

(G)een gebrek aan zand

Modelleren van sediment transport over vaste lagen in de rivierbodem

Arjan Tuijnder

Er beweegt heel wat over de rivierbodem. Het water voert continu sediment aan van bovenstreams, maar voert ook sediment af naar benedenstreams. Zo lang dit in evenwicht is, zitten we goed en blijft de rivier op zijn plek. Maar als er meer wordt afgevoerd dan aangevoerd, dan erodeert de rivierbodem. Dit heeft ongewenste effecten, zoals grondwaterstandverlagingen en het ondermijnen van kunstwerken. Er zijn in Portugal en Australië al eens bruggen ingestort op deze manier. Verder komen er door de erosie op sommige plekken lagen aan de oppervlakte te liggen die moeilijk te eroderen zijn. Op de overgang van zo'n vaste laag naar erodeerbaar sediment wordt het ondiep, wat problemen oplevert voor de scheepvaart. Er kan zelfs een soort waterval ontstaan bij de Nederlands-Duitse grens. Zover laat Rijkswaterstaat het niet komen en daarom is rivierbeheer noodzakelijk.

Laaglandrivieren zoals we die in Nederland kennen, stromen door de afzettingen van grind, zand en klei die ze zelf hebben aangevoerd. In principe is de rivier dus in staat om die afzettingen weer te transporteren en de bodem dus te eroderen. Deze situatie wordt 'alluviaal' genoemd. Stukken van de rivierbodem kunnen echter niet-alluviaal zijn door het voorkomen van vast gesteente, taaie klei- en veenlagen en 'armour layers', lagen grof sediment die het onderliggende fijner sediment beschermen (bepantseren). Ook worden soms vaste lagen aangelegd door de mens. In de Waal zijn bijvoorbeeld, o.a. bij Sint-Andries en Nijmegen, buitenbochten voorzien van een vaste laag om de rivier breder te maken. Door de buitenbocht ondieper te maken, wordt de stroming naar de binnenbocht gedwongen. Daardoor erodeert de binnenbocht en neemt de bevaarbare breedte toe. In de Nieuwe Merwede vormen klei en veen moeilijk erodeerbare lagen en armour layers van grind komen voor in de Boven-Rijn, het begin van de IJssel en de Grensmaas. Het voorkomen van dit soort moeilijk of niet erodeerbare stukken bodem beïnvloedt de morfologische ontwikkeling van de rivierbodem. Als er in een gebied waar vaste lagen aanwe-

zig zijn sprake is van netto erosie, dan kunnen de vaste lagen relatief hoog komen te liggen. Ondiepten die hierdoor veroorzaakt worden, kunnen een belemmering zijn voor de scheepvaart. Anderzijds kunnen vaste lagen soms bij een hoge afvoer opbreken, waardoor plotseling veel sediment beschikbaar komt voor erosie. Dit kan tot plotselinge erosie leiden, wat in principe ongewenst is. Het gebrek aan sedimentaanvoer dat zorgt voor een netto erosie wordt o.a. veroorzaakt door bodemdaling in Duitsland. De Rijn stroomt daar door een gebied waar door geologische activiteit en mijnbouw de bodem langzaam daalt. Vroeger werd er in de rivier ook nog veel zand gewonnen voor bouwactiviteiten, maar daar is men tegenwoordig mee gestopt. Al het zand dat wordt gebaggerd om ondiepten te verwijderen, wordt weer teruggestort in diepe delen van de rivier.

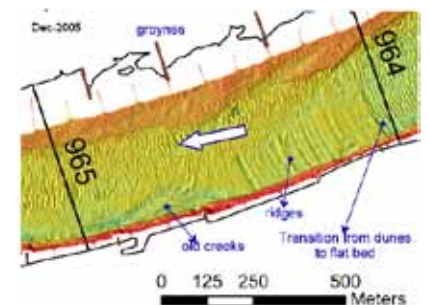
Supply-limitation

Het sedimenttransport over een vaste laag is in principe 'supply-limited'. Dit betekent dat de hoeveelheid sediment die beschikbaar is boven de vaste laag kleiner is dan nodig voor het vormen van de alluviale bodem vormen (rivierduinen). Daardoor blijven de duinen kleiner. Dit heeft weer gevol-



