

Erosie en ecologische effecten door scheepvaartgolven

Ruurd Noordhuis (Deltares)

Scheepvaart veroorzaakt waterbewegingen, die, afhankelijk van de beschikbare ruimte rond de schepen, meer of minder effect hebben op de bodem en de oevers van het betreffende waterlichaam. Vooral als de ruimte beperkt is zoals in lijnvormige rivieren en kanalen veroorzaken deze waterbewegingen schade aan de stabiliteit en de ecologie van de waterbodem en de oevers. In veel Nederlandse kanalen en rivieren kunnen deze effecten substantieel zijn. De factsheet behandelt de verschillende golven en waterbewegingen, omdat een goed begrip hiervan van belang is voor het identificeren van zinvolle maatregelen.

Inleiding	2
Waterbewegingen door scheepvaart	2
Schade door scheepvaartgolven	4
Ecologische schade van erosie door scheepvaart	7
Maatregelen	11
Scheepvaart management	11
Oeverinrichtingsmaatregelen	11
Compensatie	14
Bronnen	15
Colofon	17

Inleiding

Deze factsheet gaat over de effecten van waterbeweging door scheepvaart op de ecologie van kanalen en rivieren en de daartegen te nemen maatregelen. Effecten van scheepvaart treden op door een combinatie van retourstroming, schroefstroming en golfwerking en de daarmee verbonden erosie van de bodem en oevers. In veel Nederlandse wateren zijn deze effecten substantieel. De factsheet behandelt eerst de verschillende golven en waterbewegingen die door schepen worden veroorzaakt. Dit onderwerp is relatief uitvoerig behandeld, omdat een goed begrip van de verschillende golven en stromingspatronen van belang is voor het identificeren van zinvolle maatregelen. Dan volgt een paragraaf over de erosie die daardoor optreedt en de inschatting daarvan, met extra aandacht voor enkele bijzondere omstandigheden. Daarna worden de ecologische gevolgen behandeld en tenslotte de manier waarop die effecten kunnen worden gemitigeerd of gecompenseerd.

Naast de fysieke gevolgen van de waterbeweging door passerende schepen heeft de scheepvaart nog andere ecologische effecten, zoals de invloed op de waterkwaliteit en de verspreiding van invasieve exoten. Ook zijn waterlichamen aangepast om als vaarweg te dienen met consequenties voor de habitatdiversiteit (Bak et al. 2006). Deze aspecten vallen buiten de scope van deze factsheet.

Waterbewegingen door scheepvaart

Schepen veroorzaken zowel stroming (en schroefstroming en retourstroming) als golfslag, in sterke onderlinge samenhang. Afhankelijk van de combinatie van eigenschappen van schip en waterlichaam treedt daardoor erosie van bodem en oevers op.

Schroefstraal

Een schip beweegt zich in de regel voort met één of meerdere schroeven, die water naar achteren malen en daardoor het schip naar voren stuwten. De schroef produceert daarmee een achterwaarts gerichte stroming. De sterkte hiervan hangt af van de diameter van de schroef en het gebruikte vermogen. De schroefstraal verbreedt zich naar achteren toe en verliest daarbij aan energie. In Nederland wordt in zes klassen van vaartuigen de diepte berekend die onder de schroef nodig is (kielspeling) om geen opwerveling te veroorzaken. Bij de lichtste klasse is dat al meer dan 7 meter als de motor draait terwijl het schip stilligt. Als het schip vaart wordt die afstand sterk gereduceerd (afhankelijk van de snelheid).

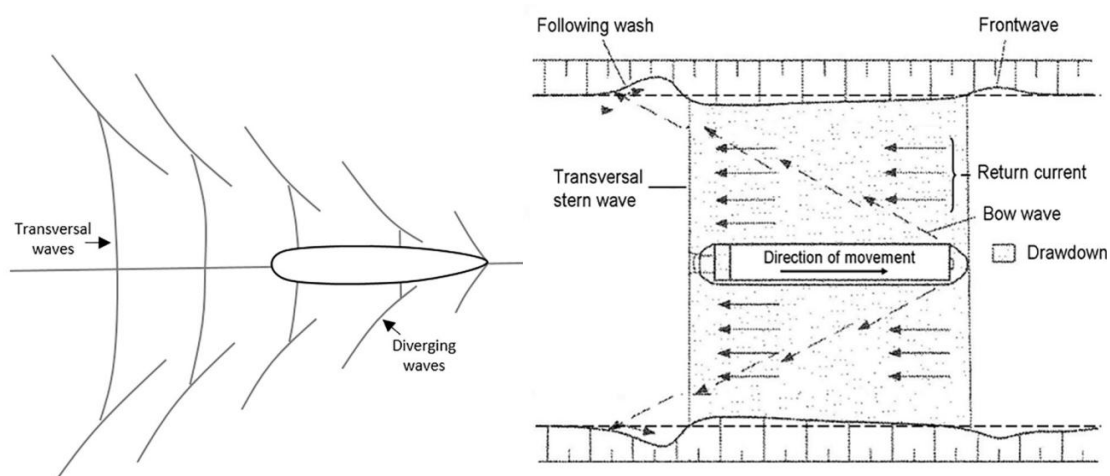
De schroefstroom heeft bij een schip dat stilligt of langzaam vaart tot op grote diepte effect op de bodem. Daarom is dit bij langzaam varende schepen de dominante kracht op de bodem. Bij hogere snelheid neemt de diepte van de turbulentie snel af en dan wordt de retourstroom de dominante kracht. In de Nederlandse vaarwateren vindt door deze combinatie eigenlijk altijd bodemerosie en sediment opwerveling plaats.

Boeggolf

Een varend schip duwt water naar voren, waardoor een boeggolf ontstaat (figuur 1). De hoogte van de boeggolf en de grootte van voorwaartse stroming hangen af van de snelheid en de vorm van de boeg. Er is een sterke relatie tussen de snelheid van het schip en de hoogte van de boeggolf: als de snelheid toeneemt, neemt de (hoogte en) golflengte van de boeggolf ook toe, totdat deze gelijk is aan de lengte van het schip (grenssnelheid of rompsnelheid). Meer vermogen levert dan alleen meer golven op, een schip kan z'n eigen boeggolf niet inhalen. Als het schip deze snelheid nadert lijkt het z'n boeggolf te "beklimmen".

Retourstroming

Retourstroming ontstaat door compensatie van de voorwaartse waterverplaatsing door het schip, en is dus tegengesteld aan de vaarrichting. De snelheid is afhankelijk van de snelheid van het schip en van het oppervlak van de doorsnede van het schip ten opzichte van die van het (resterende) waterlichaam. Deze stroming gaat gepaard met waterstandsverlaging en een golfdal, het spiegeldalingsgebied, en met "squat", verlaging van het schip zelf. Het dal is het diepst dicht bij het schip en is dieper naar mate de snelheid groter is. Door de squat loopt het schip dan ook eerder vast. Sowieso loopt de retourstroom ook onder het schip door. Vaak is de snelheid hier groter dan aan weerszijden van het schip.



Figuur 1 Twee weergaven van de waterbewegingen veroorzaakt door een varend schip. In de linker weergave is de combinatie van boeggolf en transversale golven weergegeven, met de hoogste toppen op de kruisingen (stippellijn); dit beschrijft de situatie in open water in meren en zee. In de rechter weergave is ook de afwisseling van golfoploop en zuiging op de oevers weergegeven waar de ruimte beperkt is. Bron: Gabel et al. (2017).

Haal- of hekgolf en volgstroom

Bij het achterschip gaat de spiegeldaling over in de haal- of hekgolf, die mede gevormd wordt door de voorwaarts gerichte volgstroom die aan weerszijden van de schroefstraal ontstaat. Een varend schip veroorzaakt dus een opeenvolging van voorwaartse boegstroom, achterwaartse retourstroom, voorwaartse volgstroom en achterwaartse schroefstroom. Hoe smaller en ondieper de vaargeul van het kanaal

of de rivier en hoe groter en sneller het schip, hoe sterker de stroming en hoe groter de kans op erosie.

Secundaire golven

Vanaf het schip reizen twee soorten golven naar de oevers. Zowel de boeggolf als de hekgolf verplaatsen zich zijdelings naar de oevers, gezien vanaf het schip in een wigvormig patroon. Daarnaast worden transversale golven gevormd, die vanaf de achtersteven dwars op de lijn van het schip over het zog lopen. Waar ze de boeg- en hekgolven kruisen zijn de golven het hoogst. De hoogte van de golven hangt af van de snelheid van het schip en de diepte, en wordt kleiner op grotere afstand van het schip. Erosie door dit type golven treedt ook in bredere wateren op als er een groot diepteverschil is tussen de vaargeul en de omgeving; vooral als er ondieptes (of oevers) naast de scheepvaartroutes (vaargeulen) liggen.

Belangrijk voor de oevererosie is dat snellere stroming resulteert in lager peil (wet van Bernoulli), waarbij zuiging gaat optreden. Op de oevers wordt die zuiging dus afgewisseld met golfploop.

Relatie tussen omvang en lading van een schip en de breedte van het water

Als het kanaal of de rivier smal is en de snelheid van het schip groot, wordt het gat achter het schip op deze manier niet snel genoeg gevuld en ontstaat voorwaartse stroming van achterop. Het schip kan dan onbestuurbaar worden en moet vaart minderen. Als twee schepen elkaar inhalen of passeren gaan de stromingspatronen elkaar beïnvloeden en ontstaan stroomversnellingen en -vertragingen. Meer turbulentie indiceert ook een groter energieverlies voor het schip. Dat kan door het ontwerp van het schip worden gereduceerd. Zo worden grote schepen tegenwoordig vaak uitgerust met een bulbsteven, een torpedovormige uitstulping onder de waterlijn. Deze rijkt tot voor de boeggolf en vormt een golfdal dat de boeggolf compenseert en daardoor ook het "zog" daarachter vermindert. Een spits toelopende achtersteven kan de hekgolf behoorlijk reduceren.

Voor de verhouding tussen schip en de doorsnede van het vaarwater is ook de lading van belang. Langs de rivieren heeft een individuele passage het meeste effect bij de 4- en 6-baksduwvaart. Door de relatief lage frequentie van passage is het effect van de duwvaart echter (meer en meer) beperkt ten opzichte van de grote, gemotoriseerde kanaal- en Rijnschepen. Het effect van passage van zulke schepen is aanzienlijk groter als het schip geladen is en dus diep ligt. Door het verschil in lading tussen stroomafwaarts en stroomopwaarts varende schepen is de erosie van de zuidoever van de Waal (beladen vaart stroomopwaarts van Rotterdam) twee keer zo groot als langs de noordoever (grotendeels onbeladen retourvaart; Ten Brinke 2003).

Schade door scheepvaartgolven

Problemen met oevererosie door schepen treden vooral op in smalle wateren zoals kanalen en rivieren, of als vaargeulen in meren dicht bij de oever liggen, waar het een reden kan zijn dat herinrichting van de oever maar een beperkte natuurwinst oplevert. De intensiteit van golfwerking is vooral afhankelijk van drie dingen:

- De opgewekte golfenergie (grootte, vermogen en snelheid schepen)
- Afstand vaargeul – oever
- Oevertype (steil/flauw, kribben/gestreckte oever)

Voor de omvang van de schade is daarnaast van belang:

- Frequentie van verstoring
- Spreiding van de verstoring via waterstandsfluctuaties

Frequentie is van belang in relatie tot de omvang van de verstoring. Terwijl commerciële duwvaart veel meer sediment opwerfelt, is de frequentie waarmee dit gebeurt meestal laag ten opzichte die van de pleziervaart passages. Toch worden veronderstelde kritische waarden in het aantal commerciële passages (m.b.t. mogelijkheden voor vegetatie) in veel Europese waterwegen wel degelijk overschreden (Murphy & Eaton 1983, Söhngen et al. 2008; Zajicek & Wolter 2019).

De spreiding van de verstoring verschilt per type waterweg. Zo concentreert de golfenergie zich in de gestuwde Nederrijn een groot deel van het jaar binnen 0,5 m rond het stuwpeil, terwijl die in vrij afstromende rivieren is verdeeld over een zone van ongeveer 1 m rond de gemiddelde waterstand. In de smalle IJssel is de golfenergie op alle oevers desondanks groot, terwijl in de Waal de verstoring met name tussen de kribben in de buitenbochten het grootst is, omdat daar het dichtst bij de oever gevaren wordt (Sieben 2009). In de meeste kanalen is het waterpeil strak gereguleerd, waardoor de golfenergie zich concentreert in een veel smallere hoogtezona dan in de rivieren.

Effectinschatting

Er zijn in het verleden diverse instrumenten ontwikkeld om de schade aan oevers te voorspellen en te adresseren. Voorbeelden zijn het programma DIPRO (1989, o.a. op basis van rekenregels uit Laboyrie & Verheij 1988), waarmee scheepsgeïnduceerde belastingen kunnen worden berekend en stabiele oeververdedigingen kunnen worden ontworpen (verbeterslagen in Meijer et al. 1993 en Verheij & van Prooijen 2007) en het oeverafslag model BEM (Verheij et al. 2007). BEM is inmiddels opgenomen in WAQBANK, dat kan worden gecombineerd met het hydrodynamische model WAQUA (Deltares). Een minder bekend DWW model is PLONS. De rol van de aard van de scheepvaart is benaderd in BIVAS (Binnenvaart Analysesysteem; <https://bivas.chartasoftware.com>).

Erosie rond obstakels: kribvakken

Kribben zijn in de negentiende eeuw aangelegd in onze rivieren om, met name in de buitenbochten, de stroming bij de oevers weg te leiden en erosie tegen te gaan, en zo het natuurlijk meanderen van de rivier te beperken (Hadel 2001). Hierbij werd de hoofdgeul ook versmald. De stroomsnelheid in de hoofdgeul wordt dan hoger, waardoor die zichzelf op diepte houdt. Tussen de kribben ontstaan echter onder invloed van de stroming in de rivier neren en ruimtelijke patronen van ontgroning en aanzanding. Daardoor ontstaat een veel complexere stromingsdynamiek, met ruimtelijke patronen die mede afhankelijk zijn van de lengte en de afstand tussen de kribben (Verheij 1997; Ten Brinke et al. 1999).

Als grote schepen door de vaargeul langs de kribvakken varen, bijv. bij 4- of 6-baks duwvaart, kan door de secundaire scheepsgolven oevererosie optreden. Het vrijgekomen materiaal wordt met de retourstroom afgevoerd. De stroming kan zo sterk zijn dat langs de kribben geulen ontstaan (Kruyt 2001).

Toch blijken strandjes tussen de kribben lange tijd in stand te blijven. Onderzoek van Rijkswaterstaat aan 23 kribvakstranden langs de Waal (Ten Brinke 2003) liet zien dat deze strandjes wel degelijk geleidelijk weg eroderen door de effecten van scheepvaart, maar dat dit zand in korte tijd weer wordt aangevuld als de afvoer zodanig hoog is dat de kribben worden overstroomd. Dit komt ongeveer eens per vijf jaar voor. De kribben zorgen dus niet alleen ruimtelijk maar ook in de tijd voor een nieuw patroon van dynamiek.

Sedimenttype, erosie en resuspensie

De mate van troebeling hangt behalve van de sterkte van golven en stroming ook af van het sedimenttype. Dat komt niet alleen door verschil in de snelheid van hersedimentatie, maar ook doordat fijne sedimenttypes makkelijker instabiel worden. Dat komt omdat de drukveranderingen door scheepspassage in het water boven het sediment vertraagd worden doorgegeven in het poriewater. Een geconsolideerd sediment vervloeit dan (liquefactie) en blijft daarna gevoeliger voor opwerveling. Dit proces is het sterkst als het schip snel vaart en het drukverschil tussen de boegwolf en het zog groot is (Söhngen et al. 2008).



Figuur 2 Opgewerveld slib in de oeverzone na het passeren van een schip. De oeverbescherming is hier verwijderd zodat de oever vrij kan eroderen.

Combinatie met andere oorzaken van verzwakking

Er zijn ook andere mechanismen die de oevers en bodems kunnen verzwakken, zoals insnijding van de rivieren (Brils et al. 2017). Schade van bovenaf kan optreden door vee of door gravende dieren. Deze mechanismen kunnen de oevers extra gevoelig maken voor erosie door scheepvaartgolven.

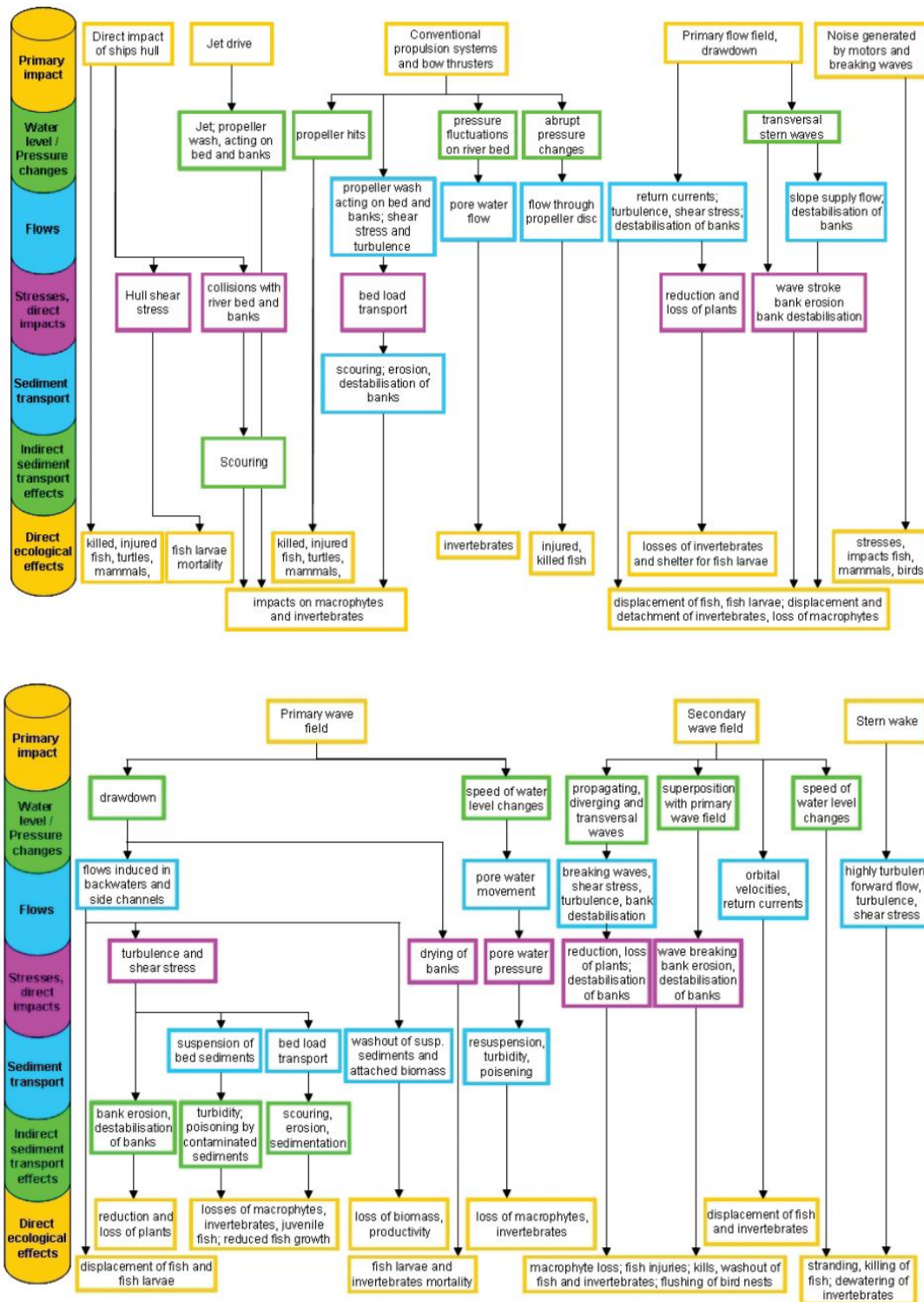
Ecologische schade van erosie door scheepvaart

Hoewel erosie doorgaans een negatieve klank heeft, is het voor het ecologisch functioneren van een watersysteem niet per definitie slecht. In kustgebieden trotseren aangepaste gemeenschappen de specifieke dynamiek van wind- en getijgestuurde golfslag (Denny 1988). In een deltagebied zoals laag Nederland horen erosie en sedimentatieprocessen ook bij de natuurlijke rivierdynamiek, in sterke samenhang met fluctuaties in afvoer. Bij een levende, meanderende rivier of beek, langs de hoofdgeul of in het winterbed, vindt voortdurend erosie en sedimentatie plaats. Hierdoor ontstaat ruimtelijke diversiteit en blijven waardevolle pionierhabitats zoals zand- en slikplaten en ondieptes op grotere schaal beschikbaar. Natuurlijke riviergemeenschappen zijn dan ook ingesteld op een relatief grote hoeveelheid dynamiek, vergeleken bij de gemeenschappen van meren (Söhngen et al. 2008). Pas als de ruimte waarover deze processen zich van nature afspelen wordt beperkt door regulering, kanalisatie en verstuwning en als waterpeilen worden gefixeerd (stuwpannen), ontstaan problemen. Nog meer dan in gereguleerde rivieren lijken gemeenschappen in min of meer stagnante kanalen op die van de meren. Deze gemeenschappen zijn niet ingesteld op veel dynamiek. De betrokken diersoorten zijn meer afhankelijk van vegetatie en soortgelijk substraat en hebben minder capaciteiten in de zin van zwemprestaties e.d.

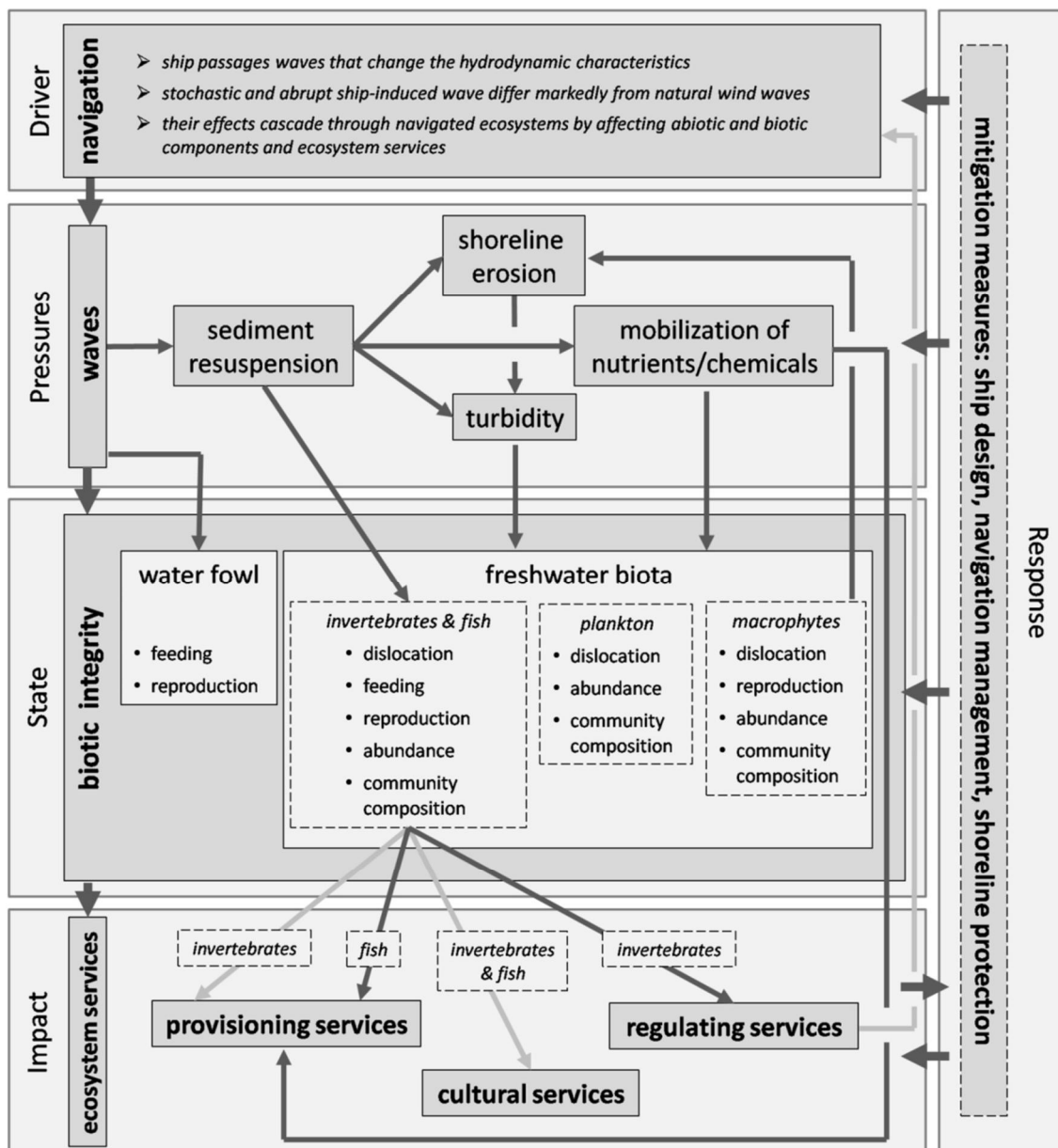
Een uitgebreide analyse van ecologische schade door schepen (niet alleen stroming en golfslag, maar ook directe schroefschade, aanvaringen, schade door geluid onder water, etc.) wordt gegeven in Söhngen et al. 2008 (figuur 3) en voor scheepvaartgolven in Gabel et al. (2017) (figuur 4). Passerende schepen veroorzaken een palet van kortstondige stress voor vissen, vogels, zoogdieren, macrofauna en water- en oevervegetatie. Ze kunnen sterfte en verwondingen veroorzaken bij direct contact met de schroeven, verplaatsing, losslaan en ontworteling door de sterk wisselende stroomsnelheid en -richting en golven, stranden op droogvallende oevers, stress door geluid. Dit wordt in figuur 3 gespecificeerd.

Korte video's om de effecten te illustreren:

- Geul langs de veerstoep bij Wamel in de Waal:
<https://vimeo.com/159468427>
- In de Maas bij een vrij eroderende oever ter hoogte van Boxmeer:
<https://vimeo.com/277642827>



Figuur 3 Schematische weergave van ecologische effecten van scheepvaart, verdeeld in effecten van aandrijving en stroming (boven) en golven (onder). Bron: Söhngen et al. 2008.



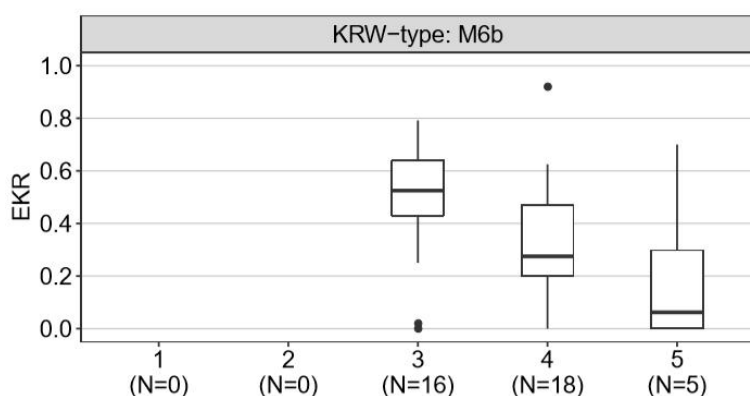
Figuur 4 Conceptueel overzicht volgens de DPSIR (driver-pressure-state-impact-response) systematiek van kwantitatief of kwalitatief aangetoonde directe en indirecte effecten van door scheepvaart veroorzaakte golven op ecosystemen. Eerste aanwijzingen van effecten op ecosysteemdiensten worden gegeven in lichtere grijze pijlen. (bron: Gabel et al. 2017).

Kanalen

De omvang van de invloed van golven en waterbeweging door scheepvaart wordt misschien wel het best duidelijk bij de ecologische beoordeling van kanalen, die natuurlijk veelal specifiek voor scheepvaart zijn aangelegd. De invloed van scheepvaart is hier vaak gecombineerd met een gefixeerd peil waardoor de druk zich steeds op dezelfde plaats concentreert. Vaak zijn de oevers van bevaarbare kanalen op een of andere wijze hiertegen beschermd (damwanden, beschoeiingen etc.). Indien de bescherming ontbreekt dan veroorzaken schippassages erosie van de oeverzone, met directe mechanische effecten op oeverplanten en secundaire effecten via troebelheid op ondergedoken planten en de daarbij behorende fauna.

Deze effecten zijn “alles bepalend” voor de ecologische potenties van deze wateren en hebben een grote invloed op de soortenrijkdom (Pot 2005). Zo komen in kanalen met veel scheepvaart nauwelijks waterplanten en emergente oeverplanten voor, terwijl dat in vergelijkbare kanalen zonder scheepvaart wel het geval is (Evers et al. 2012). Met name bij grote beroepsvaart is de waterbeweging te groot voor waterplanten. Het gaat vaak om een combinatie van mechanische schade (schroef, direct door golven, ontworteling door golven) en indirecte schade via vertroebeling (ter Heerdt 2012). Als het alleen gaat om recreatievaart met kleinere schepen en een lagere frequentie zijn er meer kansen voor vegetatie. Behalve omvang en frequentie van de schade is daarbij ook de timing van belang; waterplanten zijn het meest gevoelig (door lichtgebrek) in het begin van het groeiseizoen (Söhngen et al. 2008).

In het algemeen zijn de effecten zodanig groot dat voor de KRW watertypen M6 en M7 (grote ondiepe resp. diepe kanalen) afzonderlijke subtypen met scheepvaart zijn onderscheiden met aanzienlijk minder ambitieuze ecologische doelen dan de subtypen zonder scheepvaart en aparte maatlaten voor macrofauna en vis. Als zich enige vegetatie kan handhaven kan de soortensamenstelling worden beïnvloed als gevolg van verschillen in resistentie tegen mechanische druk (rekenregels KRW verkenner). Ook binnen de subtypes kanalen met scheepvaart is er een negatief verband tussen de intensiteit van die scheepvaart en de EKR score (figuur 5; Pot 2018).



Figuur 5 Boxplot voor de relatie tussen de intensiteit van de scheepvaart (1 -5 van laag naar hoog) en de EKR score voor watertype M6b, ondiepe kanalen met scheepvaart. Bron: Pot 2018.

Rivieren

Ook in de rivieren versnelt scheepvaart de oevererosie en wordt de ontwikkeling van watervegetatie beperkt (Vermaat & De Bruyne 1993, Buijse et al. 2019). Hogere water- en oeverplanten verdragen stroomsnelheden tot 1 m/s, maar pas beneden ca. 0,3 m/s is er voldoende bodem stabiliteit voor soortenrijke vegetaties met een hogere bedekking. Dat is aanzienlijk minder dan de stroomsnelheden die een passerend schip kan genereren (Söhngen et al. 2008). Ook golven kunnen de biomassa ontwikkeling van waterplanten remmen, evenals de troebeling die schepen veroorzaken via opwerveling van sediment (Doyle 2000, 2001).

Ten behoeve van de scheepvaart zijn rivieren in hoge mate gereguleerd, waardoor de habitatdiversiteit sterk is afgenomen. Om schade te voorkomen zijn veel oevers beschermd met stortsteen of andere typen van beschoeiing waardoor de connectiviteit met de uiterwaarden verder wordt belemmerd. Met name binnen de

kribvakken worden door scheepvaart golf- en stromingspatronen veroorzaakt (Ten Brinke et al. 1999) die een negatieve uitwerking hebben op de levensgemeenschappen in de rivier (Collas et al. 2018a, b). Vooral de juveniele vis wordt in de ontwikkeling belemmerd (Kucera-Hirzinger et al. 2009, Lechner et al. 2013, Schludermann et al. 2014), maar ook de zwemprestaties van volwassen vis kunnen negatief worden beïnvloed (Wolter & Arlinghaus 2003).

De mate waarin schade optreedt is tevens gekoppeld aan de inrichting; naar mate de rivier meer ruimte (terug)krijgt neemt de invloed van scheepvaart af.

Maatregelen

Scheepvaart management

Snelheidsbeperking: Als beheermaatregel tegen schade door scheepvaart is snelheidsbeperking denkbaar. In het algemeen gelden er snelheidsbeperkingen voor scheepvaart (20 km/h), met positieve uitzonderingen (hogere maxima) voor grote en negatieve voor drukke wateren. In het Rotterdamse havengebied geldt momenteel een lagere maximumsnelheid in verband met de luchtkwaliteit (13 km/h). In sommige natuurgebieden gelden verdergaande snelheidsbeperkingen ter bescherming van de oevers.

Bij het bepalen van een maximum vaarsnelheid is het zinvol deze ook te relateren aan de grens- of rompsnelheid van het schip. Hoe dichter deze snelheid wordt benaderd, hoe meer golven worden gemaakt. Dit is nog belangrijker als sprake is van een fijner sedimenttype, dat gemakkelijk "vervloeit".

Ontwerp van schepen: Het is wel mogelijk de golfenergie te reduceren door aanpassingen in het ontwerp van het schip (bulbsteven, spitse achtersteven). Omdat schepen lang meegaan is dit een lange termijn maatregel. Vanzelfsprekend hebben ook de dimensies van de gebruikte schepen, zoals lengte, breedte en diepteligging effect op de golferosie, maar ook de behuizing van de schroef. Bepaalde veranderingen zoals een slankere vorm van het schip reduceren behalve de golfschade ook het brandstofverbruik. Bij een catamaran-achtig ontwerp kan een deel van de retourstroom door het schip heen worden geïntegreerd met de schroefstroom. Een optie is ook de vervanging van duwbakken door bakken die met onderlinge ruimte ertussen worden getrokken, ook dit reduceert de sterkte van de retourstroom. (Söhngen et al. 2008).

Locatie vaargeul: Soms kan winst worden behaald door de positionering van de vaargeul met als doel de afstand van het schip tot de oever te vergroten. Dit is iets dat vooral in meren overwogen kan worden waar ruimte beschikbaar is.

Omdat het dominante schade mechanisme bij langzamer varen verschuift van de retourstroom naar de schroefstroom heeft een snelheidsbeperking ook enig effect op het type schade dat optreedt en de locatie daarvan (oevers versus bodem), zodat de optimale regelgeving mede van de lokale omstandigheden afhangt. Zo kan langzamer varen in sommige situaties leiden tot een toename van de benodigde manoeuvreer ruimte, waardoor schade juist kan toenemen.

Oeverinrichtingsmaatregelen

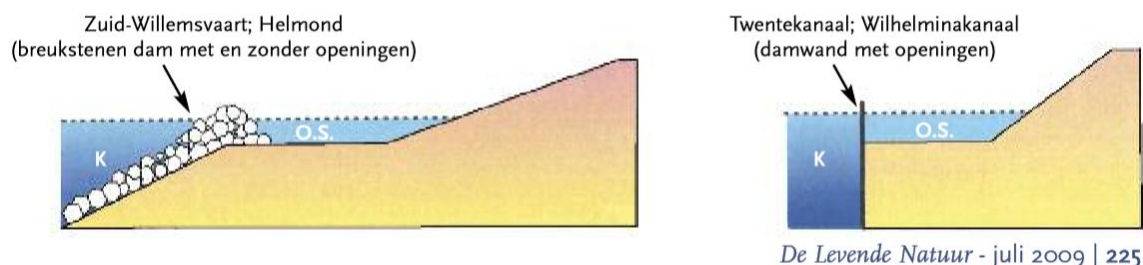
Er zijn verschillende maatregelen om de ecologische gevolgen van door scheepvaart veroorzaakte waterbeweging te verminderen. Vaak gaat het om het beperken van geconcentreerde schade op de oever. Dat kan door middel van spreiding van de

golfaanval via peilfluctuaties of het vroegtijdig breken van golven door middel van oeverinrichting. Mogelijkheden voor golfbreking zijn ondieptes en drempels of dammen, maar ook het beheersen van secundaire effecten, bijv. het voorkomen van opwerveling van slib met behulp van afdekking of putten.

Een aantal mogelijkheden voor effectgerichte maatregelen zijn de laatste decennia verder uitgewerkt en toegepast, met name het ontwerpen van vooroevers en andere vormen van natuurlijke beschoeiing, herstel van nevengeulen, verwijdering van harde beschoeiing en gebruik van langsdammen in plaats van kribben. Deze worden hieronder nader omschreven. Concrete voorbeelden om via variatie in waterstanden effecten van scheepvaart te verminderen zijn er niet. Wel kunnen maximaal toegestane vaarsnelheden aangepast worden om afhankelijk van de waterstand in de grote rivieren.

Kanalen

Vooroevers langs kanalen: Maatregelen vergelijkbaar met langsdammen of vooroevers langs meren zijn in enkele kanalen toegepast, en zijn hier vaak de enige mogelijkheid om de natuurkwaliteit te verbeteren. Aanleg van natuurvriendelijke oevers (NVO's) in kanalen moet vaak worden gecombineerd met bescherming tegen erosie door scheepvaart (en soms golfwerking door wind). Als daarbij ook een strook water wordt afgeschermd ontstaan "plasbermen", die mogelijkheden bieden voor het vergroten van de biodiversiteit (Verhofstad et al. 2021; Weber 2017). De beschoeiing neemt zelf idealiter weinig ruimte in, en bestaat bijv. uit breuksteen of damwanden, met openingen naar de scheepvaartgeul (figuur 6; Boedeltje et al. 2009; Meesters & Boks 1997). Het succes hangt mede af van de waterkwaliteit.



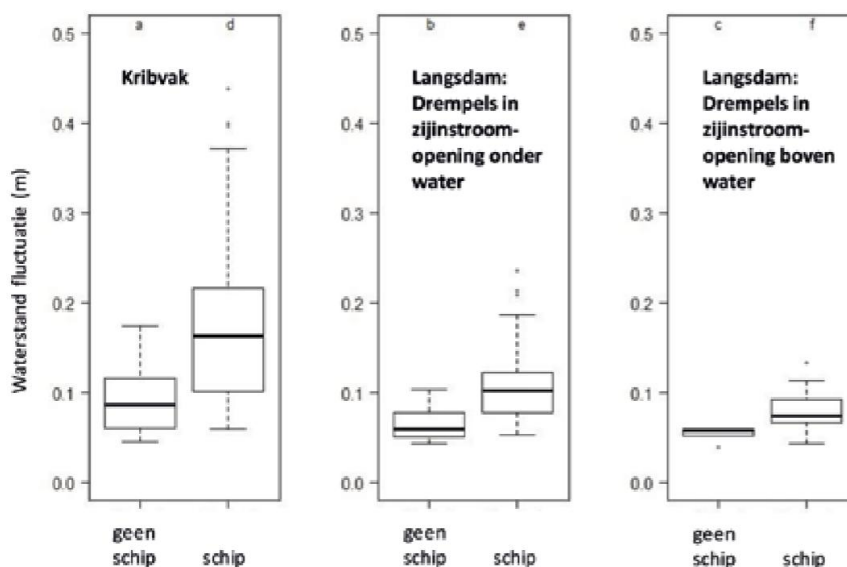
Figuur 6 Natuurvriendelijke oevers met oeververdediging langs kanalen. Uit Boedeltje et al. 2009.

Rivieren en kanalen

Langsdammen in plaats van kribben: Langsdammen langs rivieren zijn primair bedoeld om de afvoer te verbeteren bij hoog water en om de vaardiepte voor de scheepvaart bij lage waterstanden te vergroten. Ze vervangen de kribben, zodat tussen de langsdammen en de oevers meestromende zijkanalen ontstaan, gescheiden van de vaargeul. Door deze langsdammen wordt de oever ook beschermd tegen de waterbeweging die door scheepvaart wordt veroorzaakt (figuur 7), en in die zin is de maatregel een overgangsvorm tussen de vooroevers in meren of damwanden bij natuurvriendelijke oevers langs kanalen enerzijds en meestromende nevengeulen langs rivieren anderzijds. De oevergeulen achter de langsdammen bieden kansen voor ontwikkeling van oever- en ondergedoken vegetatie, macrofauna en (juvenile) vis (Paalvast 1995, Brabender et al. 2016, Collas et al. 2018a, b; zie ook [factsheet langsdammen van Rijkswaterstaat](#)). In de Waal zijn als onderdeel van het programma Ruimte voor de Rivier een groot aantal

kribben verwijderd en over een lengte van 10 km vervangen door een drietal langsdammen. Hierbij is ook het vergroten van habitatdiversiteit door het scheppen van beschutte oeversgeulen een van de doelstellingen (Huthoff et al. 2011, Verbrugge & van den Born 2017). Na vijf jaar bleek in elk geval ruimtelijke diversiteit in sedimentsamenstelling te zijn ontstaan (Collas et al. 2019). Uit onderzoek naar ecologische effecten bleek dat de hydrodynamiek in deze oeversgeulen lager en de dichtheden van vis significant hoger waren dan in de kribvakken (Collas et al. 2018a, b). Kortere langsdammen zijn recent ook in het buitenland aangelegd in de Elbe en de Loire.

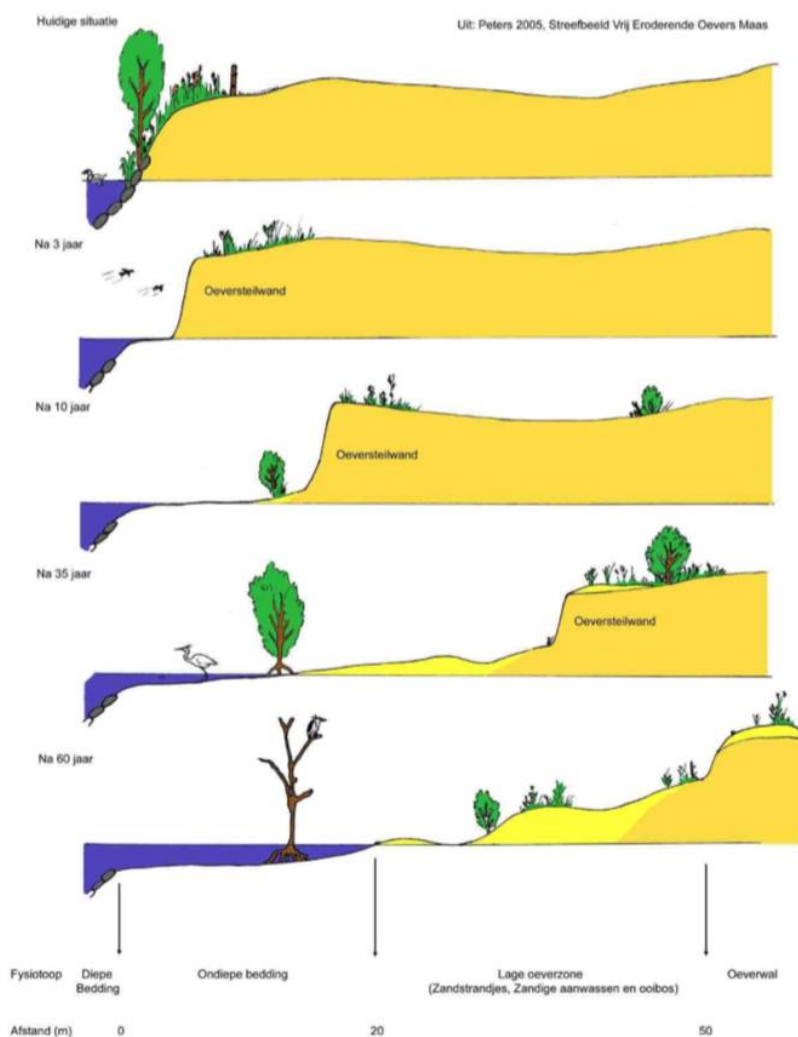
Waterstandfluctuatie tijdens het passeren van schepen in een kribvak en in de oeversgeul van de langsdam bij twee verschillende waterstanden. De donkere band duidt de mediaan, de banden van de box laten het 25ste en 75ste percentiel zien.



Figuur 7 Waterstandfluctuaties met en zonder passerende schepen in een kribvak langs de Waal en in de oeversgeul achter de langsdam bij twee verschillende waterstanden. Bron: Collas et al. 2018b.

Neversgeulen langs rivieren: Herstel en aantakking van meestromende neversgeulen vergroten enerzijds de waterafvoer, maar bieden anderzijds ook beschutting tegen de invloed van de scheepvaart, waardoor verdwenen habitats in de hoofdgeul zich elders in het winterbed kunnen ontwikkelen waar het in de hoofdgeul zelf niet mogelijk is. De voordelen van neversgeulen voor de natuurwaarden hangen af van de karakteristieken van de rivier en de locatie (bovenstrooms / benedenstrooms) en is bijvoorbeeld nauwelijks zinvol langs gestuwde rivierpanden omdat er dan onvoldoende stroming is. Bij te grote waterstandsfluctuaties (bovenstrooms) blijft de aquatische vegetatie ontwikkeling achterwege (Geerling & van Kouwen 2010). Benedenstrooms is het belang van neversgeulen voor de vegetatie juist groot (Van der Molen & Pot 2007). Dat geldt ook voor macrofauna, waarbij na aantakking de gemeenschap van generalisten naar meer stromingsminnende soorten verschuift. Ook voor juveniele vis zijn neversgeulen van grote betekenis (Grift et al. 2003; Geerling & van Kouwen 2010; Stoffers et al. 2020). Verschillende typen neversgeulen langs Rijn en Maas zijn recent geëvalueerd (Royal Haskoning DHV 2019).

Verwijdering oeverbescherming: Bij deze maatregel ontstaan “vrije eroderende oevers” waar de golfwerking aanvankelijk sterk is, maar geleidelijk minder wordt naar mate de rivier breder wordt (figuur 8; Peters 2005; Buijse et al. 2019). Het doel is op lange termijn geleidelijke land-waterovergangen tussen de rivier en de uiterwaarden te creëren. Bij deze maatregel worden oevers juist blootgesteld aan de waterbeweging door schepen. Hiervoor moet natuurlijk voldoende ruimte zijn (Arntz & Valkman 2012). In de Maas is dit op een groot aantal locaties met een totale lengte van meer dan 100 km uitgevoerd (www.rijkswaterstaat.nl/maasoevers; Figuur 2). Om voldoende speelruimte te hebben voor erosie worden oeverstroken aangekocht. Niet alleen de aquatische, maar ook de terrestrische natuur profiteert hiervan.



Figuur 8 Ontwikkeling van een vrij eroderende oever in de loop van de tijd. Bron: Peters 2005.

Compensatie

Als maatregelen langs bestaande oevers niet mogelijk zijn, is compensatie soms een optie. Dat kan door habitat aan te leggen dat meer beschermd ligt voor passerende schepen. Waar geen ruimte is voor vooroevers kunnen inhammen rustpunten zijn voor vissen en refugia voor water- en oeverplanten en de daarbij behorende

macrofauna (STOWA 2009). Een voorbeeld is een project in het Drongelens Kanaal, waar plaatselijk de oever wordt afgegraven zodat beschut gelegen ondiep oeverhabitat ontstaat, door palenrijen afgescheiden van de vaargeul waardoor vissen in en uit kunnen zwemmen (www.samenwerkenaanriviernatuur.nl)

Bronnen

- Arntz J. & R. Valkman 2012. Richtlijnenboek Watermanagement. Tauw bv, Deventer.
- Bak A., F. van Vliet & B.G.W. Aarts 2006. Ecologische effecten van de beroepsscheepvaart : verkenning op hoofdlijnen naar de effecten op doelstellingen van de Europese kaderrichtlijn Water, Vogelrichtlijn en Habitatrichtlijn : eindrapport. Bureau Waardenburg Rapport 06-221.
- Boedeltje G., B. Besteman, P. Duijn & M. de la Haye 2009. Waterplanten in natuurvriendelijke oevers langs scheepvaartkanalen. *De Levende Natuur* 110/5: 225-230.
- Brabender M., M. Weitere, C. Anlanger & M. Brauns 2016. Secondary production and richness of native and non-native macroinvertebrates are driven by human-altered shoreline morphology in a large river. *Hydrobiologia* 776: 51-65.
- Brils J., E. de Boer, P. de Boer et al. 2017. Sediment uit balans. Deltares, Delft.
- Buijse T., G. Geerling, C. Chrzanowski, M. Dorenbosch & B. Peters 2019. Natuurvriendelijke oevers langs de Maas: toestand en trend na 10 jaar ontwikkeling. Deltares rapport 11201679-000, Utrecht.
- Collas F., T. Buijse & R. Leuven 2018a. Langsdammen in de Waal. *Visionair* 48: 9-11.
- Collas F.P.L., L. van den Heuvel, N. van Kessel, M.M. Schoor, H. Eerden, A.D. Buijse & R.S.E.W. Leuven 2018b. Longitudinal training dams mitigate effects of shipping on environmental conditions and fish density in the littoral zones of the river Rhine. *Science of the Total Environment* 619-620: 1183-1193.
- Collas F.P.L., N.Y. Flores, M.M. Schoor & R.S.E.W. Leuven 2019. Substraatkartering van oevergeulen bij langsdammen in de Waal. Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Denny M. 1988. *Biology and the mechanics of the wave-swept environment*. Princeton University Press.
- DIPRO 1989. Ontwerpprogramma voor oeververdedigingen in vaarwegen. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, CUR rapport 89-8, Gouda.
- Doyle R.D. 2000. Effects of sediment resuspension and de position on plant growth and reproduction. US Army Corps of Engineers, ENV report 28, Vicksburg.
- Doyle R.D. 2001. Effects of waves on the early growth of *Vallisneria americana*. *Freshwater Biology*; doi/abs/10.1046/j.1365-2427.2001.00668.x
- Evers C.H.M., R.A.E. Knobens & F.C.J. van Herpen (red) 2012. Omschrijving MEP en maatlatten voor sloten en kanalen voor de Kaderrichtlijn Water 2015-2021. STOWA rapport 2012-34, Amersfoort.
- Gabel F., S. Lorenz & S. Stoll 2017. Effects of ship-induced waves on aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 601, 926-939.
- Geerling G. & L. van Kouwen 2010. Evaluatie Nevengeulen. Deltares rapport 1201474-000, Utrecht.
- Grift R.E., A.D. Buijse, W.L.T. van Densen, M.A.M. Machiels, J. Kranenbarg, J.G.P. Klein Breteler & J.J.G.M. Backx 2003. Suitable habitats for 0-group fish in rehabilitated floodplains along the lower River Rhine. *River Research and Applications* 19: 353-374.
- Hadel A.M.M. 2001. Kribben natuurlijk(er). Ecologische effecten van kribben op vegetatie, vissen en macrofauna. RWS - DWW, Delft.

- Huthoff F., A. Paarlberg, H. Barneveld & M. van der Wal 2011. Rivierkundig onderzoek WaalSamen: pilotstudie langsdammen. Rapport PR2096.10. HKV lijn in water, Lelystad.
- Kruyt N.M. 2001, Waterbouwkundige kennisleemtes bij hydraulische belasting voor het ontwerpen van kribben, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Kucera-Hirzinger V., E. Schludermann, H. Zornig, A. Weissenbacher, M. Schabuss & F. Schiemer 2009. Potential effects of navigation-induced wave wash on the early life history stages of riverine fish. *Aquatic Sciences* 71: 94-102.
- Laboyrie J.H. & H.J. Verhey 1988. Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Technische aanbeveling voor oeververdedigingen van losgestorte en gezette steen. WL Delft.
- Lechner A., H. Keckeis, E. Schludermann, P. Humphries, N. McCasker & M. Tritthart 2013. Hydraulic forces impact larval fish drift in the free flowing section of a large European river. *Ecology*, DOI: 10.1002/eco.1386.
- Meesters H.J.N. & G.M. Boks 1997. Natuurvriendelijke oevers langs kanalen: kansen voor flora en fauna. *H2O* (30) 1997/25: 771-774.
- Meijer D.G., M. van de Wal & H.J. Verheij 1993. Analyse enkele specifieke aspecten ten behoeve van uitbreiding DIPRO. WL Delft, rapport Q1125.
- Murphy K.J. & J.W. Eaton 1983. The effects of pleasure boat traffic on macrophyte growth in canals. *J. Appl. Ecol.* 20: 713-729.
- Paalvast P. 1995. Ecologische waarde van langsdammen. Ecoconsult, Vlaardingen.
- Peters B. 2005. Vrij Eroderende Oevers langs de Maas - Landschapsecologisch Streefbeeld. Studie in opdracht van Rijkswaterstaat Limburg Bureau Drift. 38 p.
- Pot R. 2005. Default-MEP/GEP's voor sterk veranderde en kunstmatige wateren.
- Pot R. 2018. Aanpassing maatlaten overige waterflora in sloten en kanalen. Royal Haskoning DHV Nederland BV, Eindhoven.
- Royal Haskoning DHV 2019. Grip op nevengeulen. Pilot voor programmeringsmethodiek beheer en onderhoud van nevengeulen. Royal Haskoning DHV, ref. BF9237-101_Grip op nevengeulen_04032019_d6.0.
- Schludermann E., M. Liedermann, H. Hoyer, M. Tritthart, H. Habersack & H. Keckeis 2014. Effects of vessel-induced waves on the YOY-fish assemblage at two different habitat types in the main stem of a large river (Danube, Austria). *Hydrobiologia* 729: 3-15.
- Sieben A. 2009. Voorstel ontwerp regels en functie-eisen natuurvriendelijke oevers KRW. Memo RWS WVL, Lelystad.
- Söhngen B., J.H.E. Koop, S.E. Knight, J. Rythönen, P. Beckwith, N. Ferrari, J. Iribarren, T. Kevin, C. Wolter & S.T. Maynard 2008. Considerations to Reduce Environmental Impacts of Vessels. Report of PIANC InCom Working Group 27. PIANC, Brussels, p. 90.
- Stoffers T., F.P.L. Collas, A.D. Buijse, G.W. Geerling, L.H. Jans, N. van Kessel, J.A.J. Verreth & L.A.J. Nagelkerke 2020. 30 years of large river restoration: how long do restored floodplain channels remain suitable for targeted rheophilic fishes in the lower river Rhine? *Science of the Total Environment* 755: 142931
- STOWA 2009. Handreiking Natuurvriendelijke Oevers. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) rapportnummer 2018-24, Amersfoort.
- Ten Brinke W.B.M. 2003. De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal. Het langjarig gedrag van kribvakstranden, de invloed van scheepsgeïnduceerde waterbeweging en morfologische processen bij hoge en lage afvoeren. RWS RIZA, rapport 2003.002, Arnhem.
- Ten Brinke W.B.M., N.M. Kruyt, A. Kroon & J.H. van den Berg 1999. Erosion of sediments between groynes in the River Waal as a result of navigation traffic. *Spec. Publ. int. Ass. Sediment.* 28: 147-160.

- Ter Heerdt G. 2012. Effect gemotoriseerde recreatievaart op waterplanten: mechanismen, kwantificering en de relatie met de Europese Kaderrichtlijn Water. Waternet notitie, Amsterdam.
- Van der Molen D.T. & R. Pot (red.) 2007. Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water. STOWA rapport 2007-32.
- Verbrugge L.N.H. & R.J.G. van den Born 2017. Vissen langs de dam 2016: Uitkomsten participatieve monitoring langsdammen Waal. Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Verheij H.J. 1997. Effectiviteit van kribben. WL.
- Verheij H., F. van der Knaap & H. Sessink 2007. Verder ontwikkelen van oeverafslagmodel BEM. WL Delft, rapport 4264.02.
- Verheij H. & B. van Prooijen 2007. Verbetering DIPRO. WL Delft, rapport Q4264.01.
- Verhofstad M., J.E. Herder, E.T.H.M. Peeters & J.P. van Zuidam 2021. Kunstmatig natuurlijk. Een evaluatie van de meerwaarde van natuurvriendelijke oevers. Gegevens: 2017 t/m 2020. FLORON Rapportnr. FL.2017.034.e2, Nijmegen.
- Vermaat J. E. & R.J. de Bruyne 1993. Factors limiting the distribution of submerged waterplants in the lowland River Vecht (The Netherlands). *Freshwater Biology* 30: 147-157.
- Weber, A. 2017. Comparative evaluation of selected hydro-morphological rehabilitation measures for aquatic organisms in urban waterways. Dissertation Freie Universität Berlin.
- Wolter C. & R. Arlinghaus 2003. Navigation impacts on freshwater fish assemblages: /tge ecikigucak rekebabce of swimming performance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 13(1): 63-89.
- Zajicek, P. & C. Wolter. 2019. The effects of recreational and commercial navigation on fish assemblages in large rivers. *SScience of the Total Environment* 646: 1304–1314.

Colofon

Utrecht, december 2021

Auteurs: Ruurd Noordhuis (Deltares)

Leesgroep: Tom Buijse (Deltares), Nikki Dijkstra (HH De Stichtse Rijnlanden), Marjoke Muller, Luc Jans, Martijn Antheunisse (allen RWS), Hermen Klomp (WS Hunze en Aa's), Gerard ter Heerdt (Waternet)

Te citeren als: Noordhuis, R. (2021) Erosie en ecologische effecten door scheepvaartgolven. Notitie Kennisimpuls Waterkwaliteit