

Verkenning invloed scheepvaart op morfologie en impact daarvan op modeltoepassingen

KPP Rivierkunde



**Verkenning invloed scheepvaart op morfologie en impact daarvan op
modeltoepassingen**
KPP Rivierkunde

Auteur(s)
Kees Sloff

Verkenning invloed scheepvaart op morfologie en impact daarvan op modeltoepassingen

KPP Rivierkunde

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer J. Sieben, Michiel Reneerkens
Referenties	KPP Rivierkunde 2021
Trefwoorden	Rijntakken, scheepvaart, erosie, sedimenttransport

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	21-06-2022
Projectnummer	11206792-013
Document ID	11206792-013-ZWS-0001
Pagina's	68
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Kees Sloff	

Inhoud

1	Inleiding	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Doelstelling	6
1.3	Aanpak	6
2	Scheepsgeïnduceerde stroming en erosie	7
2.1	Inleiding	7
2.2	Definities	10
2.3	Benaderende methoden voor berekening van stroming onder het schip	14
2.3.1	Eendimensionale analytische methode voor retourstroming	14
2.3.2	Empirische berekening van retourstroming	15
2.3.3	Ontwikkeling grenslagen en zijwaartse retourstroming	16
2.3.4	Analytische aanpak schroefstralen	19
2.4	Benaderende methoden voor berekening van sedimenttransport en erosie/sedimentatie onder het schip	22
2.4.1	Erosie en sedimentatie processen (kwalitatief)	22
2.4.2	Rekenmethoden voor erosie (kwantitatief)	30
3	Inschatting van scheepvaartinvloed op sedimenttransport in Boven-Rijn, Waal en Maas	33
3.1	Aanpak	33
3.2	Locaties	33
3.3	Scheepvaart	36
3.3.1	Scheepvaartklassen en aantallen	36
3.3.2	Diepgang	39
3.3.3	Vaarsnelheid	40
3.4	Sedimenttransport berekening	41
4	Morfologische modellen en scheepvaartinvloeden	48
4.1	Scheepvaart in systeempoging en effectbepaling	48
4.2	Varianten van numerieke modellen	49
4.3	Aanpak voor verbetering van modelinstrumentarium	51
5	Conclusies	53
6	Referenties	56
A	Stroming onder het schip	59
A.1	Retourstroomsnelheid met eendimensionale analytische methoden	59
A.2	Retourstroomsnelheid met empirische relaties	61

A.3	Schroefstraal	62
B	Sedimenttransport schattingen	64
B.1	Locatie Lobith	64
B.2	Locatie Nijmegen	65
B.3	Locatie Tiel	66
B.4	Locatie Belfeld	67

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De 2D modellen die op dit moment gebruikt worden voor de voorspelling van morfologisch gedrag houden geen rekening met de invloed van scheepvaart. Voor berekening van sedimenttransport(-gradiënten) en de daaruit volgende morfologie wordt alleen uitgegaan van de rivierstroming en eventueel onderhoudsbaggerwerk. Echter, zowel op de Rijntakken als op de Maas is sprake van intensief scheepvaartverkeer. De retourstroming, schroefstraal en golven rond ieder passerend schip verstoren de sedimentprocessen nabij de bodem en de verdeling van het sediment in het dwarsprofiel (inclusief aanbod van sediment uit oevers en kribvakken). Onbekend is welk deel van de bodemdynamiek kan worden toegeschreven aan de scheepvaart, en hoe zich dat verhoudt tot de dynamiek door stroming en onderhoud. Door hier meer inzicht in te krijgen (op basis van bestaande kennis) willen we nagaan wat dit betekent voor de effectbepaling met de huidige modellen. Gaat er iets mis in de voorspellingen, of wordt dit door kalibratie gecompenseerd? En welke kennis zou er nodig zijn om het effect van scheepvaart in de modellen voor effectbepaling mee te nemen?

1.2 Doelstelling

Evaluatie voorspelkracht beschikbare modellen voor ruimtelijke bodemdynamiek op intensief bevaren riviertrajecten.

1.3 Aanpak

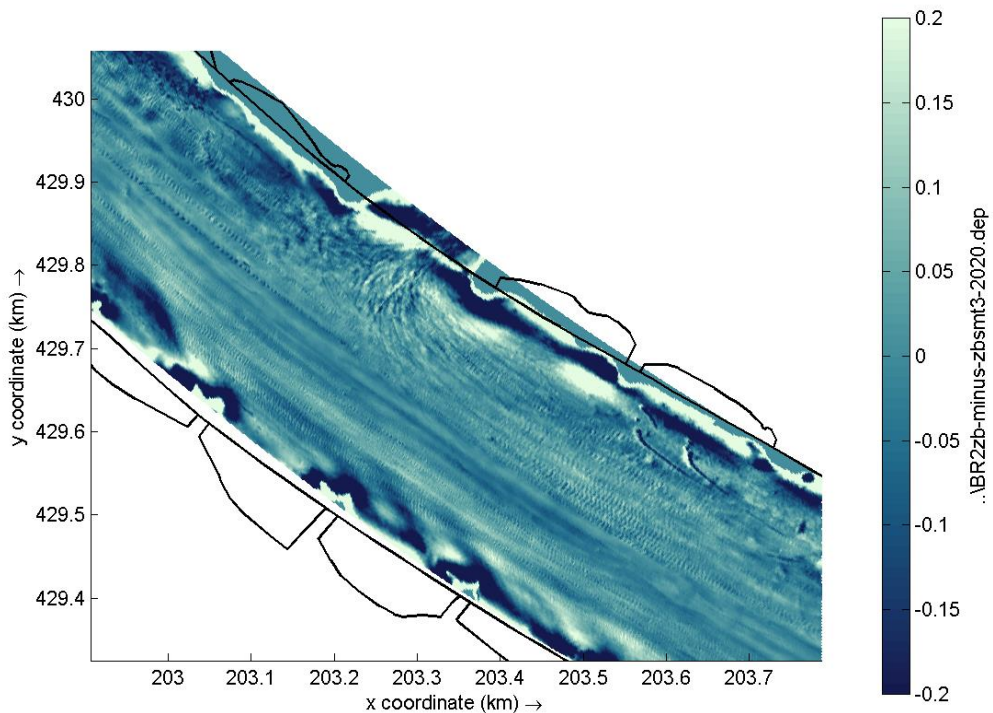
De activiteiten en uitkomsten van deze bureaustudie zijn als volgt:

- 1 Overzicht van huidige inzichten (inclusief kennis en studies bij BAW, afstudeeronderzoek UT, eerdere KPP-projecten, etc.) in de generieke invloed van scheepvaart (retourstroming en drukverloop onder en langs het schip, schroefstraal, bergop en -af) op de rivierbodem (bodenvormen en bodenvorm-gemiddelden). De kennis zal afkomstig zijn uit beschikbare rapporten en literatuur. Ook is hiervoor het afstudeerwerk van Paul Bongers (student UT) beschouwd.
- 2 Maken van een expert inschatting van deze impact op de rivierbodem op een voorbeeldtraject van de Maas en van de Rijn. De keuze van de vakken/trajecten is dusdanig dat zowel in de Rijntakken als in de Maas een conclusie kan worden getrokken. Het karakter van de uitkomsten is bij voorkeur kwantitatief, maar mag een kwalitatief karakter hebben vanwege de inherente onzekerheden. In activiteit (1) zijn de diverse mogelijke effecten op de bodem gepresenteerd, maar in hoeverre en met welke mate deze optreden in de Rijn en Maas is op basis van de beschikbare kennis en concepten niet goed te schatten. De expert inschatting is daarom beperkt tot inschatting van bijdrage van scheepvaart aan het gemiddelde sedimenttransport. Deze is een indirecte maat voor invloed op tijdsafhankelijke ontwikkeling van bodemligging en bodemsamenstelling. Beschrijving van vermoedelijke consequenties voor i) effectbepaling en ii) systeempogroses met huidig modelinstrumentarium. In deze activiteit wordt bepaald wat er mis gaat in de 2D modellen (zoals DVR) voor morfologische voorspelling.
- 3 Ten aanzien van de relevante consequenties; maken van een advies voor aangepaste kalibratie en/of gebruik van het huidig instrumentarium en zo nodig aanvullend hieraan beschrijving van benodigde nieuwe kennis en het traject voor de ontwikkeling daarvan.

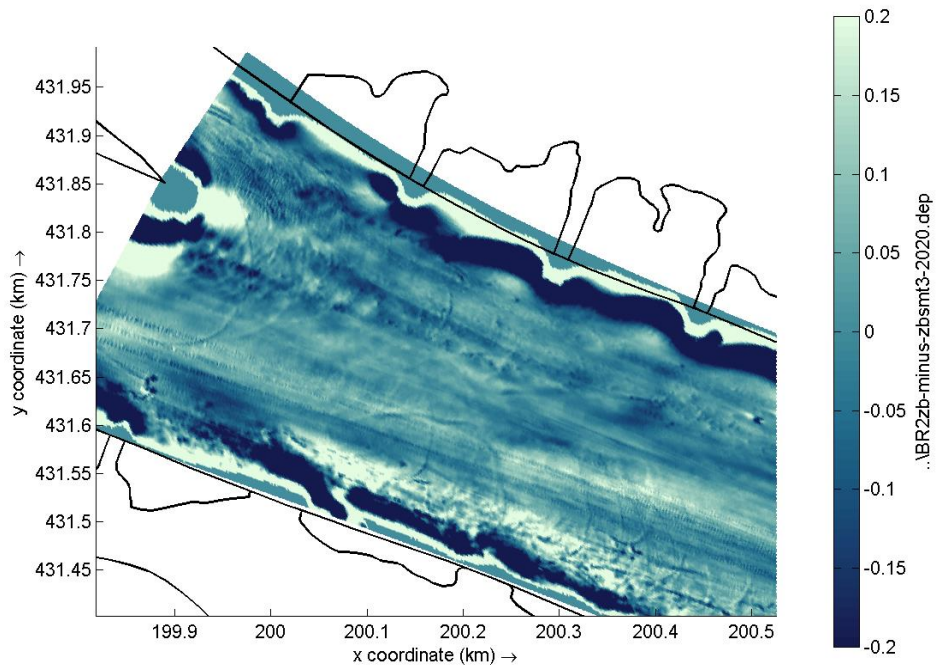
2 Scheepsgeïnduceerde stroming en erosie

2.1 Inleiding

De invloed van scheepvaart op de bedding laat zich goed visualiseren door, voor een specifieke hoge-resolutie multi-beampeiling, een ruimtelijk gemiddelde bodemligging van de oorspronkelijke bodemligging af te trekken. Alleen de variaties door beddingvormen (duinen, ribbels en vaarsporen) restereren dan in het figuur. Voor 2 trajecten is het resulterende verschil gepresenteerd in Figuur 2-1 en Figuur 2-2 voor de jaarlijkse peiling van 2020. De ruimtelijke middeling is uitgevoerd door een herhaalde 'smoothing' in het software programma Quickin toe te passen op de raster-data. Vervolgens is deze 'smoothed' bodemligging van de oorspronkelijke bodem afgetrokken (het resterende verschil geeft een indruk van kleinschalige variaties in bodemligging). Op de figuren zijn langgerekte sporen zichtbaar met onderlinge afstanden van 5 tot 10 meter. Bij zowel de ingang naar de overnachtingshaven in Figuur 2-1 en rondom de Pannerdensche Kop in Figuur 2-2 is te zien hoe plaatselijk de sporen krommen door afslaande schepen. Hiermee wordt bijvoorbeeld de ontwikkeling van secundaire stroomcellen en baggerwerk als oorzaak voor de langgerekte sporen uitgesloten. Naast de sporen zijn op dit traject slechts een relatief gering aantal duinen en ribbels zichtbaar in de figuren.



Figuur 2-1 Langgerekte parallelle vaarsporen op de Boven-Rijn, met afbuigende sporen naar de overnachtingshaven Tuindorp/Tolkamer bij Lobith



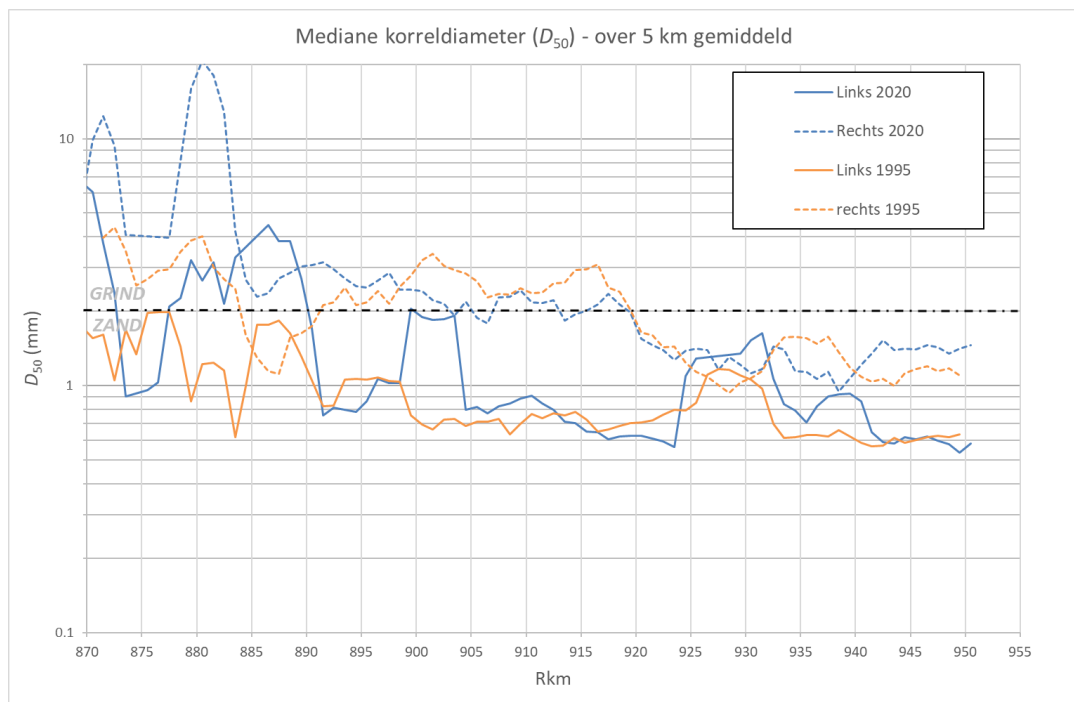
Figuur 2-2 Vaarsporen ter hoogte van splitsingspunt de Pannerdensche Kop (links in figuur)

De vaarsporen in de peilingen laten zich goed vergelijken met de sporen waargenomen in laboratoriumexperiment in 2014 bij Deltares (Robijns, 2014). Figuur 2-3 toont een voorbeeld van het spoor van een als duweenheid geclassificeerd schip (met geringe kielspeling) voortgetrokken door de goot over een zandbedding met ribbels. Er is sprake van een diep spoor onder de kiel, met aan beide zijden een verhoogde bedding waar het uitgespoelde sediment is terecht gekomen.

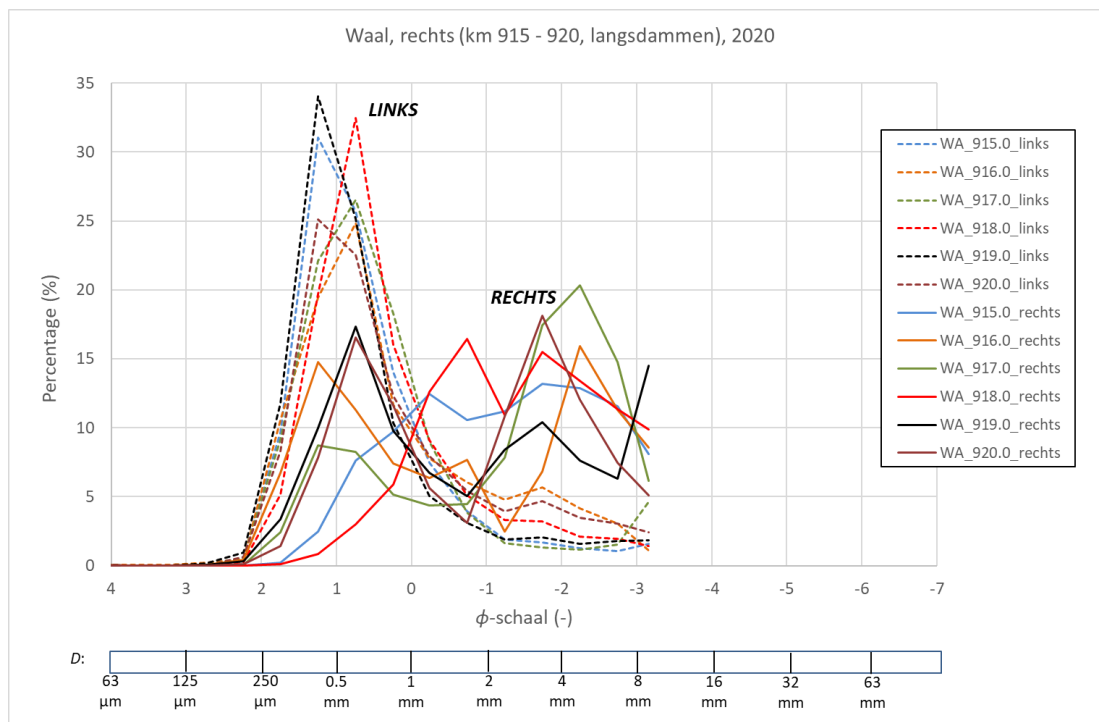


Figuur 2-3 Vaarspoor in laboratorium goot gecreëerd door een getrokken schip over een zandbodem met ribbels (Robijns, 2014)

In de intensief bevaren vaargeul van de Waal is sprake van een opvallend verschil in samenstelling van de toplaag van de bedding. Aan de linkerzijde, waar vooral de geladen opvaart plaatsvindt, is de bodem aanmerkelijk fijner dan aan de rechterzijde, waar juist (ongeladen) afvaart plaatsvindt, zie Figuur 2-4. Bijvoorbeeld op de Midden-Waal bestaat de toplaag aan de linkerzijde voornamelijk uit zand, en bestaat de rechterzijde overwegend uit een bimodaal mengsel met een relatief fors aandeel van grind, zie Figuur 2-5. De verschillen kunnen eigenlijk alleen maar worden toegeschreven aan effecten van de scheepvaart, hoewel het proces wat zorgt voor deze sortering niet goed bekend is. Heel aannemelijk is dat de directe invloed van retourstroming en volgstroming een proces kan opwekken dat dit veroorzaakt. Er is echter ook een hypothese (ten Brinke, 1997) dat de linkerzijde fijner is door een aanbod van zand uit kribvakken. Het (fijne) zand wordt uit de vakken geërodeerd door scheepsgeïnduceerde golven. Deze zijn sterker aan de zijde van de opvaart (linkerzijde) dan aan de zijde van de afvaart. Daarbij moet worden opgemerkt dat in het traject van Figuur 2-5 tijdens de bemonstering al circa 5 jaar sprake is van langsdammen aan de linkeroever, en het zand niet afkomstig kan zijn van de kribvakken in de directe omgeving. Het traject zonder kribben aan de linkeroever heeft een gestrekte oever van km 910 tot km 920 (afstand 10 km).



Figuur 2-4 Mediane diameter in de Waal, bemonstering 1995 en 2020, met onderscheid linker en rechterzijde van de rivier



Figuur 2-5 Korrelgrootteverdelingen voor sedimentmonsters (2020 bemonstering) op het traject van de langsdammen in de Midden-Waal (km 915-920), met onderscheid tussen linker- en rechterzijde van de vaarweg

Hugtenburg et al. (2007) schrijven dat vermoedelijk de scheepvaart een invloed van betekenis heeft op de bodemligging bij kribben. Langs de linkeroever van de Midden-Waal (km 880-930), waar overwegend diepliggende opvaart passeert, ligt de bodem buiten de ontgrondingskuilen gemiddeld circa 0,1 à 0,2 meter lager dan langs de rechteroever, en zijn de ontgrondingskuilen kleiner, ondieper en uitgesmeerd over een groter oppervlak. Langs de rechteroever, en in de bredere Beneden-Waal (km 930-950) waar schepen verder van de kribben kunnen blijven, hebben de ontgrondingskuilen een groter volume en een grotere diepte. Ten slotte lijkt de omvang van kuilen in buitenbochten kleiner dan in binnenbochten.

2.2 Definities

Bij scheepsgeïnduceerde waterbeweging wordt onderscheid gemaakt tussen primaire en secundaire effecten:

- Primair: retourstroom en waterspiegeldaling. Dit zijn de meest relevante processen voor sedimentbeweging *onder* een schip;
- Secundair: golven rondom schip en turbulentie en schroefstraal achter het schip.



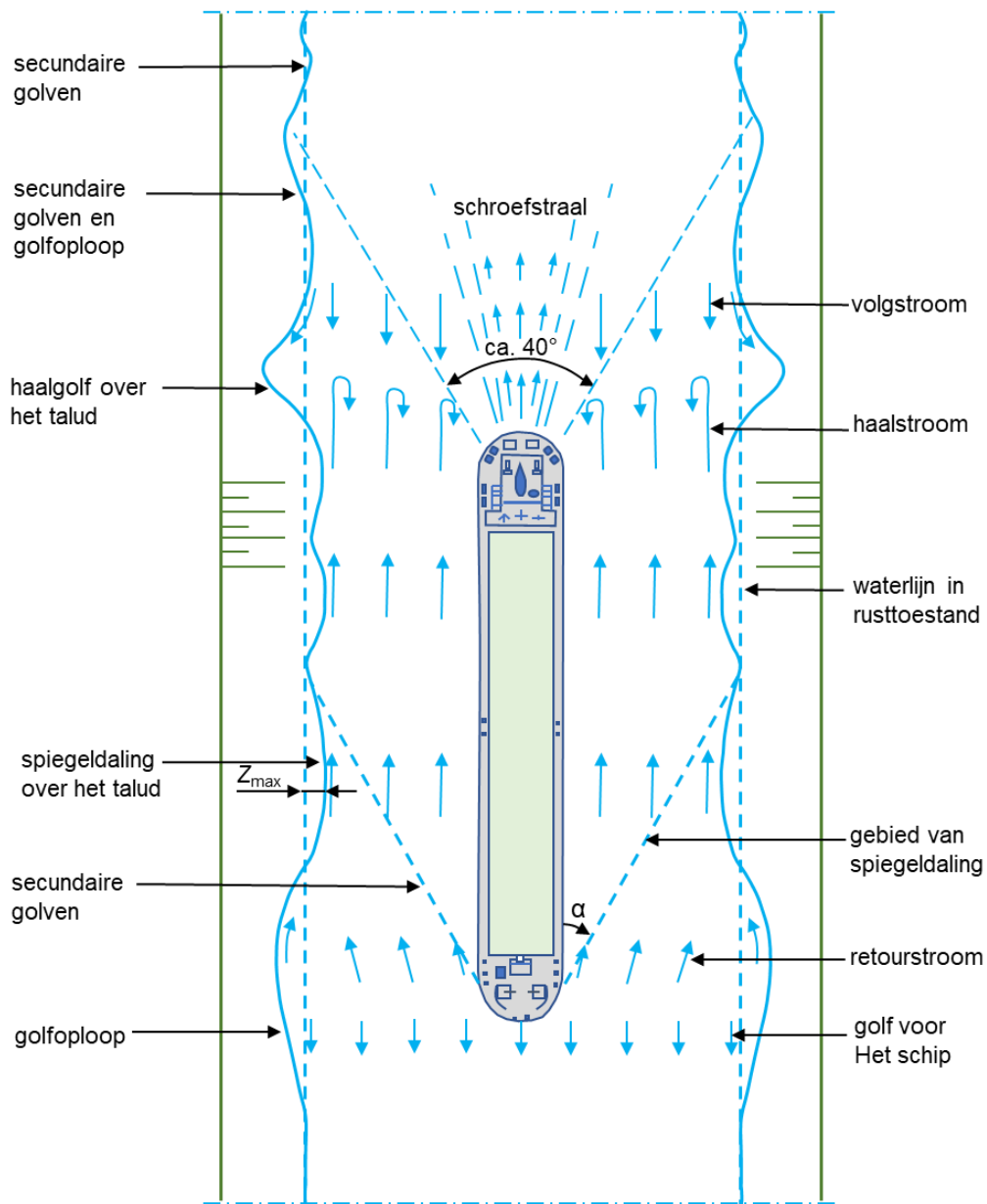
Figuur 2-6 Binnenvaartschip ZEELAND varend op Julianakanaal (foto Kees Sloff, 2020)

Bij de boeg van een varend schip wordt water verdrongen; dit water stroomt langs beide zijkanten en onder de kiel van het schip af en vult vervolgens de 'lege' ruimte achter het schip weer aan. In een rivier of kanaal met beperkte waterdiepte wordt een retourstroom gecreëerd onder en naast het schip die in tegengestelde richting van de vaarrichting werkt.

Kenmerkend is dat de retourstroomsnelheid het grootst is in een gebied in de onmiddellijke nabijheid van het schip. Het omstromende water moet vanuit stilstand worden versneld. Hiervoor is een drukverhoging nodig; deze drukverhoging wordt door het varende schip gegenereerd en komt bij de boeg van het schip tot uiting in een lokale waterspiegelverheffing (boeg golf, ook te beschouwen als toegevoegde potentiële energie). Naast het schip ontstaat in samenhang met het omstromende water een waterspiegeldaling (potentiële energie wordt omgezet in kinetische energie), terwijl achter het schip de waterspiegel weer tot boven het stil-water niveau kan rijzen (hekgolf, te zien-als gedeeltelijke terugwinning van de potentiële energie). Al deze verschijnselen worden aangeduid met primaire golf. De lengte van de primaire golf is iets groter dan de lengte van het schip. De amplitude van de primaire golf in de rivieren ligt in de orde van 0,2 – 0,5 m.

Verder is er sprake van inzinking (squat): uitgaande van het Bernoulli-principe volgt dat bij gelijkblijvende mechanische energie een aanwezige vaarsnelheid leidt tot een drukverschil wat ervoor zorgt dat het schip iets dieper komt te liggen. De grootste inzinking is aanwezig aan de achterzijde van het schip, wat tot trim leidt. Ook andere bewegingen van het schip, zoals driften of zwaaien (varen onder een hoek), kunnen bijvoorbeeld leiden tot asymmetrische stromingen onder en rond het schip.

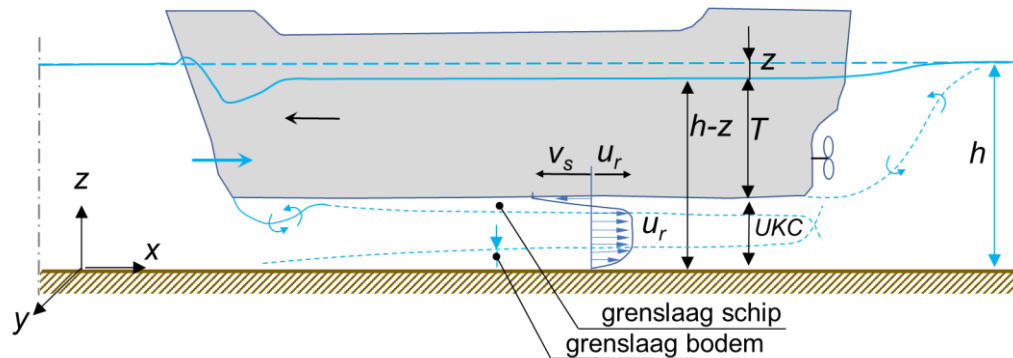
De hoeveelheid water die naar achteren moet worden verplaatst is afhankelijk van de vaarsnelheid en moet worden afgevoerd door het rivierdwarsprofiel minus het dwarsoppervlak van het schip onder water, en gecorrigeerd voor de waterspiegeldaling. De vaarsnelheid waarbij de maximale hoeveelheid water wordt afgevoerd onder en langs het schip wordt de grenssnelheid genoemd van een schip in een kanaal of rivier. Een schip kan nooit harder varen dan de grenssnelheid. In de praktijk zal een schipper nooit harder varen dan 80% van de grenssnelheid, omdat harder varen dan 80% van de grenssnelheid te weinig snelheidstoename oplevert ten opzichte van de extra hoeveelheid benodigde brandstof. De grenssnelheid neemt toe naarmate het rivierprofiel toeneemt.



Figuur 2-7 Waterbeweging rondom een schip (naar Schroevers et al., 2015)

De vorm van het stroomprofiel onder de kiel van het schip is niet constant over de lengte van het schip. In principe kan de stroming beschouwd worden als een “Couette stroming”, d.w.z. een stroming tussen twee oppervlakten, waarbij 1 oppervlak beweegt ten opzichte van de andere. In het geval van het varende schip kan daaraan worden toegevoegd de term “Poiseuille stroming”, d.w.z. een stroming tussen de oppervlakten die wordt aangedreven door een externe drukgradiënt, vergelijkbaar met stroming door leidingen. Direct bij de boeg zal een nagenoeg recht profiel ontstaan dat scherp afloopt aan de bodem en aan de scheepshuid. Onder aan de boeg zal de stroming worden afgebogen en kan loslating en contractie optreden afhankelijk van de vorm van de boeg. Een deel van het water zal zijwaarts afstromen onder de boeg (wat bijdraagt aan de spoorvorming). Daarna zullen zich aan de bodem en onder de kiel twee grenslagen ontwikkelen (Figuur 2-8). Deze grenslagen worden dikker vanaf de boeg van het schip. In deze grenslaag heeft het stroomprofiel een logaritmische vorm. In situaties met geringe kielspeling zullen de grenslagen elkaar kunnen gaan beïnvloeden. De toenemende dikte van de grenslaag zorgt voor een verhoging van snelheid richting het achterschip, en trimmen van de romp in de lengteas.

Bij dalvaart kan de retourstroming onder de kiel groter zijn dan de ongestoorde rivierstroming en dus leiden tot een tijdelijke omkering van de stroomrichting langs de bedding. De opgewekte drukgradiënten en drukfluctuaties beïnvloeden het water in de poriën van de sedimentbedding en dragen daardoor bij aan destabilisatie van korrels.



Figuur 2-8 Schematische weergave van de ontwikkeling van een grenslaag aan de bodem van de rivier of het kanaal en vlak onder het schip

Belangrijk is de kielspeling UKC (*under keel clearance*), gedefinieerd als:

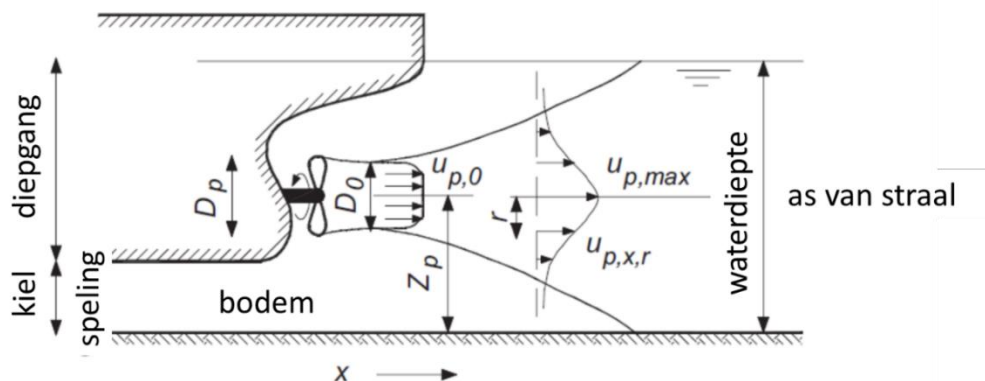
$$UKC = h - T - z$$

Waarin: h = onverstoorde waterdiepte (m), T = diepgang zonder snelheid (ten opzichte van de stroming) (m) UKC = kielspeling (m), z = inzinking (m)

Voor de bepaling van de belasting van de bodem van het kanaal is een berekening van de maximale retourstroomsnelheid $U_{r,max}$ onder de kiel van een schip noodzakelijk. Deze kan worden afgeleid door de theoretische doorsnee-gemiddelde retourstroming U_r (zie paragraaf 2.3) te vermenigvuldigen met een factor met orde grootte 1,5.

