



Modellering van de dynamiek van zwevend stof in de Maas

GERTJAN ZWOLSMAN, KIWA WATER RESEARCH

EISSE WIJMA, UNIVERSITEIT UTRECHT

ANNETTE DOOMEN, KIWA WATER RESEARCH

HANS MIDDELKOOP, UNIVERSITEIT UTRECHT

De kwaliteit van het zwevend stof (slib) in de Maas is relatief slecht. Kennis over het gedrag van zwevend stof is van belang voor waterleidingbedrijven en voor natuurontwikkelingsprojecten langs de rivier. Het is bekend dat de concentratie zwevend stof in de Maas afhankelijk is van de afvoer, maar deze relatie is niet eenduidig: er treedt hysteresis op, wat betekent dat de concentratie zwevend stof tijdens de stijgende fase van de afvoergolf hoger is dan die tijdens de dalende fase. De klassieke relatie tussen de afvoer en zwevend stof heeft dan ook een beperkt voorspellend vermogen. In het hier beschreven onderzoek is een verbeterde relatie tussen de concentratie zwevend stof en de afvoer van de Maas ontwikkeld, waarbij de slibvoorraad in de rivierbedding als extra variabele is geïntroduceerd. De voorspellende waarde van de ontwikkelde relatie is aanmerkelijk beter dan die van de klassieke relatie met de waterafvoer.

De kwaliteit van het zwevend stof in de Maas is relatief slecht¹⁾. De gehalten aan zware metalen (cadmium, koper, zink), PCB en PAK liggen boven het maximaal toelaatbaar risico (MTR). De slechte kwaliteit van het zwevende stof is een punt van zorg, omdat een groot-schalige herinrichting van de Maas in uitvoering is²⁾. Deze herinrichting is nodig om de rivier meer ruimte te geven en biedt tegelijkertijd gelegenheid voor natuurontwikkeling. Wanneer de kwaliteit van het zwevende stof niet verbetert, is de kans op nieuwe verontreiniging groot. De gesaneerde en heringerichte gebieden zullen dan opnieuw worden veront-

reinigd door afzetting van zwevend stof. Het ecologische rendement van sanering is in dat geval beperkt.

Kennis over zwevend stof is ook van belang voor waterleidingbedrijven die oppervlaktewater gebruiken als bron voor drinkwater. Bij de Maas gaat het om drie bedrijven: Waterleidingmaatschappij Limburg (WML), Duinwaterbedrijf Zuid-Holland (DZH) en Evides. Hun grootste productielocaties bevinden zich te Heel (WML), Brakel (DZH) en in de Brabantse Biesbosch (Evides). De waterleidingbedrijven stoppen de inname van water als het

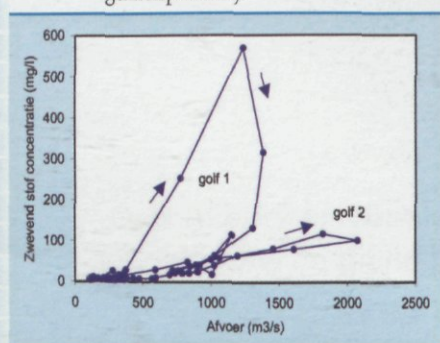
zwevende stof boven 50 mg/l komt om verontreiniging van hun opslagbekkens zoveel mogelijk te beperken. Dergelijke innamestops zijn zeer ongewenst voor de bedrijfsvoering. Daarom bestaat behoefte aan meer inzicht in de dynamiek van zwevend stof in de Maas, in het bijzonder aan methoden om de concentratie zwevend stof en de kwaliteit te voorspellen als functie van de afvoer van de rivier. Het doel van deze studie is een methode te ontwikkelen waarmee de concentratie zwevend stof in de Maas op eenvoudige manier kan worden voorspeld voor alle mogelijke afvoerreëgimes. De studie is beperkt tot de locatie Eijsden aan de grens met België.

