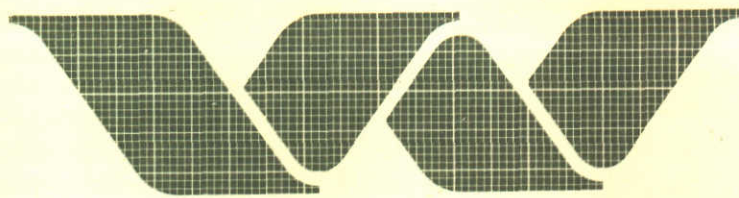


R 1056-03



B EXEMPLAAR

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

waterkwaliteitsmodel Rijn

modellering gedrag en verspreiding
micro-verontreinigingen

haalbaarheid modellering zwevend stof

verslag onderzoek

R 1056-03

juni 1985

waterkwaliteitsmodel Rijn

modellering gedrag en verspreiding
micro-verontreinigingen

haalbaarheid modellering zwevend stof

verslag onderzoek

R 1056-03

juni 1985

INHOUD

1	Inleiding	1
1.1	Opdracht	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Samenvatting	2
2	Overzicht beschikbare gegevens	4
2.1	Relatie tussen troebelheid en zwevend stof	5
2.2	Benodigde bemonsteringsfrequentie troebelheid	8
3	Analyse beschikbare gegevens	15
3.1	Debietverdeling over de Rijntakken	15
3.2	Vergelijken verloop debiet en troebelheid	17
3.3	Vergelijken gedrag troebelheid en zwevend stof	20
3.4	Relatie troebelheid en debiet (Lobith)	21
3.5	Vergelijken verschillende hystereselussen	26
4	Mogelijkheden voor modellering zwevend stof	31
4.1	Beschrijvingen fysisch-chemische aspecten	31
4.2	Mathematische modellen en modelformuleringen	38
4.3	Principeberekening met twee modelconcepten	43
4.4	Samenvatting van de resultaten	53
4.5	Toekomstige ontwikkelingen	54
5	Mogelijkheden modellering verontreinigingen	56
5.1	Processen	56
5.2	Globale analyse gegevens Lobith	57
5.3	Voorspellen gedrag bij afvoergolf	63
5.4	Voorstellen voor aanvullend meetprogramma	66
6	Konklusies en aanbevelingen	68
6.1	Beschikbare gegevens	68
6.2	Analyse beschikbare gegevens	68
6.3	Mogelijkheden voor modelleren zwevend stof	69
6.4	Mogelijkheden voor modelleren verontreinigingen	70
	Literatuur	71

1 INLEIDING

1.1 OPDRACHT

Dit onderzoek is een haalbaarheidsstudie voor de zwevend stof modellering van de Rijn en is uitgevoerd in het kader van het "Waterkwaliteitsmodel Rijn". De opdracht is verleend door het Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater (RIZA) in juni 1983 (brief Hod/7532 dd 27 juni 1983). Het doel van deze haalbaarheidsstudie is om na te gaan welke mogelijkheden er zijn voor de modellering van zwevend stof in de Rijn. Het modelleren van zwevend stof is een eerste stap voor de modellering van het gedrag van verontreinigingen zoals zware metalen en organische microverontreinigingen welke ten dele adsorberen aan het zwevend stof.

1.2 PROBLEEMSTELLING

Het belang van het zwevend stof voor de waterkwaliteit van de Rijn is dat het zwevend stof (slib) drager is van zowel organische als anorganische verontreinigingen. Voor de kwaliteit van het oppervlaktewater is de interactie tussen de waterfase (opgeloste stoffen) en de slibfase (aan slib geadsorbeerde stoffen) van direct belang. Verontreinigingen kunnen onder andere via desorptie en adsorptie aan de waterfase worden toegevoegd dan wel (tijdelijk) worden onttrokken. Naast de kwaliteit van het oppervlaktewater is ook de kwaliteit van het slib van belang. Het gaat hier dan met name om het baggerslib en de bestemming die aan dit verontreinigde slib kan worden gegeven. Verder is ook de invloed van de organische of anorganische verontreinigingen op de (aquatische) voedselketen van belang. Bij een nadere studie naar de accumulatie van toxische stoffen in de voedselketen is het gedrag van deze stoffen in het oppervlakte water onontbeerlijk. Bij het beschrijven van dit gedrag is het zwevend stof een van de basiselementen. Een ander belangrijk aspect is dat het zwevend stof ook een van de basiselementen is voor een meer gedetailleerde beschrijving van de fosfor-komponenten. De verhouding tussen ortho-fosfaat en particulier fosfaat wordt in belangrijke mate bepaald door adsorptie/desorptie en sedimentatie/resuspensie.

Gezien de relaties tussen zwevend stof, de kwaliteit van het oppervlaktewater, het baggerslib en het aquatisch ecosysteem is het van belang om het gedrag van zwevend stof modelmatig te kunnen beschrijven. Er mag worden verwacht dat er dan meer kwantitatieve informatie beschikbaar komt voor het beleid en beheer ten aanzien van het oppervlaktewater. Deze informatie kan gebruikt worden bij de interpretatie van metingen van zowel zwevend stof als de daaraan geadsorbeerde verontreinigingen. Met

name gaat het hierbij om de representatieve waarde van een steekmonster voor een bepaalde periode. Daarnaast kan deze informatie worden gebruikt om tot een betere schatting van de vracht aan zwevend stof en verontreinigingen te komen.

Het benodigde onderzoek kan in een aantal fasen worden onderverdeeld:

1. Onderzoek naar de mogelijkheid van een zwevend stof model voor de Rijn.
2. Onderzoek gericht op de ontwikkeling, inregeling, toetsing en toepassing van zo'n model voor zwevend stof.
3. Onderzoek gericht op de ontwikkeling, inregeling, toetsing en toepassing van een model voor de verspreiding van micro-verontreinigingen.

In dit rapport is de eerste fase van dit onderzoek gerapporteerd. Het doel van deze fase van het onderzoek is om na te gaan in hoeverre een modelmatige benadering van het zwevend stof mogelijk is. Dit is een belangrijke randvoorwaarde voor de verdere fasen van het onderzoek; een modelmatige benadering van micro-verontreinigingen is in grote mate afhankelijk van de beschrijving van het zwevend stof transport.

1.3 SAMENVATTING

In dit onderzoek is met name het gedrag van zwevend stof (troebelheid) als functie van de tijd en het debiet (stroomsnelheid) geanalyseerd. De bemonsteringsfrequentie van zwevend stof op de benedenstroms van Lobith gelegen stations is te gering om inzicht te verkrijgen in het gedrag van zwevend stof. Gezien het feit dat zwevend stof en troebelheid eenzelfde gedrag vertonen is ook gebruik gemaakt van de troebelheid. De troebelheid wordt continu gemeten op de stations Lobith (Rijn), Vuren (Waal), Hagestein (Beneden-Rijn) en Kampen (IJssel). Uit een analyse van de gegevens van zwevend stof (een steekmonster per dag) en troebelheid bij Lobith blijkt dat zwevend stof en troebelheid eenzelfde gedrag vertonen in relatie tot het debiet. Op basis van de beschikbare informatie kan er evenwel geen eenduidige relatie tussen zwevend stof en troebelheid worden afgeleid. Dit wordt veroorzaakt door de korrelverdeling van het zwevend stof, welke van invloed is op de meting van de troebelheid; de korrelverdeling van het zwevend stof in de Rijn is niet konstant.

Bij de uitgevoerde analyses is hoofdzakelijk gebruik gemaakt van de troebelheidsgegevens. De benodigde bemonsteringsfrequentie voor troebelheid is een waarde per dag; er is gekozen voor de uurgemiddelde waarde tussen 7.00 en 8.00 uur, dit mede omdat deze waarde dan kan worden vergeleken met een steekmonster van het zwevend stof (bij Lobith).

Uit de analyse uitgevoerd van de troebelheids- en debietgegevens is gebleken dat de troebelheid een functie is van het debiet, maar daarnaast ook een functie van de beschikbare hoeveelheid sediment. Voordat het maximum debiet van een afvoergolf wordt bereikt, is de troebelheid bij eenzelfde debiet meestal hoger dan na het maximale debiet van de afvoergolf: er treedt uitputting op in de aanvoer van sediment naar de rivier en van het erodeerbare bodemsediment. Dit laatste kan worden aangetoond door de in- en uitgaande troebelheden van de verschillende riviertakken te vergelijken.

Voor wat betreft Lobith is er een analyse uitgevoerd van de troebelheid in relatie tot het debiet over de jaren 1977 tot 1983. Naast een jaarlijkse variatie (natte en droge perioden) is ook een meerjaarlijkse cyclus aan te tonen (natte en droge jaren).

Op basis van een literatuur onderzoek naar het gedrag van zwevend stof zijn enkele voorstellen geformuleerd ten aanzien van mogelijke modelmatige benaderingen van het zwevend stof transport. In dit literatuur onderzoek zijn de belangrijkste processen welke het gedrag van zwevend stof beschrijven meegenomen en indien mogelijk beschreven met wiskundige vergelijkingen. Er zijn twee benaderingen uitgewerkt: een eenvoudig deterministisch en een eenvoudig empirisch model. Beide modellen kunnen het gedrag van zwevend stof redelijk beschrijven, het deterministische model verdient echter de voorkeur, omdat dit meer mogelijkheden biedt voor verdere uitbreiding van het aantal mee te nemen processen.

Het uiteindelijke doel van het totale onderzoek is het modelleren van de aan zwevend stof gehechte verontreinigingen. Er is nagegaan welke gegevens noodzakelijk zijn voor het modelleren van deze verontreinigingen (met name de zware metalen), los van de mogelijkheden tot modelleren van zwevend stof. Belangrijk is hierbij de frequentie waarmee de zware metalen worden bemonsterd. De huidige frequentie van een maal per 14 dagen is te gering om tot een voldoende nauwkeurige uitspraak te komen over de aangevoerde vracht aan zware metalen. Daarnaast is ook het gedrag van de zware metalen tijdens een afvoergolf niet goed te achterhalen. Er zijn daarom enkele aanbevelingen geformuleerd voor het uitvoeren van aanvullende metingen.

De konklusies en aanbevelingen van dit onderzoek zijn vermeld in het laatste hoofdstuk van dit rapport. De belangrijkste konklusies van dit onderzoek zijn dat modellering van het zwevend stof en troebelheid mogelijk is en dat het eenvoudige deterministische model, dat bij wijze van voorbeeld in dit onderzoek is gebruikt, verder dient te worden uitgebouwd.

Bij dit onderzoek is alleen gebruik gemaakt van gegevens voor het Nederlandse gedeelte van de Rijn. De gegevens voor het bovenstroomse deel zijn niet meegenomen. Voor wat betreft het Nederlandse gedeelte van de Rijn waren de volgende gegevens beschikbaar:

- o De 14-daagse metingen van zwevend stof op diverse stations aan de Rijn en de Rijntakken, verzameld in de kwartaal berichten van Rijkswaterstaat.
- o De maandelijkse metingen van concentraties van verschillende organische en anorganische verontreinigingen op verschillende stations, verzameld in de kwartaal berichten.
- o De dagelijkse metingen van het debiet van de Rijn en de Rijntakken.
- o De dagelijkse zwevend stof metingen (steekmonster om ongeveer 8.00 uur) bij Lobith.
- o De uurgemiddelde waarden van de troebelheid en het debiet op de stations Lobith, Kampen, Hagestein en Vuren.

Als aanvullende informatie waren er gegevens bekend van een dwarsraai-onderzoek bij het meetstation Lobith, waaruit bleek dat voor wat betreft zwevend stof het meetstation Lobith representatief is voor het dwarsprofiel bij Lobith. Uit deze resultaten bleek verder dat er een grotere variatie was van het zwevend stof gehalte in horizontale richting dan in verticale richting. Opgemerkt dient te worden dat de bemonstering bij Lobith plaatsvindt op ongeveer 1.0 meter onder het wateroppervlak (de hoogte ten opzichte van de bodem varieert dus met de waterstand), bij de overige stations (Kampen, Hagestein en Vuren) wordt op 1.0 m boven de bodem bemonsterd.

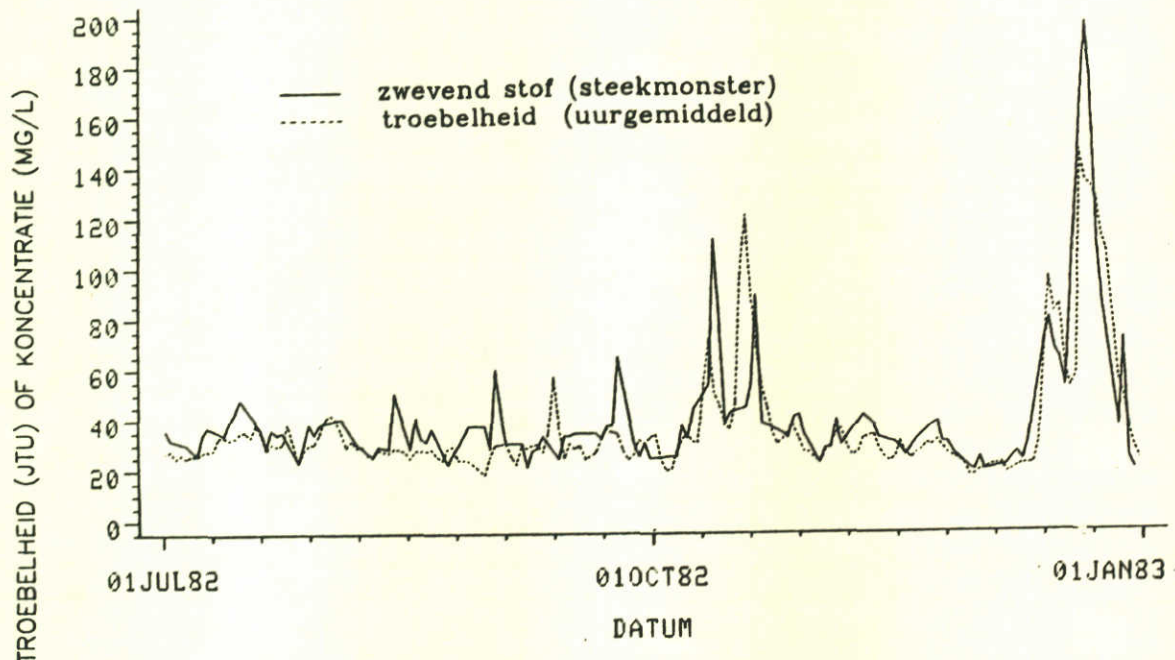
Voor de stations Kampen en Hagestein is nog geen dwarsraai-onderzoek uitgevoerd, het dwarsraai-onderzoek voor het meetstation Vuren was nog niet uitgewerkt. Er zijn geen frequente metingen van de korrelgrootte-verdeling van het zwevend stof. Er zijn slechts enkele indicatieve metingen van de korrelgrootteverdelingen op de Waal beschikbaar.

Een belangrijk gegeven bij het uitwerken van de gegevens is de tijdschaal van het fysische proces en de daarbij behorende frequentie van de bemonstering. Voor het bepalen van de tijdschaal van het zwevend stof transport dienen de gegevens te worden gebruikt met de hoogste meetfrequentie. Voor wat betreft zwevend stof zijn dat de dagelijkse metingen bij Lobith. Er zijn echter meer frequente gegevens van de troebelheid beschikbaar (uurgemiddelden), die gebruikt kunnen worden als er een duidelijk verband bestaat tussen troebelheid en het zwevend stof gehalte. Het aantonen van dit verband is tevens van belang voor de verdere uitwerking van de gegevens. Met name op de benedenstroomse stations zijn er geen frequente (orde dagelijks) metingen van zwe-

vend stof. Het is waarschijnlijk niet goed mogelijk om op basis van de beschikbare zwevend stof gegevens inzicht te krijgen in het zwevend stof transport. Er zijn echter wel frequente troebelheidsgegevens zodat, via een omweg, wellicht inzicht kan worden verkregen in het gedrag van zwevend stof. De aard van de relatie tussen troebelheid en zwevend stof wordt nader uitgewerkt in de volgende paragraaf.

2.1 RELATIE TUSSEN TROEBELHEID EN ZWEVEND STOF

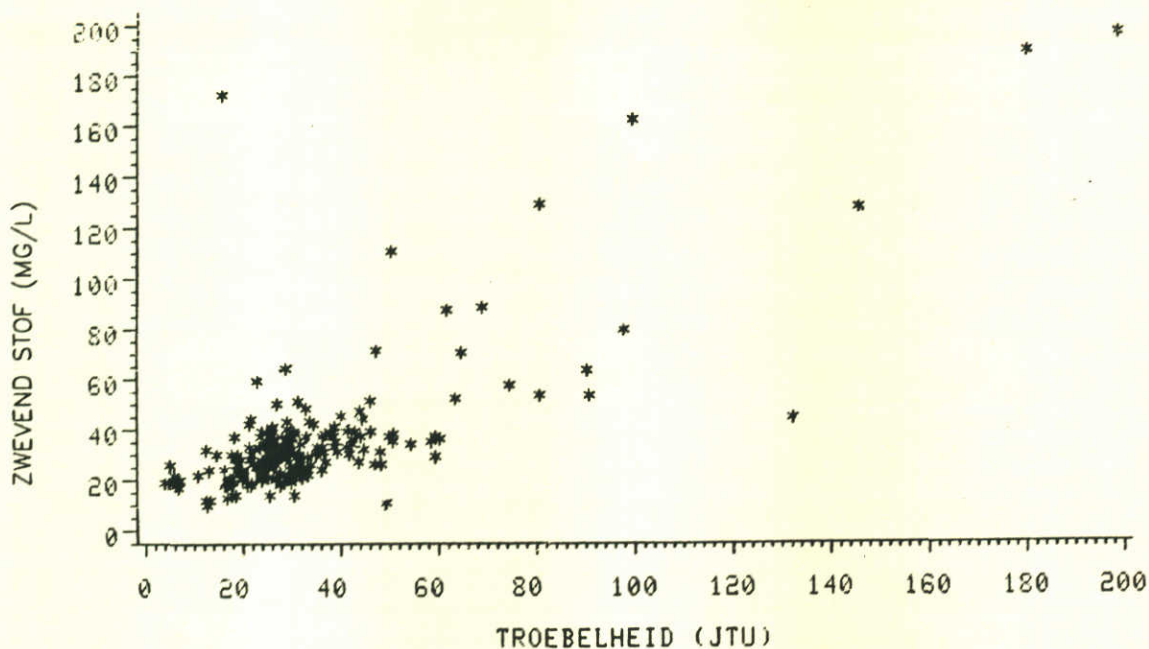
Een belangrijke randvoorwaarde bij het uitwerken van de troebelheidsgegevens van de verschillende stations is de vertaling van troebelheid naar zwevend stof gehalte. Voor de Rijntakken in Nederland zijn alleen bij Lobith simultaan troebelheids- en zwevend stof metingen verricht. In de onderstaande figuur 1 is een voorbeeld gegeven van het verloop van de troebelheid en het zwevend stof gehalte in de tweede helft van 1982.



Figuur 1 Zwevend stof gehalte en troebelheid (steekmonster respectievelijk uurgemiddelde rond 8.00 uur).

De in bovenstaande figuur gepresenteerde zwevend stof gehalten bij Lobith zijn steekmonsters, die om ongeveer 8.00 uur 's ochtends zijn genomen. De troebelheid in bovenstaande figuur is de gemiddelde waarde van de troebelheid tussen 7.00 en 8.00 uur. Uit bovenstaande figuur volgt dat het zwevend stof gehalte en de troebelheid als functie van de tijd op overeenkomstige wijze verlopen.

Een eventueel verband tussen zwevend stof en troebelheid zou onder andere kunnen blijken uit figuur 2, waarin de beschikbare gegevens tegen elkaar zijn uitgezet.



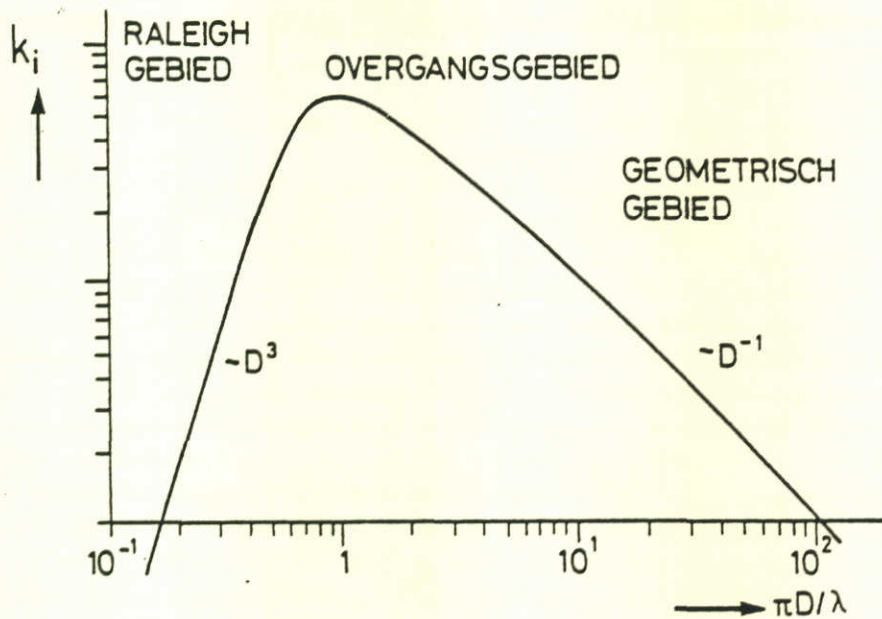
Figuur 2 Zwevend stof als functie van troebelheid op basis van de gegevens van juni 1982 tot december 1983.

Uit de in figuur 2 gepresenteerde informatie kan geen eenduidig verband tussen troebelheid en zwevend stof worden aangetoond. Eenzelfde konklusie kan worden getrokken uit de gegevens van het meetstation Eijsden aan de Maas.

Uit het voorgaande mag worden opgemaakt dat het gedrag van zwevend stof en troebelheid als functie van de tijd (of afvoer) overeenkomsten vertonen, maar dat een eenduidig verband niet aantoonbaar is.

Dit kan wellicht voor een deel worden verklaard uit de meetmethode van de troebelheidsmeter. Door WL zijn verschillende soorten slibconcentratiemeters onderzocht (rapportage intern speurwerk), waarvan in het navolgende de belangrijkste konklusies worden gegeven.

Alle bij het WL-onderzoek betrokken instrumenten meten transmissie en/of verstrooiing van licht in de slib suspensie. Uit de literatuur (Sigrist (2)) blijkt dat de verstrooiing van licht voor verschillende stoffen (formazine, kiezelgoer) niet gelijk is. De oorzaak van de verschillen schuilt in de afhankelijkheid van de meetmethode van de deeltjeseigenschappen: afmetingen, vorm en brekingsindex. Het kwalitatieve verband tussen het quotient van de deeltjesdiameter D en de stralingsgolflengte enerzijds en een evenredigheidsfaktor k (uit de relatie tussen de concentratie c en uitslag $U=k \cdot c$ van het instrument) anderzijds, is weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 Evenredigheidsfactor k als functie van het quotient van deeltjesdiameter en golfgetal.

Bij optische instrumenten (golflengte ongeveer 600 nm) zal het meetsignaal voor een deeltjesdiameter van meer dan 1 μm omgekeerd evenredig zijn met de karakteristieke diameter. Bij een niet-uniforme grootte van de deeltjes betekent dit dat er een verschil is tussen het 50% percentiel ($=d(50)$) uit de zeefanalyse en de effectieve diameter voor het meetinstrument. De effectieve diameter volgt uit figuur 4 als de factor k bekend is; de factor k volgt uit de uitslag van het instrument (U) en de concentratie zwevend stof (c) met behulp van de hierboven genoemde relatie ($U=k \cdot c$).

Het zwevend stof van de Rijn bestaat uit niet-uniform materiaal. Waarschijnlijk zal de korrelgrootte-verdeling variëren in de tijd, afhankelijk van het aangevoerde materiaal, de mate van erosie of sedimentatie, uitputting van bodemslib enzovoorts. Dit betekent in feite dat de gemeten waarde van de troebelheid alleen maar een indicatie is van het zwevend stof gehalte, maar dat het zwevend stof gehalte niet zomaar uit de troebelheid kan worden bepaald. Met name de korrelgrootte-verdeling is hiervoor van belang. Als er, bij een bepaalde waarde van de $d(50)$, meer grof materiaal in het zwevend stof aanwezig is dan zal de waarde van de troebelheid lager zijn dan als er meer fijn materiaal in het zwevend stof aanwezig is. Troebelheid is dus geen eenduidige maat voor zwevend stof. Omrekenen van troebelheid naar zwevend stof is pas mogelijk als er gegevens omtrent de korrelgrootte-verdeling beschikbaar zijn.

Bij de troebelheidsmeting wegen kleinere deeltjes zwaarder mee dan grotere deeltjes. Het is bekend dat verontreinigingen, en met name de zware metalen, in grotere concentraties voorkomen in de kleinere frakties van het zwevend stof. Er is dan ook nagegaan in hoeverre troebelheid beter gekorreleerd kan worden met

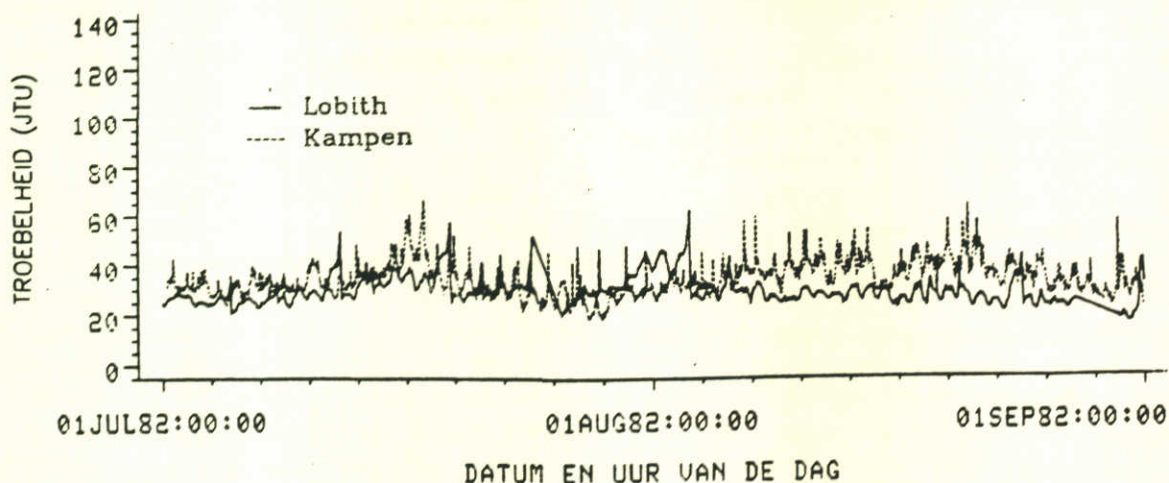
de concentratie zware metalen dan zwevend stof. Uit een globale analyse bleek geen grotere correlatie tussen troebelheid en zware metalen groter was dan tussen zwevend stof en zware metalen; hierbij is uitgegaan van de zware metalen zink en cadmium. Dit komt overeen met een konklusie uit een rapport van ZMAS-onderzoek (Zware Metalen in Aquatische Systemen, (1)); deze konklusie luidt dat er bij de in de Rijn voorkomende concentraties verontreinigingen geen duidelijk verschil in adsorptie is aan te tonen tussen verschillende frakties van het zwevend stof (frakties kleiner dan 60 μm).

De konklusie die uit het bovenstaande kan worden getrokken is dat **het gedrag** van troebelheid en zwevend stof waarschijnlijk hetzelfde zal zijn. De troebelheid is echter niet op een eenduidige manier te vertalen naar zwevend stof gehalte. Bij de verdere uitwerking zal in eerste instantie toch worden uitgegaan van de troebelheid. De verwachting is dat de fysische achtergrond van het gedrag van troebelheid en zwevend stof gelijk is. Deze fysische achtergrond is voor de troebelheid eenvoudiger te achterhalen dan voor het zwevend stof gezien de beschikbare gegevens. Zodra echter een bepaald model-concept wordt gekozen zal ook het zwevend stof bij de beschouwing moeten worden betrokken.

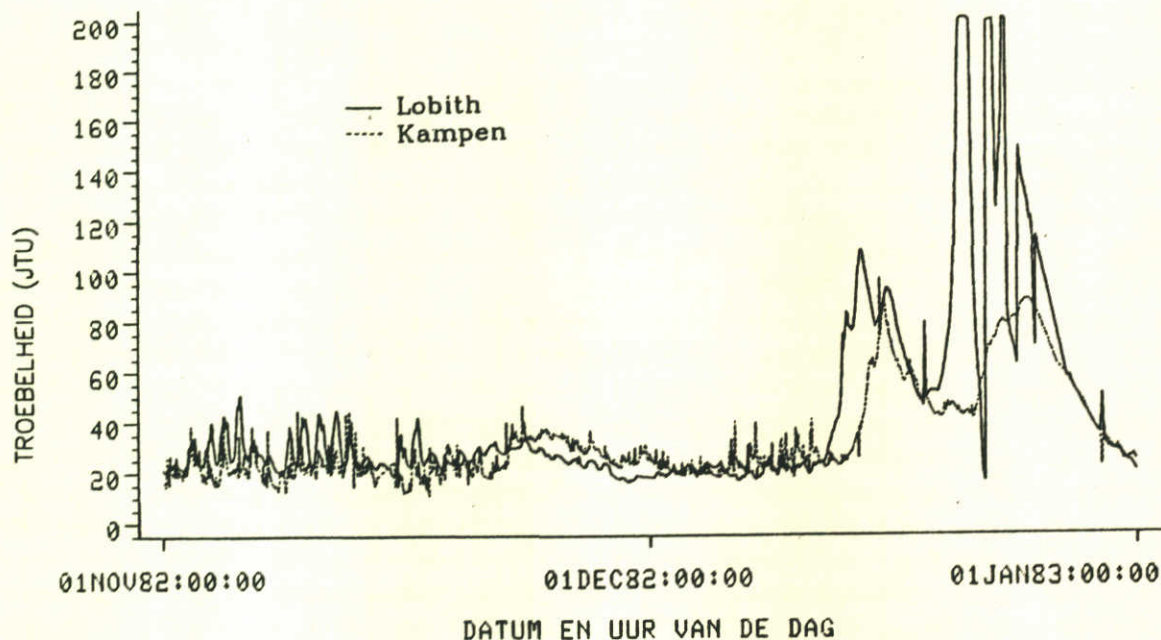
2.2 BENODIGDE BEMONSTERINGSFREQUENTIE TROEBELHEID

Bij de verdere uitwerking van de gegevens zal voornamelijk worden uitgegaan van troebelheid. De beschikbare troebelheidsgegevens zijn uurgemiddelde waarden voor 4 stations, namelijk Lobith, Vuren, Kampen en Hagestein. Het is de vraag of alle beschikbare uurgemiddelden moeten worden gebruikt of dat kan worden uitgegaan van een of enkele waarden van de troebelheid per dag. In deze paragraaf wordt nagegaan wat de benodigde bemonsteringsfrequentie is voor het verkrijgen van een korrekt troebelheidssignaal.

Ten behoeve van het bepalen van de benodigde bemonsteringsfrequentie van het troebelheidssignaal zijn voor Lobith en Kampen de uurgemiddelde waarnemingen uitgewerkt. Met behulp van deze uurgemiddelde waarnemingen is aan te geven welke bemonsteringsfrequentie kan worden aangehouden voor de verdere uitwerking van de troebelheidsgegevens. In onderstaande figuren 4 en 5 zijn troebelheidsgegevens weergegeven voor de periode september 1982 tot januari 1983.



Figuur 4 Uurgemiddelde troebelheid van Lobith en Kampen in de periode juli. 1982 tot sept. 1982.

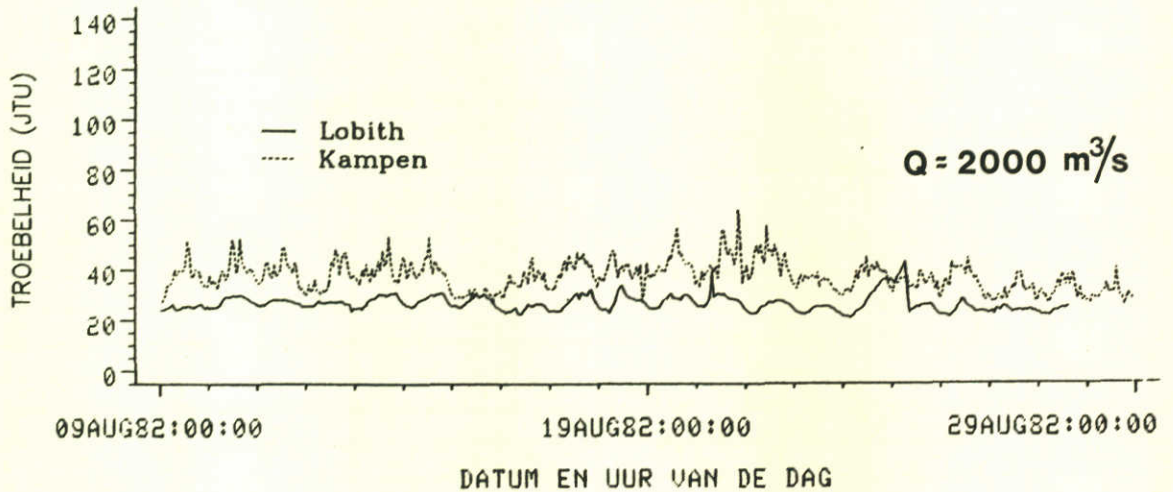


Figuur 5 Uurgemiddelde troebelheid van Lobith en Kampen in de periode nov. 1982 tot jan. 1983.