Er ontstaat voorts een systeem van oppervlaktegolven, aangeduid met secundaire golven, dat bestaat uit golven die in langsrichting van het schip lopen (transversale golven) en golven die van het schip wegbuigen (divergerende golven). Beide typen golven kruisen elkaar en er ontstaat een patroon met interferentiepieken (Figuur 2-6).

Aansluitend op de stromingen rondom het schip wordt de bodem ook belast door de schroefstraal waarmee het schip zich voortstuwt. In Figuur 2-9 is aangegeven welk stroombeeld wordt opgewekt bij de bodem. De kwantificering ervan is beschreven in paragraaf 2.3.4.



Figuur 2-9 Schematische weergave van de schroefstraal (naar Hoffmans en Verheij, 2011)

Het stromende water en het systeem van oppervlaktegolven vertegenwoordigen een zekere hoeveelheid kinetische energie; achter het schip komt het water tot rust en gaat de kinetische energie weer verloren. In de energiebalans is het energieverlies in evenwicht met de door het schip (via de propeller) aan het water toegevoerde energie.

Bij passage van het schip wordt plaatselijk een grote watermassa in beweging gebracht, die weer uitdempt na passage. Daarbij ondervindt de rivierbodem krachten door toedoen van het zich verplaatsende, aan het schip gebonden druk- en snelheidsveld, het systeem van golven naast en achter het schip en de schroefstraal.

2.3 Benaderende methoden voor berekening van stroming onder het schip

2.3.1 Eendimensionale analytische methode voor retourstroming

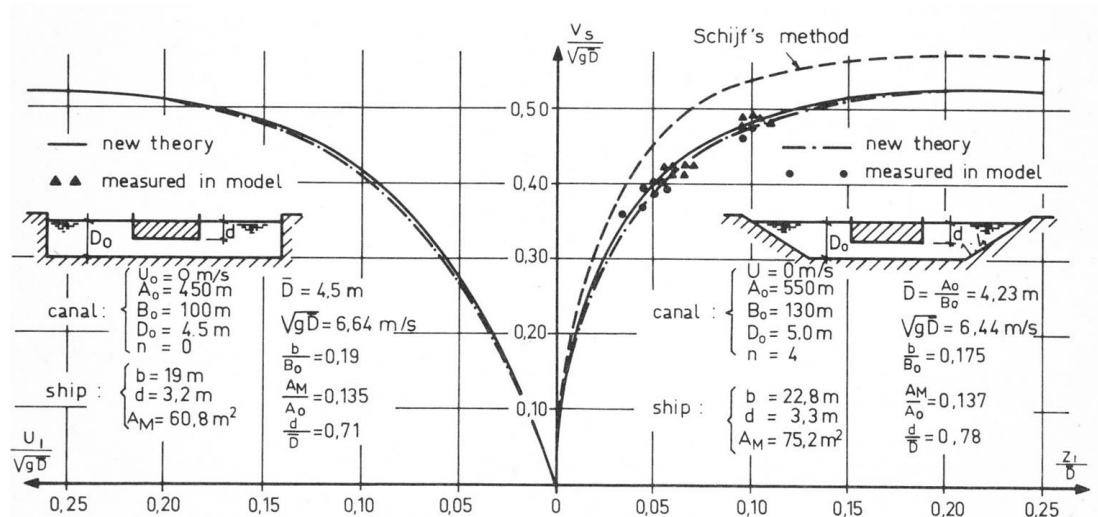
Voor het berekenen van de stroming onder het schip zijn analytische en empirische relaties beschikbaar in de literatuur. In de Nederlandse praktijk is veel gebruik gemaakt van een aanpak met ééndimensionale analytische modellen. De aanname van ééndimensionaliteit gaat alleen op als de breedte van de waterweg niet groter is dan orde 1,5 maal de lengte van het schip, of in praktijk als de verhouding tussen breedte van de waterweg en breedte van het schip ligt tussen 2 en 12. Verder moet het schip op de rivieras varen. De eendimensionale modellen lenen zich dus voor kanalen zoals Amsterdam-Rijnkanaal en Julianakanaal, maar voldoen minder goed voor brede rivieren zoals de Waal, waar de stroming rond het schip meer ruimte heeft om zijdelings uit te wijken. De experimenten van Robijns (2014) tonen dat ook het scheepstype van belang is: de maximale absolute snelheden voor conventionele schepen treden op aan de zijkant van het schip (bij de boeg, door uitwaaiering) terwijl deze voor duwbakeenheden optreden in de as van het schip. Desondanks presenteren we de modellen omdat ze de belangrijkste principes beschrijven en gebruikt kunnen worden als eerste benadering.

De methode voor het berekenen van de retourstroomsnelheid U_r , ontwikkeld door Schijf (1949), gaat uit van behoud van energie (met toepassing van Bernoulli principe). Schijf bepaalt met het energiebehoudsprincipe een maximale snelheid of grenssnelheid die kan worden beschouwd als de maximale snelheid die voor een schroefaangedreven schip kan worden bereikt. Overigens zal in praktijk gevaren worden met een snelheid van circa 80% van de grenssnelheid. De methode van Schijf, en de vertaling ervan naar maximale retourstroomsnelheid onder de boeg, is verder uitgewerkt in Appendix A.1.

Naast bovengenoemde aanpak op basis van energiebehoud zijn er ook methoden op basis van behoud van impuls, bijvoorbeeld Bouwmeester et al. (1977) (zie ook Verheij et al, 2008). Hierbij wordt uitgegaan van de krachten op het varende schip, waaronder drukkrachten (inclusief de opstuwing voor de boeg) en de wrijving van de scheepsromp en de vorm van de boeg. Deze methode is gebaseerd op een impulsbeschouwing voor een gebied tussen een doorsnede voor het schip en een doorsnede naast het schip. In de beschouwing wordt verondersteld dat alle grootheden uniform zijn verdeeld over de beschouwde doorsneden en stationair zijn. De berekende retourstroomsnelheid en waterspiegeldaling naast het schip zijn dus profielgemiddelde waarden; er wordt daarbij geen rekening gehouden met effecten door excentrisch varen van het schip. De inzinking van het schip wordt gelijkgesteld aan de waterspiegeldaling naast het schip, hoewel deze in werkelijkheid iets groter kan zijn (vooral bij trimmen¹) en daardoor kan de retourstroom worden onderschat.

¹ "Trimmen" wil zeggen dat de diepgang bij het hek groter is dan de diepgang bij de boeg (andersom komt trouwens ook voor). Trim kan optreden door het varen zelf ("achterover gaan liggen"), maar schepen zonder vracht varen vaak in ballast en pompen tanks nabij het hek vol om de schroef dieper te laten steken zodat de schroef efficiënter werkt.

Verder wordt de vormweerstand van het schip via een experimentele relatie in de impulsvergelijking ingebracht. De methode is geschikt voor alle scheepstypen. In de methode Bouwmeester wordt eveneens geen rekening gehouden met de effecten van vaarwegprofielveranderingen, zoals een lokale verbreding of verdieping, een zijhaven, een bocht in de vaarbaan. De methode van Bouwmeester is ook toegepast voor krachten van scheepsgeïnduceerde stroming op afgezonken tunnels (programma FORTUN, zie Jongeling, 2001).



Figuur 2-10 Vergelijking van methode Bouwmeester ("new theory"), methode Schijf en modelmetingen voor toepassing in Amsterdam-Rijnkanaal (Bouwmeester et al., 1977).

Welke type berekening, energiebehoud of impulsbehoud, het beste resultaat oplevert voor de waterspiegeldaling en retourstroomsnelheid hangt af van de verhouding tussen de lengte en breedte van het schip. Zoals eerder aangegeven zijn deze eendimensionale modellen eigenlijk niet geschikt als sprake is van grote breedte van de rivier. De waterspiegeldaling en retourstroom zijn dan niet meer constant over de breedte van de rivier of kanaal, maar nemen af op toenemende afstand van het schip. De primaire golf moet worden vertaald naar een driedimensionale kuil in de richting haaks op de vaarrichting. De eendimensionale methode Bouwmeester is getoetst voor $B_0 / B_s < 12$ waarbij $B_0 =$ breedte vaarweg op waterlijn, $B_s =$ scheepsbreedte. Zie de voorbeelden in Figuur 2-10. Voor kleine vaarwegbreedte, $B_0 / B_s < 4,5$, ligt de voorspelde waarde van waterspiegeldaling met Bouwmeester iets aan de lage kant, en wordt beter uitgegaan van de (iets te hoge) waarden met de methode van Schijf.

2.3.2 Empirische berekening van retourstroming

Een alternatieve aanpak voor berekening van snelheden onder het schip is gebaseerd op de empirische relaties die over het algemeen zijn afgeleid uit laboratoriumexperimenten. Er zijn diverse relaties beschikbaar in de literatuur, maar deze zijn vaak specifiek voor een bepaalde combinatie van stromingsomstandigheden en scheepseigenschappen. De ervaring is dat de formules in andere omstandigheden slecht scoren. Voor het onderzoek in rivieren en kanalen in Nederland kan worden verwezen naar de relatie van Maynard (1990) en de aanpassingen ervan door Stolker en Verheij (2006). In deze methode wordt de verhouding van de maximale retourstroomsnelheid U_{rb} (bij de bodem, net achter de boeg) tot de vaarsnelheid V_s berekend als functie van de ratio scheepsbreedte door waterdiepte (B_s/h) en de ratio diepgang door waterdiepte (D/h). De methode is gepresenteerd in Appendix A.2.

2.3.3 Ontwikkeling grenslagen en zijwaartse retourstroming

De vorm van het stroomprofiel onder de kiel van het schip is niet constant over de lengte van het schip. Zoals aangegeven in paragraaf 2.2 zullen zich aan de bodem en onder de kiel twee grenslagen ontwikkelen. Deze grenslagen worden dikker vanaf de boeg van het schip. In deze grenslagen heeft het stroomprofiel een logaritmische vorm. Bij geringe kielspeling groeien de grenslagen naar elkaar en vormen een blokkade voor de doorstroming onder het schip. Dit leidt tot versterkte zijwaartse uitwaaiing van stroming wat vervolgens sterk bijdraagt aan de spoorvorming in een sedimentbodem.

Opgemerkt moet worden dat in stromende rivieren er al sprake is van een ontwikkelde grenslaag. De grenslagen in deze paragraaf hebben betrekking op de grenslaagontwikkeling specifiek gerelateerd aan het varende schip, bijvoorbeeld in stilstaand water.

Voor een hydraulisch ruwe bodem is de groei van de grenslaag aan de bodem als functie van de afstand vanaf de boeg van het schip te schatten als (volgens studie M1115, Blauw et al. (1985), van der Wal (1989)):

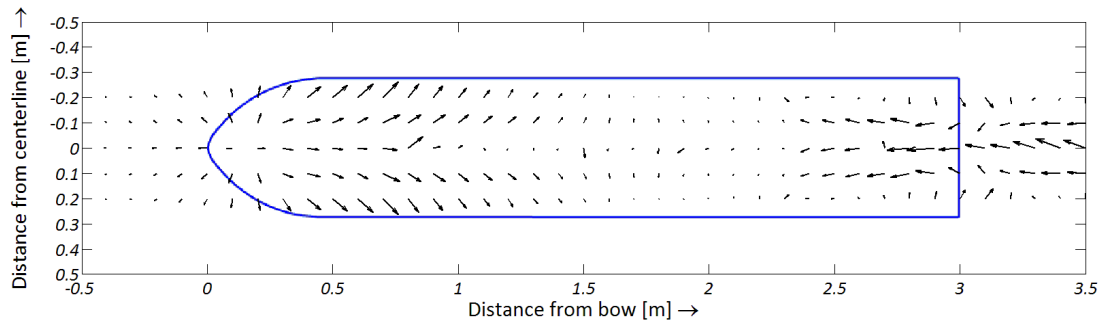
$$\delta_b = K_s \cdot 10^{\frac{1.907}{2.96\sqrt{c_f}}}$$

waarin

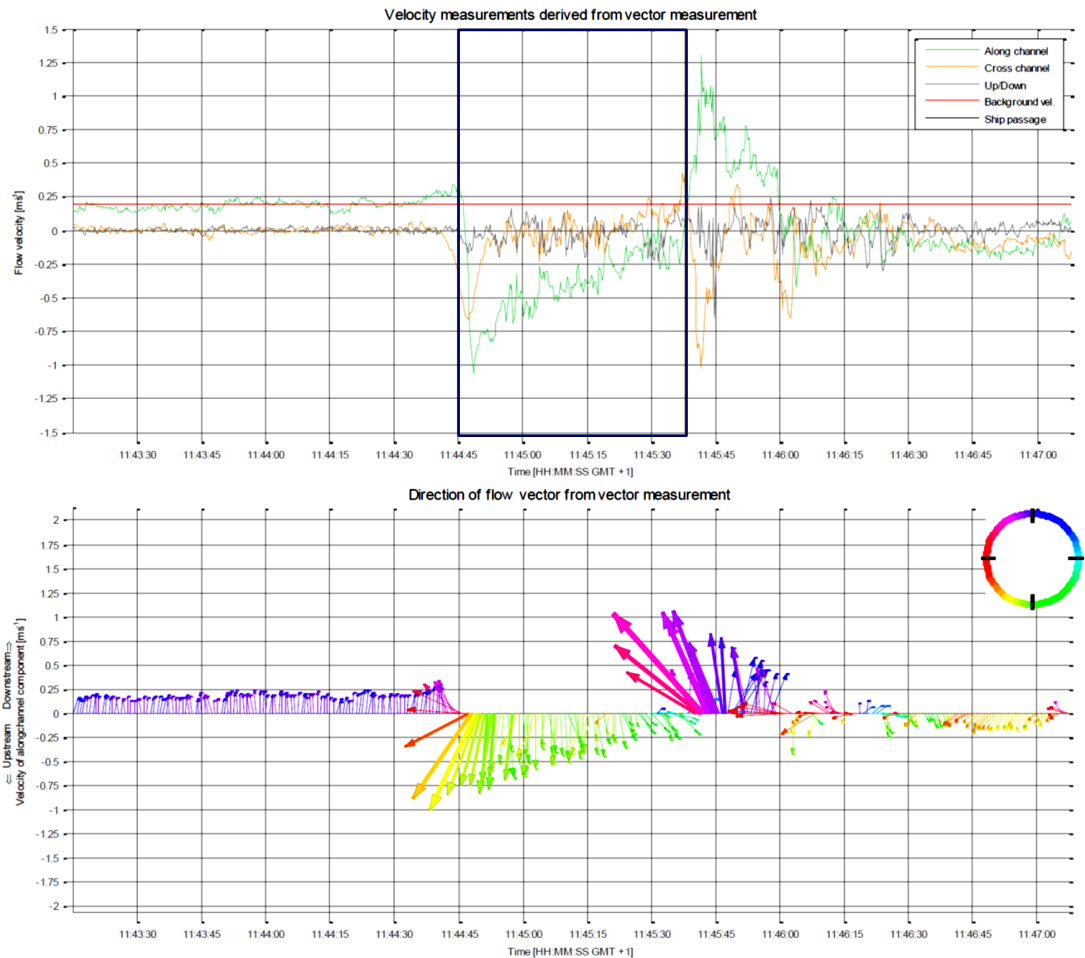
$$c_f = \left(3.47 + 0.707 \ln \left[\frac{L_f}{K_s} \right] \right)^{-2.56}$$

en c_f = schuifspanningscoëfficiënt, δ_b = grenslaagdikte, L_f = relatieve afstand tot de boeg van het schip = $U/(V_s+U_f) \cdot x$, loopweglengte genaamd, x = de afstand vanaf de boeg van het schip, K_s = equivalente korrelgrootte (hier benaderd door $2 \times D_{90}$ van de korrelgrootteverdeling).

Door de groei van de grenslagen neemt de effectieve kielspeling af, en zullen snelheden moeten toenemen of de afvoer onder het schip moet afnemen. Het proces dat hier optreedt en zorgt voor zijwaarts uitwaaiëren van de stroming, is geïllustreerd in Figuur 2-11 (experiment) en Figuur 2-12 (prototype). Vlak achter de boeg ontstaat de retourstroom. Deze piekt in zowel de langssnelheid, als de dwarssnelheid. Laboratoriumexperimenten van Robijns (2014) tonen dat afhankelijk van het type schip (vorm van de boeg) en kielspeling, de maximale snelheid bij de boeg aan de zijkant van het schip optreedt in plaats van de scheepsas (zie Figuur 2-11). In Figuur 2-12 in prototype piekt de stroomsnelheid op 1,26 m/s (of zelfs orde 2 m/s ten opzichte van de ongestoorde stroming) onder een zijwaartse hoek, buitenwaarts gericht. Onbekend is hoe deze resultaten worden beïnvloed door schaafeffecten in de laboratoriumcondities. Onder het schip neemt de retourstroomsnelheid weer af. Vervolgens, na de passage van het schip, zien we een stroming tegengesteld aan de vaarrichting, waarbij deze naar het midden is gericht. Dit is de volgstroom, welke ongeveer dezelfde pieksnelheid oplevert als de piek van de retourstroom (bij de boeg). Daarna volgt een enigszins turbulent stromingsveld. Dit is het gecombineerde effect van de schroefstraal, de volgstroom en de transversale golven achter het schip. Garcia et al. (1998) constateren dat de volgstroom een veel complexer turbulent beeld geeft dan de retourstroompiek onder de boeg.



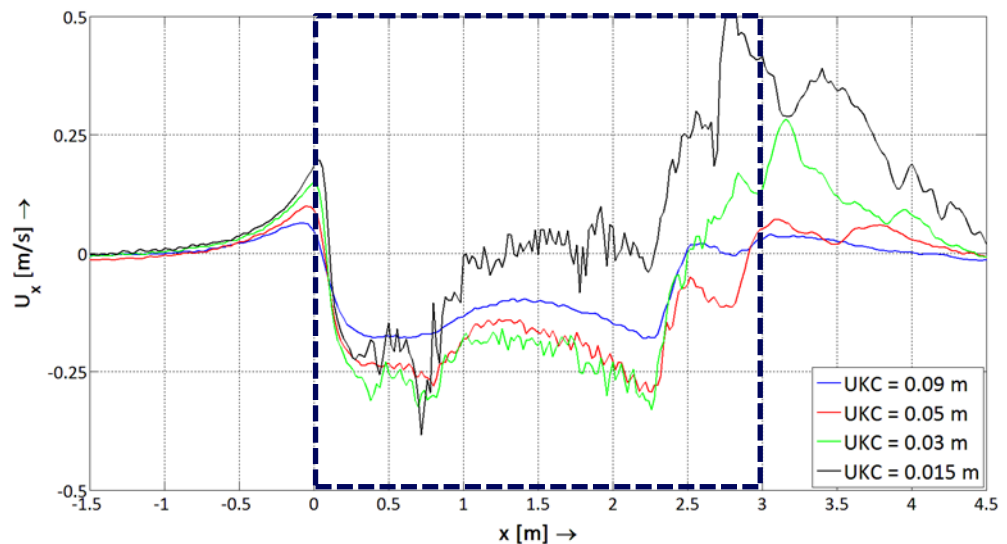
Figuur 2-11 Vector plot van relatieve stroomsnelheden in experiment 13 van T. Robijns (2015), met kielspeling $UKC = 0,015$ m, $h = 0.3$ m, $U_0 = -0.05$ m/s, en $V_s = 0.65$ m/s



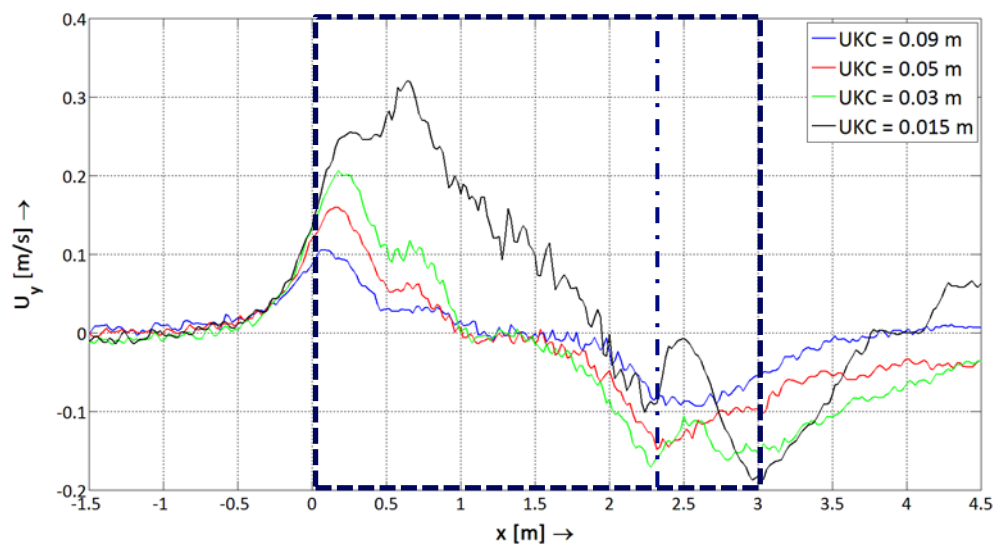
Figuur 2-12 Metingen van de retourstroming onder een schip met duwbak (Santa F) in het Julianakanaal bij een afluaddiepte van 3.5 meter, een snelheid van 7,5 km/h bergvaart, met presentatie van snelheidscomponenten dwars en in de lengterichting van het kanaal (Schroevers et al., 2015)

Tijdens de metingen in het Julianakanaal, zoals gepresenteerd in Figuur 2-12, werd bij een afluaddiepte van 3 m een aantal opvallende verschillen waargenomen. In deze situatie is sprake van een grotere kielspeling waardoor de grenslagen minder dik zijn. De retourstroomsnelheid onder het schip neemt daardoor minder af richting het achterschip. Ook Robijns (2014) observeert in experimenten met verschillende mate van kielspeling een afname van de stroming onder het schip bij kleine kielspeling.

Dit is weergegeven in Figuur 2-13 voor experimenten met een 'conventioneel motorschip'. Verder tonen de experimenten van Robijns dat dwarsstromingen bij de boeg sterker worden bij een afnemende kielspeling, Figuur 2-14, en dat bij het achterschip de dwarsstroming omkeert (dus water terugstroomt) omdat de kielspeling daar weer toeneemt. De zijwaartse uitwaaiing van de stroming houdt langer aan voor de kleinste kielspeling, wat samenhangt met de afname van langssnelheid door de ontwikkeling van de grenslaag: het aanstromende water kan alleen zijwaarts uitwijken. Verder tonen de experimenten van Robijns een forse afhankelijkheid van de vorm van de boeg van het schip: de (maximale) snelheden, zowel in langs- en dwarsrichting, gedragen zich iets anders onder een duwbak-eenheid dan onder een motorschip. Vooral de dwarsnelheden bij de boeg zijn aanzienlijk groter voor de duwbak-eenheid.



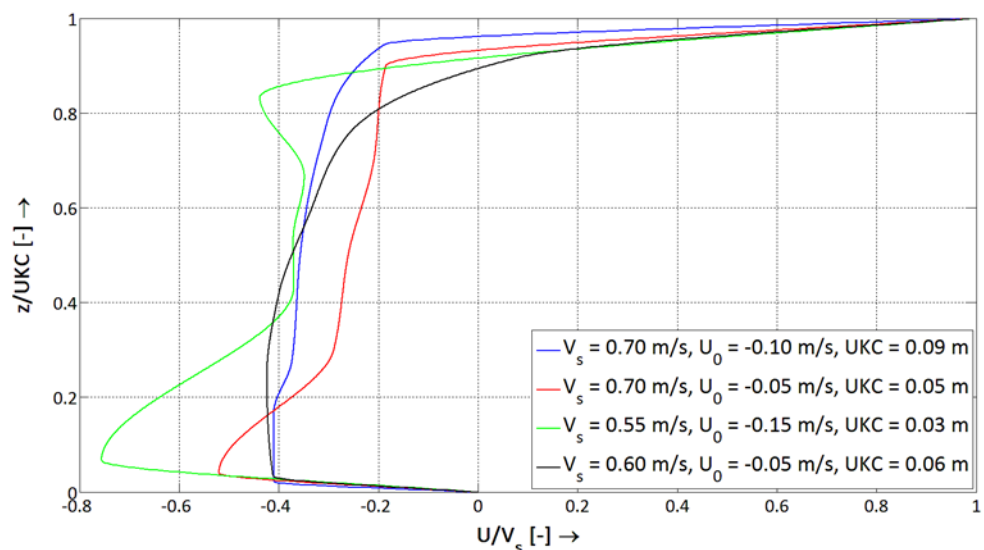
Figuur 2-13 Snelheden in langsrichting nabij de bodem in experimenten voor verschillende UKC (met $VS = 0.50$ m/s, $U_0 = -0.05$ m/s, $h=0.30$ m), Robijns (2014). Streeplijn geeft locatie van boeg en hek van schip weer.



Figuur 2-14 Snelheden in dwarsrichting nabij de bodem in experimenten voor verschillende UKC (met $VS = 0.50$ m/s, $U_0 = -0.05$ m/s, $h=0.30$ m), Robijns (2014). Streeplijn geeft locatie van schip weer. Streep-stip lijn geeft de overgang aan naar het schuin oplopende achterschip.

De resultaten van Robijns (2014) tonen ook dat de volgstream toeneemt naarmate de kielspeling afneemt (Figuur 2-13), of wanneer de vaarsnelheid toeneemt. Ook dit volgt ook uit de prototype waarnemingen in het Julianakanaal. De resultaten voor de volgstream zijn echter niet eenduidig te relateren aan de kielspeling, Froude getallen, of andere parameters, en zijn nog niet goed beschreven met een theoretisch model (Schroevers et al., 2015). Ook geldt hiervoor dat interactie met schroefstraal de situatie compliceert. Experimenten in het laboratorium zijn bijvoorbeeld uitgevoerd zonder schroef (bijv. Robijns, 2014) of met lastig te schalen invloed van de schroef (Rodriguez et al., 2002). Zo zijn bij een Froude schaling (zie bijvoorbeeld Robijns, 2014) de Reynolds waarden veel lager (dus de stroming viskeuzer), wat mogelijk bij de interactie tussen schroefstralen en volgstream, maar ook de grenslaagontwikkeling een rol kan spelen.

Robijns (2014) heeft ook in detail metingen (met EMS) verricht aan de verticale structuur van de snelheden onder het schip. Figuur 2-15 toont de gefilterde resultaten voor een aantal experimenten, waarbij de turbulente Couette-Poiseuille stroming kan worden herkend. De snelheden zijn geschaald met de scheepssnelheid V_s , en de hoogte met de kielspeling UKC . Het toont hoe in alle gevallen de maximale snelheid optreedt bij de bodem, met een relatief grote vervorming bij de kleinste kielspeling (groene lijn). Dat laatste hangt mogelijk samen met de invloed van contractie en loslating bij de boeg, en deze neemt af naarmate de snelheid van de ongestoorde rivier-/kanaalstroming afneemt.



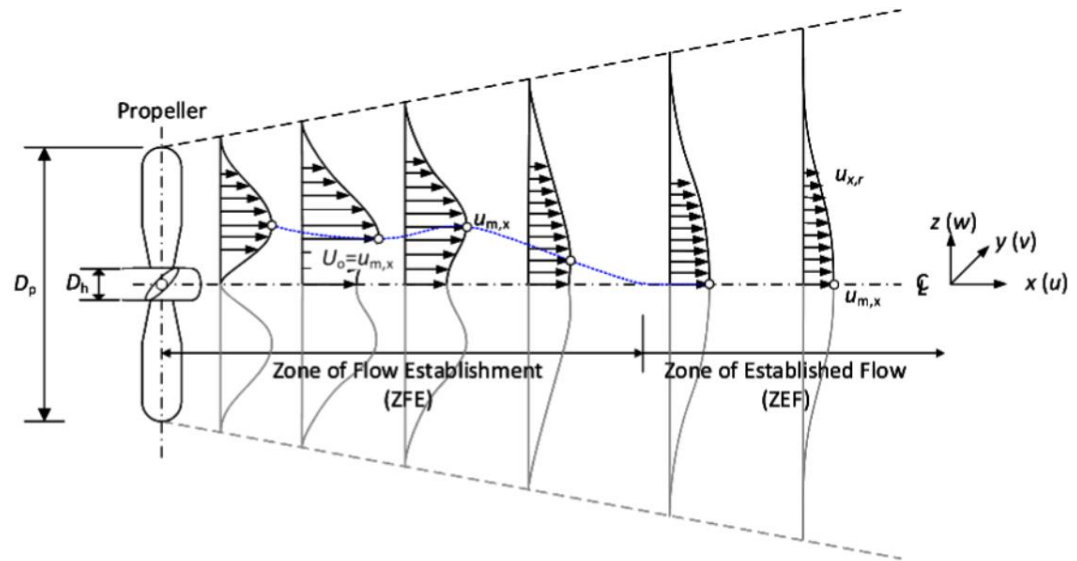
Figuur 2-15 Verticale snelheidsverdeling gemeten onder de kiel bij verschillende vaarsnelheid, stroming en kielspeling in experimenten van Robijns (2014)

2.3.4 Analytische aanpak schroefstralen

Diverse studies beschrijven vergelijkbare methoden voor het kwantificeren van de invloed van schroefstralen op snelheden, drukken, schuifspanningen en turbulentie op de bodem, bijvoorbeeld Wei et al. (2020), Oebius (2000), AMOG (2010), Garcia et al. (1998). Onderscheid wordt gemaakt tussen een kernzone (of *zone of flow establishment*) en een diffusiezone (of *zone of established flow*) (Figuur 2-16), waarbij de straal zich uitbreidt onder een hoek van orde 19° voor een schroefstraal en 9° voor een jet of een straalbuis² en is onafhankelijk van de snelheid (Oebius, 2000). De snelheidsverdeling is afhankelijk van de afstand tot de bron van de straal (de schroef of jet) en de afstand tot de straal as.