Bestaande kennis

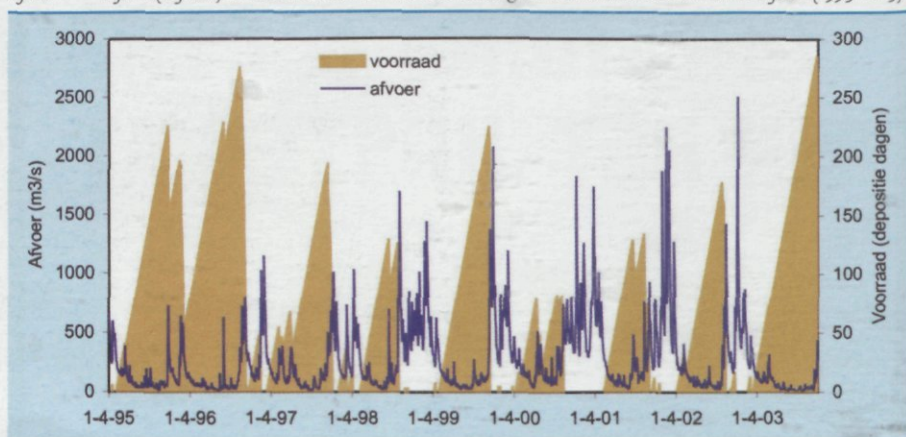
De dynamiek van zwevend stof in rivieren is uitgebreid onderzocht op verschillende schaalniveaus en met verschillende doelstellingen^{3),4),5),6),7),8)}. Daarbij zijn diverse voorspellingsmethoden uitgetoetst. De meest algemene aanpak is het opstellen van een 'rating curve'. Uit langdurige meetreeksen van afvoer (Q) en zwevend stof (ZS) wordt een regressievergelijking afgeleid die de Q/ZS-relatie zo goed mogelijk weergeeft. Uit vele studies is gebleken dat de afvoer slechts een beperkt gedeelte van de dynamiek van het zwevende stof verklaart. Andere factoren met invloed op de concentratie van zwevend stof in rivieren zijn het landgebruik (erosie), de samenstelling van de rivierbedding, de mate van oevererosie en de aanwezigheid van stuwen en sluizen. Bij hoge afvoeren treedt bovendien hysteresis op.

Van hysteresis wordt gesproken wanneer de concentratie zwevend stof in de stijgende fase van de golf hoger is dan in de dalende fase (zie afbeelding 1). Dit verschil kan grotendeels worden verklaard door uitputting van de slibvoorraad in de bedding van de rivier. De concentratie zwevend stof wordt dus niet alleen bepaald door de transportcapaciteit van de rivier, maar ook door de grootte van de slibvoorraad in de bedding. Hysteresis wordt vaak gemodelleerd door verschillende (regressie)ver-

Afb. 1: Concentratie zwevend stof te Eijsden tijdens het hoogwater van december 1999. De pijlen geven het verloop van de afvoergolf aan (stijgend resp. dalend).



Afb. 2: Afvoer (Eijsden) en berekende slibvoorraad in de bedding van de Maas bovenstrooms van Eijsden (1995-2003).



gelijkingen op te stellen voor de verschillende stadia binnen de afvoergolf. Het is echter nooit gelukt om een model te maken dat kan voorspellen of hysteresis zal optreden en welke verschillen in zwevend stof hierdoor kunnen ontstaan.

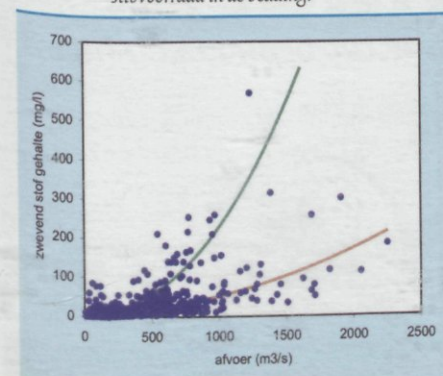
Het gedrag van zwevend stof in de Maas is complex^{9),10),11)}. De concentraties kunnen variëren van enkele mg/l bij laagwater tot 600 mg/l tijdens afvoergolven. De mediane concentratie aan de grens met België (Eijsden) is ongeveer 10 mg/l. De hydrologische situatie is zeer dynamisch. Grosso modo is de afvoer hoog in het winterhalfjaar (van oktober tot en met maart circa 500 tot 2000 kubieke meter per seconde) en laag tot zeer laag in het zomerhalfjaar (van april tot en met september circa 10 tot 50 kubieke meter per seconde). Bij een aantrekkende afvoer en hoogwatergolven vertoont de Q/ZS-relatie sterke hysteresis-effecten (afbeelding 1). Het uitgangspunt van deze studie is dat deze hysteresis wordt veroorzaakt door uitputting van de slibvoorraad in de bedding. Daarom is een methodiek ontwikkeld om die slibvoorraad kwantitatief te beschrijven. Volgens is onderzocht in hoeverre de introductie van deze nieuwe variabele in de 'rating curve' de voorspelling van de concentratie verbetert voor alle mogelijke afvoerreëgimes.

Kwantificering van de slibvoorraad in de Maas

De studie is beperkt tot het meetstation Eijsden. Bovenstrooms van Eijsden is er nog geen significante berging van zwevend stof in de uiterwaarden; tevens is de bijdrage van oevererosie aan de concentratie zwevend stof beperkt, omdat de oevers grotendeels uit vast gesteente bestaan. De studie is gebaseerd op metingen van het zwevend stof en de afvoer die het RIZA tussen 1990 en 2003 verrichtte.

Wanneer de afvoer van de afgelopen tien jaar wordt verdeeld in klassen, kan een kritische afvoer worden onderscheiden waarboven de concentratie zwevend stof sterk toeneemt¹¹⁾.

Afb. 3: 'Rating curves' voor zwevend stof te Eijsden bij aanwezigheid c.q. afwezigheid van een slibvoorraad in de bedding.



Dit proces is fysisch te verklaren door aan te nemen dat een drempelwaarde moet worden overschreden om slib van de bodem op te nemen voor transport. Deze kritische afvoer is vastgesteld op 280 kubieke meter per seconde, waarbij de concentratie zwevend stof 10 mg/l bedraagt. Aangenomen wordt dat bij een afvoer lager dan 280 kubieke meter per seconde afzetting van zwevend stof (slib) plaatsvindt in de bedding (sedimentatie), terwijl daarboven erosie optreedt van de slibvoorraad in de bedding (indien aanwezig). De aangroei van de slibvoorraad wordt uitgedrukt in depositiedagen: één depositiedag komt overeen met een vaste hoeveelheid slibafzetting per dag als de afvoer lager is dan 280 kubieke meter per seconde.

De erosie wordt uitgedrukt in negatieve depositiedagen volgens de volgende, empirisch verkregen, vergelijking:

$$E = 3,7 \times 10^{-5} Q^2,$$

waarin E de erosie is in depositiedagen en Q het debiet.

Ter illustratie: bij een debiet van 500 kubieke meter per seconde wordt dagelijks een slibvoorraad ter grootte van negen depositiedagen weggespoeld, bij 1000 kubieke meter per seconde een voorraad van 37 depositiedagen en bij 2000 kubieke meter per seconde een voorraad van 148 depositiedagen.

De aanwezige slibvoorraad in de bedding wordt bijgehouden sinds 1 april 1995. Aangenomen wordt dat de slibvoorraad op dat moment geheel uitgeput was, vanwege het voorafgaande extreme hoogwater in januari/februari 1995. In het zomerhalfjaar van 1995 bouwt zich een slibvoorraad op, doordat de afvoer doorgaans lager is dan 280 kubieke meter per seconde. Deze slibvoorraad wordt

weer geheel of gedeeltelijk verwijderd in het winterhalfjaar (afbeelding 2). De slibvoorraad wordt per dag bijgehouden. Voor elke dag na 1 april 1995 is nu bekend of een slibvoorraad aanwezig is (S=1) of niet (S=0).