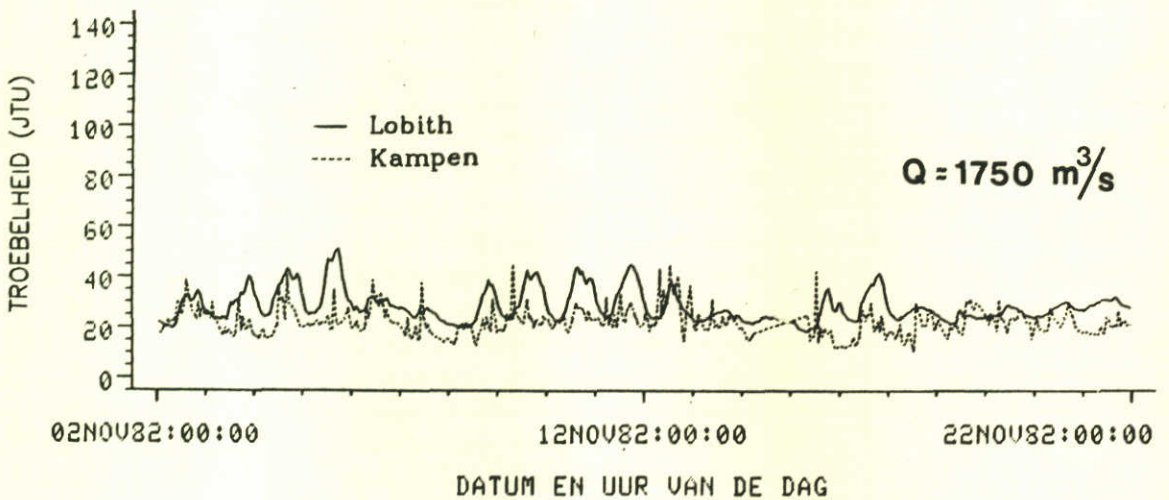
Uit de figuren 4 en 5 kan worden afgeleid:

- o De troebelheid heeft zowel voor Lobith als Kampen een weinig fluktuuerend signaal, waarbij de variatie in de tijd een tijdschaal heeft die duidelijk groter is dan een uur.
- o De troebelheid bij Lobith wordt nooit hoger 200 JTU, met name bij de afvoergolf in december 1982 lijkt het erop dat de troebelheid in werkelijkheid groter is. Waarschijnlijk wordt het signaal boven 200 JTU afgekapt. Dit is ook geconstateerd bij de troebelheidsmetingen van het meetstation Vuren (Waal).

- o Naast de variatie van de troebelheid door veranderingen van de afvoer, blijkt er ook een dagelijkse variatie van de troebelheid op te treden; dit is aangegeven in figuur 6 en 7.



Figuur 6 Uurgemiddelde troebelheid bij Lobith en Kampen in de periode 9 t/m 29 augustus 1982.



Figuur 7 Uurgemiddelde troebelheid bij Lobith en Kampen in de periode 2 t/m 22 november 1982.

Uit de resultaten in bovenstaande figuren volgt dat er zowel voor Lobith als voor Kampen een duidelijke dagelijkse variatie is te herkennen; in de figuren is een dag de afstand tussen twee streepjes op de horizontale as. Het minimum in deze variatie treedt 's nachts op en het maximum overdag. Het vermoeden is dat deze variatie wordt veroorzaakt door de scheepvaart. Dit wordt nog eens onderschreven door de konstatering dat in november 1982 het Rijn-debiet duidelijk lager was dan in augustus 1982. Bij een lager debiet is ook de waterstand lager en is de invloed van scheepsschroeven op de opwerveling van bodemslib dus groter. Deze invloed is bij Lobith duidelijker dan bij Kampen, omdat de

verandering van het debiet bij Kampen geringer is dan bij Lobith (invloed stuwen in de Beneden-Rijn). Verder kan nog worden opgemerkt, met name voor de situatie in november 1982, dat er een invloed is van het weekend. In de weekenden 6, 7 en 13, 14 november zijn de variaties van de troebelheid duidelijk geringer. De vraag is of er in het weekend een duidelijk lagere scheepvaart-intensiteit is, met name bij Lobith.

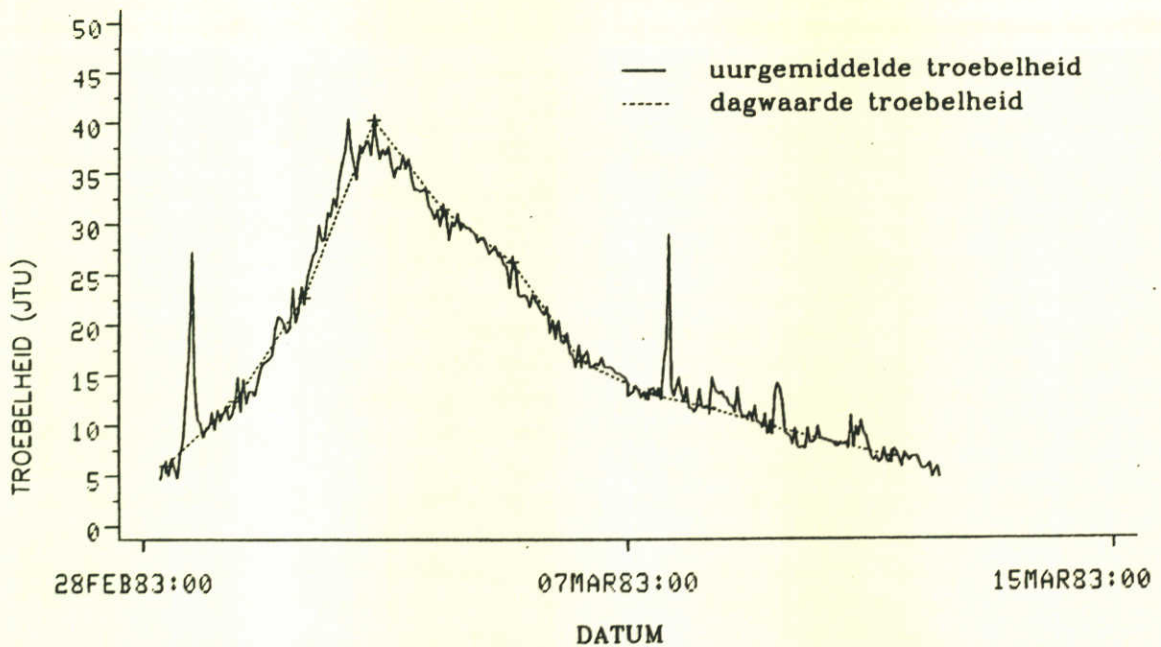
Uit een rapport van de Dienst Verkeerskunde van de Rijkswaterstaat (3) blijkt inderdaad dat er sprake is van een verloop van de scheepvaartintensiteit over de dag en over de week. Op de zondagen is de scheepvaartintensiteit ongeveer twee maal zo laag als door de week (dinsdag t/m vrijdag), de intensiteit van zaterdag en maandag is iets geringer dan de intensiteiten op dinsdag t/m vrijdag. Er is ook een duidelijke variatie in de scheepvaartintensiteit op een dag. Tussen acht uur 's avonds en zes uur 's ochtends is er vrijwel geen scheepvaart. Tussen 12 en 16 uur 's middags worden de hoogste intensiteiten gemeten. Dit komt inderdaad goed overeen met de gevonden variaties in de troebelheid over een dag. Ook in een rapport van de Rijncommissie Waterleidingbedrijven (4) over het slib in Rijn en Maas wordt een opmerking gemaakt over de invloed van de scheepvaart op het zwevend stof gehalte cq de troebelheid.

Deze dagelijkse variatie heeft vooral bij lagere debieten een vrij grote invloed op de daggemiddelde troebelheid. Er zal dus wel degelijk rekening moeten worden gehouden met deze dagelijkse variatie.

Afgezien van de dagelijkse variatie, is het verloop van de troebelheid over een aantal dagen zeer geleidelijk. Het verloop van de troebelheid kan dan ook worden beschreven met een waarneming per dag; hiervoor is de waarde om 8.00 uur gekozen omdat:

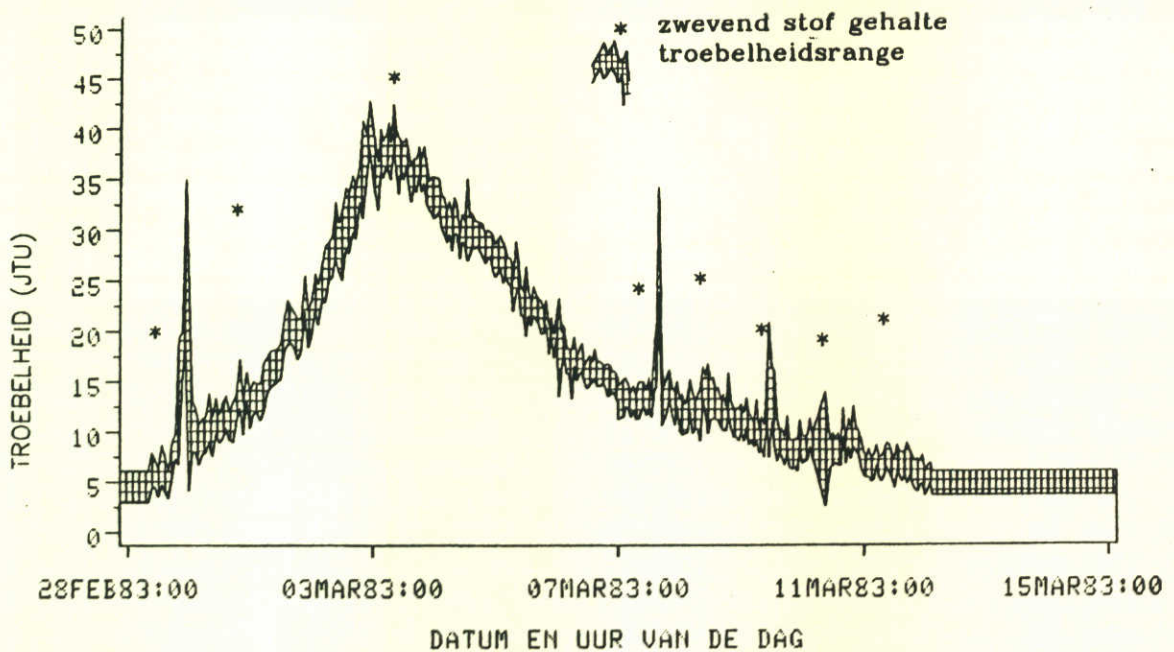
1. Deze waarde bij Lobith vergelijkbaar is met het steekmonster van het zwevend stof om ongeveer 8.00 uur.
2. De gekonstateerde dagelijkse variatie bij lage rivierafvoeren is dusdanig, dat om ongeveer 8.00 uur de gemiddelde waarde optreedt.

In figuur 8 zijn voor het meetstation Lobith alle uurgemiddelde waarnemingen in de periode 28 februari 1983 tot en met 15 maart 1983 uitgezet. Daarnaast zijn de uurgemiddelden om 8.00 uur met elkaar verbonden, zodat het verschil in het verloop tussen 24 waarnemingen en een waarneming per dag duidelijk wordt; het in deze periode gemeten debiet bij Lobith is weergegeven in figuur 10.



Figuur 8 Verloop uurgemiddelde troebelheid en verloop dagwaarde troebelheid tussen 7 en 8 uur.

De afwijking tussen de dagwaarden en de uurgemiddelden van de troebelheid vallen ruim binnen de opgegeven standaard deviatie van de uurgemiddelden, hetgeen is aangegeven in figuur 9.

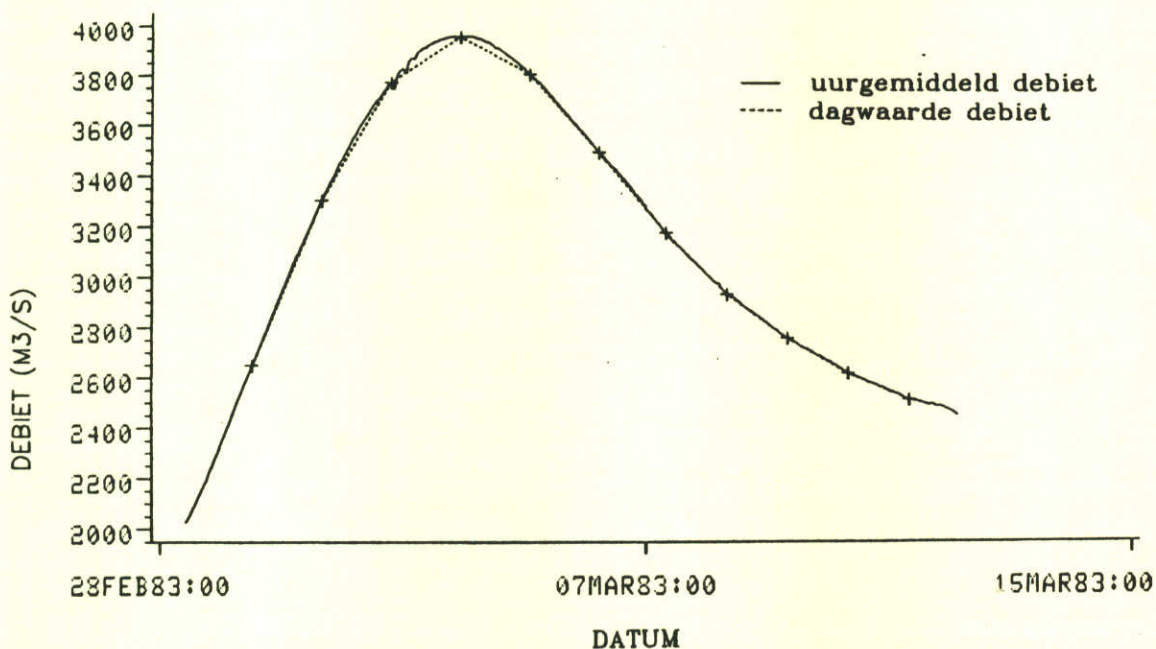


Figuur 9 Range van troebelheid om uurgemiddelde; gebaseerd op de standaard deviatie.

Het lijkt mogelijk om te kiezen voor een meting van de troebelheid per dag. Alleen bij zeer snelle veranderingen van de troebelheid is een waarneming per dag niet voldoende. Dit treedt in de periode 1982-1983 alleen op bij de afvoerpiek van december

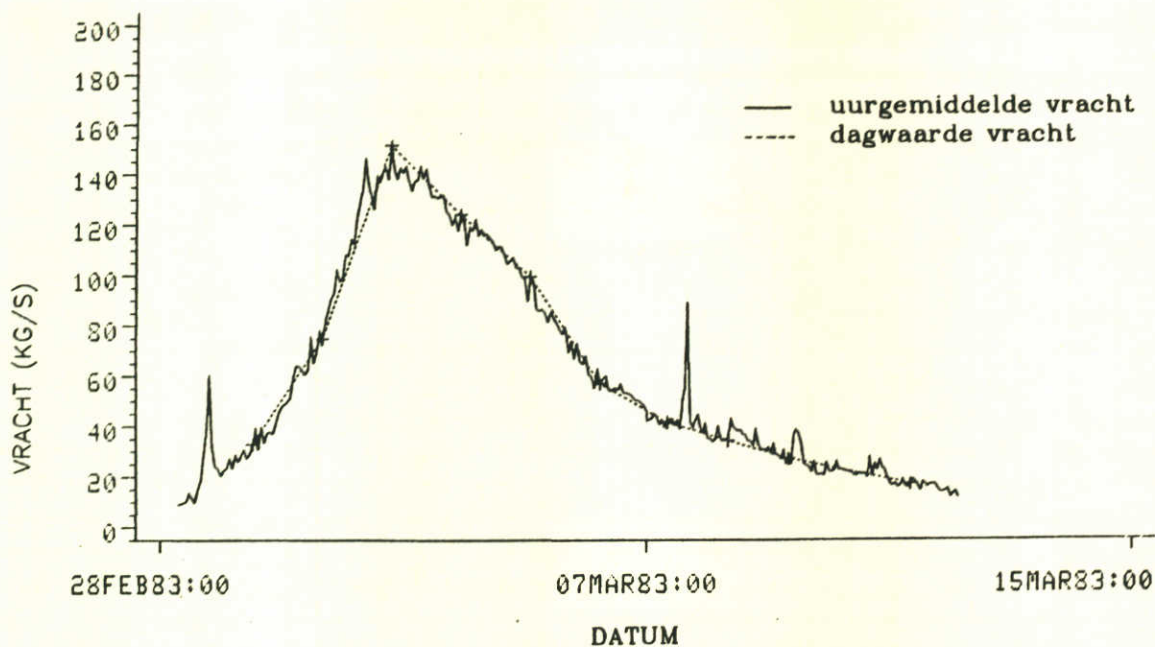
1982. Hierbij moet worden aangetekend dat er waarschijnlijk problemen zijn opgetreden bij de uurmiddelingsen. De waarde van de troebelheid wordt in deze periode waarschijnlijk groter dan 200 JTU. Er moet dan worden overgeschakeld op een ander bereik van de troebelheidsmeter, hetgeen waarschijnlijk problemen gaf bij de verwerking. Overigens dient hierbij opgemerkt te worden dat in de jaren 1978-1981 wel troebelheidswaarden tot 400 JTU voorkomen.

In het vervolg is uitgegaan van een meting van de troebelheid per dag, en wel van de uurgemiddelde waarde om 8.00 uur. Naast de troebelheid moet ook het debiet worden meegenomen. Ook voor het debiet is uitgegaan van een meting per dag, en wel van de waarde om 8.00 uur. In figuur 10 is aangegeven dat ook het debietverloop met een waarde per dag goed kan worden weergegeven.



Figuur 10 Verloop uurgemiddelde debiet en het debiet om 8.00 uur (geïnterpoleerd).

Alleen bij de top van de afvoerpiek treedt enige afwijking op tussen het werkelijke en de geïnterpoleerde debieten. Deze afwijking is echter niet echt van belang, omdat de mogelijke variatie van de troebelheid een orde groter is. Uitgaande van debiet en troebelheid (zwevend stof) is de vracht "troebelheid" (zwevend stof) van de rivier bepaald. Voor de afvoerpiek van maart 1983 is in figuur 11 een voorbeeld gegeven van deze vrachtbepaling; hierbij is de dagwaarde van de vracht vergeleken met uurwaarden.



Figuur 11 Verloop van uurgemiddelde waarde en dagwaarde van de vracht "troebelheid" bij Lobith.

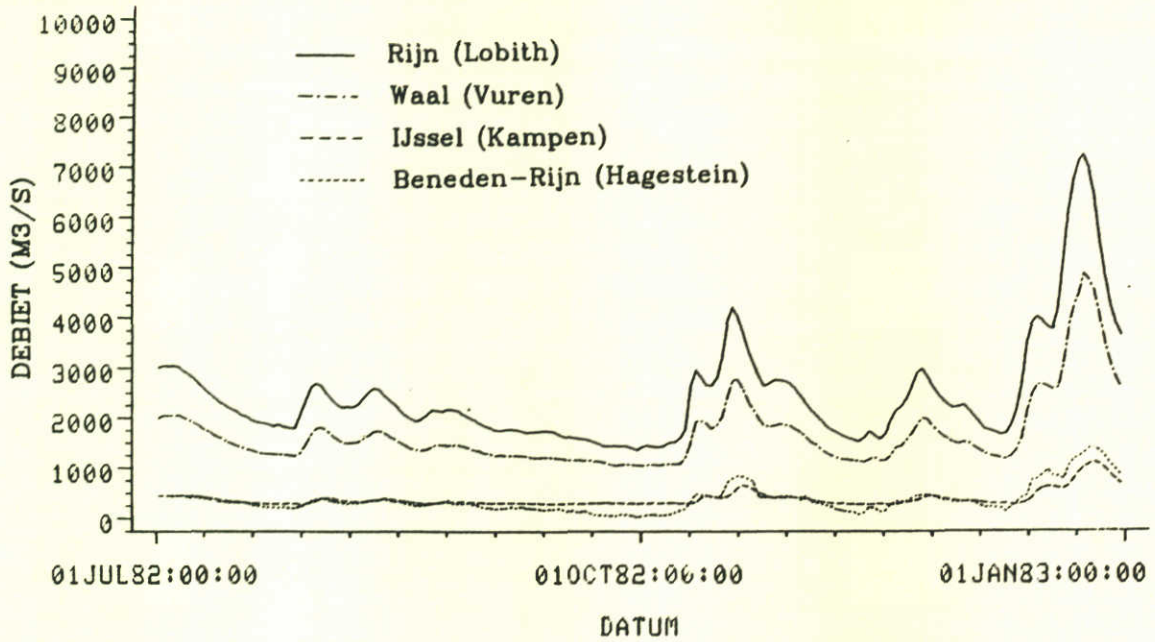
Bij de verdere verwerking en bewerking van de gegevens is uitgegaan van een uurgemiddelde waarde van debiet en troebelheid per dag. Dit is voldoende frequent om het verloop te beschrijven en vervolgens de fysische achtergronden van het troebelheidsgedrag te kunnen achterhalen.

Bij de analyse van de beschikbare gegevens komen de volgende aspecten aan de orde:

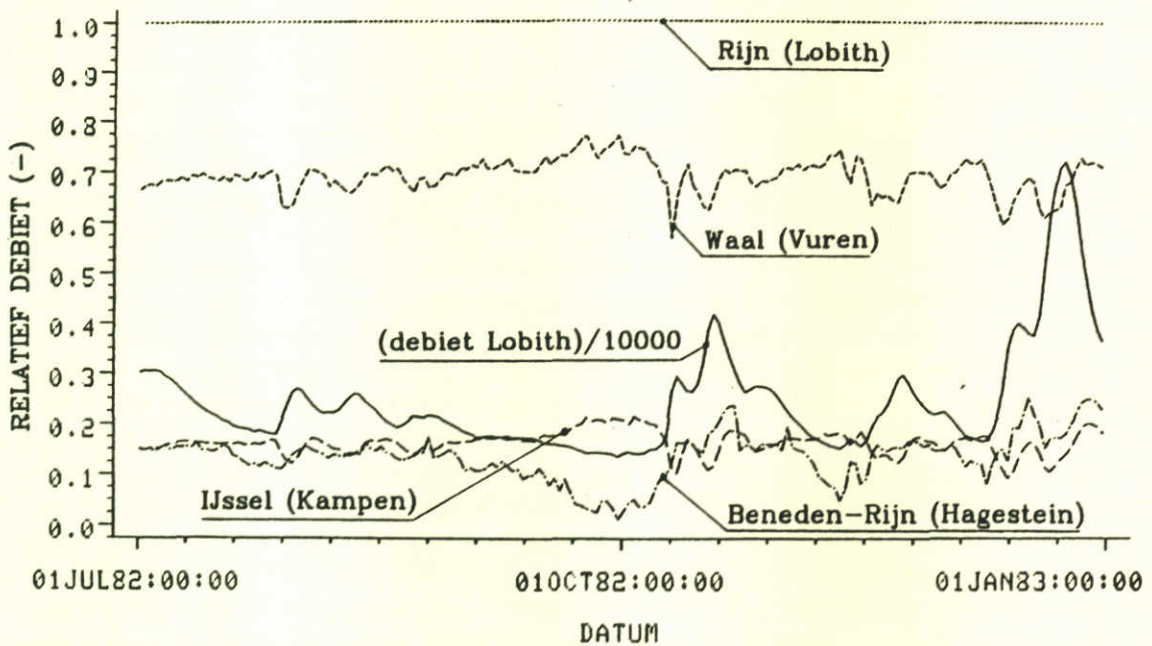
1. De debietverdeling over de verschillende Rijntakken.
2. Het verloop van het debiet en troebelheid als functie van de tijd.
3. Vergelijking van de relatie van zwevend stof respectievelijk troebelheid met het debiet.
4. Analyse van de relatie tussen troebelheid en debiet voor het meetstation Lobith; het gaat hierbij met name om het gedrag over een aantal jaren.
5. Vergelijking van de hystereselussen in de relatie tussen troebelheid en de gemiddelde stroomsnelheid op de verschillende meetstations; het gaat dan met name om het aantonen van de relatie tussen het voor erosie beschikbare bodemsediment en de troebelheid.

3.1 DEBIETVERDELING OVER DE RIJNTAKKEN

Het debiet, in feite de snelheid van het water, is een belangrijke parameter bij het zwevend stof transport. Bij een groter debiet is er een grotere transport capaciteit, omdat er meer maar ook zwaardere deeltjes in suspensie kunnen worden gehouden. Afhankelijk van de beschikbaarheid van sediment kan bij grotere debieten het zwevend stof gehalte (troebelheid) toenemen. De Rijn splitst zich in Nederland in drie takken: Waal, IJssel en Beneden-Rijn. Het debietverloop in deze takken is niet gelijkvormig, omdat de debietverdeling over de verschillende Rijntakken, met name voor de Beneden-Rijn en de IJssel, bij lage Rijn-afvoeren wordt gestuurd door de stuwen bij Driel en Hagestein. Het absolute verloop van de debieten in de Rijntakken in de tweede helft van 1982 is weergegeven in figuur 12, het relatieve verloop (gerelateerd aan het debiet bij Lobith) is weergegeven in figuur 13.



Figuur 12 Debiet Rijntakken (juli '82 tot jan. '83).



Figuur 13 Relatieve debietverdeling (t.o.v. debiet Lobith) voor de Rijntakken (juli '82 tot jan. '83).

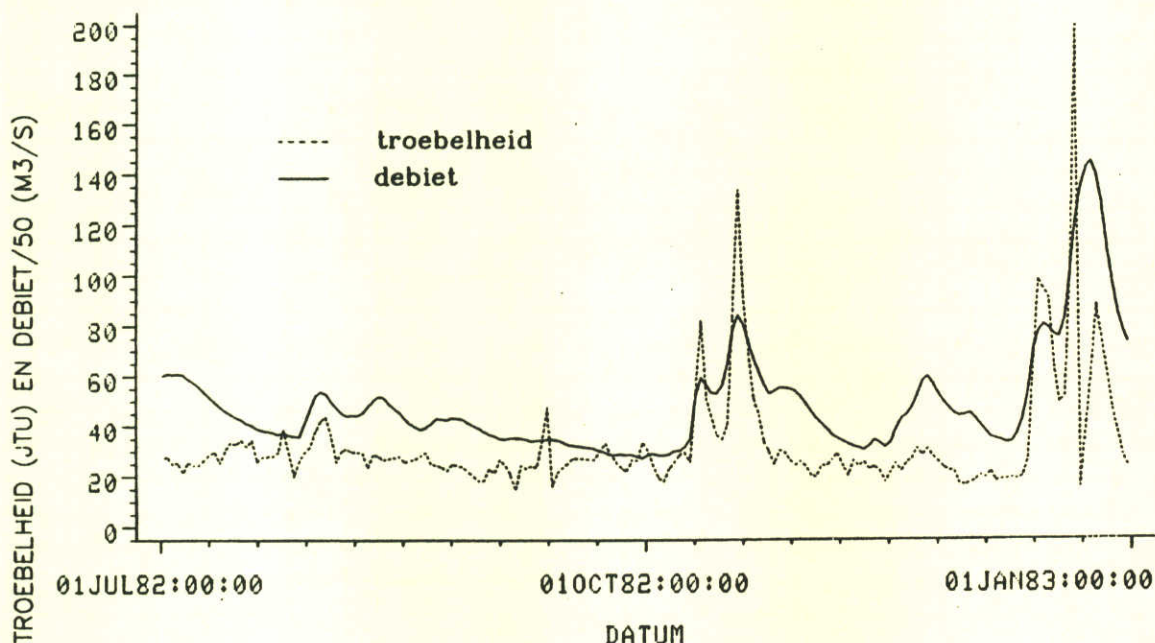
In figuur 13 is naast de relatieve debieten ook het (geschaalde) debiet bij Lobith, weergegeven. De debietverdeling verandert in perioden met lage Rijn-afvoer: de Waal en de IJssel krijgen relatief meer water dan de Beneden-Rijn; de stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein worden gesloten. Bij afvoerpieken treedt een snelle verandering op van de afvoerverdeling. De stuwen worden dan geheven, waarbij de relatieve debietverdeling in

korte tijd sterk verandert. Dit heeft met name konsekventies voor de afvoer van de Beneden-Rijn en de IJssel.

3.2 VERGELIJKEN VERLOOP DEBIET EN TROEBELHEID

In deze paragraaf wordt ingegaan op het verloop van het debiet en de troebelheid als functie van de tijd. Uit dit verloop als functie van de tijd volgen aanwijzingen omtrent de relatie tussen debiet en troebelheid. In de figuren 14 t/m 17 zijn voor de verschillende stations de dagwaarden van troebelheid (uurgemiddeld tussen 7 en 8 uur) en het debiet (waarde om 8 uur) uitgezet voor de tweede helft van 1982. Het signaal van de troebelheid heeft in dit halfjaar de minste ontbrekende waarden.

1. Lobith:

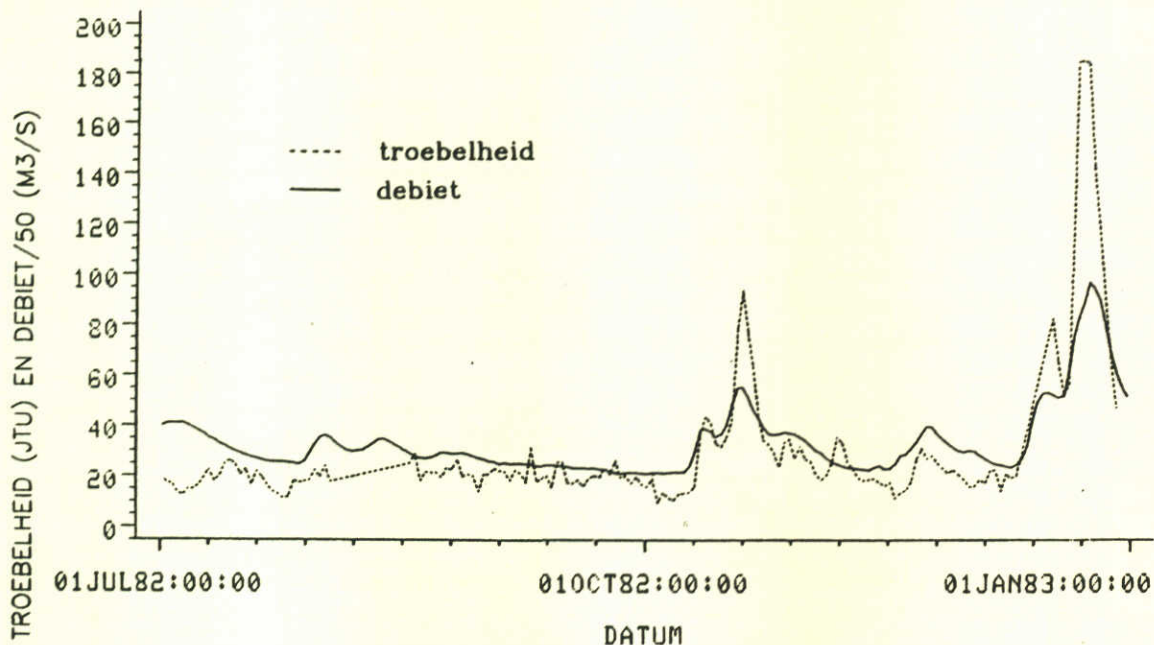


Figuur 14 Troebelheid en debiet bij Lobith, in de periode juli 1982 tot januari 1983.

Het troebelheidssignaal bij Lobith heeft een duidelijke koppeling met het debiet. Met name bij de grotere afvoerpieken (oktober en december) is er uitputting van het zwevend stof; vergelijk zwevend stof gehalten voor en na een piek bij eenzelfde debiet. Bij de afvoerpiek in december zijn er over enkele dagen ontbrekende waarden, waardoor het verloop van het signaal niet geheel korrekt zal zijn. Verder wordt het signaal nog beïnvloed door het feit dat, waarschijnlijk door de verwerking, het de troebelheid een maximum van 200 JTU heeft.

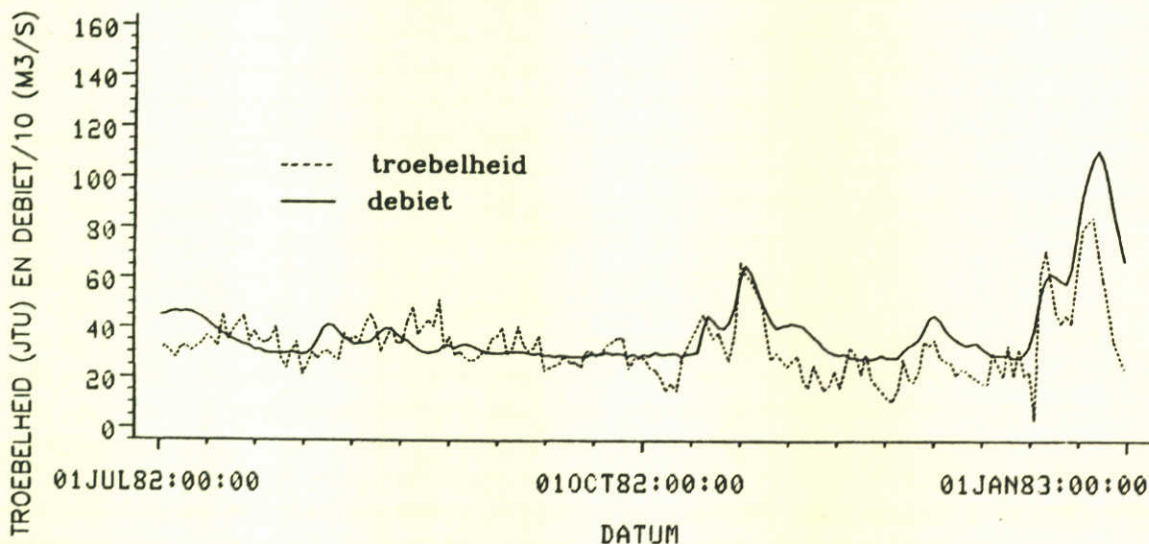
2. Vuren:

Het debiet- en troebelheidsverloop bij Vuren lijkt veel op dat bij Lobith. Toch is er een verschil: bij Vuren is er in mindere mate sprake van een uitputting van het zwevend stof (troebelheid). Zowel bij de afvoerpiek in oktober als in december is de troebelheid bij toenemend debiet niet veel groter dan bij afnemend debiet; de relatie tussen debiet en troebelheid vertoont bij Vuren ook een minder grote hysteresis dan bij Lobith (zie paragraaf 3.5).



Figuur 15 Troebelheid en debiet bij Vuren in de periode juli 1982 tot januari 1983.