Arjan Tuijnder

gen voor de bodemruwheid. Deze is in principe dan ook lager door de kleinere bodemvormen. Dit zorgt bij dezelfde afvoer voor lagere waterstanden. Deze twee factoren beïnvloeden op hun beurt het sedimenttransport weer. De foto's 1-3 tonen het verschil tussen alluviale duinen en twee soorten supply-limited duinen. De eerste foto toont alluvial duinen die ontstonden in een goot-experiment. In de tweede foto is een grindlaag zichtbaar tussen de duinen; door het gebrek aan zand zijn de duinen kleiner gebleven. In de laatste foto is er sprake van een sterke supply-limitation; er is zo weinig zand dat er zich hele kleine duintjes hebben gevormd. Om de toekomstige ontwikkeling van het riviersysteem te voorspellen maakt Rijkswaterstaat gebruik van modellen (Delft3D) die het



Figuur 1. Vaste laag van klei en veen in de Nieuwe Merwede. De graafsporen zijn nog zichtbaar in de vaste laag

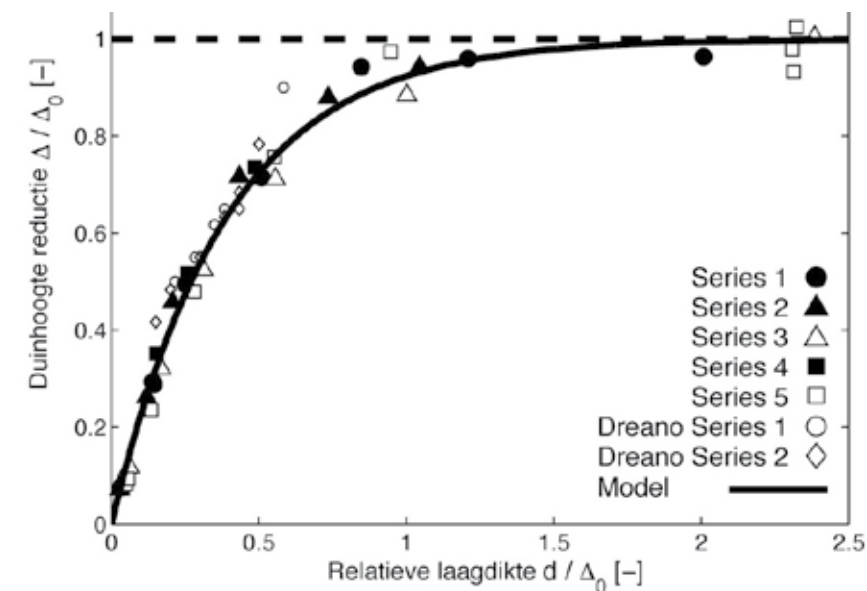
transport van sediment kunnen voorspellen. Hiermee wordt de morfologische ontwikkeling van de rivier voorspeld. Deze morfologische riviermodellen gaan er veelal vanuit dat de bodem overall alluviaal is. Het effect van de vaste lagen op de bodemvormgrootte, de bodemruwheid en het sedimenttransport wordt dus niet of in beperkte mate meegenomen. Om betere voorspellingen te krijgen uit deze riviermodellen heb ik de effecten van de vaste lagen op de bodemvormgrootte, de ruwheid en het sedimenttransport onderzocht. Met de kennis die dit onderzoek heeft opgeleverd heb ik modelconcepten voor transport over vaste lagen in riviermodellen verbeterd.

Experimenteel onderzoek

Ik heb in 2006 en 2007 veel experimenten uitgevoerd in een stroomgoot van de Technische Universiteit Braunschweig om meer inzicht te krijgen in de samenhang van bodemvormdimensies, bodemruwheid en transport. In de stroomgoot werd een laag grind aangelegd, waarvan de korrelgrootte te groot was om getransporteerd te worden door het water. Op de grindlaag werd een



Foto 1. Alluviale duinen na een goot experiment



Figuur 2. Reductie duinhoogte door afnemende zandbeschikbaarheid

laag zand aangebracht. Het zand werd wel getransporteerd. Onder de ingestelde stromingscondities ontstaan duinen bij voldoende beschikbaarheid van zand. In een serie experimenten werd de laagdikte van het zand tussen de experimenten steeds vergroot, waardoor de supply-limitation werd verkleind. De stroomsnelheid en waterdiepte werden echter constant gehouden. We voerden diverse serie experimenten uit met verschillende waterdiepten en stroomsnelheden om ook de invloed van deze parameters mee te nemen in een model. Uit de experimenten bleek dat de relatieve laagdikte - de laagdikte gedeeld

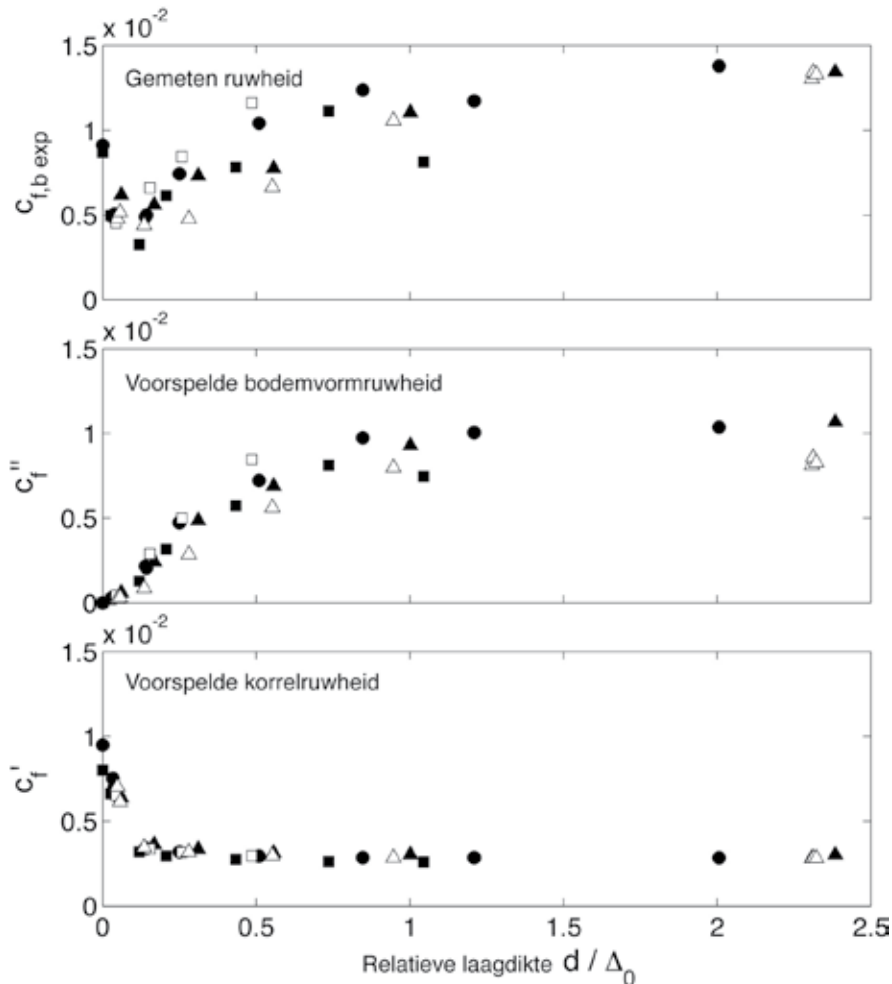


Foto 2. Supply-limited duinen na een goot experiment

door de duinhoogte onder alluviale omstandigheden - maatgevend is voor de reductie in duinhoogte die ontstaat door de supply limitation. Dit wordt getoond in Figuur 2. De hoeveelheid zand die beschikbaar is per vierkante meter wordt uitgedrukt in d , de gemiddelde laagdikte van het zand. Naarmate d afneemt ten opzichte van de duinhoogte die zou ontstaan bij onbeperkt sediment aanbod (Δ_0), wordt de duinhoogte (Δ) kleiner ten opzichte van Δ_0 . Het blijkt dat de resultaten van de experi-



Foto 3. Sterk supply-limited duinen na een goot experiment



Figuur 3. De bovenste grafiek toont de bodemruwheid zoals deze optrad in de experimenten. Deze is maximaal bij volledige duinvorming, maar ook relatief hoog bij een volledig blootliggende vaste laag ($d/\Delta_0 = 0$). Om deze ruwheid te voorspellen wordt deze opgedeeld in een bijdrage van de bodemvormen, de tweede grafiek, en een bijdrage van sediment dat aan de oppervlakte ligt, de korrelruwheid in de onderste grafiek. Bij kleine d/Δ_0 komt er meer van de grove laag bloot te liggen en neemt de korrelruwheid toe. Deze ruwheden worden opgeteld voor de totale bodemruwheid

menten, die onder verschillende omstandigheden zijn gedaan, op één lijn liggen. Deze eigenschap is gebruikt om empirische modellen te maken voor de reductie in bodemvormafmetingen door een beperkte sedimentbeschikbaarheid.