'Rating curve' voor zwevend stof

Voor de oneven jaren in de periode 1995-2003 is het verband tussen zwevend stof en de afvoer bepaald, waarbij de aanwezigheid c.q. afwezigheid van een slibvoorraad in de bedding is meegenomen. Dit resulteert in de volgende relatie:

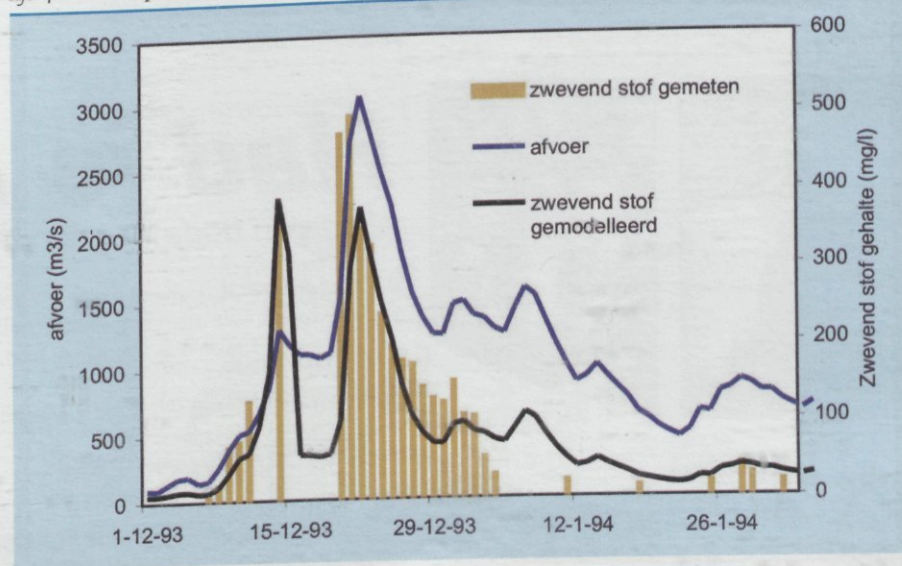
$$ZS = 5,5 \times 10^{-5} Q^{(0,24 \times S + 1,96)} + 8,$$

waarin S (het Engelse Stock) voor de eventueel aanwezige voorraad staat.

De vergelijking geeft aan dat bij aanwezigheid van een slibvoorraad (S=1) de afhankelijkheid van de afvoer groter is dan wanneer de voorraad uitgeput is (S=0). In de 'rating curve' wordt dit verschil weergegeven door twee regressielijnen (afbeelding 3). De verklaarde variantie door deze 'rating curve' bedraagt 60 procent ($R^2 = 0,60$). Dat is een significante verbetering ten opzichte van de verklaarde variantie door de afvoer alleen ($R^2 = 0,46$)¹⁰⁾.

Om de voorspellende waarde van de gevonden relatie te onderzoeken en te valideren zijn drie datasets gebruikt: de even jaren in de periode 1996-2002, de periode 1990-1995 (waarvan alleen wekelijkse zwevend stofmetingen bekend zijn) en het hoogwater 1993-1994. Afbeelding 4 geeft een tijdserie weer van het hoogwater 1993-1994, waaruit blijkt dat de concentratie zwevend stof bij de eerste afvoergolf (slibvoorraad aanwezig) goed wordt voorspeld. Bij maximale afvoer wordt de hoogte van de zwevend stof-piek goed voorspeld, maar deze loopt wel twee dagen achter op de gemeten piek. De staart van het hoogwater (slib-

Afb. 4: Voorspelde en gemeten concentratie zwevend stof te Eijsden tijdens het hoogwater van december 1993-januari 1994.



voorraad afwezig) wordt ook bijzonder goed voorspeld. Tot nu toe is het niet mogelijk gebleken om beide extremen (hoog en laag debiet) in één hoogwatergolf goed te voorspellen. De verklaarde variantie voor de hoogwatergolf van 1993 bedraagt 72 procent, hetgeen zeer goed is. Voor de overige validatieperiodes is de verklaarde variantie 74 procent (1990-1995) en 52 procent (even jaren 1995-2003).

Tenslotte is de per dag afgezette hoeveelheid slib (depositiedag) geschat waarmee het model rekent. Hierbij is een 'steady state'-aansname gebruikt voor de slibvoorraad in de bodem tussen 1995 en 2003. Eerst is de weggespoelde vracht aan zwevend stof berekend voor alle dagen dat het debiet groter was dan 280 kubieke meter per seconde; de dagelijkse vrachten (berekend als $Q \times ZS$) zijn gesommeerd voor de periode 1995-2003. De totale weggespoelde vracht is gedeeld door het aantal depositiedagen (afvoer minder dan 280 kubieke meter per seconde) in deze periode. Dit resulteert in een gemiddelde vracht aan slib per depositiedag van $0,32 \pm 0,15$ kton. Ter vergelijking: de jaarlijkse aanvoer van zwevend stof te Eijsden, berekend over de jaren 1990 t/m 1999, bedraagt zo'n 460 kton¹²⁾.

Discussie en conclusie

Door de slibvoorraad in de bedding te kwantificeren en te implementeren in de 'rating curve' is de voorspelling van de concentratie zwevend stof in de Maas aanzienlijk verbeterd. Deze nieuwe methode van modellering is fundamenteel anders dan voorgaande methoden, omdat de oorzaak van hysteresis, de beschikbaarheid van slib in de bedding, als

verklarende variabele wordt meegenomen. Niettemin bestaat ruimte voor verdere verbetering. Er zijn namelijk andere bronnen van zwevend stof naast de liggende voorraad in de bedding, zoals oevererosie en erosie van hellingmateriaal. De indruk bestaat dat erosie van hellingmateriaal tijdens extreme hoogwaters zelfs de grootste bron is van zwevend stof in de Maas^{9),10),11)}. Om de 'rating curve' voor zwevend stof in de Maas verder te verbeteren zal de erosie van hellingmateriaal moeten worden gekwantificeerd. Onderscheid tussen hellingen en beddingmateriaal lijkt mogelijk op basis van de chemische samenstelling van het zwevend stof⁹⁾.

De beschreven methode is mogelijk toepasbaar op andere rivieren in dezelfde orde van grootte of kleiner dan de Maas. Voor grotere stroomgebieden, zoals de Rijn, is de methode waarschijnlijk minder goed toepasbaar: de grootte van het stroomgebied en de verschillende karakters van de zijrivieren resulteren in complexe hysteresis-effecten¹³⁾. 

LITERATUUR

- 1) Breukel R. en A. Mol (1999). De waterkwaliteit van de Maas. Normtoetsingen in de periode 1993 t/m 1998. Werkdocument 99.181X. RIZA.
- 2) www.demaaswerken.nl
- 3) Asselman N. (1997). Suspended sediment in the river Rhine. The impact of climate change on erosion, transport and deposition. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- 4) Bogen J. (2004). Erosion and sediment yield in the Atna river basin. *Hydrobiologia* nr. 521, pag. 35-47.
- 5) Horowitz A., F. Rinella, P. Lamothe, T. Miller, T. Edwards, R. Roche en D. Rickert (1990). Variations in

suspended sediment and associated trace element concentrations in selected cross sections. *Environmental Science & Technology* nr. 24, pag. 1313-1320.

- 6) Hudson P. en J. Mossa (1997). Suspended sediment transport effectiveness of three large impounded rivers, U.S. Gulf coastal plain. *Environmental Geology* nr. 32, pag. 263-273.
- 7) Steegen A., G. Govers, J. Nachtergaele, I. Takken, L. Beuselinck en J. Poesen (2000). Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium. *Geomorphology* nr. 33, pag. 25-36.
- 8) Walling D. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology* nr. 65, pag. 209-237.
- 9) Zwolsman J., R. Kouer en A. Hendriks (2000). Environmental impact of river floods in the Netherlands. Symposium Elbeforschung, Berlin. ATV-DVWK Schriftenreihe, nr. 21, pag. 31-61.
- 10) Doomen A. (2003). Zwevend-stof dynamiek en zwevend stof kwaliteit van de Maas. Stageverslag RIZA / Universiteit Utrecht.
- 11) Wijma E. (2005). Modelling suspended sediment of the river Meuse. Stageverslag Kiwa Water Research / Universiteit Utrecht.
- 12) Fiiole A., E. Houwing en T. Viser (2002). Sedimentbalans 1960-2000 zwevend stofvracht Rijn en Maas. Werkdocument 2002.197X. RIZA.
- 13) Asselman N. (1997). Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the river Rhine. *Hydrological Processes* nr. 13, pag. 1437-1450.