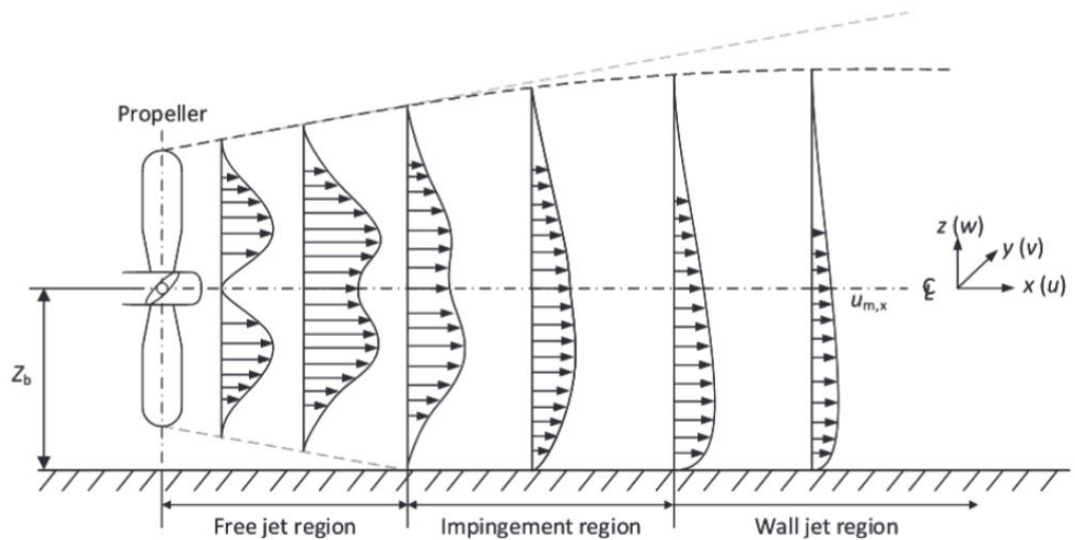
² Straalbuisschroeven worden over het algemeen toegepast bij duwbotten, die relatief langzaam varen en in verhouding flink moeten 'drukken' (de straalbuizen leiden tot minder verlies van de tipwervels, maar zorgen voor hogere wrijvingsweerstand/verliezen bij hogere snelheden).

Enkele theoretische relaties voor de schroefstraalsnelheid bij de bodem zijn gepresenteerd in Appendix A.3.



Figuur 2-16 Schematische weergave van stroming achter en schroef. De blauwe lijn representeert de plaats van het lokale snelheidsmaximum. Niet op schaal (figuur 3 uit Wei et al., 2020)

Een uitvoerig overzicht van processen en diverse andere (vergelijkbare) relaties is gepresenteerd in Wei et al. (2020). Daarbij gaan Wei et al. ook specifiek in op het effect van een horizontale schroefstraal op de snelheidsverdeling, zoals aangegeven in de definitieschets in Figuur 2-17. In het lagere deel neemt snelheid minder af, waarbij dus hogere snelheden kunnen worden verwacht bij de bodem dan op basis van een onbegrensde straal zou worden berekend. De werveling in de straal worden onder invloed van de bodem versterkt, vooral wanneer de schroef vrijwel tegen de bodem ligt: de straal vormt dan een wall-jet met hoge erosieve snelheden en wervels langs de bodem. Metingen van M.X. Wei tonen ook de werveling van de stroming opgewekt door de rotatie van de schroef, en daarmee samenhangende dwarssnelheid langs de bodem en de oriëntatie van de straal. Garcia et al. (1998) vinden dat voor grotere dieptes de propeller jet aan de waterspiegel bindt en de invloed op de bodem verwaarloosbaar is.



Figuur 2-17 Schematische weergave van een schroefstraal op een horizontale bodem (Wei et al., 2020)

Opgemerkt moet worden dat bij dubbele schroeven verondersteld wordt dat de effecten van elke schroef lineair kunnen worden gesuperponeerd. Echter, deze superpositie aanname is nog niet voldoende gevalideerd, en de interacties van de twee wervelende stralen leiden mogelijk tot menging en energieuitwisseling.

Uitgaande van een M12-schip (grootste diepgang, grootste vermogen), twee schroeven en $\eta = 0,7$ geven de formules een uitstroomsnelheid van 8,3 m/s. Dit resulteert in een stroomsnelheid aan de bodem van maximaal 1,45 m/s bij stilliggend schip voor een enkele schroef en bij superpositie voor beide schroeven van 2 m/s. Rekening houdend met het gegeven dat het schip vaart met minimaal een snelheid van 3,2 m/s, betekent dit in werkelijkheid een stroomsnelheid van maximaal 0,4 m/s. Ten opzichte van de retourstroomsnelheden zijn de stroomsnelheden in de schroefstraal bij varende schepen mogelijk te verwaarlozen, zelfs als rekening wordt gehouden met de veel hogere turbulentie in de schroefstraal.

Uiteindelijk zijn de ontgrondingsdiepten afhankelijk van de duur van de werking van de straal op het bodemmateriaal. Bij varende schepen is die belasting van zeer korte duur (en neemt af naarmate het schip sneller vaart). Daarentegen staat dat op drukke scheepvaartroutes (zoals de Waal en Boven-Rijn) de belasting vaak terugkeert.

Uit metingen in het Julianakanaal concluderen Schroevers et al. (2015) dat bij de passage van een duwbak geen duidelijke schroefstraal is waar te nemen bij de bodem. Dit is in overeenstemming met de verwachting zoals boven genoemd. De afstand schroef-kanaalbodem is daar relatief groot waardoor de snelheid bij de bodem sterk afneemt. Bovendien speelt een rol dat de vaarsnelheid daar hoog is, wat een sterk reducerende werking op de schroefstraalsnelheid heeft. Daarnaast heeft de meting niet exact in het midden van het schip plaatsgevonden, maar iets opzij, waardoor wederom niet het maximum van de schroefstraal is bemonsterd.

2.4 Benaderende methoden voor berekening van sedimenttransport en erosie/sedimentatie onder het schip

2.4.1 Erosie en sedimentatie processen (kwalitatief)

Erosie door passerende schepen hangt af van de hydrodynamische processen en van de eigenschappen van de bedding. In voorgaande paragrafen is aangegeven dat de complexiteit van golven, retourstroming en schroefstraal in beperkte mate zijn te beschrijven met vereenvoudigde (analytische/empirische) modellen. Een vertaling naar schuifspanning en turbulentie vanuit deze hydrodynamica vormt de basis voor het berekenen van sedimenttransport en erosie.

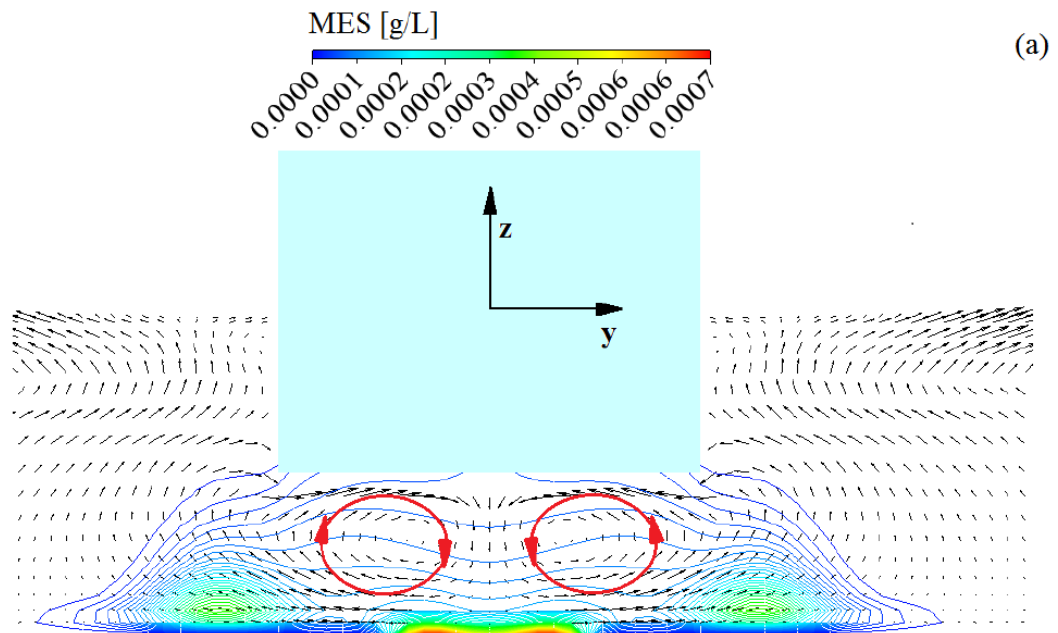
Uit voorgaande paragrafen komen een aantal relevante hydrodynamische processen aan de orde die relevant zijn voor het transport:

- De retourstroming onder het schip is maximaal juist achter de boeg. Hoe kleiner de kielspeling, hoe groter deze maximale snelheid.
- De zijwaartse component (uitwaaiing) van deze stroming is ook maximaal bij de boeg en neemt daarna af.
- Onder de kiel ontwikkelt een grenslaag: bij kleine kielspeling groeit deze tot aan de bodem en zal de langsstroming worden afgeremd. Dit leidt ertoe dat meer water zijwaarts wordt afgevoerd. Circulaties in deze grenslaag dragen mogelijk bij aan zijwaartse verplaatsing van opgewerveld sediment.
- De volgstroming na passage van de achtersteven zorgt ook voor een relatief hoge stroomsnelheid langs de bodem en verticale (opwaartse) snelheden die zwevend sediment hoog kunnen opwerpen.
- De straal/jet van de schroef leidt tot een verhoogde turbulentie en stroming langs de bodem die sterk afhangt van de hoogte van de schroef ten opzichte van de bodem en de zone van de straal die de bodem raakt.

Invloed van schuifspanningen op de bodem zijn onderzocht door onder ander Rodriguez et al. (2002). Op basis van experimenten met 1:25 schaalmodellen hebben Rodriguez et al. de schuifspanningen gemeten onder schepen, inclusief schroefstraal. De resultaten bevestigen het eerdere beeld uit paragraaf 2.3.3 dat er over het algemeen twee pieken in schuifspanning optreden, bij de boeg en bij de achtersteven (volgroom en schroefstraal). De schuifspanningen in prototype schaal kunnen oplopen tot 100 N/m² en zijn het grootst bij kleine waterdiepte. Dergelijke waarden worden in normale rivieren zelden bereikt, zelfs niet bij hoogwaters.

Met de 'entrainment' relatie van Garcia en Parker (1991) worden entrainment-waarden van 0.25 tot 18.5 m³/s voorspeld voor zand met een diameter van 0.5 mm. Hoewel het sediment snel weer bezinkt na passage van het schip, zorgt dit er wel voor dat de toplaag van de bedding continu wordt omgewoeld. Opgemerkt wordt dat er een vertraging zit in entrainment ten opzichte van de ontwikkeling van de schuifspanning, wat ervoor pleit deze niet-stationariteit mee te nemen.

Ji et al. (2014) bevestigen deze resultaten. Zij leggen een relatie tussen de zwevend-stof concentratie en het Froude getal. Ji (2013) en Chevalier et al. (2015) verwijzen naar gedetailleerde turbulentieberekeningen van de retourstroom. Deze resultaten tonen niet alleen hoe de grenslaag ontwikkelt langs het schip, maar ook hoe recirculatiepatronen ontstaan onder het schip zoals gepresenteerd in Figuur 2-18. De wervels in dit figuur zijn te vergelijken met de wervels in een Taylor-Couette stroming. Wellicht kan met detailmodellen of nadere analyse van de resultaten van Ji et al. (2014) nader worden onderzocht of in de condities in de Rijntakken en Maas ook dergelijke circulatiecellen tot ontwikkeling kunnen komen.

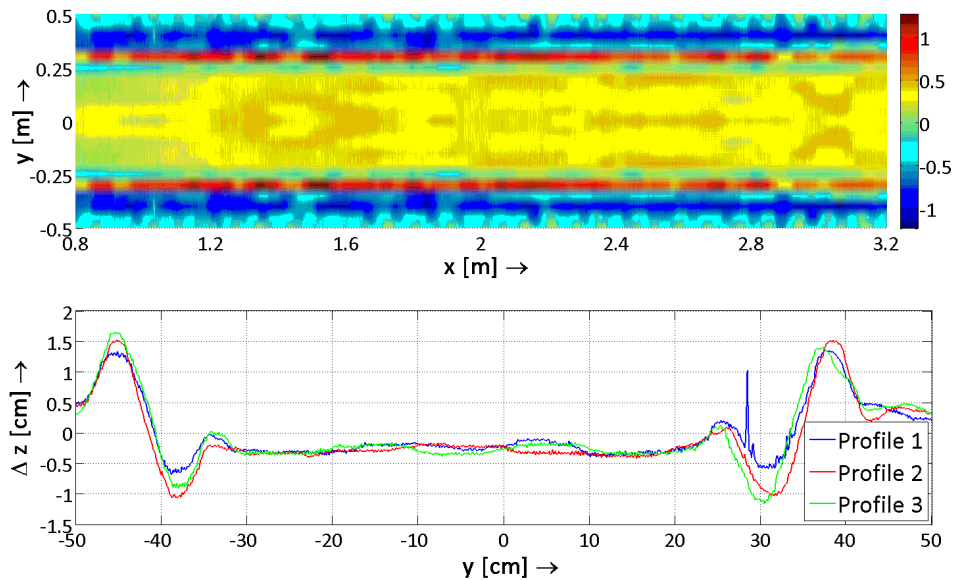


Figuur 2-18 Dwarsprofiel berekende snelheden onder een schip van Shengcheng Ji (Ji, 2013)

De pieken in schuifspanning leiden ertoe dat de sediment-entrainment als puls wordt opgewekt, en daardoor wordt gekenmerkt door een hoge mate van niet-stationariteit. Admiraal et al. (2000) concluderen op basis van experimenten hoe de zwevend-stof concentratie na-ijlt op de piek in schuifspanning en hoe met een faseverschuiving de methode van Garcia en Parker (1991) kan worden toegepast. De na-ijling zorgt bij passerende schepen tot hogere berekende concentraties dan wanneer de formules zonder faseverschuiving worden toegepast.

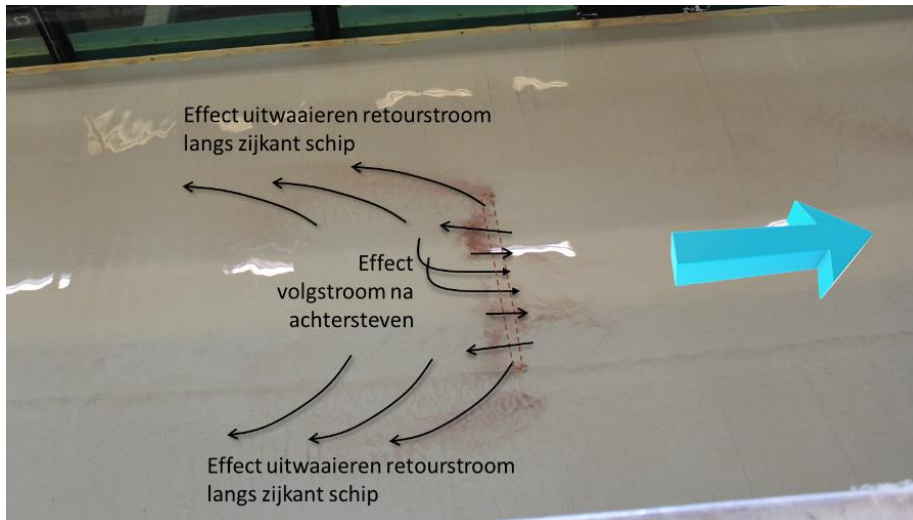
Uliczka et al. (2016) presenteren transport metingen uitgevoerd door de BAW voor het project "ship-induced sediment transport (SeST)". Ulm et al. (2016, 2017) concluderen op basis van analyse en verwerking van zwevend-sediment metingen met 3 bodem-sensors (voor 8 dagen) onder passerende (zee-)schepen en met ADCP/SSC metingen in Kiel kanaal, dat ongeveer 10% van het sedimenttransport door het kanaal kan worden toegeschreven aan de scheepvaart. In het kanaal is slechts een geringe constante stroming aanwezig, en het kanaal wordt beschouwd als een laboratoriumgoot in prototype schaal. Bodemsediment bestaat voor 75% uit fijn tot medium zand. Bij een vergelijkbare campagne in de Elbe (profiel op km 646,8), waar getijdestromingen het sedimenttransport bepalen, bleek slechts een percentage van minder dan 2% bij te dragen aan het totale zwevend transport in die sectie.

Robijns (2014) beschrijft laboratoriumexperimenten met een sedimentbodem met en zonder duinen, en met toepassing van verschillende typen schepen. In de experimenten met standaard binnenvaartschepen was alleen bij geringe kielspeling duidelijk sprake van spoorvorming, met de grootste erosie op de vaar-as en een afvlakking van beddingvormen. Zowel bij het conventionele schip als bij de duwbakeenheid zorgt de verhoogde zijwaartse stroming onder de boeg voor erosie aan de zijkanen van het schip, waarbij het opgewerkte sediment wordt afgezet iets buiten deze lijn. Bij de duwbakeenheid is de erosie aan de zijden groter dan in de vaaras.

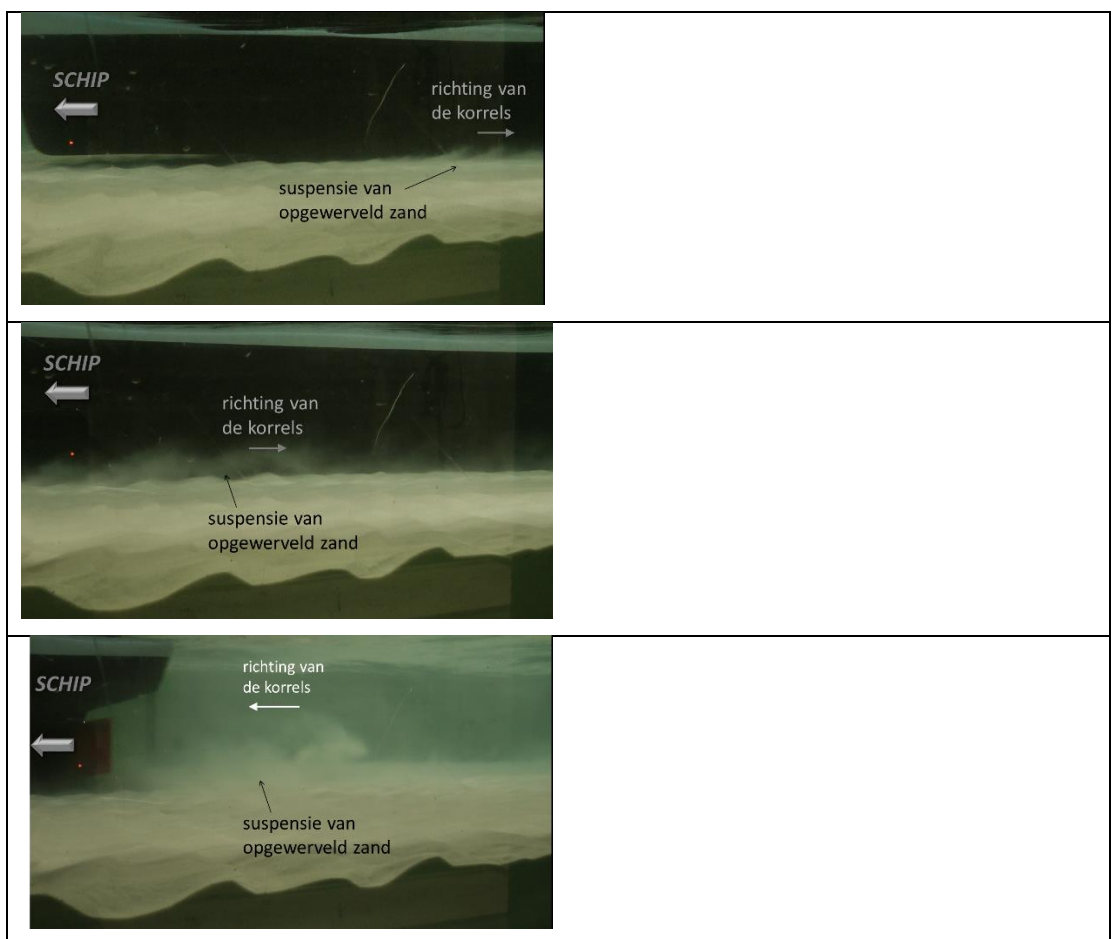


Figuur 2-19 Erosie en sedimentatie bovenaanzicht (erosie in cm, erosie positief, sedimentatie negatief) en zijaanzicht op 3 locaties, na 10 passages van een duwbakeenheid in laboratorium experiment van Robijns (2014)

Met behulp van gekleurde tracers in de experimenten toont Robijns (2014) hoe onder het schip boven een vlakke bodem sediment in de as wordt verplaatst in de vaarrichting, en aan de zijkant van het schip het sediment wordt verplaatst in tegengestelde en zijwaartse richting, zoals geïllustreerd in Figuur 2-20. Dit is een belangrijk inzicht, want het toont dat in de beschouwde experimenten het sediment met name wordt getransporteerd in de zones met hoge turbulentie aan de zijden van het schip en bij het passeren van de achtersteven (d.w.z. de volgstroom). Deze processen waardoor de verspreiding (transporten) van sediment optreedt zijn geïllustreerd in de stills van video-opnames van een passerend schip via een glazen wand van de goot in Figuur 2-21. De beelden tonen dat zichtbare opwerveling van sediment pas op enige afstand van de boeg, aan de zijkanten van het schip optreedt, en daarbij de korrels tegengesteld aan de vaarrichting bewegen. Vervolgens neemt de omvang van deze sediment 'wolkjes' richting het achterschip weer iets af. Na de passage van het achterhek worden een aantal grote 'wolken' sediment opgewerveld die in de volgstroom in vaarrichting bewegen, en daarbij sediment hoog in de verticaal brengen.



Figuur 2-20 Verspreiding van sediment-tracer na passage van een duwbak-eenheid in experiment 71 (run 1) van Robijns (2014). De gestreepte lijn geeft een indicatie van de oorspronkelijke plek van de tracer, de blauwe pijl geeft de vaarrichting, en de zwarte pijlen geven de richting van het transport weer tijdens passage.



Figuur 2-21 Stills uit video-opname van experiment van schip met geringe kielspeling gesleept over een 'vlakke' sediment bodem van Robijns (2014): figuur boven: voorschip en opwerveling op enige afstand van de boeg aan zijkant van schip; figuur midden: opgewerveld sediment aan zijkant midscheeps; figuur onder: opwerveling achter het schip. De dikke pijl geeft de vaarrichting, de dunne witte pijlen geven de richting van de zandkorrels ten opzichte van de bodem.

De lab-experimenten van Robijns tonen dat de achtergrondstroming (de ongestoorde snelheid U_0) een iets andere invloed heeft op de snelheid onder het schip dan de scheepssnelheid V_s . De invloed van deze twee parameters is vervolgens weer afhankelijk van:

- Boegvorm: snelheden onder het schip zijn bijna 2 keer groter voor de duweenheid dan voor de conventionele boegvorm.
- Kielspeling: hoe kleiner de speling hoe groter de pieksnelheden. Bij kleine kielspeling kan door grenslaag-ontwikkeling een blokkade optreden die het stroombeeld sterk verandert.
- Breedte van het schip: bij bredere schepen wordt de dwarsstroming versterkt. Hierbij speelt ook de breedte van de waterloop een rol (verhouding B_s/B_0).

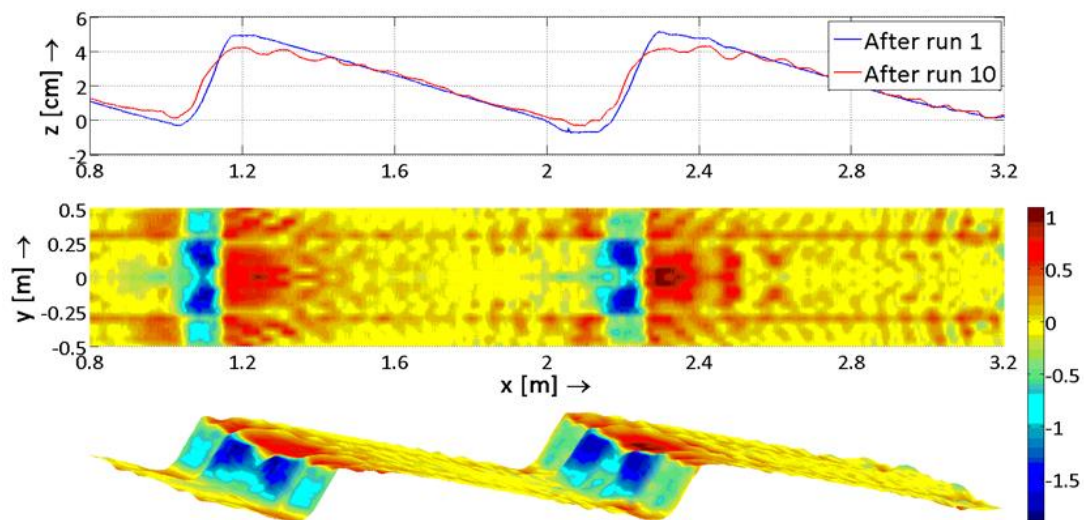
Het voorgaande is door Robijns (2014) vertaald naar de volgende effectieve kielspeling voor erosie van bodemmateriaal:

$$\text{Conventionele schepen: } \frac{h}{h - UKC} \leq 1.07 \quad \text{duwbakken: } \frac{h}{h - UKC} \leq 1.1$$

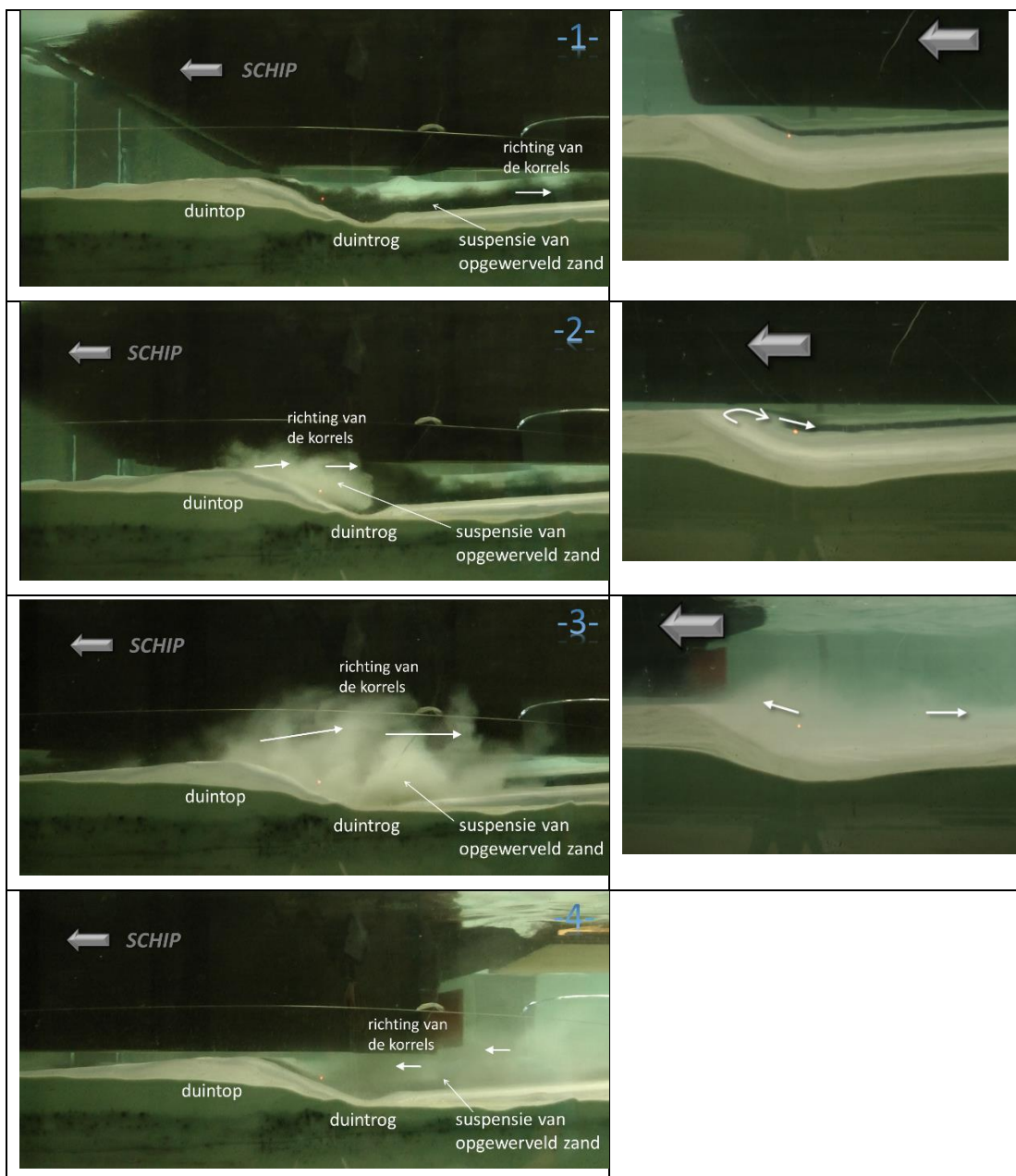
Invloed van en op beddingvormen

Bots (2011) heeft experimenten uitgevoerd waarbij schepen met geringe kielspeling zijn getrokken over een duinenveld. Een belangrijk doel van de experimenten was te bepalen in hoeverre schepen in staat zijn ondieptes 'plat te varen', met name waar ondieptes door beddingvormen relevant zijn (bijvoorbeeld op de Midden-Waal). Met een kielspeling van 25% van de waterdiepte vond hij een geringe toename van sedimenttransport, waarbij hooguit 5% van het duin was geërodeerd. Bij hogere snelheden, dicht bij de grenssnelheid, nam de erosie van het duin toe tot circa 10%. Lenselink (2011) heeft vervolgens vergelijkbare experimenten uitgevoerd, waarbij specifieke tests zijn uitgevoerd voor het bestuderen van het snelheidsprofiel onder het schip. Op basis van de inzichten van deze experimenten is geconcludeerd dat, gezien de korte duur van verhoogde sedimentopwerveling, het gebruik van diepgeladen schepen voor verwijderen van ondieptes niet voldoende effectief zal zijn.

De experimenten van schepen over een duinenveld door Robijns (2014) leiden ook tot interessante bevindingen. Figuur 2-22 toont het resultaat van erosie en sedimentatie na passage van 10 conventionele binnenvaartschepen (zonder schroef) in experiment 51. Uit de figuur blijkt dat duintoppen eroderen, waarna het geërodeerde sediment voornamelijk wordt afgezet in de troggen (lijzijde, steile deel van duin). Door het afschaven van de duintoppen neemt de minimale kielspeling toe, en neemt de erosie dus ook af.



Figuur 2-22 Erosie van duinenbedding (in centimeters) na passage van 10 schepen in experiment 51 van Robijns (2014). Rode zones zijn locaties met erosie, blauwe zones zijn locaties met sedimentatie.



Figuur 2-23 Stills van video-opname van experiment met een schip gesleept over een duinenveld (bergvaart) door Robijns (2014) op achtereenvolgende tijdstippen. Linker kolom: experiment met duwbakeenheid en geringe kielspeling; rechts conventioneel schip. Brede grijze pijl geeft vaarrichting. Witte pijlen geven de richting van de korrels ten opzichte van de bodem.

Uit de stills van video-opnames in Figuur 2-23 volgt dat de processen anders verlopen dan bij de vlakke bodem. Wanneer, bij geringe kielspeling, de boeg over de duintop vaart, trekt deze een wervel aan de lijzijde van de duin waarbij het materiaal van de duintop tegen de vaarrichting in de duintrog wordt getrokken. Bij zeer geringe kielspeling (linkerkolom in Figuur 2-23) wordt dit sediment ook zijwaarts verplaatst, en zal het naast het schip verder stroomafwaarts stromen. Aan de achterzijde van het schip wordt minder sediment opgewerveld dan in de situatie met het vlakke bed. Bij de duwbakeenheid met geringe kielspeling zal ook op de loefzijde van de duin in de vaaras een deel van het sediment in suspensie komen.

In het onderzoek van Bongers (2021) is de ontwikkeling van beddingvormen (duinen) onderzocht, en is bestudeerd in hoeverre scheepvaart de duinen heeft kunnen beïnvloeden. Uit de analyses volgt dat in de periode 2019-2020 de duinen in de Midden-Waal zich voortplanten met snelheden van 3 m/dag tot 6 m/dag. Duinlengtes variëren van orde 60 tot 120 m, en hoogtes van 0,6 tot 1,0 m. De resultaten tonen voor een specifiek duinenveld in de Midden-Waal dat tijdens lage waterstand de duinsnelheid aan de linkerzijde (bergvaart) iets lager is dan aan de rechterzijde (dalvaart), maar het onderscheid is gering en niet geheel consistent (er zijn in ieder geval 2 peilingen waar dit niet opgaat). Ook duinhoogtes tonen geen significant effect op dit traject (in 2019 lijken de duinen links iets lager, maar in 2020 zijn deze weer gelijk). Het is wel zichtbaar (en significant) dat duinlengtes links (orde 104 m) groter zijn dan rechts (orde 96 m). Nadere beschouwing van tracks toont dat op veelbevaren tracks de duinen langer zijn (103 m) dan op beperkt bevaren tracks (93 m). Dit is niet onderscheidend voor duinhoogte en duin-celerity. Deze resultaten zijn niet los te zien van het grote onderscheid in bodemsamenstelling in de Waal tussen linker en rechterzijde van de rivier. Het onderzoek zal verder worden voortgezet op de Universiteit Twente met aanvullende data op andere trajecten (Lokin, 2022).

Invloed van en op de bodemsamenstelling

In paragraaf 2.2 (Figuur 2-4 en Figuur 2-5) is getoond dat op de intensief bevaren Waal er sprake is van een toplaag van zand aan de linkerzijde (bergvaart) en zand/grind aan de rechterzijde (dalvaart). Er is op dit moment nog geen onderzoeksresultaat beschikbaar dat het relevante proces van deze sortering beschrijft, maar over de relatie met scheepvaart bestaat geen twijfel bij de experts.

Verschillende processen die hierbij een rol spelen zouden nader moeten worden onderzocht. Ter illustratie kan worden gedacht aan:

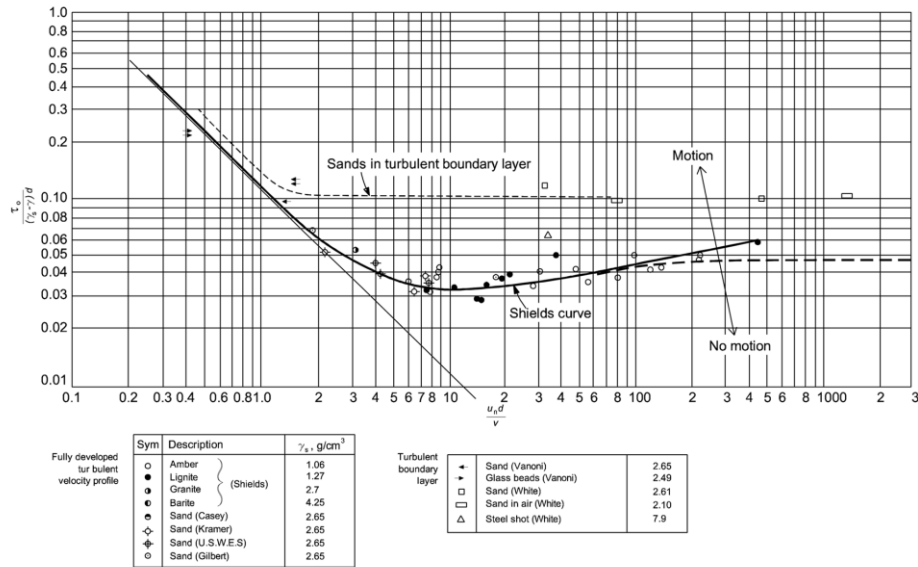
- **Uitzeving:** bij stroming (door rivier en/of scheepvaart) over een gegradeerde bedding zullen fijnere korrels makkelijker bewegen dan de zwaardere grovere korrels. Bij lage snelheden kunnen fijne korrels weggespoeld worden en kan de bedding een grove toplaag vormen (afpleistering). Echter, voor het in beweging brengen van het beddingmateriaal kunnen de fijne korrels worden afgeschermd van stroming door de grovere korrels en vice versa (hiding en exposure). Per saldo leidt dit ertoe dat het mengsel als geheel in beweging komt met een mobiliteit die ergens ligt tussen de mobiliteit van de fijne en van de grove fractie (equal mobility). En dat leidt dan voor de gemengde bedding tot transport van grof sediment bij lagere snelheden dan bij een bedding die alleen uit grof sediment bestaat. Bij scheepspassages met geringe kielspeling zijn de retourstromingsnelheden mogelijk groot genoeg om niet alleen fijn sediment weg te spoelen, maar om het gehele mengsel in transport te brengen. Er zal dan een proces van uitzeving kunnen optreden die niet per definitie zal leiden tot vergroving.
- **Bodemtransport versus zwevend transport:** wanneer het bodemmateriaal om het schip eenmaal in beweging is, zal het grovere sediment zich rollend en springend langs de bodem verplaatsen (bodemtransport), en het fijner sediment door turbulentie hoger in de verticaal met de stroming worden meegevoerd. De 'wolkjes' sediment in de proeven van Robijns (2014) in Figuur 2-21 en Figuur 2-23 zijn voorbeelden van het zwevend sediment. In de kortdurende pulsen van retourstroom en volgroom zal het grove sediment snel weer tot stilstand komen, maar kan het iets langer duren voordat het fijnere zwevend transport weer uitzakt. Het is onbekend of dit proces ertoe zou kunnen leiden dat grind naar diepere lagen wordt 'gewerkt' en zand deze lagen dan afdekt. Deze hypothese, die het onderscheid in samenstelling links en rechts zou kunnen verklaren, kan nader worden onderzocht, bijvoorbeeld met laboratoriumexperimenten.

- Sortering bij beddingvormen: wanneer duinen zich ontwikkelen in een zand-grind bodem, zal een proces optreden waarbij het grove materiaal zich verzamelt in de troggen en de duinkammen daardoor een relatief fijne samenstelling krijgen. Het sorteringsproces lijkt zich in theorie vooral op de lijzijde van de duinen te ontwikkelen onder invloed van gravitatie. Het is interessant te observeren dat het effect van duinen over de rivierbreedte van de Waal geen significante verschillen oplevert (Bongers, 2021) terwijl de verschillen in bodemsamenstelling van de toplaag en de scheepsstromingen wel significant verschillend zijn. In hoeverre deze interacties tussen duinen, sedimentsoortering en scheepvaart met elkaar samenhangen is nog niet teruggevonden in de beschouwde literatuur.
- 'Winnowing': een speciale situatie kan optreden bij een bedding met relatief veel grof sediment (grind, stenen). In die situatie kan het fijnere materiaal uit de bedding spoelen tussen de grove stenen door, zelfs als het grove materiaal immobiel is (in geval van afpleistering). Dit is een proces wat bijvoorbeeld een rol speelt bij het ontwerp van granulaire filters in de waterbouw, waar dit juist moet worden voorkomen. In bijvoorbeeld de Niederrhein en Boven-Rijn, en in de buitenbochten in de Boven-Waal, zijn er locaties waar (tijdelijke) afpleisterlagen zijn waargenomen en 'winnowing' mogelijk een rol kan spelen. Echter op grote delen van de bedding in de Rijntakken is het beddingmateriaal breed gesorteerd, en is het niet aannemelijk dat het proces zal optreden.

2.4.2 Rekenmethoden voor erosie (kwantitatief)

De berekeningen kunnen worden gemaakt met behulp van numerieke modellen, maar dat vereist een grote mate van detail. Daarnaast kan gebruik worden gemaakt van empirische modellen die zijn gebaseerd op gemeten bodemveranderingen en een inschatting van opgetreden krachten bij scheepspassages. De laatste categorie is de meest gangbare methode in de praktijk.

Gebruik van het Shields diagram is een basis voor veel sediment-transport modellen. Echter, de curve is gebaseerd op uniforme stroming in open waterlopen met logaritmisch snelheidsprofiel ('law of the wall'). Deze theorie geldt echter niet voor de complexe niet stationaire en zeer turbulente stroming rond een schip. Bijvoorbeeld Wei et al. (2020) tonen dat in een situatie met een schroefstraal de Reynolds schuifspanning aan de bodem afnam tot onder de kritische waarde, de ontgronding bleef toenemen door de hoge turbulentie (d.w.z. hoge turbulente kinetische energie in de stroming, en hoge gemiddelde kinetische energie aan de bodem).



Figuur 2-24 Shields diagram

De erosie door retourstroming kan worden geschat door (Hoffmans en Verheij, 1997):

$$\frac{z_m}{h} = \sqrt{\frac{t}{t_1}} \quad \text{of} \quad \frac{z_m}{h} = \sqrt{\frac{(\alpha U - U_c)^4 t}{K h^2 \Delta^{1.7}}} \quad \text{of} \quad z_m = (\alpha U - U_c)^2 \sqrt{\frac{t}{K \Delta^{1.7}}}$$

Met $U = U_r + U_i$. Hierin is h de waterdiepte (m), K ($= 330$ uren m^2/s^4) is een ontgrondingsconstante, r_0 ($= 0,1$) is de relatieve (dieptegemiddelde) turbulentie-intensiteit (-), t is de tijd, t_1 is de karakteristieke tijd waarin $z_m = h$, U is de maximale stroomsnelheid (m/s), U_c is de kritische stroomsnelheid (m/s), U_i is de spuistroomsnelheid (m/s), U_r is de retour stroomsnelheid (m/s), z_m is de erosie, (m), α ($= 1,5 + 5r_0 = 2$) is de turbulentie-coëfficiënt en Δ ($= 1,65$) is de relatieve dichtheid (-). N.B. de tijden t en t_1 hebben de dimensie van uur. De tijdsduur (dt) per scheepsbeweging wordt benaderd door:

$$dt = \frac{L}{V_s}$$

waarin L is de scheeps lengte en V_s is de vaarsnelheid. Hieruit volgt dat na N scheepsbewegingen de erosiediepte voor de bodemverdediging volgt uit:

$$z_m = (\alpha U - U_c)^2 \sqrt{\frac{N \cdot dt}{K \Delta^{1.7}}}$$

Opmerking: de bovengenoemde relaties zijn afgeleid voor de ontwikkeling in de tijd van de groei van een ontgrondingskuil. Hier is geen sprake van een kuil, maar meer van spoorvorming, dat wil zeggen een in de tijd afnemende daling van de bodem over een beperkte breedte. Het erosieproces is echter wel vergelijkbaar en daarom is de formule als indicatie van de te verwachten bodemdaling voor een individueel schip bruikbaar. Echter, in het model zit niet een eventuele opvulling van het spoor door verplaatst bodemmateriaal door een schip dat naast het spoor vaart.

Het model geeft dus een bovengrens van wat in de praktijk verwacht mag worden. In paragraaf 3.4 wordt getoond dat deze methode tot onrealistische waarden leidt voor een sommatie van meerdere scheepspassages over een laagwaterperiode.

Om de invloed van scheepvaart op het sedimenttransport te simuleren wordt vaak gebruik gemaakt van transportformules die op basis van de stroomsnelheid en turbulentie bij de bodem een schatting geven van de opwerveling (entrainment) of concentratie vlak bij de bodem. Door de kortdurende passage kan het sedimenttransport als een sterk niet-stationaire puls worden beschouwd, waarvoor de meeste transport relaties eigenlijk niet van toepassing zijn. García et al (1998) tonen dat voor hun onderzochte gevallen de entrainment-formule van García en Parker (1991) een goede indicatie gaf van het waargenomen transport en erosie voor condities in de Mississippi met een bedding van zand. In andere studies worden diverse transportmodellen toegepast, maar in alle gevallen is sprake van grote onzekerheden. De berekeningen op basis van deze formuleringen moeten daarom met voorzichtigheid worden gehanteerd. Zie voor verdere voorbeelden paragraaf 3.4.

Robijns (2014) stelt verder dat kielspeling vaak onbekend is en variabel. De erosieformulering kan daarom beter worden gerelateerd aan de diepgang (T , de diepteligging bij stilstand). Hoewel dit ten koste gaat aan de nauwkeurigheid, hoeven geen schattingen worden gemaakt van de inzinking/squat (z) van het varende schip. Voor de kielspeling geldt $UKC = h_0 - T - z$.

Robijns (2014) onderscheidt twee zones voor de UKC: een zone voor kleine waarde van UKC waarbij grenslagen elkaar raken en de snelheid onder de kiel wordt afgeremd, en een zone voor grotere waarden van UKC. De grens wordt bepaald door de groei van de grenslagen in combinatie met de lengte van het schip. Robijns geeft een ruwe schatting voor de overgangen, maar stelt daarbij dat de werkelijke situatie meer complex is en onder andere afhangt van de ruwheid.

$$\frac{L_{PP}}{UKC} \leq 77 \text{ (no interaction); } \frac{L_{PP}}{UKC} \geq 115 \text{ (interaction)}$$

Een overzicht van ervaringen en van erosierelaties in literatuur voor erosie door schroefstralen is gepresenteerd door Wei et al. (2020). Veel studies hebben betrekking op de situatie waarbij het schip stilligt, en de schroefstraal langdurig op een vaste locatie kan leiden tot lokale ontgroning. Bij een varend schip is bij passage van de boeg al veel sediment in beweging, en kan de erosie bij de schroefstraal niet als 'clear scour' worden behandeld. Daarnaast wordt in het algemeen geen rekening gehouden met de asymmetrische ontwikkeling van de erosie door de werveling door de draaiing van de schroef. Froude getal en afstand tot de bodem spelen een belangrijke rol bij de erosie.

In enkele studies, zoals Ji (2013), wordt ook de aanwezigheid van secundaire golven, bijvoorbeeld de boeggolf, genoemd als een bijdrage aan het sedimenttransport. De drukvariaties die door deze golven worden veroorzaakt, dragen bij aan een resuspensie van het sediment. De totale bijdrage hiervan is onduidelijk, maar lijkt gering ten opzichte van de transporten door retourstroom.

3 Inschatting van scheepvaartinvloed op sedimenttransport in Boven-Rijn, Waal en Maas

3.1 Aanpak

Om de invloed van scheepvaart op een aantal locaties in de Rijntakken en in de Maas te beoordelen, zijn in dit hoofdstuk de resultaten van enkele handberekeningen gepresenteerd.

De berekeningen zijn in een paar stappen uitgevoerd voor een aantal karakteristieke locaties:

- 1 Bepaling van de waterdiepte voor laagwateromstandigheden (beperkte kielspeling) en duur van een dergelijke periode (gebaseerd op waterstandsverloop 2020).
- 2 Kenmerken van de voorkomende schepen en geschat aantal passages.
- 3 Bereken voor de betreffende schepen, bij de gekozen waterdiepte, de maximale retourstroming bij de passage van het schip. We gaan uit van de methode van Schijf (1949) voor gemiddelde retourstroming (vereenvoudigde versie), en de vertaling naar maximum retourstroom met factor α .
- 4 Bereken de gemiddelde grootte van bodemtransport en zwevend transport onder het schip met transportformules (voorspellers voor bodemtransport en concentratie bij de bodem, of voor sediment entrainment) op basis van de retourstroming. Uiteraard rekening houdend met alle beperkingen en tekortkomingen van deze aanpak.
- 5 Veronderstel dat sediment dat in transport wordt gebracht door de retourstroming wordt verplaatst met deze retourstroming (voor zwevend transport is dat door berekend debiet onder het schip te vermenigvuldigen met de gemiddelde concentratie) gedurende de duur van de passage van het schip. Dit geeft dus een kortdurende sedimenttransport puls (nadat het schip is gepasseerd zakt het sediment weer uit). Bij bergvaart zal dit transport stroomafwaarts zijn (langs de bodem wordt de stroming versneld in stroomafwaartse richting), en dus bijdragen aan het totale transport van de rivier. Bij dalvaart zal dit juist leiden tot een vertraging van de stroming bij de bodem, en dus het normale sedimenttransport kortdurend reduceren of zelfs kunnen omkeren.
- 6 Door het aantal passages gedurende een laagwaterseizoen te vermenigvuldigen met de sediment puls per schipspassage, met onderscheid per scheepstype, kan het cumulatieve aandeel aan het jaarlijkse sedimenttransport worden ingeschat.

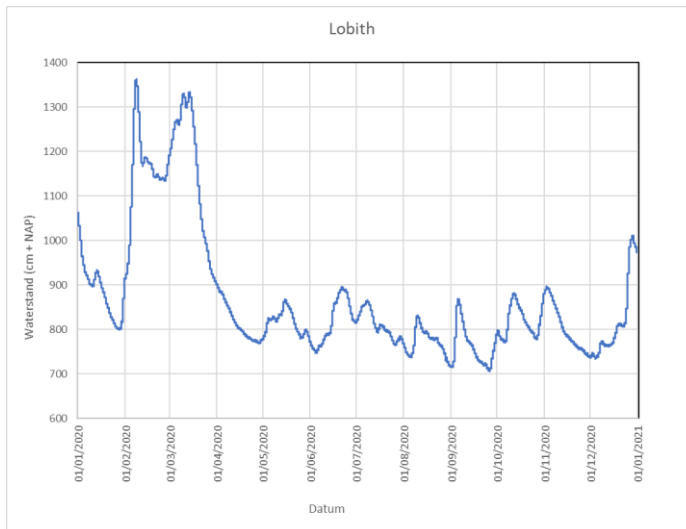
In deze aanpak is niet gekozen voor een verdere opsplitsing van selectief transport per sedimentfractie, omdat daarbij ook de ontwikkeling van sortering van sediment in de bodem (d.w.z. de beschikbare fractieverdeling in de actieve laag) moet worden gesimuleerd. Dat vraagt om een meer geavanceerde (numerieke) modellering. Dat uitzeying door selectief transport een belangrijke rol speelt, blijkt uit het forse onderscheid in bodemsamenstelling tussen linker- en rechterzijde van de rivier (zie paragraaf 2.1).

3.2 Locaties

Voor de Rijntakken:

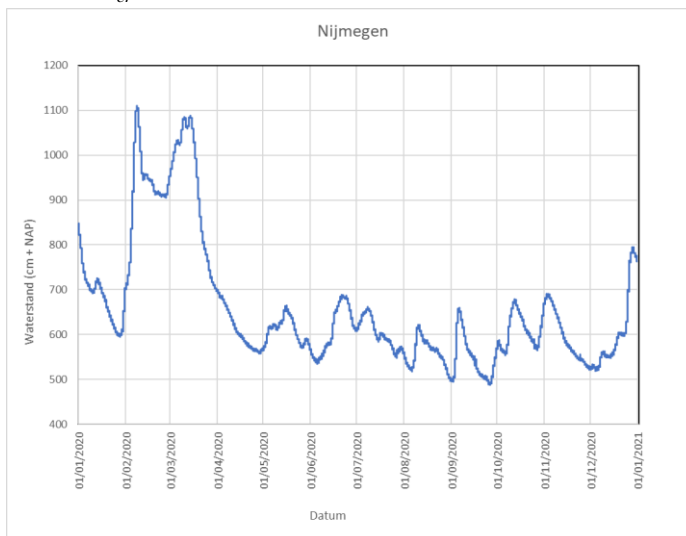
- Locatie Lobith/Tolkamer, Boven-Rijn (rond km 863)
 - Bodemligging, +3 à 3,5 m + NAP
 - Breedte 350 m
 - Waterstand gedurende laagwaterseizoen, mei t/m november: +7,5 à 8,5 m+NAP, zie Figuur 3-1,
 - Aanname: waterdiepte voor maatgevende berekeningen: 4 m

- Aanname: Stroomsnelheid ongestoorde rivier = 0,9 m/s
- Bodemsamenstelling (benadering): $D_{50} = 5$ mm, $D_{16}=1$ mm, $D_{84}=11$ mm, $D_{90}=14$ mm
- Valsnelheid van $D_{50} = 0,32$ m/s
- $\theta_{cr} = 0.053$ (Van Rijn, 1984)



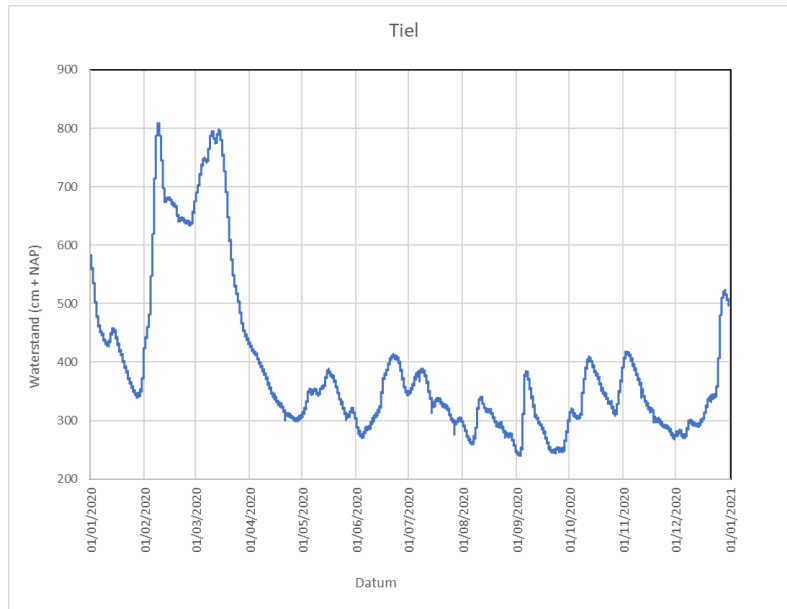
Figuur 3-1 Waterstandsverloop meetstation Lobith, in 2020

- Locatie Nijmegen, Waal, juist bovenstrooms aansluiting Maas-Waalkanaal (rond km 886):
 - Bodemligging, 1,8 à 2,0 m + NAP
 - Breedte 250 m
 - Waterstand gedurende laagwaterseizoen, mei t/m november: +5,0 à 6,0 m+NAP, zie Figuur 3-2,
 - Aanname: waterdiepte voor maatgevende berekeningen: 4,2 m
 - Aanname: Stroomsnelheid ongestoorde rivier = 1,0 m/s
 - Bodemsamenstelling (benadering): $D_{50} = 1,5$ mm, $D_{16}=0,5$ mm, $D_{84}=5$ mm, $D_{90}=6$ mm
 - Valsnelheid van $D_{50} = 0,17$ m/s
 - $\theta_{cr} = 0.0373$ (Van Rijn, 1984)



Figuur 3-2 Waterstandsverloop meetstation Nijmegen, in 2020

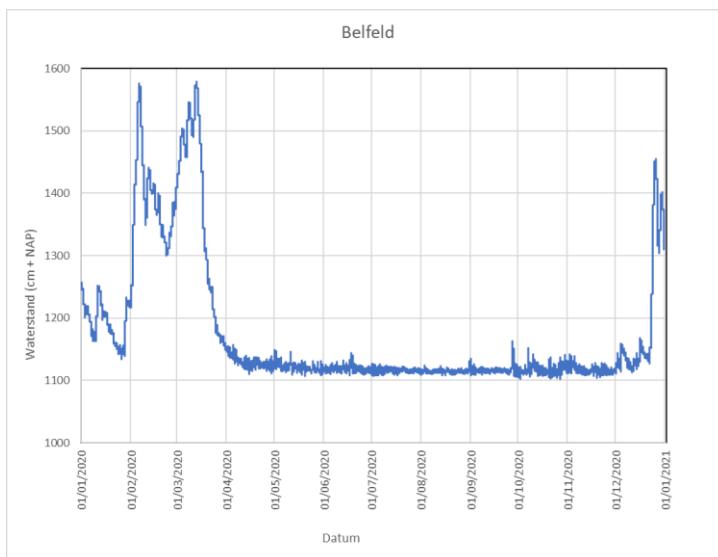
- Locatie Tiel, Waal, juist bovenstrooms aansluiting Amsterdam-Rijnkanaal (rond km 912)
 - Bodemligging, -1 à -1,5 m + NAP
 - Breedte 230 m
 - Waterstand gedurende laagwaterseizoen, mei t/m november: +2,5 à 3,5 m+NAP, zie Figuur 3-3,
 - Aanname: waterdiepte voor maatgevende berekeningen: 4 m
 - Aanname: Stroomsnelheid ongestoorde rivier = 1,1 m/s
 - Bodemsamenstelling (benadering): $D_{50} = 1,2$ mm, $D_{16}=0,6$ mm, $D_{84}=3$ mm, $D_{90}=4$ mm
 - Valsnelheid van $D_{50} = 0,15$ m/s
 - $\theta_{cr} = 0.035$ (Van Rijn, 1984)



Figuur 3-3 Waterstandsverloop meetstation Tiel, in 2020

En voor de Maas:

- Locatie Belfeld-beneden, Maas, juist benedenstrooms van de sluizen (na km 101)
 - Bodemligging, 6 à 7 m + NAP
 - Breedte rivier-sectie 100 m
 - Waterstand gedurende laagwaterseizoen, mei t/m november: 11,3 m+NAP, zie Figuur 3-4,
 - Aanname: waterdiepte voor maatgevende berekeningen: 4,5 m
 - Aanname: Stroomsnelheid ongestoorde rivier = 0,1 m/s
 - Bodemsamenstelling (benadering): $D_{50} = 3$ mm, $D_{16}=0,4$ mm, $D_{84}=25$ mm, $D_{90}=30$ mm
 - Valsnelheid van $D_{50} = 0,24$ m/s
 - $\theta_{cr} = 0.046$ (Van Rijn, 1984)



Figuur 3-4 Waterstandsverloop meetstation Belfeld, in 2020

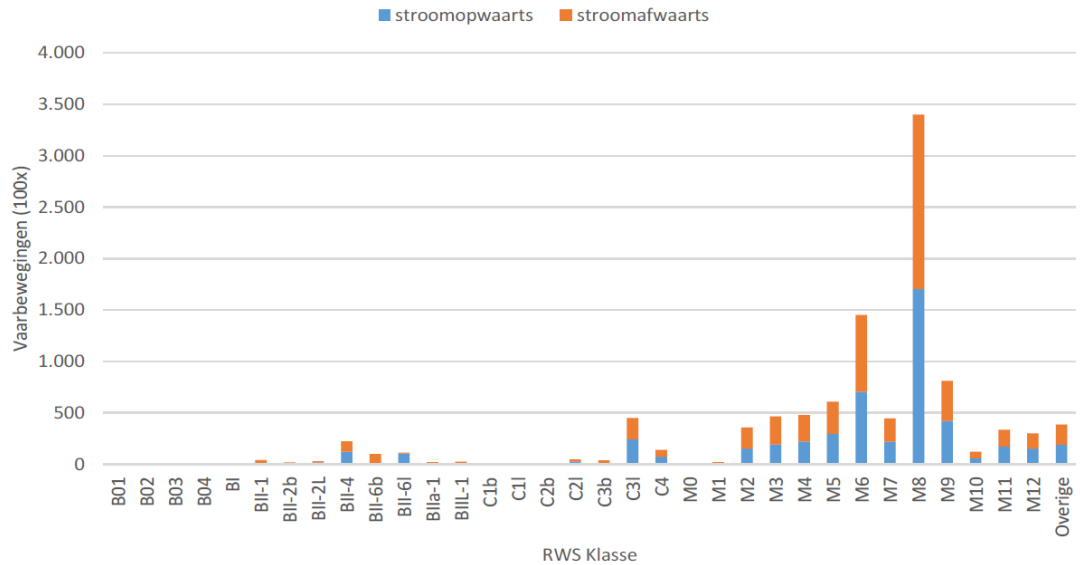
3.3 Scheepvaart

3.3.1 Scheepvaartklassen en aantallen

Voor de typen schepen op de rivieren hanteren we de classificatie zoals gedefinieerd in de Richtlijnen Vaarweg 2020 (Rijkswaterstaat, 2020). Onderstaande tabel geeft een overzicht van de belangrijkste scheepvaartklassen op de rivieren die kunnen bijdragen aan het sedimenttransport. In de tabel staan de kenmerkende lengtes L , breedte B_s , diepgang geladen T , aantal passages gemeten op de Midden-Waal (traject Maas-Waalkanaal tot Druten) gemiddeld voor de periode 2009-2018 (Van de Ven, 2021), zie ook Figuur 3-5.

RWS Klasse	Naam	CEMT Klasse	L (m)	Bs (m)	T (m) (max)	Aantal/ jaar	Aantal %
M2	Kempenaar	II	50-55	6.6	2.6	4500	4
M3	Hagenaar	III	55-70	7.2	2.6	5800	5
M4	Dordtmund-Eems	III	67-73	8.2	2.7	6200	6
M5	Verl. Dordtmund Eems	III	80-85	8.2	2.9	7700	7
M6	Rijn-Herne schip	IVa	80-85	8.2	2.9	1900	2
M7	Verlengd Rijn-Herne	IVa	105	9.5	3	5700	5
M8	Groot Rijnschip	Va	110	11.4	3	43800	40
M9	Verl. Groot Rijnschip	Va	135	11.4	3.5	10300	9
M10	Maatg. Schip 13,5 * 110 m	Vla	110	13.5	4	1500	1
M11	Maatg. Schip 14,2 * 135 m	Vla	135	14.2	4	4400	4
M12	Rijnmax schip	Vla	135	17	4	3900	4
BLL-4	4 baks duwstel		185-190	22.8	3.5-4	2800	3
BLL-6l	6 baks duwstel lang (berg)		270	22.8	3.5-4	1300	1
BLL-6b	6 baks duwstel lang (dal)		170-190	34.2	3.5-4	1300	1
C3l	Koppelv. Va+Eur.II lang		170-190	11.4	3.5-4	5800	5
C4	Koppelv. Va+3 Europa II		185	22.8	3.5-4	1900	2

Vaarbewegingen per RWS-klasse Waal MWK-Druten (2009-2018)



Figuur 3-5 Scheepspassages onderverdeeld naar bergvaart (stroomopwaarts) en dalvaart (stroomafwaarts) voor Midden-Waal periode 2009-2018.



Figuur 3-6 Voorbeeld van een Groot Rijnschip (M8): de MEANDER met een lengte van 110 m (Foto: Kees Sloff, 2021)

Het totale aantal schepen dat het traject in de Waal passeert bedraagt ruim 100,000 schepen per jaar, waarbij circa 50% opvaart en 50% afvaart. De opvaart (bergvaart) is vaker geladen, en heeft grotere diepgang dan de afvaart (dalvaart) die vaker ongeladen is. De opvarende schepen houden over het algemeen de rechterzijde van de rivier, maar diep geladen schepen kunnen daarvan afwijken om de diepere delen van de rivier volgen.

Het Groot Rijnschip (M8) (zie Figuur 3-6), het Rijn-Herneschip (M6) en het verlengd Groot-Rijnschip (M9) zijn samen verantwoordelijk voor de helft van alle scheepvaartbewegingen op de Waal. Daarnaast spelen ook de grotere schepen M11 en M12 en duwstellen en koppelverbanden (d.w.z. motorvrachtschip met eraan gekoppeld 1 of meer duwbakken) een niet te verwaarlozen rol vanwege hun relatief forse diepgang en motorvermogen.

Schepen van het type M9 (Verlengd Groot Rijnschip), worden in de meeste gevallen aangedreven met een enkelvoudige aandrijving met een vermogen van 1200 tot 2000 pk. De nieuwere schepen van dit scheepstype zijn steeds vaker uitgerust met een dubbele aandrijving van bijvoorbeeld 2 x 1200 pk. De krachtigste aandrijving zien we bij de moderne duwboten, zoals de VEERHAVEN en HERKULES. Sommige van deze duwboten hebben zelfs een drievoudige aandrijving van 3 x 2000 pk. Figuur 3-7 toont foto's van het stroombeeld achter de Veerhaven XI (dit schip heeft drie 5-blads schroeven Ø 2050 mm in Damen Optima straalbuizen, en 3 x 1850 pk).

In de Maas is het aantal schepen (beroepsvaart geringer). Per jaar passeren circa 17000 schepen de sluisen Belfeld. De exacte verdeling van schepen is niet verder onderzocht.

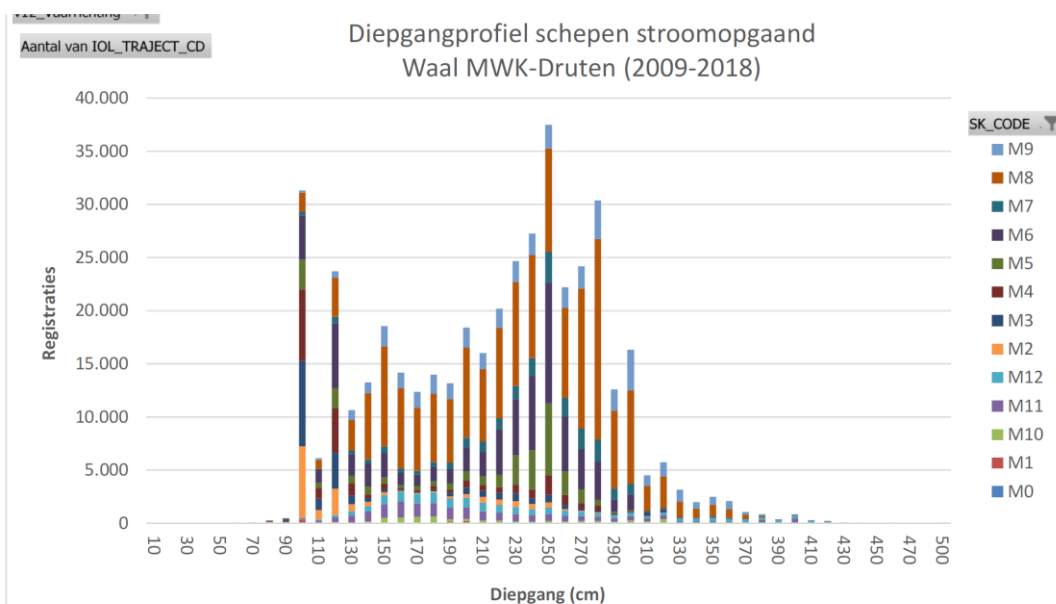


Figuur 3-7 Strooming en golven achter de Veerhaven XI - Ijsbeer (ongeladen 6-baks duwstel, dalvaart) op de Waal ter hoogte van km 878 (Foto's Kees Sloff, 2022)

3.3.2 Diepgang

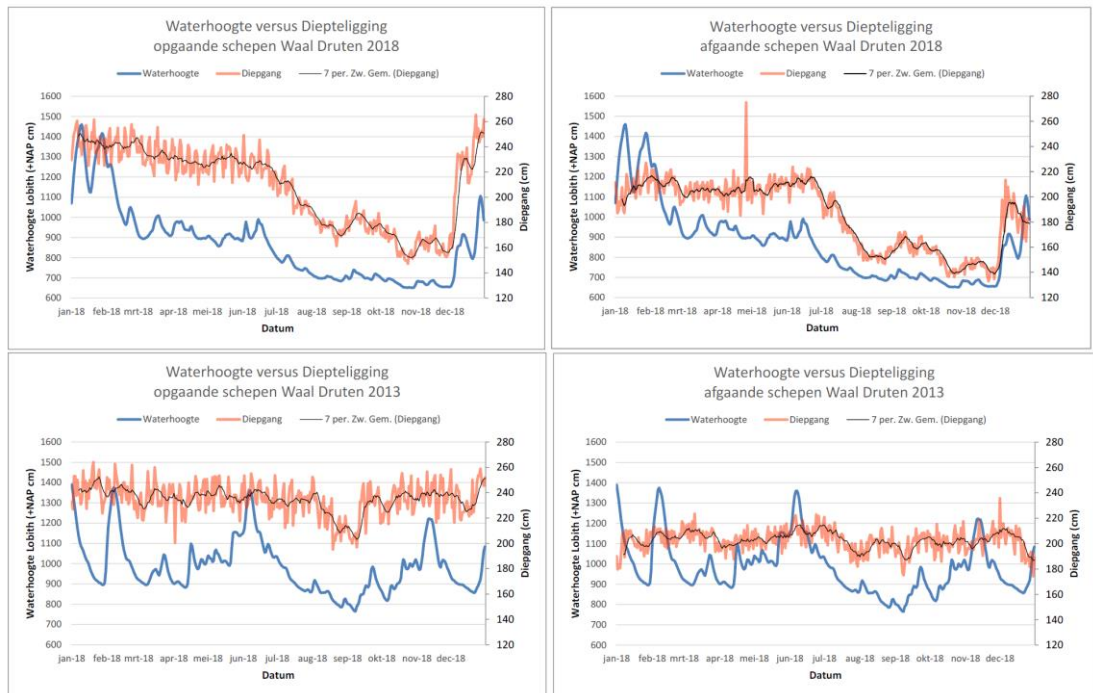
De gemiddelde diepgang van schepen op de Waal is ongeveer 210 cm (220 opvarend, en 197 afvarend), op de Nederrijn en IJssel ongeveer 180 cm. Dit houdt verband met de gemiddelde grootte en belading van de schepen. Op de Waal en Boven Merwede liggen opvarende schepen gemiddeld 20 cm (Waal) lager dan afvarende schepen.

De verklaring hiervoor is dat het totale transportvolume Rotterdam richting Duitsland groter is dan andersom. Gemiddeld zijn opvarende schepen daarom zwaarder beladen dan afvarende schepen. In principe is er sprake van een forse spreiding rond dit gemiddelde, omdat een deel van de schepen volledig ongeladen en een ander deel volledig geladen vaart. Door uit te gaan van gemiddelde vaardiepte zou dat leiden tot een overschatting van sedimenttransporten ten aanzien van het aantal ongeladen schepen, en onderschatting bij het aantal geladen schepen. De gevoeligheid van de resultaten is hiervoor niet verder onderzocht. De aflaaddiepte neemt af zodra de waterstand Lobith < 9 m wordt. Figuur 3-8 toont een overzicht van de diepgang van schepen op het Midden-Waal traject tussen Nijmegen en Druten. Voor klasse M8 en M9 is de meest voorkomende diepgang orde 2,80 m. Het aantal schepen met een diepgang groter dan 3 m is zeer gering.



Figuur 3-8 Diepgang van schepen per type voor de Midden-Waal periode 2009-2018 (Van de Ven, 2021).

Figuur 3-9 toont hoe de diepgang bij lage afvoeren wordt gereduceerd. In het jaar 2018 met lange droogte zijn i.v.m. lage waterstanden forse dieptebeperkingen opgetreden, terwijl in die perioden het aantal scheepsbewegingen is toegenomen om de lagere beladingsgraad te compenseren.

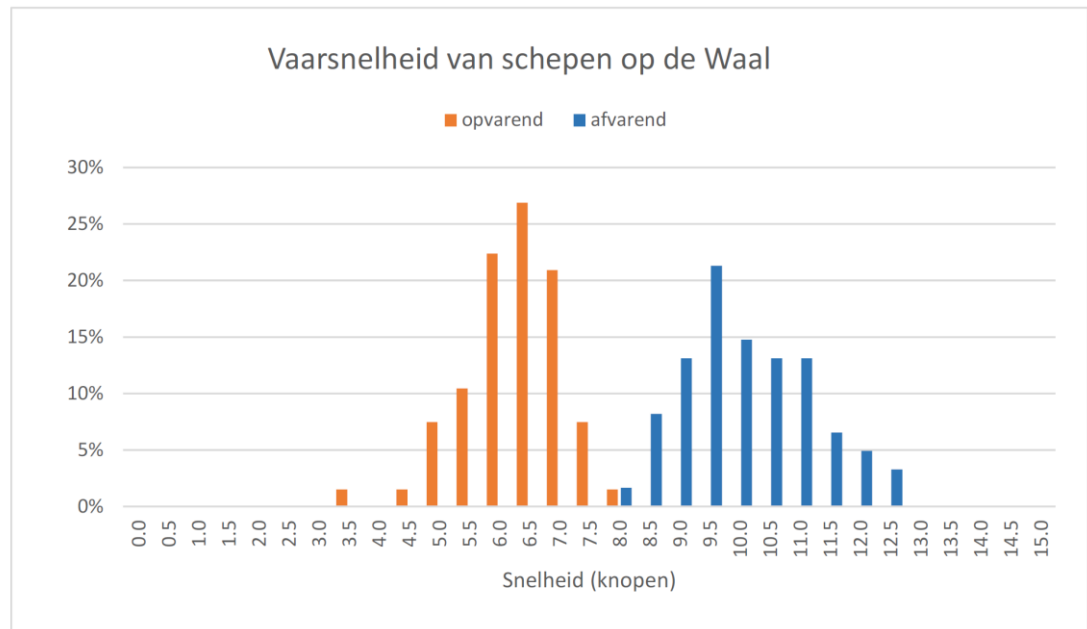


Figuur 3-9 Gemiddelde diepgang op- en afgaande schepen op de Waal voor 2 periodes (Van de Ven, 2021)

In de Maas is door de stuwen sprake van minder diepgang beperkingen. Daarentegen is de diepgang bij de sluis Belfeld beperkt tot 2.80 m. Voor de analyse gaan we ervan uit dat de gemiddelde diepgang van scheepvaart dat Belfeld passeert ongeveer 2.5 m bedraagt.

3.3.3 Vaarsnelheid

Uit Figuur 3-10 blijkt dat de gemiddelde snelheid van opvarende schepen op de Waal circa 6,2 knopen bedraagt, 11,5 km/uur, 3,19 m/s; voor afvarende schepen 7,9 knopen, 14,6 km/uur, 4.06 m/s. Er blijkt echter een redelijk grote variatie rond deze waarden op te treden, wat wordt beïnvloed door vele factoren, zoals onderscheid in scheepstypes (motorvermogen, stroomlijn, grenssnelheid), belading, stromingscondities, etc. Wanneer de scheepssnelheid aan het stromende water wordt gerelateerd (vergeleken met de gemiddelde stroomsnelheid in de rivier van 0,9 m/s, 3,3 km/u) dan bedraagt de gemiddelde vaarsnelheid ongeveer 14,5 km/uur, onafhankelijk van lading en richting. Dit komt redelijk overeen met (een groot percentage van) de grenssnelheid van de schepen zoals kan worden berekend met de methode van Schijf. Voor de berekeningen is daarom gebruik gemaakt van deze grenssnelheden voor zowel de Rijn als de Maas.



Figuur 3-10 Verdeling van vaarsnelheden op de Waal voor bergvaart en dalvaart (1 knoop = 1,852 km/uur) (Van de Ven, 2021)

3.4 Sedimenttransport berekening

In deze studie is gekozen om een voorzichtige schatting te maken van het cumulatieve effect van de scheepspassages op het gemiddelde (totale) transport van beddingmateriaal in een dwarsraai van de rivier. Daarvoor combineren we de statistiek van de scheepvaartbewegingen zoals gepresenteerd in voorgaande paragrafen (Van de Ven, 2021), met de vuistregels en empirische relaties voor retourstroom, en daaruit volgend het potentieel sedimenttransport. De literatuur biedt geen gevalideerde methode voor deze berekeningen, en daarom is het slechts mogelijk om op deze wijze een indicatieve schatting maken.

Uitgangspunten en beperkingen bij deze berekening zijn:

- Voor de rivierstroming en waterdiepte zijn gemiddelde laagwatercondities aangehouden.
- Passerende schepen beïnvloeden elkaar niet noemenswaardig door de relatief grote breedte van de vaarweg. Desondanks kunnen er soms situaties optreden waarbij 3 schepen elkaar passeren in een dwarsraai (bijvoorbeeld geladen opvaart in binnenbocht, ongeladen opvaart in buitenbocht, en geladen afvaart in rivieras). Deze situaties zijn dusdanig beperkt dat deze geen significante invloed hebben op het cumulatieve effect.
- De kielspeling is variabel door de variabiliteit van de bodemligging in plaats en tijd, maar ook door variabiliteit van waterstanden (en van beladingsgraad en vaarsnelheid). Desondanks passen we een constante gemiddelde kielspeling toe voor de berekeningen. Er wordt geen onderscheid gemaakt in aantal volledig ongeladen en volledig geladen schepen rond dit gemiddelde.
- De schepen varen met een snelheid die in orde van grootte overeenkomt met de grenssnelheid zoals die kan worden berekend met de methode van Schijf. In werkelijkheid zal de vaarsnelheid niet hoger zijn dan circa 80% van de grenssnelheid.

- Voor de sedimenttransporten gaan we uit van stroming onder de kiel, en niet de stromingen zijdelings van het schip. Hoewel een deel van de retourstroom en het opgewerkte sediment bij de boeg zijwaarts wordt verplaatst, zal ook dit sediment met retourstroom worden afgevoerd. Uitgaande van de maximale snelheid onder de boeg (en niet de snelheid in vaarrichting) zal 'entrainment' en verplaatsing in orde van grootte op deze wijze indicatief zijn benaderd. Deze keuze is bepaald door inzichten afkomstig uit observaties in de laboratoriumexperimenten, en de waarnemingen gerapporteerd in de literatuur. Een accurate voorspeller voor sedimenttransport onder schepen is niet beschikbaar.
- De invloed van de schroefstraal op de bedding is niet beschouwd. In potentie kan het door de schroefstraal opgewerkte sediment meegevoerd worden met de stroming en dus ook bijdragen aan een toename van gemiddeld sedimenttransport. Er zijn onvoldoende gegevens uit het veld en geen geschikte methoden gevonden in literatuur om dit effect te kwantificeren.
- Invloeden van sedimentsoortering en beddingvormen zijn niet in detail beschouwd. In de vuistregels wordt uitgegaan van een constante hydraulische ruwheid (Chézy ruwheid 50 m^{1/2}/s) en een uniform sedimentmengsel met een geschatte waarde voor D_{50} en D_{90} . Zowel in de Waal als in de Maas is onderscheid in samenstelling aan de linker en rechterzijde van de rivier: aan de linkerkant met (geladen) opvaart is over het algemeen sprake van een fijner sediment mengsel (meer zand) dan aan de rechterzijde met (ongeladen) afvaart.

In onderstaande tekst-box is de aanpak in detail beschreven.

Aanpak sedimenttransport schattingen voor 4 locaties

1. Bereken de (absolute) maximale en gemiddelde retourstroomsnelheid. Gebruik hiervoor de empirische relaties of de analytische benaderingen van Schijf of Bouwmeester. In deze studie hebben we de benadering voor retourstroming volgens Schijf gehanteerd. De daaruit volgende grenssnelheid is gebruikt als benadering van de maximale retourstroming onder de kiel (ruwweg aangenomen dat vaarsnelheid is 80% van de grenssnelheid en U_{max} is ongeveer 1,3 maal de gemiddelde retourstroom)
2. Bereken sedimenttransporten. Vanwege de hoge schuifspanningen beschouwen we zowel suspensie transport ($\theta = 5x\theta_{cr}$ à $50x\theta_{cr}$; $w_s/u_* \sim 1$) als bodemtransport. Hoge schuifspanning en turbulentie sluit niet uit dat grover materiaal zich nog steeds als bodemtransport gedraagt. Voor suspensie: bereken de concentratie bij de bodem (c_a) of de entrainment (Es). Voor bodemtransport of totaal transport, beschouw een transport formule zoals Engelund en Hansen (1967) of Meyer-Peter en Müller (1949) of Van Rijn (1984).

Bijvoorbeeld een suspensie concentratie bij de bodem (niveau $a=0.01 \cdot h$) met Van Rijn (1984):

$$c_a = 0.015 \frac{D_s}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

$$\text{Waarin } T = \frac{(C/C_{90})^2 \theta - \theta_{cr}}{\theta_{cr}}$$

$$\theta = \text{Shields parameter } \theta = \frac{u_r^2}{C^2 \Delta D_{50}} = \frac{\tau_r}{(\rho_s - \rho) g D_{50}}$$

$$D_* = \text{dimensieloze korrelparameter } D_* = D_{50} \left(\frac{\Delta g}{v^2} \right)^{1/3}$$

$$C_{90} = \text{korrelruwheid } C_{90} = 18 \log \left(\frac{12h}{D_{90}} \right)$$

en $D_s = D_{50}$ als $T < 25$; a = referentiehoogte, neem bijvoorbeeld $0.05 \cdot (h - T)$; θ_{cr} = kritische Shields waarde (zie Van Rijn, 1984); ν = viscositeit ($1 \cdot 10^{-6}$); De formule is gevoelig voor de keuze van de waarde voor a .

Of, bijvoorbeeld de formule van Zysermann en Fredsøe (1994) voor de suspensieconcentratie bij de bodem (niveau $a=0.05 \cdot h$):

$$c_a = \frac{0.331 \left([C/C_{90}]^2 \theta_r - 0.045 \right)^{1.75}}{1 + 0.72 \left([C/C_{90}]^2 \theta_r - 0.045 \right)^{1.75}} = \frac{0.331 \cdot T^{1.75}}{\theta_{cr}^{1.75} + 0.72 \cdot T^{1.75}}$$

Of bijvoorbeeld de formule van Akiyama en Fukushima (1986) voor de entrainment van suspensief sediment (niveau $a=0.05 \cdot h$):

$$E_s = \begin{cases} 0; & Z < Z_c \\ 3 \cdot 10^{-12} Z^{10} \left(1 - \frac{Z_c}{Z} \right); & Z_c < Z < Z_m \\ 0.3; & Z > Z_m \end{cases}$$

Met $Z = \frac{u_*}{w_s} R_{ep}^{1/2}$; $Z_c = 5$; $Z_m = 13.2$. Voor evenwichtssituaties geldt dat $c_a = E_s$.

Of, bijvoorbeeld Garcia en Parker (1991) voor de entrainment van suspensief sediment (niveau $a=0.05 \cdot h$):

$$E_s = \frac{AZ_u^5}{1 + (A/0.3)Z_u^5} \text{ met } A = 1.3 \cdot 10^{-7}.$$

En $Z_u = \frac{u_*}{w_s} R_{ep}^{0.6}$ met Reynolds partikel parameter $R_{ep} = \frac{\sqrt{g \Delta D_{50}} D_{50}}{\nu}$

Of Engelund en Hansen (1967) voor totaal transport:

$$s = 0.05 \sqrt{g \Delta D_{50}^3} \left(\frac{u_*}{\sqrt{g \Delta D_{50}}} \right)^3 \left(\frac{u}{\sqrt{g \Delta D_{50}}} \right)^2 = 0.05 \frac{u^5}{\sqrt{g C^3 \Delta^2 D_{50}}}$$

Netto flux per eenheid van oppervlak (in $m^3/s/m^2$) naar de bodem bestaat uit een entrainment-flux E_r en een depositie-flux D_r : $E_r - D_r = w_s (E_s - c_b)$ waarbij w_s = valsnelheid (m/s), c_b is sedimentvolume-concentratie (m^3/m^3) aan de bodem en dimensieloze $E_s = E_r/w_s$. Ook hier geldt dat voor evenwichtssituaties $c_a = E_s$.

3. Berekening van de dieptegemiddelde concentratie en sedimenttransport

Voor het concentratieprofiel is geen goede benadering beschikbaar. We nemen hier als voorbeeld een over de UKC geïntegreerde versie van de Lane en Kalinski (voor constante eddy diffusivity) omdat deze eenvoudig over de diepte kan worden geïntegreerd, en we nemen aan dat de stroming nog vrij uniform is verdeeld over de hoogte (zoals bijvoorbeeld volgt uit Sandhu, 2017):

$$\frac{c(z)}{c_a} = \exp \left\{ - \frac{15w_s}{u_*} \left(\frac{z-a}{H} \right) \right\} \text{ zodat } C_s = c_a \frac{u_*}{15w_s} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{15w_s}{u_*} \left[1 - \frac{a}{H} \right] \right) \right\}$$

Waarin H = representatieve diepte, waarvoor in dit geval wordt gekozen voor de kielspeling. Deze formulering is niet ontwikkeld voor de situatie onder schepen (of Couette-stroming) en daarom slechts indicatief.

Voor sedimenttransportflux door een raai waar het schip passeert nemen we debiet onder kiel maal suspensieconcentratie, of het berekende transport uit een transportformule. Debiet onder de kiel is breedte van schip B_s maal kielspeling (ruwweg $h - T$) maal de retourstroomsnelheid. Voor bodemtransport wordt in dit geval ook vermenigvuldigd met breedte van schip B_s . In deze vereenvoudigde analyse volstaat dit als eerste schatting.

Voor de vier locaties zijn op basis van de methode zoals hiervoor beschreven de ruwe schattingen gemaakt voor de extra hoeveelheid sedimenttransport die in een dwarsprofiel (cumulatief) over de periode met relatief lage kielspeling, dus laagwaterperiode, zouden kunnen optreden. Het betreft dus de som van alle 'pulsen' van sediment die bij elk passerend schip door dit dwarsprofiel extra worden verplaatst.

De detailresultaten van de berekeningen zijn gepresenteerd in Appendix A. De belangrijkste cumulatieve resultaten zijn gepresenteerd in Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Schattingen van cumulatief sedimenttransport door scheepspassages in 4 dwarsraaien voor een periode van een half jaar (laagwaterperiode). Voor de Rijntakken betreft het de som van transport door berg- en dalvaart, voor de Maas alleen bergvaart (waarden voor dalvaart zijn daar gelijkwaardig en tegengesteld)

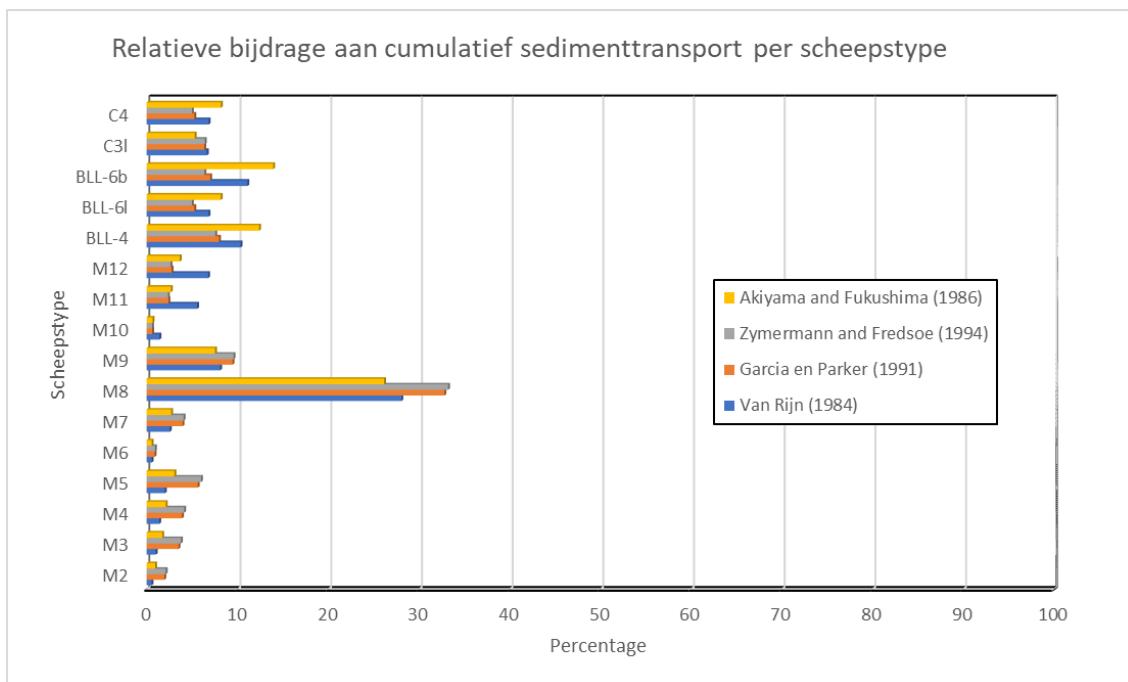
Formule	Lobith	Nijmegen	Tiel	Belfeld ³
Schijf – retourstroom bergvaart (t.o.v. bed)	1,9 – 2,3 m/s	2 – 2,5 m/s	2 – 2,6 m/s	1,2 – 2,3 m/s
Schijf – retourstroom dalvaart (t.o.v. bed)	-0,4 – -0,1 m/s	-0,5 – 0 m/s	-0,4 – 0,1 m/s	-2 – -1 m/s
Van Rijn (1984) bodem+zwevend	$2 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$11 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$16 \cdot 10^3$ m ³ /jr	1 m ³ /jr (alleen bergvaart)
Van Rijn (1984) suspensie	$1 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$7 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$10 \cdot 10^3$ m ³ /jr	0 m ³ /jr
Garcia&Parker (1991)	$150 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$103 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$78 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$23 \cdot 10^3$ m ³ /jr (alleen bergvaart)
Engelund &Hansen (1967)	$4 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$19 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$33 \cdot 10^3$ m ³ /jr	1 m ³ /jr (alleen bergvaart)
Meyer-Peter & Müller (1948)	$6 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$8 \cdot 10^3$ m ³ /jr	$9 \cdot 10^3$ m ³ /jr	1 m ³ /jr (alleen bergvaart)
Zymermann and Fredsoe (1994)	$290 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$670 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$724 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$71 \cdot 10^3$ m ³ /jr (alleen bergvaart)
Akiyama and Fukushima (1986)	$87 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$6 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$4 \cdot 10^3$ m ³ /jr (netto)	$9 \cdot 10^3$ m ³ /jr (alleen bergvaart)

³ In de berekening bij Belfeld is uitgegaan van vergelijkbare verdeling van schepen als in de Waal, maar is het totaal aantal schepen gereduceerd met 80%. Omdat de stroming zeer gering is, is het transport bij berg en dalvaart vergelijkbaar. Bij gelijkwaardig aantal op- en afvaart zou het netto extra transport dus reduceren tot bijna nihil (heft elkaar op).

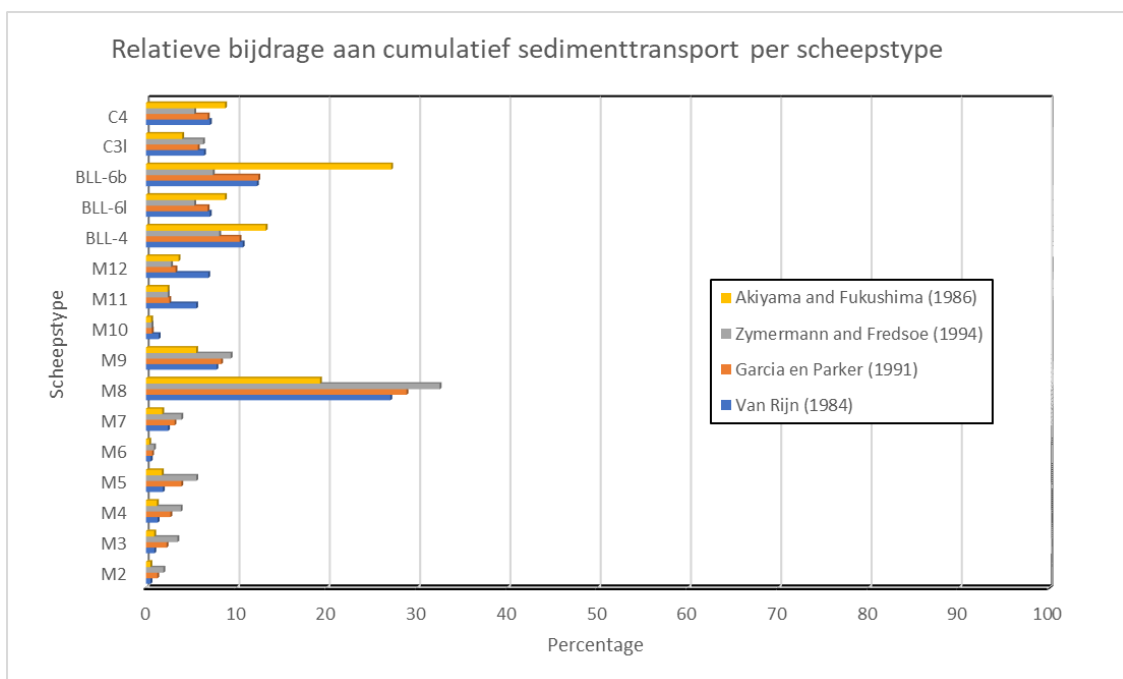
In de tabel zijn alle waarden een sommatie van de pulsen (scheepspassages) over een periode van een half jaar weergegeven. Aangenomen is dat het aantal schepen voor bergvaart en dalvaart ongeveer gelijk is. Bij de dalvaart is gemiddeld sprake van geringere diepgang en een kleiner verschil tussen vaarsnelheid en stroomsnelheid van de rivier ten opzichte van de bodem, en is het berekende extra transport verwaarloosbaar klein (behalve bij Belfeld, omdat de stroomsnelheid van de rivier gering is door de stuw en de geringe afvoer). De resultaten tonen enorme variatie in de berekende waarden, tot enkele orden van grootte verschil. De verschillen laten zich moeilijk verklaren zonder verder onderzoek en evaluatie van toepasbaarheid en gevoeligheid. Zo is in de tabel voor het zwevend-stof deel van Van Rijn (1984) alleen gerekend met de waarde van c_a voor suspensie met een reductie voor gemiddelde concentratie. Zouden we aannemen dat de concentratie onder kiel gelijk is aan c_a , dan worden de jaarlijkse transporten $800 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jr}$ tot $4.200 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jr}$. Alleen de methode van García en Parker (1991) is in eerdere studies gevalideerd voor sedimenttransport onder schepen, met de aanname dat een groot deel van het sediment als suspensief transport onder het schip wordt verplaatst. Desondanks zijn de onzekerheden in snelheden en andere condities te groot om een keuze te maken. De belangrijkste conclusies die kunnen worden getrokken uit de tabel zijn:

- De sedimenttransport toename door scheepvaart ligt voor de meeste relaties twee orden kleiner dan het jaartransport van bodemmateriaal: jaartransport van bodemmateriaal bedraagt orde $500 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jr}$ in de Boven Rijn, $300 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jr}$ in de Waal, orde $30 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jr}$ in de Maas (bron: Roy Frings). Voor enkele relaties worden hoge (suspensie) jaartransporten berekend, maar over het algemeen lijken deze ook een orde lager uit te vallen dan de genoemde jaartransporten.
- De gevoelheden en onzekerheden in de berekeningen (en gebruikte vereenvoudigingen) zijn te groot om de betrouwbaarheid van de schattingen te bepalen.
- De versterkte (stroomafwaartse) transporten in de Rijntakken zijn vooral het resultaat van bergvaart, en dus overwegend van belang voor de linkerzijde van de rivier.
- De pulsen door scheepvaart zijn gelijk langs de vaartrack, en leiden daardoor niet tot extra gradiënten in langtransport. De scheepvaart op zich zal daarom niet leiden tot erosie. Echter, door de toename van sedimenttransporten aan de rivierzijde met overwegend bergvaart (in stromende secties), zal wel sprake zijn van een versterking van bestaande sedimenttransportgradiënten. De doorgaande erosie en sedimentatieprocessen kunnen daardoor worden versterkt.

In Figuur 3-11 en Figuur 3-12 zijn voor twee locaties de relatieve (procentuele) bijdragen getoond van de verschillende scheepstypes aan het extra jaarlijkse sedimenttransport zoals berekend voor de verschillende transportmodellen. De bijdrage van type M8 is dominant vanwege het grote aantal. Daarnaast is ook de bijdrage van de duwstellen, ondanks de relatief lage aantallen, vrij groot in de grafiek. Dit komt door de relatief hoge waarde van de retourstroom die samenhangt met de vorm (een hoge A_s/A_c). Het effect kan nog groter zijn als de invloed van de boegvorm beter wordt verwerkt in de schatting van de maximale retourstroom: deze is op dit moment daarvoor niet gecorrigeerd.



Figuur 3-11 Lobith: relatieve bijdrage van scheepstypes aan extra sedimenttransport (ruwe schatting)



Figuur 3-12 Tiel: relatieve bijdrage van scheepstypes aan extra sedimenttransport (ruwe schatting)

Aanvullend aan deze berekeningen hebben we de relaties van Hoffmans en Verhey (1997) toegepast zoals beschreven in paragraaf 2.4.2. De formule geeft een schatting van erosiediepte, uitgaande van meerdere passages over een enkel vaarspoor, waarbij deze steeds verder verdiept. In praktijk zullen de vaarroutes van de schepen meer diffuus over de vaarbaanbreedte zijn verdeeld: bij elke passage wordt het sediment iets verplaatst van de as van het schip naar de zijkanten en stroomafwaarts. Er is dus niet een continue verdieping, omdat er een doorgaand aanbod is van bovenstrooms.

De methode is daarom ongeschikt voor een schatting van potentiële erosie door scheepvaart⁴. Een vergelijkbaar resultaat kan worden gevonden bij toepassing van een vereenvoudigd conceptueel model van Sieben (2008). Ook hiermee wordt een overschatting van erosiediepte gesimuleerd (zie ook Lenselink, 2011).

⁴ Als we aannemen dat de erosie plaats vindt over de vaarspoortbreedte van circa 10 m (breedte van gemiddeld schip), en gelijkmatig verdeeld over de beschouwde rivierhelft (voor de Rijntakken is dat met name voor de linkerzijde met geladen opvaart, breedte circa 80 m) wordt een gemiddelde erosie z_m berekening voor de beschouwde laagwater periode van een half jaar tussen de 2 en 5 m. Dergelijke effecten zijn niet in overeenstemming met observaties.

4 Morfologische modellen en scheepvaartinvloeden

4.1 Scheepvaart in systeemprognose en effectbepaling

In de huidige praktijk worden morfologische berekening uitgevoerd met eendimensionale (1D) en tweedimensionale dieptegemiddelde (2DH) numerieke modellen. De modellen worden toegepast voor inzicht in systeemgedrag en de prognoses van bodemligging in de toekomst, en voor de effectbepaling van ingrepen in het systeem. De toepassing vindt daarbij plaats op verschillende ruimte- en tijdschalen, maar over het algemeen op schalen die groter zijn dan de invloed van individuele schepen. In de modellen wordt tot nu toe geen rekening gehouden met invloeden van schepen. Eventuele invloeden op sedimenttransport worden als het ware 'weg-gekalibreerd' door instellingen voor sedimenttransportmodellen, ruwheid en bodemsamenstelling. De volgende effecten worden op dit moment niet door de modellen gereproduceerd:

- Bij elke scheepspassage wordt bodemmateriaal in transport gebracht, en bij opvaart stroomafwaarts getransporteerd als bodem en zwevend transport (bij dalvaart is effect van retourstroom veel geringer en treedt slechts weinig extra sedimenttransport op, in stroomopwaartse richting). Omdat deze processen vooral spelen bij geringe kielspeling, zullen deze pulses tot extra sedimenttransport (in kortdurende pulses) leiden bij laagwateromstandigheden wanneer de natuurlijke transporten gering zijn. Omdat de pulses min of meer gelijk zijn langs de vaartrack van het schip, zal er geen sprake zijn van extra langsgradiënten in transport. Los van vaarsporen zal er dus geen netto erosie worden opgewekt, maar zal door de verhoogde transporten wel een toename kunnen optreden van bestaande sedimenttransportgradiënten (en versterking van erosie en sedimentatieprocessen).
- De sedimenttransport toename treedt op over een beperkte breedte (orde 10 m) onder de kiel en achter het schip, langs de vaartrack van het schip. Echter, door passage van meerdere schepen zullen er meerdere tracks verdeeld over de vaarweg netto leiden tot een versterking van het gemiddeld sedimenttransport.
- Bij elke scheepspassage wordt de toplaag van de bedding omgewoeld. De beroering van de toplaag, en selectief transport en bezinking van opgewerveld sediment, leidt tot verticale sortering van deze toplaag die afwijkt van de sortering door natuurlijke rivierstroming. Een duidelijk verschil in korrelsamenstelling van de toplaag aan de linker en rechterzijde van de vaarweg is daarmee te verklaren.
- Verschillen in bodemruwheid onder invloed van de verschillen links en rechts in bodemsamenstelling en eventuele invloed op beddingvormen.

In onderstaande diagram zijn de scheepvaartinvloeden op specifieke processen samengevat. De pijlen geven aan dat de verschillende processen aan elkaar zijn gekoppeld (feedbacks). De aandachtspunten voor verbetering geven een indicatie op welke aspecten de invloed van scheepvaart kan worden meegenomen in de numerieke modellen.



Figuur 4-1 Diagram voor modellering van processen (en hun feedbacks) voor invloed van scheepvaart op de morfologische processen

Ook voor situaties zonder scheepvaart zijn de aandachtspunten in het diagram soms van toepassing. Zo wordt nog vaak met een constante laagdikte voor de actieve laag gerekend omdat een variabele laagdikte in combinatie met beschikbare duinhoogtevoorspellers soms kan leiden tot ongewenst en zelfs instabiel gedrag. Dit voorbeeld geeft aan dat het simuleren van de feedbacks vaak niet succesvol is omdat de theoretische (empirische) concepten onvoldoende geschikt zijn en leiden tot ongewenst morfologisch gedrag.

De voorliggende studie toont dat er nog geen geschikte methoden zijn ontwikkeld die ons in staat stellen bovengenoemde processen (inclusief de ‘aandachtspunten’) te simuleren in situaties met scheepvaart. De voorbeelden in de literatuur beschouwen enkel de invloeden op sedimenttransport door benaderingen voor stroomcondities, met toepassing van theoretische sedimenttransportrelaties voor waterlopen.

In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de varianten van numerieke modellen die beschikbaar zijn om de processen te benaderen, en waar deze tekort schieten.

4.2 Varianten van numerieke modellen

Een opsplitsing naar beschikbare typen modellen is mogelijk door drie verschillende detailniveaus te beschouwen, waarbij elk van de modellen gebruikt wordt voor verschillende doelen:

- 1 Detail van stroming rond een enkel schip op willekeurige locatie in het dwarsprofiel (dus bijvoorbeeld bij oever of juist midden van de rivier), of 2 of meer passerende/inhalende schepen in een dwarsprofiel. De noodzakelijke numerieke modellering betreft een volledig driedimensionale stroming met voldoende resolutie en functionaliteit voor het berekenen van de complexe turbulentie en grenslaagontwikkeling onder en naast de romp, en in de volgstroom met additionele invloed van schroefstralen. In veel gevallen zal het rekenintensief zijn om de modellering op prototype schaal uit te voeren, en voor verschillende typen schepen en omstandigheden.

- 2 Effect van schepen via een drukveld op een 2DH model met relatief hoge resolutie simuleren, maar daarbij geparametriseerde vergelijkingen toevoegen om de vertaling van de relatief grof gesimuleerde retourstroom (en uitwaaiering ervan) verder te vertalen naar turbulentie en schuifspanningen, en de methode voor berekening van sedimenttransporten en morfologie. In principe zou deze aanpak geschikt moeten zijn voor het simuleren van de vaarsporen en invloeden op oevers en kribvakken op prototype schaal. De aanpak met verplaatsende drukvelden is beschikbaar en toegepast in Delft3D, onder andere door Helsloot (2016) en Sandhu (2017).
- 3 Cumulatief effect op grootschalige 2D modellen die worden gebruikt voor morfologie van riviertrajecten (bijv. DVR model) voor lange termijn voorspellingen. De scheepvaarteffecten worden dan geparametriseerd en als extra module aan het bestaande morfologische model toegevoegd. Met deze aanpak kan worden overwogen sedimenttransport te koppelen aan vooraf ingevoerde statistiek van vaartracks, scheepseigenschappen, relatieve vaarsnelheid en kielspeling.

Ad 1 – detailmodel

Een detailmodel met alle belangrijke processen kan als vervanging van de gootproeven worden ontwikkeld. In dat geval zou het model kunnen worden gebruikt om aanvullende effecten, zoals invloed van breedte van de waterloop, verschillende dimensies van schepen (lengte, boegvorm), varen door bochten, effect drifthoek, en eigenschappen van bodem (ruwheid, beddingvormen, samenstelling) nader worden onderzocht. Voor de simulaties kan gebruik worden gemaakt van CFD software (Computational Fluid Dynamics). Belangrijke eigenschappen:

- Niet-hydrostatische drukverdeling
- 3D turbulentie berekeningen, inclusief wervelingen en circulaties onder het schip, aan zijanten, en in volgstroom. Simulatie van de grenslaagontwikkeling onder het schip en de invloed ervan op de doorstroming (effect van blokkade). De simulatie van Couette-Poiseuille stroming.
- Sediment-transport (entrainment en suspensief transport) gerelateerd aan turbulentie, drukvariaties en schuifspanning. Hoge mate van niet-stationariteit en niet-uniforme condities diskwalificeren gebruik van traditionele formules.
- Methode voor introduceren schroefstraal, met onderscheid in verschillende typen schroef (conventioneel, straalbuis).

Bij MARIN zijn diverse toepassingen van CFD van stroming rondom schepen beschikbaar. De belangrijkste instrumenten daarvoor zijn ReFRESCO, PARNASSOS en COMFLOW. Het programma ReFRESCO is de open-source software van MARIN, en is speciaal ontworpen voor detailstroming rond schepen en bijvoorbeeld voor schroefstralen.

De bestaande modelsystemen voor CFD die zijn toegepast voor scheepsstromingen bevatten echter geen solvers voor berekenen van sedimenttransport en morfologie. Een uitbreiding hiervan vraagt een forse investering.

Ad 2. – grof detailmodel

Voor toepassing op schaal van een beperkt riviertraject (bijvoorbeeld orde van 1 km of enkele scheepslengtes) of vergelijkbaar kanaalpand kan de inzet van een 2D model met fijnmazig rooster al redelijk inzicht bieden in de hydrodynamica rondom het schip en invloeden op de oevers, werken (kribben, verdedigingen) en bodem. De beweging van het schip kan worden gesimuleerd met een drukveld, waarbij de verdringing van stroming redelijk wordt weergegeven, maar er ontbreken specifieke aspecten van echte schepen zoals inzinking, drift etc.

De schatting van retourstroom en daaraan gerelateerde turbulentie zijn dus erg beperkt, en moeten met aanvullende relaties worden gedetailleerd voor een goede schatting van sedimenttransport. Om die reden wordt geadviseerd in deze aanpak een aantal semi-empirische relaties te ontwikkelen voor de turbulentie en maximale schuifspanningen, en die te koppelen aan het sedimenttransportmodel dat worden gebruikt in de rivier. Onderzocht moet worden of de sedimenttransportvoorspellers voor open waterlopen in een aangepaste vorm kunnen worden ingezet. Idealiter wordt op deze wijze ook het effect van schroefstralen en variabiliteit in de bodemligging door beddingvormen geparametriseerd.

Ad 3. – grof morfologisch model

De bestaande 2DH morfologische modellen voor Rijntakken en Maas gaan uit van een beperkt aantal rekencellen in dwarsrichting, en een gedetailleerde simulatie van vaarsporen sluit hier niet op aan. Desondanks kan worden overwogen de ruimtelijke en temporele variatie van de langsvarende schepen te introduceren in de morfologische ontwikkeling en verspreiding van sediment.

Een standaardmethode voor toepassing in 2DH modellen bestaat hiervoor nog niet, en zou nader kunnen worden onderzocht. Elementen kunnen zijn een statistische verdeling van scheepvaarttracks over de breedte van het rooster (dus niet individuele tracks), de statistiek van diepgang en vaarsnelheid (of op basis van grenssnelheid), en submodellen die de schatting van de retourstroom en het sedimenttransport kunnen toevoegen. Gesteld kan worden dat schepen in de rivieren niet allen exact hetzelfde traject varen. Vooralsnog mag worden verondersteld dat op deze schaal de richting van dit extra sedimenttransport overeenkomt met de vaarrichting (dus niet bedoeld voor berekenen van vaarsporen). Ook hier geldt dat het gewenste doel de details bepaalt.

Algemeen

Verder kan nog worden genoemd dat de volgende kwesties ook vragen om functionaliteit voor scheepvaartinvloeden:

- invloed van scheepvaart op kribvakken: de suppleties in kribvakken worden beschouwd als potentiële sediment-management maatregelen. Verder wordt de geleidelijke aanvoer van fijn materiaal uit die vakken genoemd als mogelijke bijdrage aan verschil in samenstelling van linker- en rechterzijde van de rivier.
- invloed van scheepvaart op kribvakken werkt indirect door op duinlengtes, zoals volgt uit de studie van Bongers (2021).

4.3 Aanpak voor verbetering van modelinstrumentarium

De implementatie van scheepvaarteffecten in de 2D modellen voor lange-termijn simulaties wordt bij voorkeur geïntroduceerd via parametrisatie van de relevante processen. De invloed van scheepvaart kan worden beschouwd als een stochast zowel in ruimte als in tijd: het aantal schepen en hun koers is vooraf onbepaald. In concept kunnen fysische processen onder individuele schepen voor specifieke condities worden vertaald in empirische relaties (parametrisaties). Vervolgens kunnen deze worden verwerkt in de statistische relaties die de effecten van meerdere schepen en trajecten aggregeren in ruimte en tijd.

Voor de 2D modellen (zoals DVR modellen) wordt het relevant geacht het effect van scheepvaart te introduceren in sedimenttransport en in de sedimentsorteringsprocessen (actieve laag concept). Voor beide processen zijn nog geen bruikbare theoretische concepten beschikbaar die het effect van scheepvaart kunnen beschrijven.

De volgende stappen voor verdere ontwikkeling kunnen worden overwogen:

- 1 Parametrisatie van detailstroming en transporten rond varende schepen: dit betreft het afleiden van details van schuifspanningen, turbulentie en sediment transport onder en rond maatgevende schepen (bijvoorbeeld M6 t/m M9 en duwstellen) bij verschillende condities (waterdiepte, afvoer, vaarsnelheid, opvaart en afvaart, etc.). Hiervoor gebruik maken van gedetailleerde CFD modellen voor stromingsprocessen, inclusief schroefstraal (volledig 3D). Voor sedimenttransport is nader onderzoek nodig: de vertaling van dit stroombeeld naar sedimenttransport vraagt mogelijk een aangepast sedimenttransportmodel (variant op traditionele transportrelaties voor open waterlopen, of transporten in leidingen). Zowel voor de stromingseffecten als voor de sedimenttransporten worden in deze stap regressierelaties afgeleid.
- 2 Integratie van scheepvaarteffecten in submodellen (of ontwikkeling ervan) voor bodemsamenstelling, bodemvormen en ruwheden. Bij voorkeur worden de bestaande subroutines in de source-code voor deze processen zoveel mogelijk gehandhaafd (dus uitbreidingen via extra parameters) in plaats van ontwikkeling van volledig nieuwe concepten.
- 3 Relatie leggen tussen effecten van individuele schepen en van een ensemble van schepen, d.w.z. de statistiek van scheepvaart, voor introductie in de rekenmodellen. Invoer voor deze submodellen is de statistiek van aantallen en typen schepen als functie van de tijd.

De bovengenoemde stappen leveren een submodel op dat kan worden toegepast op twee manieren:

- 1 Implementatie van het submodel in de Delft3D software. De bestaande subroutines worden aangepast, en waar nodig worden nieuwe subroutines geïmplementeerd. Aansturing kan via afzonderlijke (Ascii) invoer bestanden.
- 2 Toepassing van de submodellen voor kalibratie van sedimenttransportparameters en actieve laag concepten (verticale sortering). Deze aanpak biedt minder flexibiliteit, om bijvoorbeeld de variabiliteit als functie van kielspeling (dus afvoerafhankelijkheid) eenvoudig te introduceren.

Voor validatie ontbreken op dit moment gemeten gegevens in prototype van transporten in de Rijnakken en Maas. Onderzocht moet worden of er indirecte metingen (bijvoorbeeld via multibeam peilingen op korte intervallen) of directe metingen (transport meting onder een schip) kunnen worden uitgevoerd.

5 Conclusies

Voor de simulatie van morfologische effecten en systeempredicties met numerieke modellen wordt in de huidige praktijk geen rekening gehouden met invloeden van scheepvaart. In dit rapport wordt op basis van literatuur en inzichten uit eerdere studies een overzicht gegeven van de invloeden van scheepvaart op sedimenttransport, morfologie en bodemsamenstelling in de Rijnakkers en de Maas. Vervolgens is onderzocht op welke wijze de modellen hiervoor kunnen worden aangepast.

Welke invloed hebben schepen op de bodem?

De inzichten uit modelstudies (laboratoriummodellen en rekenmodellen) en veldgegevens duiden op significante verstoring van de bodem tijdens passage van een schip. Hoewel de verstoring rondom een varende schip plaatselijk slechts kortdurende pieken in sediment-opwerveling en verplaatsing oplevert, kan het cumulatieve effect ervan in drukbevatte rivieren significant zijn. De invloeden manifesteren zich onder andere door een fijnere samenstelling van de linkerzijde van de rivier met (geladen) opvaart, dan de rechterzijde met (ongeladen) afvaart; en de aanwezigheid van 'vaarsporen' in de bedding.

Relevante processen zijn als volgt:

- De invloed op de bedding door stroming rond het schip treedt vooral op bij geringe kielspeling, en is dus met name relevant tijdens laagwaterperioden.
- De retourstroming onder de kiel heeft een maximum direct onder de boeg, en zorgt daarvoor voor de opwerveling van sediment. Een tweede piek volgt na de passage van het achterhek, waarbij terugstroming/volgstroom wordt gecombineerd met de schroefstraal. De details en omvang van deze processen zijn sterk afhankelijk van de kielspeling, boegvorm (stroomlijning) en vaarsnelheid: de invloed neemt snel af als kielspeling toeneemt.
- De verhoogde stroomsnelheden en snelheidsgradiënten leiden ertoe dat het opgewerkte sediment wordt verplaatst in langs- en dwarsrichting door bodemtransport (grof sediment) en suspensief transport (fijn sediment). Bij bergvaart (stroomopwaarts) kan dit leiden tot een verhoging van netto sedimenttransport in de rivier.
- Door scheepvaart over een sedimentbodem ontwikkelen zich 'vaarsporen', waarbij sediment wordt geërodeerd onder de kiel van het schip, en zijdelings wordt verplaatst waar het weer wordt afgezet naast het schip.
- Onder het schip ontwikkelen zich grenslagen die groeien in langsrichting. Wanneer de grenslagen over de lengte van het schip elkaar raken, wordt de retourstroming deels 'geblokkeerd' en zal meer water en sediment in dwarsrichting worden verplaatst. De kielspeling en lengte van het schip zijn de dominante parameters.
- Bij elke scheepspassage wordt het sediment langs de zijanten van het schip netto iets getransporteerd tegen de vaarrichting in. Sediment in de vaar-as opgewerkeld in de volgroom (na passage van het hek) wordt deels getransporteerd in vaarrichting.
- Door de retourstroom onder de kiel wordt sediment van beddingvormen (duinen en ribbels) geërodeerd en verplaatst naar de troggen. Er is echter vooralsnog geen significant verschil gevonden in duinhoogte tussen linker- en rechterzijde van de rivieren (zoals wel is gevonden voor bodemsamenstelling).
- Bergvaart (stroomopwaarts varende) verschilt met dalvaart (stroomafwaarts varende) doordat de rivierstroming (en bijbehorende bodemsnelheid en schuifspanning) moet worden opgeteld/afgetrokken bij de scheepssnelheid: in dalvaart zal retourstroom leiden tot een kortdurende afname of omkering van bodemsnelheid. Bij de bergvaart wordt de bodemsnelheid juist versterkt onder de kiel.

- In zowel de Rijntakken als de Maas is sprake van een fijner samenstelling van de toplaag aan de linkerzijde, waar de opvaart voornamelijk plaatsvindt. Hoewel dit vaak wordt toegeschreven aan toestroming van fijn sediment uit kribvakken is dit ook onveranderlijk aanwezig op het Waal-traject bij Tiel waar over een lengte van circa 10 km (km 910-920) geen kribvakken aanwezig zijn aan de linkeroever (langsdammen traject). Het is niet uitgesloten dat andere sorteringseffecten hier belangrijker zijn (bijvoorbeeld vertraagd uitzakken van fijner sediment na passage van een schip).

Hoe groot zijn de effecten in Rijntakken en Maas?

Metingen en observaties tonen dat door de drukke scheepvaart op deze rivieren zowel sediment op de rivierbodem als in oevers en kribvakken vrijwel continu extra worden belast, met name in het midden- en laagwaterseizoen. Dit manifesteert zich door grootschalige aanwezigheid van vaarsporen en door de verschillen in korrelverdeling tussen linker- en rechterzijde in alle rivieren.

Op basis van een aantal ruwe handberekeningen is in deze studie geprobeerd een cumulatieve bijdrage van de sedimenttransport-pulsen door schepen te berekenen. Verondersteld is dat sedimenttransport een (indirecte) maat is voor alle bovengenoemde effecten op tijdsafhankelijk gedrag van de bodemligging en -samenstelling. Echter, toepassing van verschillende transportvoorspellers leidt tot cumulatieve sedimenttransporten die variëren van “twee-orde kleiner” tot “zelfde orde van grootte” als het totale jaartransport van de riviertakken. Deze onzekerheid maakt het niet mogelijk een eindoordeel te vellen over de mate van invloed van schepen op het jaartransport relatief ten opzichte van het ‘natuurlijke’ transport, en daarmee een schatting te maken van de invloed op bodemveranderingen die relevant zijn voor het beheer (bijvoorbeeld voor baggerwerk). Uit de handberekeningen volgt verder nog:

- Zonder aanpassingen (bijvoorbeeld voor turbulentie intensiteit) kunnen de traditionele sedimenttransportformules (zoals Meyer-Peter en Müller, 1948, García en Parker, 1991, of Van Rijn, 1984) niet betrouwbaar worden toegepast voor deze omstandigheden omdat deze zijn afgeleid voor uniforme en stationaire stroming in open waterlopen.
- Van de relatieve bijdrage aan transport door verschillende scheepstypes is die van het Grote Rijnschip (M8) het grootst (orde 25 à 30%) op de Boven-Rijn en Waal.

Hoe kunnen de effecten van scheepvaart worden meegenomen in morfologische berekeningen?

De invloed van scheepvaart op sedimenttransport en bedding zijn niet zondermeer met de huidige 1D en 2D morfologische rekenmodellen te simuleren. De meest gebruikte morfologische software (met name Delft3D) is nog niet voldoende uitgerust voor bovengenoemde effecten van schepen op de sedimenttransporten bij de bodem, zover deze überhaupt bekend zijn. De meeste studies worden daarom nog uitgevoerd met standaard analytische en empirisch relaties, toegepast met een standaard afvoerverloop.

Afhankelijk van de intensiteit van scheepvaart en de grootte van de sedimentpulsen, kan het scheepvaarteffect bijdragen aan versnelling van morfologische processen en verandering van bodemsamenstelling in prototype. Voor het simuleren van het eerste aspect kan een aangepaste transportformulering volstaan, maar voor het laatste aspect zal ook verticale sortering in de bedding (actieve-laag concept, en daaraan gekoppeld transportmodel) aanpassing vragen. Hiervoor is het belangrijk de details van de relevante processen eerst te parametriseren tot eenvoudige relaties die berekening van transport en sortering tijdens de simulatie beïnvloeden. Overwogen kan worden om daarvoor eerst CFD (3D hoge resolutie) simulaties toe te passen die de details van stroming rond het schip kwantificeren, en vervolgens uit te breiden met nog nieuwe te ontwikkelen “sediment-entrainment” en transport concepten voor deze detailsimulaties.

De CFD-berekeningen (uitgebreid met sediment) kunnen worden gebruikt om coëfficiënten in generieke (empirische) parametrisaties te bepalen, waarna deze generieke concepten kunnen worden toegepast in de lange-termijn 2D morfologische modellen. De locatie (vaarbaan), scheepseigenschappen en variaties in tijd zijn daarvoor als statistische gegevens te beschouwen die door de gebruiker worden ingevoerd. Een deterministische berekening van varende schepen is voor dergelijke lange-termijn morfologie simulaties te rekenintensief en te onzeker.

6 Referenties

- Admiraal, D.M., Garcia, M.H., and Rodriguez, J.F. (2000) Entrainment response of bed sediment to time-varying flows. Civil Engineering Faculty Publications. 133. University of Nebraska <https://digitalcommons.unl.edu/civilengfacpub/133>
- Akiyama, J. en Y. Fukushima (1986) Entrainment of non-cohesive bed sediment into suspension. Third International Symposium on River Sedimentation. S.Y. Wang, et al. (eds.). Univ. of Mississippi, 804-813.
- AMOG (2010) Assessment of waves and propeller wash associated shipping: final report. Appendix 11. BHP Billiton. M1010.2010.J017.TML.R5. October 2010.
- Blaauw, H.O., Knaap, F.C.M. van der (1985) 'Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Voorspelling van waterspiegeldaling. inzinking en vertrimming bij schepen op beperkt water'
- Bongers, P. (2021) The effect of navigation on river dunes. MSc thesis. Univ. Twente. <https://purl.utwente.nl/essays/88630>
- Bots, H.C.G., 2011 Efficient maintenance of the Dutch fairways, MSc thesis, TU Delft, Delft.
- Bouwmeester, J., E.J. van de Kaa, H.A. Nuhoff, en R.G.J. Orden (1977) Recent studies on push-towing as a base for dimensioning waterways. PIANC XXIV the International Navigation Congress, Leningrad, Sept. 6-14, 1977.
- CUR/CIRIA/CETMEF. (2007) Rock Manual. London: CIRIA. report C683.
- Chevalier, C., D. Pham Van Bang, E. Durand, I. Charles, G. Herrier (2015) Scour and erosion phenomena occurring in waterways - recent advances. In: Cheng, Draper & An (Eds) Scour and Erosion. Taylor & Francis Group, London, 978-1-138-02732-9
- Dorst, K., D.J. Meys, M. Schroevers, H. Verheij (2016) Prototype measuring of erosion and currents under the keel of a sailing ship in a canal. In: Scour and Erosion. Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion (Oxford, UK, 12-15 September 2016). CRC Press, Oct. 2016.
- Exer, A. (2015) Influence of non-symmetrical flow conditions on a sailing vessel. MSC TU Delft en ETH Zürich.
- García, M.H. and G. Parker (1991) Entrainment of bed sediment into suspension. J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(4), 414-435.
- García, M.H., D.M. Admiraal, J. Rodríguez, F. López (1998) Navigation-Induced Bed Shear Stresses: Laboratory Measurements, Data Analysis, and Field Application. Civil Engineering Studies, Hydr. Engrg. Series No. 56. Dept. of Civil Engineering Univ. of Illinois At Urbana-Champaign Urbana, Illinois. April 1998.
- Helsloot, T. (2016) The development of a method to predict ship-bank interaction in real-time, MSc thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Hoffmans, G.J.C.M. & Verheij, H.J. (1997). Scour Manual. Rotterdam: Balkema. ISBN9054106735.

- Hoffmans, G.J.C.M. & H.J. Verheij (2011) Jet scour. *Maritime Engineering*. Vol. 164, Issue MA4, p. 185-193. <https://doi.org/10.1680/maen.2011.164.4.185>
- Hugtenburg, J., A. Sieben, E. van Velzen, W. ten Brinke, M. Schoor (2007) Onder hoogwater: Onderzoek naar morfologische processen in het stroombed van onze grote rivieren. Rijkswaterstaat RIZA.
- Ji, Shengcheng (2013) Simulation 3D des ondes de batillage générées par le passage des bateaux et des processus associée de transport de sédiments. *Mécanique [physics.med-ph]*. Université Technologie de Compiègne, 2013. Français. NNT:2013COMP2068.
- Ji, Shengcheng, Ouahsine A., Smaoui H., Sergent P., Jing Guo-qing (2014) Impacts of ship movement on the sediment transport in shipping channel. *Journal of Hydrodynamics*. Vol. 26, No. 5, p.706-714. DOI: 10.1016/S1001-6058(14)60079-2
- Jong, J. de (2017) Modelling van de invloed van scheepvaart op de bodemgeometrie in D-Flow FM. Deltares memo 11200536-007-ZWS-001 (KPP Rivierkundige Onderzoek), 21 december 2017.
- Jongeling, T.H.G. (2001) Afgezonken tunnelelementen: krachten door overvarende schepen en stroming. Voorstudie verbetering rekenmethodiek. WL | Delft Hydraulics rapport Q2550. Mei 2001.
- Kazi, Shahbaz Asif (1998) 'Hydrodynamic modelling of vessel-induced water motion using Delft2D-Rivers' IHE - WL | Delft Hydraulics, IHE Thesis, thesis number HE 009, March 1998.
- Lenselink, R.J. (2011) Interaction between loaded barges and bed material. MSc TU Delft.
- Lokin, L. (2022) Persoonlijke communicatie, 13-4-2022.
- Maynard, S.T., 1990 Velocities induced by commercial navigation, Department of the Army Corps of Engineers, Technical report HL-90-15, Louisville, USA
- Oebius, H. (2000) Charakterisierung der Einflussgrößen Schiffsumströmung und Propellerstrahl auf die Wasserstraßen. *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 82 Karlsruhe*. Dezember 2000.
- Rijkswaterstaat (2020) Richtlijnen Vaarwegen 2020. 31 juli 2020. ISBN: 978-90-9033423-3.
- Robijns, T. 2014. Flow beneath inland navigation vessels. MSc thesis. Delft University of Technology. Delft.
- Rodríguez, J.F., Admiraal, D.M., López, F and Garcíá, M.H., 2002 Unsteady bed shear stresses induced by navigation: laboratory observations, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 515-526
- Sandhu, R. (2017) Numerical Modelling of Sediment Transport Induced by Inland Waterway Vessels sailing with small Underkeel Clearance. MSc thesis TU Delft.
- Schijf, J.B. 1949. Protection of Embankments and Bed in Inland and Maritime Waters, and in Overflow or Weirs. Lisbon: XVIIIth International Navigation Congress . Section I, pp. 61-78.
- Schroevers, R., H. Verheij, K. Berends, T. Vermaas (2015) Stabielheidsproeven Julianakanaal 2014. Analyse meetresultaten. Deltares Rapport 1210294. Januari 2015.
- Sieben, A. (2008) Startnotitie "Nieuwe bezems, efficiënter baggeren", Rijkswaterstaat.
- Sieben, A. (2015) Résumé scheepskrachten in variërend dwarsprofiel. Notitie naar aanleiding van de 2012 experimenten in KPP Rivierkunde 3 April, 2015; opgesteld door Arjan Sieben, RWS-WVL.

- Stolker, C., and Verheij, H.J. (2006): Ship-induced water motions beneath the ship's hull, 31th Intern. Navigation Congress PIANC, 14-18 May 2006, Estoril, Portugal.
- Ten Brinke, W.B.M. (1997) De bodemsamenstelling van Waal en IJssel in de jaren 1966, 1976, 1984 en 1995. Rijkswaterstaat RIZA rapport 97.009. Februari 1997
- Uliczka, K., B. Kondziella (2016) Ship-induced sediment transport in coastal waterways (SeST). Proc. 4th MASHCON, Hamburg - Uliczka et al. (eds), 2016 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-38-0 (Online) DOI: 10.18451/978-3-939230-38-0_1
- Ulm, M., S. Niehüser, J. Jensen (2016) Schiffserzeugter Sedimenttransport im Nord-Ostsee-Kanal. In proc. 18. Treffen junger WissenschaftlerInnen wasserbaulicher Institute, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. 24. bis 26. August 2016. P. 47. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010734523>
- Ulm, M., S. Niehüser, A. Arns, J. Jensen, B. Kondziella, K. Uliczka (2017) Estimating ship-induced sediment transport in confined waters. Poster at EGU General Assembly 2017. At: Vienna, Austria.
- Van de Ven, M. (2021) Scheepvaart en aalsterfte in de nederlandse rijntakken. Rapport 20190095/rap01, ATKB voor natuur en leefomgeving, 15-02-2021.
- Van Rijn, L.C. (1984) Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. J. Hydr. Engrg., ASCE, No. 11.
- Verheij, H. (2014) Interactie vaarweggebruik en rivierbodemplugging en effecten op vlotheid en veiligheid. KPP Rivierkundig Onderzoek Duurzame vaardiepte. Rapport 1209376.
- Verheij, H., Stolker, C. and Groenveld, R. (2008). Inland waterways. Lecture Notes CT 4330. Delft: VSDD. ISBN: 9789065623430
- Wal, M. van der (1987) 'Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen. Systematische meetserie waterbeweging door drie typen binnenvaartschepen' WL | Delft Hydraulics, Rapport M1115 deel IV, 1987.
- Wei Maoxing, Yee-Meng Chiew, Nian-Sheng Cheng (2020) Recent advances in understanding propeller jet flow and its impact on scour. Phys. Fluids 32, 101303. Doi: 10.1063/5.0023266.
- WL IDelft Hydraulics, Rapport modelonderzoek M1115 deel V-A, 1985.
- Zyserman, J.A. en J. Fredsøe (1994) Data Analysis of Bed Concentration of Suspended Sediment. J. Hydr Engrg., 120(9), 1021-1042.

A Stroming onder het schip

A.1 Retourstroomsnelheid met eendimensionale analytische methoden

De methode voor het berekenen van de retourstroomsnelheid U_r , ontwikkeld door Schijf (1949), gaat uit van behoud van energie (met toepassing van Bernoulli principe). Daarvoor wordt eerst de 3D stroming vereenvoudigd tot een eendimensionale stroming. Diverse verdere vereenvoudigingen leiden ertoe dat dit slechts als benadering moet worden beschouwd (bijvoorbeeld constante vaarsnelheid, uniforme retourstroming, verwaarlozing van energieverliezen door traagheidseffect en wrijving, etc.). Schijf bepaalde met het bovengenoemde energiebehoudsprincipe dat er een maximale snelheid of grenssnelheid is waarbij stroming naast het schip overgaat in een superkritische conditie. Deze overgang kan worden uitgedrukt met een Froude getal gelijk aan 1. In die situatie wordt water opgestuwd voor de boeg, wat bij schroefaangedreven vaartuigen niet is te overkomen (wel bij bijvoorbeeld zeiljachten). Deze snelheid is daarom fysiek de maximale snelheid die voor een schroefaangedreven schip kan worden bereikt. Overigens zal in praktijk gevaren worden met een snelheid van circa 80% van de grenssnelheid omdat harder varen dan 80% van de grenssnelheid te weinig snelheidstoename oplevert ten opzichte van de extra hoeveelheid benodigde brandstof.

Voor de grenssnelheid geldt:

$$1 - \frac{A_s}{A_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{V'_{lim}}{\sqrt{g \cdot h}} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{V'_{lim}}{\sqrt{g \cdot h}} \right)^{2/3} = 0 \quad A-1$$

Waarin A_c = ongestoorde natte dwarsprofiel van de rivier (m^2), A_s = midscheeps onderwater dwarsprofiel ($=B_s \cdot T$), B_s = schipbreedte midscheeps, T = diepgang midscheeps, h = waterdiepte ongestoorde profiel, U_c = stroomsnelheid ongestoorde rivier, V'_s = snelheid van het schip relatief ten opzichte van het (stromende) water = $V_s - U_c$.

Als er geen breedtebeperking van het rivier-dwarsprofiel zijn dan volgt hieruit dat de maximale scheepsnelheid ongeveer gelijk is aan de theoretische lange-golf snelheid $\sqrt{g \cdot h}$, wat in de praktijk betekent dat voor het Froude getal geldt:

$$Fr = \frac{V'_{lim}}{\sqrt{g \cdot h}} = 1 \quad A-2$$

Overigens kunnen we de bovenstaande relaties verder vereenvoudigen voor de situatie met A_s/A_c tussen 0,1 en 0,3, die vaak voorkomt in binnenwateren, waar de grenssnelheid dan volgt uit:

$$\left(\frac{V'_{lim}}{\sqrt{g \cdot h}} \right) = 0,78 \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_c} \right)^{2.25} \quad A-3$$

Uitgaande van bovengenoemde aanpak volgt dan een maximale retourstroomsnelheid U'_{lim} voor deze grenssituatie als volgt:

$$U'_{lim} = \sqrt{\frac{2}{3} g \cdot h \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{V'_{lim}}{\sqrt{g \cdot h}} \right)^2 \right)} - V'_{lim} \quad A-4$$

En bijbehorende inzinking z_{lim} volgt dan uit:

$$\frac{z_{lim}}{h} = \frac{1}{3} \cdot \left(1 - \frac{A_s}{A_c} - \left(\frac{V'_{lim}}{\sqrt{g \cdot h}} \right)^2 \right) \quad A-5$$

Uit deze theorie volgt dus de maximale snelheid waarmee het schip kan varen en bijbehorende retourstroomsnelheid en inzinking. In praktijk zal de vaarsnelheid lager liggen. In dat geval, dus $V'_s < V'_{lim}$, dan kan de retourstroomsnelheid U'_r berekend worden uit:

$$\frac{\alpha_{schijf} \cdot (V'_s + U'_r)^2 - V'^2_s}{2 \cdot g \cdot h} - \frac{U'_r}{V'_s + U'_r} + \frac{A_s}{A_c} = 0 \quad A-6$$

Waarin α_{schijf} een correctiefactor is voor de niet-uniforme verdeling van de retoursnelheid en meestal gelijk genomen aan $\alpha_{schijf} = 1,1$. Verder geldt dat $U_r = U'_r - U_c$, met U_r de retourstroomsnelheid relatief tot de bodem. De inzinking z volgt voor deze aanpak uit:

$$z = \alpha_{schijf} \frac{(V'_s + U'_r)^2}{2 \cdot g} - \frac{V'^2_s}{2 \cdot g} \quad A-7$$

De maximale stroming onder de kiel treedt op direct achter de boeg, en is hoger dan de hierboven berekende gemiddelde retourstroom U_r (door plaatselijke loslating, en contractie). Op basis van het M1115 onderzoek van Blauw et al. (1985), van der Wal (1989) is de maximale retourstroomsnelheid nabij de bodem (onder de boeg) $U_{rb,max}$ via de coëfficiënt α gerelateerd aan een doorsnede gemiddelde retourstroomsnelheid U_r die met de eendimensionale methode volgens Schijf kan worden berekend (formules 4.167 – 4.174 uit de Rock Manual, CUR):

$$U_{rb,max} = \alpha \cdot U_r \quad A-8$$

Stolker en Verheij (2006) stellen dat $\alpha \approx 1,5 - 2$. Uit experimenten bepaalde Lenselink (2011) dat $\alpha \approx 1,46$ en Robijns (2014) dat $\alpha \approx 1,53$ voor standaard binnenvaartschip en $\alpha \approx 2,88$ voor een duwbakeenheid. Schoevers et al. (2015) tonen op basis van metingen aan schepen in het Julianakanaal dat gemiddeld voor motorschepen een factor $\alpha \approx 1,3$ geldt, maar voor duwbak-combinaties gemiddeld een waarde van $\alpha \approx 1,6$ geldt voor afluaddiepte 3 m en 1,8 voor afluaddiepte 3,5 m (variërende tussen 1,4 en 2,3), door de minder goede stroomlijning van de boeg.

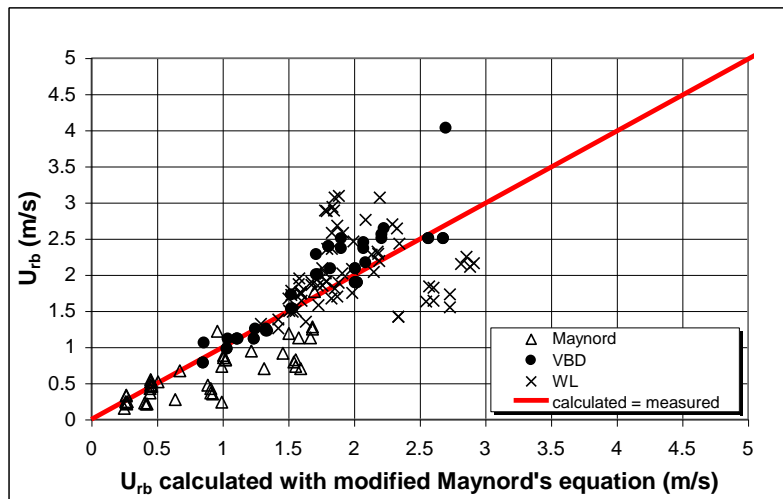
Opgemerkt moet worden dat bovengenoemde formules gelden voor een rechthoekig dwarsprofiel van de rivier, maar in situaties met meer trapeziumvormig profiel leidt dit hooguit tot een fout van enkele procenten. Verder kan deze alleen worden toegepast als $U_r > U_c$.

A.2 Retourstroomsnelheid met empirische relaties

De aanpassing van de Maynard (1990) relatie door Stolker en Verheij (2006) is:

$$\frac{U_{rb,max}}{V_s} = 1.07 \cdot \left(\frac{B_s}{h}\right)^{0.08} \cdot \left(\frac{D}{h}\right)^{1.82} \quad A-9$$

Waarin U_{rb} = snelheid nabij bodem achter de boeg onder het schip (m/s). De geldigheid van de formule is beperkt tot $h/T > 1,6$ en $A_c/A_m > 6$, waarin A_c = dwarsprofiel van ongestoorde rivier, en A_m = dwarsprofiel midscheeps.



Figuur 6-1 Vergelijking van berekende en gemeten stroomsnelheden onder een schip

Een alternatieve functionele relatie is afgeleid met een parameter analyse door Stolker en Verheij (2006). De methode is vergelijkbaar met die van Maynard, en levert de volgende relatie:

$$U_{rb} = U_r \left\{ 1 + 0.041 \left(\frac{h-T}{h}\right)^{-1.52} \left(\frac{V_s - U_c}{\sqrt{g(h-T)}}\right)^{-1.07} \left(\frac{A_c}{A_m}\right)^{0.81} \right\} \quad A-10$$

De functionele relatie blijkt echter minder goed te scoren in de experimenten van Robijns (2014) dan de hiervoor genoemde aangepaste Maynard relatie van Stolker en Verheij. De bovengenoemde relaties zijn over het algemeen beperkt geldig. Ze zijn bijvoorbeeld niet toepasbaar als $h/T < 1.25$, waardoor ze niet kunnen worden gebruikt voor situaties met geringe kielspeling. Juist deze situaties zijn relevant voor bodemtransport en potentiële erosie.

Robijns (2014) heeft de volgende formules afgeleid uit de laboratoriumexperimenten in 2014:

- Maximum snelheid in langsrichting, met maximum onder de boeg, tegengesteld aan de vaarrichting:

$$\text{Conventioneel schip: } U_{x,max} = 0.6 \cdot \left(\frac{T}{h}\right)^{1.2} \cdot V_s - \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{h}{B_s}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot U_0$$

$$\text{Duweenheid: } U_{x,max} = 1.36 \cdot \left(\frac{T}{h}\right)^2 \cdot V_s - 1.7 \cdot \left(\frac{h}{B_s}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot U_0$$

- Maximum snelheid in dwarsrichting, met maximum onder de boeg, loodrecht op de vaarrichting:

$$\text{Conventioneel schip: } U_{y,max} = 0.06 \cdot \left(\frac{B_s}{h-T}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot V_s - 0.15 \cdot \left(\frac{h}{h-T}\right) \cdot U_0$$

$$\text{Duweenheid: } U_{y,max} = 0.03 \cdot \left(\frac{B_s}{h-T}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot V_s - 0.17 \cdot \left(\frac{h}{h-T}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot U_0$$

- Maximum absolute snelheid, onder de boeg zonder rekening te houden met richting (niet een combinatie van de maximale x- en y-snelheden, omdat die op verschillende locaties optreden):

$$\text{Conventioneel schip: } U_{max} = 0.32 \cdot \left(\frac{B_s}{h-T}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot V_s - 0.36 \cdot \left(\frac{h}{h-T}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot U_0$$

$$\text{Duweenheid: } U_{max} = 0.07 \cdot \left(\frac{B_s}{h-T}\right)^{\frac{5}{4}} \cdot V_s - 1.6 \cdot \left(\frac{h}{h-T}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot U_0$$

Waarin: B_s = scheepsbreedte (m), T = scheepsdiepgang (m), h = waterdiepte (m), V_s = vaarsnelheid (m/s), U_0 = ongestoorde stroomsnelheid, negatief tegen de vaarrichting, positief in vaarrichting (m/s), U_{max} = maximale absolute snelheid, B_s = scheepsbreedte, h = waterdiepte, T = diepgang, en U_0 = ongestoorde stroomsnelheid.

Robijns stelt dat deze formules gelden voor situaties met en zonder volledige ontwikkeling van de grenslagen, dus zowel voor kleine als grote kielspeling. Robijns heeft ook afzonderlijke relaties voor kleine en grote kielspeling afgeleid, maar gezien de beperkingen en onzekerheden heeft dergelijke complexiteit weinig toegevoegde waarde. De gevoeligheid voor grenslagen is groter voor maximum dwarsnelheid dan voor de maximum langssnelheid onder de kiel bij de boeg. De relaties zijn afgeleid voor condities waarbij $h/T < 1,4$.

A.3 Schroefstraal

De uitstroomsnelheid V_0 bij een schroef kan worden geschat via:

$$V_0 = 1.15 \left(\frac{\eta P}{\rho D_0^2} \right)^{1/3} \quad A-11$$

Hierin stelt P het geïnstalleerde vermogen voor, η het toegepaste percentage van het geïnstalleerde vermogen, ρ de dichtheid van het water, D_0 de effectieve diameter van de schroef. Over het algemeen geldt dat voor grotere schroeven meer vermogen kan worden overgebracht bij lage toeren, waarbij meer gebruik wordt gemaakt van de volgstroom.

Vanaf de schroef ontwikkelt zich een snelheidsveld. De snelheid V_{axis} als functie van de horizontale afstand vanuit de as van de schroef en parallel aan de schroefas, x , is bepaald met:

$$V_{axis} = 2.8V_0 \frac{D_0}{x}$$

A- 12

Deze snelheid neemt af naarmate de afstand uit de schroefas groter wordt. De snelheid op elk willekeurig punt, dus als functie van horizontale afstand vanuit de schroef, x , en als functie van de afstand loodrecht op de x -as, r , is bepaald met:

$$V_{stil} = V_{axis} \exp\left(\frac{-15.4r^2}{x^2}\right)$$

A- 13

waarin V_{stil} de snelheid aan de bodem of oever door een stilliggend schip voorstelt.

Theoretisch en experimenteel is bepaald dat de maximale snelheid aan de bodem achter het schip als gevolg van de hoofdschroef plaatsvindt op $x_{max} = h_p / 0,18$, waarin h_p de verticale afstand voorstelt van schroefas tot de bodem. Dit betekent dat de maximale snelheid aan de bodem achter het schip gelijk is aan (vul in $x = x_{max}$ en $r = h_p$):

$$V_{b,max,0} = 0.3V_0 \frac{D_0}{h_p}$$

A- 14

Deze vergelijking geldt voor een stilliggend schip. Voor de snelheid aan de bodem of aan de oever als gevolg van de hoofdschroef door een varend schip, V_v , geldt:

$$V_v = V_{stil} - \frac{1}{2}V_s$$

A- 15

Waarin V_s is de vaarsnelheid (m/s).

Een iets meer complexe formulering is gegeven door Oebius (2000), verschillend voor een jet of een schroef, en met onderscheid van een kernzone (net achter de schroef) en een diffusiezone (iets verder van de schroef).

Met vergelijking A- 13 kan op ieder willekeurig punt (met r en $x > 0$) de snelheid aan de bodem worden bepaald die wordt veroorzaakt door de schroef als er geen blokkade is, bijvoorbeeld in de vorm van een oever of kademuur.

B Sedimenttransport schattingen

B.1 Locatie Lobith

Berekening	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	BL-4	BL-6i	BL-60	C3i	C4	
L	55	70	73	85	85	105	110	135	135	135	135	135	190	270	190	190	185
Bs	6.6	7.2	8.2	8.2	8.2	9.5	11.4	11.4	13.5	14.2	17	22.8	22.8	34.2	11.4	22.8	
T max	2.6	2.6	2.7	2.9	2.9	3	3	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	
Tgemidd berg	1	1	1.5	1.5	2.5	2.5	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	3	3	3	3	3	
Tgemidd dal	0.9	0.9	1.35	1.35	2.25	2.25	2.52	2.52	3.15	3.15	3.15	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	
As-berg	6.6	7.2	12.3	12.3	20.5	23.75	31.92	31.92	47.25	47.25	59.5	68.4	68.4	102.6	34.2	68.4	
As-dal	5.94	6.48	11.07	11.07	18.45	21.375	28.728	28.728	42.525	42.525	53.55	61.56	61.56	92.34	30.78	61.56	
Aantal	4500	5800	6200	7700	1900	1900	43800	10300	1500	4400	3900	2800	1300	1300	5800	1900	
Berg	2250	2900	3100	3850	950	950	21900	5150	750	2200	1950	1400	650	650	2900	950	
Dal	2250	2900	3100	3850	950	2800	21900	5150	750	2200	1950	1400	650	650	2900	950	
Verenoudigd model - volgens Schijf																	
Veronderstel dat sneelheid in de buurt van grenssnelheid volgens Schijf (ruwe aanname lijkt aanmerkelijk als we naar waargenomen snelheden kijken)																	
As/AC	GELADEN BERG	0.0047429	0.00514287	0.008785714	0.008785714	0.014642857	0.016964286	0.0228	0.0228	0.03375	0.0355	0.0425	0.048857143	0.048857143	0.073285714	0.024428571	0.048857143
As/AC	ONGELADEN DAL	0.00424286	0.004628571	0.007907143	0.007907143	0.011785714	0.013267857	0.02052	0.02052	0.030375	0.03195	0.03825	0.043971429	0.043971429	0.065957143	0.021985714	0.043971429
V-berg	geen iteratie	4.83438892	4.82970366	4.79006419	4.79006419	4.72556542	4.70158737	4.63897341	4.63897341	4.528232379	4.50442255	4.43200111	4.36527954	4.36527954	4.11760816	4.11760816	4.36527954
V-dal	geen iteratie	4.83954264	4.83525731	4.795564455	4.795564455	4.74237495	4.71813733	4.663362116	4.663362116	4.558458897	4.54181174	4.47557076	4.415893219	4.415893219	4.190679139	4.190679139	4.415893219
U ¹ -berg		0.98171915	0.984140672	1.004665232	1.004665232	1.037445693	1.050326669	1.082644377	1.082644377	1.142480579	1.151953867	1.189598599	1.223440096	1.223440096	1.35037999	1.09164663	1.223440096
U ¹ -dal		0.9790538	0.981234668	0.999724765	0.999724765	1.029276052	1.040927553	1.070064335	1.070064335	1.124140785	1.132710796	1.166790354	1.197460954	1.197460954	1.312818993	1.078156274	1.197460954
U ² -berg		1.88171915	1.884140672	1.904665232	1.904665232	1.937445693	1.950326669	1.982644377	1.982644377	2.042480579	2.051953867	2.089598599	2.123440096	2.123440096	2.25037999	1.99164663	2.123440096
U ² -dal		0.9790538	0.981234668	0.999724765	0.999724765	1.029276052	1.040927553	1.070064335	1.070064335	1.124140785	1.132710796	1.166790354	1.197460954	1.197460954	1.312818993	1.078156274	1.197460954
t-berg	Passage tijd door cross section	13.9792992	17.81305376	18.76603587	21.85086369	22.2131281	27.6203946	31.41984014	36.10615744	30.36298357	37.45398829	38.23862862	54.82963439	77.91579621	59.06012866	51.6335988	54.38574927
t-dal	Passage tijd door cross section	9.58264508	12.20569203	12.80799622	14.91342026	15.06457844	18.6893931	19.7721646	24.26590202	20.15222294	24.80791446	25.1135828	35.7418776	50.79108795	37.3211442	34.24857848	34.801301
t-total-b	Jaartijks aantal passages x t_berg	31453.4233	5167.80369	58174.7112	84125.82519	21102.52367	78718.1246	644294.499	189946.7623	22772.23768	82398.77424	74549.7258	76761.48814	50645.26753	38389.07843	148054.7436	50711.41181
t-total-d	Jaartijks aantal passages x t_dal	21560.9514	35394.6767	39704.78828	57416.66790	14311.34951	53249.09592	433011.5404	128699.3954	15114.16721	54577.41181	48971.48646	50038.62739	33014.20717	24620.0437	99320.87761	33061.23595
Van Rijn (1984)																	
theta-berg		0.1716794	0.172120537	0.175809892	0.175809892	0.181997373	0.18443322	0.190580859	0.190580859	0.202265547	0.204146156	0.211705324	0.218618077	0.218618077	0.245537459	0.213326425	0.245537459
theta-dal		0.0003031	0.000319955	0.000482183	0.000482183	0.00081293	0.001402273	0.002435835	0.002435835	0.00431011	0.00431011	0.00431011	0.00431011	0.00431011	0.00431011	0.00431011	0.00431011
T-berg	T-parameter of Van Rijn (1984)	1.67737088	1.684265164	1.74306867	1.74306867	1.838298082	1.876270182	1.972272154	1.972272154	2.154385727	2.183774419	2.303160187	2.409407836	2.409407836	2.829228526	1.999184045	2.409407836
T-dal	T-parameter of Van Rijn (1984)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a-berg	neem min.bedformheight 0.01*(h-T)	0.03	0.03	0.025	0.025	0.015	0.015	0.012	0.012	0.005	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
a-dal		0.031	0.031	0.0265	0.0265	0.0175	0.0175	0.0148	0.0148	0.0085	0.0085	0.0085	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
D ₅₀		1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
ca-berg	Van Rijn (1984)	0.00017139	0.00179233	0.001616165	0.001616165	0.002917344	0.00300802	0.004052509	0.004052509	0.011103762	0.011331274	0.012261121	0.006566296	0.006566296	0.008855176	0.004962938	0.006566296
ca-dal	Van Rijn (1984)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u ¹ *(15 ^w)-berg		2.28E-02	2.28E-02	2.31E-02	2.31E-02	2.35E-02	2.36E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.48E-02	2.48E-02	2.53E-02	2.57E-02	2.57E-02	2.73E-02	2.41E-02	2.57E-02
u ¹ *(15 ^w)-dal		9.58E-04	9.58E-04	1.21E-03	1.21E-03	1.57E-03	1.71E-03	2.06E-03	2.06E-03	2.72E-03	2.82E-03	3.23E-03	3.61E-03	3.61E-03	5.00E-03	3.61E-03	3.61E-03
Cs-berg	dieptegemiddeld Cs	2.90E-05	2.92E-05	3.73E-05	3.73E-05	6.85E-05	7.11E-05	9.74E-05	9.74E-05	2.75E-04	2.82E-04	3.11E-04	1.69E-04	1.69E-04	2.28E-04	1.20E-04	1.69E-04
Cs-dal	dieptegemiddeld Cs	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sed-berg	per s, Cs*ur*B*(h-T) (m3/s)	3.38E-04	3.72E-04	4.56E-04	4.56E-04	5.11E-04	6.19E-04	8.27E-04	8.27E-04	1.19E-03	1.29E-03	1.73E-03	2.56E-03	2.56E-03	5.49E-03	2.56E-03	2.56E-03
Sed-dal	per s, Cs*ur*B*(h-T) (m3/s)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sed-total	per s, Cs*ur*B*(h-T) (m3/s)	1.10E-01	1.54E-01	1.95E-01	1.95E-01	2.27E-01	2.71E-01	5.10E-01	5.10E-01	6.26E-01	7.12E-01	9.43E-01	1.25E+00	1.25E+00	3.65E+00	1.25E+00	2.50E+00
Stotaal	0.5 ^o jaartijks passages (6 mnd)	5.32E+00	9.61E+00	1.13E+01	1.13E+01	1.92E+01	5.39E+00	2.41E+01	2.66E+02	7.69E+01	1.35E+01	5.29E+01	6.43E+01	6.43E+01	1.05E+02	6.39E+01	6.43E+01
Stot (ca)		1.73E+03	3.98E+03	5.66E+03	5.66E+03	9.53E+03	2.63E+03	1.46E+04	1.64E+05	5.82E+04	8.11E+03	3.88E+04	4.65E+04	4.65E+04	6.69E+04	6.34E+04	6.69E+04
U ¹ -berg	U ¹ =u*sqrt(g)/C	0.10707312	0.107210911	0.108378794	0.108378794	0.11024406	0.110979059	0.112815945	0.112815945	0.116220729	0.116759776	0.118901828	0.120827468	0.120827468	0.128050571	0.113325801	0.120827468
U ¹ -dal	U ¹ =u*sqrt(g)/C	0.0044983	0.004622395	0.005674514	0.005674514	0.007356034	0.008019025	0.009676959	0.009676959	0.012754004	0.013241653	0.015180839	0.01692605	0.01692605	0.023490215	0.010137405	0.01692605
Garold & Parker (1991)																	
Zu-berg	Z ₀ = $\frac{u_*^3}{v_*^3} R^*$	22.9509152	22.98045001	23.23078355	23.23078355	23.63059964	23.78814515	24.18187806	24.18187806	24.91168707	25.02723068	25.48637522	25.89913253	25.89913253	27.44793053	24.2911647	25.89913253
Zu-dal		0.9620104	0.990801408	1.216321059	1.216321059	1.576751622	1.718862416	2.07423735	2.07423735	2.733795931	2.838324276	3.253981382	3.62806929	3.62806929	5.05062598	2.712932953	3.62806929
Es-berg	$\gamma = \frac{Az_0^2}{1 + Az_0^2}$	0.22020104	0.220577108	0.223699993	0.223699993	0.228451792	0.230246249	0.23454369	0.23454369	0.241832881	0.242910367	0.24699411	0.250409107	0.250409107	0.261292157	0.235660139	0.250409107
Es-dal		1.0834E-07	1.2413E-07	3.4608E-07	3.4608E-07	1.26695E-06	1.9505E-06	4.99147E-06	4.99147E-06	9.99147E-06	9.99147E-06	2.39451E-05	4.74189E-05	4.74189E-05	1.8696E-05	8.1896E-05	4.74189E-05
Cs-berg	ca=Es, dieptegemiddeld	5.02E-03	5.04E-03	5.16E-03	5.16E-03	5.37E-03	5.64E-03	5.64E-03	5.64E-03	5.99E-03	6.04E-03	6.04E-03	6.45E-03	6.45E-03	7.13E-03	5.69E-03	6.45E-03
Cs-dal	ca=Es, dieptegemiddeld	1.04E-10	1.22E-10	4.19E-10	4.19E-10	1.19E-09	3.31E-09	1.03E-08	1.03E-08	5.39E-08	6.75E-08	1.53E-07	2.95E-07	2.95E-07	2.10E-06	1.36E-06	2.95E-07
Q-dal	U ¹ B*U<																

B.2 Locatie Nijmegen

Berekening	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	BLI-4	BLI-6l	BLI-6b	C3l	C4	
L	55	70	73	85	85	105	110	135	150	135	135	135	135	190	270	190	190	185	
Bs	6.6	7.2	8.2	8.2	8.2	9.5	11.4	11.4	13.5	14.7	17	22.8	22.8	4	4	4	4	4	
T max	2.6	2.6	2.7	2.9	2.9	3	3	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Tgemidd berg	1	1	1.5	1.5	2.5	2.5	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	3.5	3	3	3	3	3	3	
Tgemidd dal	0.9	0.9	1.35	1.35	2.25	2.25	2.52	2.52	3.15	3.15	3.15	3.15	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	
As-berg	6.6	7.2	12.3	12.3	20.5	23.75	31.92	31.92	47.25	47.25	49.7	59.5	68.4	68.4	68.4	102.6	34.2	11.4	
As-dal	5.94	6.48	11.07	11.07	18.45	21.375	28.728	28.728	42.525	44.73	53.55	61.56	61.56	92.34	30.78	30.78	30.78	30.78	
Aantal	4500	5800	6200	7700	3900	5700	4300	10300	1500	4800	3900	2800	1300	1300	1300	1300	500	1900	
Berg	2250	2900	3100	3850	1950	2850	2100	5150	750	2200	1950	1400	650	650	650	650	2900	950	
Dal	2250	2900	3100	3850	1950	2850	2100	5150	750	2200	1950	1400	650	650	650	650	2900	950	
Dal Aantal dal	2250	2900	3100	3850	1950	2850	2100	5150	750	2200	1950	1400	650	650	650	650	2900	950	
Veronderstel dat sneheid in de buurt van grenssnelheid volgens Schijf (ruwe aanname lijkt aanmerkelijk als we naar waargenomen snelheden kijken)																			
Veronderstel dat retourstroom zorgen voor een lagere sneheid bij de bodem of zelfs omkering als U ² >U ₀ , bij U _{max} treedt wervel op die ca verdeelt over verticaal																			
As/Ac	GELADEN BERG	0.00628571	0.006857143	0.011714286	0.011714286	0.01952381	0.022619048	0.0304	0.045	0.047333333	0.056666667	0.065142857	0.065142857	0.065142857	0.097714286	0.032571429	0.065142857	0.065142857	
As/Ac	ONGELADEN DAL	0.00965714	0.006171429	0.010542857	0.010542857	0.017571429	0.020357143	0.02736	0.0426	0.0445	0.0495	0.051	0.05628571	0.05628571	0.087942857	0.03914286	0.05628571	0.05628571	
V ² -berg	geen teratie	4.93619379	4.92809409	4.875727299	4.875727299	4.78946262	4.75513966	4.67055318	4.513997744	4.489220459	4.39828673	4.30259564	4.20595964	4.10932813	3.97238313	4.6472528	4.30259564	4.30259564	
V ² -dal	geen teratie	4.94322102	4.93747122	4.888740383	4.888740383	4.810951362	4.780312058	4.703769537	4.561996571	4.539562018	4.450437737	4.370348107	4.285961017	4.197348107	4.07083898	4.68251281	4.370348107	4.370348107	
U ² -berg	U ² =U ² U ²	1.01505373	1.018354589	1.046305294	1.046305294	1.090844021	1.108388646	1.152041079	1.152041079	1.232653328	1.245371777	1.295787575	1.340934256	1.340934256	1.508664949	1.164142402	1.340934256	1.340934256	
U ² -dal	U ² =U ² U ²	1.01141974	1.01439324	1.039581722	1.039581722	1.079759204	1.095567263	1.135033834	1.135033834	1.209662228	1.219523931	1.265265545	1.306291562	1.306291562	1.459314494	1.145975812	1.306291562	1.306291562	
U ² -berg	U ² =U ² U ²	2.01505373	2.018354589	2.046305294	2.046305294	2.090844021	2.108388646	2.152041079	2.152041079	2.232653328	2.245371777	2.295787575	2.340934256	2.340934256	2.508664949	1.64142402	2.340934256	2.340934256	
U ² -dal	U ² =U ² U ²	0.01141974	0.01439324	0.039581722	0.039581722	0.079759204	0.095567263	0.135033834	0.135033834	0.209662228	0.219523931	0.265265545	0.306291562	0.306291562	0.459314494	0.145975812	0.306291562	0.306291562	
t _{berg}	Passage tijd door cross section	13.9728893	17.8125869	18.8351702	21.911367	22.4359949	27.958895	29.9658466	36.7717238	31.333781	38.6005952	39.8128168	57.9350087	61.7838666	63.9165061	52.0400346	55.0165432	55.0165432	
t _{dal}	Passage tijd door cross section	9.25423966	11.78953083	12.39653903	14.43432627	14.62755317	18.16510925	18.28549169	23.6885798	19.7707801	24.3705171	24.78682381	35.37945702	50.2760705	37.4742704	33.4383633	34.48481867	34.48481867	
t _{total} -0.5/jaarlijks aantal passages x t _{berg}		31439.0009	15656.4419	58389.03945	84435.76297	21309.06952	79682.83508	66628.2041	189402.4362	23477.53357	85119.29914	7634.98278	80542.70122	53140.0528	41545.7254	15307.6161	53213.7133	53213.7133	
t _{total} -0.5/jaarlijks aantal passages x t _{dal}		20822.0392	34189.63941	38429.271	55572.15614	13896.17551	51770.56135	42252.268	121893.0736	14832.8031	53614.34695	48288.87299	49531.23982	32679.44582	34588.51727	96963.83051	32725.99774	32725.99774	
Van Rijn (1984)																			
theta-dal		0.6562297	0.658284686	0.676745916	0.676745916	0.706527584	0.718412448	0.748489827	0.748489827	0.805614688	0.8148193	0.851820701	0.856522323	0.856522323	0.117115213	0.75691287	0.856522323	0.856522323	
theta-berg		2.1076E-05	3.3481E-05	0.000253206	0.000253206	0.001002804	0.0014676057	0.002946931	0.006991908	0.007788405	0.011372252	0.015161943	0.015161943	0.03409613	0.03409613	0.03409613	0.03409613	0.03409613	
Tr-berg	T-parameter of Van Rijn (1984)	10.4192099	10.45665221	10.77615877	10.77615877	11.294364	11.50120444	12.0458549	12.0458549	13.0186239	13.7897474	13.8226516	14.4113694	14.4113694	16.69985718	12.7147661	14.4113694	14.4113694	
Tr-dal	T-parameter of Van Rijn (1984)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
a-berg	neem min.bedformheight 0.01*(h-T)	0.032	0.032	0.027	0.027	0.017	0.017	0.014	0.014	0.007	0.007	0.007	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	
a-dal		0.033	0.033	0.028	0.028	0.019	0.019	0.016	0.016	0.009	0.009	0.009	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	
D ₅₀		1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	
ca-berg	Van Rijn (1984) $C_s = 0.015 \frac{D_{50}}{b} \frac{1}{D_{50}^{0.5}}$	0.00794405	0.00798911	0.00990312	0.00990312	0.016876547	0.01734229	0.02251215	0.02251215	0.050721189	0.051660112	0.055491866	0.034460095	0.034460095	0.042982664	0.0326746903	0.034460095	0.034460095	
ca-dal	Van Rijn (1984) $C_s = 0.015 \frac{D_{50}}{b} \frac{1}{D_{50}^{0.5}}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
u ² /(15*ws) ² -berg		3.96E-02	3.96E-02	4.02E-02	4.02E-02	4.11E-02	4.14E-02	4.23E-02	4.23E-02	4.38E-02	4.41E-02	4.51E-02	4.60E-02	4.60E-02	4.93E-02	4.25E-02	4.60E-02	4.60E-02	
u ² /(15*ws) ² -dal		2.24E-04	2.83E-04	7.77E-04	7.77E-04	1.57E-03	1.88E-03	2.65E-03	2.65E-03	4.08E-03	4.31E-03	5.21E-03	6.01E-03	6.01E-03	9.02E-03	6.01E-03	6.01E-03	6.01E-03	
Cs-berg	diepte-gemiddeld Cs	3.14E-04	3.16E-04	3.98E-04	3.98E-04	6.93E-04	7.18E-04	9.51E-04	9.51E-04	1.22E-03	1.22E-03	1.58E-03	1.58E-03	1.58E-03	2.12E-03	1.14E-03	1.58E-03	1.58E-03	
Cs-dal	diepte-gemiddeld Cs	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
Sed-berg	per s, Cs*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	2.29E-03	2.52E-03	3.09E-03	3.09E-03	3.46E-03	4.19E-03	5.60E-03	5.60E-03	7.04E-03	7.28E-03	8.71E-03	1.17E-02	1.17E-02	1.74E-02	7.42E-03	8.71E-03	8.71E-03	
Sed-dal	per s, Cs*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
Sed-berg	per s, Cs*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	4.02E-01	5.62E-01	7.08E-01	7.08E-01	8.24E-01	9.04E-01	1.34E+00	1.85E+00	2.26E+00	2.57E+00	3.41E+00	4.51E+00	4.51E+00	9.30E+00	1.32E+01	9.30E+00	9.30E+00	
Sed-dal	per s, Cs*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
Stotaal	0.5/jaarlijks passages (6 mnd)	3.60E+01	6.52E+01	9.02E+01	1.30E+02	3.69E+01	1.67E+02	1.84E+03	5.30E+02	9.44E+01	3.71E+02	4.55E+02	7.00E+02	7.00E+02	4.62E+02	7.76E+02	4.62E+02	4.62E+02	
Stot(c)		6.32E+03	1.45E+04	2.07E+04	3.48E+04	9.64E+03	5.35E+04	6.05E+05	2.14E+05	3.02E+04	1.45E+05	1.75E+05	3.74E+05	3.74E+05	5.31E+05	4.01E+05	2.47E+05	2.47E+05	
U ² -berg	U ² =u ² /g/C	0.0171557	0.10188219	0.103293081	0.103293081	0.1055413	0.106425411	0.108630396	0.108630396	0.112699528	0.113341528	0.115884809	0.118155316	0.118155316	0.126632	0.109241245	0.118155316	0.118155316	
U ² -dal	U ² =u ² /g/C	0.00057644	0.00072654	0.001998	0.001998	0.004025907	0.004824029	0.006816217	0.011089201	0.011089201	0.01390033	0.015460938	0.015460938	0.023185206	0.007368545	0.015460938	0.015460938	0.015460938	
Garca & Parker (1991)																			
Zu-berg	$Z_u = \frac{u_{*c}}{v_*} R^*$	13.4696242	13.49168883	13.67852529	13.67852529	13.97624436	14.33321218	14.38531602	14.9241685	15.00918495	15.34618929	15.64797223	15.64797223	16.76916785	14.46620729	15.64797223	15.64797223	15.64797223	
Zu-dal		0.07633522	0.096211594	0.26483973	0.264839														

Berekening	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	BL-4	BL-6i	BL-60	C3i	C4
L	55	70	73	85	85	105	110	135	110	135	135	190	270	190	190	185
Bs	6.6	7.2	8.2	8.2	8.2	9.5	11.4	11.4	13.5	14.7	17	22.8	22.8	34.2	34.2	22.8
T max	2.6	2.6	2.7	2.9	2.9	3	3	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4
Tgemidd berg	1	1	1.5	1.5	2.5	2.5	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	3.5	3	3	3	3
Tgemidd dal	0.9	0.9	1.35	1.35	2.25	2.25	2.52	2.52	3.15	3.15	3.15	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
As-berg	6.6	7.2	12.3	12.3	20.5	23.75	31.92	31.92	47.25	47.25	49.7	59.5	68.4	68.4	102.6	68.4
As-dal	5.94	6.48	11.07	11.07	18.45	21.375	28.728	28.728	42.525	44.73	53.55	61.56	61.56	92.34	30.78	61.56
Aantal	4500	5800	6200	7700	1900	5700	4300	1000	1500	4400	3900	2800	1300	1300	1300	1900
Berg	2250	2900	3100	3850	950	2850	2100	510	750	2200	1950	1400	650	650	2900	950
Vereenvoudigd model -volgens Schijf	Veronderstelt dat sneelheid in de buurt van grenssnelheid volgens Schijf (ruwe aanname lijkt aanemelijk als we naar waargenomen snelheden kijken)															
Bi	Bij dalvaart zal retourstroom zorgen voor een lagere sneelheid bij de bodem of zelfs omkering als U₀ bij Umax treedt wervel op die ca verdeert over verticaal															
As/Ac	0.0071391	0.00726087	0.01386965	0.01386965	0.022282609	0.02581217	0.03469652	0.03469652	0.05135866	0.054021739	0.064673913	0.074347826	0.074347826	0.111521739	0.037173913	0.074347826
As/Ac	0.0064562	0.007043478	0.012032609	0.012032609	0.020054348	0.02323696	0.031226087	0.031226087	0.046222826	0.048619565	0.056025522	0.066913043	0.066913043	0.100389565	0.033456522	0.066913043
V-berg	4.80754941	4.800446801	4.740310014	4.740310014	4.64450161	4.60829297	4.51287903	4.51287903	4.3948979	4.31228592	4.20364284	4.106451607	4.106451607	3.744674452	4.406852175	4.106451607
V-dal	4.81536903	4.808976308	4.754775057	4.754775057	4.668251943	4.63442296	4.54045126	4.54045126	4.425929454	4.340733058	4.20364284	4.106451607	4.106451607	3.811255531	4.525923827	4.106451607
U₀-berg	0.99559694	0.99928697	1.030342622	1.030342622	1.079793283	1.099217143	1.14702762	1.14702762	1.236666038	1.250689247	1.306195901	1.35789255	1.35789255	1.538957129	1.160920671	1.35789255
U₀-dal	0.99155417	0.994882188	1.022870562	1.022870562	1.067489964	1.085021614	1.128774269	1.128774269	1.1945673	1.22218133	1.27607533	1.317743727	1.317743727	1.485251838	1.104889465	1.317743727
U₀-berg	2.09559694	2.09928697	2.130342622	2.130342622	2.179793283	2.199217143	2.24702762	2.24702762	2.336666038	2.350689247	2.406195901	2.45789255	2.45789255	2.638957129	2.260992067	2.45789255
U₀-dal	-0.1084458	-0.105137812	-0.07712944	-0.07712944	-0.03251004	-0.01496739	0.028774269	0.028774269	0.10945673	0.12218133	0.172607533	0.217743727	0.217743727	0.385251838	0.04889465	0.217743727
t_berg	14.8345966	18.9166346	20.05232715	23.34965999	23.98080445	29.94157717	32.23085232	39.55604603	33.95596451	42.02820533	43.4972528	63.1974201	89.80686712	71.84240932	56.0992893	61.53433488
t_dal	9.2973184	11.8469496	12.46845511	14.5380417	14.73557826	18.31073113	19.4789718	23.89610109	20.02720257	24.6932058	25.14281773	35.9779371	51.26335593	38.37403081	33.72221117	35.03100772
t-total-dal-jaarlijks aantal passages x t_berg	33377.8424	54858.24034	62165.03515	89896.18981	22781.76423	85333.04942	70555.6657	20713.637	25466.97338	92462.05173	84819.64295	88476.39501	58374.46363	46697.56606	162687.939	59457.61813
t-total-dal-jaarlijks aantal passages x t_dal	20920.0811	74354.54539	38652.21085	55894.54706	13998.79935	52183.58733	42642.6483	123064.9206	15020.40193	54318.67227	52083.49457	30368.9004	33232.18124	24943.12004	97939.47039	33279.45734
Van Rijn (1984)																
theta-berg	0.88717707	0.890288665	0.916840341	0.916840341	0.959898739	0.977062028	1.002549126	1.002549126	1.103011954	1.116311098	1.169652265	1.218360835	1.218360835	1.406887824	1.032744477	1.218360835
theta-dal	0.00237586	0.002323123	0.001201808	0.001201808	0.00223516	4.52571E-05	0.00016264	0.00016264	0.00015784	0.00015814	0.00015861	0.00015861	0.00015861	0.00015861	0.00015861	0.00015861
T-berg	14.0836681	14.13677169	14.58820578	14.58820578	15.32028871	15.61244062	16.35147231	16.35147231	17.75385312	17.97962636	18.88657191	19.7146856	19.7146856	22.9203921	16.55881869	19.7146856
T-dal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a-berg	0.03	0.03	0.025	0.025	0.015	0.015	0.012	0.012	0.005	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
a-dal	0.01	0.031	0.031	0.0265	0.0265	0.0175	0.0175	0.0148	0.0148	0.0085	0.0085	0.0103	0.0103	0.013	0.013	0.013
Du/D50	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
ca-berg	0.01139107	0.011453333	0.014410055	0.014410055	0.025847111	0.026589966	0.035625165	0.035625165	0.096732356	0.098583408	0.10613567	0.106596245	0.106596245	0.070945666	0.043659245	0.106596245
ca-dal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u*(15*ws)-dal	4.40E-02	4.41E-02	4.48E-02	4.48E-02	4.58E-02	4.62E-02	4.72E-02	4.72E-02	4.91E-02	4.94E-02	5.05E-02	5.16E-02	5.16E-02	5.54E-02	4.75E-02	5.16E-02
u*(15*ws)-dal	2.28E-03	2.21E-03	1.62E-03	1.62E-03	1.83E-04	1.34E-04	6.04E-04	6.04E-04	2.30E-03	2.57E-03	3.63E-03	4.57E-03	4.57E-03	8.09E-03	8.59E-04	4.57E-03
cs-berg	5.01E-04	5.05E-04	6.45E-04	6.45E-04	1.18E-03	1.23E-03	1.68E-03	1.68E-03	4.75E-03	4.87E-03	5.36E-03	5.92E-03	5.92E-03	2.97E-03	2.07E-03	5.92E-03
cs-dal	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sed-berg per s, Cs*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	3.13E-03	3.51E-03	4.32E-03	4.32E-03	4.86E-03	5.90E-03	7.93E-03	7.93E-03	1.15E-02	1.25E-02	1.68E-02	2.51E-02	2.51E-02	5.44E-02	8.18E-03	2.51E-02
Sed-dal per s, Cs*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sed-berg per s, ca*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	5.13E-01	7.18E-01	9.08E-01	9.08E-01	1.17E+00	1.74E+00	2.41E+00	2.41E+00	2.96E+00	3.40E+00	4.51E+00	6.02E+00	6.02E+00	1.78E+01	2.67E+01	4.27E+00
Sed-dal per s, ca*ur*Bs*(h-T) (m3/s)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Stotaal	5.32E+01	9.63E+01	1.34E+02	1.34E+02	1.94E+02	5.54E+01	2.52E+02	2.80E+03	8.08E+02	1.46E+02	5.76E+02	7.13E+02	1.11E+03	7.32E+02	1.27E+03	6.65E+02
Stot (ca)	8.56E+03	1.97E+04	2.82E+04	4.75E+04	1.33E+04	7.42E+04	8.50E+05	3.01E+05	4.33E+04	2.08E+05	2.55E+05	5.33E+05	5.19E+05	6.24E+05	3.47E+05	3.56E+05
U₀-berg	0.10123223	0.10140962	0.102910696	0.102910696	0.105299514	0.106237825	0.108575194	0.108575194	0.112877584	0.113555004	0.116236397	0.118631937	0.118631937	0.127480392	0.109221993	0.118631937
U₀-dal	-0.0052387	-0.005078904	-0.0037259	-0.0037259	-0.00157047	-0.000723033	0.001390002	0.001390002	0.005287538	0.005902227	0.008338171	0.0101857	0.0101857	0.018610403	0.0101857	0.0101857
Garca&Parker (1991)																
Zu-berg	12.2609141	12.28233966	12.46420414	12.46420414	12.75252996	12.86717503	13.15026951	13.15026951	13.67136074	13.7534077	14.07815952	14.36830906	14.36830906	15.44000482	13.22806767	14.36830906
Zu-dal	-0.6340496	-0.615140087	-0.45126875	-0.45126875	-0.19020965	-0.08751115	1.68352434	1.68352434	0.640409207	0.714858269	1.088991793	1.273974538	1.273974538	2.254030643	0.292325996	1.273974538
Es-berg	0.03215972	0.0324119	0.034597863	0.034597863	0.03826763	0.039773171	0.04367959	0.04367959	0.051441089	0.052728733	0.059935252	0.062915032	0.062915032	0.082466697	0.04019799	0.062915032
Es-dal	-1.337E-08	-1.14502E-08	-2.4329E-09	-2.4329E-09	-3.2367E-11	-6.695E-13	1.75809E-11	1.75809E-11	1.40033E-08	1.24628E-08	1.36558E-07	1.36261E-07	1.36261E-07	1.04789E-06	1.04789E-06	1.36261E-07
cs-berg	1.42E-03	1.43E-03	1.55E-03	1.55E-03	1.75E-03	1.84E-03	2.06E-03	2.06E-03	2.53E-03	2.60E-03	2.93E-03	3.25E-03	3.25E-03	4.58E-03	2.13E-03	3.25E-03
cs-dal	-3.05E-11	-2.53E-11	-3.94E-12	-3.94E-12	-2.21E-14	-2.11E-16	1.06E-14	1.06E-14	3.22E-11	6.23E-11	4.95E-10	2.00E-09	2.00E-09	6.12E-08	8.79E-14	2.00E-09
Q-berg	41.4928183	45.3442029	43.67202376	43.67202376	46.81145738	31.33884428	30.74720578	30.74720578	15.72459576	16.68989365	20.45266515	55.99128662	55.99128662	90.2332338	25.7530966	55.99128662
Q-dal</																

B.4 Locatie Belfeld

Deze berekening voor locatie Belfeld is gebaseerd op aantal schepen en type schepen dat voorkomt in de Waal: het werkelijke aantal is ruwweg factor 5 kleiner: hiervoor wordt een correctie toegepast op de vetgedrukte eindwaarden in de tabel (deze moeten nog met een factor 5 worden gereduceerd).

Berekening	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	BL-4	BL-6i	BL-60	C3i	C4	
L	55	70	73	85	85	105	110	135	110	135	135	190	270	190	190	185	
Bs	6.6	7.2	8.2	8.2	8.2	9.5	11.4	11.4	13.5	14.2	17	22.8	22.8	34.2	11.4	22.8	
T max	2.6	2.6	2.7	2.9	2.9	3	3	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	
Tgemidd berg	1	1	1.5	1.5	2.5	2.5	2.8	2.8	3.5	3.5	3.5	3	3	3	3	3	
Tgemidd dal	0.9	0.9	1.35	1.35	2.25	2.25	2.52	2.52	3.15	3.15	3.15	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	
As-berg	6.6	7.2	12.3	12.3	20.5	23.75	31.92	31.92	47.25	49.7	59.5	68.4	68.4	102.6	34.2	68.4	
As-dal	5.94	6.48	11.07	11.07	18.45	21.375	28.728	28.728	42.525	44.73	53.55	61.56	61.56	92.34	30.78	61.56	
Aantal	4500	5800	6200	7700	1900	5700	4300	10300	1500	4400	3900	2800	1300	1300	5800	1900	
Berg	2250	2900	3100	3850	950	2850	2100	5150	750	2200	1950	1400	650	650	2900	950	
Dal	2250	2900	3100	3850	950	2850	2100	5150	750	2200	1950	1400	650	650	2900	950	
Verenoudertel dat snelheid in de buurt van grenssnelheid volgens Schijf (ruwe aanname lijkt aanneemelijk als we naar waargenomen snelheden kijken)																	
As/c	0.01466667	0.016	0.02733333	0.02733333	0.04555556	0.05277778	0.07093333	0.07093333	0.105	0.11044444	0.13222222	0.152	0.152	0.228	0.076	0.152	
As/c	0.0132	0.0144	0.0246	0.0246	0.0414	0.0475	0.06384	0.06384	0.0945	0.0994	0.119	0.1368	0.1368	0.2052	0.0684	0.1368	
V'-dal	5.01299772	4.99747778	4.869164389	4.869164389	4.666318042	4.587246656	4.391782665	4.391782665	4.037729239	3.98267424	3.766439722	3.576234849	3.576234849	2.895171461	4.338077421	3.576234849	
V'-dal	5.02980247	5.016505805	4.90005343	4.90005343	4.716580264	4.644955718	4.467587272	4.467587272	4.145094024	4.094795669	3.897005742	3.722083267	3.722083267	3.09111772	4.418773013	3.722083267	
U'-berg	1.0051808	1.08392379	1.174716865	1.174716865	1.279561384	1.3196161	1.419558287	1.419558287	1.599137722	1.626857948	1.734983459	1.829298603	1.829298603	2.155963652	1.446928362	1.829298603	
U'-dal	1.09183905	1.05941418	1.158820681	1.158820681	1.25323937	1.29020075	1.380857035	1.380857035	1.544908889	1.570341159	1.669864059	1.757145141	1.757145141	2.06407063	1.405787598	1.757145141	
U'-berg	1.20051808	1.208392379	1.274716865	1.274716865	1.379561384	1.4196161	1.519558287	1.519558287	1.699137722	1.726857948	1.834983459	1.929298603	1.929298603	2.255963652	1.546928362	1.929298603	
U'-dal	0.99183905	0.99841418	1.058820681	1.058820681	1.15323937	1.19020075	1.280857035	1.280857035	1.444908889	1.470341159	1.569864059	1.657145141	1.657145141	1.96407063	1.305787598	1.657145141	
t_berg	11.1947945	14.29228355	15.30666666	17.82228714	18.61455974	23.39964992	25.3037521	31.45546048	27.93488159	34.76984977	36.81841221	54.65863657	57.67024114	67.97436318	44.83169451	53.21849877	
t_dal	10.7216604	13.68242863	14.59998844	16.99998183	17.64737339	22.12876289	24.08273634	29.55608551	25.91226469	32.1827337	33.77524542	49.7110955	50.64213005	59.54266606	40.46812114	48.402575783	
t-totaal-0.5*jaarlijks passages x t_berg	25.188	2877	4147	6233	47450	66043	68617	89053	17683	83176	66689	100227	161305	217	161995	6215	20951
t-totaal-0.5*jaarlijks passages x t_dal	24123	7359	39679	64302	65449	93006	16765	10062	97423	12111	9259	15221	8404	19434	19852	70802	101854
Van Rijn (1984)																	
theta-berg	0.1166443	0.117996941	0.1313053	0.1313053	0.133680482	0.162832633	0.186590496	0.186590496	0.233298505	0.240972798	0.272094085	0.300783281	0.300783281	0.41126384	0.193372716	0.300783281	
theta-dal	0.0794952	0.080637087	0.090594039	0.090594039	0.1074716	0.114436323	0.132573313	0.132573313	0.168078016	0.174699242	0.19949346	0.221909496	0.221909496	0.311723106	0.137784344	0.221909496	
T-parameter of Van Rijn (1984)	1.55200854	1.58559603	1.877214102	1.877214102	1.877214102	2.367508008	2.58596966	3.08864537	4.112129894	4.28029206	4.962324106	5.590883218	5.590883218	8.01174539	3.278270372	5.590883218	
T-parameter of Van Rijn (1984)	0.74191567	0.765992022	0.98513719	0.98513719	1.354960555	1.507514345	1.904899303	1.904899303	2.696797327	2.828079477	3.362569392	3.862569392	3.862569392	5.830061033	2.01562493	3.862569392	
a-berg	0.035	0.035	0.03	0.03	0.02	0.02	0.017	0.017	0.01	0.01	0.01	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	
a-dal	0.036	0.036	0.0315	0.0315	0.0225	0.0225	0.0198	0.0198	0.0135	0.0135	0.0135	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	
Ds/D50	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	
ca-berg	0.00067832	0.000700457	0.001052714	0.001052714	0.00236496	0.002527272	0.003920703	0.003920703	0.010230083	0.010230083	0.01078354	0.0130027	0.0130027	0.01865318	0.004767997	0.01865318	
ca-dal	0.00021797	0.000220992	0.000381147	0.000381147	0.00086733	0.001001075	0.001630564	0.001630564	0.004020993	0.004020993	0.004257871	0.005611514	0.005611514	0.008174886	0.003174886	0.008174886	
U''(15°-ws)-berg	2.07E-02	2.08E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.38E-02	2.46E-02	2.62E-02	2.62E-02	2.93E-02	2.97E-02	3.16E-02	3.32E-02	3.32E-02	3.89E-02	2.66E-02	3.32E-02	
U''(15°-ws)-dal	1.71E-02	1.72E-02	1.82E-02	1.82E-02	1.99E-02	2.05E-02	2.21E-02	2.21E-02	2.49E-02	2.52E-02	2.70E-02	2.88E-02	2.88E-02	3.35E-02	2.25E-02	2.88E-02	
Cs-berg	1.40E-05	1.46E-05	2.31E-05	2.31E-05	5.31E-05	6.18E-05	1.03E-04	1.03E-04	1.00E-04	1.03E-04	1.32E-04	1.42E-04	1.42E-04	1.60E-04	7.21E-05	1.42E-04	
Cs-dal	3.72E-06	3.94E-06	6.95E-06	6.95E-06	1.71E-05	2.07E-05	3.60E-05	3.60E-05	1.00E-04	1.10E-04	1.52E-04	1.48E-04	1.48E-04	1.75E-04	4.40E-05	1.48E-04	
Sed-berg pers, Cs*ur*Bst*(h-T) (m3/s)	9.43E-05	1.08E-04	1.78E-04	1.78E-04	2.91E-04	4.04E-04	7.33E-04	7.33E-04	1.27E-03	1.32E-03	1.67E-03	1.92E-03	1.92E-03	2.25E-03	1.15E-03	1.92E-03	
Sed-dal pers, Cs*ur*Bst*(h-T) (m3/s)	2.13E-05	2.47E-05	4.61E-05	4.61E-05	8.82E-05	1.28E-04	2.52E-04	2.52E-04	6.40E-04	7.49E-04	1.34E-03	1.44E-03	1.44E-03	1.92E-03	2.86E-04	1.44E-03	
Sed-berg pers, Cs*ur*Bst*(h-T) (m3/s)	4.25E-02	6.12E-02	9.61E-02	1.12E-01	1.65E-01	2.72E-01	4.72E-01	5.79E-01	9.36E-01	1.30E+00	2.06E+00	4.90E+00	4.90E+00	6.97E+00	1.37E+01	4.90E+00	
Sed-dal pers, Cs*ur*Bst*(h-T) (m3/s)	1.35E-02	1.97E-02	3.48E-02	4.06E-02	6.79E-02	1.16E-01	2.15E-01	2.64E-01	4.61E-01	6.47E-01	1.05E+00	2.56E+00	2.56E+00	3.64E+00	8.53E+00	4.09E+01	
Stoot (a)	1.19E+00	2.23E+00	4.17E+00	6.03E+00	2.58E+00	1.35E+01	2.06E+02	5.93E+01	1.75E+01	7.35E+01	1.16E+02	2.20E+02	1.45E+02	4.47E+02	5.30E+01	1.45E+02	
Stot (ca)	5.36E+02	1.27E+03	2.28E+03	3.84E+03	1.46E+03	9.08E+03	1.32E+05	4.69E+04	9.81E+03	4.98E+04	7.39E+04	1.88E+05	1.76E+05	3.47E+05	5.75E+04	1.21E+05	
U''-berg	0.07510255	0.075685745	0.079839874	0.079839874	0.086375002	0.088915409	0.095175129	0.095175129	0.106422803	0.108150016	0.114931286	0.120838566	0.120838566	0.141209714	0.09889411	0.120838566	
U''-dal	0.06212227	0.062567115	0.066317558	0.066317558	0.072231323	0.07435307	0.080224454	0.080224454	0.090495952	0.092092492	0.098235952	0.103792664	0.103792664	0.123016457	0.08178594	0.103792664	
Garcia&Parker (1991)																	
Zu-berg	13.1387745	13.2249287	13.95082488	13.95082488	15.09274087	15.53663888	16.63043154	16.63043154	18.59579446	18.89917164	20.08252468	21.11473355	21.11473355	24.6883875	16.92997658	21.11473355	
Zu-dal	10.8549383	10.9526684	11.5880225	11.5880225	12.6134435	13.0288959	14.01802446	14.01802446	15.81344959	16.0917868	17.30979067	18.13621699	18.13621699	21.49528743	14.9087087	18.13621699	
Es-berg	0.0431666	0.04746973	0.055897644	0.055897644	0.070212688	0.07451679	0.08606564	0.08606564	0.114732129	0.115238665	0.13007743	0.13956627	0.13956627	0.239706949	0.11281631	0.13956627	
Es-dal	0.018391	0.019101663	0.024908213	0.024908213	0.0365619	0.041982365	0.05699868	0.05699868	0.08990132	0.095579971	0.118041621	0.137861288	0.137861288	0.199617158	0.01500003	0.137861288	
Cs-berg	9.00E-04	9.31E-04	1.23E-03	1.23E-03	1.81E-03	2.07E-03	3.79E-03	3.79E-03	6.43E-03	6.43E-03	7.92E-03	9.32E-03	9.32E-03	1.10E-02	6.43E-03	9.32E-03	
Cs-dal	3.14E-04	3.27E-04	4.54E-04	4.54E-04	7.26E-04	8.59E-04	1.26E-03	1.26E-03	2.24E-03	2.42E-							

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl