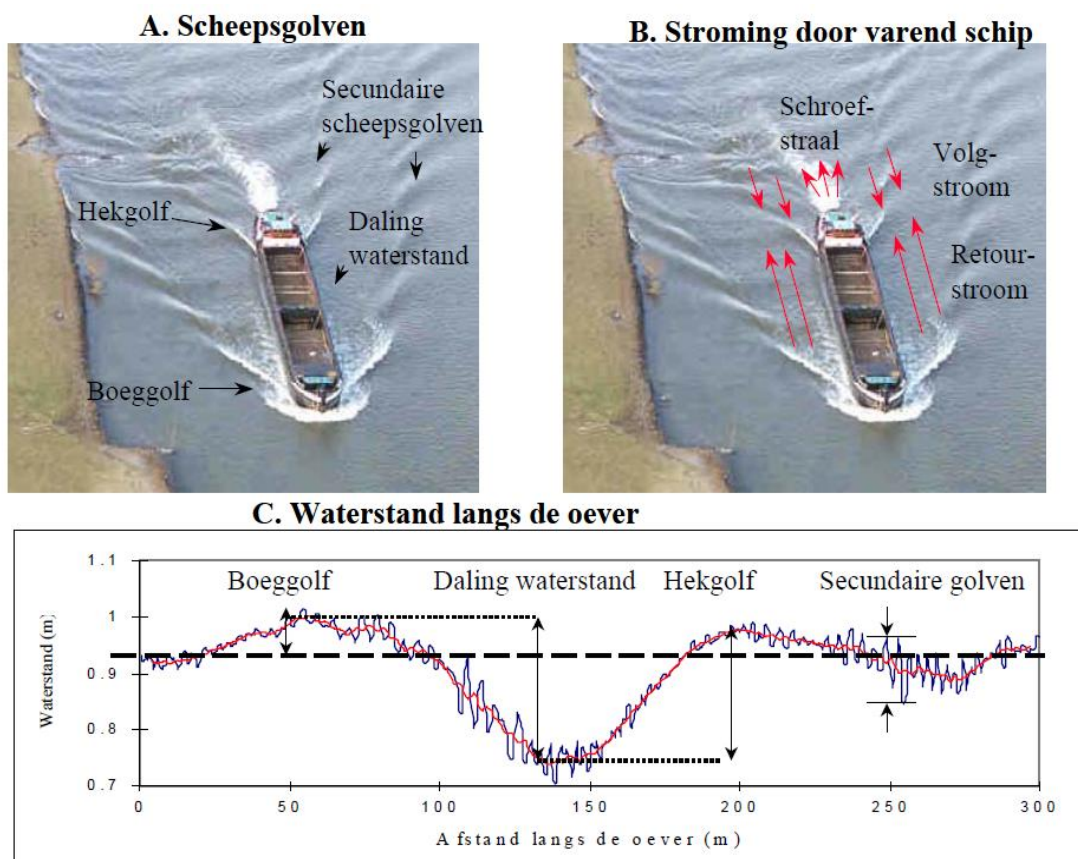
Figuur 3.1 – Geschematiseerd stromingspatroon in een kribvak. In relatief vierkanter kribvakken is één circulatiecel aanwezig (A), terwijl in langere kribvakken een relatief kleine en een grotere circulatiecel ontwikkelt (B) (Ten Brinke et al., 2004).

3.2 Scheepsgeïnduceerde stromingen

Bij gemiddelde en lagere waterstanden heeft de passage van een schip grote invloed op het stromingspatroon en de waterstanden in een kribvak, door het opwekken van golven en stromingen. In figuur 3.2 zijn de opgewekte golven en stromingen weergegeven, samen met de gerelateerde waterstandsvariatie langs de oever. Primaire golven worden veroorzaakt door de opstuwing van het water bij de boeg van het schip (boeggolf), de waterspiegeldaling aan de zijkant van het schip en de golf bij het achtersteven van het schip (hekgolf) (Ten Brinke et al., 2004). De golfhoogte is afhankelijk van de vaarsnelheid, de afstand tot de oever en de verhouding tussen de dwarsdoorsnede van het schip en de dwarsdoorsnede van de vaargeul (Verheij, 2011). Het door de boeg opgestuwde water stroomt terug naar de depressie aan de zijkant van het schip en daardoor ontstaat er een retourstroom langs het schip (figuur 3.2B). Daarnaast wordt er ook een volgstroom opgewekt door het water dat vanaf de hekgolf naar de depressie stroomt (Ten Brinke et al., 2004). Secundaire golven worden opgewekt aan de zijkant en achterkant van het schip en verplaatsen zich onder een hoek naar de oever (Verheij, 2011; Ten Brinke et al., 2004). De golfhoogte van secundaire golven hangt alleen af van de vaarsnelheid en neemt nauwelijks af richting de oever (Verheij, 2011). Deze golven worden vooral opgewekt door kleinere schepen. Bij het passeren van relatief grote schepen zorgen de primaire golven voor de hoogste schuifspanningen op het kribvakstrand, terwijl secundaire golven ongeveer eenderde van de totale schuifspanning veroorzaken (Ten Brinke, 2003).

De scheepsgeïnduceerde stromingen en golven kunnen worden waargenomen in de waterbeweging in het kribvak (figuur 3.2C). Wanneer de boeg van een schip de krib passeert wordt er een helling gecreëerd tussen de kribkop en de boeg van het schip. De retourstroom zorgt ervoor dat het water uit het kribvak naar de depressie aan de zijkant van het schip stroomt en daardoor wordt de circulatie in het kribvak sterk afgezwakt. De waterstand in het kribvak stijgt. Wanneer de achterzijde van het schip het kribvak passeert zal de stroming in het kribvak omkeren, omdat nu de volgstroom

ervoor zorgt dat het water vanaf het kribvak naar de depressie stroomt. Als de achterzijde dan de volgende krib passeert, moet de volgstroom afbuigen naar de vaargeul en ontmoet hier de retourstroom vanuit het volgende kribvak. De circulatie wordt hierdoor versterkt en de waterstand in het kribvak daalt sterk, omdat het water uit het kribvak wordt gezogen. Na de passage van het schip stroomt het water weer terug het kribvak in en op dit moment worden de hoogste stroomsnelheden gemeten (Ten Brinke, 2003; Ten Brinke et al., 2004). Dit effect is het sterkst wanneer de afstand tussen de kribben relatief groot is, omdat er een groter volume aan water verplaatst wordt. Langere schepen zorgen voor een volgstroom parallel aan het kribvak die langer aanhoudt (Ten Brinke, 2003). Vanuit het kribvak gezien is vooral de sterke daling in de waterstand door de zuiging van de volgstroom belangrijk, aangezien dit het meeste sedimenttransport veroorzaakt.



Figuur 3.2 - Het ruimtelijk patroon van scheepsgolven (A) en scheepsgeïnduceerde stroming (B) gerelateerd aan de gemeten waterstand langs de oever (C) (Ten Brinke, 2003).

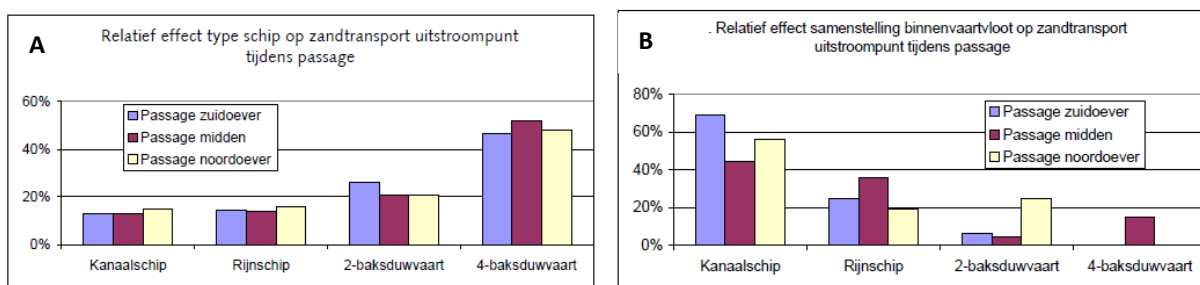
3.3 Sedimenttransport in kribvakken

Kribben zorgen voor een verstoring van de hoofdstroming in de rivier zelf en hebben daarom ook een invloed op het sedimenttransport. De wervel die zich benedenstrooms van een krib vormt zorgt er voor dat de bodem hier uitgeschuurd wordt en er een kuil vormt die uitdooft richting the as van de rivier. Vanwege de vorm worden dit ook wel kribvlammen genoemd (Ten Brinke et al., 2004). Het uitschuren van de bodem kan de kribben zelf beschadigen (Uijttewaal, 2005).

In het kribvak wordt fijn sediment afgezet in het midden van de circulatiecel, waar de stroomsnelheden het laagst zijn. In relatief kleine kribvakken met maar één circulatiecel is deze laag het dikst in het midden van het kribvak, terwijl in grotere kribvakken met twee circulatiecellen deze zone meer benedenstrooms te vinden is (Sukhodolov et al., 2002). Sedimenttransport wordt ook

beïnvloed door scheepspassages, aangezien het passeren van een schip grote invloed heeft op stroomsnelheden. De secundaire golven zorgen voor het opwoelen van sediment, terwijl de opgewekte stromingen het sediment verplaatsen naar de bovenstroomse krib, waar het het kribvak verlaat (Ten Brinke, 2003; Verheij, 2011).

Uit metingen blijkt dat het sedimenttransport het grootst is wanneer het schip net het kribvak gepasseerd is. Dit is het gevolg van de stroomsnelheden die het grootst zijn wanneer het water terug het kribvak instroomt, nadat het uit het kribvak was gezogen door de volgstroom (Ten Brinke, 2003; Ten Brinke et al., 2004). De hoeveelheid sediment die het kribvak uit getransporteerd wordt, hangt af van de sterkte van de scheepsgeïnduceerde stromingen en daarom van de eigenschappen van het schip en de dwarsdoorsnede van de rivier (Ten Brinke et al., 2004). Bijvoorbeeld, in de Waal varen geladen schepen langs de zuidoever en minder geladen schepen langs de noordoever, wat als gevolg heeft dat er twee keer zoveel erosie optreedt bij kribvakken aan de zuidoever (Ten Brinke, 2003). Ook vindt er volgens Ten Brinke (2003) meer erosie plaats wanneer een schip stroomopwaarts vaart dan stroomafwaarts. Hoewel de eigenschappen van een schip dus een belangrijke invloed hebben op het sedimenttransport, blijkt volgens metingen van Ten Brinke (2003) dat de frequentie dat een bepaald type schip langs vaart meer invloed heeft dan het individuele effect (figuur 3.3). Ook kan er interferentie van scheepsgolven plaatsvinden als meerdere schepen tegelijk of vlak na elkaar een kribvak passeren, waardoor mogelijk meer sediment getransporteerd wordt (Ten Brinke, 2003).



Figuur 3.3 – Het effect van verschillende type schepen op sedimenttransport in kribvakken in de Waal (Ten Brinke, 2003). In (A) is het effect van één scheepspassage weergegeven, terwijl in B) deze waarden zijn vermenigvuldigd met het relatieve aandeel van het bewuste type schip in het totaal waargenomen scheepspassages.

In kribvakken die in een rivierbocht liggen is echter geen significant effect van de scheepvaart geobserveerd (Ten Brinke, 2003). Hier heeft het stromingspatroon in de bocht teveel invloed op de stroomsnelheden en sedimenttransport. Zo varen schepen door de ondiepere bodem in een binnenbocht op een grotere afstand van de oever dan op een recht rivier traject, waardoor ze geen significant effect hebben op de stroomsnelheden in het kribvak. Om het sediment hier in beweging te krijgen is interferentie nodig tussen meerdere passerende schepen, maar zelfs dan zal er weinig erosie plaats vinden volgens Ten Brinke (2003). Het opgewoelde sediment zal namelijk het kribvak niet verlaten en op dezelfde plek bezinken, doordat de circulatie in het kribvak te zwak is. In kribvakken in de buitenbocht van een rivier zijn stroomsnelheden en zandconcentraties al hoger dan in kribvakken langs een recht riviertraject, maar is er geen toename gemeten in de zandconcentratie tijdens de passage van een schip. De kribvakstranden zijn in het algemeen smaller en steiler in buitenbochten door de verhoogde stroomsnelheden, maar daar hebben scheepspassages geen extra invloed op (Ten Brinke, 2003).

4. Oevererosie

De hoeveelheid oevererosie is één van de belangrijkste aandachtspunten bij het verwijderen van de oeverbescherming in kribvakken. De hoeveelheid erosie is het resultaat van twee erosieprocessen en hun interacties: fluviatiele erosie en massabewegingen (Rinaldi & Darby, 2007). Fluviatiele erosie betekent directe verwijdering van oevermateriaal, met name van de oeverteen waardoor ondergraving optreedt, en is daarom afhankelijk van de stroomsnelheid en de erosiegevoeligheid van de bodem. De erosiegevoeligheid hangt af van de samenstelling van de oever, aangezien fijn tot grof zand relatief makkelijk te eroderen is, terwijl de erodibiliteit van klei en organisch materiaal veel lager is (Simon et al., 2000; Stouthamer et al., 2011). De hoeveelheid erosie hangt ook deels af van de locatie van de oever, omdat stroomsnelheden variëren. Stroomsnelheden en bijbehorende schuifspanningen zijn bijvoorbeeld in de buitenbocht van een rivier veel hoger dan in de binnenbocht. Naast fluviatiele erosie kunnen er ook massabewegingen plaatsvinden, die veroorzaakt worden door het falen van de door ondergraving versteilde oever onder invloed van de zwaartekracht (Rinaldi & Darby, 2007). Massabewegingen zijn discontinu en werken op een grotere schaal vergeleken met fluviatiele erosie (Rinaldi & Darby, 2007). Verschillende mechanismen beïnvloeden het falen van de oever, zoals ook vertering en het uitschuren van de oever door fluviatiele erosie. In dit hoofdstuk worden deze mechanismen uitgelegd.

4.1 Oeverstabiliteit

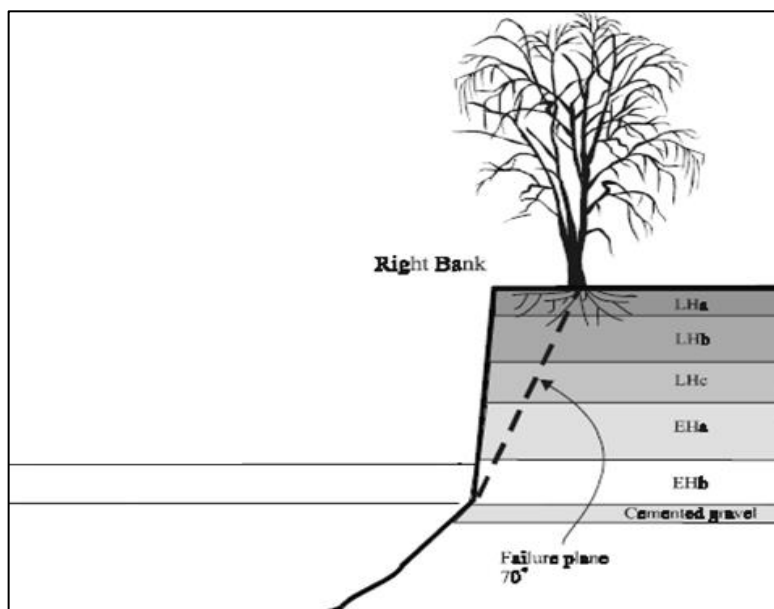
Een oever faalt wanneer de zwaartekracht op de oever groter is dan de krachten die weerstand bieden (Simon et al., 2000; Rinaldi & Darby, 2007). Factoren die de zwaartekracht bepalen zijn de hoogte van de oever, het soortelijk gewicht van de bodem, de hoeveelheid water in de bodem en andere objecten die op de oever staan, zoals vegetatie. De zwaartekracht wordt verder ook beïnvloed door de helling van het schuifvlak (figuur 4.1) (Simon & Collinson, 2002). De schuifspanning van de bodem biedt weerstand tegen het falen van de oever en hangt af van de effectieve cohesie, de normaalkracht en de waterdruk. De normaalkracht bepaalt de wrijvingskracht tussen het schuifvlak en de oever, en hangt ook af van de zwaartekracht en de helling van het schuifvlak (Simon et al., 2000). De belangrijkste factoren die de stabiliteit van de oever bepalen zijn dus de eigenschappen van de bodem en de hydrologische situatie.

De cohesie van de bodem is een belangrijke factor die de stabiliteit van de oever bepaalt (Thorne, 1991). Wanneer een bodem niet cohesief is, bieden alleen de normaalkracht en de wrijving tussen de korrels weerstand tegen het falen van de oever (Thorne, 1991). De meeste oevers zijn echter wel in enige mate cohesief. Effectieve cohesie is het resultaat van de aantrekkingskracht tussen silt- en kleideeltjes en daarbij verhogen ze de weerstand van de bodem tegen massabewegingen. Ook hebben vegetatie en de waterdruk een grote invloed op de cohesie van de bodem (Thorne, 1991).

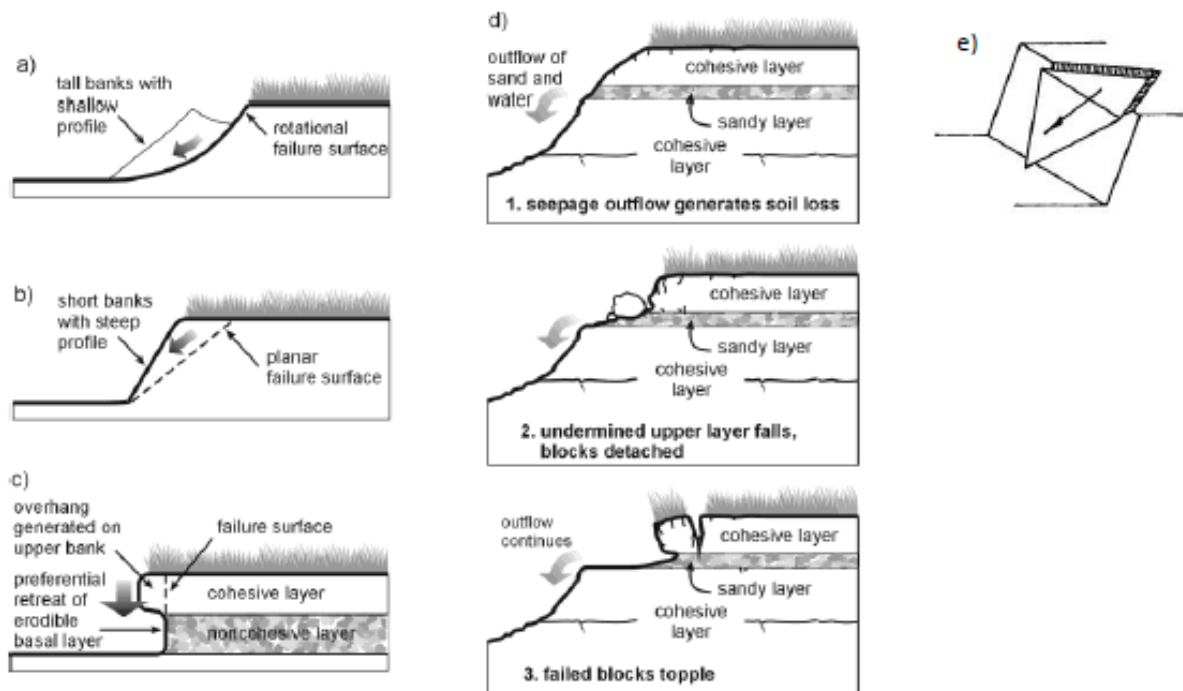
De waterdruk heeft een grote invloed op de oeverstabiliteit (Rinaldi & Darby, 2007). Positieve druk wanneer de bodem verzadigd is, zorgt voor een verlaging van de schuifspanning van de oever. Ook zorgt het voor een toename in gewicht van de bodem. Negatieve druk in de onverzadigde zone boven de grondwaterspiegel zorgt juist voor een toename in cohesie. Het verschil tussen de luchtdruk en de waterdruk zorgt hier namelijk voor zuigspanning (Simon et al., 2000). Deze toename in cohesie veroorzaakt dus een toename in schuifspanning van de oever en dus kan een steilere helling blijven bestaan (Simon et al., 2000).

Vegetatie heeft mechanische en hydrologische effecten op de oeverstabiliteit, wat beide zowel een positief als negatief effect kan hebben (Rinaldi & Darby, 2007). Het belangrijkste mechanische effect is de toename van de oeverstabiliteit door de wortels, wat afhangt van de lengte van de wortels ten opzichte van de hoogte van de oever, de distributie en de weerstand tegen trekkracht. Deze eigenschappen variëren per soort (Greenway, 1987). In figuur 4.2 is een voorbeeld te zien van toegenomen oeverstabiliteit door wortels. Ook zorgt vegetatie voor een toename in gewicht, wat resulteert in een grotere zwaartekracht, maar ook in een grotere normaalkracht. Of de oeverstabiliteit toeneemt, hangt hierbij dus af van de helling van het schuifvlak. Hierbij is er ook een groot verschil per soort, aangezien grote bomen veel meer gewicht toevoegen aan de oever dan gras. Vegetatie heeft ook een effect op de hydrologische toestand van de bodem, door de processen van interceptie, infiltratie en evapotranspiratie (Rinaldi & Darby, 2007). Transpiratie zorgt voor een verlies van water in de bodem, terwijl wortels zorgen voor een verbetering van de structuur van de bodem en daardoor de infiltratiecapaciteit verbeteren.

Een oever faalt als de schuifspanning van de oever overschreden wordt. Er zijn echter ook verschillende processen die de timing en het type massabeweging bepalen. Naast de samenstelling van de oever, zijn de vorm en de gelaagdheid van de oever hierbij ook belangrijk (Thorne, 1991). In figuur 4.1 zijn de verschillende types massabewegingen samengevat. In de meeste gevallen is het deel van de oever dat gaat falen zichtbaar aan een scheur in de oever. Dit wordt veroorzaakt door de trekkracht die aanwezig is in het bovenste deel van een oever met een steile helling (Thorne, 1991). Hoge, relatief minder steile oevers falen vaak langs een rotatievlak (figuur 4.1A), terwijl lagere en steilere oevers vaak falen langs een recht oppervlak (figuur 4.1B) (Thorne, 1991).



Figuur 4.1 – Schets van het profiel van een oever met een schuifvlak. Of de oever gaat falen, hangt af van de helling van het schuifvlak, de zwaartekracht, de waterdruk en de effectieve cohesie (Simon & Collinson, 2002).



Figuur 4.1 – Relatie tussen eigenschappen van de oever en de verschillende mechanismen van massabewegingen die ermee gepaard gaan (Langendoen & Simon, 2008).



Figuur 4.2 – Een voorbeeld van toegenomen oeverstabiliteit door vegetatie (Wytema, 2009).

4.2 Timing massabewegingen

Massabewegingen zijn vaak gekoppeld aan fluviale erosie van de oeverteen (Langendoen & Simon, 2008). De helling van de oever wordt steiler wanneer de oeverteen geërodeerd wordt, en de oever faalt wanneer deze helling steiler wordt dan de wrijvingshoek. Dit proces van ondergraving van de oever wordt beïnvloed door de gelaagdheid, omdat niet-cohesieve lagen eerder eroderen dan cohesieve lagen (figuur 4.1C). De locatie, grootte en dichtheid van vegetatie ten opzichte van de oever is ook belangrijk, want wanneer vegetatie alleen op de oever aanwezig is, kan het de oeverteen niet beschermen en zal er eerder ondergraving plaatsvinden (Thorne, 1990).

Een verandering in waterdruk heeft een grote invloed op de timing van massabewegingen (Rinaldi & Darby, 2007). Zoals uitgelegd in de vorige paragraaf, zorgt een positieve waterdruk voor een vermindering van de schuifspanning van de bodem. Daarom kan een massabeweging in gang gezet

worden door hoge waterstanden in de rivier of door een grote neerslagintensiteit (Simon et al., 2000). De meeste massabewegingen vinden plaats direct na hoogwater wanneer het waterpeil zakt, omdat op dit moment de bodem nog verzadigd is, maar de druk die de rivier op de oever uitoefent wegvalt (Thorne, 1991; Simon et al., 2000). Dit proces is vaak geobserveerd in cohesieve oevers die niet snel genoeg draineren (Thorne, 1991). Kwel en piping kunnen ook zorgen voor een verminderde oeverstabiliteit. Deze processen zijn vooral aanwezig in oevers met dunne laagjes niet-cohesief zand tussen dikke lagen silt en klei (Thorne, 1991). De verzwakking van deze laagjes ondermijnen hierbij de bovenliggende lagen, die hierdoor kunnen instorten (figuur 4.2D). Hierbij is dus weer de gelaagdheid van de oever belangrijk. Ook kunnen er zettingsvloeiingen optreden op locaties waar losgepakt zand aanwezig is. Dit is een verschijnsel waarbij een verzadigde zandmassa zich gedraagt als een vloeistof als gevolg van het wegvallen van de korrelspanning. Zand is losgepakt wanneer er over drie meter of meer in de verticaal zand voorkomt met een relatieve dichtheid kleiner dan 66 procent (Stouthamer et al., 2011). Als laatste kan het uiteenzetten en inkrimpen van de oever door vries/dooi cycli en verdroging van de bodem zorgen voor barsten in de oever en daarmee een massabeweging in gang zetten (Lawler et al., 1997).

Wanneer een massabeweging heeft plaatsgevonden, is het oevermateriaal niet gelijk weg getransporteerd, maar blijft het liggen aan de teen van de oever (figuur 4.3). Hierdoor wordt de oeverteen tijdelijk beschermd totdat de rivier al het materiaal heeft meegenomen. Uiteindelijk kan de rivier de oever weer eroderen en begint het proces van ondergraving weer opnieuw. Volgens Thorne (1991) is dit het bewijs dat de hoeveelheid oevererosie op langere termijn bepaald wordt door de ondergraving door rivierstroming, terwijl de samenstelling van de oever en andere processen alleen de limiet bepalen voor een stabiele oeverhoogte en helling (Parker et al., 2011).



Figuur 4.3 – Ingestorte oever. Het materiaal beschermt de oeverteen tegen verdere erosie (Wytema, 2009).

5. Bestaande modellen

Om op toekomstige locaties de oeverstabiliteit en de hoeveelheid erosie te voorspellen, bestaan er enkele modellen. In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van twee veelgebruikte modellen, te beginnen met het Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) en het bijbehorende RipRoot model, gevolgd door een beschrijving van WAQBANK.

5.1 Bank Stability and Toe Erosion Model

BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) is ontwikkeld door Simon et al. (2000) en voorspelt de ontwikkeling van een enkele dwarsdoorsnede van de oever op grond van de gedetailleerde opbouw van de oever maar sterk versimpelde stroming. Het Bank Stability model berekent de stabiliteit van de oever en het schuifvlak, gebaseerd op cohesie, de sequentie van lagen en hun geotechnische eigenschappen in de oever en de waterdruk. Het is een numeriek model dat gebaseerd is op de verhouding tussen de krachten die weerstand bieden tegen het falen van de oever en de zwaartekracht. Deze verhouding wordt de veiligheidsfactor genoemd, waarbij een waarde kleiner dan één aangeeft dat de oever instabiel is. De uitkomst van het model kan daarna gebruikt worden om de hoeveelheid erosie van de oeverten door de rivierstroming te voorspellen met het Toe Erosion model.

De geometrie van de oever die ingevoerd wordt in het model hangt af van de helling en de hoogte van de oever en de oeverten. Ook kunnen er vijf verschillende horizontale lagen worden aangegeven. Hierna moeten voor elke laag eigenschappen worden gespecificeerd die de veiligheidsfactor bepalen, zoals de gemiddelde korrelgrootte, wrijvingshoek, cohesie en verzadigd gewicht van de bodem. Met behulp van een ingevoerde waterdiepte worden vervolgens de positieve en negatieve waterdruk langs de dwarsdoorsnede berekend en de druk die het rivierwater op de oever uitoefent. Het model gaat uit van hydrostatische druk onder de grondwaterspiegel en een lineaire interpolatie van de zuigspanning boven de grondwaterspiegel. Ook kan er vegetatie worden toegevoegd, wat in het model geparametriseerd wordt als extra cohesie. Deze cohesie is een functie van de trekkracht van de wortels en de verhouding tussen het totale oppervlak en het oppervlak dat wordt ingenomen door de wortels. Als laatste kan ook een vorm van oeverbescherming worden aangegeven, zoals juten netten en stenen oeververdediging.

Als output geeft het model de veiligheidsfactor en het berekende schuifvlak. Het schuifvlak kan worden gedefinieerd door de gebruiker, maar kan ook door het model worden uitgerekend. In dat geval berekent het model het schuifvlak waarbij de veiligheidsfactor het kleinst is. Ook is het mogelijk om een scheur in de oever toe te voegen. In het geval dat de veiligheidsfactor onder de 1 ligt en de oever dus faalt volgens het model, kan het nieuwe oeverprofiel weer als input gebruikt worden voor een nieuwe oeverstabiliteitsberekening. Ook kan het gebruikt worden voor een oevertenerosie berekening.

Het Toe Erosion model gebruikt de Partheniadesvergelijking om de hoeveelheid erosie aan de oeverten door rivierstroming te berekenen. Deze vergelijking is een lineair verband tussen de erosiesnelheid en het verschil tussen de schuifspanning en de kritieke schuifspanning (Partheniades, 1965). De schuifspanning wordt berekend met behulp van de geometrie van de oever en een constante rivierafvoer. De kritieke schuifspanning is een eigenschap van het oevermateriaal. Het resulterende dwarsprofiel van de oever kan weer worden gebruikt in het oeverstabiliteit model.

In het Bank Stability and Toe Erosion Model worden bepaalde aannames gedaan, zoals dat het geërodeerde materiaal gelijk weg getransporteerd wordt en niet de oever nog tijdelijk beschermt. Ook is de rivierafvoer en dus de schuifspanning constant, is er geen aanvoer van sediment van bovenstrooms en kan de rivierbedding niet eroderen. Als er vegetatie is toegevoegd, breken alle wortels tegelijkertijd als de oever faalt. Omdat dit geen realistische weergave is, kan beter het RipRoot model gebruikt worden (zie paragraaf 5.2). De extra weerstand door vegetatie geldt alleen voor de eerste meter van de bodem en is een gemiddelde waarde.

5.2 RipRoot model

Het RipRoot model is ontwikkeld om de rol van vegetatie op de stabiliteit van een oever beter te voorspellen en kan worden gebruikt in het Bank Stability and Toe Erosion Model (Pollen & Simon, 2005; Pollen, 2007). Het grote verschil is dat er rekening wordt gehouden met de sterkte van individuele wortels en dat deze dus op verschillende momenten kunnen breken. Het model doorloopt de loop die weergegeven is in figuur 5.1. De initiële kracht die op de wortels wordt uitgeoefend, wordt evenredig verdeeld over alle wortels. Wanneer de belasting toeneemt, kan het groter zijn dan de trekkracht van sommige wortels, waardoor deze breken. In dat geval wordt de kracht verdeeld over de resterende wortels. Als er geen wortels breken, wordt er meer belasting toegevoegd en wordt er opnieuw berekend of er wortels breken. Het model stopt als alle wortels zijn gebroken of als de totale kracht groter is dan de zwaartekracht. Door de gebruiker kunnen de vegetatietypes worden aangegeven, samen met de hoeveelheid wortels die in de bodem aanwezig zijn en de toename in belasting die per stap in de loop wordt toegevoegd. De toename in belasting moet tussen 0 en de totale zwaartekracht liggen. Wortels kunnen ook uit de bodem getrokken worden in plaats van te breken. Dit proces kan gemodelleerd worden wanneer het bodemtype en de bodemvochtigheid is toegevoegd (Pollen, 2007). De krachten die hiervoor nodig zijn veranderen met variaties in bodemvochtigheid en zijn ook verschillend per bodemtype. Uiteindelijk geeft het model een waarde voor de toegevoegde cohesie door de wortels per vierkante meter, dat in het Bank Stability and Toe Erosion Model kan worden gebruikt. Een nadeel van het model is dat er veel bekend moet zijn over de eigenschappen van de bodem.

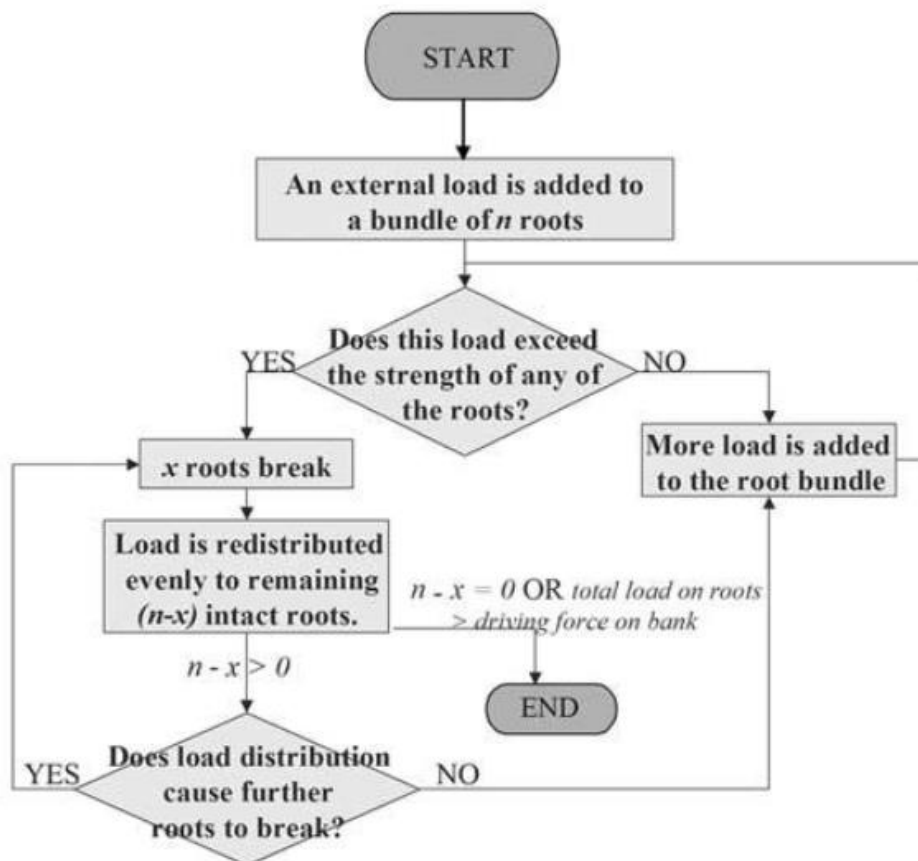
5.3 WAQBANK

WAQBANK is een oevererosiemodule die gebruikt kan worden in combinatie met WAQUA, waarmee dieptegemiddelde waterstromingen worden gemodelleerd. Het doel van WAQBANK is het identificeren van oevers langs een rivier die gevoelig zijn voor erosie. Het model berekent de verplaatsing van de oever en de hoeveelheid sediment die daar bij vrijkomt na het eerste jaar en nadat er zich een evenwicht heeft ingesteld. Het kan daarom gebruikt worden om een schatting te maken van de hoeveelheid erosie langs een heel riviertraject na het verwijderen van oeverbescherming (Van de Sligte & Spruyt, 2012). De berekening van oevererosie is echter veel eenvoudiger dan in het Bank Stability and Toe Erosion Model.

Als input worden resultaten van WAQUA gebruikt en de lokale eigenschappen, zoals oevermateriaal, oeverbescherming en de intensiteit van de scheepvaart. De eigenschappen van de oever worden homogeen verondersteld per riviertraject. Deltares adviseert om WAQUA berekeningen te gebruiken met tenminste tien verschillende rivierafvoeren voor een nauwkeuriger resultaat. Dit aspect is dus een verbetering ten opzichte van het Bank Stability and Toe Erosion Model, waarbij maar één rivierafvoer kan worden toegevoegd. De oeverlijnen langs een rivier worden door WAQBANK bepaald op basis van bathymetrie data en een referentieafvoer die is berekend met een WAQUA

model. Om de hoeveelheid oevererosie te bepalen en daarmee de verplaatsing van de oever, berekent WAQBANK de erosie door scheepsgolven en de erosie door stroming van de rivier. De nieuwe oeverlijn wordt bepaald door lokale berekende verplaatsingen van de oever te combineren. Met de verplaatsing van de oever wordt ook het volume van het geërodeerde sediment geschat (Van de Sligte & Spruyt, 2012).

Een nadeel van het model is dat het deel tussen de vaargeul en de oever ontbreekt, waardoor daar geen sediment kan blijven liggen. Geërodeerd materiaal van de oevers kan dus niet de oever tijdelijk beschermen. Ook is gebleken dat locaties waar de meeste erosie verwacht werd door het model niet overeenkwamen met de realiteit, doordat erosie in het model alleen afhankelijk is van lokale stromingspatronen. De eigenschappen van de oever zijn hetzelfde voor bepaalde riviertrajecten en de samenstelling van de oever wordt homogeen verondersteld. Met het model kan er ook geen langere termijn voorspelling gedaan worden, aangezien er geen terugkoppeling is tussen de oevererosie en de rivierstroming. Door deze nadelen wordt geadviseerd WAQBANK alleen te gebruiken om in te kunnen schatten welke delen van de oever het meest gevoelig zijn voor erosie en hoe gevoelig een bepaalde locatie is voor verschillende maatregelen (Giri, 2013).



Figuur 5.1 – Loop van het RipRoot model (Pollen & Simon, 2005).

6. Ontwikkeling van natuurvriendelijke oevers in de tijd

Natuurvriendelijke oevers kunnen op verschillende manieren worden aangelegd, onder andere afhankelijk van het bodemtype en de intensiteit van de scheepvaart (STOWA, 2011). De oeverbescherming kan bijvoorbeeld helemaal weggehaald worden, of alleen het deel boven de gemiddelde waterstand dat onderhevig is aan erosie door golven. Daarnaast kan ook de uiterwaard worden afgegraven tot het verwachte evenwichtsprofiel (Sieben, 2011). Een natuurlijke oever ontstaat vanzelf onder invloed van golven en stromingen na het verwijderen van de oeververdediging. In dit hoofdstuk wordt deze ontwikkeling beschreven en worden factoren benoemd die de erosiesnelheid en evenwichtshelling bepalen.

6.1 Ontwikkeling van het dwarsprofiel

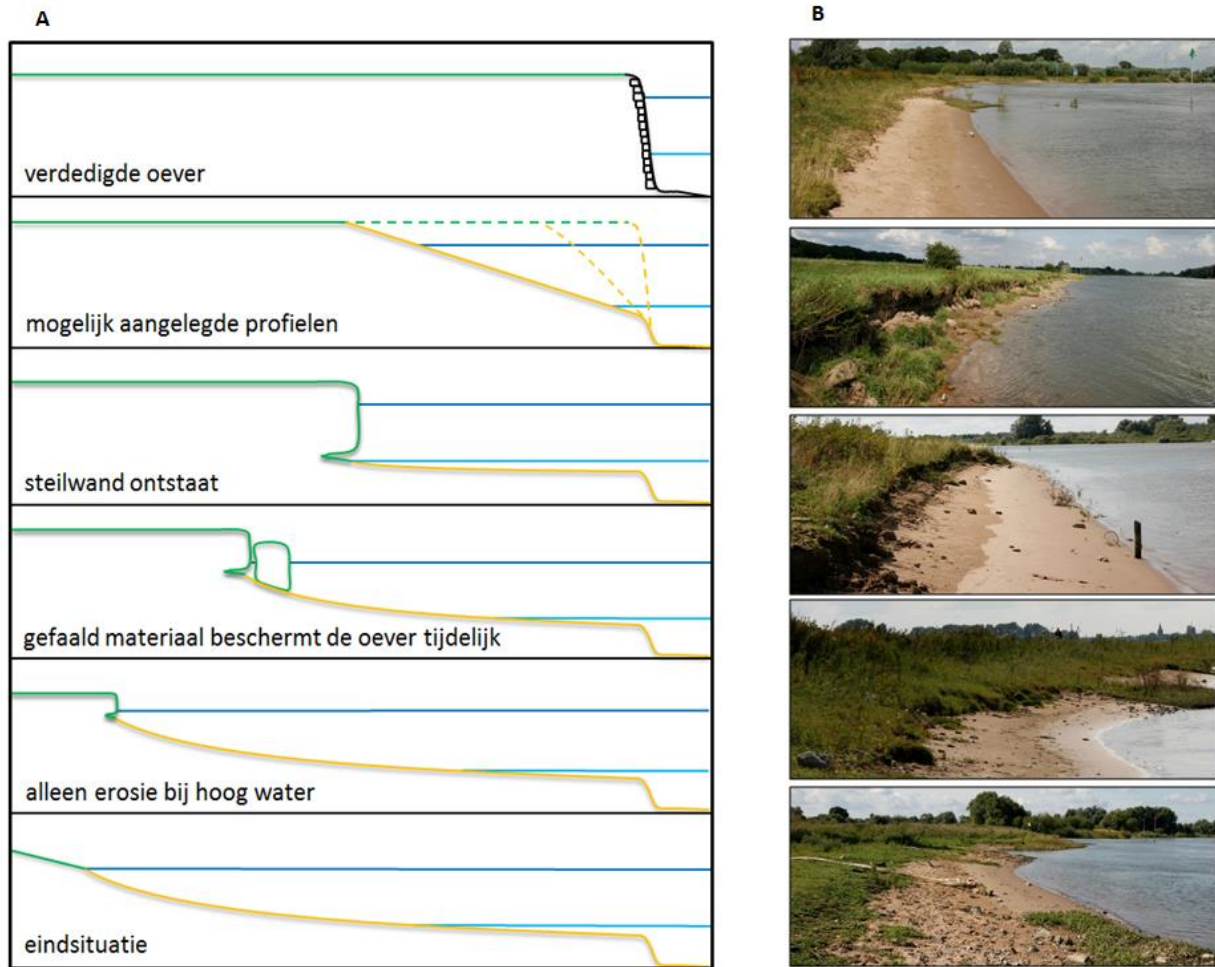
Uit waarnemingen bij al bestaande natuurvriendelijke oevers lijkt de ontwikkeling van het dwarsprofiel overal dezelfde trend te hebben. In figuur 6.1 is het verwachte verloop te zien na het verwijderen van de oeververdediging en eventueel het aanleggen van een evenwichtsprofiel. Het deel van de oever waar de oeververdediging is weggehaald zal onder invloed van stroming en golven gaan eroderen. De minder cohesieve lagen zullen sneller eroderen en de bovenliggende lagen ondergraven. Dit zorgt ervoor dat de oever uiteindelijk instabiel wordt en gedeeltelijk instort, waarna het proces van ondergraven weer opnieuw begint en er een steilwand ontstaat. Door golven wordt het sediment losgewoeld en door de zuiging van de volgstroom meegevoerd uit het kribvak. De steilwanden worden daarom alleen ondergraven wanneer het water aan de teen van de oever staat. Daarnaast beschermt het ingestorte materiaal de oeverteen tijdelijk tegen het ondergraven, totdat al het materiaal weggevoerd is.

Het ontstaan van steilwanden suggereert de aanwezigheid van cohesief materiaal. Bolwidt et al. (2004) hebben het inderdaad ook alleen over kleibanken bij natuurlijke oevers langs de IJssel, maar Peters (2005) beschrijft ook steilwanden in de Maas met zandig materiaal. Zowel kleiige steilwanden als zandige steilwanden zijn ook geobserveerd tijdens een recent veldbezoek (hoofdstuk 2). Steilwanden ontstaan als vorm dus in zowel zandige als kleiige oevers. Echter, de snelheid van erosie wordt sterk beïnvloed door het type sediment. De stabiliteit van de oever, en dus de snelheid van ondergraven en instorten, wordt naast door cohesie ook bepaald door de vegetatie op de oever.

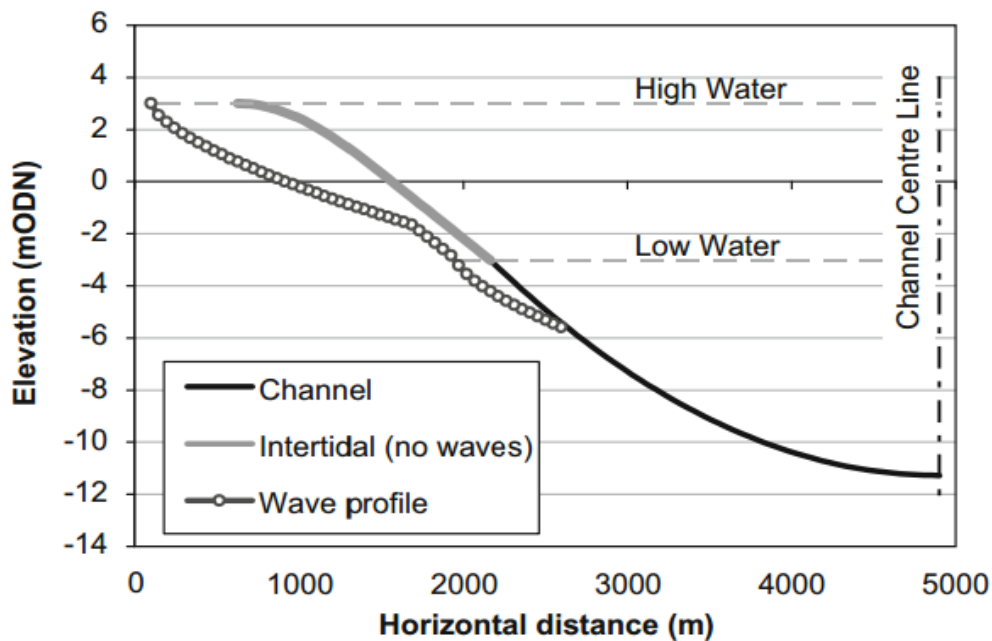
Oevers die nog niet ver geërodeerd zijn, hebben relatief hoge steilwanden. Delen van een kribvakstrand die verder geërodeerd zijn, hebben een lagere steilwand doordat het hoogteverschil tussen de oeverteen, waar de erosie plaatsvindt, en het maaiveld kleiner wordt. Golven breken steeds meer op de zandstrandjes die ontstaan en uiteindelijk zal oevererosie alleen plaatsvinden tijdens hoogwater. De erosiesnelheid zal dus afnemen, doordat de frequentie van water dat aan de oeverteen staat afneemt. Uiteindelijk is het kribvak zo ver geërodeerd dat het kribvakstrand niet eindigt in een steilwand, maar in een steilere helling bedekt met vegetatie. Het uiteindelijke profiel dat ontstaat, wordt bepaald door de eigenschappen van de scheepsgolven.

In figuur 6.2 is het effect van golven op de vorm van oever, op basis van kwantitatieve modellering door Townend (2010) schematisch weergegeven. Volgens dit model is vooral de golfhoogte bepalend voor het profiel, met name tijdens hoog- en laagwater. In dit profiel is een lokaal steiler stuk te zien tussen de laagwaterstand en de hoogwaterstand, wat ook geobserveerd is bij bestaande natuurvriendelijke oevers. Dit model zou wellicht ook gebruikt kunnen worden om het oeverprofiel

in kribvakken te modelleren met behulp van scheepskarakteristieken. De toepasbaarheid zou dan echter nog wel onderzocht moeten worden.



Figuur 6.1 – (A) Schets van de ontwikkeling van het dwarsprofiel van een oever na het verwijderen van de oeververdediging. (B) Voorbeelden van oevers langs de IJssel, variërend van een aangelegd profiel tot een profiel dat in de eindsituatie lijkt te zijn.



Figuur 6.2 – Het verschil tussen een oeverprofiel met en zonder golfaanval, zoals gemodelleerd door Townend (2010).

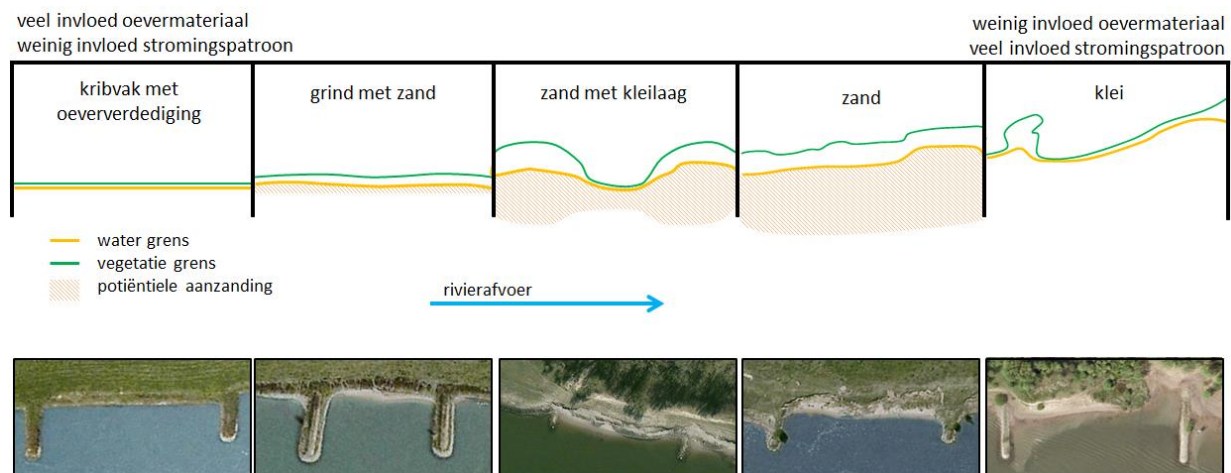
6.2 Oevererosiesnelheid

Om te bepalen wat mogelijke toekomstige locaties zijn voor natuurvriendelijke oevers is het nodig om te identificeren wat de belangrijkste factor is voor de snelheid van oevererosie en de uiteindelijke evenwichtshelling: de samenstelling van de oever of het stromingspatroon. Uit de observaties blijkt dat er grote verschillen kunnen zitten in de hoeveelheid oevererosie tussen verschillende locaties, maar ook binnen een kribvak. Te zien is dat het type sediment en de gelaagdheid van de uiterwaarden belangrijk zijn voor de snelheid van oevererosie. Zandige oevers zijn verder geërodeerd en meer richting de evenwichtshelling dan oevers met een kleilaag op dezelfde locatie. Zo is er in de kribvakken bij de Welsumer Waarden een verschil in oevermateriaal te zien, wat een ander dwarsprofiel als gevolg heeft. Echter, RIZA (2003) concludeert dat bij het Engelse werk de stroming de belangrijkste factor is. De samenstelling van de oevers blijkt hier vrijwel gelijk te zijn, maar toch is er een duidelijk verschil te zien in erosiesnelheid tussen de kribvakken. Ook is er bij het Engelse Werk en de Duursche Waarden meer erosie bovenstrooms van de krib te zien, wat suggereert dat het stromingspatroon erg belangrijk is voor de erosiesnelheid in een kribvak.

De mate waarin oevererosie en het evenwichtsprofiel in een kribvak worden bepaald door stroming en door materiaaleigenschappen ligt waarschijnlijk op een continuüm. Bij zeer sterke oevers wordt dit voornamelijk door de initiële condities van oeversamenstelling en vorm bepaald en nauwelijks door stroming. De ontwikkeling van oevers van fijn zand daarentegen wordt geheel bepaald door de stroming, omdat de mobiliteit van het sediment hier niet beperkend is. De relevante verhouding is hier de sterkte van de stroming in combinatie met scheepsgolven in verhouding tot de sterkte van de oevers, of, bij grind, de mobiliteit van het oevermateriaal. In figuur 6.3 zijn deze waarnemingen samengevat in een schets die de vorm van verschillende typen kribvakken weergeeft. De typen oevers zijn geordend op de mate van invloed van de samenstelling van de oever, in vergelijking met de invloed van het stromingspatroon. Kribvakken met grind ondervinden nauwelijks erosie en worden daardoor ook niet beïnvloed door het stromingspatroon. Er is hier geen verschil in vorm te zien tussen het bovenstroomse en benedenstroomse deel van het kribvak. In kribvakken met zand- en

kleilagen is al wel meer erosie te zien naast de kribben, maar zorgt de kleilaag voor extra weerstand, wat zorgt voor variatie in erosiesnelheid in het kribvak. Bij de kribvakken met alleen een zand- en kleimengsel is duidelijk te zien dat er meer erosie net bovenstrooms van de krib plaatsvindt, wat veroorzaakt wordt door het stromingspatroon. Waarnemingen bij Deventer en Zwolle laten zien dat de zandige oever bij Deventer regelmatig van vorm was dan de kleiige oever bij Zwolle. Dit kan echter ook afhankelijk zijn van de hoogte van de oever of de locatie in de bocht.

De vraag is nog of de kribvakken waar op dit moment verschillend materiaal en verschillende profielen geobserveerd zijn, zoals in de Welsumer Waarden, oorspronkelijk ook uit verschillend materiaal bestonden. De andere mogelijkheid is namelijk dat de oever oorspronkelijk hetzelfde was, maar dat het verschil in stromingspatroon een verschil in hoeveelheid erosie heeft veroorzaakt. Hierdoor is op de ene locatie nog steeds een kleilaag te vinden, maar op een andere locatie zou dit al weg geërodeerd kunnen zijn en heeft de oever zich al meer richting een evenwichtsprofiel ontwikkeld. Uiteindelijk is de totale hoeveelheid erosie en de evenwichtshelling die ontstaat belangrijk, om te bepalen hoe groot de terugschrijding van de oeverlijn is. Uit waarnemingen blijkt dit variabel te zijn langs de IJssel.



Figuur 6.3 – Schets van het bovenaanzicht van verschillende typen kribvakken. De oevers zijn geordend op de mate van invloed van de samenstelling van de oever, in vergelijking met de invloed van het stromingspatroon.

6.3 Aanzanding in het zomerbed

De erosie van de natuurvriendelijke oevers zou kunnen zorgen voor een aanzanding in het zomerbed, door sedimentatie van geërodeerd oevermateriaal. Sieben (2014) verwacht dat gedurende de eerste jaren het geërodeerde materiaal afgezet zal worden in het zomerbed vlak voor de natuurvriendelijke oevers. De hoeveelheid geërodeerd sediment die wordt afgezet in de vaargeul hangt af van de verhouding tussen de hoeveelheid sediment die plaatselijk van de oevers naar de geul wordt toegevoerd en de transportcapaciteit van de rivier. Wanneer er een relatief kleine toevoer is van sediment en de rivier dit makkelijk kan weghalen, zal er geen sediment blijven liggen voor de natuurvriendelijke oever.

Uit literatuur over het Engelse Werk blijkt dat er echter nog nauwelijks extra aanzanding van het zomerbed is geobserveerd. Ook dit heeft met het type sediment te maken. De klei uit de oevers raakt in suspensie en wordt zonder interactie met het zomerbed meegevoerd door de stroming. Grind zorgt voor een pleisterlaag die het zand er onder beschermt tegen erosie. Alleen een deel van het zand dat in de bovenste laag tussen het grind zit, wordt uitgespoeld tot de afpleistering te sterk is

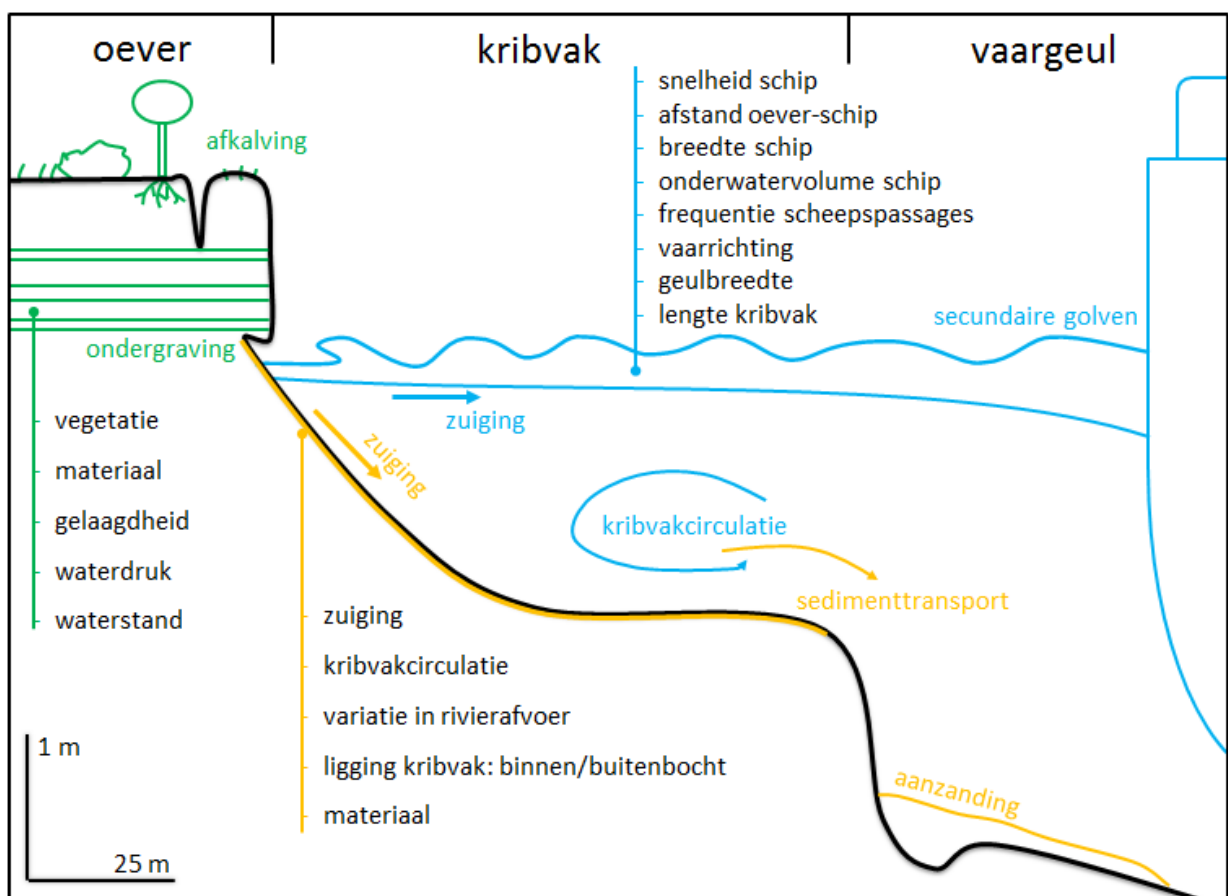
geworden. Het is daarom belangrijk om te bepalen hoeveel zand en grind aanwezig is op bepaalde locaties, omdat dit de afpleistering bepaalt en het zand zich eventueel kan afzetten in de vaargeul. Maar ook de hoeveelheid zand die wordt afgezet in de vaargeul is moeilijk te voorspellen, aangezien niet al het zand wat erodeert hier terecht komt. Fijn sediment is zo mobiel, afhankelijk van de locatie en de rivier, dat het als spoeltransport kan worden afgevoerd en niet aan bodemverandering van de vaargeul bijdraagt. Of dit gebeurt hangt af van dynamische processen die de transportcapaciteit bepalen zoals de waterstand en de intensiteit van de scheepvaart in verhouding tot de korrelgrootte.

6.4 Langere termijn stabiliteit

Ten Brinke et al. (2004) laten zien dat er op een schaal van een paar decennia een balans is tussen de erosie van kribvakken door de scheepvaart en aanzanding van kribvakken tijdens hoge rivierafvoeren. Hoge rivierafvoeren zijn hierbij gedefinieerd als afvoeren met een herhalingsstijd van vijf jaar. Zelfs als er bijvoorbeeld een verschil is in erosie tussen de twee oevers zoals in de Waal, wordt dit gecompenseerd met meer aanzanding tijdens hoogwater. De precieze reden hiervan is nog onbekend. Volgens Ten Brinke (2003) vindt er niet in het hele kribvak aanzanding plaats tijdens hoogwater. De hoger gelegen delen zijn nog steeds aan erosie door golven onderhevig, waardoor er sediment uitzakt naar lager gelegen delen en het strand afvlakt. Gedurende lagere rivierafvoeren zal er weer sediment afgezet worden op de hoger gelegen delen door windtransport vanaf lager gelegen delen. Zo is er in de Waal tussen 1995 en 1998 een gemiddelde aanzanding van 0.2 tot 0.6 meter in hoger gelegen delen van een kribvakstrand gemeten (Ten Brinke et al., 2004). De lange termijn stabiliteit van kribvakstranden lijkt dus te worden bepaald door aanzanding tijdens grote hoogwaters aan de ene kant, en erosie door scheepsgolven bij lagere waterstanden aan de andere kant (Ten Brinke, 2003).

7. Conceptueel model

De conclusies die getrokken kunnen worden uit de literatuur en de observaties, worden hier samengevat in een conceptueel model. Dit conceptueel model bestaat uit een schets van een dwarsdoorsnede van een kribvak en alle factoren die invloed hebben op de oevererosie tijdens laagwater (figuur 7.1), zoals uitgelegd in de vorige hoofdstukken. Als de oeververdediging weggehaald wordt, hangt de hoeveelheid oevererosie af van het stromingspatroon en de golven door de scheepvaart aan de ene kant, en de sterkte van de oever aan de andere kant. Naarmate de oever verder erodeert zal de hoeveelheid erosie minder worden en alleen plaatsvinden bij hoogwater, zoals onder andere is geobserveerd bij het Engelse Werk langs de IJssel. De uiteindelijke evenwichtshelling zal afhangen van de sterkte van de oever en de balans tussen erosie en sedimentatie van los zand en grind in het kribvak. In kribvakken langs de Waal is er op een termijn van tientallen jaren een balans gemeten tussen sedimenttransport het kribvak uit tijdens laagwater en sedimenttransport het kribvak in tijdens hoogwater. Om het oevererosieproces goed te kunnen voorspellen is, naast gedetailleerde opnamen van de gelaagdheid, samenstelling en materiaalsterkte van het oevermateriaal, een kliferosiemodel nodig dat ondergraving van de oever inclusief golven berekent. Daarvoor moeten de scheepsgeïnduceerde stromingen en golven geschematiseerd worden op grond van metingen en theoretische benaderingen over het effect van golven op de vorm van de oever. Het kliferosiemodel kan daarna gebruikt worden als landwaartse randvoorwaarde voor een dwarsprofielmodel voor aanzanding en erosie in het kribvak.



Figuur 7.1 – Schets van een dwarsdoorsnede van een kribvak met alle relevante processen en variabelen die invloed hebben op oevererosie tijdens laagwater. De evenwichtshelling die uiteindelijk ontstaat hangt af van de balans van toevoer en afvoer van sediment in het kribvak en van de mate waarin de oever de scheepsgolven kan weerstaan.

8. Monitorings- en onderzoeksplan

In de vorige hoofdstukken is samengevat welke processen belangrijk zijn voor oevererosie in kribvakken en hoe ze invloed op elkaar hebben. In hoofdstuk 6 zijn verschillende typen kribvakken weergegeven, variërend van kribvakken waarbij het erosiepatroon vooral bepaald wordt door het oevermateriaal tot kribvakken waarbij het vooral afhankelijk is van het stromingspatroon. Omdat de variabele die de grootste invloed heeft op het erosiepatroon kan variëren per kribvak, is het niet mogelijk om een aanname te maken met betrekking tot welke variabele in het algemeen de meeste invloed heeft. Daarom is het nodig om eerst een model te ontwikkelen dat de generieke processen beschrijft, waarna dit pas kan worden toegepast op specifieke riviertakken. Voor verdere begripsvorming en hypothesetests is het nodig een model te ontwikkelen voor scheepsgolfgedrag en kliferosie door golven, eendimensionaal als dwarsprofielmodel of tweedimensionaal voor het hele kribvak, met een koppeling van sediment uit de oever en in de bedding. BSTEM kan hier een onderdeel van zijn, aangezien dit model de oeverstabiliteit redelijk goed kan voorspellen. Voordat dit model ontwikkeld kan worden, moet een aantal kennisleemtes opgevuld worden. In dit hoofdstuk worden deze benoemd en wordt er een voorstel gedaan voor metingen om deze op te vullen. Kortom, we stellen drie benaderingen voor die parallel gedaan moeten worden:

- het bemeten van een reeks kribvakken om de erosiesnelheid te bepalen en de uiteindelijke evenwichtshelling
- het meten en in detail modelleren van de scheepsgeïnduceerde stromingen en idealiter ook het daardoor aangedreven sedimenttransport
- het bouwen van een morfologisch profielmodel (dwars op de oever) waar zowel de stromingen worden geparametriseerd die de oever ondergraaft, als de geotechnische processen van het oeverfalen en de bescherming van de oeverteen door het gefaalde materiaal.

8.1 Isoleren van variabelen door keuzes van locaties

Om de effecten van verschillende belangrijke variabelen op de helling van natuurlijke oevers te kunnen isoleren, moeten metingen worden uitgevoerd in verschillende categorieën oevers. Deze categorieën zijn gebaseerd op verschillen in de vorm van het kribvak, oevermateriaal en de morfologie van de geul. De metingen moeten worden uitgevoerd binnen één riviertak en voor verschillende riviertakken. Voor de vorm van het kribvak kan de ratio tussen de breedte en lengte van het kribvak worden gebruikt, door metingen te doen in kribvakken met een ratio lager dan 0.3 en kribvakken met een ratio hoger dan 0.7. Volgens Sukhodolov et al. (2002) hebben deze typen kribvakken verschillende stromingspatronen (zie paragraaf 3.1). Voor het oevermateriaal kan er onderscheid gemaakt worden tussen kribvakken met een oever bestaande uit overwegend grind, zand of klei. Daarnaast kan een kribvak in de binnenbocht of in de buitenbocht liggen. Voor elke parameter die onderzocht gaat worden, moeten tenminste 2 pilotgebieden langs dezelfde rivier gekozen worden waarbij maar één variabele verschilt. Bijvoorbeeld: snelheidsmetingen in een relatief klein en een relatief groot kribvak, bij kribvakken die beide zandige oevers hebben en in de buitenbocht liggen. De keuze kan worden gemaakt om de locaties zo te kiezen dat de morfologie van de geul vergelijkbaar is, door bijvoorbeeld alle metingen in een buitenbocht uit te voeren. Hier zijn de grootste effecten te verwachten omdat het sedimenttransport het grootst is in de buitenbocht, maar contrasterende locaties in de binnenbocht zijn ook interessant, aangezien het uiteindelijke doel is dat er zo min mogelijk erosie plaatsvindt en geschikte locaties wellicht frequenter in de binnenbocht te

vinden zijn. Dit leidt tot de volgende typen kribvakken waar bodempeilingen gedaan zouden moeten worden:

- gelegen in de IJssel, Nederrijn-Lek, Pannerdensch Kanaal of Waal
- korte, middellange en lange kribvakken (ratio<0.3, ratio 0.3-0.7 en ratio>0.7)
- oevermateriaal in het kribvak: overwegend klei, zand, grind (waarbij complexere stratigrafie wordt vermeden)
- vegetatie op de oever in het kribvak: onbegroeid, ondiep beworteld (gras) en diep beworteld
- gesitueerd in een binnenbocht, een recht stuk of een buitenbocht

Als alle permutaties zouden worden bemeten komt dat neer op $4 \times 3 \times 3 \times 3 = 108$ kribvakken, maar het is waarschijnlijk dat sommige situaties, vormen en oevermaterialen niet in alle riviertakken voorkomen. Om dit goed af te kunnen schatten zou een snelle inventarisatie op grond van luchtfoto's van de aard en verdeling van typen kribvakken op zijn plaats zijn. Bovendien kan worden gekozen om voor de verschillende oevermaterialen alleen de lange kribvakken te nemen en niet ook de korte, omdat in de lange voldoende variatie in golfaanval op de oever gevonden zal worden om het effect van materiaal goed te kunnen onderscheiden van dat van de lengte van het kribvak. Daarmee zal het aantal te onderzoeken kribvakken neerkomen op enkele tientallen.

Tegelijkertijd moeten ook kribvakken worden bemeten met al bestaande natuurvriendelijke oevers, kribvakken met een aangelegd profiel of vrij eroderende oevers waar alleen ontsteend is. De al bestaande natuurvriendelijke oevers kunnen inzicht geven in de langetermijn evenwichtshelling. De vrij eroderende oevers kunnen gebruikt worden om de oevererosieprocessen uit het conceptuele model te testen, aangezien de ontwikkeling naar verwachting snel zal verlopen omdat het profiel uit evenwicht is. Hiermee wordt informatie verkregen over de snelheid van oevererosie en het volume van sediment dat in de vaargeul terecht komt (na vergelijking met de stratigrafie die van tevoren door boringen moet zijn vastgelegd). De oevers met een aangelegd profiel kunnen meteen gebruikt worden voor metingen aan de oploop van scheepsgolven (zie volgende paragraaf). Dit profiel wordt aangelegd bij oevers die anders snel zouden eroderen, waarbij het zand in de vaargeul terecht zou komen. Voor de metingen aan vrij eroderende oevers is het niet nodig om gelijk een reeks kribvakken te ontstenen, maar kan dit één individueel kribvak zijn. Dit zorgt ervoor dat een vergunning makkelijker te verkrijgen is.

Metingen van dwarsprofielen van huidige natuurvriendelijke oevers zijn noodzakelijk voor alle categorieën. Deze metingen moeten in ieder geval gedaan worden vanaf, in dwarsdoorsnede gezien, het begin van het kribvak tot en met de steilwand. Er kan dan gekeken worden in welke mate de helling verschilt voor de verschillende categorieën kribvakken en of er een schatting gemaakt kan worden over de uiteindelijke evenwichtshelling. Bij natuurvriendelijke oevers die in de toekomst aangelegd worden, wordt geadviseerd de dwarsdoorsnede te peilen voor de aanleg en gedurende enkele jaren na de aanleg, waarbij gaandeweg kan worden gezien hoe vaak gepeild moet worden om het verloop van het proces goed te kunnen volgen. Metingen moeten elk jaar herhaald worden om de ontwikkeling van het dwarsprofiel in kaart te brengen, en bij voorkeur extra onmiddellijk voor en na grote hoogwaters om de sedimentatie van de erosie te kunnen isoleren. Deze dwarsprofielen kunnen worden gebruikt als invoer voor de geometrie van de oever en als verificatie van de gemodelleerde oevererosie.

8.2 Nader onderzoek naar stroming in kribvakken

Er is nog veel onduidelijk over de invloed van scheepsgeïnduceerde stromingen op het sedimenttransport en hoe dit beïnvloed wordt door de vorm van het kribvak. Zo speelt de helling van het kribvak waarschijnlijk een grote rol in de demping van de secundaire golven, maar is het onduidelijk hoe dit de primaire golven en dus de zuiging uit het kribvak beïnvloedt. De helling van het kribvak is sterk bepalend voor het sedimenttransport: bij opwoeling door scheepsgolven kan alleen door de helling al netto transport naar de vaargeul toe optreden. Verder blijkt uit metingen dat de sedimentconcentratie bij het uitstroompunt het grootst is wanneer het schip net het kribvak is gepasseerd en dat de hoeveelheid sedimenttransport afhangt van de sterkte van scheepsgeïnduceerde stromingen (paragraaf 3.3). Het is echter nog onduidelijk hoe het sediment van de oever precies wordt opgewoeld door deze primaire en secundaire scheepsgolven. Ten Brinke (2003) benoemt bijvoorbeeld dat secundaire golven zorgen voor het opwoelen van sediment en primaire golven voor het transport. De hoge schuifspanningen die veroorzaakt worden door de zuiging uit het kribvak suggereren echter dat secundaire golven hier niet voor nodig zijn. Bij observaties blijkt ook dat de meeste secundaire golven de oever pas bereiken als het water weer terug het kribvak instroomt. Ook veroorzaakt scheepvaart in buitenbochten geen extra sedimenttransport het kribvak uit volgens metingen van Ten Brinke (2003), maar dit is tegen de verwachting in en wordt niet helemaal verklaard. Bij geobserveerde natuurvriendelijke oevers in buitenbochten is wel erosie te zien. Dit betekent dat de relatie tussen de al dan niet gekromde hoofdstroming in de vaargeul en de stroming in de kribvakken nog onduidelijk is.

Meer in het algemeen betekent dit dat er nog onduidelijkheid is over de primaire processen die de richting en grootte van het sedimenttransport van en naar de kribvakken bepalen. Gezien de complexe stromingspatronen en de vele variabelen die van belang zijn in het sedimenttransport zou een combinatie van veldmetingen en modellering op zijn plaats zijn. De stromingspatronen die veroorzaakt worden door de scheepvaart kunnen gemeten worden door middel van particle tracking vanuit Unmanned Airborne Vehicles of vanaf bruggen, en door horizontale ADCP's bij hoogwater, wellicht vanaf meetschepen. Verder is het nuttig om de metingen van Ten Brinke (2003) opnieuw te analyseren. Met deze metingen kunnen de stroomsnelheden van scheepsgeïnduceerde stromingen bepaald worden voor de categorieën kribvakken met verschillende vorm en ligging (binnenbocht of buitenbocht). Ook kunnen wellicht Large Eddy Simulation stromingsmodellen worden toegepast die scheepspassage simuleren (Delft3D User days 2012, Bay of Venice). Deze complexiteit is nodig om de loslating en werveling van stroming rond de kribben te kunnen berekenen. Aan de andere kant is het waarschijnlijk niet nodig om diverse geometrieën van kribvakken te modelleren, omdat het globale patroon voldoende inzichten zou moeten opleveren om stroming bij een bereik aan waterstanden te kunnen parametriseren voor het profielmodel. Dit zou moeten blijken uit een vergelijking van de stromingsmetingen in het veld. Dit kan als invoer gebruikt worden voor een dwarsprofielmodel of voor een model van het hele kribvak.

Uit de waarnemingen bij natuurvriendelijke oevers blijkt dat de erosie het grootst is net bovenstrooms van de krib, wat suggereert dat de kribvakcirculatie hier zorgt voor grotere schuifspanningen. Het is nog onduidelijk hoe dit patroon en de hoeveelheid sedimenttransport samenhangt met de lengte van het kribvak en de lengte van de kribben. Ook is het interessant om te onderzoeken wat het effect is van de verlaagde kribben bij de Duursche Waarden op het stromingspatroon en de hoeveelheid erosie. De kribvakcirculatie kan wellicht nagebootst worden

met een Large Eddy Simulation model en daarmee systematisch onderzocht worden om trends te beschrijven, bijvoorbeeld door het kribvak steeds breder te maken. Hiervoor moet ook de lengte en breedte worden opgemeten van kribvakken die als referentie gebruikt worden. Deze simulatie kan vergeleken worden met stromingspatronen in de categorieën kribvakken met verschillende vorm en ligging (binnenbocht of buitenbocht), waar met behulp van particle tracking metingen gedaan kunnen worden. Voor een tweedimensionaal kliferosiemodel is dit berekende stromingspatroon nodig als invoer om bijbehorende schuifspanningen te kunnen berekenen en daarmee het sedimenttransport in het kribvak.

8.3 Afhankelijkheid oevererosie van de stratigrafie van uiterwaarden

De afkalving van oevers hangt op veel plaatsen mede af van de lithologische opbouw van de oevers. Hier is in principe een adequaat model voor (BSTEM, paragraaf 5.1), maar dat is nog niet getest voor deze specifieke toepassing. Het model duidt echter wel het grote belang van gedetailleerde kwantitatieve kennis van de lithologische opbouw van de oevers. Het is daarom belangrijk om te weten wat de lithologische opbouw (<2 m diep) is van de uiterwaarden langs de IJssel en de Nederrijn-Lek. Met deze informatie kunnen testlocaties worden aangewezen aan de hand van de gedefinieerde categorieën. Na de ontwikkeling van het profielmodel kan dit ook als invoer gebruikt worden om te bepalen welke oevers het meest beïnvloed worden door het stromingspatroon en op welke locaties er een groter risico is op aanzanding van het zomerbed.

De zanddieptekaarten van het rivierengebied en het IJsseldal (Cohen et al., 2009), de Archeologische Verwachtingskaart Uiterwaarden Rivierengebied (Cohen et al. 2014) en de detailprofielen langs de Lek van Stouthamer et al. (2011) zijn een goed startpunt; deze kaarten kunnen gebruikt worden om een inschatting te maken van de te verwachten lithologische variatie. De minste erosie vindt plaats bij grindige oevers zoals bij Rheden, maar volgens de zanddieptekaarten is dit alleen op locaties te vinden waar de IJssel afspoelingswaaiers aan de stuwwalvoet aansnijdt. Dit is het geval voor slechts enkele locaties rond Doetinchem. Verder is op deze kaarten te zien dat in het zuiden en het midden van het IJsseldal op meerdere plekken zand op geringe diepte te vinden is langs de rivier. Deze locaties bevinden zich vooral langs de buitenbocht van de rivier. Dat het zand op geringe diepte te vinden is (tot 2 meter onder het maaiveld), betekent dat hier kribvakstranden vooral uit zand bestaan. Op andere locaties waar het zand dieper ligt is vooral klei te vinden. Op veel locaties is echter wel een zandige laag te vinden en het is ook mogelijk dat in het zand lokaal kleilagen te vinden zijn. De precieze gelaagdheid van de uiterwaard is van belang aangezien dit de oeverafkalving door golven beïnvloed. Als de oever erodeert en hierbij een cohesieve laag boven het zand tevoorschijn komt, kan de oever makkelijk ondergraven worden.

De boordichtheid die voor de karteringen gebruikt is, is waarschijnlijk te laag om in voldoende mate van detail de bodemeigenschappen ter plekke van het betreffende kribvak te kunnen bepalen. Deze eigenschappen zijn niet alleen lithologie maar ook rijping en beworteling, om de geotechnische eigenschappen die het model heeft te kunnen afleiden. Of de boordichtheid toereikend is kan bepaald worden door de boorlocaties van de boringen die ten grondslag liggen aan de bodemkartering te inventariseren. Als de boorlocaties dicht bij de oeverlijn liggen in het betreffende kribvak, dan kunnen de bodemeigenschappen van de bodemkaart worden afgeleid. Boorgegevens voor verschillende locaties langs de IJssel en de Nederrijn-Lek zijn opgeslagen in de Laaglandgenesedatabase Universiteit Utrecht en de Bodemloket database van Alterra. Voor alle boorlocaties in beide databases zijn de eigenschappen van de ondergrond bepaald per 10 cm (=hoge

resolutie) en is de textuurindeling en de indeling in organische stofklassen van De Bakker & Schelling (1966) gebruikt. Tevens zijn er in het verleden door de UU (contactpersoon: Stouthamer) in het kader van het veldwerk laaglandgenese en onderzoeksprojecten op diverse locaties langs de rivieren lithologische profielen gemaakt. Belangrijk hierbij te vermelden is dat deze profielen een goed beeld geven van de grootschalige opbouw van de ondergrond in een uiterwaard. Echter, meestal is er niet vlakbij de waterlijn geboord, zodat niet bekend is wat daar de precieze opbouw is.

Als er nog onvoldoende metingen beschikbaar zijn langs de waterlijn, zullen er lokaal boringen gedaan moeten worden om de precieze samenstelling van een kribvak te bepalen. De afstand tussen boorlocaties, zowel langs als dwars op de rivier, is afhankelijk van de te verwachten lithologische variatie in de oever van het betreffende kribvak en hoe nauwkeurig de variatie in verschillende bodemeigenschappen gereconstrueerd moet worden. Als de oever in een kribvak naar verwachting homogeen is opgebouwd kan worden volstaan met minimaal 3 boringen langs de rivier; 1 aan de bovenstroomse kant, 1 in het midden en 1 aan de benedenstroomse kant. Is er veel lithologische variatie te verwachten, dan zijn er minimaal 4 boringen nodig. Hoe heterogener de ondergrond ter plaatse van de oever, hoe meer boringen er nodig zijn. Dwars op de rivier kan bij een homogene ondergrond volstaan worden met twee boringen, 1 vlakbij de waterlijn en 1 op ca. 30 meter vanaf de waterlijn, afhankelijk van de tot nu toe waargenomen maximale terugschrijdingsafstand langs de riviertakken. Indien de ondergrond heterogener is, zijn er meer boringen nodig. De boordiepte wordt bepaald door de maximale diepte waarop oevererosie plaatsvindt.

Met deze kennis en een schatting over de uiteindelijke evenwichtshelling kan worden bepaald hoe de gelaagdheid invloed zal hebben op de erosiesnelheid. BSTEM zou kunnen worden toegepast op een bereik van typische oevers qua sterkte, samenstelling en gelaagdheid om de te verwachten gevoeligheid af te schatten en zo de benodigde meetinspanning te optimaliseren.

9. Conclusies

Het doel van dit rapport was een beeld te krijgen van alle processen en variabelen die significante invloed hebben op de evenwichtshelling en dynamiek van natuurlijkvriendelijke oevers in kribvakken van grote rivieren. Dit is gedaan door antwoord te geven op de volgende vragen:

Hoe werkt het complex van processen van oevererosie en welke processen spelen een belangrijke rol?

De hoeveelheid erosie is het resultaat van twee stelsels van erosieprocessen en hun interacties: versteiling door fluviatiele en golfgedreven erosie van de oeverteen, en massabewegingen van het versteilde talud. In kribvakken is geobserveerd dat ondergraving plaatsvindt door golfaanslag, waarbij de golven worden veroorzaakt door scheepvaart. De belangrijkste factoren die de stabiliteit van de oever bepalen zijn de hydrologische situatie en de eigenschappen van het oevermateriaal, met inbegrip van de beworteling. Dat betekent dat oevererosie deels wordt bepaald door de sequentie van lagen, omdat de gemakkelijker fluviatiele erosie van niet-cohesieve lagen kan leiden tot het falen van cohesieve lagen die resistent waren tegen de erosie.

Van welke factoren is de snelheid van oevererosie afhankelijk en de daarmee samenhangende toevoer van sediment naar de vaargeul?

De snelheid van oevererosie hangt af van de erosiegevoeligheid van de oeverteen en de sterkte van de door de rivier- en golven aangedreven stromingen in het kribvak. Daarbij ligt de snelheid waarschijnlijk hoger wanneer de oeverhelling nog verder van evenwicht verwijderd is. Fijn tot grof zand is relatief makkelijk te eroderen, terwijl de erodibiliteit van klei en organisch materiaal veel lager is. Aanwezigheid van grind kan leiden tot een afpleisteringslaag, waardoor oevers met een relatief hoog grindgehalte ook moeilijker te eroderen zijn. Ook blokken cohesief materiaal, ontstaan bij falen van een cohesieve laag, beschermen de oeverteen tijdelijk tegen de erosie. De sterkte van de stromingen en golven in het kribvak worden op hun beurt bepaald door de intensiteit van de scheepvaart, de vorm van het kribvak en de morfologie van de geul.

De positie en steilheid van zeer sterke oevers worden nauwelijks door stroming bepaald, maar meer door de initiële condities van oeversamenstelling en vorm. Oevers van fijn zand daarentegen worden geheel bepaald door de stroming, omdat de mobiliteit van het sediment hier niet beperkend is. Niet al het geërodeerde sediment wordt afgezet in de vaargeul. Dit is afhankelijk van het type sediment en de dynamische processen zoals de waterstand en de intensiteit van de scheepvaart in verhouding tot korrelgrootte.

Van welke processen en factoren hangt de evenwichtshelling af? Zijn deze variabel langs de IJssel en de Nederrijn-Lek of zijn deze naar verwachting constant?

De uiteindelijke evenwichtshelling zal afhangen van de sterkte van de oever en de balans tussen erosie en sedimentatie van los zand en grind in het kribvak. Dit is mede afhankelijk van het stromingspatroon en de sterkte van de stromingen in het kribvak. De belangrijkste processen en factoren die de evenwichtshelling bepalen kunnen net als de erosiesnelheid variëren per kribvak en de verwachte helling is dus niet constant langs één riviertak. Het strekt tot aanbeveling om numeriek en wellicht met een veldexperiment te onderzoeken of de erosie van oevers, indien nodig, kan worden beperkt door het toestaan van begroeiing met diepe beworteling. Dit is met name interessant voor het hogere deel van relatief erodeerbare oevers.

Welke monitoring en welk onderzoek moet worden verricht om de evenwichtshelling en de erosiesnelheid langs de IJssel en de Nederrijn en Lek betrouwbaarder empirisch te kunnen bepalen?

Eerst moet er een model ontwikkeld worden dat de generieke processen beschrijft, daarna kan dit pas worden toegepast op specifieke riviertakken. Dit model moet scheepsgolfgedrag en kliferosie door golven kunnen berekenen, eendimensionaal als dwarsprofielmodel of tweedimensionaal voor het hele kribvak, met een koppeling van sediment uit de oever en in de bedding. Voordat dit model ontwikkeld kan worden, moeten er nog een aantal kennisleemtes worden opgevuld door verschillende metingen uit te voeren. Dit zijn o.a. metingen van dwarsprofielen van bodemhoogte, van stroomsnelheden en stromingspatronen veroorzaakt door scheepsgolven, en van de samenstelling van de uiterwaarden langs, en dwars op, de kribvakken. Vooral over het opwoelen van sediment door scheepsgolven is nog veel onbekend en daarvoor zijn nog veel metingen nodig om een betrouwbaar model te ontwikkelen.

Literatuur

- Bakker, H. D., & Schelling, J. (1966). Systeem van bodemclassificatie voor Nederland: De hogere niveaus. *Pudoc, Wageningen, the Netherlands*. 217 p.
- Bolwidt, L.J., Simons, H.E.J. & Kok, F.R. (2004). Removal of riverbank protection along the River Rhine (the Netherlands). *3rd European Conference on River Restoration, Zagreb, Croatia, 17-21 May 2004*.
- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Hoek, W.Z., Berendsen, H.J.A. & Kempen, H.F.J. (2009). Zand in banen: zanddiepte-kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel. Arnhem: Provincie Gelderland.
- K.M. Cohen, S. Arnoldussen, G. Erkens, Y.T. van Popta & L.J. Taal (2014). Archeologische verwachtingskaart uiterwaarden rivierengebied. Deltares, Rijksuniversiteit Groningen & Universiteit Utrecht.
- Geerling, G.W. (redactie) (2013). Een natuurlijker Maas. Samenvattende rapportage van de monitoringsresultaten 2012 van het project Monitoring en evaluatie natuur(vriendelijke) oevers Maas; ecologie en morfologie. Rapportage 2012. Deltares, Delft.
- Giri, S. (2013). Nature-Friendly River Banks (NVO Maas): Exploring dynamics of river banks and bed. *Deltares memo*
- Greenway, D.R. (1987). Vegetation and slope stability. *Slope stability, chap. 6*, pp. 187–230.
- HKV (2013). Natuurvriendelijke oevers Maas: aanzanding locaties.
- Langendoen, E. J., & Simon, A. (2008). Modeling the evolution of incised streams. II: Streambank erosion. *Journal of hydraulic engineering*, 134(7), 905-915.
- Lawler, D. M., Couperthwaite, J., Bull, L. J., & Harris, N. M. (1997). Bank erosion events and processes in the Upper Severn basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1(3), 523-534.
- Parker, G., Shimizu, Y., Wilkerson, G. V., Eke, E. C., Abad, J. D., Lauer, J. W. & Voller, V. R. (2011). A new framework for modeling the migration of meandering rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(1), 70-86.
- Partheniades, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. *J. of the Hydraulics Division, ASCE*, 91(1), 105-138.
- Pollen, N. (2007). Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *CATENA* 69(3), pp.197-205. DOI: 10.1016/j.catena.2006.05.004
- Pollen, N. & A. Simon. (2005). Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research* 41(W07025). DOI: 10.1029/2004WR003801
- Peters, B. (2005). Streefbeeld vrij eroderende oevers Maasdal. *Studie in opdracht van Rijkswaterstaat Limburg*. Bureau Drift, Berg en Dal.

- Rinaldi, M., & Darby, S. E. (2007). 9 Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations. *Developments in Earth Surface Processes*, 11, 213-239.
- RIZA (2003). Evaluatie verwijdering oeververdediging Engelsche Werk 1993-2001. RIZA rapport 2003.007
- Schiereck, G. J. (2000). Introduction to Bed, Bank and Shore protection. *Delft University press*, Delft.
- Sieben, A. (2006). Erosie Maasoevers, Rayon Noord Waterdistrict Roermond Maas. Memo Rijkswaterstaat RIZA
- Sieben, A. (2011). Memo advies impact eroderende maasoevers op de vaargeul. Rijkswaterstaat.
- Sieben, A. (2014). Monitoring morfodynamiek nvo's Maas. Notitie
- Simon, A., & Collison, A. J. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(5), 527-546.
- Simon, A., Curini, A., Darby, S. E., & Langendoen, E. J. (2000). Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35(3), 193-217.
- Stouthamer, E., Pierik, H.J., & Cohen, K.M. (2011). Erodibiliteit en kans op het ontstaan van zettingsvloeiing als maat voor stabiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodem van de Lek.
- STOWA (2010). Handreiking natuurvriendelijke oevers.
- Sukhodolov, A., Uijttewaal, W. S., & Engelhardt, C. (2002). On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(3), 289-305.
- Ten Brinke, W. B. M. (2003). De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal. *RIZA rapport 2003.002*.
- Ten Brinke, W., Schulze, F. H., & Van Der Veer, P. (2004). Sand exchange between groyne-field beaches and the navigation channel of the Dutch Rhine: the impact of navigation versus river flow. *River Research and Applications*, 20(8), 899-928.
- Thorne, C.R. (1990), Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. In: *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*, Thorne, J.B. (ed.). John Wiley & Sons: 125-144.
- Thorne, C. R. (1991). Bank erosion and meander migration of the Red and Mississippi Rivers, USA. *IAHS PUBL, IAHS, Wallinford,(ENGL), 1991,, (201), 301-313*.
- Townend, I. (2010). An exploration of equilibrium in Venice Lagoon using an idealised form model. *Continental Shelf Research*, 30(8), 984-999.
- Uijttewaal, W. S. (2005). Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: Laboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(9), 782-791.

Van der Meer, J.W. (1989). Rock slopes and gravel beaches under wave attack. *Dissertation*. Delft University of Technology.

Van de Sligte, R., Spruyt, A. (2012). WAQBANK User manual. *Deltares, draft report*

Van Winden, A. (2011). Notitie over oeverserosie bij Deventer. *Ongepubliceerd document*, 4 p.

Verheij, H.J. (2000). Samenwerkingsproject modellering afslagoeversvoortgangsrapportage. *WL Delft Hydraulics, Delft*.

Verheij, H.J. (2011). Voorstel formulering sedimentlast ontstening IJssel. *Deltares, memo 1204855, Delft*.

Wytema, H. (2009). The influence of vegetation on riverbank instability in a recently renaturalized river. *Master Thesis Universiteit Utrecht, supervision MG Kleinhans*.

Het bank stability model: <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5044>

http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28002b_en.htm