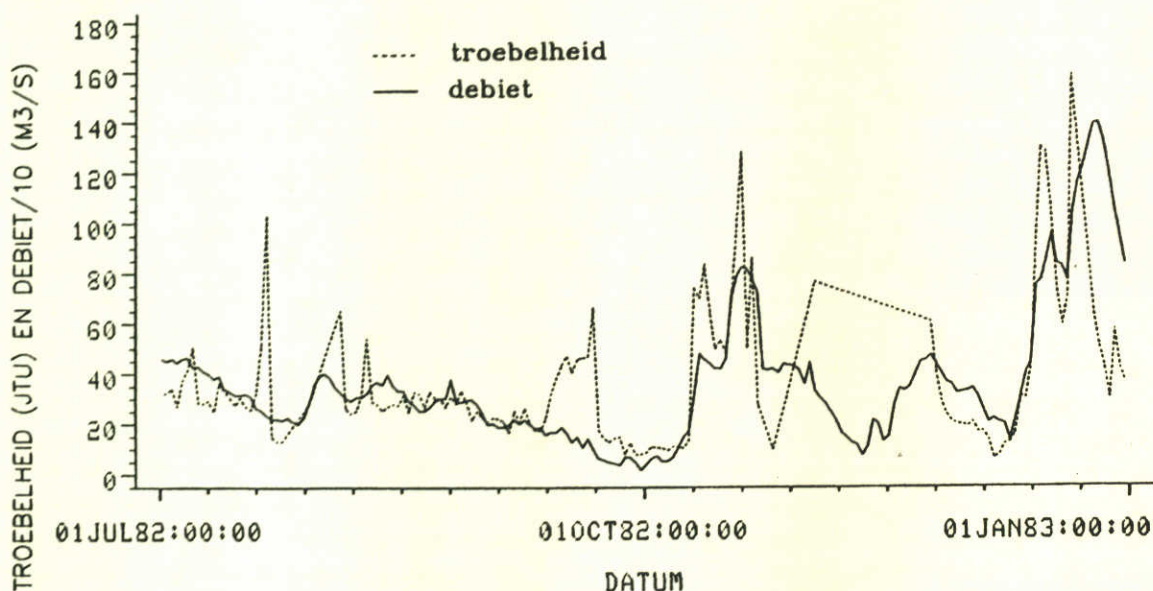
3. Kampen:



Figuur 16 Troebelheid en debiet bij Kampen in de periode juli 1982 tot januari 1983.

Bij Kampen is het debietverloop veel vlakker dan bij Lobith of Vuren, hetgeen wordt veroorzaakt door het effect van de stuw bij Hagestein op de debietverdeling tussen Beneden-Rijn en IJssel (zie figuur 21 en 22). Ook de troebelheid wordt niet opvallend groter bij de afvoerpieken in oktober en december 1982. Toch is er wel sprake van uitputting van zwevend stof (troebelheid), maar dan met name bij de afvoerpiek in december.

4. Hagestein:



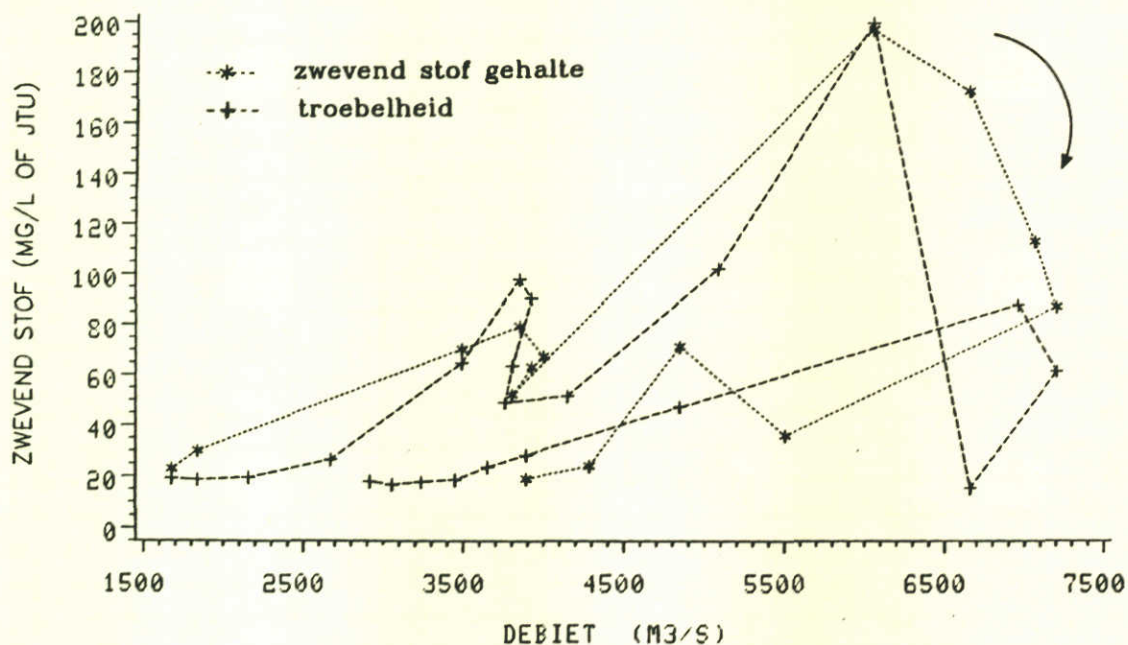
Figuur 17 Troebelheid en debiet bij Hagestein in de periode juli 1982 tot januari 1983.

Het debiet bij Hagestein wordt bij lage Rijn-afvoeren bepaald door manipulaties met de stuwen in de Beneden-Rijn. Het verloop van de afvoer is daarom veel grilliger dan bij een van de andere stations. Dit heeft een duidelijk effect op het verloop van de troebelheid. Er treden zeer sterke veranderingen op in de troebelheid, met name na droge perioden waarbij het debiet lange tijd nihil is geweest. Er treedt dan waarschijnlijk een uitspoeling van gesedimenteed zwevend stof op. Ook bij Hagestein valt uitputting van zwevend stof (troebelheid) te constateren; evenals bij Kampen treedt dit met name op bij de afvoerpiek in december. Eind september treedt er een nu nog niet te verklaren piek op in de troebelheid; in november ontbreken er nogal wat waarnemingen.

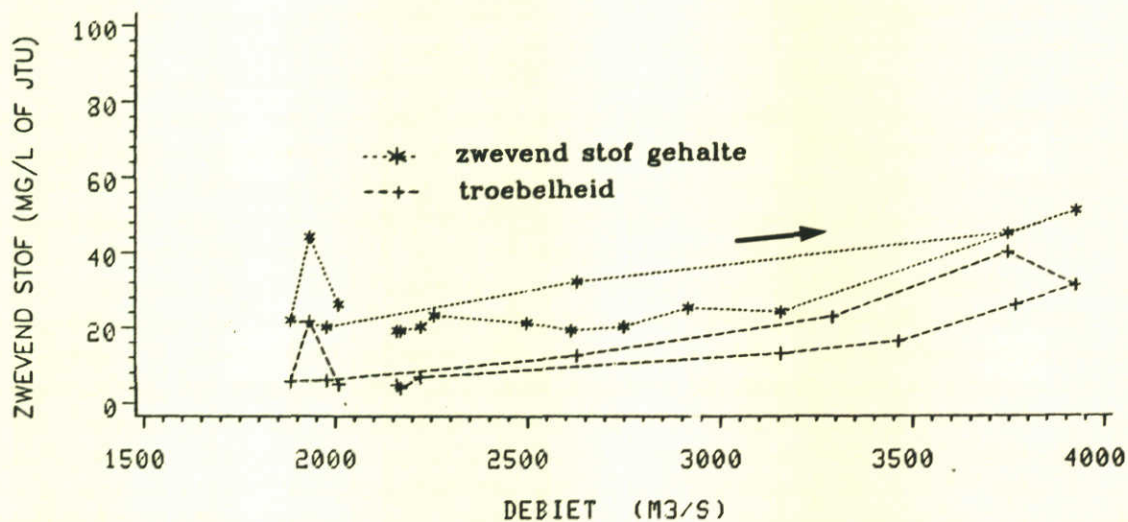
Voor alle stations is er sprake van uitputting van troebelheid bij een afvoergolf. De vraag is of er ook uitputting is van zwevend stof, dat wil zeggen is de relatie tussen debiet en zwevend stof ongeveer hetzelfde als tussen debiet en troebelheid. Dit is aangegeven in de volgende paragraaf aan de hand van de gegevens van het meetstation Lobith, omdat alleen van dit station dagelijkse zwevend stof gegevens bekend zijn. Er wordt aangenomen dat het gedrag van zwevend stof en troebelheid bij de overige stations overeenkomstig is.

3.3 VERGELIJKEN GEDRAG TROEBELHEID EN ZWEVEND STOF

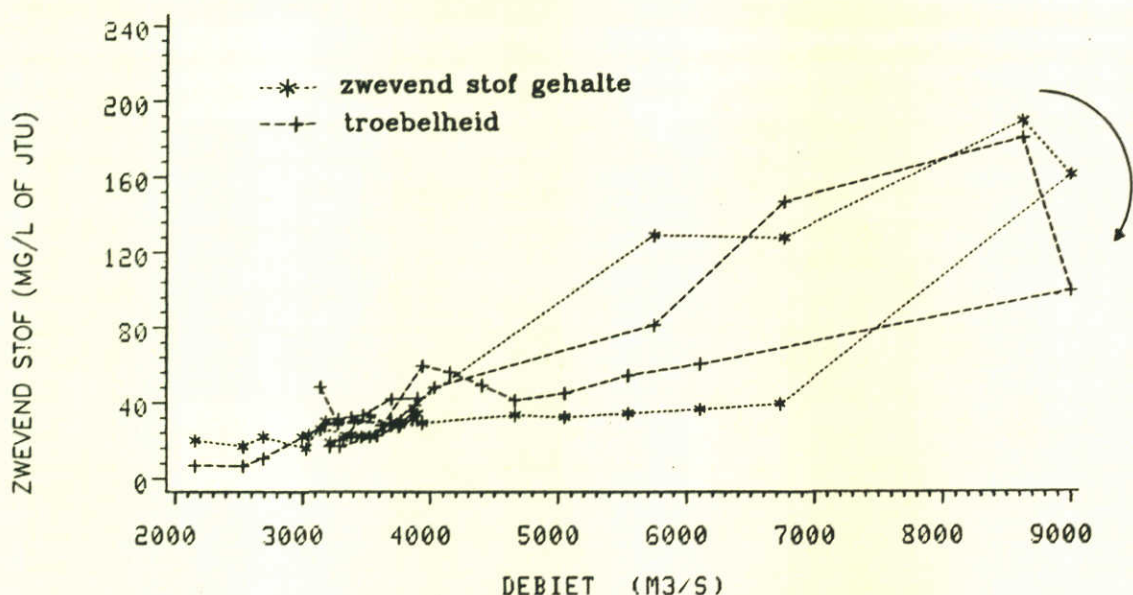
In paragraaf 2.1 is aangegeven dat er een verband is tussen zwevend stof en troebelheid, maar dat de relatie ten gevolge van de korrelgrootte verdeling niet eenduidig is. In de relatie tussen debiet en troebelheid ontstaat bij een afvoergolf een hysteresis effect tgv uitputting van de aanvoer van troebelheid.



Figuur 18 Hysteresis van zwevend stof en troebelheid bij een afvoergolf (Lobith, december 1982).



Figuur 19 Hysteresis van zwevend stof en troebelheid bij een afvoergolf (Lobith, febr/mrt 1983).



Figuur 20 Hysterese van zwevend stof en troebelheid bij een afvoergolf (Lobith, mrt/apr 1983).

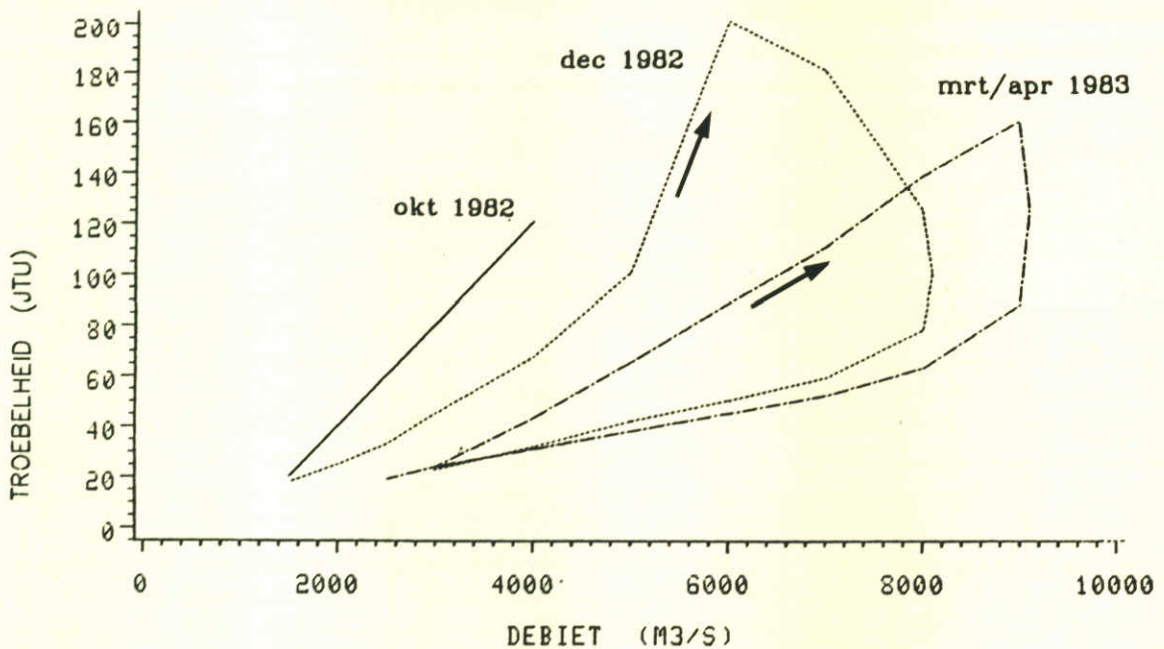
Uit figuur 18 t/m 20 kan gekonkludeerd worden dat bij troebelheid en zwevend stof ongeveer dezelfde hysterese-lussen optreden. Dit geeft aan dat het gedrag van zwevend stof overeenkomt met het gedrag van troebelheid en dientengevolge berust op dezelfde fysische achtergrond. In het verdere onderzoek is dan ook uitgegaan van troebelheid.

3.4 RELATIE TROEBELHEID EN DEBIET (LOBITH)

In de vorige paragrafen is aangegeven dat er bij een afvoergolf uitputting optreedt van zwevend stof dan wel troebelheid. Dit is aangegeven door middel van de hysterese lussen in de figuren 18 t/m 20. De vraag is echter wat er gebeurt bij achtereenvolgende afvoergolven.

Dit is uitgewerkt voor het meetstation Lobith; dit station is gekozen, omdat dit in feite de randvoorwaarde is voor het transport van zwevend stof in het nederlandse deel van de Rijn. In eerste instantie zijn de hysterese lussen tussen juli '82 en april '83 nader geanalyseerd. Daarna is het gedrag van de troebelheid (zwevend stof) over een aantal jaren geanalyseerd.

In figuur 21 zijn de verschillende hysterese lussen uitgezet in de periode juli 1982 tot april 1983.



Figuur 21 Hysterese bij opeenvolgende afvoergolven (Lobith).

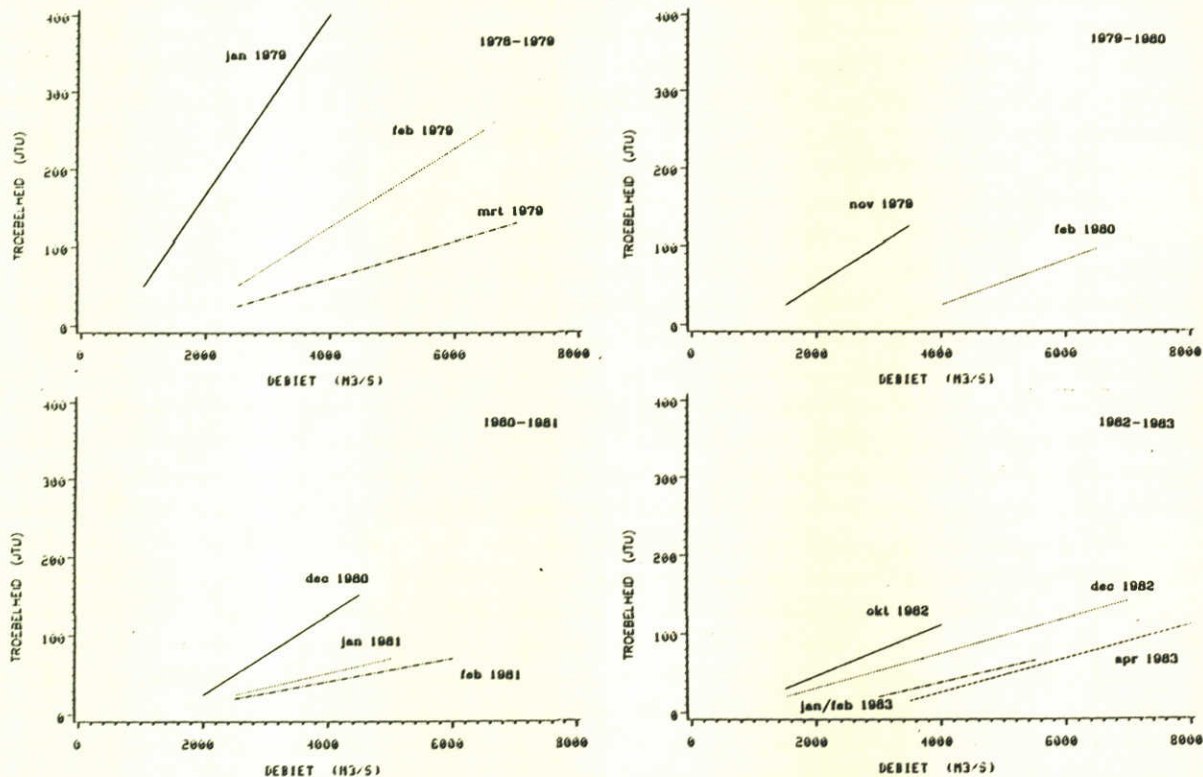
Bij figuur 21 kunnen de volgende opmerkingen wordengemaakt:

- o Er is bij de afvoergolven van december 1983 en maart/april 1983 duidelijk sprake van hysterese; bij de afvoergolf van oktober valt er nagenoeg geen hysterese waar te nemen.
- o De helling in de relatie tussen troebelheid en debiet neemt af bij opeenvolgende afvoergolven; dit is waarschijnlijk het gevolg van de volgende aspecten:
 1. De aanvoer van sediment naar de rivier vertoont ook een soort hysterese, dit gaat met name om de afvoer veroorzaakt door afstromen van regenwater; bij het begin van een regenperiode wordt er meer sediment geerodeerd dan aan het einde van een regenperiode.
 2. Bij een afvoergolf wordt er bodemsediment geerodeerd, de beschikbaarheid van bodemsediment neemt af naarmate er meerdere afvoergolven zijn geweest.

De aanvoer van sediment naar de rivier is in deze studie niet aan de orde geweest. Voor het nederlandse gedeelte van de Rijn is de aanvoer van water naar de rivier bovendien gering. Aspecten met betrekking tot de beschikbaarheid van bodemsediment worden voor het nederlandse gedeelte van de Rijn behandeld in de volgende paragraaf.

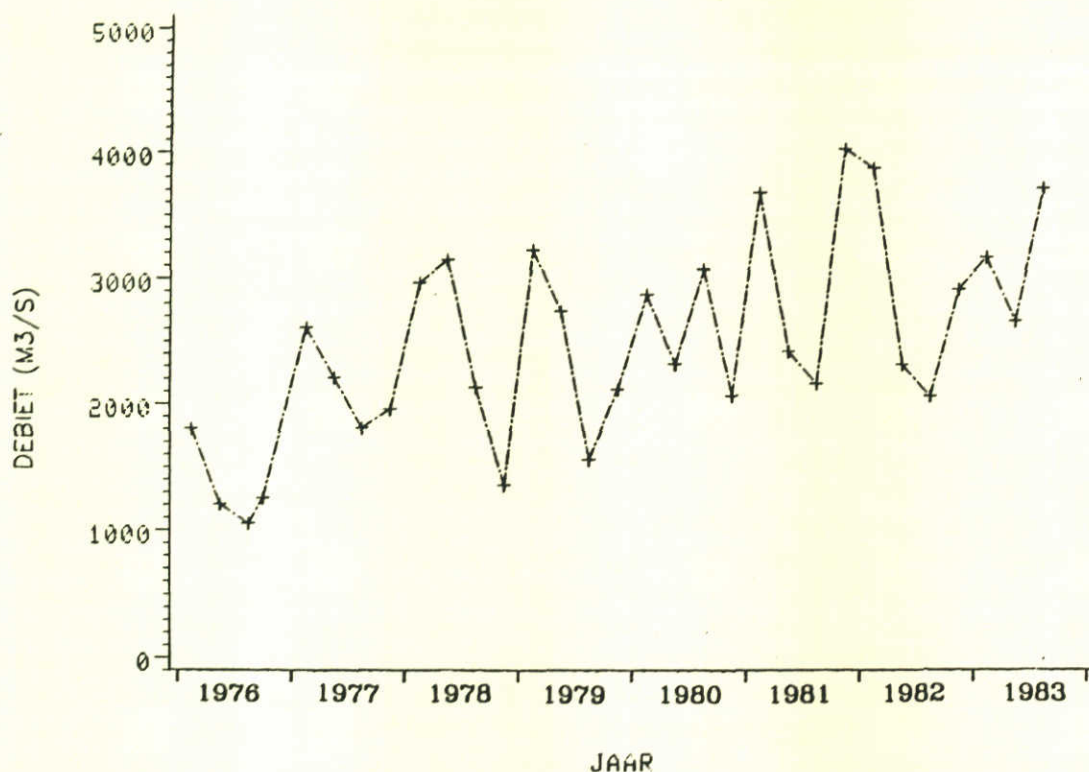
Er is gekonstateerd dat in een winterperiode de helling in de relatie tussen troebelheid en debiet geringer wordt na iedere afvoergolf. De vraag is of deze helling weer toeneemt na een winterperiode, zodat in feite een jaarcyclus ontstaat. In de

winterperiode (natte periode) neemt de beschikbaarheid van sediment af en in de zomerperiode (droge periode) neemt de beschikbaarheid van sediment toe. Dit is uitgewerkt voor de jaren 1978 tot 1983 en weergegeven in onderstaande figuur. In deze figuur is de gemiddelde helling van een hystereselus weergegeven bij verschillende afvoergolven in een winterperiode. Iedere subfiguur geeft een andere winterperiode weer. De winterperiode 1981/1982 valt uit vanwege het geringe aantal waarnemingen.



Figuur 22 Verandering helling relatie troebelheid-debiet gedurende verschillende winterperiodes.

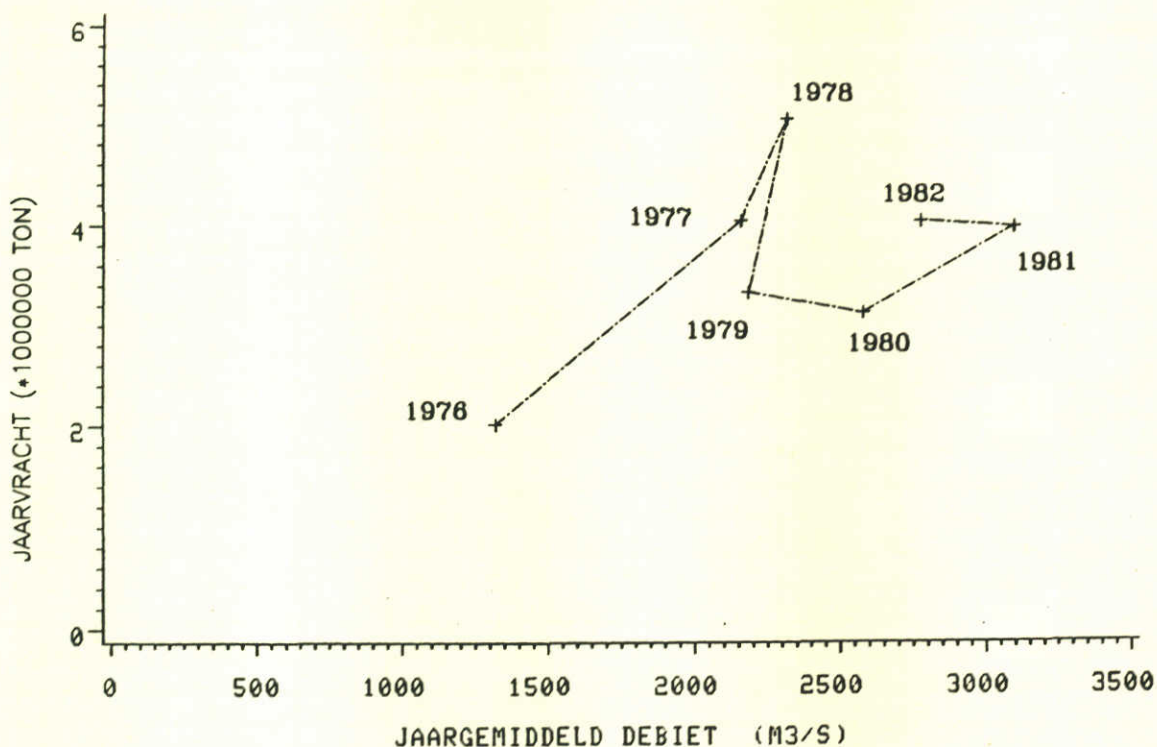
Uit bovenstaande figuur blijkt inderdaad dat er sprake is van een jaarcyclus. De gemiddelde helling van de eerste hystereselussen in een winterperiode zijn groter dan de hellingen van de laatste hystereselussen uit de voorgaande winterperiode. De winterperiode 1978/1979 valt hierbij op door de grote hellingen en grote troebelheden tot ongeveer 450 JTU. De vraag die hierbij gesteld kan worden is of er ook sprake is van een cyclus over verschillende jaren. Het jaar 1976 was een droog jaar met geringe afvoer (zie figuur 23) en dus weinig transport van zwevend stof. Het is mogelijk dat in de jaren na 1976 er een groot transport van zwevend stof is opgetreden.



Figuur 23 Kwartaalgemiddelde debieten van de Rijn bij Lobith in de periode 1976-1983.

Uitgaande van de kwartaaloverzichten van Rijkswaterstaat is een schatting gemaakt van het jaarlijks zwevend stof transport (er is niet uitgegaan van een schatting van de vracht "troebelheid", omdat het vermoeden bestaat dat de troebelheidsgegevens over 1978 en 1979 niet korrekt zijn). Dat dit een redelijk goede schatting voor het jaarlijkse transport is blijkt uit een vergelijking van deze gegevens met een schatting van de vracht zwevend stof uit de dagelijkse zwevend stof waarnemingen bij Lobith vanaf juli 1982 tot januari 1984. Wel dient te worden opgemerkt dat er rekening moet worden gehouden met de verstoring van het gemiddelde door hoge en relatief korte afvoergolven. Dit is bijvoorbeeld het geval in het tweede kwartaal van 1983. Wordt het kwartaalgemiddelde uit het kwartaaloverzicht aangehouden, dan is de berekende jaarvracht ongeveer 50 % te hoog. Als rekening wordt gehouden met de vorm van het verloop van de vracht (via de dagwaarden van debiet en troebelheid) dan wordt een veel betere schatting verkregen van de jaarvracht (orde 10% onnauwkeurigheid).

In figuur 24 is de jaarvracht zwevend stof uitgezet tegen het jaargemiddelde debiet.



Figuur 24 Relatie tussen jaarvracht zwevend stof en jaargemiddeld debiet (Rijn bij Lobith).

Uit figuur 24 volgt dat er inderdaad sprake is van een verhoogde vracht aan zwevend stof na het droge jaar 1976. In de jaren 1979 t/m 1981 is de vracht duidelijk kleiner dan in de jaren 1977 en 1978 terwijl het gemiddelde debiet van de jaren 1979 t/m 1981 duidelijk groter is dan in 1977 of 1978. Er is geen sprake van een grotere vracht zwevend stof in de jaren 1979 ten opzichte van de navolgende jaren; dit volgde wel uit de troebelheidsgegevens (zie figuur 22). Ook de vrachten "troebelheid" zijn uitgerekend voor de jaren 1979 t/m 1983. Uit de resultaten bleek dat de verhouding tussen vracht zwevend stof en "troebelheid" voor het jaar 1979 duidelijk afweek ten opzichte van de andere jaren. Waarschijnlijk zijn de in 1978 en 1979 gemeten troebelheidswaarden niet geheel korrek. Mogelijk heeft dit te maken met het omschakelen van de apparatuur.

Uit bovengenoemde resultaten kan worden afgeleid dat er een jaarlijkse cyclus in het gedrag van de troebelheid is en bovendien een cyclus over meerdere jaren, waarbij droge en natte jaren een rol spelen. De verschillen in de relatie tussen debiet en troebelheid worden veroorzaakt door de aanvoer en gesedimenteerd materiaal in de rivierbedding. Met name in de droge perioden sedimenteert er sediment op de rivierbeddingen, wat weer geerodeerd kan worden bij afvoergolven. Verschijnselen gerelateerd aan sedimentatie en erosie van sediment van de rivierbodem treden ook op in het nederlandse gedeelte van de Rijn; dit blijkt uit de resultaten van de volgende paragraaf.

3.5 VERGELIJKEN VERSCHILLENDE HYSTERESE-LUSSEN

In de vorige paragraaf is gesteld dat de hystereselussen in de relatie tussen debiet en troebelheid mede worden veroorzaakt door sedimentatie/erosie van sediment naar/van de bodem van de rivier. Het feit dat er sprake is van sedimentatie en erosie van sediment kan worden aangetoond voor de verschillende Rijn-takken in Nederland door de hystereselussen van de verschillende stations te vergelijken. Gezien het feit dat de debieten in de verschillende takken nogal verschillen, is gekozen voor een vergelijking van de hystereselussen in de relatie tussen troebelheid en snelheid. De vergelijking is uitgevoerd voor de volgende takken:

- o Waal: vergelijken gegevens Lobith en Vuren.
- o IJssel: vergelijken gegevens Lobith en Kampen.
- o Beneden-Rijn: vergelijken gegevens Lobith en Hagestein.

Er wordt hierbij gebruik gemaakt van de debiet- en troebelheidsgegevens tussen juli 1982 en december 1983. Deze periode is gekozen vanwege de beschikbaarheid van (werk-) dagelijkse zwevend stof gegevens bij Lobith. De gemiddelde stroomsnelheden bij de verschillende meetstations zijn afgeleid uit relaties tussen debiet en snelheid welke zijn gebruikt bij het toepassen van het waterkwaliteitsmodel MODQUAL voor de Rijn. De relatie tussen debiet en snelheid welke hierbij gebruikt wordt is:

$$v = a \cdot (Q)^b$$

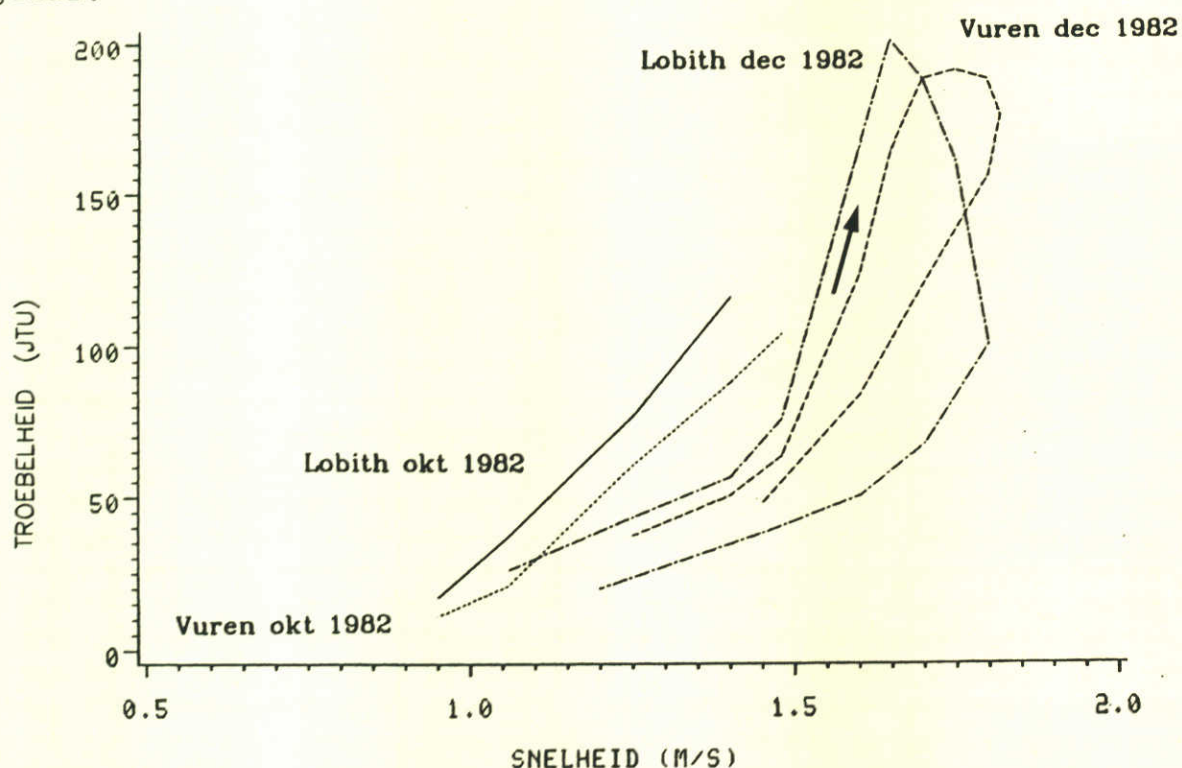
Er zijn twee konstanten in deze vergelijking, welke verschillen per meetstation. Dit is weergegeven in de onderstaande tabel.

meetstation	konstante a	konstante b
Lobith	0.051	0.40
Vuren	0.060	0.40
Kampen	0.052	0.40
Hagestein	0.001	1.00

Uitgaande van deze relaties zijn voor de verschillende meetstations de relaties tussen troebelheid en snelheid bepaald.

1. Waal:

De hystereselussen in de relatie tussen snelheid en troebelheid zijn voor de meetstations Vuren en Lobith uitgezet in figuur 25. De gegevens omtrent de afvoergolven in 1983 ontbreken, omdat de troebelheidsmeter bij Vuren in deze periode veel storingen heeft gehad.



Figuur 25 Relatie tussen snelheid en troebelheid (Waal).

Bij het vergelijken van de gegevens van Lobith en Vuren kan het volgende worden geconstateerd:

- o Zowel bij Lobith als bij Vuren treedt er bij de afvoergolf in oktober 1982 geen aantoonbare hysteresis op. De snelheden zijn bij Vuren iets hoger, terwijl de troebelheden geringer zijn dan bij Lobith. Dit geeft aan dat er niet eenduidige relatie is tussen troebelheid en gemiddelde stroomsnelheid. Gezien het feit dat de troebelheid bij Vuren lager is dan bij Lobith treedt er waarschijnlijk sedimentatie op in dit vak van de Waal.
- o Bij de afvoergolf in december is er op de Waal erosie van bodemsediment; de hysteresis bij Lobith is veel groter dan bij Vuren.

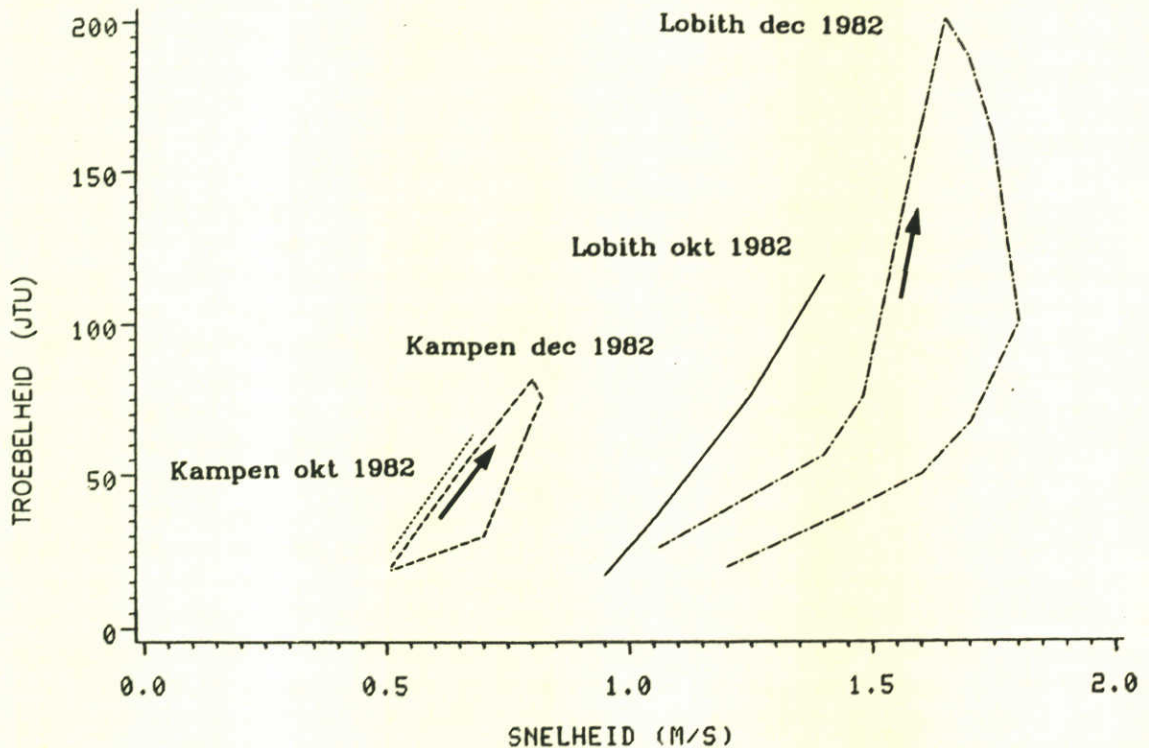
Bij afvoergolven treedt er op de Waal erosie op als de concentratie zwevend stof bij Lobith geringer is dan een bepaald evenwichtsgelalte dat gerelateerd is aan het debiet en de hoeveelheid beschikbaar sediment. De hoeveelheid beschikbaar sediment neemt af in de winterperiode en wordt weer aangevuld in de zomerperiode.

Opgemerkt dient te worden dat het gedrag van troebelheid bij Vuren in grote mate overeenkomt met dat van Lobith. Dit betekent

dat een modelmatige benadering van de troebelheid in dit vak waarschijnlijk goed mogelijk is, met name omdat er geen grote wijzigingen optreden in de (gemiddelde) snelheid.

2. IJssel:

De relatie tussen troebelheid en snelheid is voor de meetstations Kampen en Lobith weergegeven in figuur 26.



Figuur 26 Relatie tussen snelheid en troebelheid (IJssel).

Bij het vergeleken van de gegevens van de meetstations Lobith en Kampen kan het volgende worden gekonstateerd:

- o De waarde van de troebelheid tijdens de afvoergolven in oktober en december 1982 is bij Kampen duidelijk lager dan bij Lobith. In drogere perioden is de troebelheid bij Kampen in de meeste gevallen wat hoger dan bij Lobith (zie figuren 4 t/m 7).
- o De gemiddelde stroomsnelheid van de IJssel bij Kampen is ongeveer de helft van die bij Lobith. Na het Pannerdens-Kanaal neemt de stroomsnelheid sterk af.
- o Evenals bij Lobith treedt er bij Kampen geen aantoonbare hysteresis op in de relatie tussen debiet en troebelheid in oktober 1982. Er is bij beide meetstations wel hysteresis te constateren in december 1982.

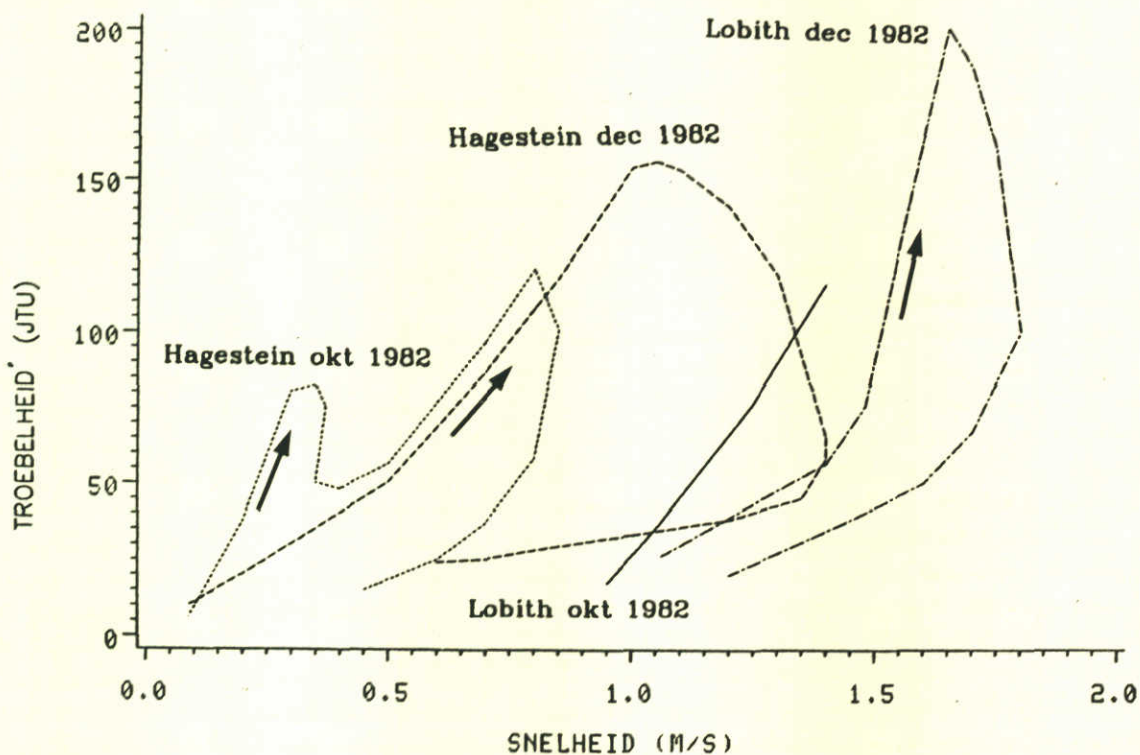
Gezien het feit dat de relatie tussen snelheid en troebelheid bij Kampen duidelijk verschilt van die bij Lobith is het ook veel moeilijker om konklusies uit deze resultaten te trekken. Bij een afvoergolf treedt er waarschijnlijk op de IJssel, vooral direct na het Pannerdens-Kanaal, sedimentatie op. Dit sediment wordt in de zomer-periode weer geerodeerd, waardoor de troe-

belheden bij Kampen in de zomerperiode meestal iets hoger zijn dan bij Lobith. Bij de afvoergolf in december is op de IJssel waarschijnlijk sprake van erosie van bodemsediment. De troebelheid bij Kampen is voor het bereiken van het maximum debiet van de afvoergolf duidelijk groter dan de troebelheid bij Lobith.

Het gedrag van troebelheid bij Kampen en Lobith is duidelijk verschillend. Op het traject Lobith-Kampen is er een verloop in de gemiddelde snelheid. Gezien de niet lineaire relatie tussen snelheid en troebelheid is het niet te verwachten dat er een modelmatige benadering van de IJssel mogelijk is als de IJssel door slechts een vak wordt gerepresenteerd.

3. Beneden-Rijn:

In figuur 27 is de relatie tussen snelheid en troebelheid weergegeven voor de meetstations Lobith en Hagestein. Het debiet van de Beneden-Rijn wordt geregeld door de stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein. Bij Rijn-afvoeren bij Lobith kleiner dan ongeveer 2000 m³/s wordt de Beneden-Rijn gestuwd, waardoor een steeds groter deel van het debiet van het Pannerdens Kanaal wordt afgeleid naar de IJssel. Dit heeft zeer zeker effect op het gedrag van de troebelheid cq het zwevend stof.



Figuur 27 Relatie tussen troebelheid en debiet (Beneden-Rijn).

Bij het vergelijken van de gegevens van Hagestein en Lobith kan het volgende worden geconstateerd:

- o Bij Hagestein treedt er in tegenstelling tot Lobith in oktober 1982 wel een hysteresis op in de relatie tussen troebelheid en snelheid. Dit zou er op kunnen duiden

dat er sediment is geerodeerd in deze periode in het traject tussen Driel en Hagestein.

- o Er is een verschil in de grootte van de gemiddelde snelheid van Lobith en Hagestein. Alleen bij zeer grote debieten (orde 8000 m³/s bij Lobith) benadert de snelheid bij Hagestein de snelheid bij Lobith.
- o Evenals bij het meetstation Lobith treedt er ook bij Hagestein een duidelijke hysteresis op in de relatie tussen troebelheid en debiet in december 1982. De maximale troebelheid is bij Hagestein iets geringer dan bij Lobith.

Er kan worden geconstateerd dat er sprake is van erosie op de Beneden-Rijn in oktober en december 1982. De relatie met het meetstation Lobith is echter moeilijk te leggen. Ook op de Beneden-Rijn is er waarschijnlijk sprake van sedimentatie direct na het Pannerdens-Kanaal evenals op de IJssel. Dit moet natuurlijk met name optreden in perioden met lage afvoeren, waarbij de stuwen worden gesloten. Een modelmatige benadering van de troebelheid zal ook in deze situatie niet eenvoudig zijn, met name omdat te verwachten is dat er een groot verschil in gemiddelde snelheid is tussen Lobith en Hagestein.

Bij deze studie zijn geen gegevens van meetstations bovenstrooms van Lobith geanalyseerd. Daar het gedrag van de troebelheid cq het zwevend stof gehalte bij Lobith ongeveer gelijk is aan het gedrag van de troebelheid cq het zwevend stof gehalte bij Vuren, kan verwacht worden dat direct bovenstrooms van Lobith (tot Rees, km 780) dezelfde relaties gelden als voor het traject Lobith-Vuren. Dit is gerelateerd aan het karakter van de rivier, dat wil zeggen de stroomsnelheid en de dwarsdoorsnede. In het bovenstroomse gedeelte zullen de relaties waarschijnlijk anders zijn, omdat daar geen kribvakken meer aanwezig zijn. Hierdoor wordt er in de rivier geen fijn sediment meer opgeslagen, omdat bij de vrij grote stroomsnelheden (1 tot 2 m/s) in de Rijn er geen zwevend stof in de stroomgeul bezinkt (voor langere tijd).

In bovenstaande is al enkele malen iets opgemerkt over een eventuele modelmatige benadering van de troebelheid. Gezien de resultaten wordt verwacht dat het mogelijk is om de troebelheid modelmatig te benaderen; dit geldt vooral voor de Waal. Bij de modelmatige benadering moet rekening worden gehouden met de relatie tussen debiet (snelheid) en troebelheid en de invloed van het bodemsediment.

In paragraaf 3.3 is aangegeven dat de fysische achtergrond van de relatie(s) tussen het debiet en het zwevend stof wellicht gelijk is aan de relatie(s) tussen het debiet en troebelheid. Indien het mogelijk blijkt om op basis van troebelheid een model te ontwikkelen dat de troebelheid als functie van de tijd beschrijft, dan zal dit model (met enigszins gewijzigde coëfficiënten) ook toepasbaar zijn voor de beschrijving van het zwevend stof gehalte. Op basis van de nu beschikbare meetgegevens is het alleen mogelijk om een model te verifiëren voor troebelheid; van het zwevend stof gehalte zijn onvoldoende gedetailleerde gegevens beschikbaar om model verificatie mogelijk te maken.

Door het Waterloopkundig Laboratorium is een literatuurstudie uitgevoerd naar de beschikbare relaties voor het modelleren van zwevend stof. De belangrijkste conclusie van deze studie is dat de modellen voor het zwevend stof uiteenvallen in twee categorieën: of zeer complex en deterministisch of zeer eenvoudig en empirisch. Gezien het doel van de huidige studie (het aangeven van mogelijkheden voor de modellering van het zwevend stof in de Rijn) dient bij voorkeur te worden gekozen voor een eenvoudig model met een zo elementair mogelijke beschrijving van het erosie- en sedimentatieproces, waarmee de beschikbare gegevens kunnen worden geordend en geanalyseerd.

In dit hoofdstuk worden in het kort een aantal karakteristieke wiskundige beschrijvingen (modelformuleringen) besproken die betrekking hebben op de verschillende aspecten van het sedimentatie- en resuspensieproces, zoals:

- | | |
|---------------|------------------------|
| -flocculatie | -consolidatie |
| -valsnelheid | -erosie en resuspensie |
| -sedimentatie | -transport |

Vervolgens wordt nog een korte beschrijving gegeven van beschikbare en wellicht voor het toekomstig slibonderzoek relevante mathematische modellen.

4.1 BESCHRIJVINGEN FYSISCH-CHEMISCHE ASPECTEN

Door de kleine afmetingen van de slibdeeltjes en de daarbij behorende verhouding tussen oppervlak en massa, spelen de oppervlaktekrachten een belangrijke rol. De kolloidale eigenschappen treden met name naar voren bij deeltjes met afmetingen kleiner dan 1 μm .

De grootte van de hierbij optredende aantrekkende en afstotende krachten tussen de deeltjes hangen, behalve van de eigenschappen

van de deeltjes zelf, in belangrijke mate af van de eigenschappen van het water.

Het zijn vooral deze fysisch-chemische eigenschappen, die het gedrag van slib onderscheiden van dat van grovere materialen zoals bijvoorbeeld zand. Kan bij zand gerekend worden met een constante valsnelheid, bij slib wordt deze bepaald door de tengevolge van flocculatie ontstane grootte van de vlok, welke op zijn beurt weer een functie is van bijvoorbeeld de slibsoort, de slibconcentratie, de zoutconcentratie en de turbulentie in het water.

Een ander belangrijk verschil is dat de kritieke schuifspanning voor erosie bij zand ongeveer gelijk is aan die waarbij sedimentatie optreedt. Bij fijne slibdeeltjes is als gevolg van de bindingskrachten tussen de deeltjes de snelheid, waarbij erosie optreedt, belangrijk groter dan die waarbij sedimentatie optreedt.

In dit hoofdstuk zullen de processen, welke aan de slibtransporten ten grondslag liggen, nader worden beschouwd. Er zal telkens summier worden ingegaan op hetgeen hierover in de literatuur bekend is. Overigens worden vrij uitgebreide overzichten vermeld in (3,4,5).

4.1.1 Flocculatie.

Van overheersend belang voor het gedrag van slibdeeltjes in water zijn de flocculatieverschijnselen, waarbij de fijne slibdeeltjes samenkleven en vlokken vormen. De individuele deeltjes zijn namelijk zo klein en hebben diensgevolge zulke kleine valsnelheden, dat zij niet of slechts zeer langzaam tot bezinking komen. Door flocculatie ontstaan evenwel vlokken die, evenals de valsnelheden, vele malen groter zijn.

De oorzaak van dit gedrag ligt in de fysisch-chemische processen van het slib-watermengsel. Sterk geschematiseerd komt dit op het volgende neer: De slibdeeltjes hebben door diverse oorzaken een negatieve lading. Hierdoor worden positieve ionen uit het water naar het deeltje slib getrokken, om hun eigen elektrische lading te neutraliseren. Wanneer twee deeltjes elkaar naderen zullen zij elkaar afstoten ten gevolge van de wolk positieve ionen die zij om zich heen verzameld hebben. Daarnaast zullen twee deeltjes elkaar aantrekken ten gevolge van de Van der Waals krachten. Deze laatste krachten nemen daarbij snel af als de afstand tot het deeltje toeneemt, terwijl de krachten afnemen bij toename van het zoutgehalte.

Behalve de mineralogische samenstelling blijkt ook de slibconcentratie een belangrijke parameter te zijn bij de invloed van het zoutgehalte op de flocculatieverschijnselen. Ook het type zout is van invloed.

Bij de beschreven fysisch-chemische processen is tevens de aanwezigheid van fysische verschijnselen (botsingen tussen deeltjes) noodzakelijk voor het optreden van flocculatie.

De door de snelheidsgradiënten op de vlokken uitgeoefende schuifspanningen hebben tot gevolg dat de vlogk grootte beperkt blijft vanwege de maximale schuifspanning die een vlogk kan weerstaan. De invloed van de turbulentie op de vlogk grootte bij het flocculatieproces is vrijwel onbekend.

Tevens is het mogelijk dat biologische processen invloed kunnen hebben. Uiterwijk Winkel (6) heeft in 1975-1976 een onderzoek gedaan naar het sedimentgedrag van Rijnslib. Uit dit onderzoek, dat beperkt bleef tot het in de rivier zwevende slib, bleek dat de vlogkvorming sterk kan worden beïnvloed door biologische processen in het slib en de activiteit van vooral bacterien, algen en protozoen. Laatstgenoemde organismen bleken onder meer de fysisch-chemische en mechanische eigenschappen van het slib te beïnvloeden.

4.1.2 Valsnelheid.

Een belangrijke parameter bij het modelleren van slibtransporten is de valsnelheid van het deeltje. Voor ronde deeltjes in stilstaand water geeft de formule van Stokes een goede beschrijving.

De door flocculatie ontstane slibvlokken hebben evenwel geen ronde vorm en bestaan voor een groot gedeelte uit water. Directe toepassing van de formule van Stokes is dan ook niet eenvoudig.

Het blijkt dat de valsnelheid wordt beïnvloed door:

1. concentratie
2. diepte
3. zoutgehalte
4. turbulentie
5. temperatuur
6. mineralogische samenstelling

ad 1: invloed concentratie:

Bij lage concentraties (minder dan 300 mg/l) blijkt, omdat de deeltjes zeer weinig interacties vertonen, de valsnelheid constant te zijn. De valsnelheid neemt in de tijd langzaam toe door voortgaande flocculatie. De uiteindelijke valsnelheid van de gevormde vlokken blijkt dan te kunnen worden beschreven door:

$$w = K \cdot C^{**m}$$

met: K = constante (afhankelijk van deeltjesgrootte)
C = concentratie gesuspendeerde deeltjes
m = empirische exponent (typische waarde 1.33)

Bij hogere concentraties (meer dan 300 mg/l) treedt er 'gehinderde bezinking' op. Men pleegt de valsnelheid dan te beschrijven met de Richardson-Zaki relatie:

$$w = w_0 \cdot (1-Y)^{**a}$$

met: w_0 = valsnelheid van de individuele vlokken
Y = relatieve volume van gesuspendeerde vlokken
a = constante (a ongeveer 5)

Daarnaast is de concentratie via de flocculatieverhsijnselen ook direct van invloed op de valsnelheid. Immers een hoge concentratie betekent veel botsingen en dus grote vlokken.

ad 2: invloed diepte:

Uit proeven uitgevoerd door McLaughlin (7) blijken belangrijke verschillen in valsnelheid op verschillende diepten, waarschijnlijk vooral ten gevolge van de voortgaande flocculatie.

ad 3: invloed zoutgehalte:

Via de invloed van het zoutgehalte op de mate van flocculatie heeft het zoutgehalte een belangrijke invloed op de valsnelheid. Boven een bepaald zoutgehalte blijkt er weinig invloed meer te zijn.

ad 4: invloed turbulentie:

Turbulentie heeft op een twee manieren invloed op de valsnelheid: in de eerste plaats wordt door turbulentie de kans op botsingen verhoogd waardoor grotere vlokken ontstaan en daarnaast wordt de grootte van de vlokken door de optredende schuifspanningen beperkt. Een groot probleem bij de turbulentiegraad is dat deze niet eenvoudig valt te meten.

Voor een stationaire situatie kan, uitgaande van een logaritmisch snelheidsprofiel en een parabolisch verloop van de turbulente uitwisselingscoefficient, worden afgeleid dat de concentratie C_z op een diepte z voor uniforme deeltjes verloopt als:

$$C_z/C_a = ((a/d-a) \cdot (d-z/z))^{**s}$$

met: a = referentiehoogte, waar $C_z = C_a$
d = waterdiepte
s = $w / K \cdot u^*$
K = Von Karmanconstante
 u^* = schuifspanningssnelheid.

De resultaten vertonen evenwel vaak nogal wat spreiding, terwijl slechts zelden aan alle voorwaarden voor deze methode zal worden voldaan.

ad 5: invloed temperatuur:

De temperatuur heeft via de relatie met de viscositeit een grote invloed op de turbulentiegraad en daarmee op de valsnelheid.

ad 6: invloed mineralogische samenstelling:

Aangezien het flocculatieproces beïnvloed wordt door de mineralogische samenstelling van het sediment, is deze tevens van invloed op de valsnelheid. Omdat iedere slibsoort weer een andere samenstelling heeft, betekent dit dat voor elke slibsoort de valsnelheid apart zal moeten worden bepaald.

4.1.3 Sedimentatie.

Wanneer de valsnelheid van deeltjes bekend is, is de afzetting van deze deeltjes in stilstaand water eenvoudig te berekenen. In stromend water is dit echter veel gecompliceerder. Bij voldoende hoge stroomsnelheden vormen de grote snelheidsgradienten bij de bodem een hinderpaal voor de vlokken om de bodem te bereiken. Een grote moeilijkheid voor het beschrijven van deze processen is tevens dat de grootte van de vlok, en dus ook de valsnelheid, afhankelijk is van de turbulentiegraad.

Uitgebreide studies naar de sedimentatie van slib in stromend water zijn uitgevoerd aan de universiteiten van California en Florida door Einstein, Krone, Partheniades en Metha (8,9,10,11,12), terwijl door het Waterloopkundig Laboratorium dergelijk onderzoek is uitgevoerd in het kader van de studie van de Demerara River (13).

Door Krone zijn proeven uitgevoerd in een stroomgoot van 30.0 bij 0.9 meter en een waterdiepte van 0.3 meter, gevuld met San Francisco Bay Mud. Er bleek een kritische schuifspanning T_{cs} te bestaan, waarvoor geldt dat als T_b groter is dan T_{cs} er geen sedimentatie optreedt. De waarschijnlijkheid P dat een deeltje dat de bodem bereikt zich ook aan de bodem zal hechten wordt door Krone gelijk gesteld aan:

$$P = 1 - T_b/T_{cs} \quad \text{als } T_b \text{ minder dan } T_{cs}$$

$$P = 0 \quad \text{als } T_b \text{ lager dan } T_{cs}$$

waarbij T_b de bodemschuifspanning is.

Als T_b lager is dan T_{cs} kan de hoeveelheid slib die per eenheid van oppervlak sedimenteert worden beschreven door:

$$dm/dt = - C.w.P = - C.w.(1 - T_b/T_{cs})$$

waaruit blijkt dat deze sterk afhangt van de concentratie C aan gesuspendeerde deeltjes. Krone onderscheidt drie gebieden:

C minder dan 300 mg/l : de concentratie neemt exponentieel

af met de tijd: $C/Co = \exp(K_1 \cdot t)$
(Er is een te verwaarlozen invloed
tgv flocculatie: de valsnelheid is
is dientengevolge constant).

C meer dan 300 mg/l en $\log C/Co = -K_2 \cdot \log(t)$
minder dan 10000 mg/l : (Er treedt flocculatie op tgv bot-
singen tussen de deeltjes: de val-
snelheid is afhankelijk van de con-
centratie).

C meer dan 10000 mg/l : Zeer langzame afzetting door con-
tact tussen de deeltjes en door de
gehinderde waterstroming.

Uit de diverse onderzoeken mag worden afgeleid dat de
afzetting van geflocculeerd slib in stromend water in belang-
rijke mate beheerst wordt door de turbulentie van het water in
een zone vlak bij de bodem.

4.1.4 Consolidatie.

Men spreekt van consolidatie wanneer er na bezinking een laag
ontstaat waarin de waterspanningen afnemen en de korrel-
spanningen toenemen. Hierdoor ontstaat een dichtere pakking van
het korrelskelet met als gevolg een grotere sterkte en weerstand
tegen afschuiving. Een dunne laag blijkt sneller te consolideren
dan een dikke laag, omdat het uit te drijven water een minder
lange afstand heeft af te leggen. De uiteindelijke dichtheid is
evenwel groter naarmate de dikte groter is. Ook neemt de
dichtheid toe met de diepte. Na de afzetting van het slib treden
geochemische processen op, die resulteren in een groot aantal
stofomzettingen. Deze processen zijn voor een groot deel van
biochemische aard en berusten op de aanwezigheid van organische
stof in het sediment. Samenvattend kan gesteld worden dat de
temperatuur, het gehalte aan organische stof, het zuurstofge-
halte en het zoutgehalte een belangrijke invloed hebben op het
consolidatieproces.

4.1.5 Erosie.

Erosie is het aantasten van de bodem door de waterbeweging en
het in beweging raken (in suspensie gaan) van het sediment waar-
uit die bodem is opgebouwd. Het is een interactie tussen water
en bodem, waarbij de afzonderlijke eigenschappen van water en
bodem en de verbanden daartussen een rol spelen. Erosie van de
bodem blijkt op diverse wijzen te kunnen plaatsvinden:

- o het losraken van deeltjes aan het oppervlak van de
bodem.

- o het instabiel worden van het grensvlak tussen een zich bij de bodem bevindende sliblaag en het er boven stromende water.
- o het losbreken van grotere gedeelten uit de bodem ten gevolge van het overschrijden van de bodemschuifweerstand.

Onderzoek naar erosie van de bodem heeft zich voornamelijk gericht op niet-cohesieve materialen. Het gedrag hiervan is evenwel geheel verschillend van die van de cohesieve materialen. Voor niet-cohesieve materialen zoals zand, wordt de weerstand tegen erosie met name bepaald door het gewicht onder water van de afzonderlijke korrels. Voor een bodem, bestaande uit cohesieve materialen, wordt deze weerstand bepaald door de electrochemische krachten tussen de deeltjes. De erosiesnelheid van een dergelijke bodem is daarom niet alleen afhankelijk van de deeltjesgrootte en de schuifweerstand, maar ook van de mineralogische samenstelling, de chemische eigenschappen van het boven de bodem stromende water en van het porienwater en de temperatuur (14).

De erosiebestendigheid wordt meestal gegeven als de kritieke waarde van een hydraulische parameter (stroomsnelheid, schuifspanning aan de bodem of schuifspanningssnelheid) waarbij een begin van aantasting optreedt. Bij de sedimenten met zeer kleine afmetingen blijkt er een belangrijk verschil tussen de snelheid waarbij erosie optreedt en die waarbij het sediment zich afzet op de bodem. Tevens blijkt er bij de fijne deeltjes van bepaalde afmetingen een grote range van kritieke erosiesnelheden te bestaan, afhankelijk van de mate van consolidatie. De toename van de erosieweerstand met afnemend watergehalte wordt veroorzaakt door de hierbij optredende toename van de cohesieve bindingskrachten tussen de deeltjes, waarbij deze krachten sterk afhangen van de mineralogische samenstelling van het sediment.

Bij onderzoek naar de erodeerbaarheid van cohesieve sedimenten wordt in de literatuur meestal onderscheid gemaakt tussen onderzoek op volledig geconsolideerde materialen en vers afgezet sediment. Het blijkt dat de weerstand van een bodem gevormd in stromend water groter is dan van een in stilstaand water gevormde bodem.

Door Migniot (15) is voor vers afgezet slib de volgende relatie opgesteld tussen de kritieke schuifspanningssnelheid U^* en de schuifweerstand T_y van het bodemmateriaal:

$$U^* = 0.018 \cdot T_y^{**0.25} \quad \text{voor } T_y \text{ minder dan } 1.5 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$U^* = 0.016 \cdot T_y^{**0.25} \quad \text{voor } T_y \text{ meer dan } 1.5 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

De erosiekans als functie van de optredende bodemschuifspanning is volgens Partheniades (11) en Cormault (16) te schrijven als:

$$P = T_b/T_{ce} - 1 \quad \text{als } T_b \text{ meer dan } T_{ce}$$

$P = 0$ als T_b minder dan T_{ce}

en daarmee voor de erosiesnelheid:

$$\dot{m}/dt = M \cdot P$$

waarbij:

M = erodeersnelheid (bij $T_b = 2T_{ce}$)

T_{ce} = kritieke schuifspanning voor erosie.

Enige waarden: Thames-slib: $M=1.7 \text{ g/m}^2/\text{s}$,
Gironde-slib: $M=0.2 \text{ g/m}^2/\text{s}$.

Behalve de in dit hoofdstuk genoemde fysische en fysisch-chemische processen kunnen ook biologische processen een belangrijke bijdrage leveren aan de erosie van afgezet slib. Diverse organismen kunnen het afgezette sediment verstoren of beïnvloeden.

Samenvattend kan worden gesteld dat de mechanismen die aan het erosieproces ten grondslag liggen nog nader dienen te worden onderzocht en dat er op dit moment slechts een beperkt aantal algemeen geldende regels bestaan voor de beschrijving van de erosie van een willekeurig cohesief sediment. Ten behoeve van de beschrijving van erosie bieden de formuleringen van Krone, Partheniades en Cormault op dit moment de beste vooruitzichten op een algemeen toepasbare beschrijvingsvorm.

4.2 MATHEMATISCHE MODELLEN EN MODELFORMULERINGEN

Een belangrijk probleem bij het beschrijven van de slibtransporten met mathematische modellen is de beperkte kennis van de diverse bij deze slibverschijnselen optredende processen. Dit betreffen met name de beschrijvingen voor de samenvlokkingsprocessen van de slibdeeltjes en de uitwisselingsprocessen met de bodem. De in de literatuur vermelde mathematische modellen dateren in bijna alle gevallen van de laatste tien jaar.

4.2.1 Het tweelagenmodel van Odd en Owen.

Het eerste model voor het berekenen van slibtransporten is het door Odd en Owen in 1972 gepresenteerde tweelagenmodel voor de Thames (17). Voor dit goed gemengde estuarium is voor een tweelagenmodel gekozen, omdat de gravitatiecirculatie een belangrijke rol speelt bij de beweging en longitudinale verdeling van gesuspendeerde deeltjes. Aangezien de interne circulatie bij een goed gemengd estuarium van weinig invloed is op de voortplanting

van het getij, is voor de berekening van de waterdiepte en de gemiddelde snelheid uitgegaan van de 1D-benadering. Vervolgens wordt de beschouwing in twee lagen voortgezet, waarbij voor de dikte van de onderste laag een vaste waarde is gekozen: $d = 1,22$ m. De in de beide lagen gemiddeld optredende concentraties van gesuspendeerde deeltjes volgen nu uit de voor de beide lagen op te stellen massabalansen, waarbij aannamen gedaan zijn voor het massatransport door het grensvlak en de transporten ten gevolge van erosie en afzetting.

In een later stadium is het model uitgebreid voor toepassing op de Great Ouse. Beide lagen kunnen dan in dikte variëren.

4.2.2 Het eindige elementenmodel van Ariathurai.

Dit betreft een 2D-model, waarbij zowel een over de diepte als een over de breedte gemiddelde versie bestaat (18). Het over de diepte gemiddelde model is aanmerkelijk eenvoudiger dan het model dat de slibverschijnselen in het verticale vlak beschrijft vanwege over het algemeen kleinere gradienten in de concentratie en eenvoudiger randvoorwaarden.

De stroomsnelheden dienen gegeven te zijn, hetzij uit berekeningen of prototypemetingen, dan wel uit hydraulisch modelonderzoek. Opgelost wordt de convectie-diffusievergelijking met brontermen voor de erosie en sedimentatie. De bodem wordt beschreven door laagjes van 2,5 cm, waarbij voor elk laagje de slibeigenschappen worden vastgelegd.

Bij het verticale model wordt de oplossing in belangrijke mate bepaald door de valsnelheid en de verticale uitwisselingscoëfficiënt. Het model is toegepast in o.a. de Savannah Estuary, een gedeeltelijk gemengd estuarium met drie meetstations.

4.2.3 Het dispersiemodel van Chritodoulou, Leimkuhler en Ippen.

Dit model is een quasi-driedimensionaal model voor de verspreiding van fijne gesuspendeerde deeltjes in kustwateren (19). Uitgangspunt voor de ontwikkeling van het model was de vraag naar de milieu-effecten van baggeractiviteiten ten behoeve van zand- en grindwinning in de Massachusetts Bay, met name het gedrag van de fijne deeltjes die daarbij vrijkomen. In het model wordt uitgegaan van een verticale continue lijnbron. Een voorwaarde bij de berekening is dat de diepte overal constant is en dat het geloosde sediment nog nergens de kust heeft bereikt.

Voor de horizontale snelheden wordt uitgegaan van een driftsnelheid, vermeerderd met een sinusvormig verlopende

snelheid ten gevolge van de getijwerking. Voor de onderste 5% van de waterdiepte wordt het gehalte constant verondersteld. Hierbij is het sediment onderverdeeld in een aantal groepen, met elk een gemiddelde valsnelheid.

De grootste invloed op de uitkomsten van de berekening hebben de uitwisselingsprocessen met de bodem (sedimenten; invloed valsnelheid) en de netto driftsnelheid. Ook de dispersiecoëfficiënt, loodrecht op de richting van de driftsnelheid, is van belang.

4.2.4 Het tweedimensionale model van Kuo, Nichols en Lewis.

Door Kuo, Nichols en Lewis is een tweedimensionaal model ontwikkeld, waarbij gemiddeld wordt over de breedte (20). Zowel de water-, zout- als sedimentbeweging worden berekend. De watermassa is hierbij in een aantal horizontale lagen verdeeld, met uitwisseling van impuls en massa tussen de lagen. Per laag worden de 2D-vergelijkingen over de hoogte geïntegreerd en in een expliciete differentie-vorm geschreven. Met de nodige begin- en randvoorwaarden worden deze vervolgens opgelost. De beschrijving voor de erosie en sedimentatie is overeenkomstig die in het model van Ariathurai.

De verticale diffusiecoëfficiënt, de valsnelheid en de kritieke bodemschuifspanning voor erosie en sedimentatie blijken een belangrijke invloed te hebben op de berekeningsresultaten.

4.2.5 Model voor suspensietransport van Smith en O'Conner.

In (21) wordt een beknopte beschrijving gegeven van een tweedimensionaal over de breedte gemiddeld model waarmee de waterbeweging en de verdeling van opgeloste en gesuspendeerde stoffen kunnen worden berekend.

De stroomsnelheid bij de proeven was zodanig dat nog geen erosie optrad. De sedimentatie werd evenredig verondersteld aan het produkt van de valsnelheid, de concentratie en een re-entrainmentcoëfficiënt. Zie ook (22).

4.2.6 WL-model voor gesuspendeerd sedimenttransport.

Door het Waterloopkundig Laboratorium is in het verleden een model ontwikkeld voor de berekening van het transport van gesus-

pendeerde deeltjes in een tweedimensionaal stromingsveld (longitudinaal en verticaal). De ontwikkeling van dit model heeft als achtergrond de aanzanding van sleuven (23,24).

Voor de waterbeweging wordt een eendimensionale beschouwing toegepast. Aangenomen wordt dat de stroomsnelheid logaritmisch verdeeld is over de diepte, zowel ter plaatse van de sleuf als daar buiten. De concentratieverdeling wordt vervolgens bepaald door oplossing van een vereenvoudigde diffusie-convectie-vergelijking voor het sediment. Deze vereenvoudiging bestaat verwaarlozen van de tijdsafhankelijke termen, waardoor het model betrekking heeft op een permanente situatie. Niet-permanente situaties worden benaderd door een quasi-permanente aanpak, waarbij het proces verdeeld wordt in een aantal tijdvakken met daarin permanent geachte stromingssituaties.

De valsnelheid van de deeltjes wordt constant verondersteld. Gebruik makend van de resultaten van door Coleman in een stroomgoot uitgevoerde experimenten (25) wordt voor de verticale diffusiecoëfficiënt over de onderste helft van de waterdiepte een parabolisch verloop aangenomen en wordt deze over de bovenste helft van de waterdiepte constant verondersteld.

Een belangrijke rol in het model speelt voorts de transportcapaciteit van het stromende water. Deze wordt bepaald met een transportformule, zoals bijvoorbeeld die van Engelund-Hansen. Op een referentiehoogte z boven de bodem (z veel kleiner dan H) wordt aangenomen dat de concentratie gelijk is aan de bij de transportcapaciteit behorende evenwichtsconcentratie. De achtergrond hiervan is de gedachte dat de concentratie zich bij de bodem momentaan aanpast aan de lokale omstandigheden.

Uit het bovenstaande blijkt reeds dat dit model voor suspensie-transport bedoeld is voor niet-cohesieve materialen met uniforme korrelverdeling. Verder wordt een permanente stromingssituatie aangenomen, waarin geen invloed van dichtheidsverschillen aanwezig is.

4.2.7 Het tweedimensionale model van Festa en Hansen.

Het optreden van een troebelingsmaximum in een estuarium, waar de concentratie groter is dan die bij de zee- en rivierrand, is een veel voorkomend verschijnsel. Door Festa en Hansen (26,27) is met een mathematisch model (2D-verticaal) onderzoek verricht naar een aantal aspecten van de bij een dergelijk verschijnsel optredende processen.

Uitgangspunt is het in 1976 gepresenteerd getijgemiddeld model, waarin de uitwisselingscoëfficiënten evenals de waterdiepte constant zijn verondersteld. Het troebelingsmaximum blijkt sterker naarmate de valsnelheid van de deeltjes groter is.

4.2.8 1D-model voor cohesief sedimenttransport van Scarlatos.

In het door Scarlatos (28) gepresenteerde 1D-model worden de over de doorsnede gemiddelde slibconcentraties berekend door oplossing van de diffusievergelijking met bron- en puttermen om de erosie en sedimentatie in rekening te brengen. De stroomsnelheden worden bekend verondersteld, verkregen uit metingen of berekeningen.

Met name wordt aandacht besteed aan de beschrijving voor de bron- en puttermen. Uitgangspunt hiervoor is het door Partheniades en Metha uitgevoerde onderzoek in een carousel (8,29). In hun publicatie wordt geconcludeerd dat dit model een redelijke beschrijving geeft van de slibverschijnselen. Overigens zijn de verschillen tussen de gemeten en berekende waarden soms niet gering.

4.2.9 De modellen van Onishi en Fields.

In het kader van onderzoek naar met name radionucliden zijn door Fields (30) en Onishi (31,32,33,34) een drietal mathematische modellen ontwikkeld welke naast opgeloste stoffen ook particulier gebonden stoffen in beschouwing nemen. Het betreft het quasi tweedimensionale model SERATRA en het tweedimensionale model FETRA van Onishi en het een-dimensionale model CHNSED van Fields. Het laatstgenoemde model brengt daarbij niet minder dan 12 sedimentklassen in rekening. De modellen van met name Onishi verdienen zowel voor wat betreft het aantal dimensies dat wordt gehanteerd als de mathematische beschrijving van de fysische processen de aandacht. De beschrijving is vrijwel overeenkomstig de door Krone en Partheniades gegeven vergelijkingen.

4.2.10 Het empirische model van VanSickle en Beschta.

Het empirische model van VanSickle en Beschta (36) model beschrijft de concentratie zwevend stof op de benedenstroomse rand van een riviervak als functie van het debiet en rekening houdend met de hoeveelheid zwevend stof die in het beschouwde riviervak sedimenteert.

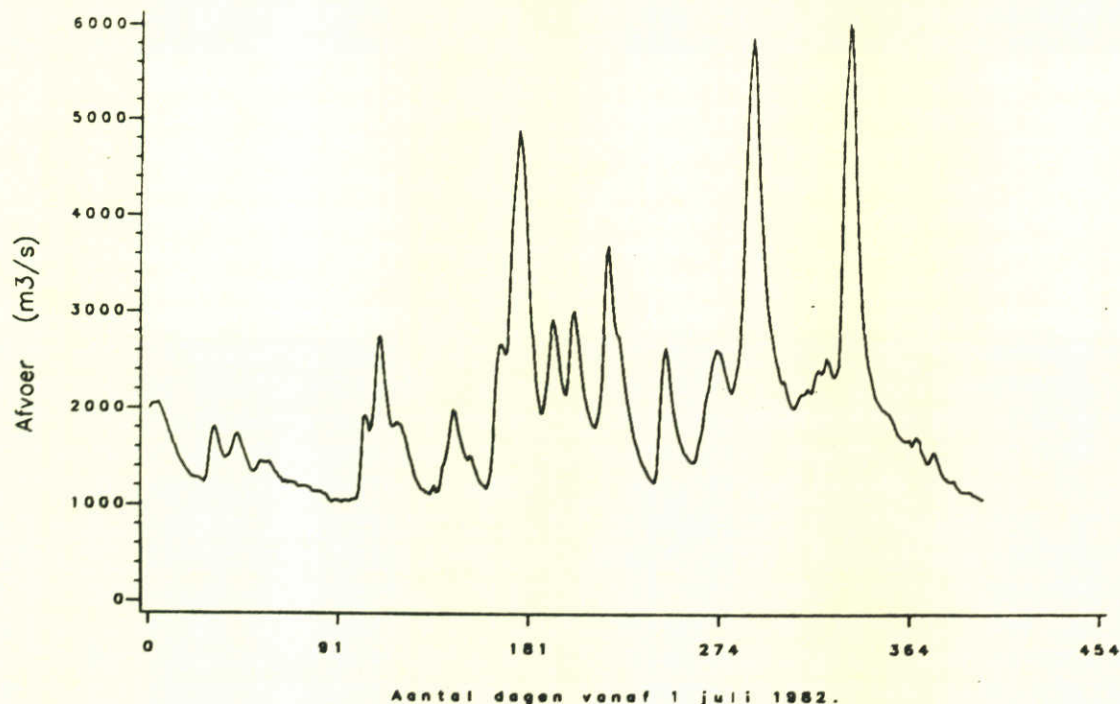
De resultaten van een beperkte toepassing van dit empirische model op de beschikbare gegevens van de Rijntakken benedenstrooms van Lobith zijn opgenomen in paragraaf 4.3.

Op basis van de resultaten met het empirisch model kunnen in een aantal gevallen conclusies worden getrokken ten aanzien van de mogelijkheden tot een meer deterministische beschrijving van het zwevend stof transport.

4.3 PRINCIPEBEREKENING MET TWEE MODELCONCEPTEN

Om enig idee te krijgen wat toepassing van de beschreven model-formuleringen voor de Nederlandse situatie betekent, is een principeberekening van beperkte omvang uitgevoerd met de model-formuleringen van Krone, Partheniades en Cormault (zie paragraaf 4.1.3 en 4.1.5) en de (empirische) modelformulering van VanSickle en Beschta (zie paragraaf 4.2.10).

Deze toepassing vindt plaats op de beschikbare troebelheidsgegevens (gemeten in JTU-eenheden) op het traject Lobith - Vuren. De modellen gaan uit van de gemeten dagelijkse troebelheid bij Lobith, terwijl de gemeten troebelheid bij Vuren wordt gebruikt ter verificatie van de berekeningsresultaten (figuur 29). De afvoer op het traject is afgeleid uit de afvoer bij Lobith (figuur 28).



Figuur 28 Debiet van de Waal (traject Lobith-Vuren) tussen juli 1982 en augustus 1983.

4.3.1 Model volgens Krone, Partheniades en Cormault.

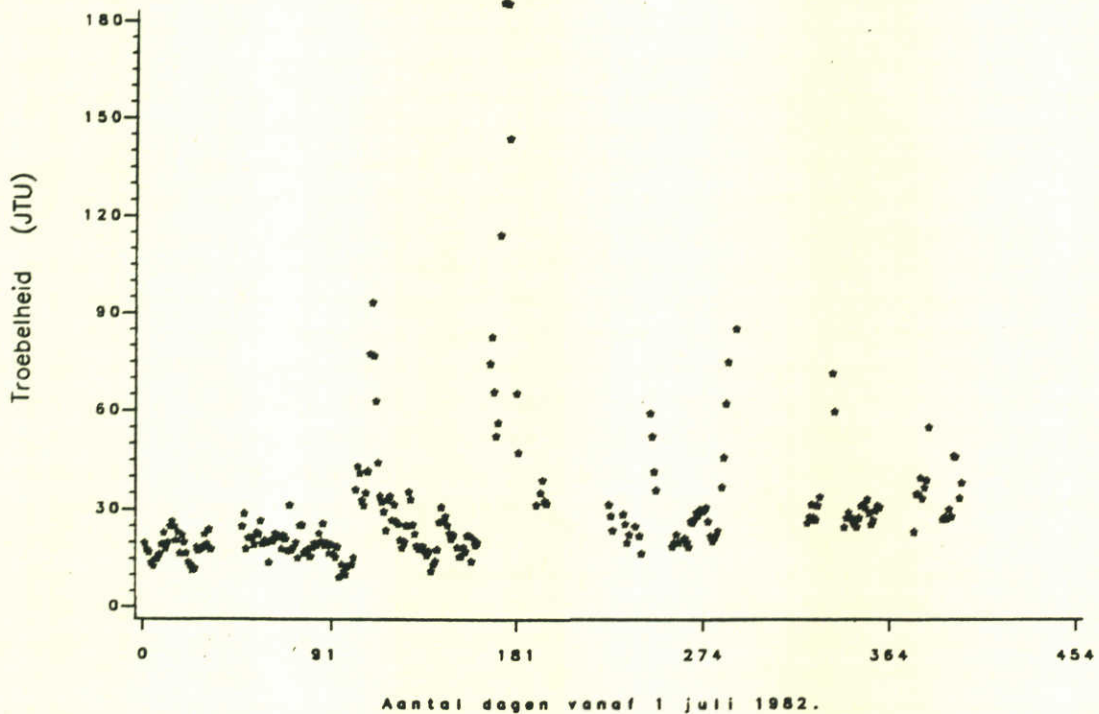
De waarschijnlijkheid P dat een deeltje dat de bodem bereikt zich ook aan de bodem zal hechten wordt door Krone gelijk gesteld aan:

$$P = 1 - T_b/T_{cs} \quad \text{als } T_b \text{ minder dan } T_{cs}$$

$$P = 0$$

als T_b meer dan T_{cs}

waarbij T_b en T_{cs} de bodemschuifspanning en de kritische bodemschuifspanning zijn.



Figuur 29 Gemeten troebelheid op het station Vuren tussen juli 1982 en augustus 1983.

Als T_b minder is dan T_{cs} kan de hoeveelheid slib die per eenheid van oppervlak sedimenteert daarmee worden geschreven als:

$$dm/dt = - C.w.P = - C.w.(1 - T_b/T_{cs})$$

waarin w de valsnelheid en C de troebelheid voorstelt. Voor het traject Lobith - Vuren is, mede gezien de optredende gehalten, de valsnelheid constant verondersteld.

De erosiekans als functie van de optredende bodemschuifspanning is volgens Partheniades (11) en Cormault (16) te schrijven als:

$$P = T_b/T_{ce} - 1 \quad \text{als } T_b \text{ meer dan } T_{ce}$$

$$P = 0 \quad \text{als } T_b \text{ minder dan } T_{ce}$$

en daarmee voor de erosiesnelheid als:

$$dm/dt = M . P$$

waarbij:

M = erodeersnelheid (bij $T_b = 2T_{ce}$)

T_{ce} = kritieke schuifspanning voor erosie.

Uitgaande van deze formuleringen voor erosie en sedimentatie kans voor het traject Lobith - Vuren een massabalans worden opgesteld, waaruit de troebelheid bij Vuren als resultaat kan worden afgeleid. Daartoe dienen de waarden voor de erodeersnelheid, de valsnelheid en de kritische schuifspanningen voor erosie en sedimentatie te worden gespecificeerd. De verhouding van de schuifspanning (Tb) en de kritische schuifspanning (Tcs resp. Tce) is gelijk aan het kwadraat van de verhouding van de schuifspanningssnelheid (U*) en de kritische schuifspanningsnelheid (U*cs resp. U*ce). Bovendien geldt voor de verhouding van de stroomsnelheid (U) en de schuifspanningsnelheid:

$$\frac{U}{U^*} = \frac{\text{Chezy}}{\text{wortel}(g)} = \frac{45}{3.13} = 14.4$$

waarin g de zwaartekracht voorstelt.

De stroomsnelheid (U) kan uit de afvoer (Q) worden afgeleid via:

$$U = a \cdot Q^{**b} \quad a=0.06 \quad \text{en} \quad b=0.4$$

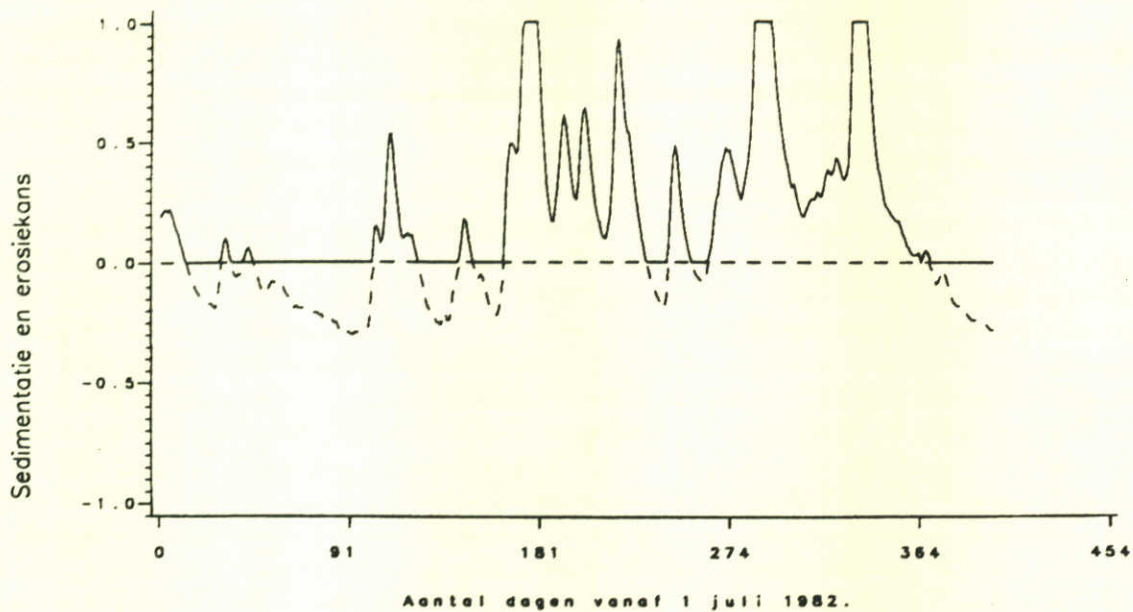
Op deze wijze kan de gespecificeerde kritische schuifspanningsnelheid (U*c) voor erosie en sedimentatie worden vertaald naar een kritische afvoer (Qc) en omgekeerd:

$$U^*c = U_c/14.4 = a \cdot Q_c^{**b} \quad a=0.0042 \quad \text{en} \quad b=0.4$$

Met een model als in bovenstaande beschreven is een principeberekening uitgevoerd met een aantal fictieve waarden voor de benodigde invoergegevens. Ter illustratie zijn de onderstaande waarden voor de diverse grootheden gehanteerd:

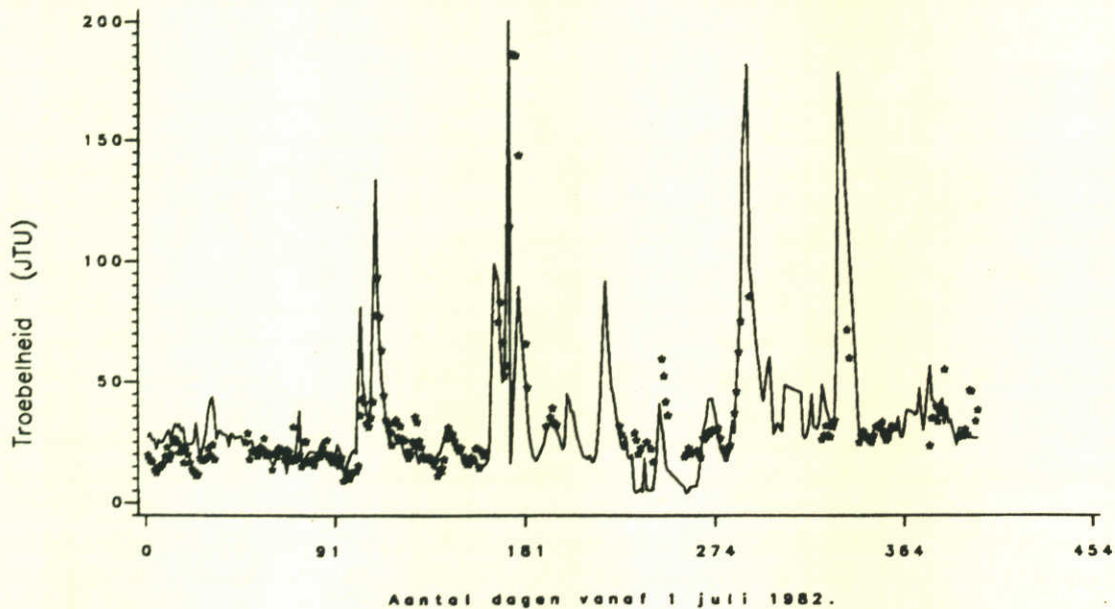
E R O S I E			S E D I M E N T A T I E		
kritische stroom-snelheid (cm/s)	kritische afvoer (m3/s)	erodeer-snelheid (mg/m2.s)	kritische stroom-snelheid (cm/s)	kritische afvoer (m3/s)	val-snelheid (mm/s)
8.0	1600.	0.40	8.0	1606.	0.125
8.0	1600.	1.85	8.0	1606.	0.08
9.5	1850.	100.	8.5	2450.	0.3

De resultaten van de 3 simulaties zijn weergegeven in de figuren 30 t/m 35. Voor iedere simulatie zijn de erosiekans en de sedimentatiekans en de vergelijking van berekende en gemeten troebelheid bij Vuren weergegeven.



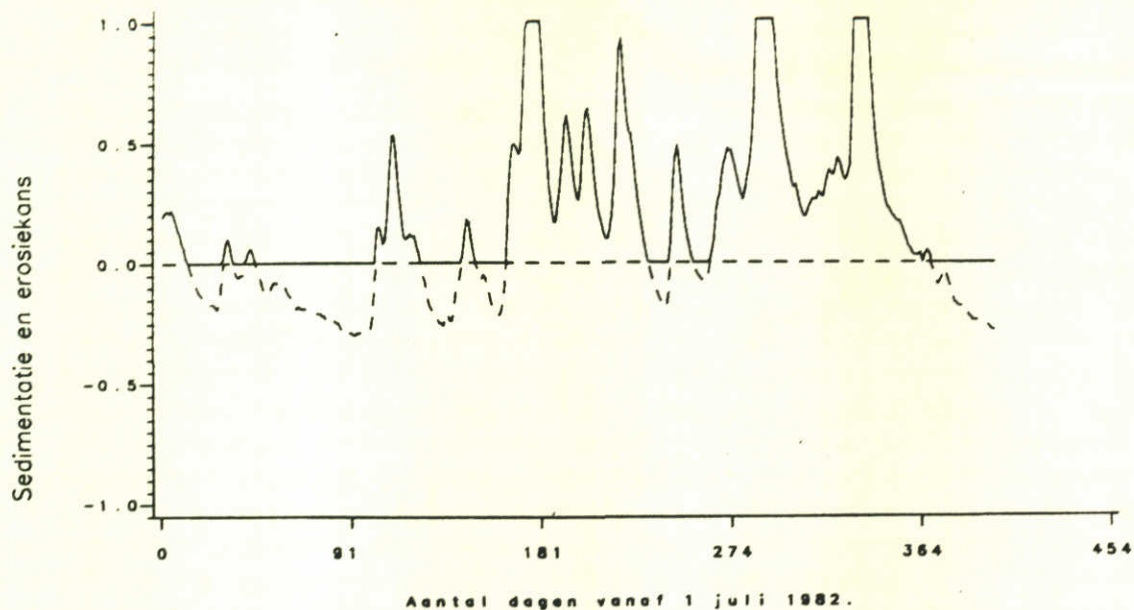
$U_{0.05} = 8.0$ en $U_{0.01} = 8.0$ (cm/s)
 Velociteit = 0.125 (mm/s)
 Erodeersnelheid = 0.40 (mg/m².s)

Figuur 30 Berekende sedimentatie en erosiekans op de Waal tussen juli 1982 en augustus 1983.



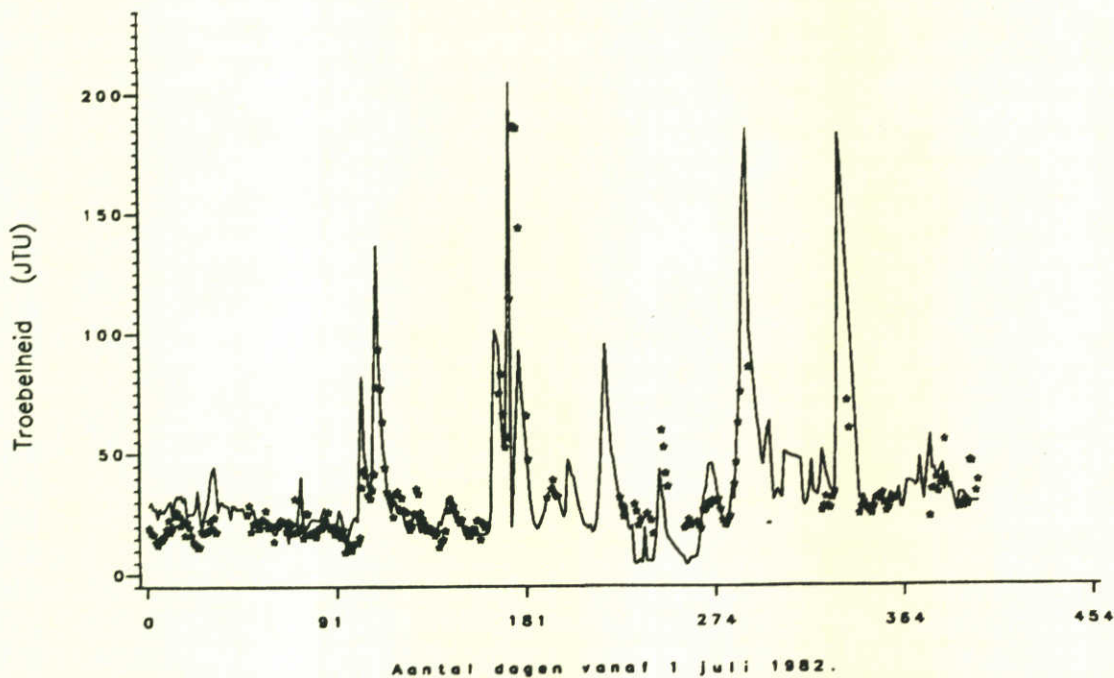
$U_{0.05} = 8.0$ en $U_{0.01} = 8.0$ (cm/s)
 Velociteit = 0.125 (mm/s)
 Erodeersnelheid = 0.40 (mg/m².s)

Figuur 31 Berekende en gemeten troebelheid op het station Vuren tussen juli 1982 en augustus 1983.



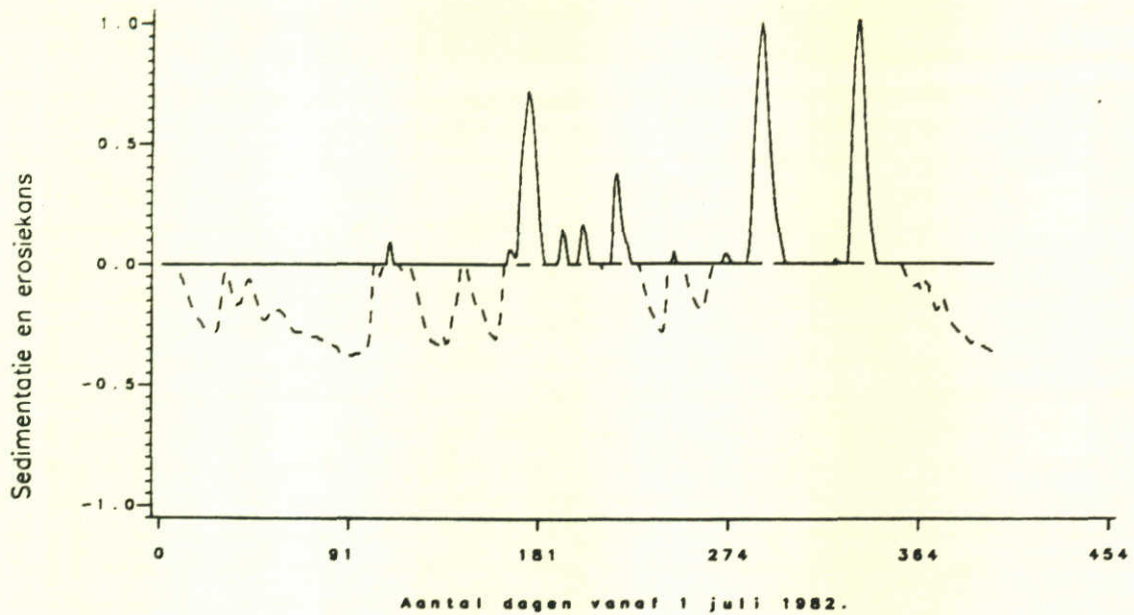
$U_{*c} = 8.0$ en $U_{*e} = 8.0$ (cm/s)
 Valsnelheid = 0.08 (mm/s)
 Erodeersnelheid = 1.85 (mg/m².s)

Figuur 32 Berekende sedimentatie en erosiekans op de Waal tussen juli 1982 en augustus 1983.



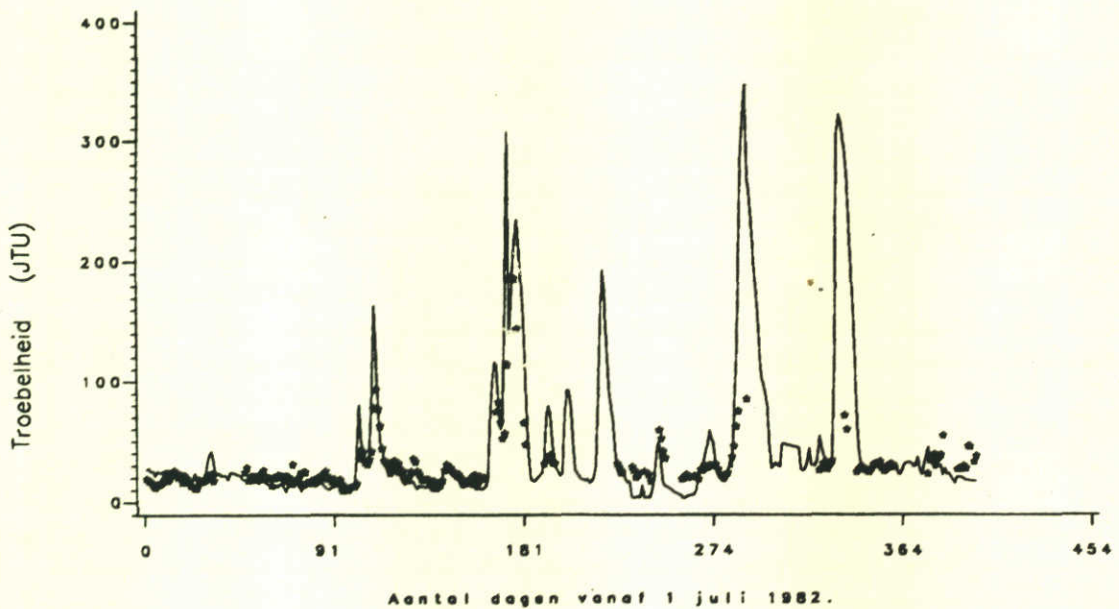
$U_{*c} = 8.0$ en $U_{*e} = 8.0$ (cm/s)
 Valsnelheid = 0.08 (mm/s)
 Erodeersnelheid = 1.85 (mg/m².s)

Figuur 33 Berekende en gemeten troebelheid op het station Vuren tussen juli 1982 en augustus 1983.



$U_{c*} = 9.5$ en $U_{c*} = 8.5$ (cm/s)
 Valsnelheid = 0.3 (mm/s)
 Erodeersnelheid = 100. (mg/m².s)

Figuur 34 Berekende sedimentatie en erosiekans op de Waal tussen juli 1982 en augustus 1983.



$U_{c*} = 9.5$ en $U_{c*} = 8.5$ (cm/s)
 Valsnelheid = 0.3 (mm/s)
 Erodeersnelheid = 100. (mg/m².s)

Figuur 35 Berekende en gemeten troebelheid op het station Vuren tussen juli 1982 en augustus 1983.

De eerste twee simulatie duiden op een te geringe sedimentatie, ondanks een variatie van de valsnelheid. Een verhoging van de

kritische schuifspanningssnelheid in de derde simulatie ligt dus voor de hand.

De in de eerste en tweede simulatie gekozen erodeersnelheid lijkt in de juiste orde van grootte te liggen (ongeveer 1 mg/m².s). De in de derde simulatie gebruikte erodeersnelheid (100 mg/m².s) levert bij een vrij lang durende afvoergolf duidelijk te hoge troebelheden op. Een dergelijk grote erodeersnelheid (de orde van grootte is afkomstig uit de literatuur) is voor het traject Lobith - Vuren alleen te verdedigen als de op de bodem voor erosie beschikbare hoeveelheid sediment niet oneindig groot is. Een dergelijke aanpassing van het model betekent in feite dat een slibbalans voor de bodem moet worden bijgehouden en dat de erodeersnelheid M niet langer constant is maar afhankelijk van de nog aanwezige hoeveelheid sediment.

Een modelformulering die expliciet rekening houdt met de beschikbare hoeveelheid sediment is bijvoorbeeld de formulering van VanSickle en Beschta zoals beschreven in paragraaf 4.3.2.

4.3.2 Model volgens VanSickle en Beschta.

De modelformulering van VanSickle beschrijft de relatie tussen het gehalte zwevend stof, de afvoer en de gesedimenteerde hoeveelheid zwevend stof in het bovenstroomse gebied. Het zwevend stof gehalte (in deze beschouwing de troebelheid) op de benedenstroomse rand van het beschouwde traject wordt beschreven:

$$c(\text{uit}) = r \cdot Q \cdot f(S)^b$$

waarin:

r, b = constanten (r is niet dimensieloos).

Q = afvoer op het beschouwde riviertraject (m³/s).

f(S) = empirische functie afhankelijk van de hoeveelheid erodeerbaar bodemsediment in het beschouwde vak.

De hierboven genoemde empirische functie f(S), welke de beschikbaarheid van bodemsediment als functie van de tijd beschrijft, moet uiteraard altijd positief zijn. VanSickle en Beschta geven aan dat de te kiezen vorm van deze functie waarschijnlijk niet kritisch is. Voorgesteld wordt om een exponentiele functie te kiezen:

$$f(S) = p \cdot e^{(d.S)}$$

Invullen in bovenstaande vergelijking geeft:

$$c(\text{uit}) = a \cdot Q \cdot e^{b(d.S)}$$

waarin:

a,d,p = constanten.

S = gesedimenteerde hoeveelheid zwevend stof
in het beschouwde riviervak (in grammen).

In de toepassing door VanSickle en Beschta wordt de beschikbare hoeveelheid sediment bepaald door aan te nemen dat de totale hoeveelheid vracht zwevend stof van de rivier wordt geerodeerd vanaf de bovenstroomse bodem. In de voor deze studie te beschouwen situaties is dat niet correct. Voor het traject Lobith - Vuren wordt de hoeveelheid gesedimenteerde materiaal beschreven door:

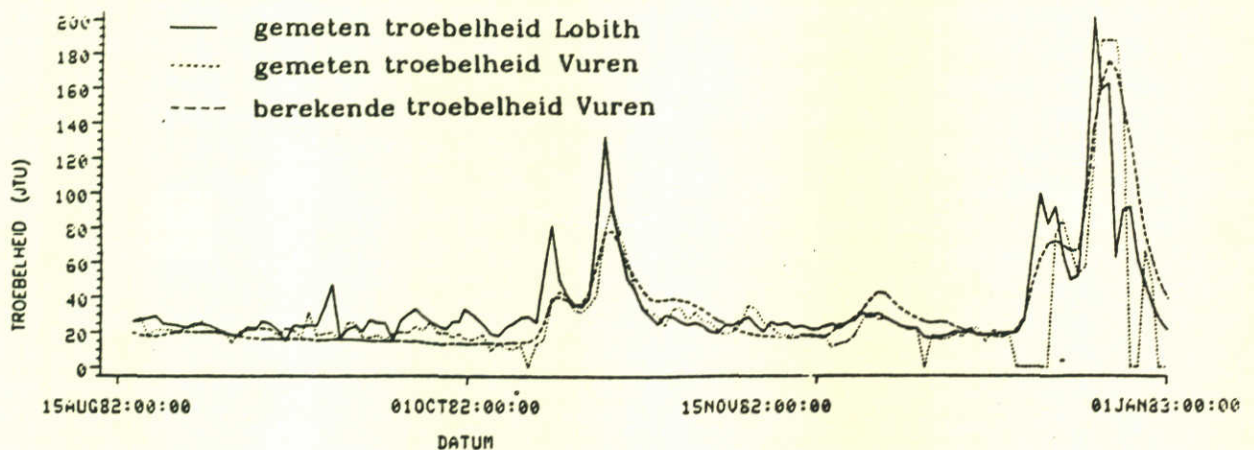
$$dS/dt = Q \cdot (c(\text{in}) - c(\text{uit}))$$

waarin:

c(in) = concentratie bovenstrooms van het traject (g/m³).

In bovenstaande vergelijking is aangenomen dat er geen lozingen of onttrekkingen plaatsvinden: het debiet in het riviervak is dan constant, terwijl geen zwevend stof wordt toegevoerd of onttrokken (anders dan door erosie of sedimentatie). Met behulp van bovenstaande formuleringen kan tevens de hoeveelheid bodemmateriaal op een riviertraject worden beschreven.

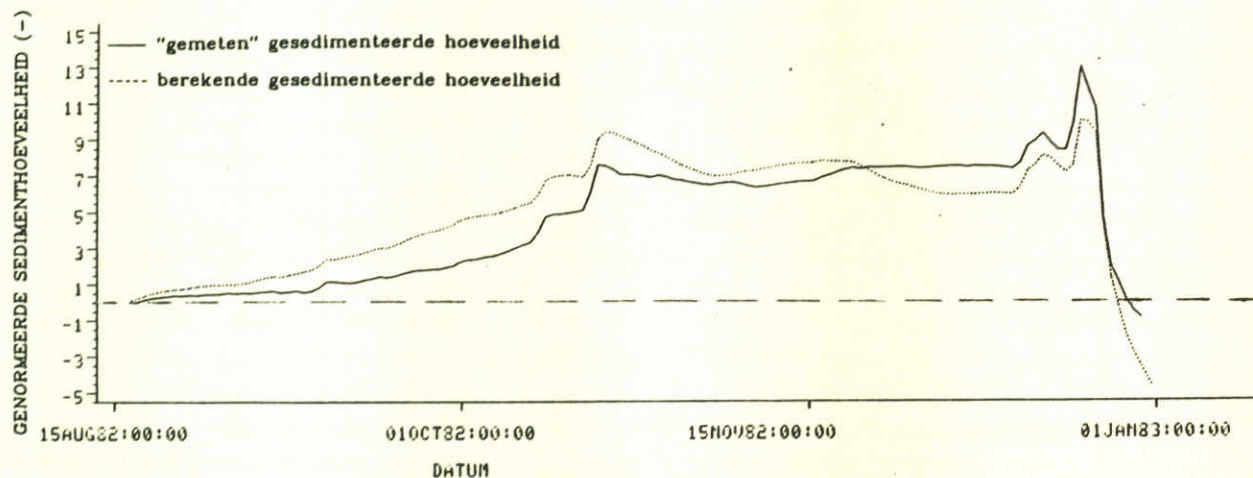
De constanten a, b en d zijn bepaald aan de hand van een meetreeks van augustus tot december 1982. Met behulp van deze constanten kan de troebelheid bij Vuren worden berekend als functie van de tijd. Dit is voor de periode waarvoor de constanten zijn bepaald weergegeven in figuur 36.



Figuur 36 Vergelijken gemeten en berekende troebelheid Vuren gedurende ijk-periode (aug-dec 1982).

De gemeten en berekende troebelheid bij Vuren komen vrij goed overeen (correlatie-coëfficiënt is ongeveer 0,95). De signalen van de gemeten troebelheid bij Lobith en Vuren lijken al vrij sterk op elkaar: de correlatie-coëfficiënt is ongeveer 0,8. Mede hieruit mag worden afgeleid dat het gedrag van troebelheid bij Lobith en Vuren overeenkomstig is.

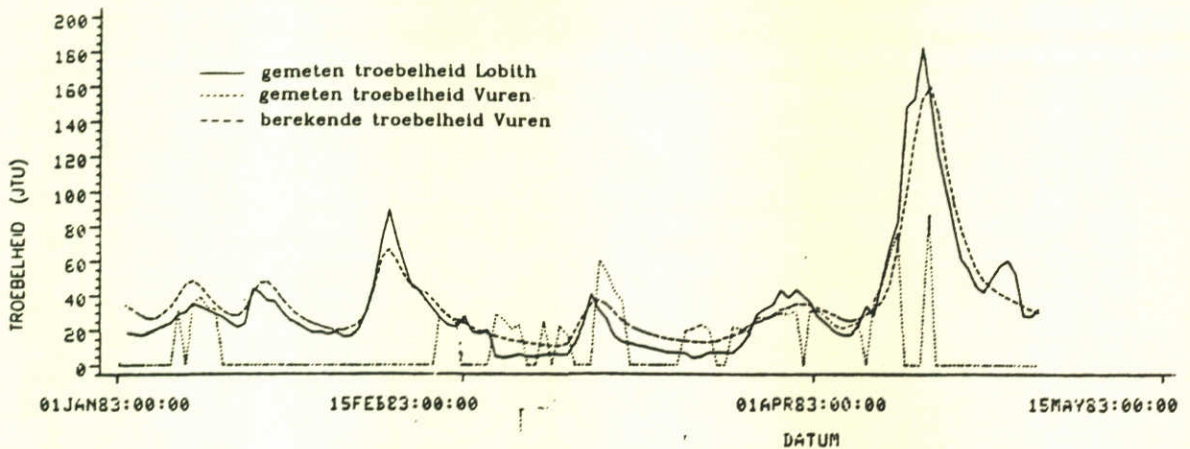
Naast de vergelijking van de gemeten en berekende troebelheid bij Vuren is ook een vergelijking uitgevoerd voor de "gemeten" en berekende hoeveelheid gesedimenteerde "troebelheid". De genormeerde gesedimenteerde hoeveelheden materiaal zijn uitgezet in figuur 37.



Figuur 37 Vergelijken verloop gemeten en berekende gesedimenteerde "troebelheid" in riviervak Waal.

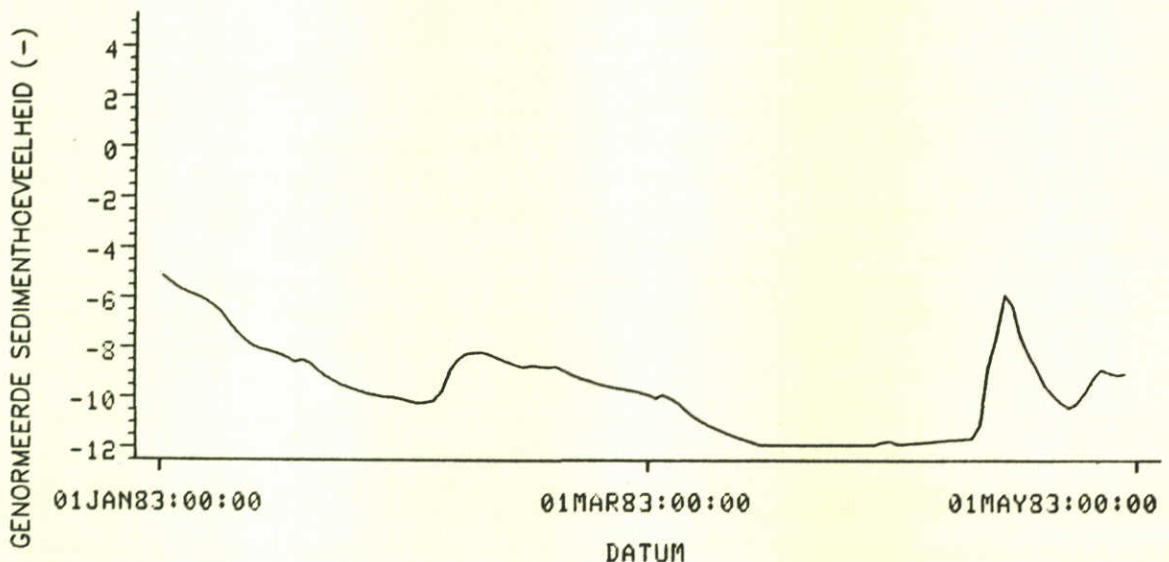
Het verloop van de gesedimenteerde hoeveelheden komt in deze ijk-periode redelijk overeen. Als wordt aangenomen dat troebelheid een goede maat is voor het zwevend stofgehalte (dus 1 JTU = 1 mg/l), dan zou dit betekenen dat in de periode augustus tot december 1982 ongeveer 0.1 miljoen ton zwevend stof is gesedimenteerd, terwijl ongeveer 1.0 miljoen ton het meetstation Vuren passeerde. Dit betekent dat ongeveer 10% van het aangevoerde zwevend stof in deze periode op de bodem sedimenteert. Tijdens de afvoergolf in december wordt de totale hoeveelheid bodemmateriaal weer geerodeerd. In de gehele winterperiode wordt ongeveer 0.2 miljoen ton geerodeerd, hetgeen overeenkomt met een laag van ongeveer 1 cm sediment op de bodem van het traject Lobith - Vuren.

Vervolgens werd de modelformulering geverifieerd aan de hand van de gegevens over de periode december 1982 tot mei 1983 (figuur 38).



Figuur 38 Vergelijken gemeten en berekende troebelheid Vuren, verificatie-periode (dec '82-mei '83).

Vergelijken van de gemeten en berekende troebelheid kan, door het veelvuldig uitvallen van de troebelheidsmeter van Vuren, op slechts een beperkt aantal momenten plaatsvinden. Als regel is er een redelijke overeenkomst tussen de gemeten en berekende troebelheid bij Vuren: de correlatie coefficient is in deze periode echter iets geringer (0,8) dan voor de calibratie-periode. Omdat er geen continue meetreeks voor het meetstation Vuren beschikbaar is, kunnen de gemeten en berekende hoeveelheid gesedimenteerd materiaal niet worden vergeleken. De berekende hoeveelheid gesedimenteerde troebelheid in deze periode is weergegeven in figuur 39. Uit deze figuur blijkt dat de hoeveelheid gesedimenteerd materiaal in de periode tussen de afvoergolven weer wordt aangevuld.



Figuur 39 Berekende hoeveelheid gesedimenteerd materiaal in de verificatie-periode (dec '82-mei '83).

4.4 SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN

De in dit hoofdstuk beschreven modellen en modeltoepassingen geven een globaal overzicht van en inzicht in de uit de literatuur bekende modellen voor transport van gesuspendeerde deeltjes.

De belangrijkste beperking van elk van de modellen wordt gevormd door het ontbreken van een voldoende betrouwbare beschrijving voor de fysische processen die het slibgehalte kunnen beïnvloeden (erosiefunctie, valsnelheid, sedimentatie e.d.). De beoordeling van de voorspellende waarde van de modellen en een onderlinge vergelijking van de procesformuleringen wordt bovendien ernstig bemoeilijkt door het ontbreken van goed toetsingsmateriaal. Zie ook (35).

Keuze voor een specifieke modelformulering is zeer sterk afhankelijk van de gewenste toepassing, terwijl een gefundeerde aanbeveling voor de keuze van een specifieke procesformulering in dit stadium niet mogelijk is. De meest gebruikte formuleringen zijn afkomstig van of gebaseerd op het werk van Krone, Ariathurai en Partheniades, die een vrij elementaire beschrijving hebben opgesteld voor erosie en sedimentatie afhankelijk van de schuifspanningstoestand.

Uit de beperkte hoeveelheid bestudeerde literatuur op het gebied van gesuspendeerd slib kunnen een aantal conclusies worden getrokken over de mathematische beschrijvingen voor het gedrag en voorkomen:

- o Er is meestal een te groot gebrek aan meetgegevens om alle verklarende variabelen bij de beschouwingen te betrekken.
- o Een directe vergelijking van meetresultaten is in veel gevallen niet mogelijk door de verschillen in deeltjesgrootteverdeling, meetapparatuur of gebruikte meetmethode. Slechts in enkele gevallen worden de aan slib gemeten gehalten tesamen met informatie over de deeltjesgrootteverdeling gerapporteerd.
- o Slibonderzoek in de USA blijkt vrij vaak gericht op de beschrijving van het transport van radionucliden (met name het door Onishi gerapporteerde onderzoek en de daarin beschreven modellen).
- o In verband met onder andere toxische stoffen verdienen de kleinere fracties van het slib (dat wil zeggen de fracties kleiner dan $10\mu\text{m}$) de nodige aandacht.
- o De zoutconcentratie en de zuurgraad zijn van groot belang voor de beschrijving van processen als adsorptie en desorptie, flocculatie en dergelijke. Bij de beschrijving van het slib in de diverse Rijntakken speelt de zoutconcentratie waarschijnlijk een ondergeschikte rol. In het estuarine gebied en de overgang naar dit gebied is de zoutconcentratie naar verwachting een van de belangrijkste grootheden.

- o De tot dusver gehanteerde modelbeschrijvingen van het transport van gesuspendeerd slib blijken grofweg in twee categorieën te kunnen worden ingedeeld. De beschrijvingen zijn of zeer complex en tot op zekere hoogte deterministisch of vrij eenvoudig en empirisch.

De wiskundige formulering van het transport of voorkomen vindt meestal of plaats met behulp van een vrij complex model waarin getracht is alle fysische, chemische en biologische processen realistisch te beschrijven of er wordt gebruik gemaakt van een eenvoudige benadering, waarbij het transport wordt gekoppeld aan een klein aantal verklarende variabelen. De deterministische aanpak vergt meestal veel proceskennis (die zich uit in de vraag naar een groot aantal invoergrootheden waarvan er velen vaak nog onbekend zijn). Bovendien maakt deze aanpak over het algemeen gebruik van een deeltjesgrootteverdeling, hetgeen direct een omvangrijk model impliceert. De meer eenvoudige benadering sluit beter aan bij de beschikbare (bemonsterings-) informatie, maar zal daarentegen een beperktere hoeveelheid kennis omtrent het systeem kunnen opleveren.

4.5 TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN

Welk modelconcept lijkt nu het meest geschikt (gezien de bovenbeschreven resultaten) voor de modellering van gesuspendeerd materiaal in een stroomgebied als dat van de Rijn? Het lijkt, gezien de beschikbare proceskennis en de tot dusver verzamelde bemonsteringsgegevens, zinvol om zoveel mogelijk uit te gaan van daadwerkelijk beschikbare informatie. Hiermee zou tot op zekere hoogte voorkomen kunnen worden dat het ontwikkelde model weliswaar de vele processen realistisch kan beschrijven, maar dat problemen zich nu manifesteren bij de procesparameters. Het model dient zoveel mogelijk uit te gaan van en aansluiten op de gemeten waterkwaliteitsvariabelen, terwijl de gebruikte procesconstanten uit de literatuur bekend behoren te zijn of eenduidig kunnen worden bepaald door aanvullend onderzoek.

Bovenstaande pleit dan ook om vooralsnog uit te gaan van een zo eenvoudig mogelijke opzet van een mathematisch model, dat is gebaseerd op een eendimensionale beschrijving van erosie, sedimentatie en transport van het slib. Er dient naar gestreefd te worden dat de belangrijkste processen, zoals het sedimentatie- en het resuspensieproces, op deterministische wijze in het model worden beschreven.

Daarnaast moet getracht worden de aanwezige kennis omtrent de met slib samenhangende processen te vertalen naar wiskundige vergelijkingen.

Voor de verdere bestudering van het gedrag en voorkomen van gesuspendeerd slib (alle fracties) wordt voorgesteld:

1. Uit te gaan van een zo simpel mogelijk model, mede gezien de complexiteit van de met het slib samenhangende processen. Dit betekent een eendimensionale aanpak met een beschouwing van fundamentele processen zoals sedimentatie en resuspensie als voorlopig uitgangspunt.
2. Het **specifieke onderzoek** dat op het gebied van slib is verricht te **inventariseren** (afvoer, deeltjesgrootteverdeling en troebelheid) en het eventueel dringend te verrichten **aanvullende onderzoek te initieren** (bijvoorbeeld continue registraties van het slibgehalte over een bepaalde periode).

Het uiteindelijke doel van dit onderzoek is het modelleren van het zwevend stof en de daaraan geadsorbeerde verontreinigingen. Bij dit vooronderzoek is de aandacht voornamelijk gericht op de mogelijkheden voor de modellering van het zwevend stof. In het vervolg van dit onderzoek zal echter de nodige aandacht moeten worden gericht op het transport van verontreinigingen. Het doel van dit hoofdstuk is:

- o Aan te geven wat de stand van zaken is met betrekking tot het onderzoek naar aan zwevend stof geadsorbeerde verontreinigingen.
- o Aan de hand van de beschikbare gegevens over verontreinigingen aangeven welke gegevens er nog noodzakelijk zijn voor de modellering van de aan zwevend stof geadsorbeerde verontreinigingen.

In dit hoofdstuk is een beperking ingevoerd voor wat betreft de te behandelen verontreinigingen. Dit heeft enerzijds te maken met de ervaringen van het WL, welke voornamelijk liggen op het gebied van de zware metalen en anderzijds met de mogelijkheden van het RIZA voor het min of meer continu meten van verontreinigingen welke nu beperkt is tot enkele zware metalen. In dit hoofdstuk wordt daarom slechts ingegaan op twee verontreinigingen, namelijk de zware metalen zink en cadmium. In het ZMAS-project (Zware Metalen in Aquatische Systemen) is vrij veel onderzoek uitgevoerd met betrekking tot het gedrag van deze verontreinigingen. Voor het RIZA bestaat de mogelijkheid om deze zware metalen frequent te bemonsteren door middel van de sinds kort bij Lobith geïnstalleerde zware metalen monitor. Deze monitor geeft een indicatie van de totale concentratie van vier zware metalen te weten zink, cadmium, lood en koper (37).

5.1 PROCESSEN

In het kader van het ZMAS-onderzoek (38) is door middel van radiochemische experimenten de adsorptie van zink en cadmium onderzocht afhankelijk van de volgende variabelen:

- o De korrelgroottefrakties: voor de frakties kleiner dan 65 μm is er vrijwel geen verschil in adsorptie van zink en cadmium aan de verschillende korrelgroottefrakties.
- o De pH: een verhoging van de pH geeft een toename van de adsorptie; bij een pH verhoging van 7 naar 8 neemt de adsorptie van zink in absolute zin sterker toe dan bij cadmium.
- o De temperatuur: een toename van de temperatuur veroorzaakt een toename van de adsorptie; hierbij geldt dat

- de toename van de adsorptie bij zink in absolute zin groter is dan bij cadmium.
- o De sedimentconcentratie: tot een sedimentconcentratie van ongeveer 50 mg/l is de toename in de hoeveelheid geadsorbeerd zink of cadmium ongeveer recht evenredig met de toename in de sedimentconcentratie.
 - o De concentratie van de verontreiniging: bij een toenemende concentratie van de verontreiniging neemt de adsorptie af; de totale concentratie van de verontreinigingen heeft in het geval van zink minder invloed op de adsorptie dan in het geval van cadmium.
 - o Het chloride-gehalte: bij een toename van het chloride gehalte neemt de adsorptie van cadmium sterker af dan bij zink.
 - o De NTA-concentratie: bij toename van de concentratie NTA (vervanging voor fosfaat in wasmiddel) neemt de adsorptie van zink af; de adsorptie van cadmium wordt bij de verwachte NTA-koncentraties niet beïnvloed.

Een overzicht van de gegevens uit het ZMAS-onderzoek (38) is opgenomen in bijlage II evenals de meest relevante figuren uit de rapportage.

5.2 GLOBALE ANALYSE GEGEVENS LOBITH

Er is een globale analyse uitgevoerd van de vracht, de adsorptiegraad en de verdelingscoëfficiënt van cadmium en zink bepaald bij het meetstation Lobith in de jaren 1982 en 1983; de gegevens zijn verkregen uit de kwartaal overzichten van Rijkswaterstaat. Bij deze analyse zijn de volgende variabelen in de beschouwing meegenomen: de pH, het zwevend stof gehalte, het debiet en de temperatuur. Deze zware metalen worden hierna-volgend afzonderlijk behandeld.

Bij de presentatie van de gegevens van deze metalen zijn enkele bewerkingen gepleegd op de meetgegevens. Naast de vracht als functie van de tijd zijn ook de adsorptiegraad en de verdelingscoëfficiënt weergegeven.

De adsorptiegraad is gedefinieerd als: de concentratie aan het zwevend stof geadsorbeerd metaal gedeeld door de totale concentratie van het metaal in het oppervlakte water.

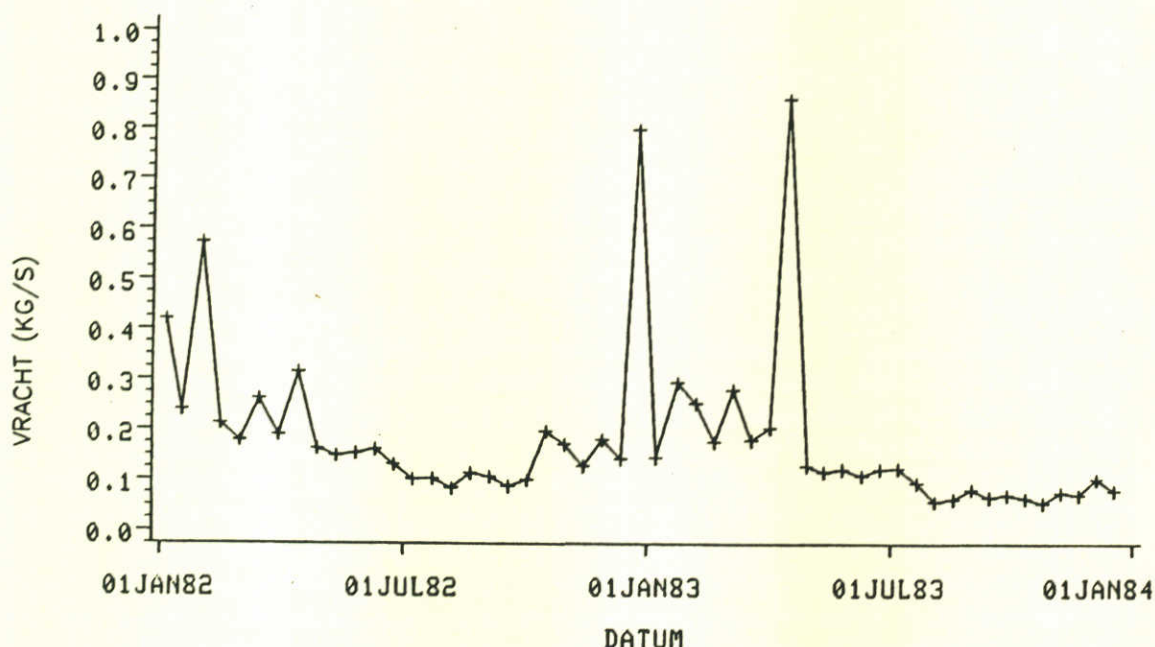
De verdelingscoëfficiënt is gedefinieerd als: de verhouding tussen de concentraties geadsorbeerd en opgelost metaal gedeeld door de concentratie zwevend stof. De definitie van deze coëfficiënt is opgesteld uitgaande van de aanname dat bij een konstante hoeveelheid zwevend stof de verhouding tussen de concentraties opgelost en geadsorbeerd metaal konstant is bij verhoging of verlaging van de totale metaalkoncentratie.

Beide coëfficiënten zijn opgenomen teneinde meer inzicht te verkrijgen in het gedrag van de zware metalen, met name bij afvoergolven. Bij de uiteindelijke wiskundige beschrijving van zware

metalen in relatie tot het zwevend stof spelen deze coëfficiënten waarschijnlijk een belangrijke rol. Met deze coëfficiënten wordt het adsorptie/desorptie evenwicht beschreven al of niet in relatie tot parameters zoals pH, temperatuur etc.

1. Zink:

Uit de gegevens (debiet en totale concentratie) is de vracht zink geschat. Deze vracht is in figuur 40 weergegeven als functie van de tijd.



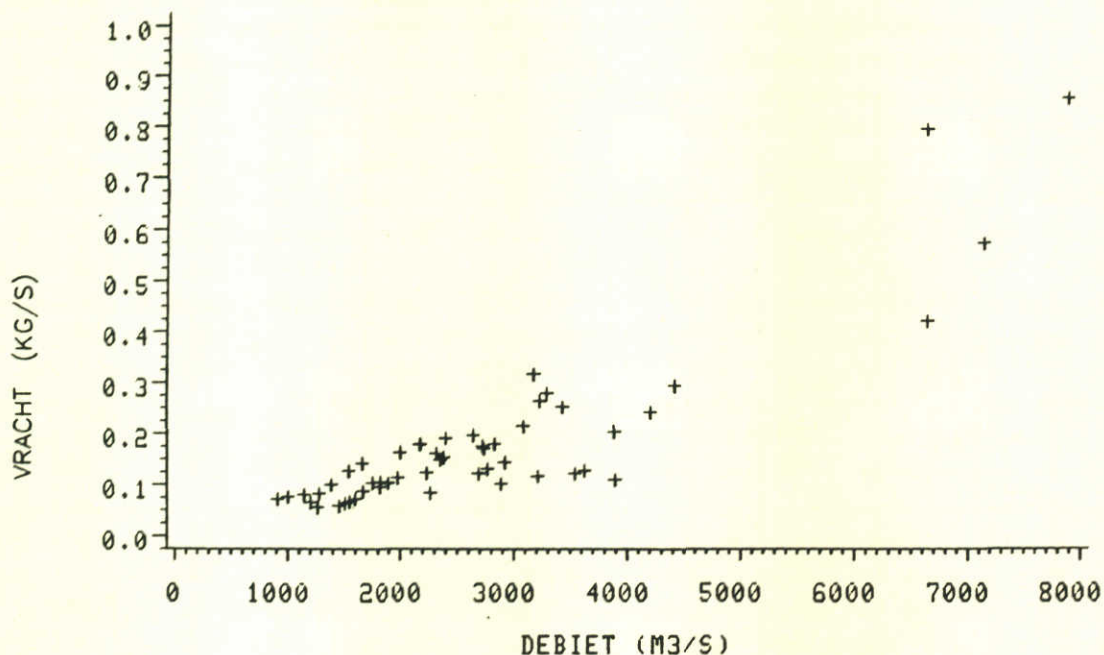
Figuur 40 Vrucht zink bij Lobith als functie van de tijd.

Uit deze figuur kan worden afgeleid dat er een verband is tussen de vracht aan zink en het debiet bij Lobith. In de drogere perioden is de vracht geringer (zomer, herfst) dan in de nattere perioden (winter, voorjaar). Verwacht wordt dat evenals bij het zwevend stof de vracht zink bij een afvoergolf een hysteresis vertoont met het debiet. Met de huidige gegevens is het niet mogelijk dit aan te tonen, omdat de bemonsteringsfrequentie te gering is om het gedrag tijdens een afvoergolf goed te volgen. Indien de vracht zink wordt uitgezet tegen het debiet (figuur 41) dan blijkt dat er een faktor 2 tot 3 verschil in de vracht kan optreden bij eenzelfde debiet. Het is niet te verwachten dat deze spreiding volledig wordt veroorzaakt door het lozingsgedrag van de verschillende lozers van zink.

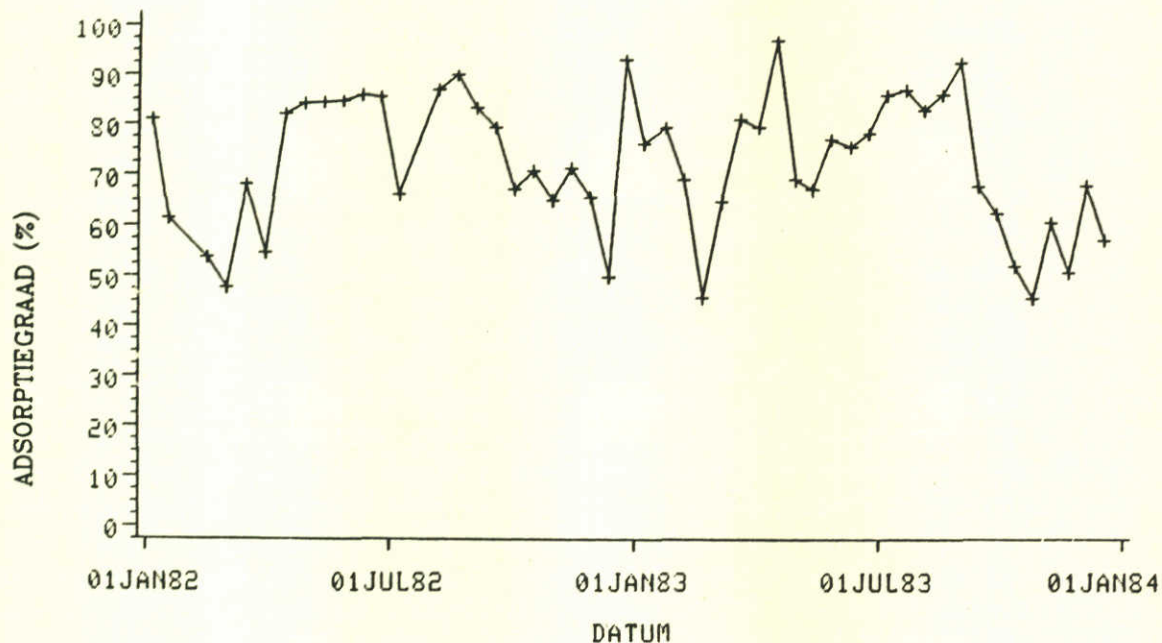
Gezien de bemonsteringsfrequentie kan een eventueel aanwezige hysteresis in de relatie tussen vracht zink en debiet tijdens een afvoergolf niet worden aangetoond. Wel blijkt dat, bij eenzelfde debiet, de vracht zink bij de afvoergolf in april 1983 duidelijk lager ligt dan bij de afvoergolf van december 1982.

Voor het bepalen van het transport van zink in het benedenstroomse gedeelte na Lobith is naast de totale concentratie ook de verdeling over opgelost en aan zwevend stof gebonden zink van belang. In figuur 42 is de adsorptiegraad, de concentratie

geadsorbeerd zink gedeeld door de totale concentratie zink, uitgezet als functie van de tijd.



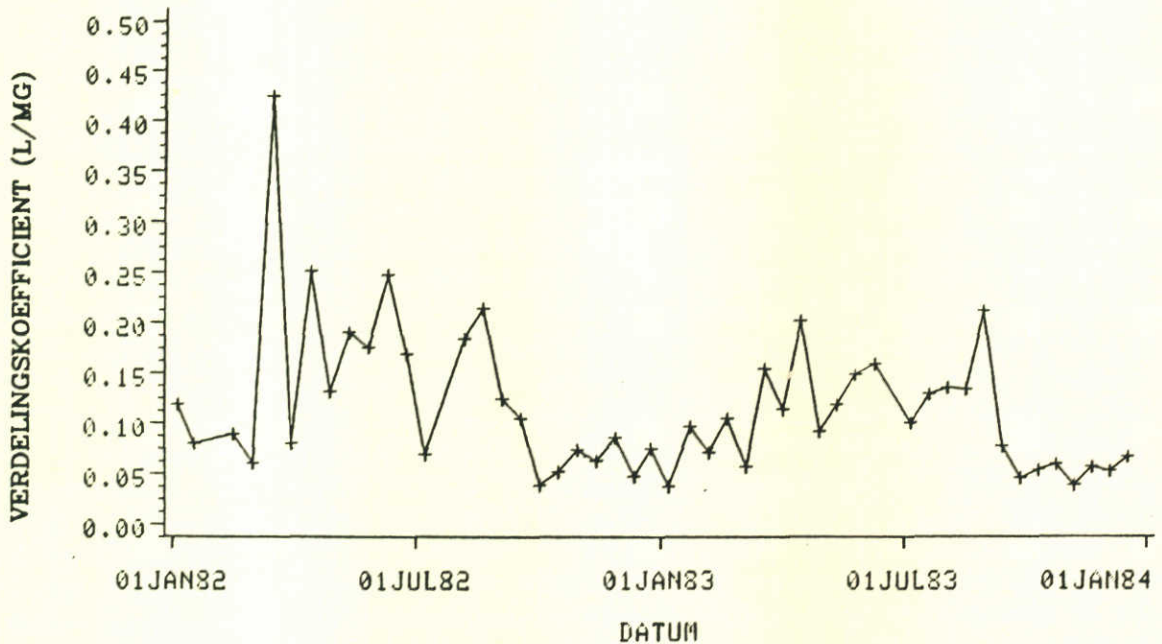
Figuur 41 Relatie tussen vracht zink en debiet bij Lobith.



Figuur 42 Adsorptiegraad zink bij Lobith als functie van de tijd.

De adsorptiegraad varieert duidelijk in de tijd. Uit een globale analyse volgt dat de variabelen welke deze variatie veroorzaken het zwevend stof gehalte, de temperatuur en de pH zijn. Dit komt vrij goed overeen met wat gevonden is bij het ZMAS-onderzoek. Een mogelijke benadering is om aan te nemen dat er een lineaire relatie is tussen de hoeveelheid geadsorbeerde verontreiniging en het zwevend stof gehalte. Deze aanname geldt in principe

alleen beneden de 50 mg/l, maar kan zonder al te grote afwijkingen worden toegepast tot ongeveer 200 mg/l, deze relatie is verwerkt in de verdelingscoëfficiënt. Deze coëfficiënt is in principe alleen nog afhankelijk van parameters zoals de pH en de temperatuur. De verdelingscoëfficiënt van zink bij Lobith is weergegeven in figuur 43.



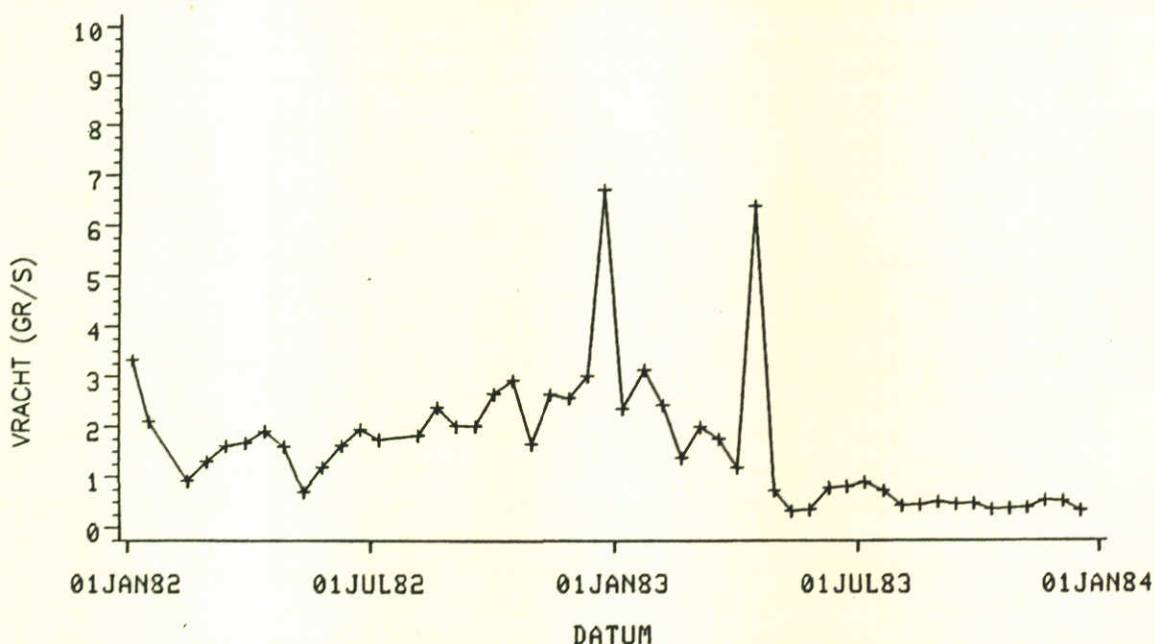
Figuur 43 Verdelingscoëfficiënt zink bij Lobith als functie van de tijd.

De verdelingscoëfficiënt van zink vertoont een seizoengedrag (zomer/winter) welke gekoppeld is aan de pH en de temperatuur. De uitschieter in maart 1982 is waarschijnlijk een fout in het gegeven zwevend stof (metaal) gehalte, het zwevend stof gehalte wat wordt gebruikt voor het bepalen van de concentraties zware metalen. Dit gehalte wijkt nogal af van het "gewone" zwevend stof gehalte.

Het feit dat de verdelingscoëfficiënt binnen een bepaalde tijdsperiode niet erg veel varieert is gebruikt in paragraaf 5.3; in deze paragraaf is nagegaan wat het gedrag van totaal, opgelost en geadsorbeerd zink en cadmium zou kunnen zijn bij een afvoergolf. Daarbij gaat het met name om het bepalen van de benodigde meetfrequentie van de verschillende parameters.

2. Cadmium:

Evenals voor zink is uit de gegevens uit de kwartaaloverzichten van Rijkswaterstaat de vracht cadmium bij Lobith bepaald als functie van de tijd en weergegeven in figuur 44.



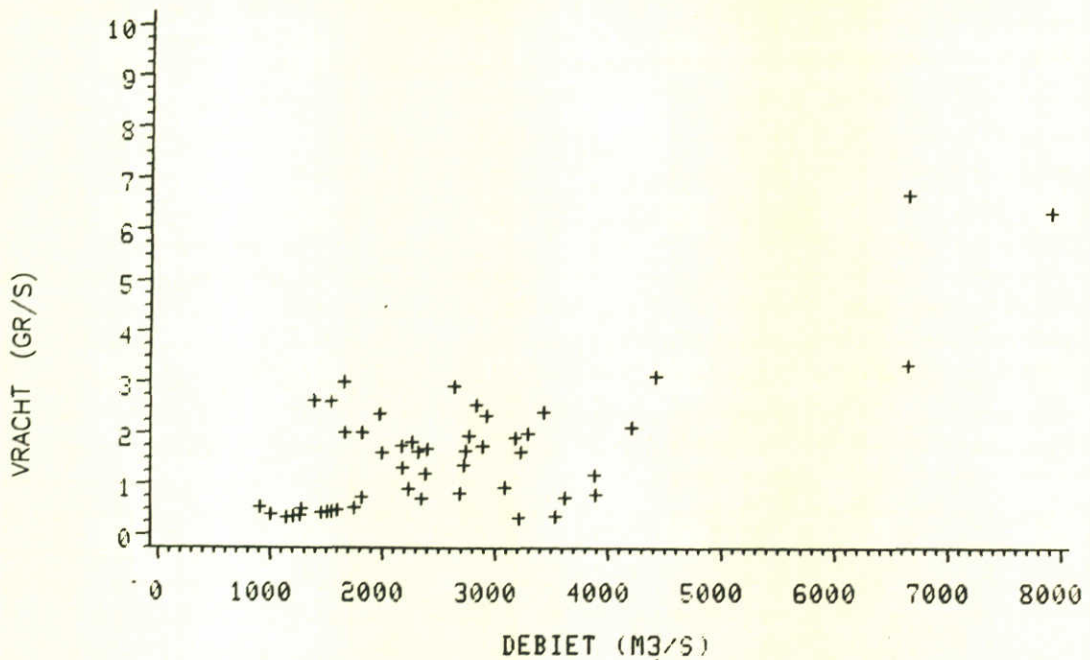
Figuur 44 Vracht cadmium bij Lobith als functie van de tijd.

Ook bij cadmium is er een duidelijk verschil tussen de vracht in de natte en de droge periode. De pieken in het vrachtverloop in december 1982 en maart 1983 worden veroorzaakt door afvoerpieken. Het is te verwachten dat er ook bij de vracht cadmium bij Lobith sprake is van een hysteresis in de relatie tussen vracht cadmium en debiet. In figuur 45 is de vracht cadmium uitgezet tegen het debiet. (Opmerking: de lage vrachten in de zomer en het najaar van 1983 worden mede veroorzaakt door het feit dat een grote lozer van Cadmium - de Duisburger Kupferhute - in het eerste kwartaal van 1983 werd gesloten).

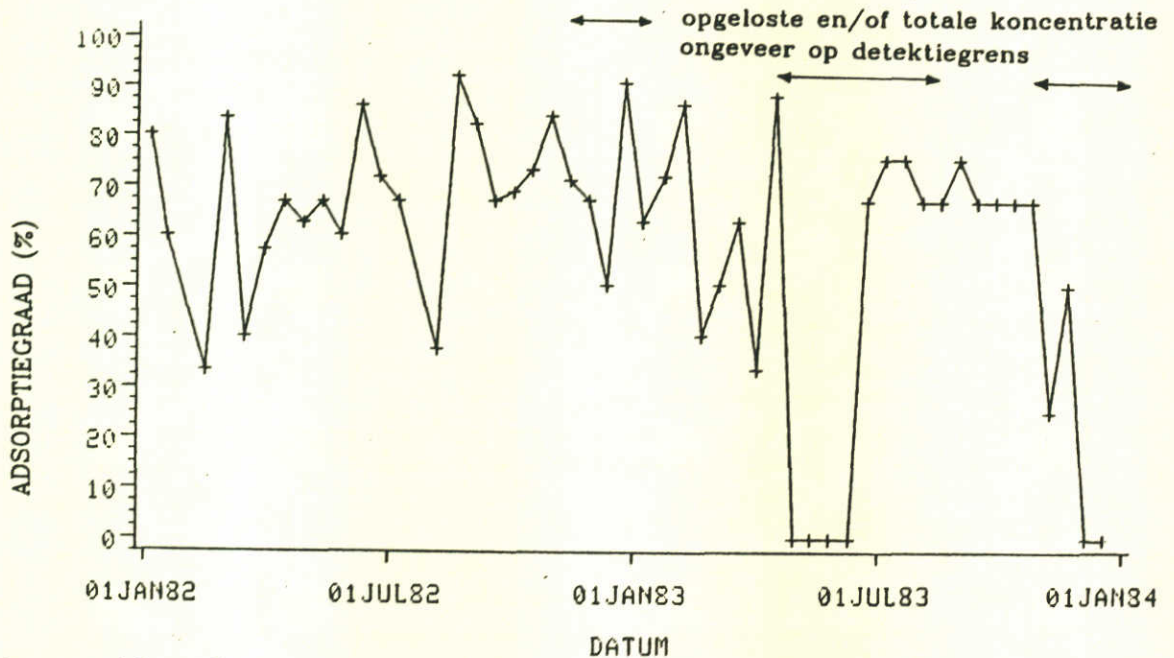
De variatie van de vracht cadmium bij eenzelfde debiet is groter dan in het geval van zink. Hierbij speelt ook een rol dat de concentraties bij cadmium veel geringer zijn, waardoor de meetfouten meer invloed hebben op het eindresultaat. Met name na 1 juli 1983 is de concentratie cadmium zeer laag, en ligt bij de detektiegrens, zodat deze resultaten minder betrouwbaar zijn. Dit is in de figuren 41 en 42 aangegeven.

Ook bij de vracht cadmium bij Lobith is, gezien de meetfrequentie, de hysteresis in de relatie tussen vracht en debiet niet onomstotelijk aan te tonen. Evenals bij zink treedt er bij cadmium een soort uitputting op: de vracht cadmium, bij eenzelfde debiet, is bij de afvoergolf van april 1983 duidelijk lager dan bij de afvoergolf van december 1982.

Naast de vracht cadmium is ook de adsorptiegraad van cadmium aan zwevend stof geanalyseerd. De adsorptiegraad van cadmium bij Lobith als functie van de tijd is uitgezet in figuur 46.



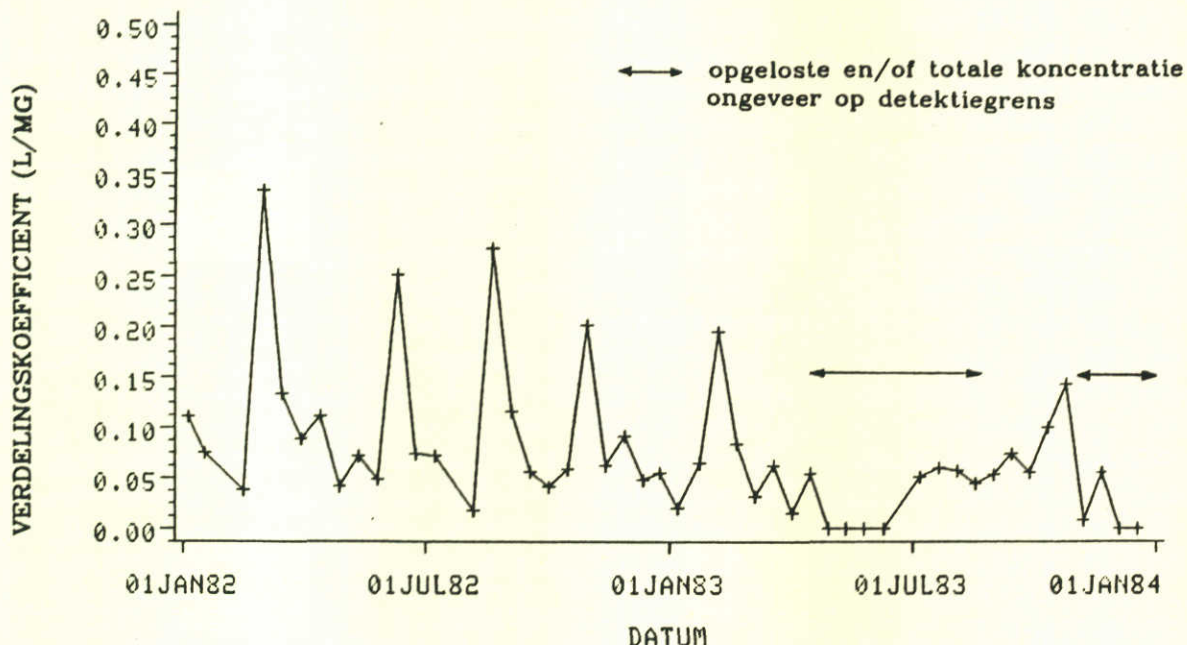
Figuur 45 Relatie tussen vracht cadmium en debiet bij Lobith.



Figuur 46 Adsorptiegraad cadmium bij Lobith als functie van de tijd.

De variatie in de adsorptiegraad van cadmium is groter dan van de adsorptiegraad van zink. Dit heeft met name te maken met de lage concentraties cadmium, welke soms tegen de detectiegrens (0.1 ug/l) aanliggen. Dit is bijvoorbeeld het geval in juni en december 1983, in deze perioden is de totale concentratie en de concentratie opgelost cadmium gelijk aan de detectiegrens; de concentratie geadsorbeerd cadmium welke wordt bepaald uit de totale en de opgeloste concentratie is dan (schijnbaar) nul. Deze punten dienen niet te worden meegenomen in de beschouwing.

De adsorptiegraad is gekorreleerd aan het gehalte zwevend stof, de temperatuur en het totale gehalte aan cadmium; ook dit komt aardig overeen met wat er gevonden is in het ZMAS-onderzoek. Ook in het geval van cadmium is, gezien de duidelijke relatie met het zwevend stof gehalte, de verdelingskoefficient bepaald; deze verdelingskoefficient is uitgezet als funktie van de tijd in figuur 47.

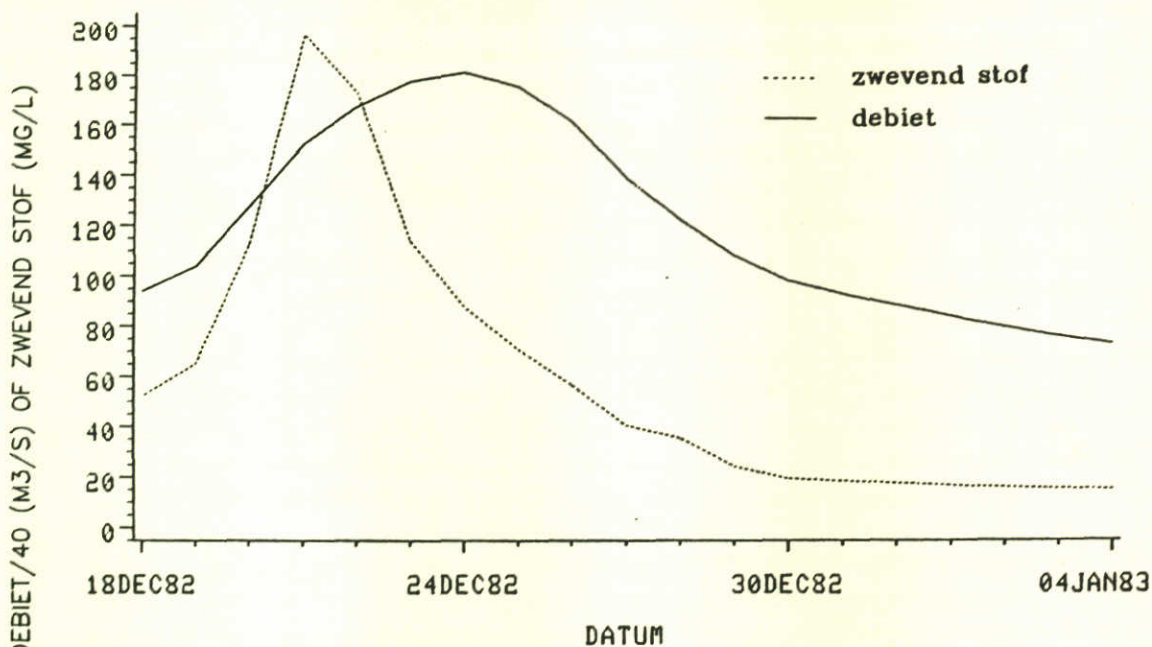


Figuur 47 Verdelingskoefficient cadmium bij Lobith als funktie van de tijd.

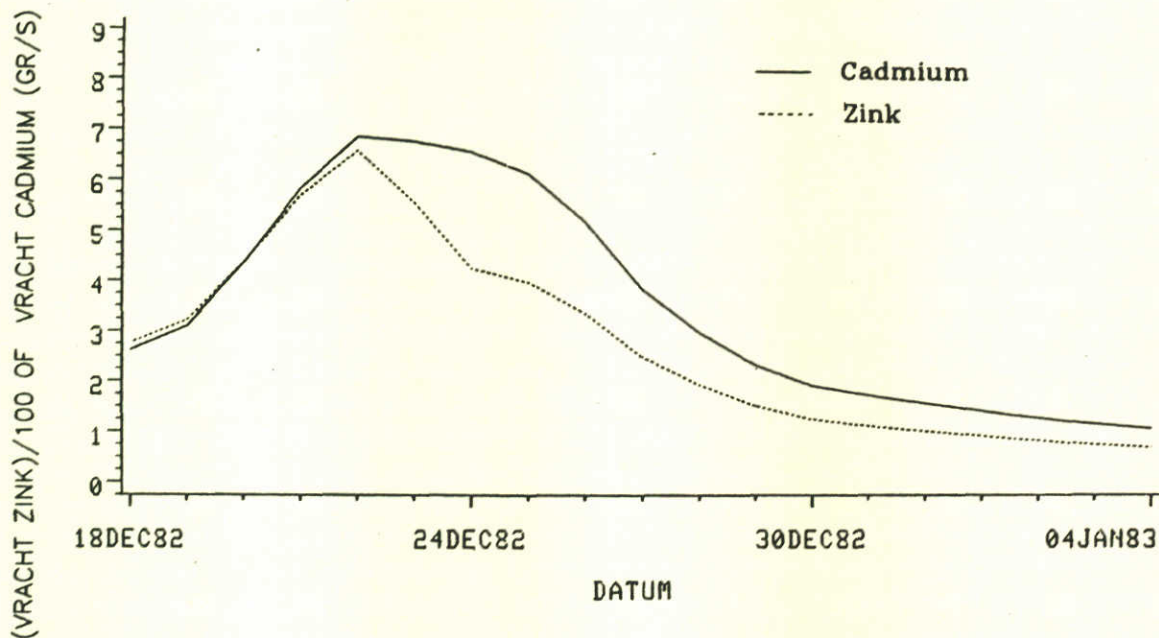
De verdelingskoefficient van cadmium varieert sterker dan die van zink. Hierdoor is er geen duidelijkheid te verkrijgen omtrent de relatie tussen deze verdelingskoefficient en variabelen zoals pH, temperatuur etc. Voorlopig is aangenomen dat de verdelingskoefficient gedurende een korte periode (een tot twee weken) konstant is. Dit is gebruikt in paragraaf 5.3 waar een voorspelling is gedaan voor het verloop van de concentraties, vrachten en adsorptiekoefficienten van cadmium en zink bij een afvoergolf.

5.3 VOORSPELLEN GEDRAG BIJ AFVOERGOLF

Om het gedrag van verontreinigingen te kunnen beschrijven, moeten de processen welke een rol spelen bij het transport van deze verontreinigingen bekend zijn. Voor wat betreft de processen zijn al veel gegevens verzameld en geverifieerd onder laboratorium kondities (38). Er zijn ook mathematische modellen, bijvoorbeeld CHARON, die het gedrag van de verontreinigingen bij gegeven sedimentconcentraties kunnen beschrijven.



Figuur 48 Debiet en zwevend stof concentratie bij Lobith; afvoergolf december 1982.



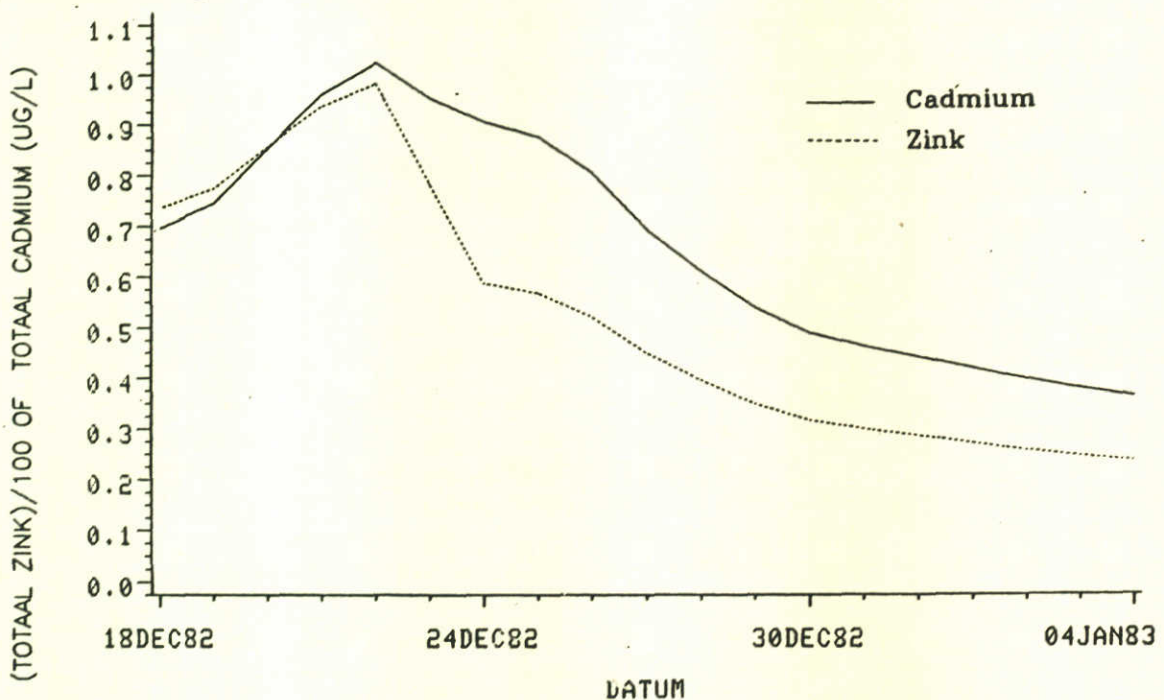
Figuur 49 Berekende vracht van cadmium en zink bij Lobith; afvoer en zwevend stof gegevens december 1982.

Wat tot op heden ontbreekt is, naast inzicht in het verloop van de sedimentconcentratie, een gedetailleerd verloop van de concentraties en adsorptiegraden van de verontreinigingen, waarmee de modellen kunnen worden geverifieerd. De huidige meetfrequentie, eens per 14 dagen, is niet geschikt om het gedrag van verontreinigingen bij een afvoergolf gedetailleerd te volgen. Teneinde een idee te krijgen van de gewenste meetfrequentie voor aanvullende metingen is uitgaande van enkele aannamen een voor-

spelling gemaakt van de concentratie en de adsorptiegraad bij een afvoergolf. Hiervoor is gebruik gemaakt van de debiet en zwevend stof gegevens van de afvoergolf van december 1982, dit is weergegeven in figuur 48.

De vracht zink en cadmium zijn geschat uit de figuren 41 en 44. Hierbij is aangehouden dat er een hysteresis bestaat tussen debiet en vracht, zodat de vracht bij afnemend debiet lager is dan bij toenemend debiet; dit is weergegeven in figuur 49.

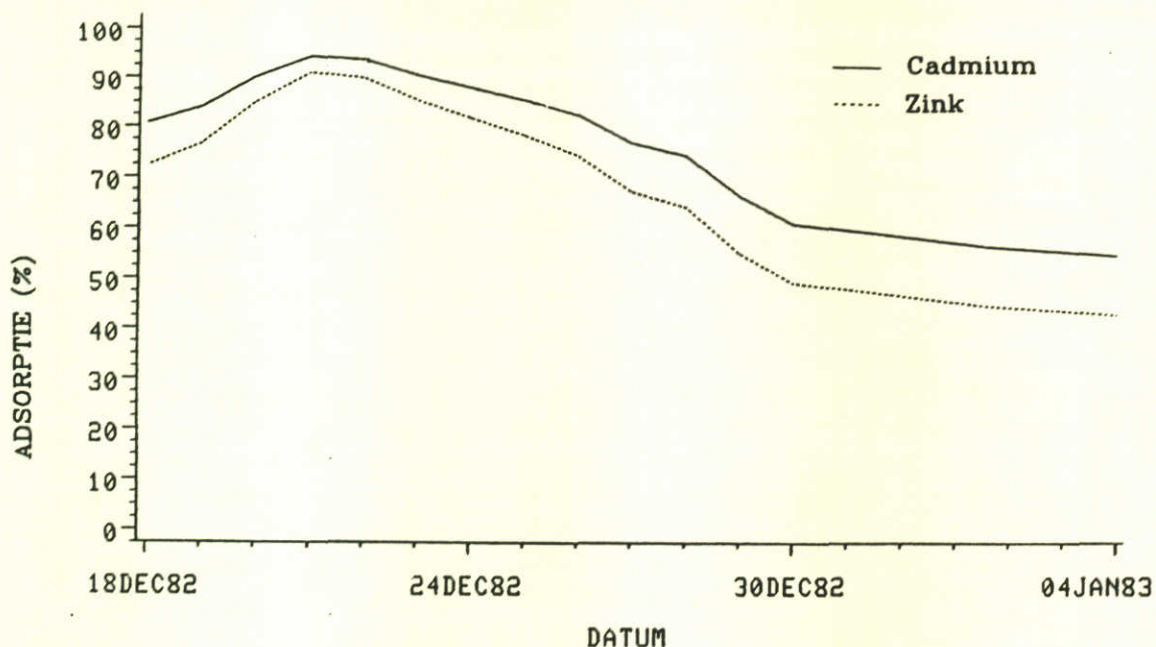
Uit de gegevens gepresenteerd in figuur 41 en 45 mag worden afgeleid dat de hysteresis bij cadmium groter dan bij zink. Uitgaande van deze relatie tussen vracht zink cq cadmium en het debiet zijn de totale concentraties bepaald, deze zijn weergegeven in figuur 50.



Figuur 50 Berekende concentraties zink en cadmium bij Lobith december 1982.

Als het verloop van de concentraties zink en cadmium wordt vergeleken met het verloop van de concentratie zwevend stof (figuur 48) dan blijkt dat de concentraties verontreiniging minder sterk variëren dan de concentratie zwevend stof bij een afvoergolf. Dit heeft consequenties voor de benodigde bemonsteringsfrequentie voor zware metalen: deze kan geringer zijn dan voor zwevend stof.

Naast de totale concentraties is ook het verloop van de adsorptiegraad van zink en cadmium bepaald tijdens de afvoergolf. Daar is aangenomen dat de verdelingscoëfficiënt konstant is, is de adsorptiegraad alleen nog maar afhankelijk van het zwevend stof gehalte. Het verloop van de adsorptie van zink en cadmium tijdens de afvoergolf is weergegeven in figuur 51.



Figuur 51 Berekende adsorptie van zink en cadmium bij Lobith december 1982.

Gezien het feit dat de berekende adsorptie tengevolge van de aannamen zowel bij zink als bij cadmium alleen afhankelijk is van het zwevend stof gehalte, is het verloop ongeveer hetzelfde.

5.4 VOORSTELLEN VOOR AANVULLEND MEETPROGRAMMA

In deze paragraaf worden voorstellen gedaan voor een aanvullend meetprogramma voor de aan slib gehechte verontreinigingen. Het aanvullend meetprogramma moet noodgedwongen beperkt blijven tot een gering aantal verontreinigingen. Dit heeft te maken met het feit dat de zware metalen monitor bij Lobith slechts 4 metalen analyseert en het feit dat de analyse-kapaciteit bij het RIZA beperkt is. Voorgesteld wordt om in ieder geval dagelijks om 8.00 uur, tegelijk met het nemen van het steekmonster zwevend stof, de gegevens van de zware metalen monitor vast te leggen. Deze zware metalen monitor meet in principe de totale concentratie van lood, zink, cadmium en koper. Uit (37) blijkt dat de verandering van de concentraties van de genoemde zware metalen goed kan worden gevolgd. Tevens blijkt dat er voor lood, cadmium en koper een positieve korrelatie is tussen de door de monitor gemeten concentraties en de concentraties die volgden uit controle-metingen door middel van atomaire adsorptiespectrometrie. Op zich kan met behulp van deze dagelijkse metingen een indruk worden verkregen van het verloop van de totale concentratie van de verschillende verontreinigingen. Er dient te worden nagegaan of een meting van de concentraties per dag inderdaad voldoende is.

Naast de gegevens van de zware metalen monitor, welke alleen inzicht geven in het verloop van de totale concentratie van de vier metalen, dienen er ook frequentere gegevens beschikbaar te komen van de opgeloste en geadsorbeerde fraktie. Gezien de verwachtingen omtrent het verloop van de adsorptiegraad van de zware metalen (zie paragraaf 5.3) en het feit dat het verloop van de totale concentratie volgt uit de meetgegevens van de zware metalen monitor, is het niet noodzakelijk om een maal per dag een meting te verrichten. Aanbevolen wordt om drie metingen per week (bijvoorbeeld op maandag, woensdag en vrijdag) uit te voeren. Deze metingen dienen voor:

- o het bepalen van het werkelijke totale gehalte aan zware metalen (ter vergelijking van de gehalten bepaald met de zware metalen monitor).
- o het bepalen van de opgeloste en geadsorbeerde frakties.

Het uitvoeren van deze metingen (1 maal per dag aflezen zware metalen monitor, drie maal per week een monster voor zware metalen analyse) over een periode van een jaar of langer geeft de mogelijkheid om deze gegevens te gebruiken als randvoorwaarde voor een model voor het berekenen van de verspreiding van zware metalen in het nederlandse gedeelte van de Rijn. Het uitvoeren van deze metingen over kortere perioden geeft inzicht in het gedrag van zware metalen, maar is waarschijnlijk niet voldoende voor een meer modelmatige benadering. Indien wordt gekozen voor metingen over een kortere perioden dan is het aan te bevelen om in onderstaande perioden metingen te verrichten:

- o Tijdens geringe debieten (september-oktober).
- o Tijdens de afvoergolven (december-januari).
- o Bij een gemiddelde afvoer (mei-juni).

6 KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste konklusies en aanbevelingen van dit rapport beschreven. Hierbij is een indeling gehanteerd welke overeenkomt met de indeling van het totale rapport. De konklusies en aanbevelingen zijn gerangschikt per hoofdstuk en hebben betrekking op de:

1. beschikbare gegevens
2. analyse van de beschikbare gegevens
3. mogelijkheden voor modelleren zwevend stof
4. mogelijkheden voor modelleren verontreinigingen

6.1 BESCHIKBARE GEGEVENS

Konklusies

- o Een meetfrequentie van een waarde per dag is voldoende om inzicht te verkrijgen in het transport van zwevend stof in het nederlandse gedeelte van de Rijn.
- o In perioden met lage afvoer is een dagelijkse variatie van troebelheid cq zwevend stof gekonstateerd. Deze dagelijkse variatie wordt veroorzaakt door de scheepvaart, wat kan worden aangetoond door het verloop van de scheepvaart-intensiteit te vergelijken met het verloop van het zwevend stof gehalte. Bij grotere afvoeren kan deze invloed niet worden waargenomen.

Aanbevelingen

- o Bij de troebelheidsregistraties blijkt een schijnbaar maximum op te treden bij 200 JTU. Dit maximum wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het omschakelen van de troebelheidsmeter bij 200 JTU; dit moet door het RIZA nog nader worden onderzocht.

6.2 ANALYSE BESCHIKBARE GEGEVENS

Konklusies

- o meetfrequentie van een maal per dag interpreteerbaar te zijn; dit in tegenstelling van de gegevens van de metingen met een meetfrequentie van een maal per veertien dagen.
- o Het gedrag van troebelheid en zwevend stof is overeenkomstig. Er is echter geen eenduidige relatie tussen

troebelheid en zwevend stof. Bij de vertaling van zwevend stof concentratie naar troebelheid speelt de korrelgrootte verdeling een rol; deze korrelgrootte verdeling is niet konstant. De fijnere sedimentfrakties spreken meer door in de troebelheid dan de grovere frakties. De fysische achtergronden van het gedrag van zwevend stof en troebelheid als functie van de afvoer zijn gelijk.

- o Er is een relatie tussen zwevend stof en debiet, waarbij de beschikbaarheid van sediment een rol speelt, dit volgt uit de zogenaamde hysteresis in de relatie tussen zwevend stof en debiet.
- o Er is sprake van een jaarcyclus in de beschikbaarheid van sediment (droge/natte periode), maar ook van een meerjarige cyclus (droge/natte jaren).
- o Er vindt zowel erosie als sedimentatie plaats op de riviertakken Waal, IJssel en Beneden-Rijn.

6.3 MOGELIJKHEDEN VOOR MODELLEREN ZWEVEND STOF

Konklusies

- o De tot nu toe gehanteerde modelbeschrijvingen van het transport van zwevend stof blijken grofweg in twee categorieën te kunnen worden ingedeeld. De beschrijvingen zijn of zeer complex en tot op zekere hoogte deterministisch of vrij eenvoudig en empirisch.
- o Zowel een eenvoudig empirisch als een eenvoudig deterministisch model kunnen het zwevend stof gehalte (troebelheid) op de Waal redelijk weergeven. Het deterministische model verdient de voorkeur gezien de mogelijkheden de verschillende processen uit te breiden als meer proceskennis of gegevens beschikbaar zijn.
- o Het is mogelijk om een deterministisch model op te stellen voor zwevend stof in (het nederlandse deel van) de Rijn; gezien de beschikbaarheid van gegevens verdient het de voorkeur om uit te gaan van een eenvoudig model.

Aanbevelingen

- o Het verder ontwikkelen van een deterministisch zwevend stof model voor het nederlandse gedeelte van de Rijn (inclusief zij-takken), waarbij met name de erosie en sedimentatie functies verder moeten worden ontwikkeld teneinde ook de beschikbaarheid van erodeerbaar bodem-materiaal te kunnen weergeven.
- o Het uitvoeren van natuurmetingen naar de samenstelling en hoeveelheid van het bodemsediment in kribvakken als functie van de tijd; dit voor een nadere onderbouwing

- van de uit de meetgegevens afgeleide ideeën omtrent erosie en sedimentatie in de kribvakken
- o Het bepalen van de korrelgrootte verdeling van het zwevend stof op verschillende stations, teneinde inzicht te verkrijgen in de samenstelling van het zwevend stof en het gedrag in de tijd en over een riviervak. Het is nu nog niet noodzakelijk om dit onderzoek routine matig uit te voeren het kan beperkt blijven tot enkele perioden in het jaar (bijvoorbeeld zoals aangegeven in paragraaf 5.4).
 - o Het uitvoeren van een fysisch modelonderzoek teneinde meer inzicht te verkrijgen in het erosie en sedimentatie gedrag van zwevend stof.

6.4 MOGELIJKHEDEN VOOR MODELLEREN VERONTREINIGINGEN

Konklusies

- o Er is voldoende bekend van het gedrag van anorganische micro-verontreinigingen (met name Cadmium en Zink) voor een eventuele modellering; het grootste probleem tot nu toe was het gebrek aan inzicht in het gedrag van zwevend stof en het gebrek aan frequente meetgegevens van micro verontreinigingen.

Aanbevelingen

- o Het frequenter bemonsteren van de anorganische micro-verontreinigingen in enkele korte perioden; een voorbeeld hiervoor is gegeven in paragraaf 5.4.

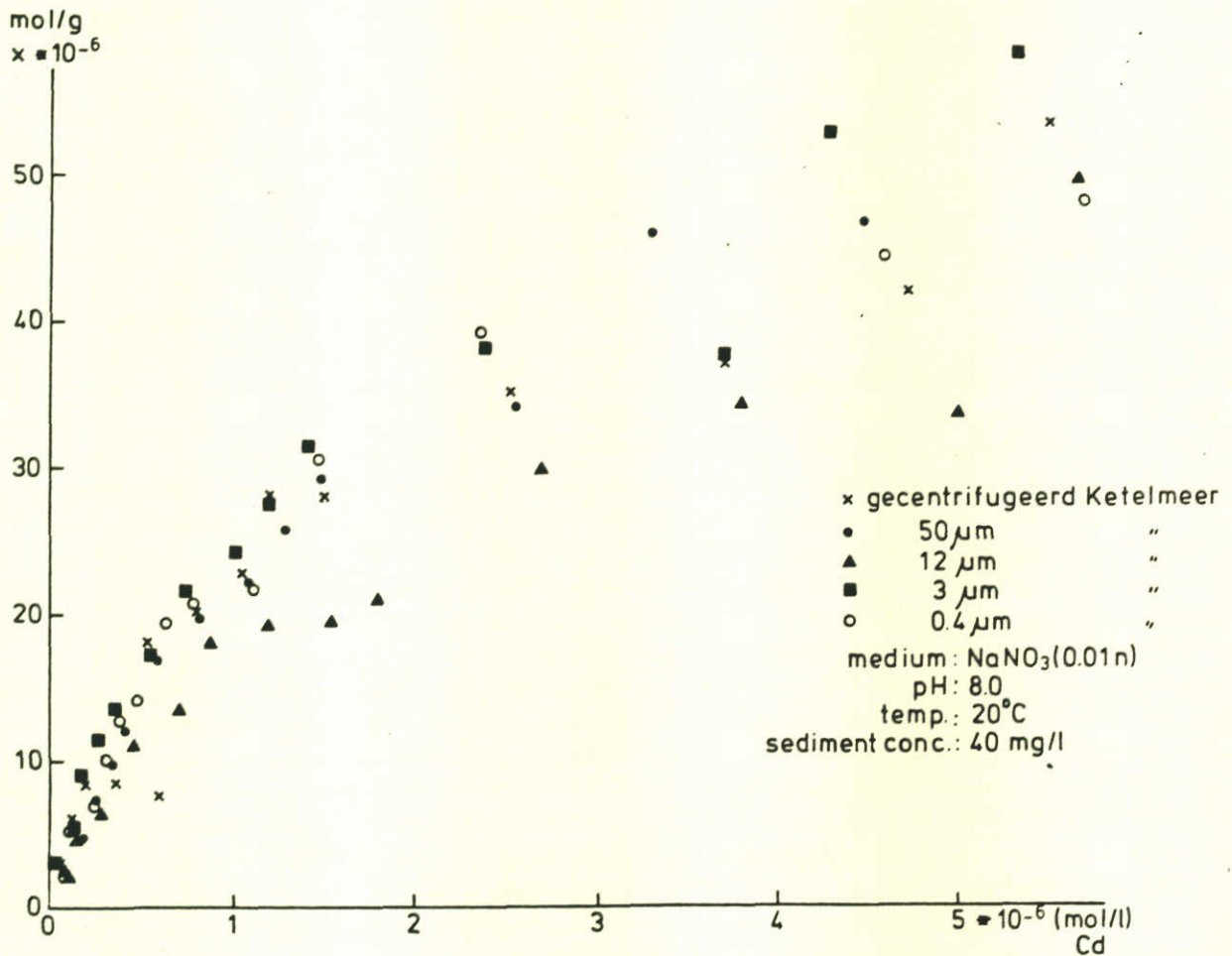
LITERATUUR

1. Sigrist Troebelheidseenheden
 Fabrieksdocument
 1980
2. RWS, Dienst Hoofdafdeling Scheepvaart
 Verkeerskunde Scheepvaarttellingen op de grote rivieren
 Nota S 82.1
 1982
3. Leussen, W. van Onderzoek naar de transport-
 mechanismen in zout/zoet
 omstandigheden.
 Waterloopkundig Laboratorium, M896,
 Deel 1: Mei 1981.
 Deel 2: November 1982.
 Deel 3: Inbouwen slib in wiskundige
 modellen, Januari 1982.
 Deel 4: Werkplan slibonderzoek
 middellange termijn, maart 1982.
4. RIWA, RID. Slib in Rijn en Maas. Een beschrijving
 van de kwalitatieve en kwantitatieve
 aspecten van slib in Rijn en Maas in
 relatie tot de drinkwatervoorziening.
 Deel 1: Samenvattend rapport.
 Deel 2: Theoretische aspecten.
 Deel 3: Toetsing theorie aan metingen.
5. Waterloopkundig Onderzoek naar eigenschappen van slib.
 Laboratorium Vooronderzoek betreffende flocculatie,
 erosie, sedimentatie en consolidatie.
 Verslag lit. onderzoek; R 988, 1976.
6. Uiterwijk- Microbiologische aspecten en het
 Winkel, A.P.B. sedimentatie gedrag van rivierslib;
 Rijkswaterstaat, Dir. Waterhuishouding
 en Waterbeweging, district Zuid-West;
 Nota 44.006.01, 1976.
7. McLaughin, R.T. Settling properties of suspension. Trans.
 ASCE; Vol. 126, pp. 1734-1786; 1962.
8. Metha, A.J. An investigation of the depositional
 Partheniades, E. properties of flocculated fine sediment.
 Journ. of Hydr. Research 13, No. 4;
 pp. 361-381, 1975.

9. Krone, R.B. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Univ. of California; Hydr. Eng. Lab. and Sanit. Eng. Lab. 1962.
10. Einstein, H.A. Experiments to determine cohesive sediment transport modes in salt water. Krone, R.B. Journ. of Geophys. Res.; Vol. 67, No. 4; 1451-1464, 1962.
11. Partheniades, E. Erosion and deposition of cohesive soils. Proc. ASCE; Journ. of Hydraulics Division, Vol. 91, No. HY1, pp. 105-139; 1965.
12. Partheniades, E. Erosion and deposition of cohesive material; material; Chapter 25 in: River Mechanics (H.W. Shen); Colorado State Univ., Fort Collins, 1971.
13. Delft Hydraulic Laboratory Demerara coastal investigation. Report on siltation of Demerara Bar channel and coastal erosion in British Guyana; 1962.
14. Harms, L.L. Phosphorus interactions with streambed sediments, Journ. of the Environm. Div., Vidal, P.H. pp 271-288, April 1978. McDermott, T.E.
15. Migniot, C. Action des courants, de la houle et du vent sur les sediments. La Houille Blanche, No. 1; pp. 9-47; 1977.
16. Cormault, P. Determination experimentale des debit solide d'erosion de sediment fins cohesifs. Proc. 14 Congr. IAHR, Paris, 1971.
17. Odd, N.V.M. A two layer model of mud transport in the Thames estuary. Proceedings of the inst. Owen, M.W. of Civil Eng. Suppl. 1972 (IX). Paper 7517 S; pp 175-205.
18. Ariathurai, R. Mathematical model of estuarial sediment transport. Techn. Rep. D-77-12; Environm. MaCarthur, R.C. Effect Lab; U.S. Army Engineer Waterways Krone, R.B. Experiment Station, 1977.

19. Christodoulou, G A mathematical model for the dispersion
Leimkuhler, W.F. of suspended sediments in coastal waters.
Ippen, A.T. Report No. 179; Ralph M. Parsons
Laboratory, Cambridge, Massachusetts,
1974.
20. Kuo, A. Modelling sediment movement in the
Nichols, M. turbidity maximum of an estuary. Virginia
Lewis, J. Water Res. Research Center, Bull. 111;
Virginia Polytechn. Inst. and State
Univ.; Blacksburg, 1978.
21. Smith, T.J. A two-dimensional model for suspended
O'Conner, B.A. sediment transport. Proc. IAHR Conference,
1977.
22. Uchrin, C.G. Modelling suspended solids and bacteria
Weber, W.J. in Ford Lake, Journ. of the Environm.
Div., pp 975-993, October 1981.
23. Kerssens, P.J.M. Morphological computations for suspended
sediment transport. Research report S78-VI,
Delft Hydraulics Laboratory; 1977.
24. Kerssens, P.J.M. Model for suspended sediment transport;
Prins, A. Jnl. of the Hydraulics Division, ASCE;
Rijn, L.C. van Vol. 105, No. HY5, pp. 461-476, 1979.
25. Coleman, M.L. Flume studies of the sediment transfer
coeff. Water Res. Res., Vol. 6, No. 3;
1979.
26. Festa, J.F. A two-dimensional numerical model of
Hansen, D.V. estuarine circulation: the effect of
altering depth and river discharge.
Estuarine and Coastal Marine Science, 4,
pp. 309-323, 1976.
27. Festa, J.F. Turbidity maxima in partially mixed
Hansen, D.V. estuaries: A two-dimensional model.
Estuarine and Coastal Marine Science, 4,
pp. 309-323, 1976.
28. Scarlatos, P.O. On the numerical modeling of cohesive
sediment transport. Journ. of Hydraulic
Research; 19, No. 1, pp. 61-68; 1981.
29. Metha, A.J. Kaolinite resuspension properties.
Partheniades, E. Technical note, Journ. of the Hydraulics
Division, Proc. ASCE, Vol. 105, No. HY4,
pp. 411-416, 1979.

30. Fields, E.F. CHNSED: Simulation of sediment and trace contaminant transport with sediment contaminant interaction, March 1976
31. Onishi, Y. Mathematical simulation of sediment and radionuclide transport in the Columbia river, Battelle Pacific Northwest Laboratory, BNWL-2228 UC-11, August 1977.
32. Onishi, Y. Mathematical modelling of sediment and
Wise, S.E. contaminant transport in the James River Estuary, Proc. of the 26th ann. ASCE Hydr. Div. Spec. Conference on Verification of Mathematical and Physical Models in Hydr. Engineering, College Park, MD, 1978, pp 303 - 310.
33. Onishi, Y. Mathematical simulation of sediment and
Arnold, E.M. contaminant transport in surface waters;
Serne, R.J.. Battelle Pacific Northwest Laboratory,
Cowan, C.E. NUREG/CR-0658; PNL-2902, January 1979.
Thompson, F.L.
Mayer, D.W.
34. Onishi, Y. Critical review: Radionuclide transport,
Serne, R.J. sediment transport, water quality,
Arnold, E.M. mathematical modelling and radionuclide
Cowan, C.E. adsorption/desorption mechanism;
Thompson, F.L. Battelle Pacific Northwest Laboratory,
NUREG/CR-1322; PNL-2901, January 1981.
35. District ZW/WW Onderzoek naar de nauwkeurigheid van
District ZO/WW metingen naar zwevend transport in een
getijrivier, Nota 72.002.01, Febr.
1980.
36. VanSickle, J. Supply-based models of suspended sediment
Beschta, R.L. transport in streams. Water Resources
Research, Vol. 19, No. 3, pp 768-778,
June 1983.
37. P.H.A. Hoogweg Beproeving metalenmonitor op
F.J. v. Poorten het meetstation "Keizersveer"
D. v.d. Berg H2O, jaargang, 15 nummer 16, pp102-107
P.J. van Duin maart 1982
C.W. de Kreuk
38. Waterloopkundig Zware Metalen in Aquatische Systemen
Laboratorium deel: "Geochemische processen"
rapport M1468-II
december 1982



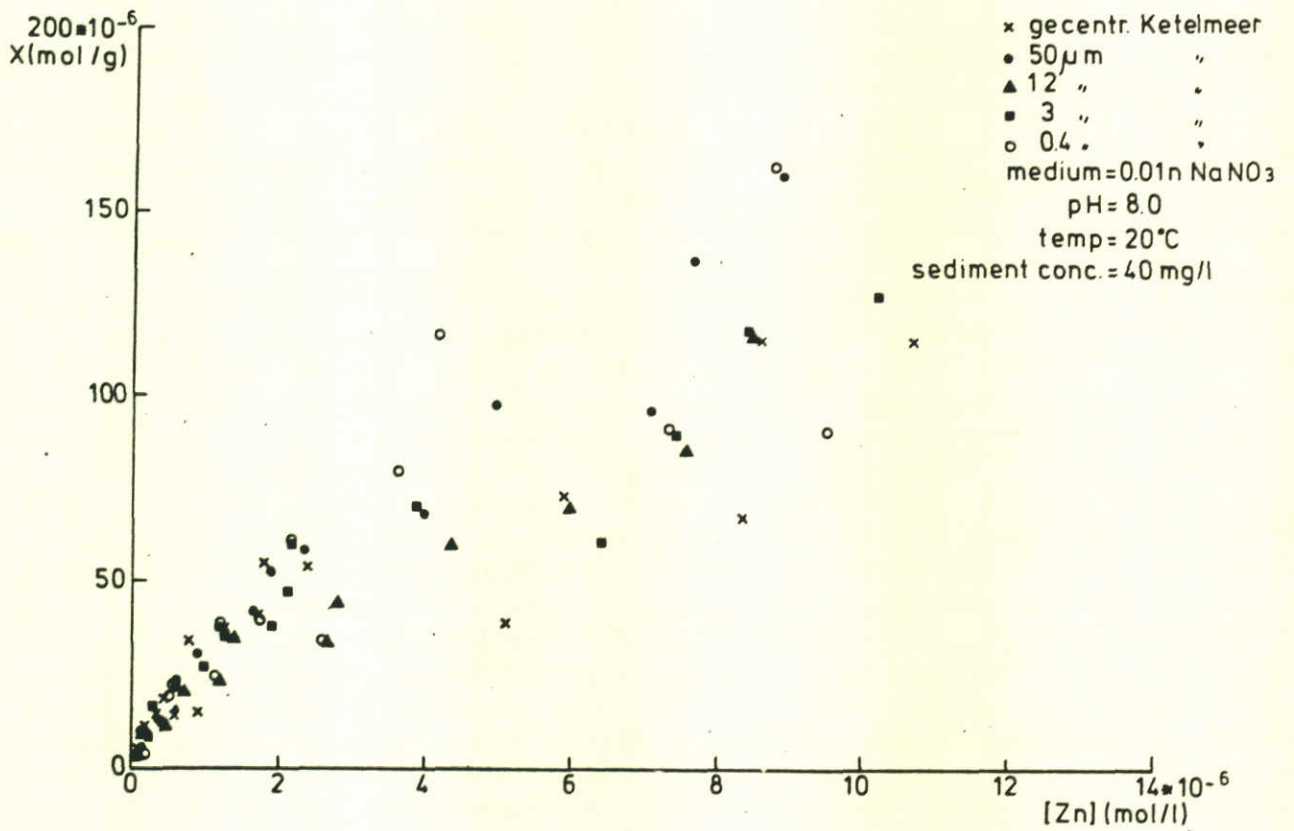
VERLOOP VAN DE ADSORPTIE VAN Cd AAN SEDIMENTFRACTIES
 VAN KETELMEERSEDIMENT MET TOENEMENDE CONCENTRATIE IN
 OPLOSSING

Bijlage II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1056-03

figuur 1



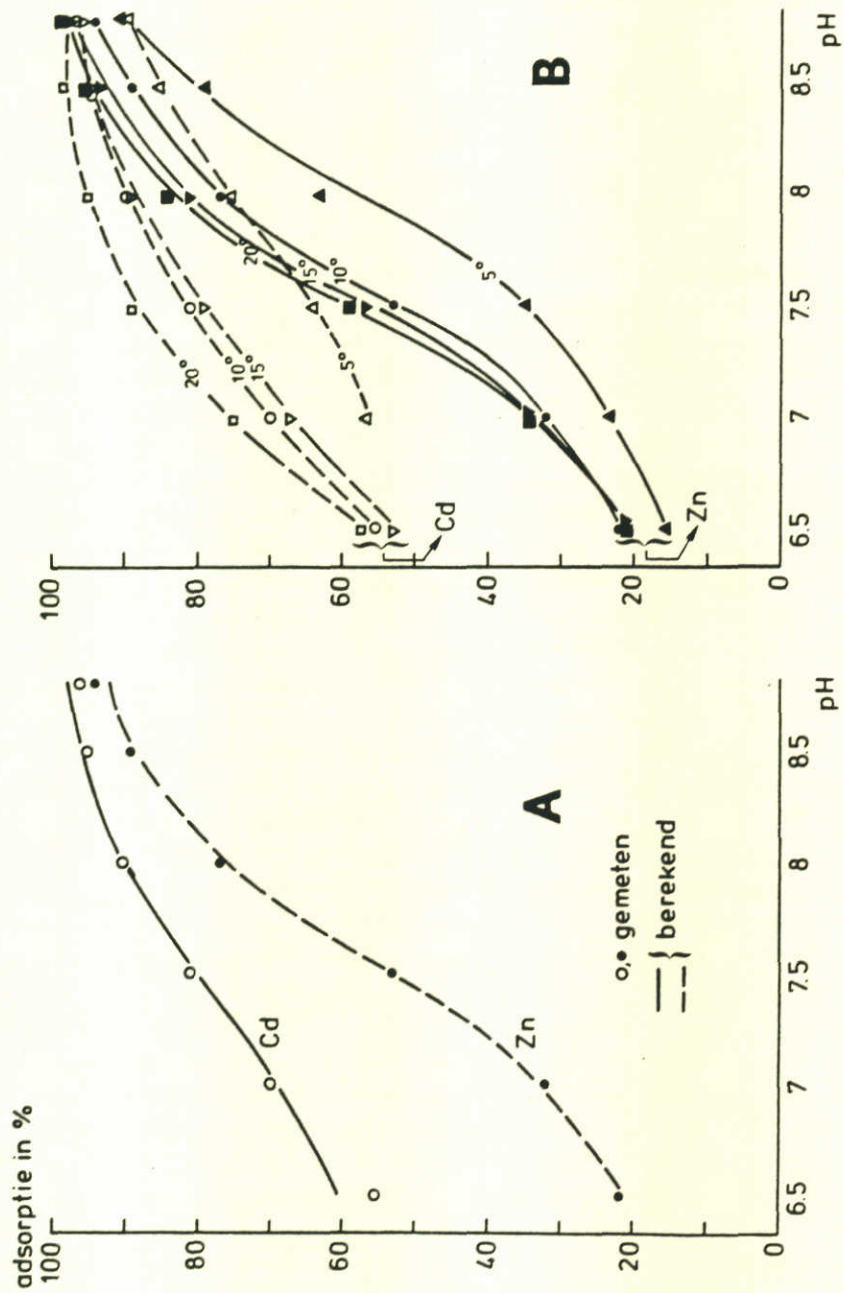
VERLOOP VAN DE ADSORPTIE VAN Zn AAN SEDIMENTFRACTIES
 VAN KETELMEERSEDIMENT MET TOENEMENDE CONCENTRATIE IN
 OPLOSSING

Bijlage II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1056-03

figuur 2



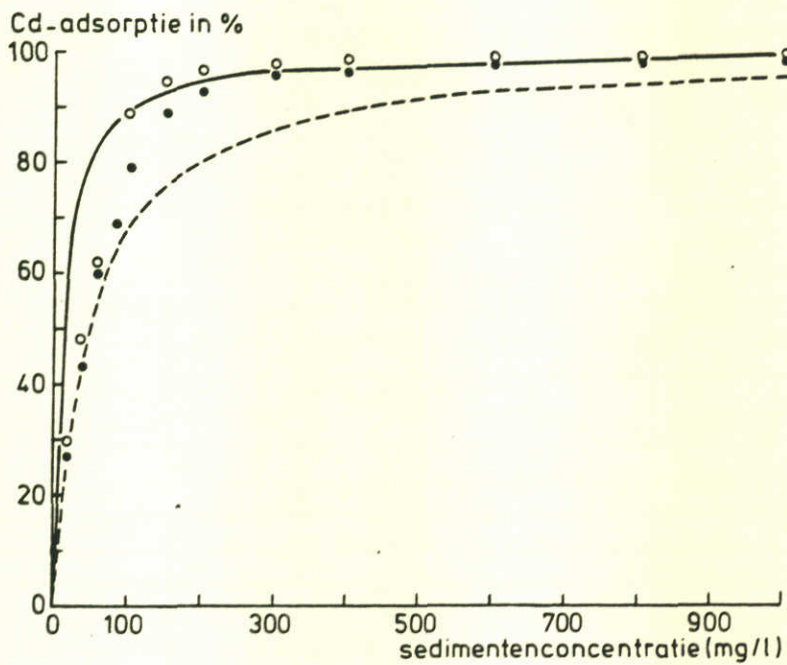
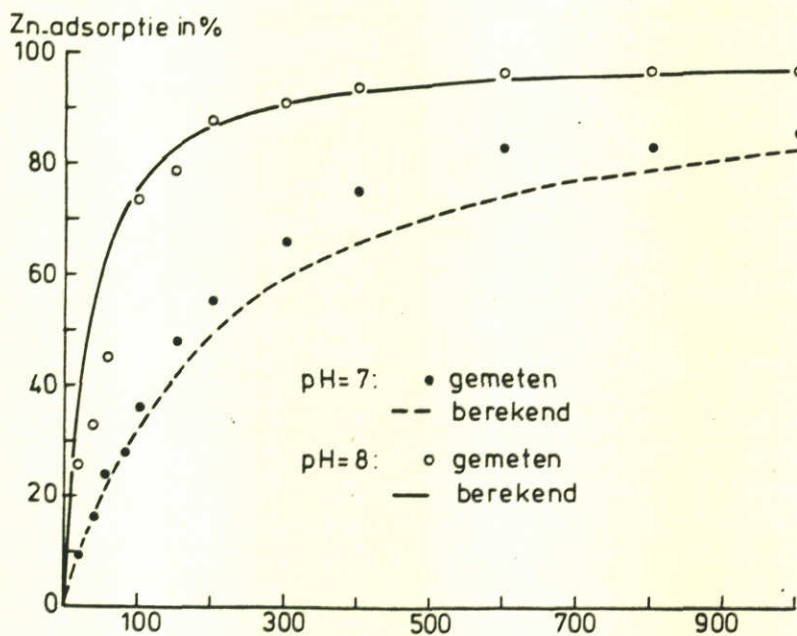
VERLOOP VAN DE FRACTIONELE ADSORPTIE BIJ 10° C (A) EN BIJ VERSCHILLENDE TEMPERATUREN (B) MET DE PH

Bijlage II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1056-03

figuur 3



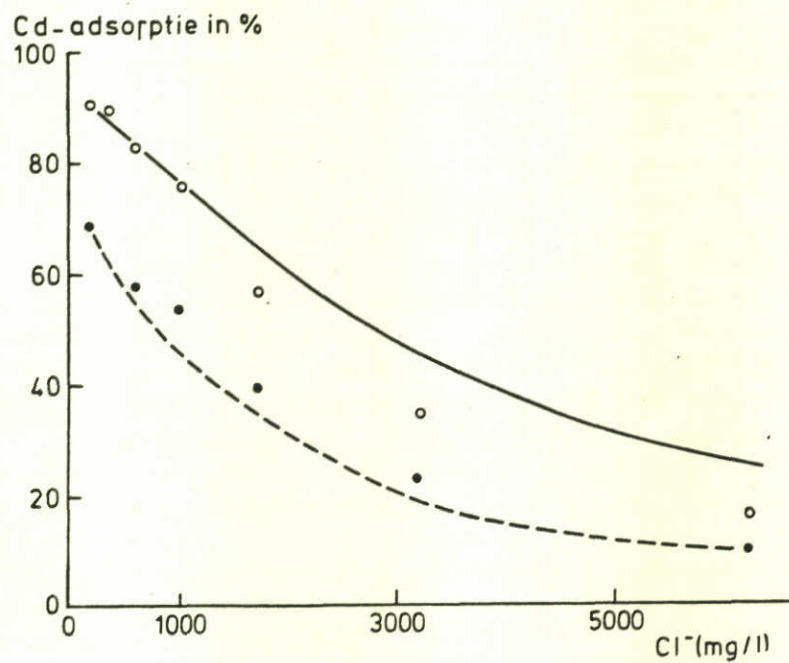
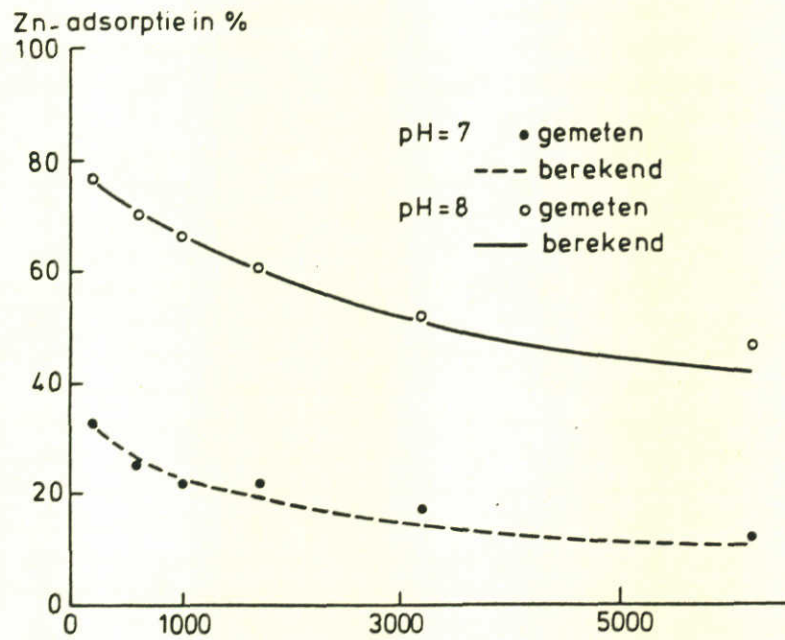
VERLOOP VAN DE FRACTIONELE ADSORPTIE MET DE
SEDIMENTCONCENTRATIE

Bijlage II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1056-03

figuur 4



VERLOOP VAN DE FRACTIONELE ADSORPTIE MET DE
CHLORIDECONCENTRATIE

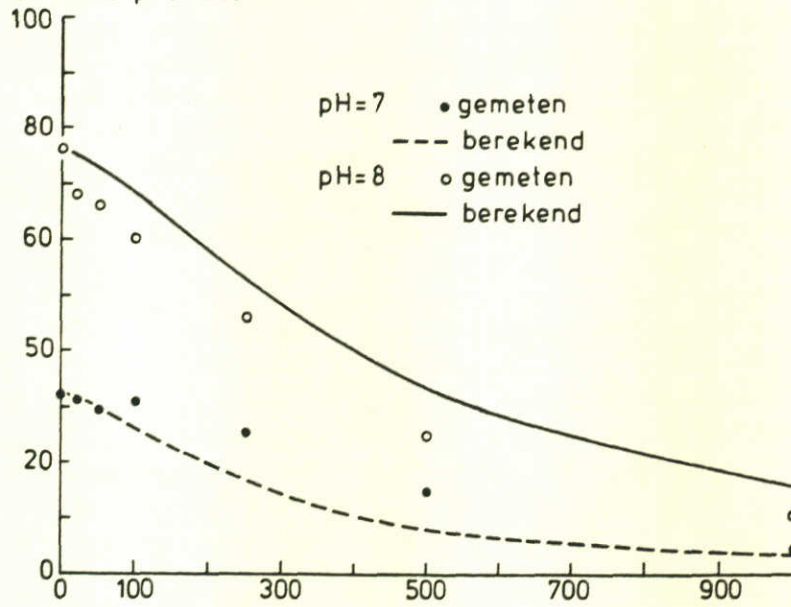
Bijlage II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

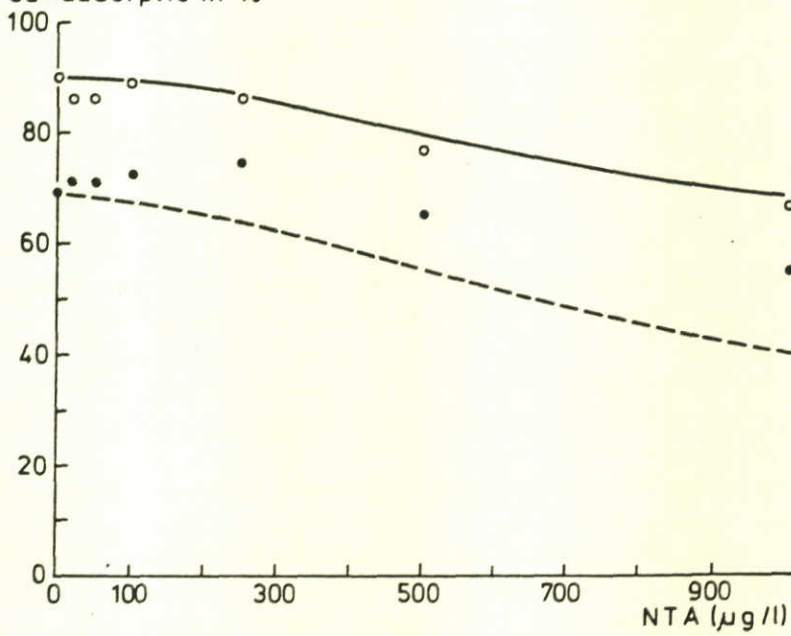
R1056-03

figuur 5

Zn-adsorptie in %



Cd-adsorptie in %



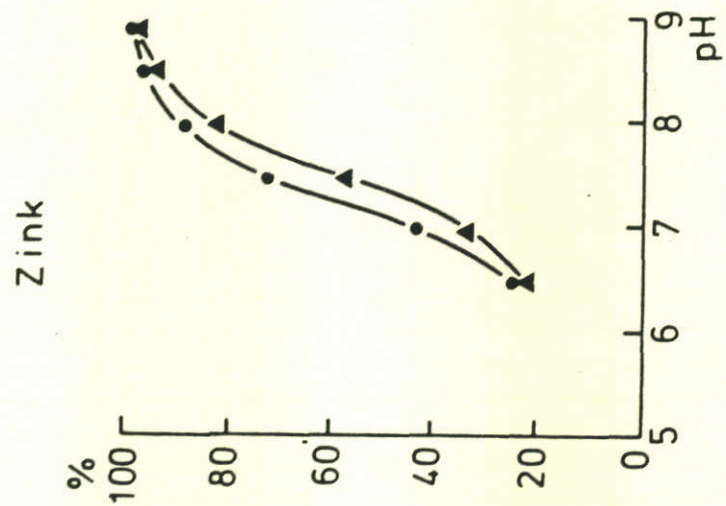
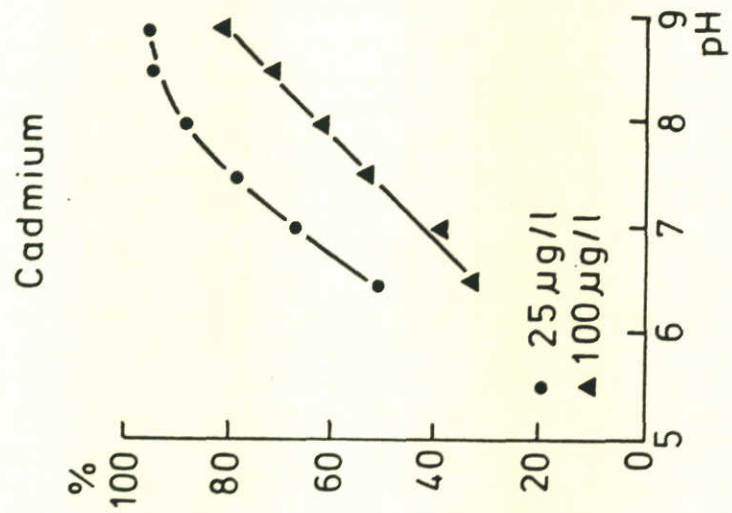
VERLOOP VAN DE FRACTIONELE ADSORPTIE MET DE
NTA- CONCENTRATIE

Bijlage II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1056-03

figuur 6



VERLOOP VAN DE FRACTIONELE ADSORPTIE VOOR VERSCHILLENDE BEGINCONCENTRATIES IN OPLOSSING AAN Zn EN Cd

Bijlage II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R1056-03

figuur 7

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands