

De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal

Managementsamenvatting

RIZA rapport 2003.002
ISBN 9036954827

Auteur: W.B.M. ten Brinke

Arnhem, februari 2003

De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal

Te citeren als :

**Brinke, W.B.M. ten (2003)
De sedimenthuishouding van kribvakken langs de
Waal. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en
Afvalwaterbehandeling/RIZA, rapport 2003.002**

0 Voorwoord

Deze managementsamenvatting geeft in het kort de hoofdlijn aan van een rapport over de sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal. De samenvatting hoort bij het hoofdrapport als één set. Door het lezen van deze samenvatting krijgt de lezer snel een overzicht van de uitkomsten van een langjarig onderzoek naar deze materie. Het hoofdrapport kan daarbij worden geraadpleegd als men van bepaalde aspecten, of het totale verhaal, meer wil weten. Voor hen die, uit oogpunt van onderzoek of beheer, veel met het gedrag van kribvakstranden te maken hebben, zal het hoofdrapport van grote waarde zijn. Voor hen die op wat meer afstand van de materie staan, biedt de managementsamenvatting al voldoende inzicht. Het hoofdrapport is de eindrapportage van een langjarige onderzoek naar de sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal. De auteur heeft in dit rapport alle van belang zijnde resultaten uit vele deelstudies geïntegreerd. Hierbij zijn ook de belangrijkste resultaten van eerder onderzoek, uitgevoerd sinds het begin van de jaren tachtig, in de rapportage meegenomen, alsmede de kennis in de wetenschappelijke literatuur. Daarmee mag dit rapport worden beschouwd als een state-of-the-art verhaal van onze huidige kennis ten aanzien van het morfologisch gedrag van kribvakstranden langs de Waal.

1 Inleiding

Het gedrag van kribvakstranden langs de Waal is in de afgelopen 20 jaar herhaaldelijk onderwerp van studie geweest. De reden hiervoor was met name de indruk dat duwvaart de stroomsnelheid en golfwerking in kribvakken dusdanig verhoogt dat zand wordt geërodeerd en naar de rivier wordt getransporteerd. Als dit proces maar lang genoeg door zou gaan, verdwijnt op termijn dermate veel zand uit de kribvakken dat de stranden in omvang afnemen en er mogelijk zelfs steilranden langs de oever ontstaan. Al in de jaren zeventig zijn de eerste signalen van stranderosie door passerende scheepvaart in rapporten opgenomen.

De studies die zijn uitgevoerd in de jaren tachtig en begin jaren negentig hadden alle betrekking op de invloed van duwvaart. De studies zijn uitgevoerd in het veld, in enkele karakteristieke kribvakken, en in het laboratorium. In het laboratorium zijn de karakteristieke kribvakken uit het veldonderzoek op schaal nagebouwd en zijn schaalproeven met scheepspassages uitgevoerd. Daarnaast zijn aanvullende bureau- en modelstudies uitgevoerd. De resultaten van deze studies zijn gerapporteerd in vele rapporten, deels geschreven door WLIDelft Hydraulics, in opdracht van Rijkswaterstaat, en deels door Rijkswaterstaat zelf. Het totaal aan publicaties geeft een goed inzicht in de beïnvloeding van met name de waterbeweging in kribvakken door passerende duwvaart. De invloed van andere typen scheepvaart dan de duwvaart is bij dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Daarnaast bieden deze studies onvoldoende inzicht in de invloed op de sedimentbeweging en het morfologisch effect op kribvakstranden. Hierdoor kon op basis van deze studies geen inschatting

worden gemaakt van de rol van kribvakstranden in de grootschalige zandhuishouding van de rivier als geheel.

In de tweede helft van de jaren negentig is een onderzoeksprogramma uitgevoerd waarbij de sedimenthuishouding van kribvakken nader is onderzocht. Bij dit programma zijn de resultaten van de studies uit voorgaande jaren als vertrekpunt genomen. Het programma had ten doel de temporele variatie in de aan- en afvoer van sediment naar/uit de kribvakken te kwantificeren en met analyses te achterhalen door welke processen en factoren deze zanduitwisseling wordt gestuurd. Met de opgedane kennis zou dan vervolgens de rol van kribvakstranden in de langjarige sedimenthuishouding van de rivier moeten kunnen worden gekwantificeerd. Het onderzoeksprogramma is langs 3 lijnen uitgevoerd: procesmetingen in kribvakken langs de rivier (kleine tijdschaal), monitoring van de bodemligging van kribvakstranden gedurende 4 jaar (middellange tijdschaal) en de studie van luchtfoto's (lange tijdschaal).

Bij de sedimenthuishouding van kribvakken gaat het feitelijk om de sedimenthuishouding van de kribvakstranden. In dit rapport wordt het morfologisch gedrag van kribvakken en het gedrag van de stranden dan ook als synoniemen van elkaar gebruikt.

2 Beschrijving van kribvakken langs de Waal

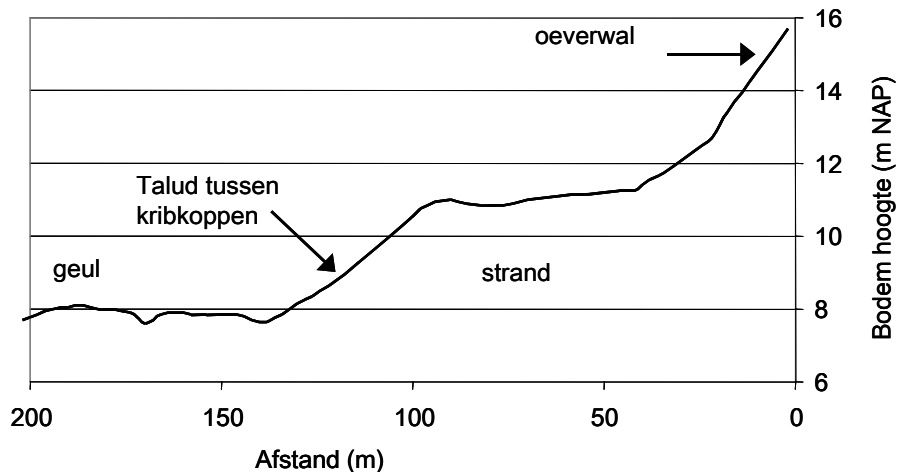
Langs de oevers van meanderende laaglandrivieren komen zandige vlaktes van nature hoofdzakelijk voor in binnenbochten, de zogenaamde point bars. Het voorkomen van stranden in kribvakken langs vrijwel de gehele Waal is een onnatuurlijk, door de mens bepaald beeld van de rivier. Hiermee is het echter wel zeer karakteristiek voor de Nederlandse rivier. Van alle Nederlandse riviertakken zijn kribvakstranden langs de Waal het meest prominent aanwezig. Bij lage waterstand op veel plaatsen zelfs zo prominent dat het strand de indruk geeft van een lokatie aan de kust (foto 1). Met name in binnenbochten zijn de stranden breed omdat de rivier, naast het stempel dat de Nederlanders op de rivier hebben gedrukt, ook de natuurlijke processen van aanzanding in de binnenbocht en erosie langs de buitenbocht laat zien.



Foto 1. Het strand van een kribvak langs de Waal bij Druten tijdens een zeer lage rivierwaterstand.

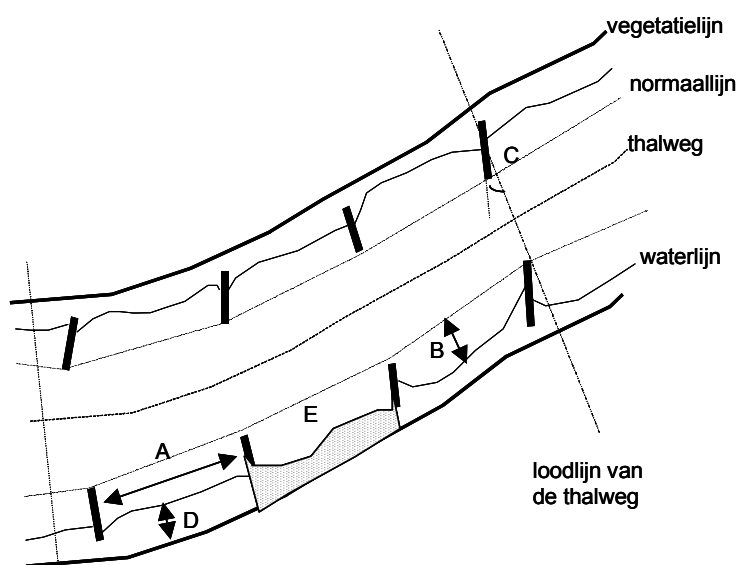
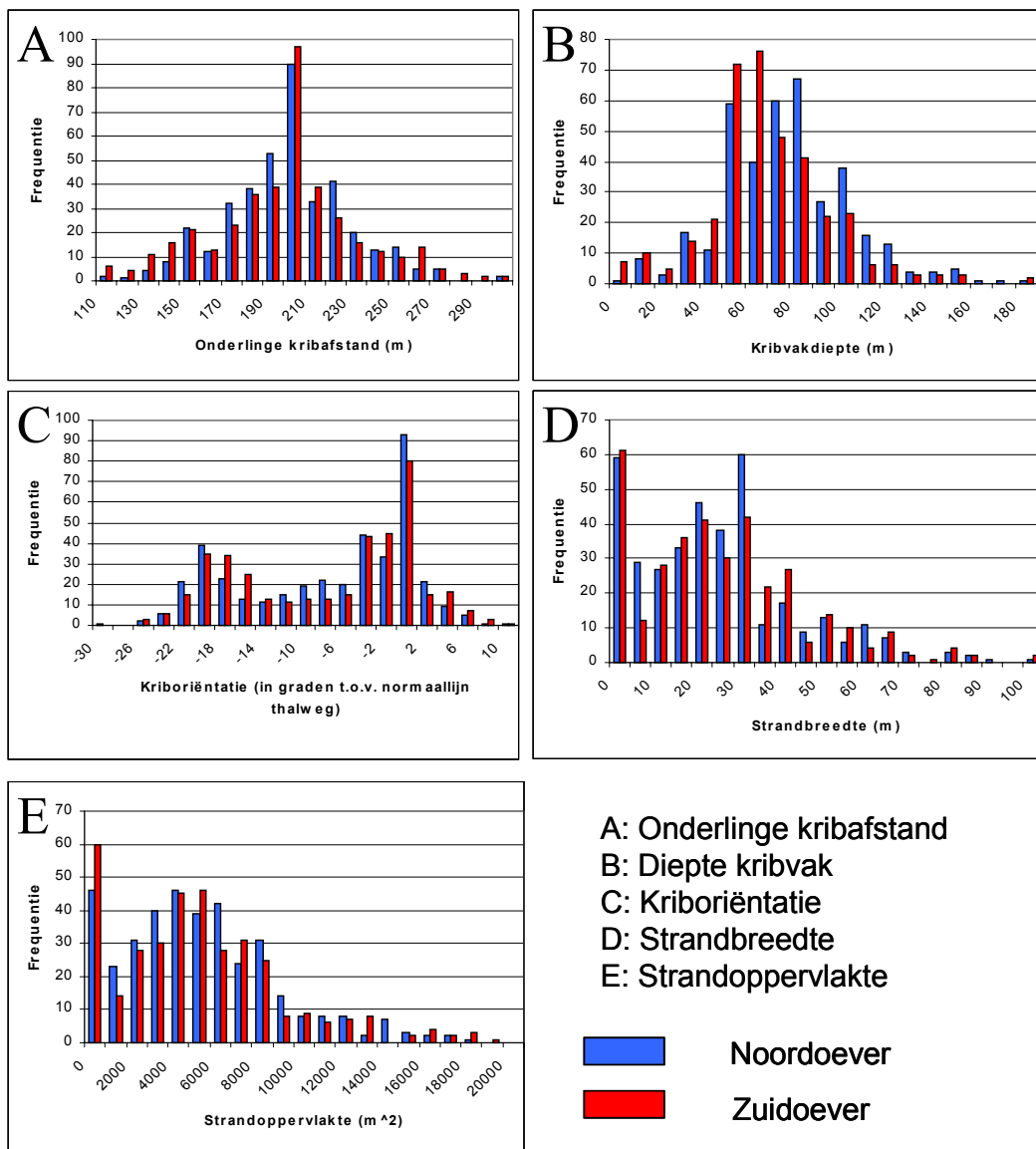
Het kribvakstrand geeft aan de rivier een onnatuurlijk dwarsprofiel (figuur 1). Door de aanwezigheid van de kribben wordt een hoeveelheid zand tussen de kribben vastgehouden die bij lage en gemiddelde rivierafvoer buiten bereik is van de rivierstroming. Daar waar de rivier wel invloed op de

bedding kan uitoefenen, gaat het strand met een steil talud over in de bedding.