Ruwheidsvoorspelling

Ruwheidsvoorspellingen zijn van belang om de waterstanden en het sedimenttransport goed te kunnen voorspellen. Bij een bepaalde afvoer neemt de waterdiepte toe als de ruwheid groter wordt. De

ruwheid wordt grotendeels bepaald door het ontstaan van rivierduinen en de grofheid van het sediment dat de bodem vormt.

Met deze nieuwe inzichten in bodemvormafmetingen is het mogelijk de ruwheidsvoorspellingen te verbeteren door deze voorspellingen mede te baseren op de gereduceerde bodemvormafmetingen. De hydraulische ruwheid bereikt een minimum wanneer er zich geen duinen meer kunnen vormen op de rivierbodem (Foto 3 en Figuur 3). Daarnaast is het van be-

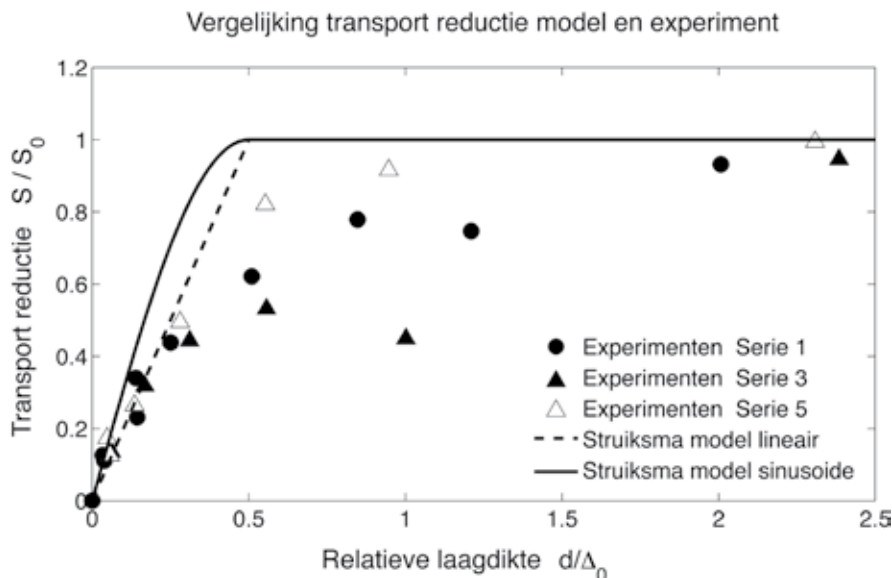
lang rekening te houden met het blootliggen van de, meestal grove, vaste laag onder 'sterk supply limited' omstandigheden.

Daarom is een modelconcept ontwikkeld waarmee te voorspellen is welk deel van de vaste laag bedekt is met bodemvormen. Naarmate er meer van de grove laag bloot komt te liggen, kan de hydraulische ruwheid weer toenemen.

Berekening sedimenttransport

Bij een beperkte hoeveelheid transporteerbaar sediment op een vaste laag zal het sedimenttransport ook kleiner zijn. Deze reductie wordt momenteel berekend in Delft3D met een modelconcept van Struiksma uit 1985. Dit concept gaat ervan uit dat het transport boven een bepaalde kritische laagdikte volledig alluviaal is en nul wordt wanneer de laagdikte ook nul is. Dit wordt getoond in Figuur 4. De lijnen van het Struiksmamodel zijn horizontaal op $s/s_0 = 1$ als de relative laagdikte groter is dan 0.5. Dit betekent dat er geen reductie van het sedimenttransport (s) plaatsvindt ten opzichte van de alluviaal situatie (s_0). Als er geen zand is ($d = 0$), dan is er ook geen transport ($s = 0$). Daartussen wordt de transportreductie lineair of met een sinus geïnterpoleerd en is afhankelijk van de transportlaagdikte.

Het was echter nog onduidelijk hoe het verloop van de reductie van het transport tussen volledig alluviaal transport en géén transport eruitziet. De nieuwe experimenten bieden inzicht in het verloop van de reductiefactor met afnemende sedimentbeschikbaarheid. Het blijkt dat het transport al bij een grotere laagdikte begint af te nemen. De Struiksma-reductiefunctie beschrijft het totale effect van alle factoren die het transport verminderen. Dit zijn onder andere de verminderde bodemschuifspanning en de



Figuur 4. Voorspelde transport reductie met het bestaande Struiksmamodel, in vergelijking met de experimenten. Het Struiksmamodel is aangepast om de experimentele data nu juist te voorspellen

verminderde bodembedekking met transporteerbaar sediment. Deze factoren zijn dankzij de experimenten nu apart voorspelbare parameters geworden. Daardoor is het nu mogelijk de invloed van deze parameters op het sedimenttransport expliciet mee te nemen in de voorspelling van het sedimenttransport.

Modeltests met Delft3D tonen aan dat zowel met het huidige Struiksmamodel als met de concepten van het nieuwe supply-limited-model goede morfologische resultaten te behalen zijn. Het nieuwe modelconcept biedt wel voordelen: de bodemvormdimensies zijn nu voorspelbaar en de ruwheid wordt niet meer overvoorspeld, wat tot een betere voorspelling van de waterstand leidt.

Semi-vaste lagen

Supply-limited condities komen niet alleen voor op vaste lagen die permanent aanwezig zijn. Als er een breed mengsel aan korrelgrootten op de rivierbodem aanwezig is, kan het zijn dat een deel van het mengsel, de grofste fracties, niet wordt getransporteerd onder de optredende omstandigheden. De korrelgrootten die niet kunnen worden getransporteerd, zijn in zo'n situatie geconcentreerd aanwezig in de troggen van de duinen. Als het aandeel van de niet-mobiele korrelgrootten in het sedimentmengsel groot genoeg is, zal er zich een tijdelijke grove laag vormen. Op deze laag kan zich een supply-limited-conditie voordoen. Deze situatie doet zich voor in veel rivieren op plekken

waar zich zand-grindmengsels bevinden met een groot grindaandeel. Afhankelijk van de situatie kan een vaste laag bij een relatief kleine hoogwatergolf tot een zeer krachtige hoogwatergolf stabiel blijven. Om dit te kunnen simuleren in morfologische modellen, is het noodzakelijk het verticale ontmengingsproces in duinen te modelleren en criteria te formuleren voor de vraag wanneer een transportlaag immobiel wordt of juist weer wordt getransporteerd. De komende tijd zal er aan dit model worden gewerkt. De experimenten om deze modellen verder te ontwikkelen zijn al gedaan.

Conclusies

De invloed van vaste lagen op de bodemvormgrootte, de bodemruwheid en het sedimenttransport is veelal verwaarloosd. Ten onrechte, want er is een duidelijke invloed. Door een bodemvormgroottevoorspeller te maken, die ook werkt boven vaste lagen, kan de ruwheid en het sedimenttransport beter worden berekend. Dit maakt nauwkeurigere morfologische berekeningen mogelijk. Dit werkt nu voor permanente vaste lagen. Voor het ontstaan en opbreken van vaste lagen moet er nog een sorteringsmodel ontwikkeld worden. Dan kunnen ook tijdelijke vaste lagen beter voorspeld worden. Met deze voorspellingen kunnen ingrepen in het riviersysteem beter worden gepland en hopelijk ontstaat er dan geen 'Warterval van Nijmegen'.

Over de auteur

Arjan Tuijnder (1980) studeerde Fysische Geografie aan de Universiteit Utrecht. Hier is hij afgestudeerd in de richting kust-morfologie. Daarna deed hij zijn promotie onderzoek (2005-2009) bij de afdeling WEM aan de Universiteit Twente, met Prof. dr. Suzanne Hulscher als promotor en dr. ir. Jan Ribberink als co-promotor. Het proefschrift 'Sand in Short Supply' gaat over het modelleren van sediment transport over vaste lagen in rivieren. Na het promotie onderzoek is hij als post-doc en universitair docent betrokken bij het onderwijs en onderzoek van de afdeling. Email: a.p.tuijnder@ctw.utwente.nl.

Proefschrift: Tuijnder, A.P. (2010) Sand in Short Supply: Modelling of Bedforms, Roughness and Sediment Transport in Rivers under Supply-Limited Conditions. Universiteit Twente, Enschede, The Netherlands. ISBN 978-90-9025123-3