

Opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat - RIZA

Slibsedimentatie in noodoverloop- en retentiegebieden

N. Asselman

april 2003

Inhoud

1	Inleiding.....	1—1
2	Noodoverloop- en retentiegebieden.....	2—1
2.1	Definitie.....	2—1
2.2	De Commissie Noodoverloopgebieden	2—1
3	Hydraulische effectbepaling inzet noodoverloop- en retentiegebieden.....	3—1
3.1	Inleiding	3—1
3.2	Noodoverloopgebieden (I).....	3—2
3.3	Noodoverloopgebieden (II).....	3—3
3.4	Retentiegebieden.....	3—6
4	Transport van zware metalen en zwevendstof.....	4—1
4.1	Jaarvracht zware metalen	4—1
4.2	Variaties in zware metalen concentraties.....	4—2
4.3	Classificatie van vervuild sediment	4—4
4.4	Zware metalen in uiterwaard bodems	4—5
4.5	Zwevendstof in de rivier	4—6
5	Sedimentatie in noodoverloopgebieden – theorie.....	5—1
5.1	Inleiding	5—1
5.2	Sedimentaanbod	5—1
5.3	Type inlaatwerk	5—2
5.4	Overstromingsduur en stroomsnelheden in het gebied.....	5—2
6	Sedimentatie in noodoverloopgebieden – modellering	6—1
6.1	Inleiding	6—1
6.2	Waterbeweging.....	6—1
6.3	Sedimentaanvoer	6—1
6.4	Sedimentatie	6—2

7	Resultaten	7—1
7.1	Ooij-Millingen	7—1
7.2	Rijnstrangen	7—4
8	Discussie en conclusies	8—1
9	Referenties	9—1

I Inleiding

In het voorjaar van 2002 heeft de Commissie Luteijn advies uit gebracht met betrekking tot de inzet van noodoverloopgebieden. Deze noodoverloopgebieden worden ingezet tijdens perioden met extreem hoge afvoer. Ze hebben tot doel de kans op een dijkdoorbraak langs de Rijn en de Maas in Nederland te verkleinen.

Bij de keuze van noodoverloopgebieden wordt voorkeur verleend aan gebieden met een geringe bevolkingsdichtheid die ver bovenstrooms liggen. Daarnaast is gekeken naar sociaal-maatschappelijke aspecten, zoals aantasting van de leefomgeving, aanwezigheid van risicovolle objecten zoals een chemische fabriek, economische effecten en de gevolgen voor landschap, natuur en cultuurhistorie.

Onder het kopje “gevolgen van daadwerkelijke inzet” stelt de commissie dat het gebied na drie tot zes weken na de inzet weer droog is, maar dat het gebied (in ieder geval de woonkernen) eerst dienen te worden schoon gemaakt omdat de rivier zand en slib zal hebben afgezet. Onbekend is echter hoeveel sediment door de rivier zal worden achtergelaten en wat de kwaliteit is van dit materiaal.

Tot op heden is geen modelinstrumentarium beschikbaar waarmee de sedimentatie in noodoverloop- en retentiegebieden kan worden berekend en waarmee de kwaliteit van het afgezette slib kan worden vastgesteld. Het verkennen van de mogelijkheden om een dergelijk instrumentarium te ontwikkelen vormt de algemene doelstelling van deze studie. Meer in detail kunnen de volgend sub-doelen worden gedefinieerd:

- inzicht geven in de beschikbare data met betrekking tot slibkwantiteit en slibkwaliteit;
- inzicht geven in de gebieden die tot op heden als potentiële noodoverloop- en retentiegebieden in het kader van andere projecten in beschouwing zijn genomen;
- inzicht geven in de gebruikte hydraulische modellen om waterstroming in noodoverloop- en retentiegebieden te simuleren;
- inzicht geven in de toepasbaarheid van deze modellen voor het ontwikkelen van een slibsedimentatiemodel;
- toetsen van de haalbaarheid voor de ontwikkeling van een slibsedimentatiemodel voor noodoverloop- en retentiegebieden aan de hand van een aantal testcases.

Het onderzoek richt zich op de Rijntakken in Nederland.

2 Noodoverloop- en retentiegebieden

2.1 Definitie

Een noodoverloopgebied (vaak afgekort tot NOG) is een gebied waar het water bij extreme rivierafvoer wordt opgevangen, zodat een ongecontroleerde overstroming op een onvoorspelbare tijd en plaats wordt voorkomen. Inzet van een noodoverloopgebied zal slachtoffers voorkomen en de schade minimaliseren (Commissie Noodoverloopgebieden, 2002). Een noodoverloop maakt geen deel uit van het riviersysteem en wordt slechts ingezet als noodmaatregel.

Een retentiegebied is een veiligheidsmaatregel voor het voorkomen van overstroming bij een maatgevende rivierafvoer, waarbij rivierwater tijdelijk wordt geborgen in speciaal daarvoor ingerichte bekkens die deel uitmaken van het riviersysteem. In de praktijk betekent dit dat retentiegebieden eerder en dus ook vaker ingezet zullen worden dan noodoverloopgebieden (Commissie Noodoverloopgebieden, 2002). Volgens Heynert et al. (2002) zullen NOG's eens per 1250 jaar worden ingezet, terwijl de overstromingsfrequentie van retentiegebieden langs de grote rivieren in de orde van eens per 500-1000 jaar liggen.

Hoewel het begrip noodoverloopgebied recentelijk hoog op de politieke agenda is verschenen maakte men in zekere zin in het verleden ook reeds gebruik van de inzet van noodoverloopgebieden. Men liet gebieden onder stromen waar het het minste kwaad kon om andere gebieden te beschermen. Een bekend voorbeeld hiervan is de Beerse overlaat bij Grave langs de Maas. In de afgelopen decennia zijn veel van deze gebieden echter verloren gegaan. Dit komt deels doordat de gebieden achter de overlaten intensiever werden benut en deels doordat elders maatregelen werden getroffen om het water efficiënter af te voeren. Bij de Maas heeft het graven van de Bergse Maas en het afsluiten van de overlaat bij Heerwaarden bijgedragen tot de mogelijkheid om de Beerse Overlaat buiten werking te stellen (zie o.a. Klijn & Stone, 2000; Asselman & Klijn, 2001).

2.2 De Commissie Noodoverloopgebieden

In 2000 heeft de Commissie Waterbeheer 21^{ste} eeuw gesteld dat het watersysteem in Nederland niet op orde is en dat maatregelen dienen te worden getroffen om er voor te zorgen dat de veiligheid gewaarborgd kan worden ook bij veranderende klimatologische omstandigheden. In reactie hierop heeft de regering opdracht gegeven aan de Commissie Noodoverloopgebieden ofwel de Commissie Luteijn om onderzoek te doen naar de mogelijkheden om noodoverloopgebieden in te zetten om onder extreme situaties de kans op ongecontroleerde overstromingen langs Rijn en Maas te verminderen.

De Commissie heeft onderzocht of noodoverloopgebieden nuttig en noodzakelijk zijn. Tevens heeft de commissie in kaart gebracht welke gebieden het meest geschikt zijn. De resultaten zijn vermeld in het eindrapport van de Commissie Noodoverloopgebieden (2002).

De conclusie die getrokken wordt is dat door de inzet van noodoverloopgebieden langs de Rijn of de Maas de benedenstroomse waterstand voldoende kan worden verlaagd (0.2-0.7 m) om overstromingsgevaar af te wenden. Wel is het noodzakelijk dat de locatie van het noodoverloopgebied goed is gekozen. Bij de keuze van noodoverloopgebieden wordt voorkeur verleend aan gebieden met een geringe bevolkingsdichtheid die ver bovenstrooms liggen. Daarnaast is gekeken naar sociaal-maatschappelijke aspecten, zoals aantasting van de leefomgeving, aanwezigheid van risicovolle objecten zoals een chemische fabriek, economische effecten en de gevolgen voor landschap, natuur en cultuurhistorie. Dit resulteerde in selectie van de volgende potentiële noodoverloopgebieden (in volgorde van voorkeur) (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Potentiële noodoverloopgebieden langs de Rijn

Noodoverloopgebied	Bergingscapaciteit (10^6 m^3) ^{*1}
Rijnstrangen ^{*2}	90
Duivense Broek	60/65
Ooijpolder ^{*2}	115/130
Land van Maas en Waal	275/350
Betuwe-oost	250/290
Betuwe-west	230/290

^{*1} Verschillende getallen zijn gegeven voor de situaties waarin wel / geen maatregelen worden getroffen om woonkernen te beschermen; ^{*2} Deze gebieden zijn ook in beeld als retentiegebied

Onder het kopje “gevolgen van daadwerkelijke inzet” stelt de commissie dat het gebied na drie tot zes weken na de inzet weer droog is. De huizen zullen vervolgens schoon dienen te worden gemaakt omdat de rivier zand en slib zal hebben afgezet. Hoeveelheden sediment en de kwaliteit van dit sediment worden niet genoemd.

3 Hydraulische effectbepaling inzet noodoverloop- en retentiegebieden

3.1 Inleiding

Aan het advies zoals uitgebracht door de Commissie Noodoverloopgebieden ligt onderzoek ten grondslag naar onder meer de rivierkundige effectiviteit, de benodigde bergingscapaciteit en de globale waterstaatkundige inrichting van een aantal mogelijke noodoverloopgebieden. Onderstaande tekst geeft een overzicht van de resultaten van de door WL uitgevoerde analyses voor noodoverloopgebieden langs de Rijntakken (Heynert et al., 2002). Een overzicht van de verschillende modellen is gegeven in onderstaand kader. SOBEK-Rivers, Delft-FLS, WAQUA en Delft-1D2D zijn de modellen die worden toegepast in studies naar de hydraulische effecten van noodoverloop- en retentiegebieden.

SOBEK

SOBEK is een 1D hydraulisch model. SOBEK kent 3 productlijnen: Rural, Urban en Rivers. Elke productlijn is opgebouwd uit meerdere modules.

SOBEK-Rural wordt met name gebruikt voor het modelleren van neerslag-afvoer processen en waterstroming in landelijke gebieden.

SOBEK-Urban wordt gebruikt voor het modelleren van neerslag-afvoer processen en waterstroming in stedelijke gebieden, inclusief rioleringsstelsels.

SOBEK-Rivers heeft geen neerslag-afvoer module en wordt vooral gebruikt voor het modelleren van waterstroming in rivieren. De Rivers versie van SOBEK is de enige die kan worden gebruikt voor het uitvoeren van morfologische berekeningen en zout intrusie.

Delft-FLS

Delft-FLS is een 2D hydraulisch model dat wordt gebruikt voor het simuleren van overstromingen o.a. als gevolg van dijkdoorbraken. (FLS staat voor FLooding System).

WAQUA

WAQUA is een 2D hydraulisch model dat wordt gebruikt voor gedetailleerde stromingsberekeningen in rivieren en meren.

SOBEK-Overland Flow / Delft-1D2D

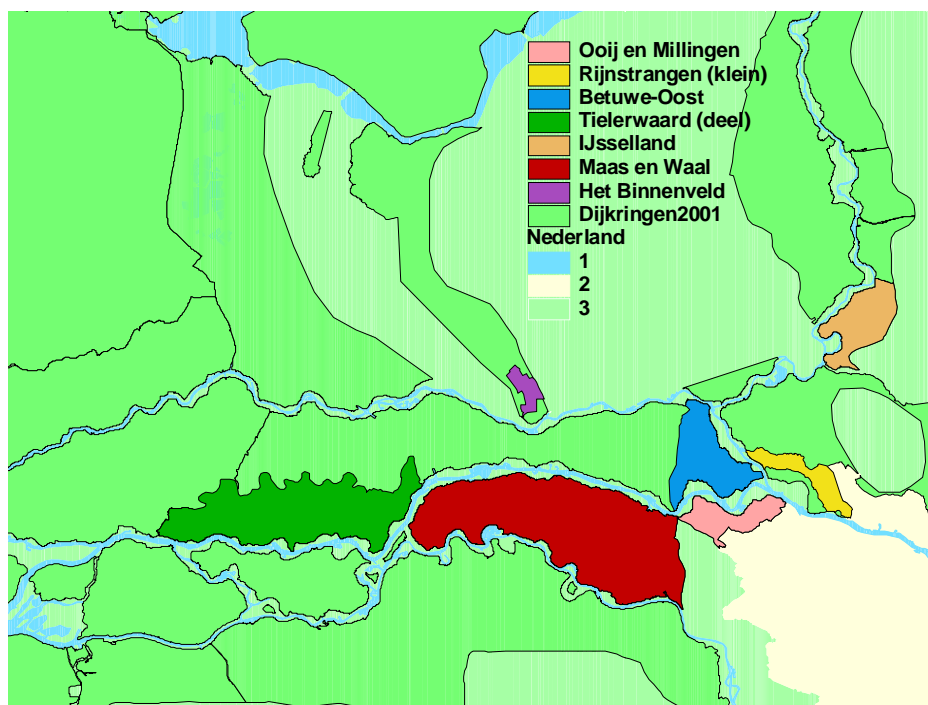
SOBEK-Overland Flow en Delft-1D2D zijn twee verschillende namen voor hetzelfde softwarepakket. Het pakket bestaat uit een combinatie van het 1D SOBEK-Rural model en het 2D Delft-FLS model.

3.2 Noodoverloopgebieden (I)

De rivierkundige effectiviteit van noodoverloopgebieden langs de Rijntakken in Nederland is bestudeerd in twee studies (Crebas et al., 2000; WL | Delft Hydraulics, 2001). Bij deze studies is aandacht besteed aan de volgende gebieden (Figuur 3.1):

- Ooij en Millingen;
- Rijnstrangen (klein);
- Betuwe-Oost;
- Tielerwaard (deel);
- IJsselland;
- Maas en Waal;
- Het Binnenveld.

Ook is aandacht besteed aan de mogelijkheden van noodoverloop op Duits grondgebied nabij de Nederlandse grens. Het betrof het gebied bij Düffelt in combinatie met het gebied Ooij en Millingen. Hoewel 270 tot 330 miljoen m³ geborgen zou kunnen worden is deze optie niet nader bestudeerd omdat een van de uitgangspunten van het onderzoek was dat geen berging op Duits grondgebied mag plaatsvinden.



Figuur 3.1 Ligging mogelijke noodoverloopgebieden onderzocht door Crebas et al. (2000) en WL | Delft Hydraulics (2001).

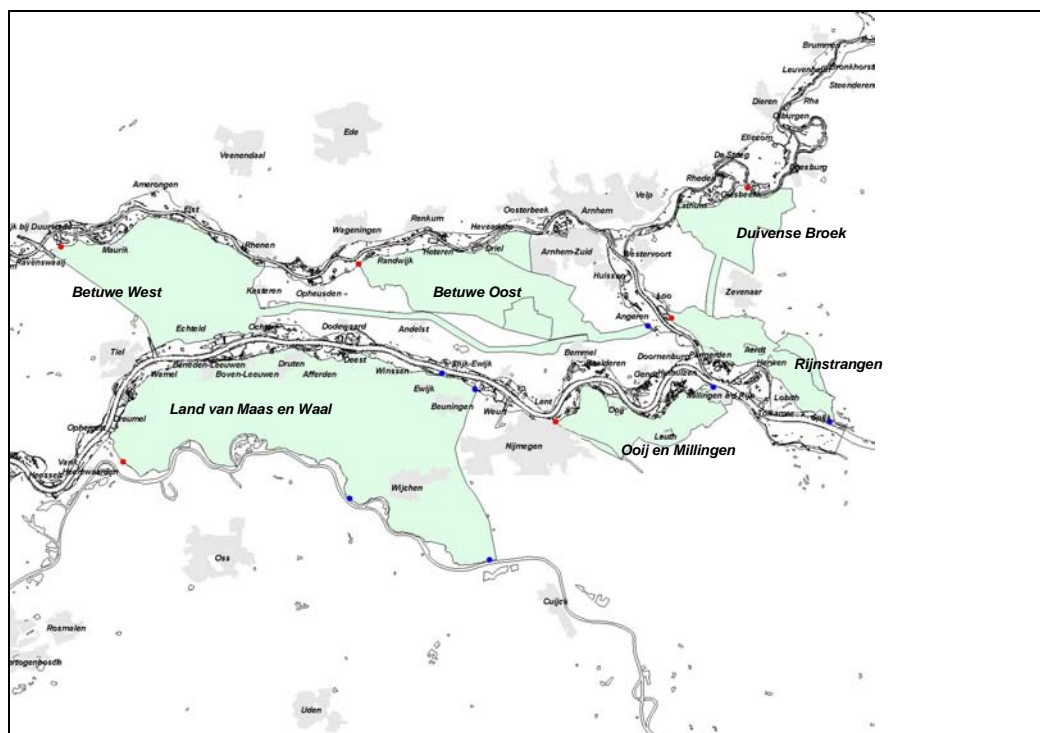
Deze eerste globale rivierkundige effectbepaling is uitgevoerd met het SOBEK-Rivers model van de Rijntakken. Bij dit model kan gekeken worden naar:

- het debiet door de inlaat;
- het geborgen volume;
- de waterstandsverlaging op de Rijntakken.

De manier waarop het noodoverloopgebied volstroomt (voortplanting van het golffront) evenals optredende stroomsnelheden kunnen niet worden bestudeerd. Ruimtelijke verschillen in stroomsnelheid of waterdiepte kunnen evenmin uit de resultaten worden afgeleid.

3.3 Noodoverloopgebieden (II)

Bij vervolgstudies (Heynert et al., 2002) zijn de Tielervwaard, IJsselland en het Binnenveld buiten beschouwing gelaten. Bij deze aanvullende studies is wel gekeken naar de Betuwe-West en Duivense Broek. Een overzicht van de bestudeerde gebieden is gegeven in Figuur 3.2 en Tabel 3.1.



Figuur 3.2 Ligging mogelijke noodoverloopgebieden onderzocht voor de Commissie Noodoverloopgebieden (Heynert et al., 2002).

Tabel 3.1 Kenmerken noodoverloopgebieden (Heynert et al., 2002)

gebied	tak	rivier km	oever	volume (Mm ³)	oppervlak (ha)
Rijnstrangen	BR	858	R	85	2322
Rijnstrangen & Duivense Broek	BR	858	R	149	5159
Ooij en Millingen	WL	868	L	131	3342
Betuwe Oost	PK	873	L	292	7225
Betuwe West	PK	873	L	287	9806
Land van Maas en Waal	WL	889	L	348	21426

Deze aanvullende berekeningen bestaan uit Delft-FLS simulaties om het inundatiepatroon na inzet van het noodoverloopgebied te simuleren en SOBEK berekeningen om het leeglopen van het gebied te onderzoeken na afloop van het hoogwater. Delft-FLS is een 2D overstromingsmodel. De hoogteligging van de noodoverloopgebieden is geschematiseerd in een 100 x 100 m² grid. De rand van het model wordt gevormd door het inlaatpunt en de omringende dijken. Het inlaatdebiet is als tijdserie op de bovenrand van het model gezet. Infiltratie en verdamping worden niet meegenomen in de modellering. De hoeveelheden water die met deze processen gemoeid zijn zijn verwaarloosbaar ten opzichte van de hoeveelheid water die ingelaten wordt vanuit de Rijn. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de met FLS doorgekende varianten en de belangrijkste resultaten.

Tabel 3.2 Doorgeredende noodoverloopgebieden (Heynert et al., 2002)

Variant	Opp. (ha)	Vol. (10 ⁶ m ³)	Locatie inlaat	Locatie uitlaat	Max. Waterdiepte (m)	Max. snelheid (m/s)	Opm.
Rijnstrangen - NL	2322	85	BR 858	PK 873	2-7 (3.7)	<0.5, lokaal tot 2 m/s	*1
Rijnstrangen - NL&D	2791	96	BR 858	PK 873			*2
Rijnstrangen - NL, met Driedorpenpolder (zonder bescherming)	3033	108	BR 858	PK 873	2-7 (3.6)	<0.5, lokaal 1 m/s	
Rijnstrangen - NL, met Driedorpenpolder (met bescherming)	2876	103	BR 858	PK 873	2-7 (3.6)	<0.5, lokaal 1 tot 2 m/s	
Duivense Broek (zonder bescherming)	2837	64	BR 858	IJ 898	1-4 (2.3)		*3
Duivense Broek (met bescherming)	2518	62	BR 858	IJ 898	1-4 (2.5)		
Ooij en Millingen (zonder bescherming)	3342	131	W 868	W 883	1-7 (3.9)	<0.5, lokaal 1 tot 2 m/s	
Ooij en Millingen (met bescherming)	2901	117	W 868	W 883	2-7 (4.0)	<0.5, lokaal 1 tot 2 m/s	
Betuwe Oost (zonder bescherming)	7225	292	PK 873	NR 902	2-7 (4.0)	<0.25, deels 0.25-0.5, inlaat >0.5	
Betuwe Oost (met bescherming)	6123	253	PK 873	NR 902	2-7 (4.1)		
Betuwe West (zonder bescherming)	9806	287	PK 873	NR 928	0-7 (2.9)	<0.25, deels 0.25-0.5, toevoerkanaal vaak >0.5	*4
Betuwe West (met bescherming)	7429	232	PK 873	NR 928	2-7 (3.1)		
Land van Maas en Waal (zonder bescherming)	21426	348	W 889	M 204	0-5 (1.6)	<0.25, soms 0.25-0.5	
Land van Maas en Waal (met bescherming)	11485	274	W 889	M 204	1-5 (2.4)		
Compartiment in Land van Maas en Waal	3700	92	W 892	M 189	(2.5)		

*1 alleen in Nederland; *2 ook Duits grondgebied; *3 water wordt ingelaten via Rijnstrangen, toevoerkanaal naar dit gebied maakt geen onderdeel uit van het model; *4 toevoerkanaal vanaf PK

Voor alle mogelijke noodoverloopgebieden is de uitstroming onderzocht (Heynert et al., 2002). Hierbij is aangenomen dat het gebied in eerste instantie onder vrij verval loost. Pas wanneer lozing onder vrij verval onmogelijk is geworden worden pompen ingezet. De belangrijkste conclusies die uit deze analyses kunnen worden getrokken zijn:

- De inundatie (vollopen) van een noodoverloopgebied duurt 3-5 dagen;
- De berging duurt minimaal 1-2 dagen (geen instroming noch uitstroming);
- De minimale periode tussen het moment waarop de inundatie begint en het moment waarop het leeglopen kan aanvangen duurt orde 1 week;
- De duur van vrije uitstroming is 4 weken met uitzondering van het Land van Maas en Waal waar vrije uitstroming 2 weken in beslag neemt (gevolg van steilere recessiecurve Maas);
- De duur van vrije uitstroming wordt met name bepaald door de vorm van de afvoergolf en niet door de topografie van het gebied;
- Het resterende volume wordt in ongeveer 1 week weg gepompt.

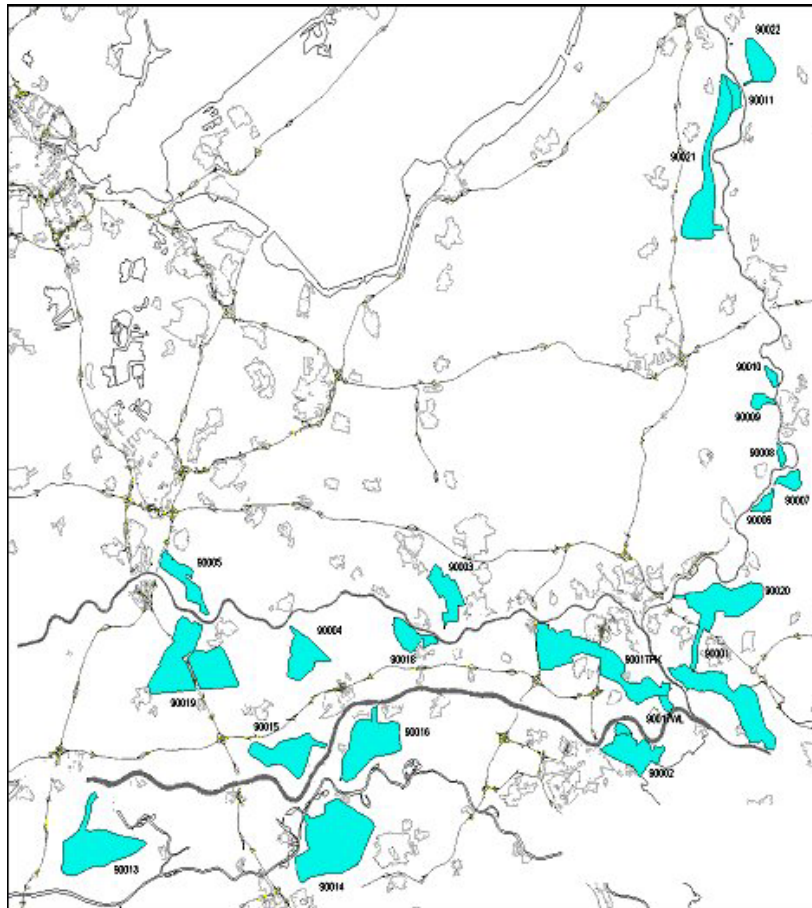
3.4 Retentiegebieden

In het kader van de Spankrachtstudie is gekeken naar de inzet van retentiegebieden. De belangrijkste kenmerken van de bestudeerde gebieden zijn vermeld in Tabel 3.3. De ligging van de verschillende gebieden is weergegeven in Figuur 3.3 (WL | Delft Hydraulics, 2002).

Tabel 3.3 Kenmerken retentiegebieden onderzocht in het kader van de spankrachtstudie (WL | Delft Hydraulics, 2002)

code	naam	tak	rivier km	oever	volume (Mm ³)	oppervlak (ha)
90001g	Rijnstrangen + Duivense Broek	BR	860.0	R	269.0	5481
90001k	Rijnstrangen	BR	860.0	R	168.8	2891
90002g	Ooijpolder groot	WL	874.0	L	97.8	1684
90002k	Ooijpolder klein	WL	874.0	L	88.7	1519
90003	Het Binnenveld	NL	907.0	R	55.7	1128
90004	Rijswijkse Veld	NL	929.0	L	66.8	1312
90005	Polder Blokhoven	NL	940.0	R	57.7	971
90006	Spaensweerd	IJ	913.5	R	8.3	286
90007	Bakerwaard	IJ	917.5	R	11.2	372
90008	Cortenoever	IJ	919.5	L	3.5	138
90009	Overmarsch	IJ	929.0	L	7.8	270
90010	Voorsterklei	IJ	931.0	L	3.9	165
90011	Wapenveld	IJ	968.0	L	26.8	742
90013	Babylonienbroek	WL	951.0	L	187.4	3008
90014	Rosmalensche Hoeven	Maas	209.0	L	194.9	4684
90015	De Steendert	WL	919.0	R	132.1	1807
90016	De Smalmorgen	WL	911.0	L	192.0	2602
90017pk	Kamervoort uit PK	PK	873.0	L	230.2	3613
90017wl	Kamervoort uit WL	WL	872.0	R	284.8	3737
90018	De Mars	NL	907.0	L	33.4	812
90019g	Lage Prijs groot	NL	942.0	L	251.0	4243
90019k	Lage Prijs klein	NL	942.0	L	152.5	2533
90020	Duivense Broek	IJ	884.0	R	92.4	2393
90021	Emsterbroek	IJ	952.0	L	118.3	2811
90022	Zuthemerbroek	IJ	970.0	R	47.5	1016

Het Rijnstrangengebied, de Ooijpolder en de Duivense Broek zijn zowel bestudeerd in het kader van de noodoverloop- als de retentiegebieden. Opvallend is het verschil in volume dat voor beide studies is vermeld voor het Rijnstrangengebied. Het verschil is deels te wijten aan het verschil in oppervlak en deels in de maximale waterstand in het gebied. Bij de studie naar noodoverloopgebieden is de maximale opvulhoogte gelijk gesteld aan het niveau 50 cm beneden de minimale kruinhoogte in het gebied (NAP +15.92 m). Bij de Spankrachtstudie is aangenomen dat de vulwaterstand gelijk is aan de MHW ter plaatse van de inlaat (NAP +17.95 m). Dit verschil in werkwijze resulteert in relatief grote bergingscapaciteiten in het geval van de Spankrachtstudie (retentiegebieden).



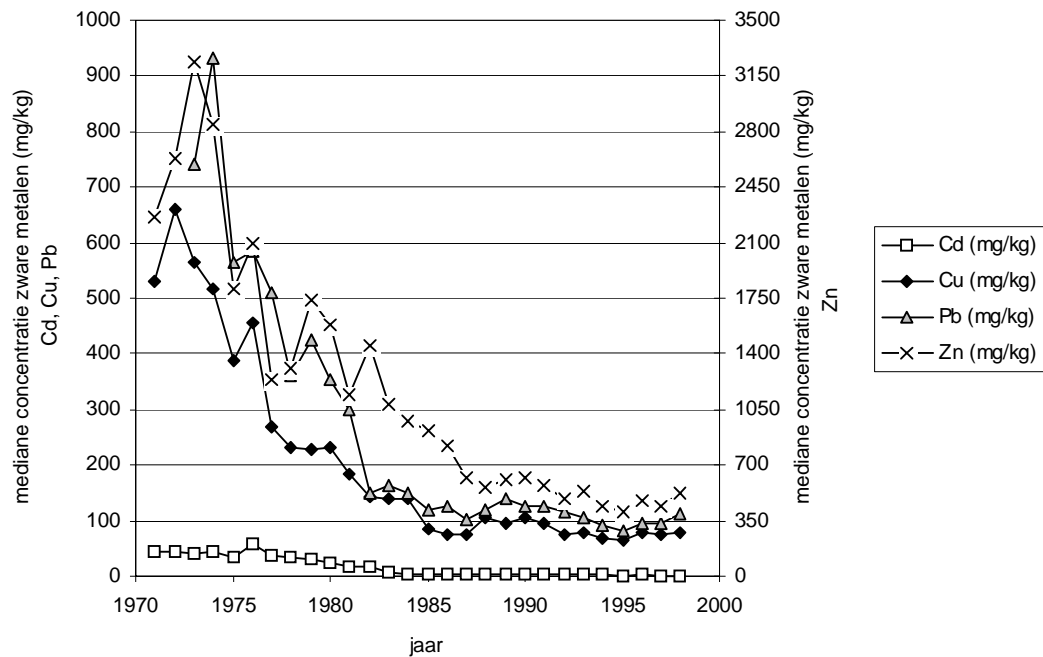
Figuur 3.3 Ligging retentiegebieden

Om het effect van de inzet van retentiegebieden op de rivier te bestuderen is gebruik gemaakt van WAQUA (2D model). Strooming in het gebied zelf is echter gemodelleerd met een 1D SOBEK model. Alleen voor het Rijnstrangengebied zijn 2D FLS berekeningen uitgevoerd. Op basis van deze berekeningen is geconcludeerd dat het voor het effect op de rivier niet uitmaakt of je het retentiegebied 1D met SOBEK of 2D modelleert. Daarom zijn voor alle andere gebieden 1D berekeningen uitgevoerd om de instromingen te bepalen. Deze instroming is vervolgens als uitstroming op het WAQUA model voor de Rijntakken gezet om het hydraulische effect op de rivier te bepalen.

4 Transport van zware metalen en zwevendstof

4.1 Jaarvracht zware metalen

Sinds 1971 worden door Rijkswaterstaat metingen uitgevoerd om de zware metalen belasting van de Rijn te Lobith vast te stellen. Uit deze metingen blijkt dat de Rijn in 1971 ongeveer 490 ton Cd, 1995 ton Cu, 2000 ton Pb, en 12340 ton Zn aanvoerde (Dijkzeul, 1982). In de periode 1977-1981 bedroeg de jaarlijkse vracht 117 ton Cd, 1110 ton Cu, 1340 ton Pb en 8470 ton Zn (Salomons et al., 1982). In 1993 waren deze vrachten nog verder afgenomen tot 6.4 ton Cd, 240 ton Cu, 340 ton Pb en 1560 ton Zn (Rijkswaterstaat, 1994). Deze afname in jaarlijkse vracht komt ook tot uiting in de mediane waarde van de jaarlijkse concentraties zware metalen gemeten aan het zwevendstof (Figuur 4.1).



Figuur 4.1 Concentraties aan Cd, Cu, Pb en Zn gebonden aan zwevendstof in de Rijn te Lobith tussen 1971 en 1998 (data Rijkswaterstaat)

4.2 Variaties in zware metalen concentraties

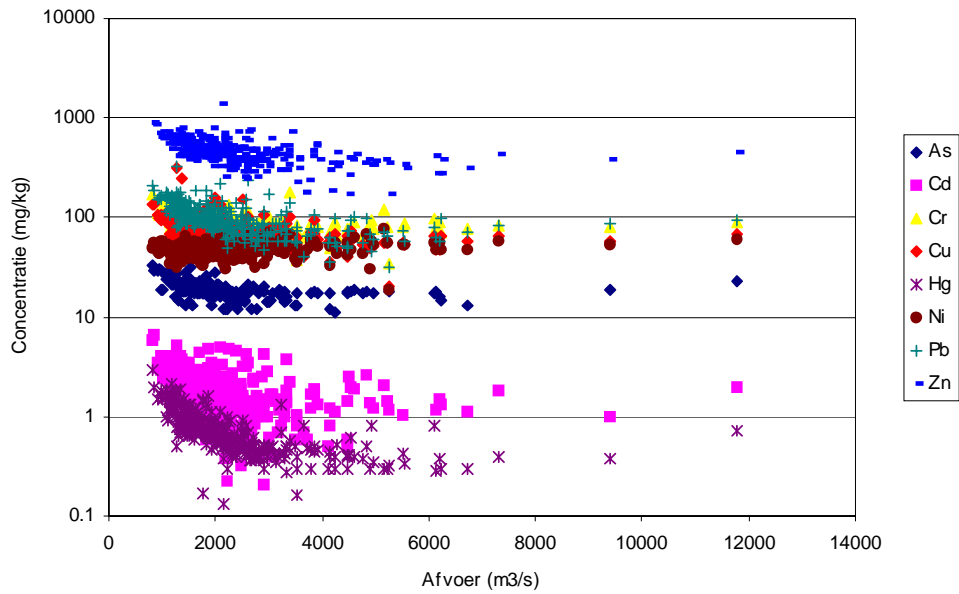
Temporeel

Bovenstaand overzicht geeft reeds aan dat concentraties aan zware metalen zoals gemeten bij Lobith niet constant zijn geweest in de tijd. Reeds in 1963 zijn programma's gestart om de vervuiling van de Rijn tegen te gaan. Vanaf het begin van de jaren 70 is hierdoor een afname in de zware metalen belasting waarneembaar (Figuur 4.1).

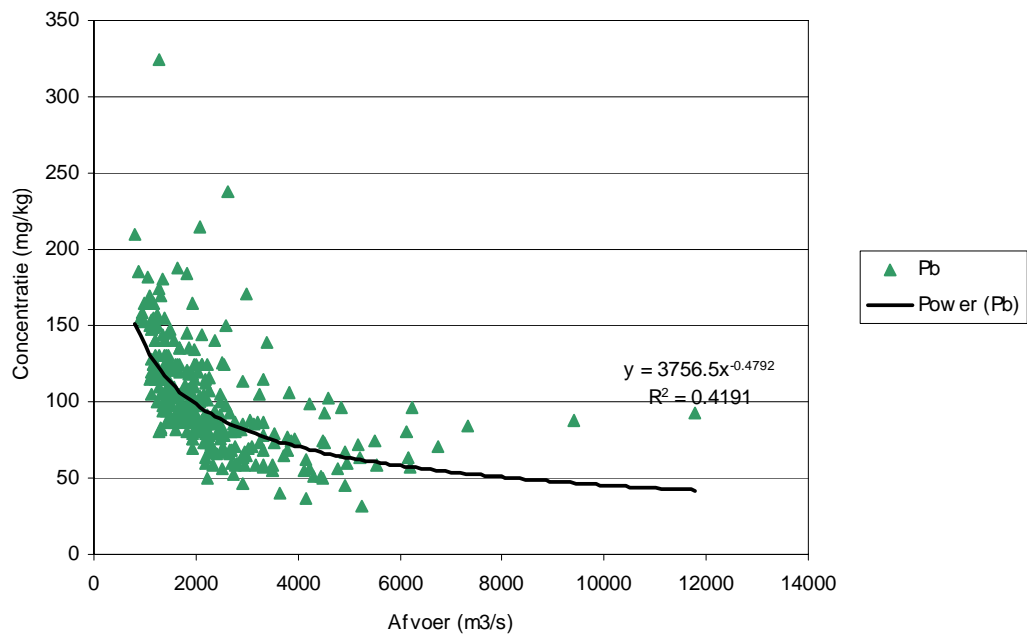
Naast langjarige variaties bestaan er ook variaties in concentraties in zware metalen die over een kortere periode optreden. Deze laatste variaties worden onder meer veroorzaakt door fluctuaties in de afvoer van de rivier (zie o.a. Zwolsman et al., 2000). Tijdens hoogwater neemt het aandeel aan slib dat op de oevers van de rivier is geërodeerd toe. Dit slib is relatief schoon. Dit resulteert in lagere concentraties aan zware metalen. Het verloop van zware metalen concentraties als functie van de afvoer zoals gemeten bij Lobith is te zien in Figuur 4.2. Figuur 4.3 toont gemeten lood concentraties als functie van de afvoer. De functie die door de meetpunten is gefit geeft redelijke schattingen bij lage afvoeren. Bij hoge afvoeren wordt de concentratie echter onderschat. Omdat voor deze studie juist de concentraties bij hoge afvoeren belangrijk zijn is besloten gebruik te maken van gemiddelde concentraties per afvoerklasse. Deze staan vermeld in Tabel 4.1. Gezien het beperkte aantal waarnemingen bij hoge afvoeren (Figuur 4.2) is voor afvoeren van meer dan 5000 m³/s te Lobith een constante gemiddelde concentratie gegeven in Tabel 4.1. Omdat de afname in zware metalen gehalten sinds 1987 gering is (Figuur 4.1) mogen de waarden uit Tabel 4.1 representatief worden gesteld voor de huidige situatie.

Tabel 4.1 Gemiddelde zware metalen concentraties (mg/kg) als functie van de afvoer bij Lobith (data Rijkswaterstaat, periode 1988-2002)

Afvoer (m ³ /s)			Metaalconcentratie (mg/kg)							
min.	max.	gem.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
500	1000	923	27	4.1	132	112	1.9	51	171	741
1000	1500	1300	22	2.5	96	93	1.1	47	129	560
1500	2000	1756	19	1.9	86	79	0.8	46	107	496
2000	2500	2239	17	1.7	83	70	0.6	48	92	460
2500	3000	2721	17	1.5	79	67	0.5	48	85	417
3000	3500	3250	16	1.4	89	67	0.5	52	81	430
3500	4000	3711	16	1.2	76	62	0.4	50	71	387
4000	4500	4286	15	0.9	72	53	0.4	48	59	313
4500	5000	4755	18	1.9	79	57	0.5	52	74	377
5000	12000	6663	17	1.4	82	55	0.4	53	72	346



Figuur 4.2 Zware metalen concentraties gemeten aan het sediment als functie van de afvoer (data Rijkswaterstaat, meetpunt Lobith, periode 1988 - 2002)



Figuur 4.3 Lood concentraties gemeten aan het sediment als functie van de afvoer (data Rijkswaterstaat, meetpunt Lobith, periode 1988 - 2002)

Spatieel

De verhouding tussen opgeloste en gebonden zware metalen kan in stroomafwaartse richting veranderen als gevolg van verschuiving van het evenwicht tussen de opgeloste en gebonden fractie metalen.

Langs de Nederlandse Rijntakken speelt dit met name in het meest benedenstrooms gelegen gebied waar sprake kan zijn van een veranderde pH waarde, toegenomen zout concentraties en menging met mariene sedimenten. Omdat noodoverloop- en retentiegebieden zich over het algemeen verder stroomopwaarts bevinden kan dit effect buiten beschouwing worden gelaten.

4.3 Classificatie van vervuild sediment

Om de mate van vervuiling van sediment vast te stellen in het kader van onderzoeken naar bodemvervuiling heeft de Nederlandse Overheid een toetsingskader opgesteld:

- streefwaarde: zware metalen concentraties voorkomend in een onvervuilde bodem;
- grenswaarde: boven deze waarde is aanvullend onderzoek noodzakelijk;
- toetsingswaarde: sediment monsters met concentraties aan zware metalen boven deze grens worden beschouwd als zwaar vervuild;
- interventiewaarde: vervuiling boven deze grens maakt interventie maatregelen noodzakelijk.

Deze waarden zijn gegeven in Tabel 4.2.

Bij bodemsaneringsprojecten wordt vaak gesproken over vervuilingklassen. Slib met een vervuilingswaarde tussen de streefwaarde en de grenswaarde wordt beschouwd als “klasse I” slib. Tussen de grenswaarde en de toetsingswaarde is sprake van klasse II slib. Tussen de toetsingswaarde en de interventiewaarde is sprake van klasse III slib. Klasse IV slib tenslotte heeft vervuilingswaarde die boven de interventiewaarde vallen.

De mate van vervuiling van het sediment in noodoverloop- en retentiegebieden is niet alleen bepalend voor mogelijke milieu- en gezondheidsrisico's, maar ook voor de kosten die gemoeid zijn met het opruimen van het sediment.

Tabel 4.2 Grenswaarden voor vervuild sediment (in mg/kg droog materiaal) in een standaard bodem bestaande uit 25% klei en 10% organisch materiaal (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998).

Metaal	concentratie (mg/kg)			
	streefwaarde	grenswaarde	toetsingswaarde	interventiewaarde
Cd	0.8	2	7.5	12
Hg	0.3	0.5	1.6	10
Cu	36	36	90	190
Ni	35	35	45	210
Pb	85	530	530	530
Zn	140	480	720	720
Cr	100	380	380	380
As	29	55	55	55

Zware metalen binden zich bij voorkeur aan fijn sediment (klei en silt) en organisch materiaal. Om vervuilde bodems onderling te vergelijken wordt daarom aangeraden de vervuilingsgraad om te rekenen naar de vervuilinggraad voor een zogenaamde standaard bodem welke bestaat uit 25% klei en 10% organische stof (zie ook de titel van Tabel 4.2).

4.4 Zware metalen in uiterwaard bodems

Middelkoop (1997) heeft onderzoek verricht naar de accumulatie van zware metalen in uiterwaard bodems. Hij vermeld concentraties aan zware metalen variërend van 30 tot 130 mg/kg voor Cu, 70 tot 490 mg/kg voor Pb, en 170 tot 1400 mg/kg voor Zn (omgerekend naar een standaard bodem). De laagste vervuilingsgraad wordt gemeten in uiterwaarden langs de Nederrijn-Lek en IJssel die worden gekenmerkt door een lage overstromingsfrequentie. De hoogste concentraties worden gemeten op relatief laag gelegen uiterwaarden zonder zomerkade welke bij lage afvoeren al overstromen.

Tijdens het hoogwater van 1993 heeft Middelkoop (1997) analyses uitgevoerd om de zware metalen concentraties te bepalen van het vers afgezette sediment. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4.3. Na verdere verwerking van de resultaten concludeerde Middelkoop (1997) dat de variaties in gemeten zware metalen concentraties vooral het gevolg zijn van variaties in organisch materiaal en kleigehalte. De maximum waarde zoals vermeld in Tabel 4.3 is dus representatief voor relatief fijn sediment dat in suspensie wordt vervoerd, homogeen verdeeld over de waterkolom, en dat bij lage stroomsnelheden wordt afgezet. De minimum waarden zijn representatief voor relatief grof sediment (relatief veel zand) dat over het algemeen dicht bij de bodem van de rivier wordt getransporteerd en dat dicht bij het instroompunt van uiterwaarden of bassins wordt afgezet. Omdat uiterwaarden langs de Waal onder water komen te staan bij afvoeren van ongeveer 5000 m³/s of meer te Lobith en de variaties in concentraties aan zware metalen bij deze afvoeren gering zijn (Tabel 4.1) mag worden aangenomen dat deze concentraties ook min of meer representatief zullen zijn voor sediment dat bij extreem hoge afvoeren wordt afgezet in noodoverloop- en retentiegebieden. Wanneer de gemiddelde waarden uit Tabel 4.3 worden vergeleken met de zware metalen concentraties gemeten aan het zwevendstof bij afvoeren van meer dan 5000 m³/s te Lobith (Tabel 4.1) lijkt deze aanname correct.

Tabel 4.3 Lutumpercentage, gehalte organisch materiaal, en zware metalen concentraties gemeten in sediment afgezet op uiterwaarden langs de Waal tijdens het hoogwater van december 1993 (bron: Middelkoop, 1997).

	minimum	Waarde maximum	gemiddeld
klei (%)	5.7	47.9	27.3
organisch materiaal (%)	1.5	12.2	6.5
Cd (mg/kg)	0.3	3.0	1.9
Cu (mg/kg)	10.4	81.5	57.1
Pb (mg/kg)	26.4	126.0	89.1
Zn (mg/kg)	151.7	461.7	344.2

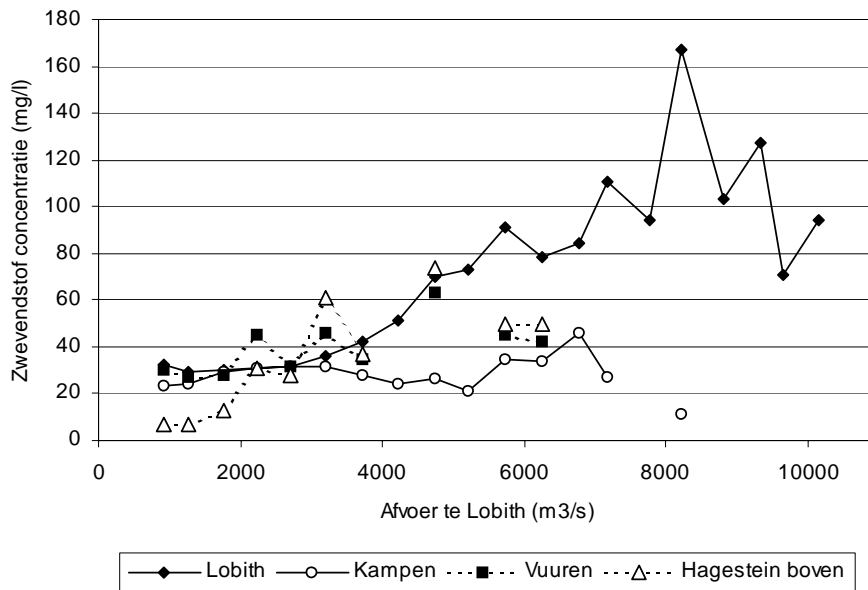
Op dit moment door Alterra en Universiteit Utrecht (vakgroep Fysische Geografie) aanvullend onderzoek uitgevoerd naar sedimentatie op een zestal uiterwaarden langs Waal, Lek en IJssel. Alterra besteedt met name aandacht aan de hoeveelheden afgezet slib en aan de textuur van het afgezette materiaal. Universiteit Utrecht gaat dieper in op de kwaliteitsaspecten (mondellinge mededeling Makaske). Resultaten zijn nu nog niet beschikbaar.

4.5 Zwevendstof in de rivier

Accumulatie van zware metalen wordt niet alleen bepaald door de concentraties aan zware metalen gebonden aan het zwevendstof, maar ook door de hoeveelheid zwevendstof dat beschikbaar is voor sedimentatie. Zwevendstof concentraties op de Rijn nemen toe naarmate de afvoer toeneemt. Figuur 4.4 toont de relatie zoals gemeten op verschillende locaties langs de Rijntakken in Nederland. Asselman (1997; 2000b) heeft op basis van zwevendstof metingen uitgevoerd door de Bundesanstalt für Gewässerkunde in Duitsland te Rees, enkele kilometers bovenstreams van Lobith, de volgende relatie opgesteld om zwevendstof concentraties te kunnen schatten als functie van de afvoer op de Rijn:

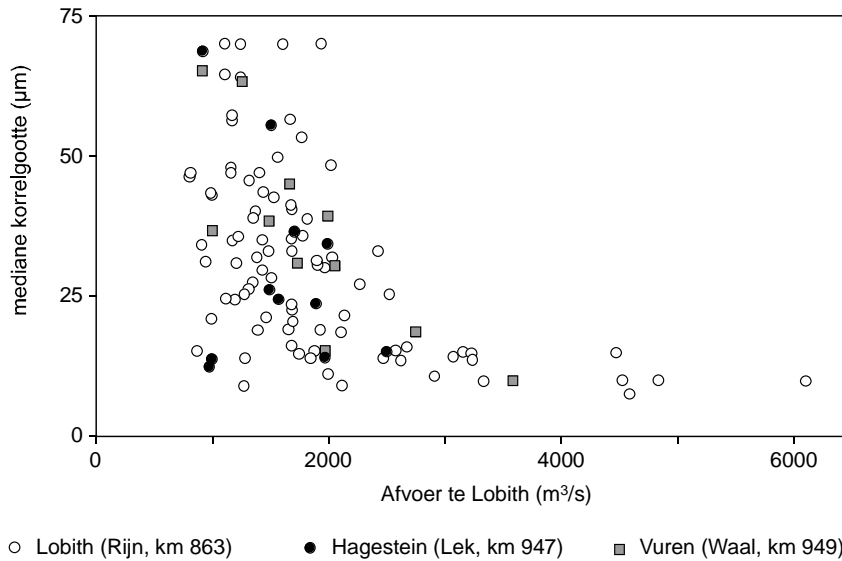
$$C = 29.3 + 1.96 \cdot 10^{-6} \cdot Q^{1.93} \tag{4.1}$$

waarbij C de zwevendstof concentratie is in mg/l en Q de afvoer op de Rijn in m³/s. Deze relatie kan worden gebruikt om de absolute aanvoer van zwevendstof naar noodoverloop- en retentiegebieden te berekenen nabij Lobith. Voor verder stroomafwaarts gelegen gebieden dient rekening te worden gehouden met een afname aan zwevendstof als gevolg van sedimentatie op uiterwaarden. Uit eerdere studies is echter gebleken dat sedimentatie bij extreem hoge afvoeren (10.000 m³/s te Lobith of meer) verwaarloosbaar is. Stroomsnelheden boven de uiterwaarden zijn dan te hoog voor sedimentatie van zwevendstof.



Figuur 4.4 Zwevendstof concentraties gemeten op verschillende locaties langs de Rijn in Nederlands, als functie van de afvoer te Lobith (data Rijkswaterstaat)

De samenstelling van het zwevendstof is gegeven in Figuur 4.5. Hoewel de variatie groot is kan worden gesteld dat het zwevendstof dat boven in de waterkolom wordt getransporteerd fijner wordt wanneer de afvoer toeneemt. Bij afvoeren boven de 3000 m³/s te Lobith lijkt de mediane korrelgrootte van het in suspensie getransporteerde sediment constant te blijven. Aangenomen wordt dat dit ook bij afvoeren boven de 6000 m³/s het geval is. Echter, omdat geen meetgegevens beschikbaar zijn voor zwevendstof monsters genomen bij extreem hoge afvoer is deze laatste aanname onzeker.



Figuur 4.5 Mediane korrelgootte van het zwevendstof getransporteerd op verschillende locaties in de Rijn in Nederlands, als functie van de afvoer te Lobith (data Rijkswaterstaat)

In studies naar sedimentatie van zwevendstof is de valsnelheid van het sediment één van de belangrijkste parameters. Echter, wanneer de mediane korrelgroottes zoals weergegeven in Figuur 4.5 worden gebruikt om de valsnelheid te schatten zal dit leiden tot een onderschatting van de sedimentatie. Deze onderschatting wordt veroorzaakt door flocculatie. Door Uiterwijk Winkel (1975) is reeds aangetoond dat flocculatie op de Rijn een belangrijke rol speelt. De gemiddelde vlok-grootte bedroeg ongeveer 20 tot 80 µm, maar vlokken met een grootte van 500 tot 2000 µm zijn eveneens aangetroffen. Om de valsnelheid van het sediment in de ruimte (in lengterichting langs de Rijntakken) en in de tijd (als functie van de afvoer) te kunnen laten variëren is niet alleen meer informatie nodig m.b.t. de absolute korrelgrootteverdeling van het sediment, maar ook van de effectieve valsnelheid als gevolg van flocculatie. Omdat deze informatie niet beschikbaar is wordt in deze studie gebruik gemaakt van de valsnelheden van het sediment welke zijn gebruikt in de studie 'Slibmodellering in RvR' (Asselman, 1999a). Deze valsnelheid is gebaseerd op modelcalibratie en bedraagt $7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Toepassing van deze valsnelheid in het slibsedimentatiemodel voor de Nederlandse uiterwaarden leverde goede resultaten op (Asselman, 1999a).

5 Sedimentatie in noodoverloopgebieden – theorie

5.1 Inleiding

Sedimentatie in noodoverloopgebieden is afhankelijk van de volgende factoren:

- sedimentaanbod;
- type inlaatwerk;
- overstromingsduur;
- stroomsnelheden in het noodoverloop- of retentiegebied.

De hoeveelheden zware metalen die met het sediment in het gebied terechtkomen zijn afhankelijk van:

- hoeveelheden afgezet sediment;
- kwaliteit van het afgezette sediment.

Deze factoren worden in onderstaande tekst kort toegelicht.

5.2 Sedimentaanbod

Het totale volume aan water dat het gebied instroomt, bepaalt de absolute hoeveelheid sediment die aangevoerd wordt. Bij gelijke sedimentconcentraties in het water neemt de aanvoer van sediment naar een noodoverloop- of retentiegebied evenredig toe met het geborgen watervolume. Andersom geldt dat bij een gelijk bergingsvolume het aanbod van sediment toe neemt naarmate de concentraties hoger zijn.

De sedimentconcentratie in het ingelaten water is afhankelijk van de concentratie op de rivier en de hoogte waarop het water wordt ingelaten. De gemiddelde sedimentconcentratie op de rivier is veelal een functie van de afvoer. In hoofdstuk 4 is reeds gebleken dat zwevendstofconcentraties toenemen naarmate de afvoer hoger is. Voor zwevendstof kan worden aangenomen dat het homogeen verdeeld is over de verticaal. Voor het grovere materiaal, vooral zand, geldt dat concentraties nabij de bodem hoger zijn dan boven in de waterkolom. De hoogte waarop water ingelaten wordt is dus vooral bepalend voor de hoeveelheid zand die kan worden afgezet en in mindere mate voor de hoeveelheid slib.

5.3 Type inlaatwerk

Heynert et al. (2001; 2002) beschouwt 4 type inlaatwerken:

- de overlaat met beweegbare kruin is relatief breed en heeft een hoge ligging;
- het inlaatwerk met schuiven is relatief smal en heeft een lage ligging;
- een harde drempel in het dijklichaam is een variant op de overlaat met beweegbare kruin, hierbij wordt de drempel ‘verstopt’ in de dijk. De drempel wordt vrijgemaakt op het moment dat het noodoverloopgebied ingezet dient te worden;
- een overlaat met harde kruin is een permanente verlaging in de dijk, de inzet kan niet door de mens worden geregeld maar wordt puur door de waterstand op de rivier bepaald.

Het effect van het type inlaatwerk op de accumulatie van zand en slib wordt vooral bepaald door de hoogte van het inlaatwerk. Hoe lager de ligging van de inlaat, hoe meer zandig sediment het gebied in wordt getransporteerd. Bij een inlaatwerk met schuiven zal dus meer zand in het gebied worden afgezet dan bij de overige typen inlaatwerken. De hoeveelheid slib die in het gebied wordt afgezet is vrijwel onafhankelijk van het type inlaatwerk in verband met de homogene verdeling over de verticaal.

5.4 Overstromingsduur en stroomsnelheden in het gebied

In 1999 en 2000 heeft WL in opdracht van RIZA studies uitgevoerd naar veranderingen in sedimentatie op uiterwaarden als gevolg van inrichtingsmaatregelen zoals voorgesteld onder meer in Ruimte voor Rijntakken (Asselman, 1999a; 1999b; 2001). In deze studies is gebruik gemaakt van een 1D slibsedimentatiemodel gebaseerd op de methode van Chen (1975). Volgens deze methode is de efficiëntie waarmee sediment in een ‘bassin’ bezinkt een functie van het debiet door het bassin, het oppervlak van het bassin en de valsnelheid van het sediment. Het debiet door het bassin en het oppervlak van het bassin zijn een maat voor de verblijftijd van het water in het bassin. Afhankelijk van de valsnelheid van het sediment kan in deze periode een bepaald percentage van het sediment bezinken.

Naast de verblijftijd speelt de stroomsnelheid in het bassin een belangrijke rol. Indien de maximum stroomsnelheid voor depositie wordt overschreden zal geen sediment worden afgezet, ongeacht de verblijftijd van het water in het bassin. Bij het modelleren van slibsedimentatie op de uiterwaarden langs de Rijntakken in Nederland bleek een bodemschuifspanning van ongeveer 2 N/m² kritiek te zijn. Boven deze schuifspanning trad geen sedimentatie meer op. Dit komt overeen met een stroomsnelheid orde een halve meter per seconde.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de verschillende fasen die herkend kunnen worden bij de inzet van noodoverloopgebieden. Per fase is de duur aangegeven en een schatting van de stroomsnelheid. De stroomsnelheden zijn geschat aan de hand van de maximum snelheden vermeld in Tabel 3.2.

Tabel 5.1 Schatting van verblijftijd en stroomsnelheid in noodoverloopgebieden

Fase	Duur	Stroomsnelheid
Inundatie	3-5 dagen	≤ 0.5 m/s
Berging	1-2 dagen	0 m/s
Lozen onder vrij verval	2-4 weken	$\ll 0.5$ m/s
Leegpompen	<1-2 weken	$\ll 0.5$ m/s

Op basis van Tabel 3.2 en Tabel 5.1 kan worden geconcludeerd dat de totale overstromingsduur van noodoverloopgebieden gemiddeld ongeveer 6 weken bedraagt. Gedurende deze periode zijn de stroomsnelheden, op enkele locaties nabij de inlaat en vernauwingen na, lager dan 0.5 m/s. Dit betekent dat gedurende de hele periode sedimentatie op kan treden.

6 Sedimentatie in noodoverloopgebieden – modellering

6.1 Inleiding

Voor twee noodoverloopgebieden zijn inventariserende sedimentatieberekeningen uitgevoerd. Dit zijn:

- het Rijnstrangengebied;
- Ooij en Millingen.

In beide gevallen is uitgegaan van de variant zonder bescherming van in het gebied gelegen woonkernen. De gevolgde werkwijze wordt hieronder kort toegelicht.

6.2 Waterbeweging

De waterbeweging door de bestudeerde noodoverloopgebieden is gesimuleerd met Delft-FLS. Delft-FLS geeft ruimtelijke variaties in waterdiepte, waterstand en stroomsnelheden weer als functie van de tijd. Dezelfde modelschematisatie, randvoorwaarden en software versies zijn gebruikt als bij de studie voor de Commissie Noodoverloopgebieden. Omdat voor deze eerder uitgevoerde studie alleen gekeken is naar de maximale waterdiepte en de maximale stroomsnelheden zijn de simulaties opnieuw uitgevoerd. Bij deze nieuwe simulaties zijn de modelresultaten in tijdstappen van 2 uur weggeschreven.

6.3 Sedimentaansvoer

De aansvoer van sediment naar de noodoverloopgebieden is bepaald met behulp van vergelijking 4.1. De noodoverloopgebieden worden ingezet onder MHW condities, ofwel een afvoer te Lobith van $16000 \text{ m}^3/\text{s}$. De bijbehorende zwevendstof concentratie wordt geschat op 284 mg/l . Echter, omdat een afvoer van $16000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith ver buiten het bereik ligt van de metingen waarop vergelijking 4.1 is gebaseerd is de onzekerheid rondom deze gemiddelde schatting groot. Om het effect van deze onzekerheid mee te nemen in de modelberekeningen zijn simulaties uitgevoerd met de volgende zwevendstofconcentraties:

- 284 mg/l : gemiddelde schatting;
- 100 mg/l : verwachte ondergrens (Figuur 4.4);
- 400 mg/l : verwachte bovengrens (overgenomen uit Cuypers (2002)).

De valsnelheid van het sediment is gebaseerd op Asselman (1999) en bedraagt $7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. De concentraties aan zware metalen die gebonden zijn aan het sediment zijn gelijk gesteld aan de gemiddelde concentraties gemeten bij afvoeren van meer dan $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith. Deze zijn kort samengevat in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Zware metalen concentraties gebonden aan zwevendstof bij hoge afvoeren op de Rijn te Lobith.

	Metaal							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
concentratie (mg/kg)	17	1.4	82	55	0.4	53	72	346

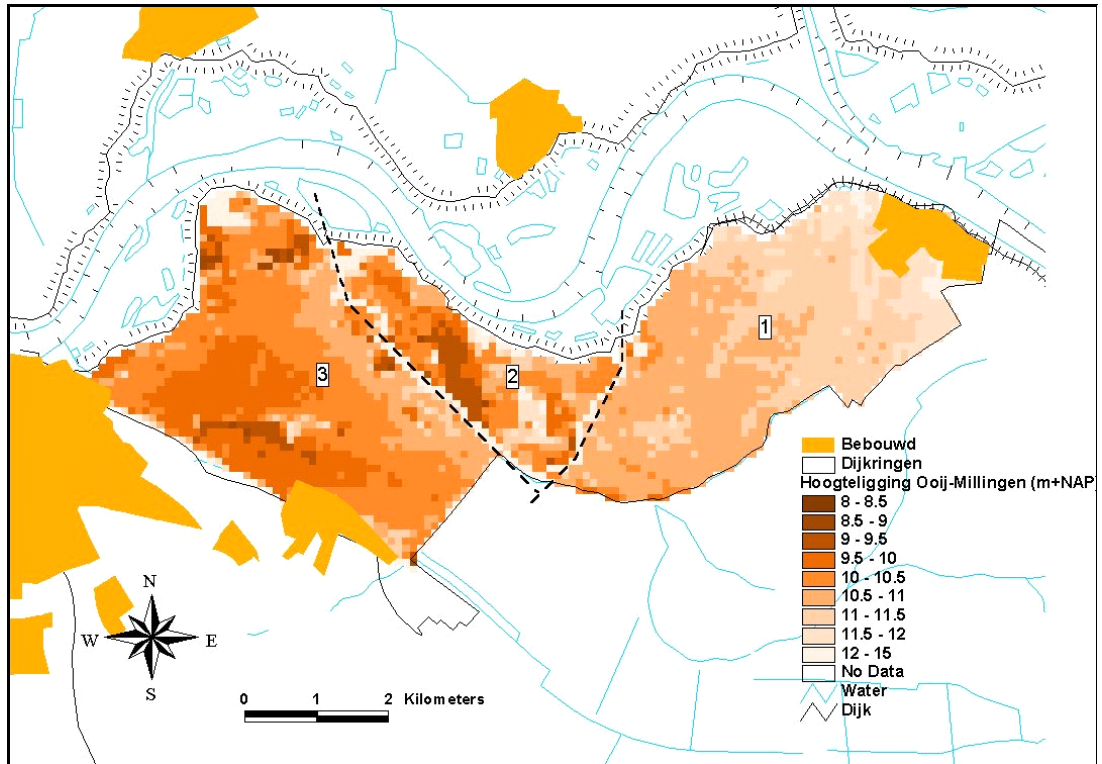
6.4 Sedimentatie

Sedimentatie in noodoverloopgebieden is berekend met de methode van Chen (1975). Volgens Chen (1975) kan het percentage van het aangevoerde sediment dat bezinkt (S) worden berekend als:

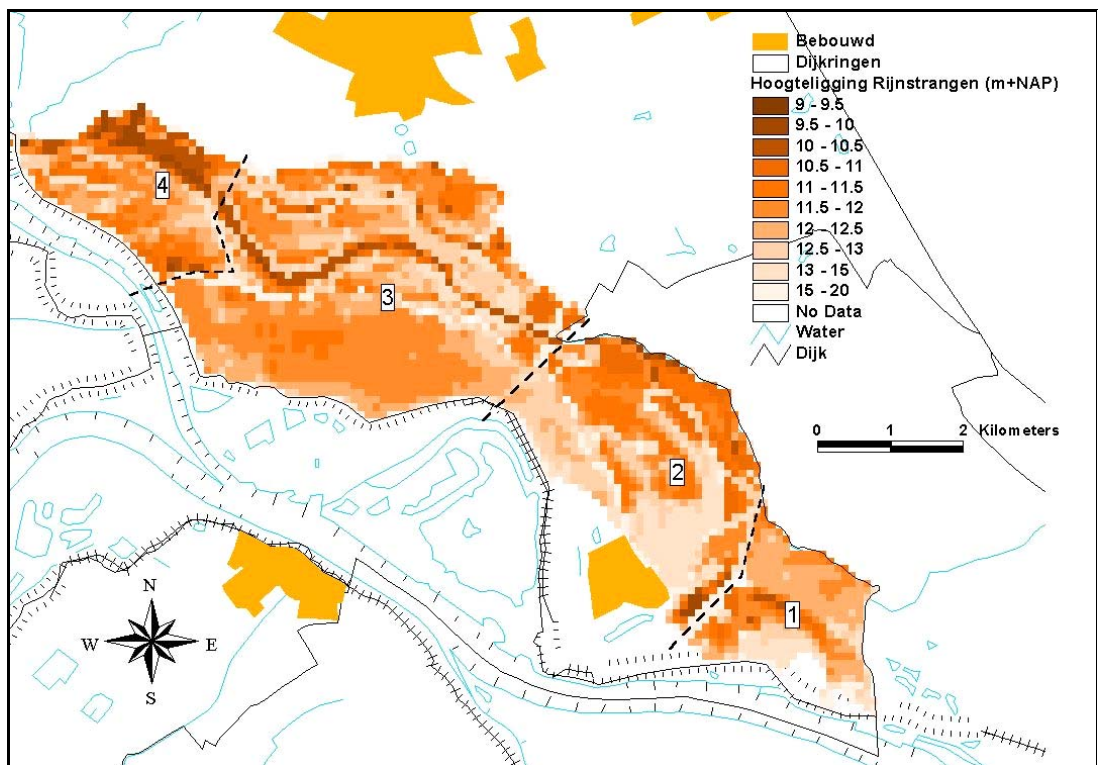
$$S(\%) = 1 - \exp\left[-w_s \cdot \frac{Q}{A}\right] \tag{6.1}$$

waarbij w_s de valsnelheid van het sediment is (m/s), Q de afvoer door het gebied (m^3/s) en A het oppervlak van het gebied (m^2). De term Q/A kan worden gezien als een maat voor de verblijftijd van het water in het gebied. In eerdere studies is deze methode toegepast op de uiterwaarden (Asselman, 1999a; 1999b, 2000a). Hierbij is echter gekeken naar sedimentatie bij stationaire afvoeren waarbij het debiet dat de uiterwaard instroomt gelijk is aan het debiet dat er uitstroomt. In deze studie wordt echter gekeken naar het vollopen en leeglopen van een gebied. Er is dus geen sprake van een constant debiet door het noodoverloopgebied. In delen waar geen berging meer mogelijk is zal het debiet constant blijven ($Q_{in} = Q_{uit}$). In delen waar nog wel berging mogelijk is zal het debiet in stroomafwaartse richting afnemen ($Q_{in} > Q_{uit}$). In deze gebieden kan vergelijking 6.1 de verblijftijd onderschatten. Dit kan leiden tot een (geringe) onderschatting van de sedimentatie.

Cuypers (2002) heeft een eerste verkenning uitgevoerd naar accumulatie van vervuild sediment in noodoverloopgebieden. Hij heeft hierbij gebruik gemaakt van een ‘0-dimensionaal’ model, waarbij één gemiddelde waarde voor het hele gebied wordt berekend. Omdat behoefte is aan inzicht in de ruimtelijke spreiding van het sediment in het gebied is gekozen voor een 1-dimensionale aanpak. Hierbij zijn de noodoverloopgebieden in lengterichting onderverdeeld in verschillende compartimenten. Op basis van aanwezige dwarsdijkjes en vernauwingen die resulteren in variaties in stroomsnelheid en inundatieduur is het gebied ‘Ooij-Millingen’ onderverdeeld in 3 compartimenten (Figuur 6.1). Het Rijnstrangengebied is onderverdeeld in 4 deelgebieden (Figuur 6.2). In beide figuren zijn de grenzen tussen de compartimenten aangegeven met een dikke zwarte stippellijn. De hoogteligging is weergegeven in bruintinten. Bij Ooij-Millingen varieert de hoogte van NAP+ 9 m in het westen (donker bruin) tot NAP+ 12 m in het oosten (licht bruin). In het Rijnstrangengebied varieert de hoogte van NAP+ 10 m (donker bruin) tot meer dan NAP+ 13 m (licht bruin). De dijken in het gebied zijn aangegeven met een zwarte lijn. De ligging van de rivier is in blauw getekend.



Figuur 6.1 Ooij-Millingen: hoogteligging en indeling in compartimenten



Figuur 6.2 Rijnstrangen: hoogteligging en indeling in compartimenten

De werkwijze om sedimentatie in de noodoverloopgebieden te schatten gaat als volgt:

- Op basis van de FLS resultaten wordt bepaald op welke plaatsen wel / geen sedimentatie op kan treden. De kritieke stroomsnelheid voor sedimentatie is gelijk gesteld aan 0.5m/s;
- Het percentage sediment dat bezinkt in ieder compartiment wordt berekend met vergelijking 6.1. Het debiet en het oppervlak dat per tijdstap onder water staat wordt met behulp van GIS uit de FLS uitvoer berekend. Dit gebeurt per compartiment en afzonderlijk voor de gebieden waar wel / geen sedimentatie op kan treden.;
- De aanvoer van sediment naar het eerste compartiment wordt bepaald door het debiet door de inlaat en de zwevendstof concentraties in de rivier op het moment dat de inlaat in werking treedt (gemiddeld 284 mg/l);
- De aanvoer van sediment naar het volgende compartiment is gelijk aan de aanvoer bij de inlaat min het sediment dat bezinkt in het eerste compartiment;
- Sedimentatie in het tweede compartiment wordt berekend met vergelijking 6.1. Zolang sprake is van stroming wordt aangenomen dat door de versnelling bij het passeren van de tussenliggende dijkjes menging optreedt en dat het sediment weer homogeen verdeeld is over de waterkolom.;
- Deze berekening wordt per tijdsinterval van 5 à 10 uur uitgevoerd. De sedimentatie per tijdstap wordt gesommeerd om de totale accumulatie tijdens de instroomfase te berekenen. Sediment dat bij de instroom niet bezinkt kan tijdens de stilstandsfase bezinken. Aangenomen wordt dat geen erosie optreedt tijdens de uitstroomfase;
- De afgezette hoeveelheden zware metalen worden berekend door de totale hoeveelheid afgezet sediment te vermenigvuldigen met de concentraties vermeld in Tabel 6.1.

Deze methode werkt goed wanneer alleen sprake is van berging in het meest benedenstroomse compartiment dat op dat moment water bevat. In de bovenstrooms gelegen compartimenten is sprake van doorstroming. Wanneer in de bovenstrooms gelegen compartimenten sprake is van berging wordt de doorvoer van sediment naar het volgende compartiment overschat. Naar verwachting is het effect van berging op de geschatte sedimentatie gering.

Wanneer volgens de berekeningen niet al het aangevoerde sediment bezinkt is deze hoeveelheid resterend sediment als extra input meegenomen bij de berekening van de volgende tijdstap. Aangenomen is dat het sediment beschikbaar is in het meest stroomafwaarts gelegen compartiment dat bij de voorgaande tijdstap onder water stond.

De aanname dat geen erosie optreedt van afgezet sediment tijdens de uitstroomfase lijkt, gezien de extreem lage stroomsnelheden tijdens de uitstroomfase, terecht. In uiterwaarden treden hogere stroomsnelheden op dan tijdens de uitstroomfase in noodoverloopgebieden. Ook hier lijkt niet of nauwelijks sprake te zijn van erosie van vers afgezet sediment (e.g. Asselman & van Wijngaarden, 2002). Tijdens de instroomfase kan wel sprake zijn van erosie op locaties met een hoge stroomsnelheid zoals het instroompunt. Aangenomen wordt dat bij de inlaat afdoende maatregelen worden getroffen om erosie te voorkomen. Indien toch erosie optreedt mag op basis van soortgelijke waarnemingen op uiterwaarden worden aangenomen dat het lokaal geërodeerde materiaal slechts over een korte afstand (enkele honderden meters) wordt getransporteerd (Middelkoop & Asselman, 1998).

De hier voorgestelde methode heeft betrekking op sedimentatie van suspensief getransporteerd materiaal bestaande uit klei, silt en fijn zand. Sedimentatie van lokaal opgewoeld bedding materiaal wordt niet in beschouwing genomen. Afhankelijk van de gekozen inlaat kan wel bedding materiaal (met name grof zand) worden afgezet. Op basis van kennis opgedaan bij veldmetingen zal hier kort op worden ingegaan. De gegeven schattingen zijn echter gebaseerd op 'kennis uit het veld' en niet op modelberekeningen.

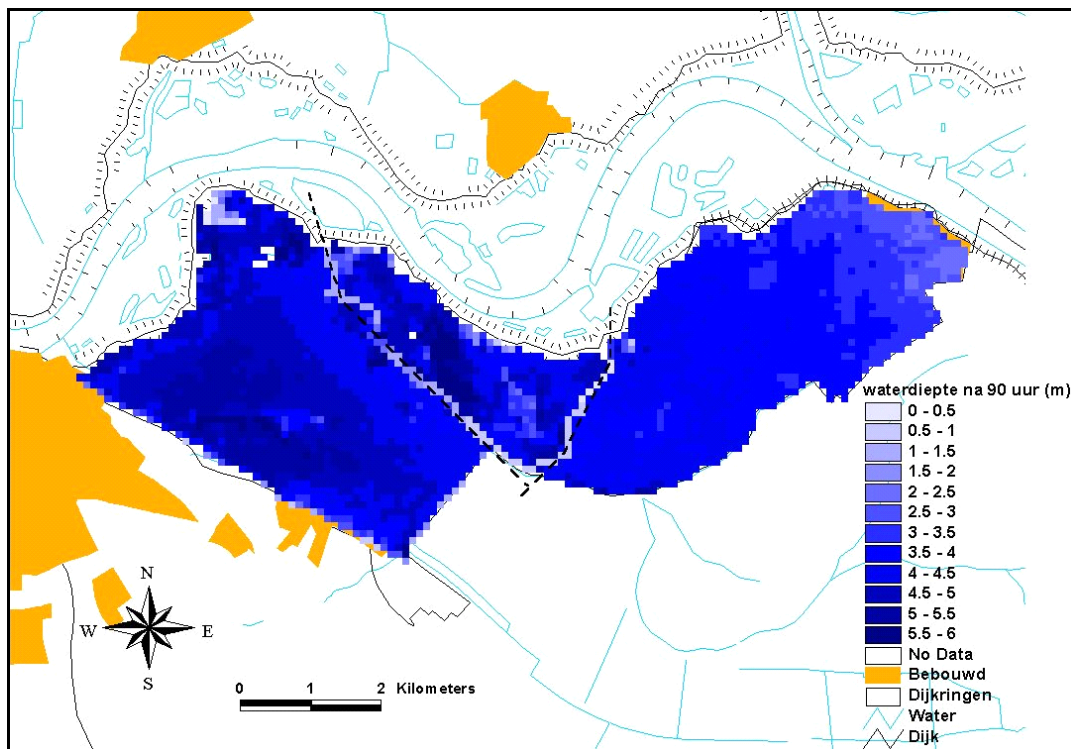
Om na te gaan in hoeverre deze 1D aanpak tot een betere inschatting van mogelijke ruimtelijke variaties in sediment accumulatie leidt dan een 0D aanpak wordt de sedimentatie tevens berekend door de totale aanvoer van sediment gelijkmatig te verdelen over het hele gebied.

7 Resultaten

7.1 Ooij-Millingen

Waterbeweging

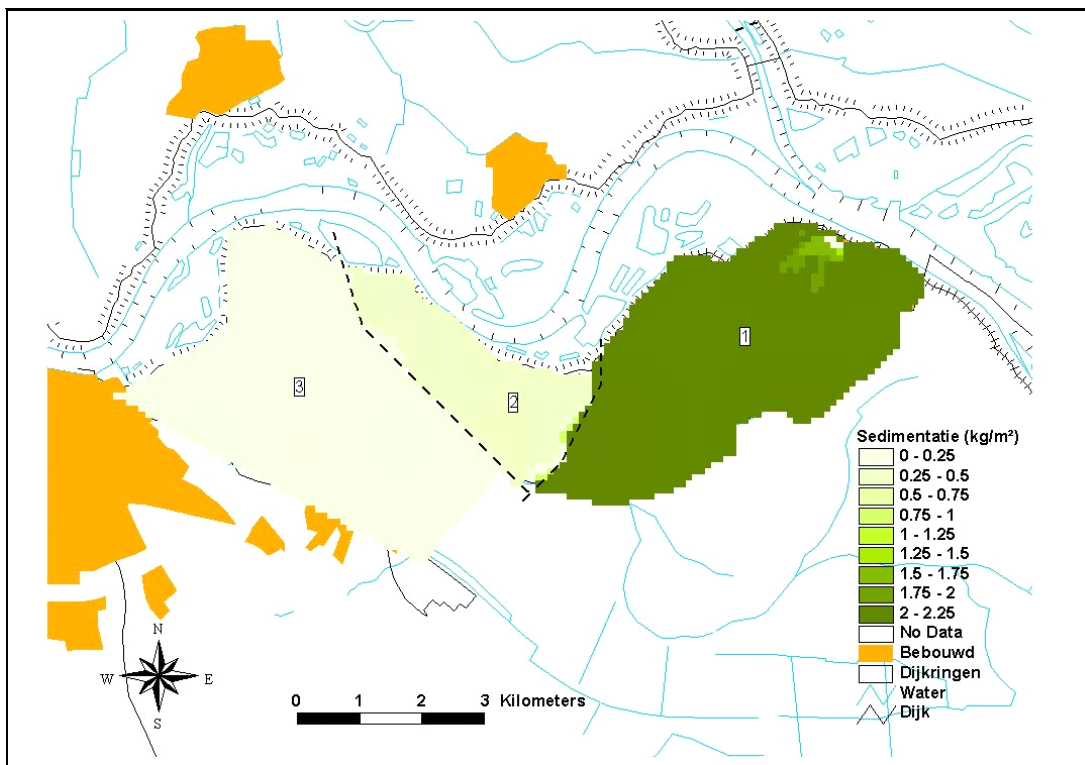
Het instroomdebiet bij Ooij-Millingen bedraagt maximaal $484 \text{ m}^3/\text{s}$. De instroming houdt bijna 90 uur aan. De indeling in compartimenten heeft een duidelijk effect op het inundatiepatroon binnen het noodoverloopgebied. Gedurende de eerste 30 uur treedt berging op in het meest bovenstrooms gelegen compartiment (nr 1 in Figuur 6.1). De waterdiepte loopt hierbij op tot een meter of 3. Na 40 uur is de berging in het tweede compartiment voor een groot deel benut en begint de inundatie van het meest benedenstrooms gelegen deel. Na 90 uur stopt de instroom. De bergingscapaciteit is dan volledig benut. Waterdieptes in het gebied variëren van 3 m bij de inlaat tot meer dan 5 m benedenstrooms (Figuur 7.1). Stroomsnelheden zijn, met uitzondering van gebieden bij de inlaat en de dijkes tussen de compartimenten, lager dan 0.5 m/s. Op veel gebieden worden stroomsnelheden van ongeveer 0.05 m/s berekend.



Figuur 7.1 Waterdiepte in Ooij-Millingen aan het einde van de instroomfase.

Sedimentatie

De sedimentatie zoals berekend met de 1D aanpak voor Ooij-Millingen bij een gemiddelde zwevendstof concentratie van 284 mg/l is weergegeven in Figuur 7.2. Bij het begin van de instroomfase treedt alleen sedimentatie op in het eerste compartiment omdat de overige compartiment nog droog zijn. Echter, ook wanneer compartiment 2 en 3 onder water staan treedt sedimentatie vooral op in het eerste compartiment. Dit is het gevolg van de grote lengte van het eerste compartiment en de extreem lage stroomsnelheden. De verblijftijd van het sediment is daardoor zo groot dat vrijwel al het sediment bezinkt. De variaties in sedimentatie die zichtbaar zijn binnen één compartiment (Figuur 7.2) zijn het gevolg van hoge stroomsnelheden. Met name bij de inlaat bezinkt minder sediment omdat de stroomsnelheden bij het begin van inundatie hier te hoog zijn voor sedimentatie.



Figuur 7.2 Sedimentatie van zwevendstof in Ooij-Millingen bij een zwevendstof concentratie in de Rijn van 284 mg/l.

Opgemerkt dient te worden dat de hier getoonde modelresultaten verkregen zijn met een 1D model. Per tijdstap is de gemiddelde sedimentatie per compartiment berekend voor zo ver de stroomsnelheid minder dan 0.5 m/s bedroeg. De lichtere kleuren bij het instroompunt in Figuur 7.2 zijn het gevolg van hoge stroomsnelheden aan het begin van de inundatie waardoor hier minder fijn sediment is afgezet. De rest van het sediment is homogeen over het compartiment verdeeld. In werkelijkheid kan het zo zijn dat als gevolg van uitputting van sediment de sedimentatie in het benedenstrooms gelegen deel van het compartiment lager is dan in het bovenstroomsgelegen deel. Hiermee wordt in een 1D model geen rekening gehouden. Voor een gedetailleerdere weergave van ruimtelijke verschillen in sedimentatie binnen een compartiment is een 2D sedimentatiemodel nodig.

Depositie van zand is niet in Figuur 7.2 aangegeven. Wanneer gekozen wordt voor een overlaat, al dan niet met beweegbare kruin, zal vrijwel geen zand in het gebied worden afgezet omdat in het bovenste deel van de waterkolom vrijwel geen zand aanwezig is. Wanneer gekozen wordt voor een inlaat met schuiven kan wel lokaal opgewoeld bedding materiaal naar binnen worden getransporteerd. Uit veldmetingen naar sedimentatie op uiterwaarden is gebleken dat het zand meestal dicht bij het instroompunt wordt afgezet in de vorm van een rug of bank (Dinter et al., 1995; Sorber, 1997; Middelkoop & Asselman, 1998; ten Brinke et al., 1998). Deze zandrug kan 25 cm dik worden en kan zich uitstrekken over een afstand van ongeveer 50 tot 100 m. Het gebied waar zand wordt afgezet is meestal scherp begrensd.

De berekende sedimentatie van zwevendstof is kort samengevat in Tabel 7.1. De sedimentatie is berekend als functie van de zwevendstof concentratie in de rivier. De eerste kolom geeft de totale hoeveelheid afgezet sediment. De tweede kolom geeft de gemiddelde sedimentatie volgens een OD aanpak, ofwel de totale hoeveelheid afgezet sediment gedeeld door het totale oppervlak. De 1D aanpak geeft de sedimentatie weer zoals berekend in deze studie (Figuur 7.2).

Tabel 7.1 Accumulatie van zwevendstof in Ooij-Millingen

	Zwevendstof concentratie op de Rijn		
	100 mg/l	284 mg/l	400 mg/l
Sedimentatie (10 ⁶ kg)			
Totaal	13.1	37.3	52.5
Gemiddelde sedimentatie (kg/m ²)			
gemiddeld (OD)	0.37	1.04	1.46
compartiment 1 (1D)	0.79	2.24	3.16
compartiment 2 (1D)	0.12	0.33	0.46
compartiment 3 (1D)	0.03	0.10	0.14

De belasting aan zware metalen als gevolg van de accumulatie van zwevendstof is in Tabel 7.2 aangegeven. Hoewel de zware metalen concentraties in alle drie de varianten gelijk zijn varieert de absolute hoeveelheid zware metalen sterk afhankelijk van de zwevendstofvracht in de rivier. De concentraties aan zware metalen zijn gegeven in Tabel 6.1. Het sediment dat tijdens hoogwater in de Rijn wordt getransporteerd en wat in noodoverloop- en retentiegebieden wordt afgezet valt alleen wat Nikkel betreft in klasse III. Koper valt in klasse II. De overige metalen (Arseen, Cadmium, Chroom, Kwik, Lood en Zink) vallen in klasse I.

Tabel 7.2 Accumulatie van zware metalen (kg) in Ooij-Millingen

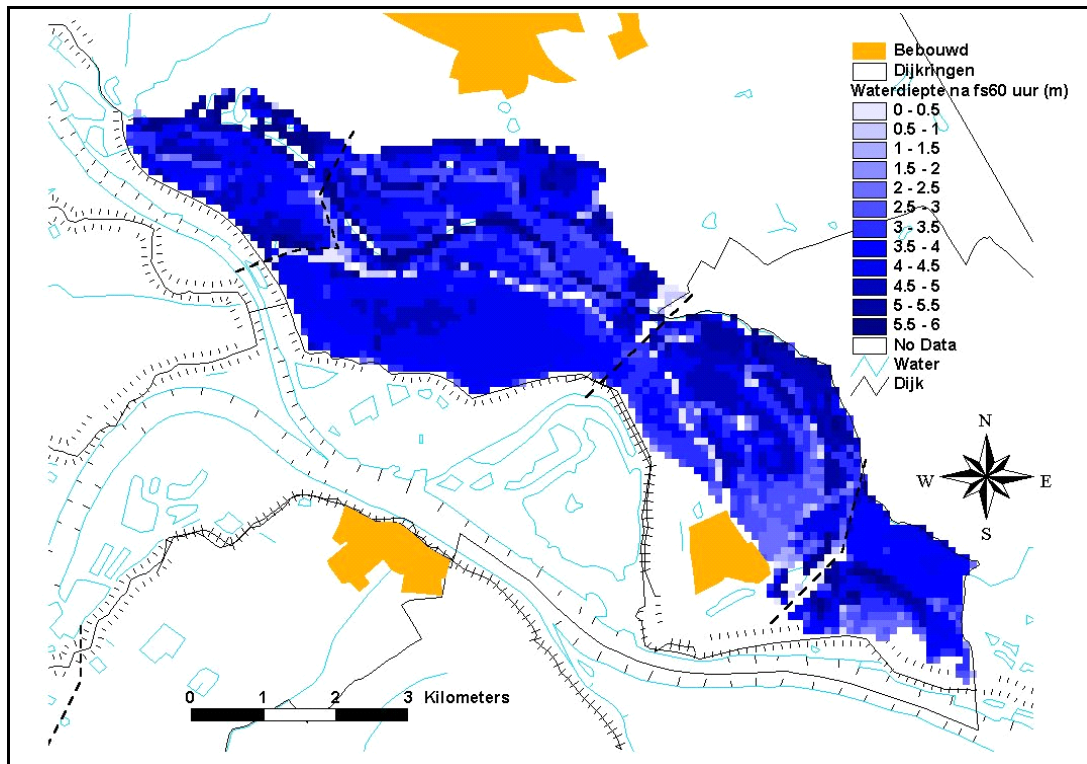
Metaal	Sedimentatie (kg)	Zwevendstof concentratie op de Rijn		
		100 mg/l	284 mg/l	400 mg/l
As	totaal	228	648	913
	compartiment 1	209	592	834
	compartiment 2	11	30	42
	compartiment 3	9	26	37
Cd	totaal	19	53	74
	compartiment 1	17	48	68
	compartiment 2	0.9	2.4	3.4
	compartiment 3	0.7	2.1	3.0
Cr	totaal	1083	3077	4333
	compartiment 1	990	2811	3960
	compartiment 2	50	142	200
	compartiment 3	43	123	174
Cu	totaal	717	2037	2869
	compartiment 1	655	1861	2622
	compartiment 2	33	94	2622
	compartiment 3	29	82	2622
Hg	totaal	5.3	15	21
	compartiment 1	4.8	14	19
	compartiment 2	0.2	0.7	1.0
	compartiment 3	0.2	0.6	0.9
Ni	totaal	695	1973	2779
	compartiment 1	635	1803	2540
	compartiment 2	32	91	128
	compartiment 3	28	79	112
Pb	totaal	943	2677	3771
	compartiment 1	861	2446	3446
	compartiment 2	43	123	174
	compartiment 3	38	107	151
Zn	totaal	4548	12917	18193
	compartiment 1	4156	11804	16625
	compartiment 2	209	595	838
	compartiment 3	183	518	730

7.2 Rijnstrangen

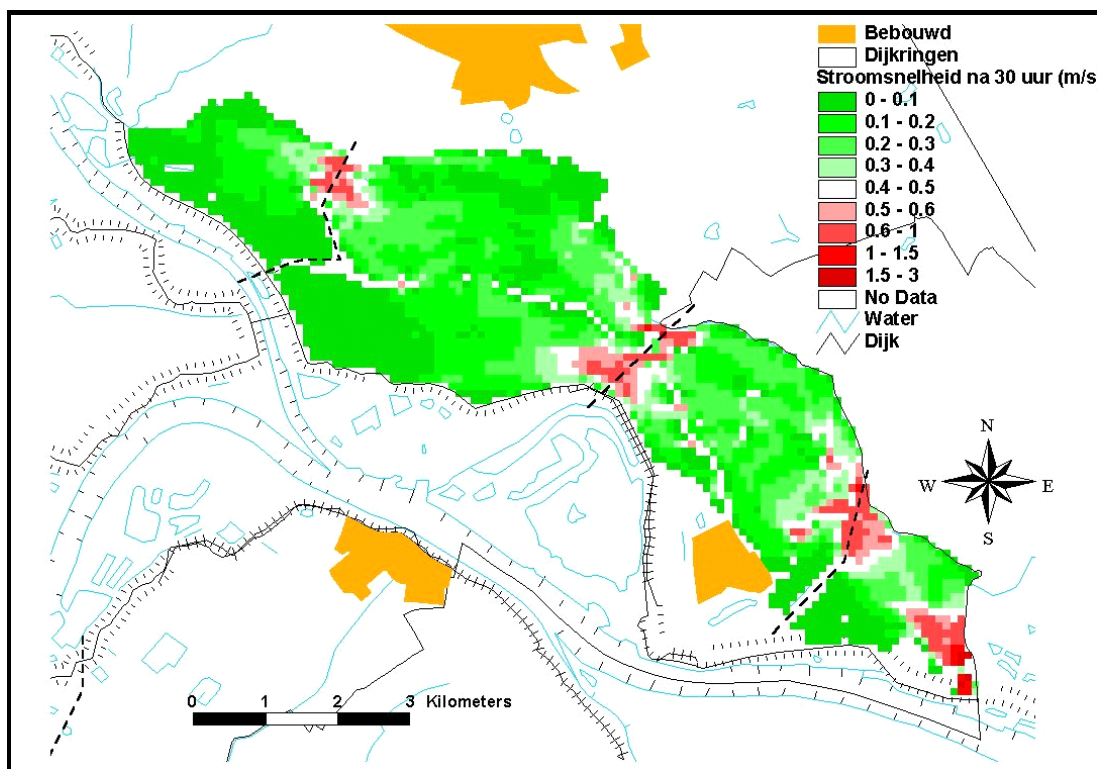
Waterbeweging

Bij de inlaat van het Rijnstrangengebied stroomt maximaal 1108 m³/s naar binnen. Gemiddeld bedraagt het inlaat debiet ongeveer 550 m³/s. De instroming houdt ongeveer 60 uur aan. De indeling in compartimenten heeft een minder duidelijk effect op het inundatiepatroon binnen het noodoverloopgebied dan bij Ooij-Millingen. Inundatie van het benedenstrooms gelegen compartiment begint reeds wanneer de waterdiepte in het bovenstrooms gelegen deel nog beperkt is. Binnen 30 uur staat het gehele gebied onder

water. De waterdiepte varieert dan van 2 m benedenstrooms tot 3 m bovenstrooms. De instroming gaat vervolgens nog 30 uur door. De einddiepte is gegeven in Figuur 7.3.



Figuur 7.3 Waterdiepte in het Rijnstrangengebied aan het einde van de instroomfase.

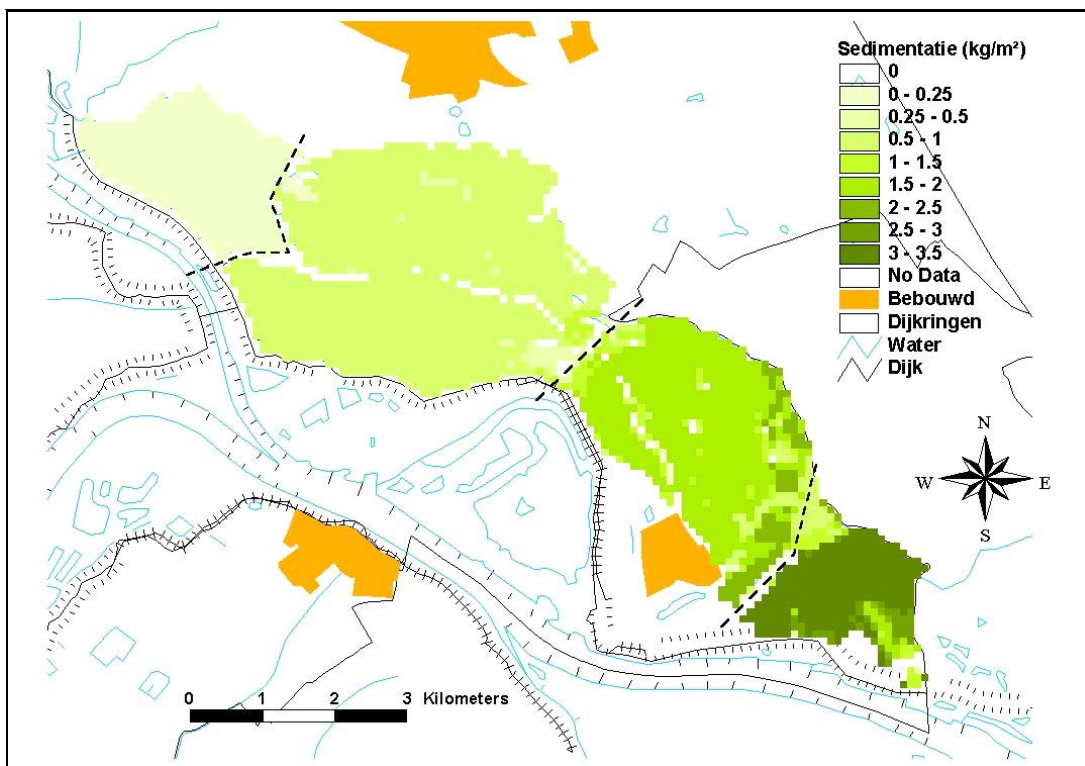


Figuur 7.4 Stroomsnelheden in het Rijnstrangengebied 30 uur na het begin van de instroming.

Stroomsnelheden zijn, met uitzondering van gebieden bij de inlaat en de dijkes tussen de compartimenten, lager dan 0.5 m/s. Binnen de compartiment variëren de stroomsnelheden van 0.05 tot 0.35 m/s afhankelijk van de exacte locatie en de tijd na instroming. Naarmate het gebied meer water bergt nemen de stroomsnelheden af. De eerste 40 uur van de instroming zijn de stroomsnelheden bij de grenzen tussen de compartimenten hoger dan 0.5 m/s (Figuur 7.4). Vanaf 40 uur na de instroming nemen de stroomsnelheden ook hier zo ver af dat sedimentatie mogelijk is.

Sedimentatie

De sedimentatie zoals berekend voor het Rijnstrangengebied bij een gemiddelde zwevendstof concentratie op de Rijn van 284 mg/l is weergegeven in Figuur 7.5. Door de hogere stroomsnelheden wordt een groter deel van het sediment doorgevoerd naar verder stroomafwaarts gelegen compartimenten. Wel is, net als bij Ooij-Millingen, een duidelijke trend waarneembaar. Bij een zwevendstof concentratie van 284 mg/l op de Rijn varieert de gemiddelde sedimentatie van 3.26 kg/m² in het eerste compartiment tot 0.25 kg/m² in laatste compartiment (Tabel 7.3). De geringe hoeveelheden sediment die zijn afgezet in het 4^e compartiment zijn het gevolg van de kortere inundatieduur, maar vooral van uitputting van het sediment. Wanneer de meest stroomafwaarts gelegen compartimenten onder water staan zijn de stroomsnelheden op de meeste locaties geringer dan 0.25 m/s. Dit betekent dat de verblijftijden van water en sediment dusdanig lang zijn dat een groot deel van het sediment reeds is bezonken voordat het het laatste compartiment bereikt. De verschillen in sedimentatie die waarneembaar zijn binnen de compartimenten (Figuur 7.5) zijn het gevolg van het overschrijden van de kritieke stroomsnelheid voor sedimentatie nabij het inlaatpunt en bij de tussendijkjes.



Figuur 7.5 Sedimentatie van zwevendstof in het Rijnstrangengebied bij een zwevendstof concentratie op de Rijn van 284 mg/l.

Depositie van zand is niet in Figuur 7.5 aangegeven. Net als bij Ooij-Millingen zal depositie van zand alleen een belangrijke rol spelen wanneer gekozen wordt voor een inlaat met schuiven. Naar verwachting zal de omvang van het gebied waarin zand bezinkt beperkt zijn (paar honderd meter vanaf de inlaat).

De berekende sedimentatie van zwevendstof als functie van de zwevendstof concentratie op de rivier is weergegeven in Tabel 7.3. Afhankelijk van de zwevendstof concentratie kan de totale hoeveelheid sediment die in het Rijnstrangengebied wordt afgezet variëren van ongeveer $12 \cdot 10^6$ kg tot $48 \cdot 10^6$ kg. De verschillen tussen de compartimenten zijn groot. Hieruit kan worden geconcludeerd dat een 0D benadering (gemiddelde waarde voor het hele noodoverloopgebied) ongeschikt is om sediment accumulatie te berekenen wanneer men geïnteresseerd is in de ruimtelijke spreiding van het sediment.

Tabel 7.3 Accumulatie van zwevendstof (in kg/m²) in het Rijnstrangengebied

Sedimentatie	Zwevendstof concentratie op de Rijn		
	100 mg/l	284 mg/l	400 mg/l
Totaal (10 ⁶ kg)	11.9	33.8	47.6
Gemiddeld (1D)	0.41	1.17	1.65
Compartiment 1 (2D)	1.15	3.26	4.59
Compartiment 2 (2D)	0.56	1.60	2.26
Compartiment 3 (2D)	0.24	0.68	0.95
Compartiment 4 (2D)	0.09	0.25	0.35

De belasting aan zware metalen als gevolg van de accumulatie van zwevendstof is aangegeven in Tabel 7.4. Hoewel de zware metalen concentraties in alle drie de varianten gelijk zijn varieert de absolute hoeveelheid zware metalen sterk afhankelijk van de zwevendstofvracht in de rivier. De concentraties aan zware metalen zijn gegeven in Tabel 6.1. Net als bij Ooij-Millingen valt het sediment dat is afgezet alleen wat Nikkel betreft in klasse III en wat Koper betreft in klasse II. De overige metalen vallen in klasse I.

Tabel 7.4 Accumulatie van zware metalen (kg) in het Rijnstrangengebied

Metaal	Sedimentatie (kg)	Zwevendstof concentratie		
		100 mg/l	284 mg/l	400 mg/l
As	Totaal (kg)	207	587	827
	Compartiment 1	59	168	237
	Compartiment 2	78	221	312
	Compartiment 3	57	161	227
	Compartiment 4	6	18	25
Cd	Totaal (kg)	17	48	67
	Compartiment 1	5	14	19
	Compartiment 2	6	18	25
	Compartiment 3	5	13	19
	Compartiment 4	1	1	2
Cr	Totaal (kg)	982	2789	3928
	Compartiment 1	281	798	1124
	Compartiment 2	370	1051	1480
	Compartiment 3	270	767	1080
	Compartiment 4	30	85	120
Cu	Totaal (kg)	650	1846	2601
	Compartiment 1	186	528	744
	Compartiment 2	245	695	980
	Compartiment 3	179	508	715
	Compartiment 4	20	57	80
Hg	Totaal (kg)	4.8	13.7	19.2
	Compartiment 1	1.4	3.9	5.5
	Compartiment 2	1.8	5.1	7.2
	Compartiment 3	1.3	3.8	5.3
	Compartiment 4	0.1	0.4	0.6
Ni	Totaal (kg)	630	1789	2520
	Compartiment 1	180	512	721
	Compartiment 2	237	674	949
	Compartiment 3	173	492	693
	Compartiment 4	19	55	77
Pb	Totaal (kg)	855	2427	3418
	Compartiment 1	244	694	978
	Compartiment 2	322	914	1288
	Compartiment 3	235	667	940
	Compartiment 4	26	74	105
Zn	Totaal (kg)	4123	11709	16492
	Compartiment 1	1179	3350	4718
	Compartiment 2	1553	4411	6212
	Compartiment 3	1133	3219	4533
	Compartiment 4	126	359	505

8 Discussie en conclusies

Model aanpak

De belangrijkste conclusie van deze studie is dat het mogelijk is om met een 1D sedimentatiemodel een inschatting te krijgen van de totale hoeveelheid sediment dat in een noodoverloopgebied wordt afgezet en van de ruimtelijke spreiding in sediment accumulatie. Vooral wanneer een inschatting moet worden gemaakt van de kosten die gemoeid zijn met het verwijderen van het afgezette slib is het belangrijk om inzicht te hebben in de ruimtelijke spreiding. De kosten zullen immers lager uitvallen wanneer sedimentatie van slib beperkt is tot een relatief klein gebied. Op basis van de testcases kan worden geconcludeerd dat de ruimtelijke variatie in sediment accumulatie binnen noodoverloopgebieden groot is. Een 1D aanpak om slibsedimentatie te simuleren verdient daarom de voorkeur boven een 0D aanpak.

In deze studie is gebruik gemaakt van Delft-FLS om de waterstroming in de noodoverloopgebieden te simuleren. Het berekenen van de sedimentatie van zwevendstof is met behulp van een GIS uitgevoerd. De GIS berekeningen zijn echter niet direct door derden te gebruiken. Om er voor te zorgen dat de methode breder inzetbaar is dient een algemeen toepasbaar script te worden ontwikkeld.

Voor het simuleren van overstromingen wordt ook vaak gebruik gemaakt van SOBEK-Overland Flow. In SOBEK kunnen 1D gemodelleerde watergangen worden gecombineerd met 2D modellering van overstromingen. Recentelijk is een begin gemaakt met de koppeling van Delwaq met deze overstromingsmodule. Sedimentatie van slib maakt nog geen onderdeel uit van deze '2D waterkwaliteits module'. Overwogen kan worden om de waterkwaliteitsmodule uit te breiden met transport en sedimentatie van slib. Op deze manier wordt aangesloten bij de algemeen gebruikte software voor het simuleren van overstromingen.

Model toepassing: maatregelen

Om kosten van opruimwerkzaamheden na afloop van de inzet van noodoverloop- en retentiegebieden te beperken moeten maatregelen worden getroffen om te voorkomen dat het sediment zich over het gehele gebied kan verspreiden. Aanvullende berekeningen zijn nodig om na te gaan hoe sedimentatie in het noodoverloopgebied kan worden gestuurd door de inrichting van het gebied.

De meest voor de hand liggende 'maatregel' is het beperken van het instroomdebiet zodat stroomsnelheden laag blijven. Uit de modelsimulaties bij Ooij-Millingen blijkt dat bij het voorgestelde inlaatdebiet de stroomsnelheden dusdanig laag zijn dat meer dan 90% van het aangevoerde sediment bezinkt in het eerste compartiment. Bij het Rijnstrangengebied zal waarschijnlijk een geringer inlaatdebiet nodig zijn dan gehanteerd in de studies voor de Commissie Noodoverloopgebieden om te zorgen dat sediment dicht bij de inlaat wordt afgezet.

Naast het beperken van de stroomsnelheden door het verlagen van het instroomdebiet zou gekozen kunnen worden voor het plaatsen van dwarsdijken in het gebied, of andere 'obstakels' waardoor stroomsnelheden afnemen en sediment over een kortere afstand door het gebied wordt getransporteerd. Het is echter de vraag of de aanleg van dwarsdijken qua kosten opweegt tegen het verwijderen van het sediment na afloop van het hoogwater.

Rijn versus Maas

Uit deze studie blijkt dat het slib dat tijdens hoogwater door de Rijn wordt getransporteerd relatief schoon is. De vervuiling met Nikkel valt in klasse III, de vervuiling met koper in klasse II. Voor alle overige metalen valt de vervuilingsgraad van het tijdens hoogwater getransporteerde zwevendstof in klasse I.

Het sediment dat in de Maas wordt getransporteerd is echter beduidend sterker vervuild. Volgens verschillende studies valt het Maas slib, zelfs tijdens hoogwater, in klasse III à IV (Bruggen et al., 1995; Middelkoop, 1997; Cuypers, 2002). De kosten die gemoeid zijn met het opruimen en opslaan van sediment zijn hoger voor klasse IV slib dan voor klasse II slib. Om een inschatting te kunnen maken van de kosten die gemoeid zijn met de verwijdering van het vervuilde slib zijn aanvullende berekeningen voor de sedimentatie in noodoverloopgebieden langs de Maas noodzakelijk.

Benodigde data

De belangrijkste gegevens die nodig zijn om sedimentatie van slib in noodoverloopgebieden te simuleren zijn de zwevendstof concentraties op de rivier bij hoge afvoeren, zware metalen gehalten gebonden aan het zwevendstof en kenmerken van het zwevendstof zoals de korrelgrootteverdeling en, in het bijzonder, de effectieve valsnelheid.

Hoewel meetreeksen van zwevendstofconcentraties beschikbaar zijn voor Lobith sinds de jaren '70 is de hoeveelheid data met betrekking tot zwevendstof concentraties en zware metalen gehalten bij extreem hoge afvoer gering. Omdat vrijwel geen meetgegevens beschikbaar zijn voor afvoeren van meer dan 10.000 m³/s te Lobith moeten aannames worden gedaan met betrekking tot de kwantiteit en de kwaliteit van het zwevendstof bij hoge afvoeren wanneer noodoverloop- en retentiegebieden worden ingezet. Aanvullende metingen tijdens hoogwater kunnen de onzekerheden omtrent kwaliteit en kwantiteit van het zwevendstof bij hoge afvoeren verkleinen. Ook kan gebruik worden gemaakt van metingen die zijn uitgevoerd in de Rijn in Duitsland, nabij de Nederlandse grens.

Vrijwel geen informatie is beschikbaar over de effectieve valsnelheid van het sediment. Hoewel bekend is dat ook in zoetwater flocculatie optreedt is nagenoeg informatie te vinden over de resulterende valsnelheid. In voorgaande studies naar de sedimentatie op uiterwaarden is de valsnelheid van het sediment als calibratieparameter vastgesteld (Middelkoop & Van der Perk, 1998; Asselman, 1999a).

Onzekerheden in de toegepaste valsnelheid hebben geen effect op de totale hoeveelheid sediment die wordt afgezet in noodoverloopgebieden (al het aangevoerde sediment bezinkt immers). Ze hebben echter wel effect op de spreiding van het sediment over het gebied. Hoe groter de valsnelheid, des te hoger de sedimentatie nabij de inlaat. Hoe lager de valsnelheid, des te verder het sediment zich over het gebied kan verspreiden. Om een gedetailleerder beeld te krijgen van ruimtelijke variaties in sediment accumulatie is meer informatie over de effectieve valsnelheid van het sediment nodig. Ook informatie over de spreiding aan vloggrootte en bijbehorende valsnelheden is nodig om een meer gedetailleerde uitspraak te kunnen doen over ruimtelijke patronen in sedimentatie.

9 Referenties

- Asselman, N.E.M. (1997), Suspended sediment in the river Rhine - the impact of climate change on erosion, transport and deposition. Utrecht University, Ph.D. Thesis.
- Asselman, N.E.M. (1999a), Slibmodellering in RvR, Fase 1. WL|DELFT HYDRAULICS, verslag R 3337
- Asselman, N.E.M. (1999b), Slibmodellering in RvR, Fase 2. WL|DELFT HYDRAULICS, verslag R 3337
- Asselman, N.E.M. (2000a), Slibmodellering in VVM. WL|DELFT HYDRAULICS, verslag Q2749
- Asselman, N.E.M. (2000b), Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* 234, 228-248.
- Asselman, N.E.M. (2001), Floodplain sedimentation. Literatuurstudie voor WL|DELFT HYDRAULICS, project T2401.
- Asselman, N.E.M. & F. Klijn (2001), Vroegere ruimte voor de Maas. WL-rapport R2795.21. Delft: WL | Delft Hydraulics.
- Asselman N.E.M. & M. van Wijngaarden (in press), Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the Rhine River in The Netherlands. Geaccepteerd voor publicatie in *Journal of Hydrology*.
- Brinke, W.B.M. ten, M.M. Schoor, A.M. Sorber & H.J.A. Berendsen (1998), Overbank sand deposition in relation to transport volumes during large-magnitude floods in the Dutch sand-bed Rhine river system. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.23, No.9, pp.809-824.
- Bruggen, M. van, Stortelder, P.B.M., Guchte, C. van de & Hooft, W.F. van (1995), Hoogwater januari en februari 1995: Kwaliteit en risico's van het door Rijn en Maas aangevoerde rivierslib. RIVM rapport nr. 609021 006, RIZA nota nr. 95.019.
- Chen, C.-N. (1975), Design of sediment retention basins, In: Proc. National Symposium on Urban Hydrology and Sediment Control, Lexington, Kentucky, pp. 285-298
- Commissie Noodoverloopgebieden (2002), Gecontroleerd overstromen - advies van de Commissie Noodoverloopgebieden.
- Crebas, J et al. (2000), Overstromingsberekeningen in het kader van HIS-NL. Eindrapport in opdracht van DG Rijkswaterstaat. Delft: WL | Delft Hydraulics
- Cuypers, C. (2002), Potentiële milieueffecten bij inundatie van noodoverloopgebieden - Consequenties van vervuild slib en evaluatie van overige risicofactoren. RIZA werkdocument 2002.102x.
- Dijkzeul, H.J. (1982), De waterkwaliteit van de Rijn in Nederland in de periode 1970-1981. Nota 82.061. Lelystad: DBW / RIZA.
- Dinter, M. van, A.M. Sorber & H.J.A. Berendsen (1995), Inventarisatie van de sedimentatie van zand op de oeverwallen van de Waal en de Gelderse IJssel tijdens het hoogwater van januari en februari 1995. ICG Rapport 95/2, Netherlands Centre For Geo-ecological Research.
- Heynert, K., Dijkman, J & Klijn, F. (2001), Waterstaatkundige inrichting noodoverloopgebieden - een overzicht. Rapport WL | Delft Hydraulics Q3155.
- Heynert, K et al. (2002), Werkzaamheden aan het Rijnsysteem ten behoeve van de Commissie Noodoverloopgebieden. Rapport WL | Delft Hydraulics Q3208.
- Klijn, F. & K. Stone (2000), Vroegere ruimte voor Rijntakken. WL-rapport R3294.67. Delft: WL | Delft Hydraulics.
- Middelkoop, H. (1997), Embanked floodplains in the Netherlands - Geomorphological evolution over various time scales. Utrecht University, Ph.D. Thesis.
- Middelkoop, H. & N.E.M. Asselman (1998), Spatial variability of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 561-573.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1998), Vierde Nota waterhuishouding - Regeringsbeslissing. Den Haag.
- Rijkswaterstaat (1994), Jaarboek monitoring Rijkswateren 1993. Den Haag: Rijkswaterstaat.

- Salomons, W. W. van Driel, H. Kerkdijk & R. Boxma (1982), Help ! Holland is plated by the Rhine (environmental problems associated with contaminated sediments). In: R. Perry (Ed.), Effects of waste disposal on groundwater and surface water (Proceedings of the Exeter symposium, July 1982). IAHS Publication 139, 255-269.
- Sorber, A.M. (1997), Oeversedimentatie tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995. RIZA rapport 97.015.
- Uiterwijk Winkel, A.P.B. (1975), Microbiologische aspecten en het sedimentatiegedrag van rivierslib. RWS, DWZ, nota 44.006.01. Lelystad: Rijkswaterstaat.
- WL | Delft Hydraulics (2001), Effectiviteit van retentie langs de Rijntakken. Verslag. DG Rijkswaterstaat RIZA.
- WL | Delft Hydraulics (2002), Spankrachtstudie: Deelrapport 3: hydraulische effecten van maatregelen in het bovenrivierengebied. Rapport WL | Delft Hydraulics Q2975.
- Zwolsman, J.J.G., Kouer, R.M. & Hendriks, A.J. (2000), Environmental impacts of river floods in the Netherlands. BMBF Symposium Elbeforschung, ATV-DVWK-Schriftenreihe vol. 21, 33-61.