Figuur 1. Het dwarsprofiel van een kribvakstrand gaande van de rivierbedding via het kribvak tot aan de vegetatielijn van de oeverwal.

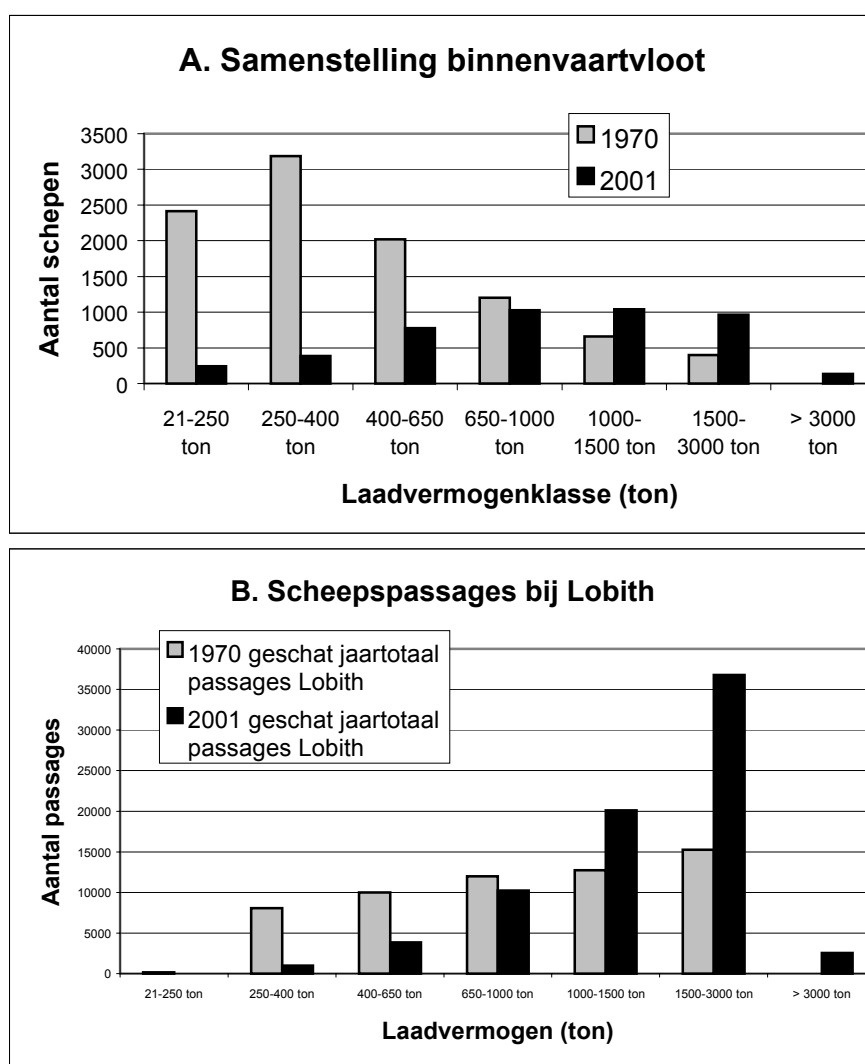
Er is, met name aan de hand van luchtfoto's, een uitgebreide database opgesteld van de eigenschappen van kribben en kribvakstranden langs de Bovenrijn en Waal. De belangrijkste gegevens in deze database zijn in figuur 2 weergegeven. Langs de beide oevers van de Bovenrijn en Waal komen in totaal ongeveer 1600 kribben voor. Deze kribben liggen gemiddeld 200 m uit elkaar. De onderlinge kribafstand varieert tussen 100 en 300 m. De kribvakdiepte geeft de afstand van de normaallijn tot de waterlijn in het kribvak weer, zoals waargenomen op luchtfoto's. Deze diepte ligt over het algemeen tussen 60 en 100 m. De kribben hebben een vrij geringe oriëntatie ten opzichte van de normaallijn of de thalweg. Dit betekent dat zij over het algemeen vrij loodrecht op de oever staan. De oriëntatie is enigszins negatief, hetgeen betekent dat de kribben in geringe mate in de stroomopwaartse richting van de rivier wijzen en de kribben onder een hoek van iets minder dan 90 ° worden aangestroomd. De strandbreedte op de luchtfoto's bedraagt gemiddeld 25 meter, maar de variatie is groot en breedtes tot 100 meter zijn waargenomen. Ook de strandoppervlakte varieert sterk, maar is over het algemeen minder dan 10.000 m² per kribvak. Er zijn voor de verschillende karakteristieken geen significante verschillen waar te nemen tussen noord- en zuidoever.



Figuur 2. De belangrijkste karakteristieken van kribben en kribvakstranden langs de Waal (Bron: Schans, 1998).

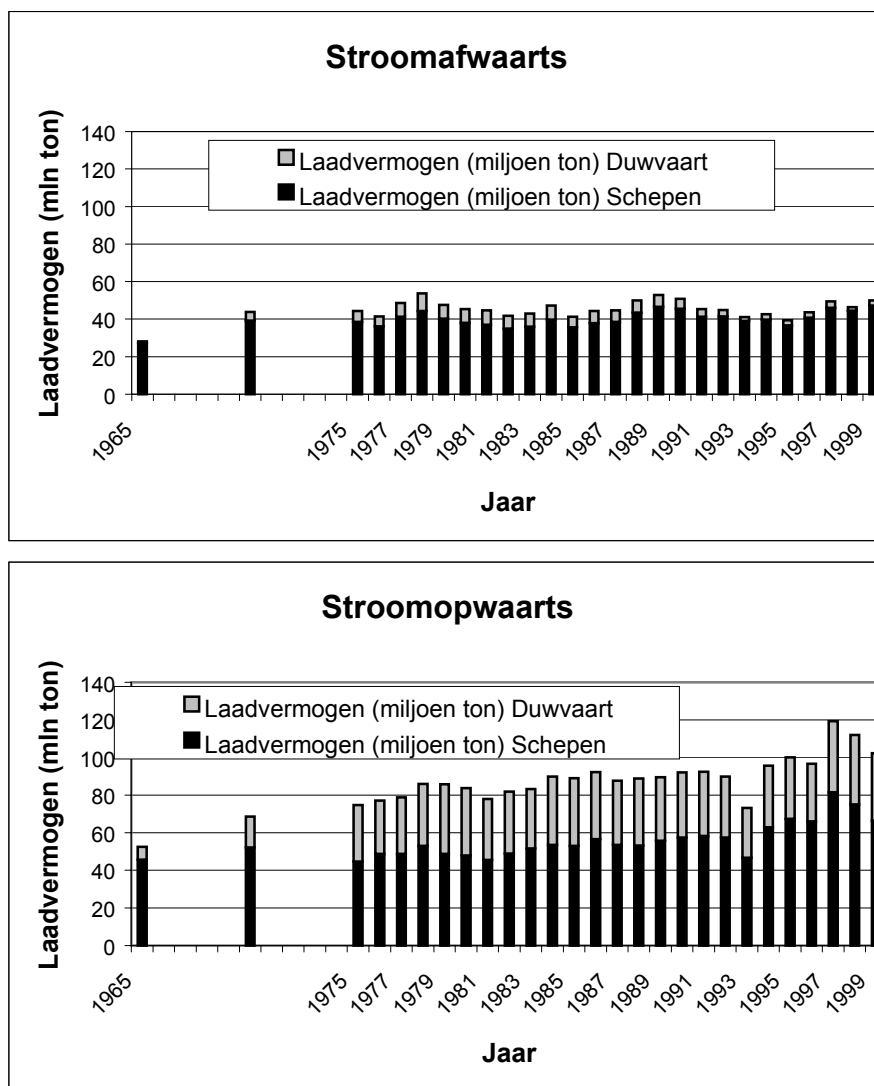
2 Scheepvaart op de Waal

In de tweede helft van de vorige eeuw is de intensiteit van de scheepvaart op de Waal sterk toegenomen. Niet alleen het aantal scheepsbewegingen op de rivier, maar ook het volume van de schepen is sterk toegenomen. Dit blijkt uit de cijfers van het CBS die voor de jaren 1970 en 2001 grafisch zijn weergegeven in figuur 3 A-B. Figuur 3 A toont de samenstelling van de binnenvaartvloot in 1970 en 2001 naar laadvermogenklasse. Het aantal kleine schepen is fors afgenomen en het aantal grote schepen is toegenomen. De afname van het aantal kleine schepen is aanmerkelijk groter dan de toename van het aantal grote schepen. Dit wil echter niet zeggen dat het op de rivier rustiger is geworden. De binnenvaart is, in vergelijking met 1970, veel meer een 24-uurs-gebeuren geworden. Met name de grote schepen zijn min of meer continu in de vaart. Dit betekent dat, hoewel het aantal (kleine) schepen is afgenomen, het aantal scheepspassages bij Lobith (figuur 3 B) sterk is toegenomen.



Figuur 3. De samenstelling van de Nederlandse binnenvaartvloot naar laadvermogenklasse in 1970 en 2001 (A), en de verdeling van het aantal scheepspassages bij Lobith naar laadvermogenklasse in 1970 en 2001 (B).

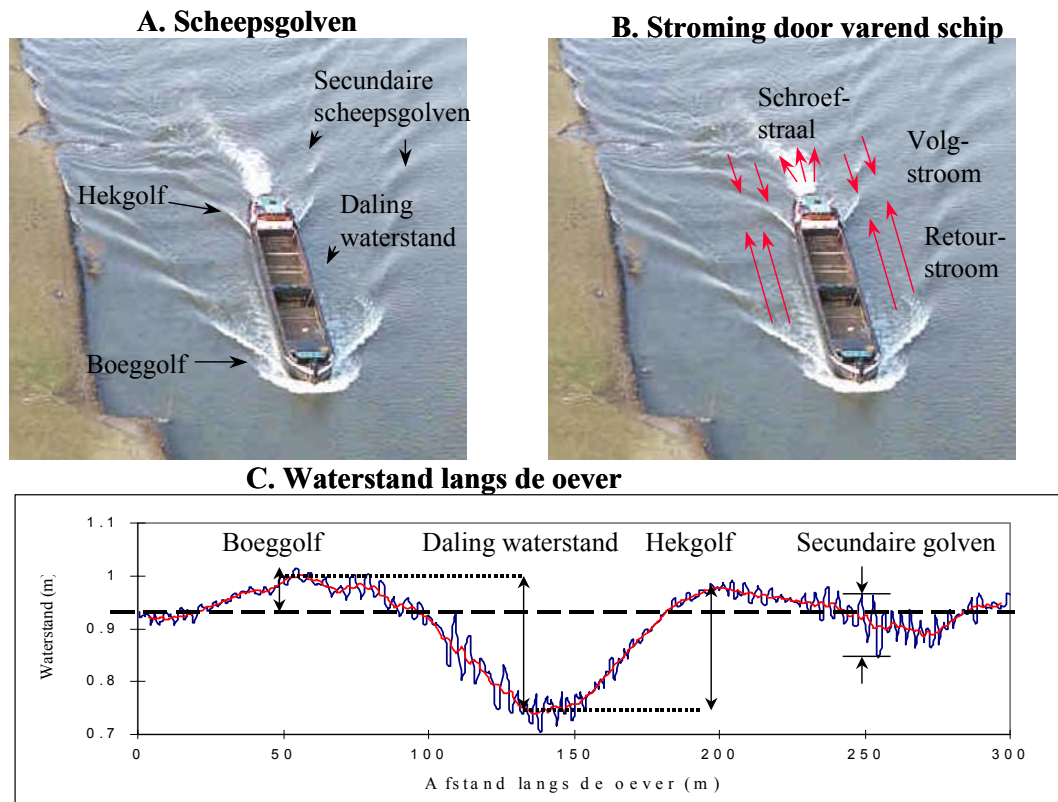
De scheepvaart op de Waal betreft voor een groot deel transport van goederen tussen Rotterdam en Duisburg. Veel van de schepen gaan vol naar Duitsland en komen leeg terug. Dit geldt met name voor de duwvaart (1- t/m 6-baksduwstellen) die het transport van bulkgoederen van de Maasvlakte naar het Duitse achterland verzorgt. De cijfers van het CBS laten dit verschil tussen op- en afvaart in het transport door duwvaart en schepen (eigen motorvermogen) goed zien (figuur 4). Voor de water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal is dit verschil van groot belang omdat de opvaart veelal de zuidoever en de afvaart veelal de noordoever volgt.



Figuur 4. De verandering in het vervoer per schip stroomafwaarts (boven) en stroomopwaarts (onder) bij Lobith sinds 1965, uitgedrukt in miljoen ton laadvermogen, met een onderscheid in duwvaart en andere schepen.

3 De processen: water- en sedimentbeweging in kribvakken

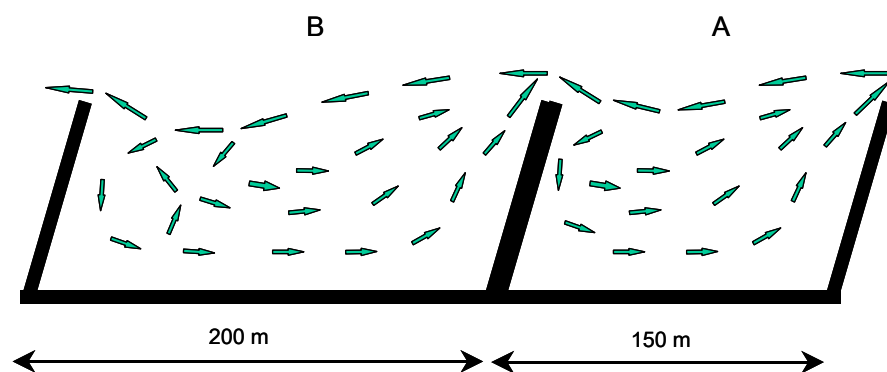
Een varend schip wekt golven en stroming op. De golven worden onderverdeeld in primaire en secundaire golven. De primaire golf is de opstuwing van het water bij de boeg van het schip (boeggolf), de waterspiegeldaling aan de zijkant van het schip, en de haalgolf (hekgolf) bij het hek van het schip. De secundaire golven zijn de korte golven die naast en vlak achter een schip ontstaan. Het ruimtelijke patroon van deze golven is geïllustreerd in figuur 5 A. De hiermee gepaard gaande stroming rond het schip staat in figuur 5 B. In figuur 5 C is weergegeven hoe de golfpatronen worden waargenomen langs de oever.



Figuur 5. Het ruimtelijk patroon van scheepsgolven (A) en scheepsgeïnduceerde stroming (B) gerelateerd aan een gemeten registratie van de waterstand langs de oever (C).

De door een varend schip opgewekte stroming bestaat uit de schroefstraal en de stroming als gevolg van de primaire golfbeweging. Laatstgenoemde stroming is voor de sedimenthuishouding van een kribvak van groot belang omdat deze de zuiging van water uit kribvakken veroorzaakt en met deze zuiging en het weer vollopen van het vak de neerstroming in het kribvak versterkt. De stroming horende bij de primaire golf bestaat uit de retourstroom en de volgstroom. De retourstroom ontstaat doordat het bij de boeg opgestuwde water terugstroomt naar de waterstandsval aan de zijkant tot bij de achterzijde van het schip. De volgstroom ontstaat door het opvullen van de waterstandsval tussen het schip en de oever vanuit de hogere waterstand achter het schip.

De aanwezigheid van kribben leidt tot het optreden van een neerstrooming in het kribvak. In het benedenstroomse deel van het kribvak zal de rivierafvoer, zij het zwak, het kribvak instromen. Bij de benedenstroomse krib van het kribvak zal een deel van de rivierafvoer door de krib in een richting naar de oever worden geleid en van daaruit middels de neer naar de bovenstroomse krib terugstromen. Daar kan de stroming het vak weer verlaten. Deze situatie is geschetst in figuur 6. Situatie A geldt als de afstand tussen de kribben voldoende klein is om één neer het hele vak te laten beslaan. Voor de Waal zijn dit de kribvakken met een kribvaklengte (= onderlinge kribafstand) van 130-150 m. Veel kribvakken langs de Waal hebben echter een lengte van ± 200 m. In deze kribvakken kan de ene neer, horende bij de wervel benedenstrooms van de krib, het hele kribvak niet beslaan, en ontstaat er een tweede, kleinere neer in het benedenstroomse deel van het kribvak (figuur 6 B).

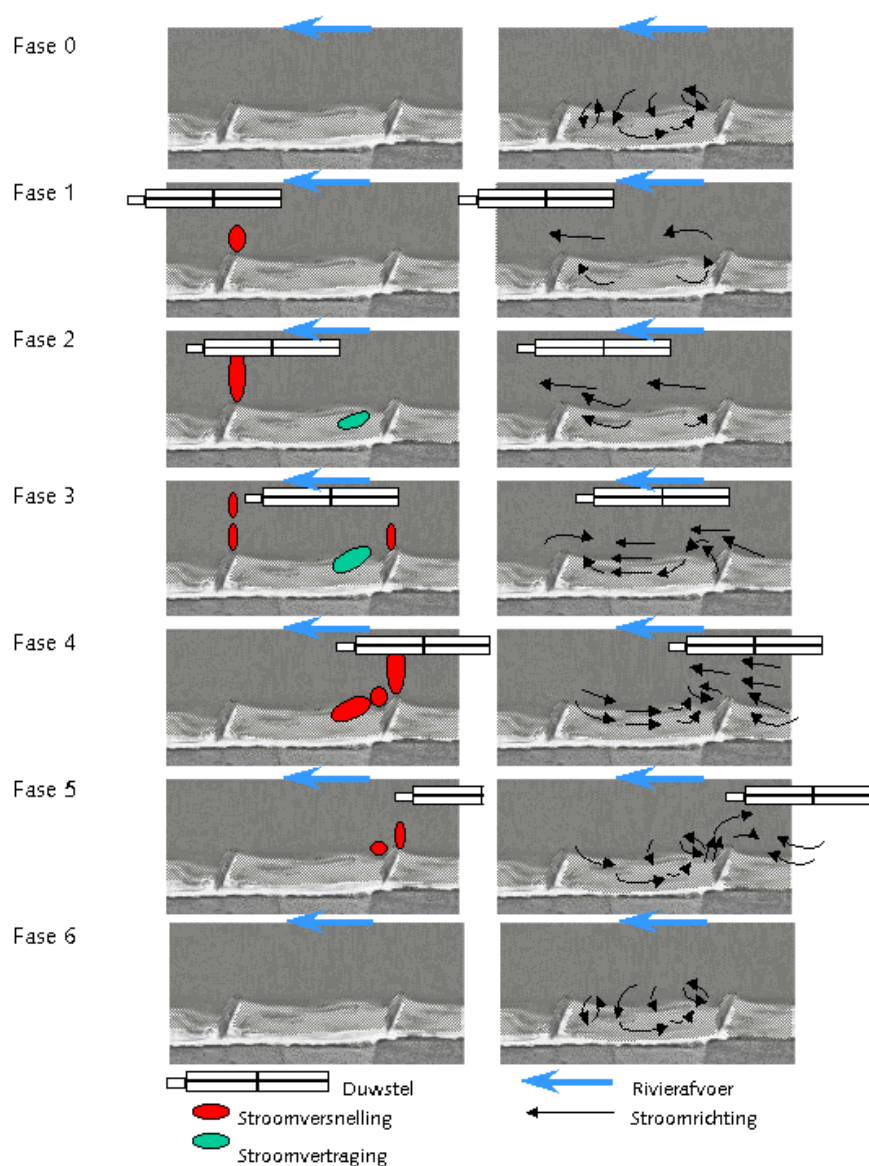


Figuur 6. Circulatiecellen van de waterbeweging in een kribvak die worden versterkt door de scheepsgeïnduceerde waterbeweging: A voor een klein kribvak (één neer), B voor een groot kribvak (2 neren).

De passage van een schip, en dan met name de passage van een beladen duwstel, heeft grote invloed op het stroompatroon in een kribvak. Deze invloed is, in stappen van de passage langs het kribvak, geschetst in figuur 7. De figuur bestaat uit 2 delen. Het linkerdeel geeft in 7 tijdstappen aan hoe de passage van een 4-bakduwstel de stroom in en nabij een kribvak vertraagt en versnelt. Het rechterdeel geeft, voor dezelfde 7 tijdstappen, aan welke stroomrichtingen bij deze vertragingen en versnellingen horen.

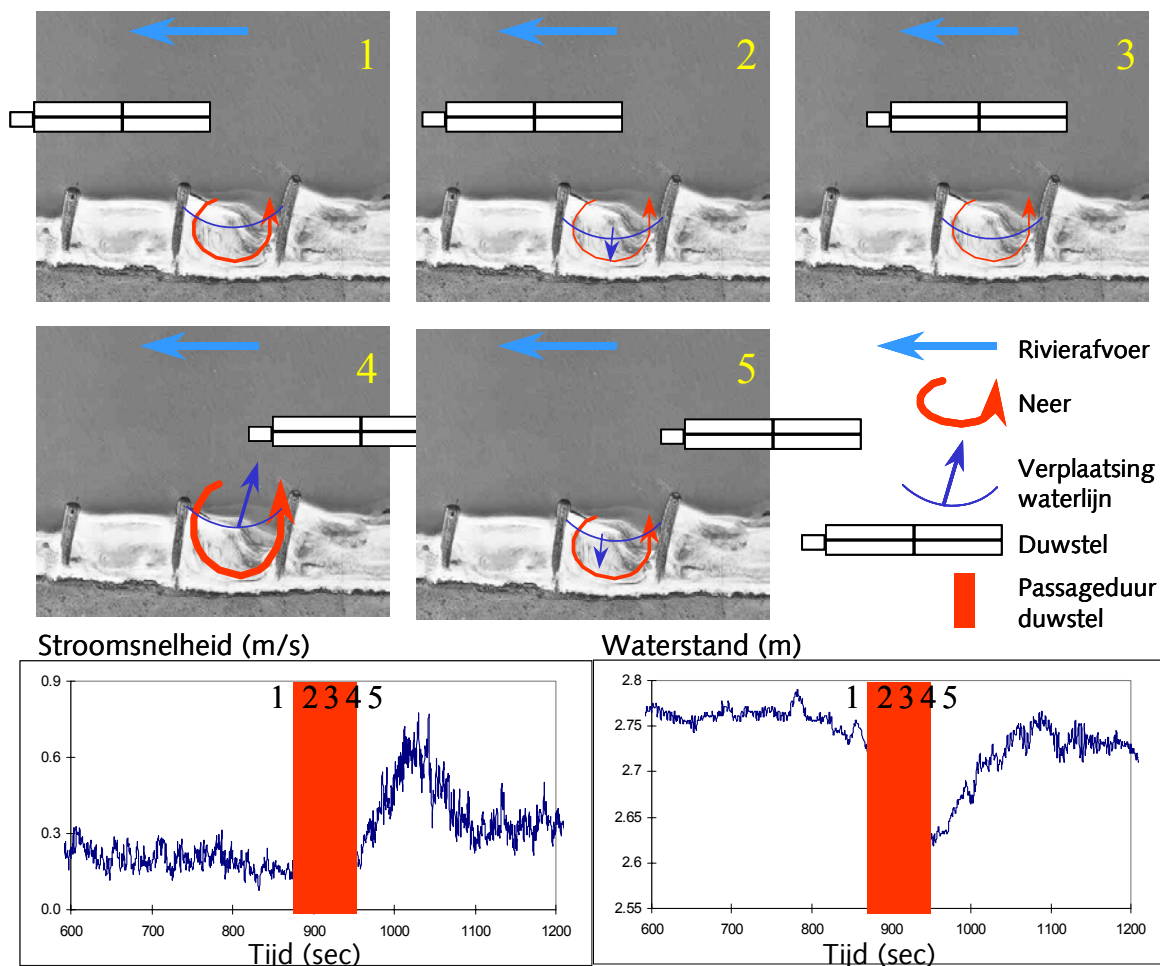
De invloed van een passage van een beladen 4-bakduwstel, varende in stroomopwaartse richting, kan aan de hand van figuur 7 als volgt worden beschreven. In de situatie vóór de passage van een duwstel is er sprake van een zwakke neerstrooming in het kribvak, met een grote en kleine neer conform figuur 6 B (fase 0). Op het moment dat de boeg van een duwstel een krib passeert (fase 1), ontstaat tussen boeg en kribkop een verhang (de frontgolf). Hierdoor wordt het bovenstroomse kribvak leeggezogen door de retourstroom. Hierdoor verdwijnt de kleine neer in het benedenstroomse deel van het kribvak vrijwel en wordt de hoofdneer in het bovenstroomse deel van het kribvak sterk gereduceerd (fase 2). Daarnaast ontstaat door de retourstroom tussen krib en duwstel een wervel benedenstrooms van de kribkop. Bij het hek van het duwstel houdt de retourstroom op en begint de volgstroom, waarbij de stroomrichting omkeert. Dit is te zien aan de pijltjes in fasen 3-5 bij de achterzijde van het schip. Deze volgstroom vult het kribvak weer op. Passeert het hek een krib (fasen 4 en 5), dan wordt de volgstroom gedwongen vanuit het kribvak af te buigen in de richting van

de rivieras. Deze volgstroom ontmoet bij de kribkop de retourstroom die net bovenstrooms van het hek de andere kant op gaat. Hierdoor wordt de neer net benedenstrooms van de krib versterkt. Als het hek de bovenstroomse krib passeert (fase 5), wordt de volgstroom merkbaar in het bovenstrooms van deze krib gelegen kribvak. Ná passage van het schip keert de situatie van vóór de passage weer terug (fase 6 = fase 0). Uit bovenstaande blijkt dat de maximale stroming optreedt juist benedenstrooms van de kribben tijdens de passage van het hek van het schip. Deze stroming wordt aangedreven door de retourstroom tussen kribkop en duwstel en de uittredende volgstroom.



Figuur 7. De versnelling en vertraging van de stroom (links) en de bijbehorende stroompatronen (rechts) in opeenvolgende fasen van de passage van een 4-bakduwstel langs een kribvak bij Druten (op basis van de beschrijvingen van Robberecht en Wentink (1986), Verhey en Vermeer (1987) en Termes et al. (1991)).

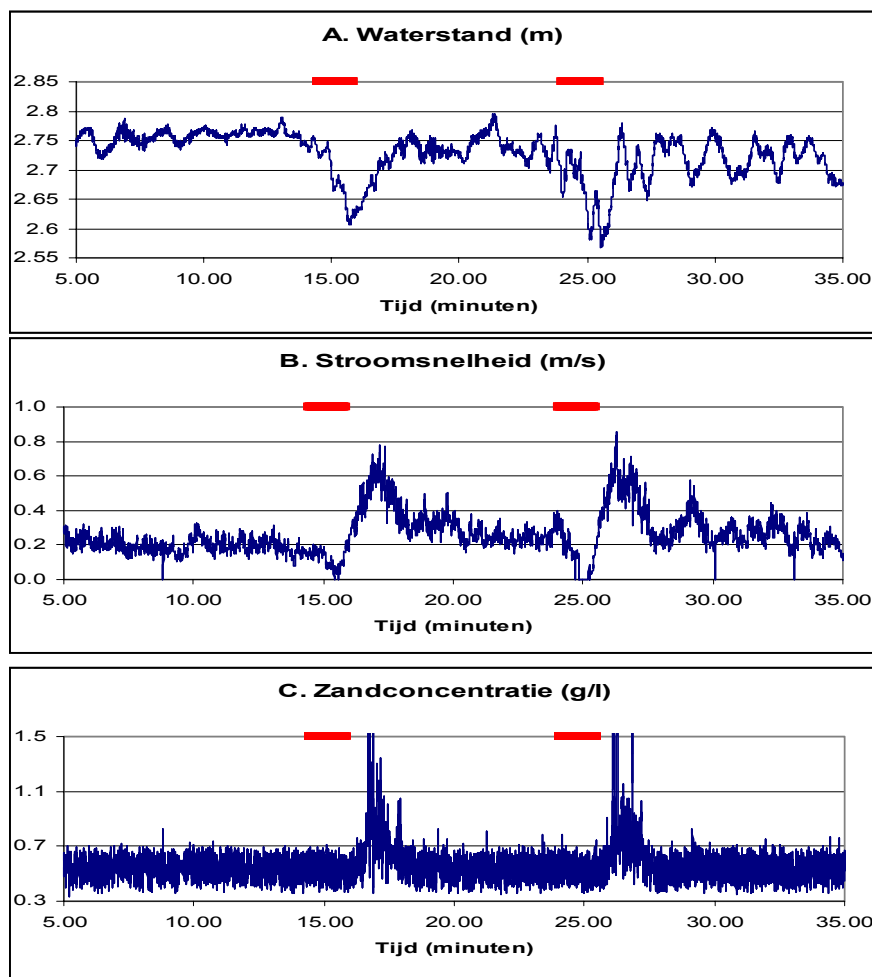
De fasering van de invloed van een scheepspassage op de waterbeweging in een kribvak kan over het algemeen goed in het kribvak zelf worden waargenomen. Ter illustratie toont figuur 8 het verloop van de waterbeweging in een klein kribvak aan de zuidoever. Het verloop van de waterbeweging is wederom gerelateerd aan de fasen van de passage van een 4-baks duwstel. Met rood is de richting van de neerstrooming aangegeven. Op de momenten dat de neerstrooming wordt versterkt, is de rode lijn vetter aanzet. Met blauwe pijltjes is de verplaatsing van de waterspiegel in het kribvak (zuiging en weer vollopen) aangegeven.



Figuur 8. Het effect van de passage van een 4-baksduwstel langs een klein kribvak op de waterbeweging in het kribvak, weergegeven in de fasen van de passage die zijn bediscussieerd aan de hand van figuur 7.

De passage van een schip leidt in principe tot een lichte verhoging van de waterstand (boeggolf), gevolgd door een aanmerkelijk forsere daling van de waterstand (leegzuigen kribvak) en daarna het weer stijgen van de waterstand (vollopen kribvak en passage hekgolf), gevolgd door een reeks secundaire golven achter het schip. Over het algemeen zijn de daling van de waterstand en de secundaire golven de meest markante verschijnselen die aan het kribvakstrand worden waargenomen. De waterstandsverhoging door de boeggolf wordt niet of nauwelijks waargenomen. Figuur 9 toont een voorbeeld van de waterbeweging en de opwerveling van zand die in het kribvak bij passage van scheepvaart wordt geïnduceerd.

Het voorbeeld heeft betrekking op een meting in het uitstroompunt van een kribvak en laat het effect van de passage van 2 vergelijkbare beladen 4-baksduwstellen zien, die stroomopwaarts van Rotterdam naar Duisburg varen. De passages zijn weergegeven met rode strepen, waarbij de lengte van de streep de duur van de passage weergeeft.

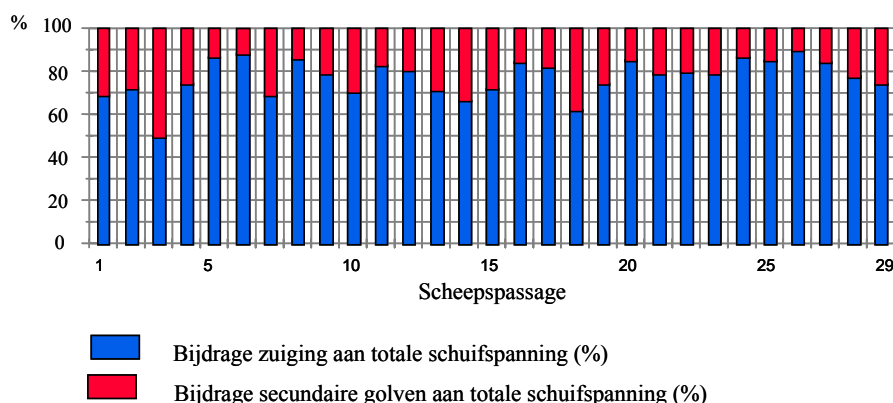


Figuur 9. Een voorbeeld van een meetserie van 35 minuten van de waterstand (A), stroomsnelheid (B) en de zandconcentratie (C) voor een meetpositie in het uitstroompunt van een kribvak. Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een tweetal beladen 4-baksduwstellen de meetlocatie passeerde.

De passages leiden tot een daling van de waterstand in het kribvak met maximaal 20 cm, een verhoging van de stroomsnelheid nabij de bodem in het uitstroompunt tot 80 cm/s en een forse toename van de zandconcentratie in het water.

Kennelijk leidt de passage van grote, beladen schepen tot een dusdanig sterkere stroming in de kribvakken dat zand wordt geërodeerd en via het uitstroompunt naar de rivier wordt gevoerd. Dit betekent dat de scheepsgeïnduceerde waterbeweging leidt tot een verhoging van de bodemschuifspanning boven het zandstrand tot boven de kritische erosieschuifspanning van het zand. De opgewekte schuifspanning is een combinatie van het effect van (secundaire) golven en (zuig)stroming. Voor een aantal karakteristieke scheepspassages is de bijdrage van golven

respectievelijk stroming aan deze schuifspanning weergegeven in figuur 10. Duidelijk is dat de stroming door het leeglopen (zuiging) van het kribvak een veel grotere bijdrage levert aan de totale schuifspanning dan de secundaire golven.



Figuur 10. De bijdragen van zuiging en secundaire golven als gevolg van passerende duwvaart aan de schuifspanning van de waterbeweging op het sediment van de kribvakstranden.

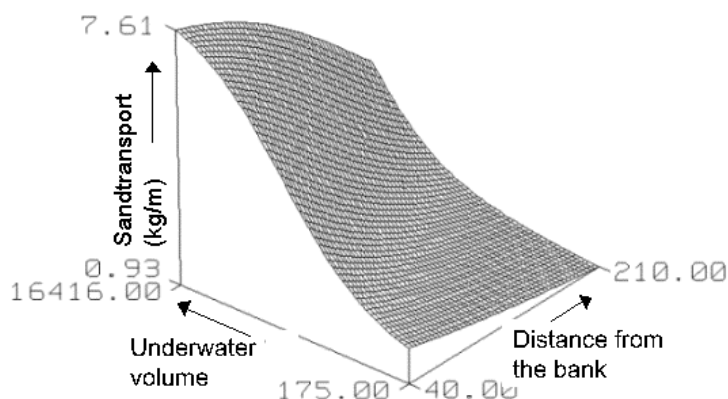
4 Zandverlies uit kribvakken: de invloed van scheepvaart

De invloed van eigenschappen van passerende schepen op de water- en sedimentbeweging in kribvakken is geanalyseerd met behulp van neurale netwerken. Het concept van kunstmatige neurale netwerken is van oorsprong ontwikkeld om het menselijk zenuwstelsel te modelleren. Een mens kan, als vanzelfsprekend, taken uitvoeren zoals herkenning, combinatie, generalisatie. Dit zijn functies die niet eenvoudig in een (computer) algoritme zijn vast te leggen. Een computer kan zeer nauwkeurig lange series berekeningen volgens een expliciet algoritme uitvoeren. Dit is een taak waarbij de mens snel fouten gaat maken. Een kunstmatig neurale netwerk combineert het associatievermogen van de mens met het analytische karakter van een computer.

Met name het zelflerende karakter van neurale netwerken maakt de techniek zeer krachtig. Bij dit leerproces wordt een neurale netwerk geleerd om invoergegevens en uitvoergegevens met elkaar in verband te brengen. Zodra dit gelukt is, is een model (een neurale netwerk) gebouwd waarin de relaties tussen invoer en uitvoer zijn vastgelegd. Neurale netwerken dienen net als andere modellen te worden gedefinieerd, te worden gecalibreerd en te worden gevalideerd. In plaats van calibratie wordt vaak gesproken over training. Hiermee wordt aangegeven dat het netwerk tijdens het calibreren combinaties van invoervariabelen moet leren koppelen (training) aan de eigenschappen van de uitvoervariabele.

Een voorbeeld van de resultaten van een neurale netwerk wordt getoond in figuur 11. In deze figuur is voor één van de gemodelleerde uitvoervariabelen, het zandtransport per strekkende meter, weergegeven hoe deze variabele varieert met de variatie in het onderwatervolume (breedte X diepte X lengte schip) en de passageafstand van passerende schepen. Uit veel analyses voor verschillende meetlokaties in verschillende

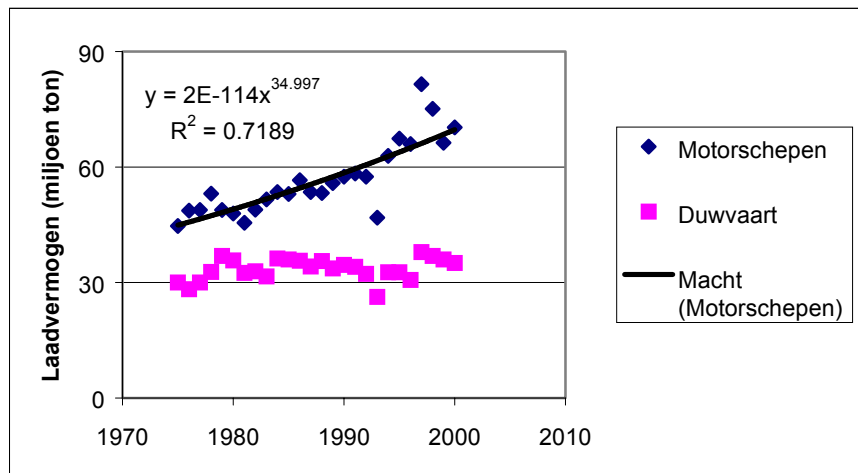
kribvakken blijkt dat met name het onderwatervolume en de vaarafstand uit de oever bepalend zijn voor de invloed van een passerend schip op de water- en sedimentbeweging in het kribvak.



Figuur 11. Een voorbeeld van de uitkomst van berekeningen met neurale netwerken: de variatie van het zandtransport per strekkende meter met het onderwatervolume en de passage-afstand van schepen uit de oever.

De neurale netwerken zijn gemaakt op basis van meetgegevens van alle typen voorkomende scheepvaart op de Waal. Daardoor is het mogelijk om jaargegevens van de scheepvaart op de Waal te gebruiken als invoer voor deze neurale netwerken zodat het totale effect van scheepvaart voor een heel jaar kan worden berekend.

De statistieken van scheepspassages zijn ontleend aan de jaarrapportages van het Centraal Bureau voor de Statistiek. In deze jaarrapportages zijn de aantallen vermeld van alle typen schepen die de rivier op een bepaalde locatie (bijvoorbeeld de Rijn bij Lobith) in een bepaald jaar gepasseerd zijn. Voor de periode 1970 – 2001 zijn deze gegevens voor ieder jaar beschikbaar. In deze periode treden grote veranderingen op in de samenstelling en vaarintensiteit van de binnenvaart. De keuze voor deze jaartallen geeft dus een goed inzicht in het effect van de veranderingen in de binnenvaart op de water- en sedimentbeweging langs de oever. Bovendien is een verwachting gemaakt van de scheepvaart situatie in 2010 door, voor de opgaande scheepvaart bij Lobith, de ontwikkeling in de omvang van het transport naar laadvermogen in de afgelopen 25 jaar te extrapoleren (figuur 12).

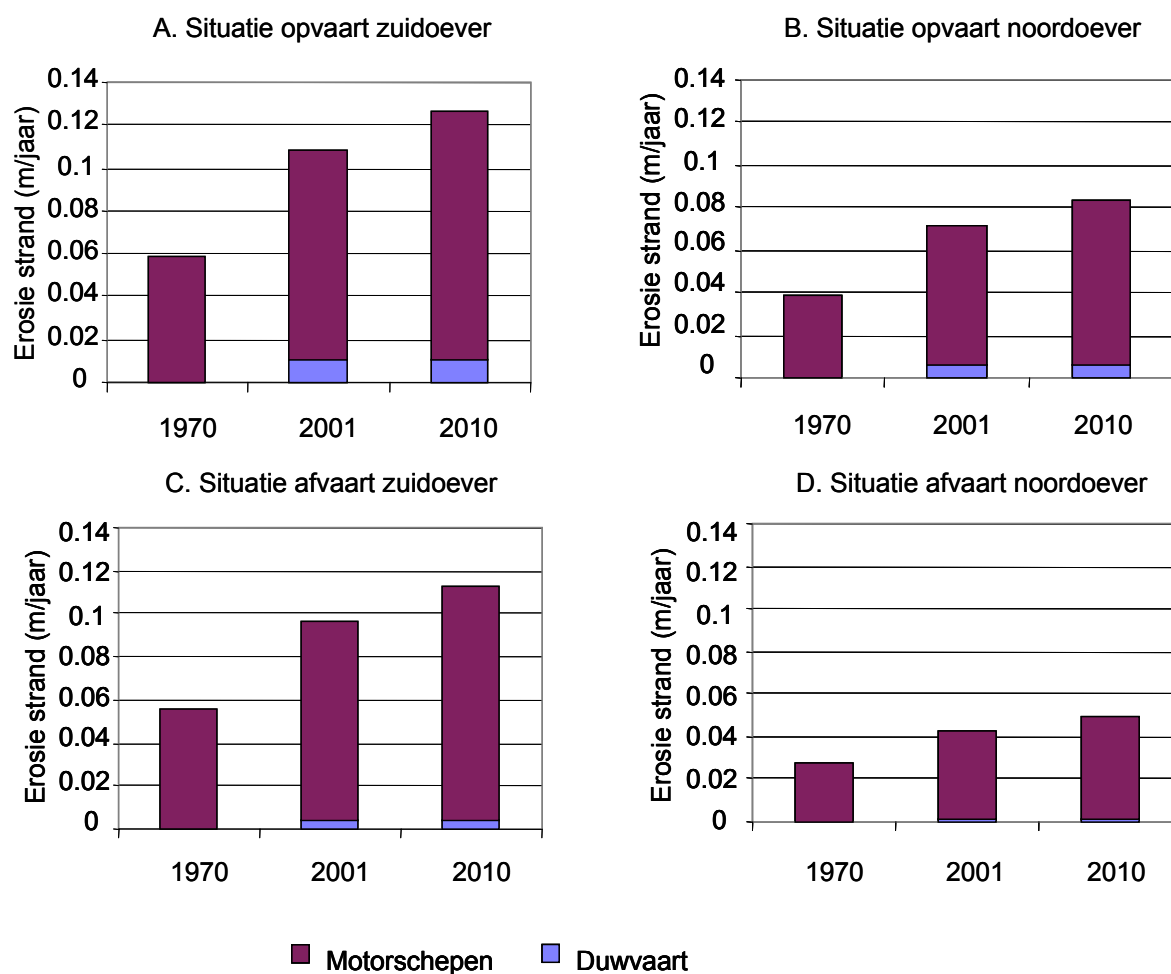


Figuur 12. De verandering in de omvang van het transport over de Rijn bij Lobith in stroomopwaartse richting gedurende de periode 1975-2000, met een onderscheid in motorschepen (kanaal- en Rijnschepen) en duwvaart).

De combinatie van veel gegevens, waaronder de informatie van figuur 12 en de neurale netwerken, geeft een beeld van de erosie van kribvakstranden langs de Waal op jaarbasis. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen het effect van duwvaart (2-, 3- en 4-bakseenheden) en motorschepen (Rijn- en kanaalschepen).

De resultaten staan in figuur 13. In deze figuur zijn 4 situaties onderscheiden: het effect van de beladen, opgaande scheepvaart (veelal van Rotterdam naar Duisburg) op de stranden langs zuid- (A) en noordoever (B), en het effect van de afgaande, veelal onbeladen scheepvaart op de stranden langs zuid- (C) en noordoever (D).

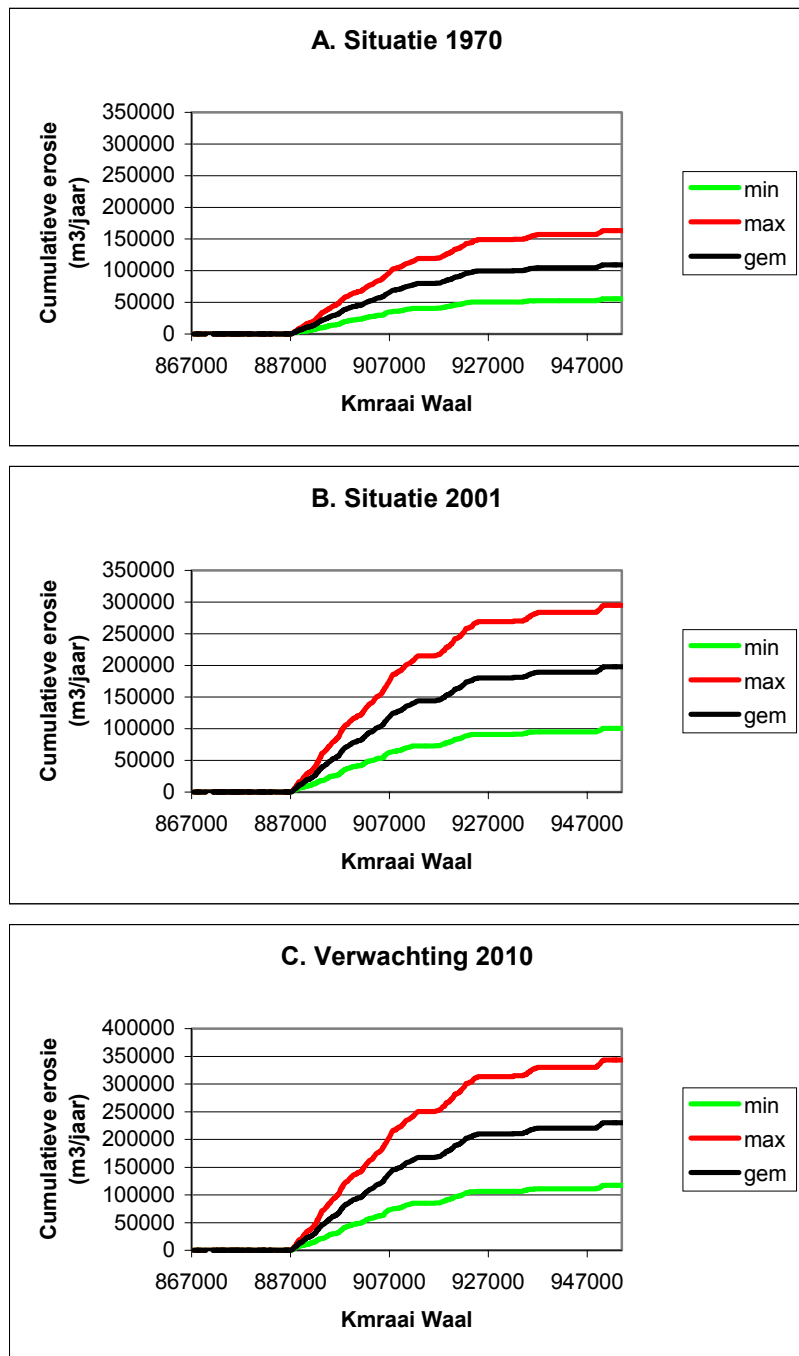
De hoeveelheid zandverlies per eenheid van oppervlakte is in de kribvakken aan de zuidoever groter dan aan de noordoever. De grootte van de bodemverlaging van het strand op jaarbasis is de som van het erosieve effect van de op- en afvaart en bedraagt volgens deze berekeningen een halve tot maximaal twee decimeter. Dit is een realistische orde van grootte. De figuur laat zien dat het effect van duwvaart in het niet valt bij het effect van de motorschepen. In 1970 was er nog geen duwvaart. De figuur laat in de tijd een toename zien van het zandverlies door passerende scheepvaart. Volgens de berekeningen zal het effect van scheepvaart op het zandverlies uit de onderzochte kribvakken in 2010 ten opzichte van 1970 zijn verdubbeld.



Figuur 13. Het erosieve effect van scheepspassages op de bodemligging van het kribvakstrand in een klein vak aan de zuidoever en een groot vak aan de noordoever van de Waal bij Druten, op jaarbasis.

De berekening die ten grondslag ligt aan figuur 13 is gemaakt voor alle kribvakstranden langs de Waal. Het resultaat van deze berekening is uitgedrukt in hoeveelheden kubieke meters erosie per jaar in figuur 14. Gekozen is voor een weergave waarbij de berekende zandverliezen per kribvak in stroomafwaartse richting cumulatief worden opgeteld. Het getal aan de stroomafwaartse zijde kan dan op realiteitsgehalte worden geëvalueerd door het te vergelijken met termen in de zandbalans van de Rijntakken (zie sectie 6). De waarden van maximum en minimum hebben betrekking op een spreidingsband van éénmaal de standaarddeviatie rond het gemiddelde.

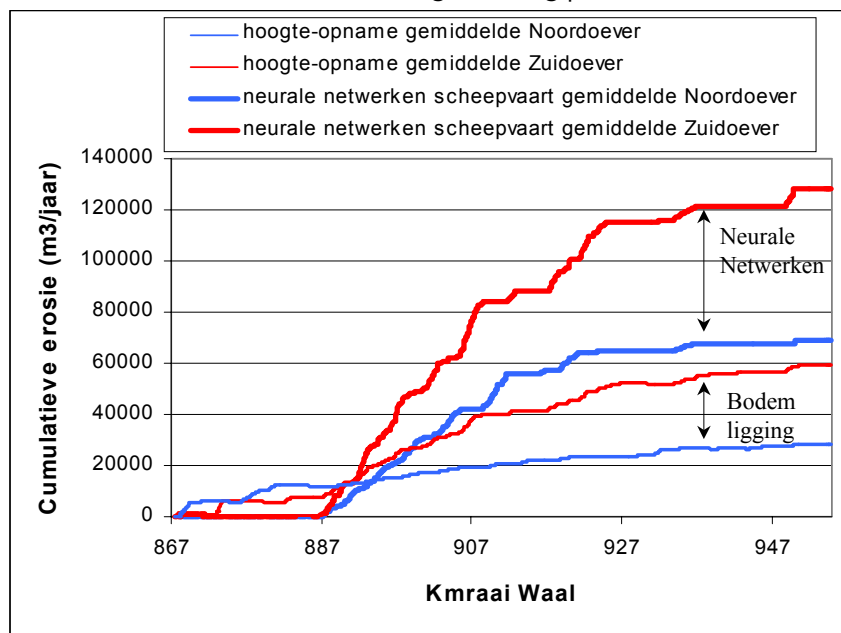
Uit de figuur blijkt dat de berekeningen een verdubbeling van het zandverlies vanuit de kribvakken naar de vaargeul laten zien van 1970 naar 2001, al zijn de spreidingsbanden groot. De extrapolatie van 2001 naar 2010 is gemaakt door de trend van de verandering in de binnenvaart sinds 1975 (figuur 12) te extrapoleren naar 2010. Volgens deze trend wordt verwacht dat de duwvaart niet veel verandert. Figuur 14 laat zien dat de extrapolatie van 2001 naar 2010 in de berekeningen van de kribvakerosie geen al te grote veranderingen oplevert.



Figuur 14. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis voor 3 jaartallen.

Bovenstaande zandverliezen uit kribvakken langs de Waal door scheepvaart volgen uit de opgestelde neurale netwerken. Op basis van een uitgevoerde monitoring van de bodemligging van 23 kribvakstranden langs de Waal kan een vergelijkbare berekening worden gemaakt. Deze berekening is uitgevoerd voor een dataset van juni 1995 – februari 1998. Deze dataset heeft betrekking op laagwater processen, en daarmee op met name de invloed van scheepvaart. Op basis van deze monitoring van 3 jaar is de jaarlijkse sedimentuitwisseling tussen kribvakken en hoofdgeul bepaald.

Conform de presentaties van het zandverlies volgens de neurale netwerken (figuur 14) is weer gewerkt met cumulatieve grafieken. Figuur 15 toont de resultaten, waarbij ook de resultaten uit de neurale netwerk studies in de figuur zijn opgenomen. Opvallend is dat zowel op basis van de neurale netwerken als de monitoring van de bodemligging een grotere erosie van de stranden langs de zuidoever wordt berekend. Dit verschillend gedrag van de kribvakstranden langs beide oevers wordt (zeer waarschijnlijk) veroorzaakt door een grotere erosie door scheepvaart langs de zuidoever omdat daar de beladen vaart richting Duisburg passeert.



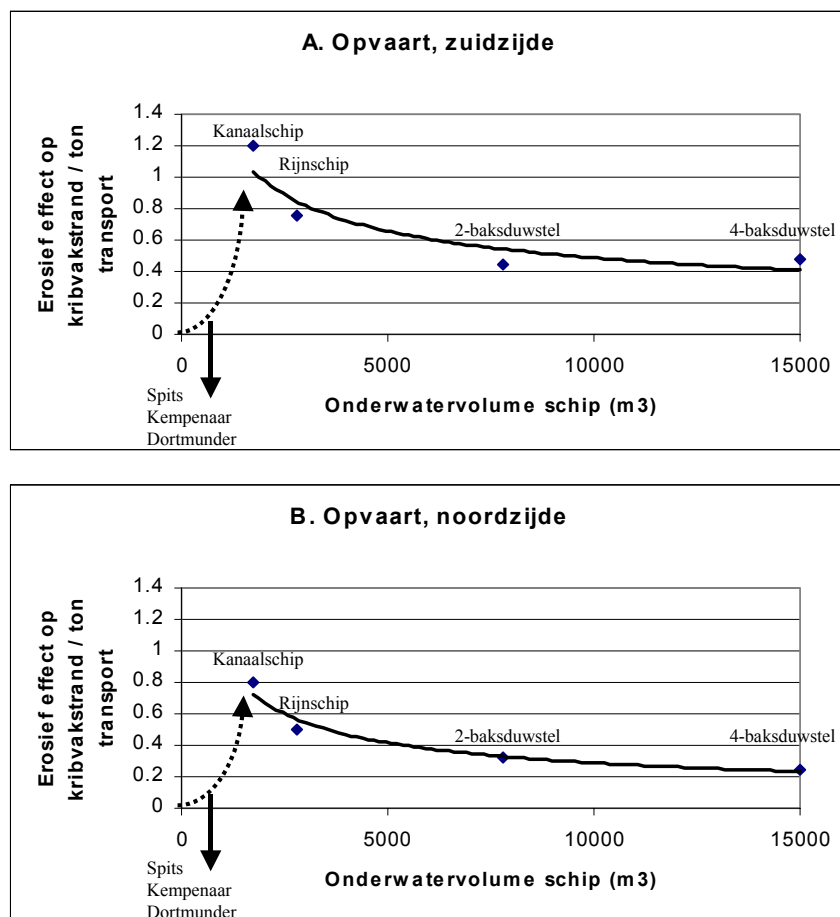
Figuur 15. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis, met een onderscheid naar noord- en zuidoever, volgens de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden én volgens de invloed van scheepvaart op basis van Neurale Netwerken.

Figuur 15 laat ook zien dat met de neurale netwerken een hogere erosie wordt berekend dan volgt uit de analyses van de bodemhoogte-opnames. Deze hogere erosie is een overschatting die het gevolg is van het feit dat de neurale netwerken zijn gebaseerd op metingen bij een lage afvoer. Bij een lage afvoer is het proces van scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging relatief sterk. Bij hogere waterstanden zal de invloed van zuiging bij scheepspassages op de bodem van het kribvakstrand minder sterk merkbaar zijn. Het extrapoleren van de lage afvoer resultaten naar een heel jaar levert dus een overschatting van de invloed van dit proces op.

Er is een ondergrens waaronder schepen geen merkbare invloed hebben op de erosie van zand van de kribvakstranden. Dit zijn de kleine schepen die wel secundaire golven opwekken maar nauwelijks zuiging uit de vakken. In figuur 10 was al getoond dat secundaire golven slechts weinig bijdragen aan de schuifspanning op de bodem. Voor de grotere schepen geldt dat met een toename van het laadvermogen van het schip het effect van een getransporteerd volume op de sedimenthuishouding van kribvakken afneemt. Simpel gezegd betekent dit dat als dezelfde vracht met één groot schip wordt vervoerd in plaats van met 3 kleinere, het eroderend effect op

de oever kleiner is. De grotere impact van een groter schip wordt dus teniet gedaan door de afname van de passagefrequentie.

De relatie tussen het effect per getransporteerde ton vracht en de scheepsgrootte heeft waarschijnlijk het karakter van de curve in figuur 16. De eenheid op de y-as is 10^{-9} m erosie van het strandoppervlak per ton getransporteerde vracht per jaar. Deze eenheid is daarbij niet zo relevant. Het gaat om het relatieve verloop van de curve. De curve kan worden beschouwd als de erosieve druk van scheepvaart op het strand langs de oever.



Figuur 16. De erosieve druk van stroomopwaartse varende scheepvaart op het kribvakstrand, uitgedrukt per ton transport voor verschillende scheepstypen (in 10^{-9} m erosie van het strandoppervlak per ton getransporteerde vracht per jaar), voor de zuid- (A) en de noordzijde (B) van de Waal.

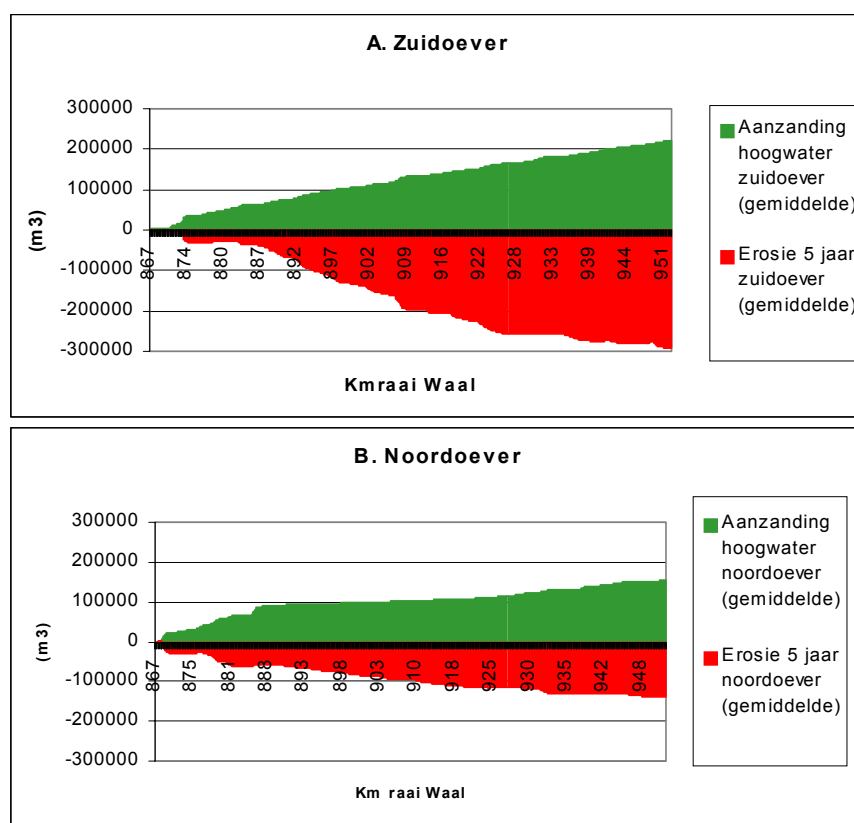
Met de stippellijn is aangegeven hoe de relatie tussen erosief effect per ton transport en de scheepsgrootte vermoedelijk zal zijn voor de schepen kleiner dan de grenswaarde waarvoor de neurale netwerken zijn opgesteld. Meer dan een vermoeden kan hiervoor niet worden gegeven, vandaar de stippellijn. Het vermoeden van een verwaarloosbare rol voor de schepen in de klassen Spits, Kempenaar en Dortmunder bleek uit de gevoeligheidsanalyses met neurale netwerken.

Figuur 16 laat zien dat de grotere motorschepen (Kanaal- en Rijnschepen) per hoeveelheid getransporteerde vracht een grotere erosie van

kribvakstranden veroorzaken dan de grotere duwstollen. Uit een oogpunt van stabiliteit van kribvakstranden zijn de grotere duwstollen dus relatief efficiënt.

5 Zandaanvoer naar kribvakken: de rol van hoogwater

De sedimenthuishouding van kribvakken bij hoge afvoeren kan alleen worden afgeleid uit de monitoring van de kribvakstranden. Deze langjarige monitoring bevat het effect van het hoogwater van 1998. De grootte van de gemiddelde waarde voor aanzanding in de kribvakken tijdens deze afvoergolf is vrij constant langs de rivier en komt voor de hele Waal uit op in totaal 373.000 m³.



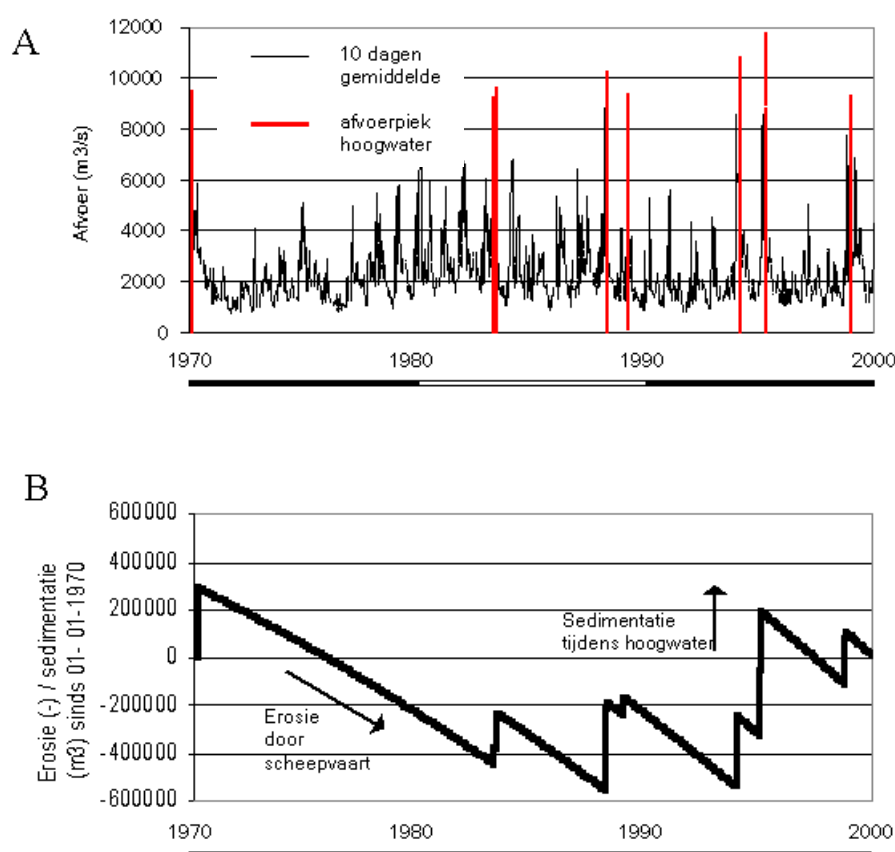
Figuur 17. De cumulatieve erosie en sedimentatie van kribvakstranden langs de Waal tijdens de opeenvolging van periodes met lagere en hoge afvoeren, voor de stranden langs de zuid- (A) en noordoevers (B).

In figuur 15 is het cumulatieve zandverlies bij lage afvoer uit de kribvakken in stroomafwaartse richting gepresenteerd. Op dezelfde wijze kan de cumulatieve zandaanvoer naar de kribvakken door een hoogwater worden gepresenteerd. Zandverlies bij lage – gemiddelde afvoeren en zandaanvoer bij hoge afvoer zijn in figuur 17 samen gepresenteerd. Uit analyses is afgeleid dat hoogwaters die zand het kribvak in transporteren een grootte moeten hebben die overeenkomen met een herhalingstijd van 5 jaar. De zandaanvoer door het hoogwater van 1998 kan dus worden beschouwd als een event dat eens in de 5 jaar voorkomt. De periode met lage –

gemiddelde afvoeren in de monitoring dataset, tussen de hoogwaters van 1995 en 1998, is korter dan deze 5 jaar. Voor een goede onderlinge vergelijking van hoeveelheden erosie en sedimentatie is de erosie daarom ook geëxtrapoleerd naar een periode van 5 jaar. Het resultaat in figuur 17 laat zien dat de processen van erosie bij lage – gemiddelde afvoer en sedimentatie door hoogwater volgens de monitoring dataset met elkaar in balans zijn. Zelfs het onderscheid tussen het gedrag van de stranden aan noord- en zuidoever is voor lage – gemiddelde afvoeren en het hoogwater ten opzichte van elkaar gespiegeld.

6 De langjarige zandbalans van kribvakken langs de Waal

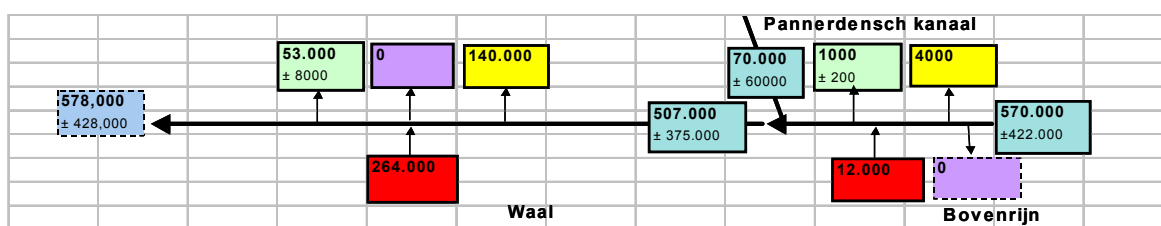
Het grootschalig en lange termijn gedrag van de kribvakstranden kan worden beschouwd als een ademen van de stranden waarbij op een tijdschaal van enkele tientallen jaren erosie tijdens periodes met lage en gemiddelde afvoeren en sedimentatie tijdens hoogwaters elkaar afwisselen. Op grond van de informatie die het onderzoek van de afgelopen jaren heeft opgeleverd kan dit ademen worden gevisualiseerd. Dit is gedaan voor de periode 1970-2000 door aan de dagafvoer een waarde voor erosie of sedimentatie toe te kennen. Het toekennen van deze waarden is gedaan op grond van de inzichten uit het onderzoek.



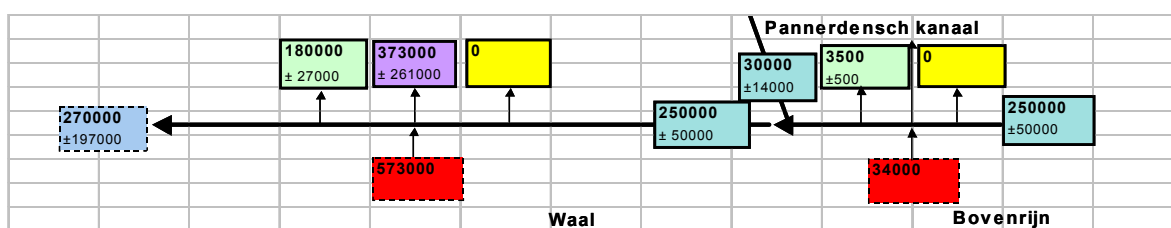
Figuur 18. Een visualisatie van het ademen van de kribvakstranden langs de Waal in de periode 1970-2000, met geleidelijke erosie bij lagere afvoeren en snelle sedimentatie tijdens hoogwaters

Het resultaat van deze simulatie van aanzanding en erosie staat in figuur 18. In deze figuur is 1 januari 1970 als startpunt gekozen. De bovenste figuur toont de afvoercurve, de onderste figuur de visualisatie van de afwisseling van erosie en sedimentatie. In deze figuur is als startwaarde op de linker verticale as 0 gekozen. Op basis van het afvoerproces groeit of vermindert de hoeveelheid zand in de kribvakken langs de Waal. De figuur illustreert het proces van geleidelijke erosie in periodes met lagere afvoeren en momenten met snelle sedimentatie tijdens hoogwaters. Met rode lijnen is de afvoer tijdens de afvoergolven $> 8950 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ aangegeven. Dit zijn hoogwaters met een herhalingsperiode van 5 jaar. Deze afvoergolven leiden er toe dat de hoeveelheid zand in de kribvakken in korte tijd op een hoger plan wordt getild, waarna dit zand weer geleidelijk aan naar de rivier wordt gevoerd. Hoewel deze visualisatie op aannames is gebaseerd, en het verloop van de curve wellicht een sterk geschematiseerd beeld van de werkelijkheid geeft, geeft het waarschijnlijk in grote lijnen toch een goede interpretatie van het ademen van de kribvakstranden. In de eerste plaats doordat de aannames in dit rapport redelijk goed zijn onderbouwd. In de tweede plaats doordat met deze aannames de afwisseling van erosie en sedimentatie na 30 jaar niet ontspoort in een overheersing van het ene proces over het andere, hetgeen in overeenstemming is met de werkelijkheid. De rekenresultaten uit de neurale netwerken en de monitoring van de stranden, toegepast op een afvoerreeks van de afgelopen 30 jaar levert dus het beeld op van een ademend strand dat op een tijdschaal van tientallen jaren geen overheersing van erosie of sedimentatie laat zien.

A. Periode 1990 – 2000 (m³/jaar)



B. Hoogwater 1995 (m³/hoogwater)



Waarden in m ³ /jaar			
	Input sediment		Hard gegeven, uit onafhankelijke bron
	Bodem verlaging/verhoging		Berekende waarde, geverifieerd
	Baggeren		Volgt uit andere waarden/aangepaste
	Kribvak erosie/depositie		
	Oeverwal depositie		
	Output sediment		

Figuur 19. De balans voor zand (en grind) voor de Bovenrijn - Waal voor de periode 1990-2000 (in m³/jaar) (A) en het hoogwater van 1995 (in m³) (B).

Voor het hoogwater van 1998 wordt een totaal zandtransport vanuit de rivier naar de kribvakken berekend van 373.000 m³. Samen met het zandtransport naar de oeverwallen betekent dit een zandtransport naar de oeverzone van ruim 500.000 m³. Dit is de zandaanvoer bovenstrooms op jaarbasis, en twee keer de aanvoer naar de Waal tijdens de afvoergolf zelf (figuur 19). Dit betekent dat tijdens een fors hoogwater kennelijk veel zand uit de bedding geërodeerd wordt en beschikbaar komt voor transport naar de oeverzone

Het onderzoek heeft laten zien dat erosie en sedimentatie van kribvakstranden elkaar op een termijn van meerdere jaren in evenwicht houden. Dit betekent dat bij een sedimentbalans van de Waal over een termijn van 10 jaar de kribvakken netto geen bron- of putterm van zand zijn en dus op 0 kunnen worden gesteld (figuur 19 A). Op een termijn van een hoogwater, daarentegen, is de zandaanvoer naar de kribvakken (en verder de oeverwal op) een zeer grote term in de sedimentbalans (figuur 19 B).

De erosie van de stranden langs de Waal bij lage – gemiddelde afvoer bedraagt 86.000 m³/jaar. Dit getal past goed in de orde van grootte van de reeks bron- en puttermen van de langjarige zandbalans. Voor de hoogwaterbalans is de berekende sedimentatie van 373.000 m³ tijdens één afvoergolf weliswaar fors in relatie tot de andere termen in de balans, het past qua grootte wel bij de hoeveelheid sedimentatie op de oeverwallen van 180.000 m³ tijdens één hoogwater.

7 Aanbevelingen voor rivierbeheer

Het ademen van kribvakstranden is een essentieel onderdeel van de zandhuishouding van de Waal. Met deze kennis kan het handelen of juist het niet-handelen van een rivierbeheerder beter worden onderbouwd. De kennis helpt de beheerder bij het maken van keuzes.

Een belangrijke uitkomst voor de beheerder is de conclusie dat, bij de huidige omvang van de binnenvaart, de duwvaart geen bedreiging vormt voor de stabiliteit van de kribvakstranden langs de Waal. In de jaren zeventig en begin jaren tachtig werd hier heel anders over gedacht. Er waren signalen die wezen op het achteruit gaan van kribvakstranden (door scheepvaart) en de introductie van de 6-baksduwvaart werd dan ook met enige zorg tegemoet gezien (vandaar het geïnitieerde kribvakonderzoek in die tijd). Na het uitvoeren van alle analyses laat de integratie van alle resultaten in figuur 18 zien dat de signalen van erosie destijds correct waren, maar dat deze betrekking hadden op een erosiefase (door het uitblijven van hoogwaters) in een langjarige balans waarin erosie en sedimentatie elkaar in evenwicht houden.

Het onderzoek leert de beheerder dus dat deze niet bezorgd hoeft te zijn over de invloed van scheepvaart op stranderosie. Althans, niet voor de huidige situatie. Hoogwaters blijken in staat om de erosie van meerdere jaren voorafgaand aan een hoogwater te compenseren. Ook het effect van verschuivingen in de binnenvaart, qua type schepen en qua vaarintensiteit, kan met het voorliggende onderzoek door de beheerder behoorlijk goed worden ingeschat. Een ook daarbij kan hij gerust zijn. Zo laat het onderzoek zien dat een eventuele verschuiving van de samenstelling van de binnenvaart naar meer duwvaart ten koste van de kleinere schepen, bij een

gelijkblijvende omvang van het transport met de binnenvaart, geen sterker eroderend effect op de kribvakstranden zal hebben.

Het dynamische gedrag van kribvakstranden biedt de beheerder mogelijkheden om de kribvakken te gebruiken als (tijdelijke) opslagplaats voor, van ondieptes, gebaggerd zand. Bij het baggerbeleid op de Waal wil de beheerder gebaggerd zand weer terugstorten in de rivier. Om zo de langjarige bodemdaling zoveel mogelijk af te remmen. Maar het zand moet niet te snel weer op de ondieptes in de vaargeul terugkeren. De kribvakken bieden dan een goede mogelijkheid om het zand én in de rivier te houden én een tijdje bij de ondieptes vandaan te houden. Door het storten in kribvakken als onderdeel van het bagger- en stortbeleid te hanteren, wordt in het rondpompen van het zand als het ware een tijdvertraging ingebouwd. Wel moet de beheerder zich realiseren dat dit mechanisme niet werkt voor grof sediment (grind). Als grof sediment wordt gebaggerd en in kribvakken wordt gestort, zal de grove fractie niet zo makkelijk, en misschien wel helemaal niet, uit het kribvak eroderen. Bij het gebruiken van kribvakken in het sedimentmanagement van de rivier moet de beheerder er dus op letten dat hij dit niet doet voor te grof sediment. Ook is het verstandig om geen kribvakken te gebruiken waar de stroming en de invloed van scheepvaart beperkt is (met name binnenbochten). Wellicht zijn juist die locaties in de rivier waar men in eerste instantie niet denkt aan kribvakstranden, de buitenbochten, interessante stortlocaties. Juist om dat daar het sediment relatief makkelijk weer terug komt in de rivier. En dat wil de beheerder uit oogpunt van het stoppen van de bodemdaling.

Het inpassen van kribvakken in het sedimentmanagement bij baggeren kan de beheerder de meerwaarde opleveren van meer natuurlijke oevers. Niet alleen doordat meer zandige oevers worden gecreëerd, maar ook doordat processen op gang worden gebracht die langs de rivier zeldzaam zijn. Het gaat hierbij om het verstuiwen van zand van de stranden naar de oeverwal. Dus meer eolische dynamiek met zelfs de mogelijkheid van duinvorming op de oever. Maar dit vraagt wel om enig lef bij de beheerder, meer dan voor sedimentmanagement nodig is. Immers, de stranden moeten tot op een hoog niveau met voldoende breedte worden opgespoten, aansluitend op de oever. Het te storten zand mag niet teveel grof materiaal bevatten en er moeten kribvakken worden geselecteerd waar de erosie door de waterbeweging relatief sterk is. Dit alles is nodig om afpleistering met een grove toplaag, en dus het stoppen van verstuiwing, te voorkómen. Het deel van het opgespoten zand dat door de wind wordt weggeblazen is alleen de fijnste fractie. Dit is een verwaarloosbaar deel van de hoeveelheid gestort zand. Het verstuiwen van deze fractie zal de bodemdaling van de rivierbedding niet beïnvloeden.

De resultaten uit dit onderzoek geven aan er een relatie bestaat tussen de sedimenthuishouding van kribvakken en de bodemligging van het zomerbed. Hierbij zijn met name de processen bij hoogwater voor de beheerder interessant. De sterke aanzanding van kribvakken bij een hoogwater zal waarschijnlijk gepaard gaan met een significante daling van het zomerbed. Temeer daar ook een significante hoeveelheid zand op de oeverwallen wordt afgezet (figuur 19). Het zand op de oeverwallen is definitief aan de rivier onttrokken. Het zand in de kribvakken komt in de loop van de tijd wel weer in de rivier terug. Bij een hoogwater zal er waarschijnlijk sprake zijn van een daling van het zomerbed, gemiddeld over grote delen van de rivier. Lokaal treedt

natuurlijk ook sedimentatie op, bijvoorbeeld op de locaties waar veel afvoer vanuit de rivier het winterbed instroomt. Het grootschalig effect van een hoogwater op het zomerbed is niet bekend, zeker niet in relatie tot de aanzanding van kribvakken, en verdient nader onderzoek. Hierbij is voor de beheerder de vraag interessant in welke mate het langjarige gedrag van de bodemligging van het zomerbed wordt bepaald door processen tijdens hoogwaters. Voor het langjarig sedimenttransport door de rivier zijn hoogwaters van ondergeschikt belang. Maar dit wil nog niets zeggen over het gedrag van de bedding. Meer kennis over de interactie tussen zomerbed en kribvakken helpt de beheerder bij het omgaan met kribvakken in het kader van sedimentmanagement. Met deze kennis zou de beheerder kunnen kiezen voor het grootschalig suppleren van kribvakken met, van ondieptes gebaggerd, zand zonder dat de langjarige bodemdaling door dit handelen toeneemt.