

De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal

**Het langjarig gedrag van
kribvakstranden, de invloed van
scheepsgeïnduceerde
waterbeweging en morfologische
processen bij hoge en lage
afvoeren**

RIZA rapport 2003.002
ISBN 9036954827

Auteur: W.B.M. ten Brinke

Arnhem, februari 2003

Te citeren als :

**Brinke, W.B.M. ten (2003)
De sedimenthuishouding van kribvakken langs de
Waal. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en
Afvalwaterbehandeling/RIZA, rapport 2003.002**

Samenvatting	13
1 Inleiding	15
1.1. De relevantie van het onderzoek	15
1.2. Hypothese en doelstelling	17
2 Karakteristieken van het gebied	20
2.1. Kribben, kribvakken en oevers	20
2.2. Scheepvaart op de Waal	23
3 Water- en sedimentbeweging in kribvakken	25
3.1. Scheepsgolven en scheepsgeïnduceerde stroming	25
3.2. Internationale literatuur	26
3.3. Eerder onderzoek: veldmetingen langs de Waal	27
3.4. Eerder onderzoek: modelonderzoek WLIDelft Hydraulics	29
3.5. Wervels, kribvlammen en neerstroming	30
3.6. Scheepsgeïnduceerde waterbeweging	31
4 Onderzoek in de Waal	38
4.1. Metingen aan de scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken	38
4.2. Representativiteit informatie	43
4.2.1. <i>Keuze kribvakken water- en sedimentbeweging</i>	43
4.2.2. <i>Meetperiodes water- en sedimentbeweging</i>	45
4.2.3. <i>Monitoring bodemligging kribvakstranden</i>	46
4.2.4. <i>Luchtfoto's</i>	46
4.2.5. <i>Dataset scheepspassages</i>	46
4.3. De relatie tussen scheepspassages en de water- en sedimentbeweging in kribvakken: de toepassing van kunstmatige Neurale Netwerken	47
4.3.1. <i>Neurale Netwerken: op zoek naar causale verbanden</i>	47
4.3.2. <i>Wat zijn Kunstmatige Neurale Netwerken?</i>	48
4.3.3. <i>Stap 1. Vaststelling mogelijke invoer- en uitvoer-variabelen Waal bij Druten</i>	51
4.3.4. <i>Stap 2. Selectie van te gebruiken invoervariabelen</i>	52
4.3.5. <i>Stap 3. De vaststelling van de ondergrens van de grootte van te beschouwen schepen</i>	54
4.3.6. <i>Stap 4: De gerealiseerde Kunstmatige Neurale Netwerken</i>	58
4.4. Hoogwater- versus laagwater-effecten: monitoring bodemligging kribvakstranden	59
4.4.1. <i>Tijdserie</i>	59
4.4.2. <i>De metingen</i>	60
4.4.3. <i>De dataverwerking</i>	61
4.5. De lange termijn balans van kribvakstranden: een analyse van luchtfoto's over 20 jaar	64

5	Resultaten	66
5.1.	Scheepsgeïnduceerde waterbeweging in kribvakken langs de Waal	66
5.1.1.	<i>Laagwater stroompatronen zonder scheepvaart: recht traject Waal</i>	66
5.1.2.	<i>Laagwater stroompatronen zonder scheepvaart: binnen- buitenbocht Waal</i>	67
5.1.3.	<i>De invloed van passerende scheepvaart</i>	67
5.1.4.	<i>Scheepsinvloeden in bochten</i>	72
5.2.	De erosie van zand tijdens scheepspassages	74
5.2.1.	<i>Scheepsinvloeden langs het rechte traject bij Druten</i>	74
5.2.2.	<i>Interferentie van scheepsinvloeden</i>	74
5.2.3.	<i>Scheepsinvloeden in bochten</i>	77
5.3.	De toepassing van Neurale Netwerken	82
5.3.1.	<i>Stap 5. De voorspelbaarheid van Kunstmatige Neurale Netwerken</i>	82
5.3.2.	<i>Stap 6. Gevoeligheidsanalyse</i>	84
5.3.3.	<i>Stap 7. Afleiding vereenvoudigde procesvergelijkingen</i>	87
5.4.	De invloed van scheepvaart op de sedimenthuishouding van kribvakken	88
5.4.1.	<i>Het effect per schip versus de frequentie van passages</i>	88
5.4.2.	<i>Effect van scheepvaart op jaarbasis: noord- versus zuidoever</i>	90
5.4.3.	<i>Vertaling effecten naar de hele Waal op jaarbasis</i>	92
5.5.	Langjarige monitoring bodemligging kribvakstranden	97
5.5.1.	<i>Temporele dynamiek: hoogwater versus laagwater</i>	97
5.5.2.	<i>Lage – gemiddelde afvoer: aanwijzingen voor eolische processen</i>	105
5.5.3.	<i>Lage – gemiddelde afvoer: de sedimenthuishouding van kribvakken</i>	106
5.5.4.	<i>Hoogwater: aanzanding kribvakken</i>	108
5.5.5.	<i>Hoogwater: invloed uitwisseling zomer – winterbed en taludkarakteristieken op zandtransport</i>	110
5.5.6.	<i>Hoogwater versus laagwater sedimentbudget kribvakstranden</i>	112
5.6.	Het langjarig gedrag van kribvakstranden op basis van luchtfoto's	113
6.	Discussie	114
6.1.	Scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal	114
6.2.	De sedimenthuishouding van kribvakken bij lage - gemiddelde afvoeren	119
6.3.	De sedimenthuishouding van kribvakken bij hoge afvoeren	121
6.4.	De langjarige zandbalans van kribvakstranden langs de Waal	122
7.	Conclusies	127
	Aanbevelingen voor nader onderzoek	130
	Dankwoord	131
	Referenties	132
	Bijlagen	I t/m XXXIX

Lijst met figuren:

Figuur 2.1. De belangrijkste karakteristieken van kribben en kribvakstranden langs de Waal (Bron: Schans, 1998).

Figuur 2.2. De samenstelling van de Nederlandse binnenvaartvloot naar laadvermogenklasse in 1970 en 2001 (A), en de verdeling van het aantal scheepspassages bij Lobith naar laadvermogenklasse in 1970 en 2001 (B).

Figuur 2.3. De verandering in het vervoer per schip stroomopwaarts (boven) en stroomafwaarts (onder) sinds 1965, uitgedrukt in miljoen ton laadvermogen, met een onderscheid in duwvaart en andere schepen.

Figuur 3.1.. Het ruimtelijk patroon van scheepsgolven (A) en scheepsgeïnduceerde stroming (B) gerelateerd aan een gemeten registratie van de waterstand langs de oever (C).

Figuur 3.2. Opgewekte scheepsgolven langs de oever door een passerend schip. De onderste tijdreeks is een registratie gemeten in vak 2 bij Druten in de zomer van 1996.

Figuur 3.3. Kribvlammen in de bodemligging van het zomerbed van de Waal bij Druten.

Figuur 3.4. Circulatiecellen van de waterbeweging in een kribvak die worden versterkt door de scheepsgeïnduceerde waterbeweging: A voor een klein kribvak (één neer), B voor een groot kribvak (2 neren).

Figuur 3.5. De versnelling en vertraging van de stroom (links) en de bijbehorende stroompatronen (rechts) in 5 fasen van de passage van een 4-bakduwstel langs een kribvak bij Druten (op basis van de beschrijvingen van Robberecht en Wentink (1986), Verhey en Vermeer (1987) en Termes et al. (1991)).

Figuur 3.6. Het effect van de passage van een 4-bakduwstel langs het kleine kribvak 2 (1996) op de waterbeweging in het kribvak, weergegeven in de 5 fasen van de passage die zijn bediscussieerd aan de hand van figuur 3.5.

Figuur 3.7. Het effect van de passage van een 4-bakduwstel langs het grote kribvak 3 (1996) op de waterbeweging in het kribvak, weergegeven in de 5 fasen van de passage die zijn bediscussieerd aan de hand van figuur 3.5.

Figuur 3.8. Het effect van twee opeenvolgende passages van 4-bakduwstelen langs het kleine kribvak 2 (1996) op de waterbeweging in het kribvak, weergegeven in de 5 fasen van de passage die zijn bediscussieerd aan de hand van figuur 3.5.

Figuur 4.1. De 8 kribvakken langs de Waal waar in de zomers van 1996 (A, Druten) en 1997 (B, St. Andries) metingen zijn verricht aan de water- en sedimentbeweging.

Figuur 4.2. Het grote meetframe voor het meten van de stroomsnelheid, zandconcentratie en waterstand in het uitstroompunt van de kribvakken.

Figuur 4.3. Het kleine meetframe voor het meten van de stroomsnelheid, zandconcentratie en waterstand boven de stranden van de kribvakken.

Figuur 4.4. De meetposities van de 3 meetframes tijdens de metingen in kribvak 1 bij Druten in 1996

Figuur 4.5. De bodemligging van de kribvakken 1 (binnenbocht) en 2 t/m 4 (buitenbocht) van De meetcampagne bij St. Andries in 1997.

Figuur 4.6. Procentuele verdeling van onderscheiden kribvakken per klasse volgens Schans (1998).

Figuur 4.7. De afvoer bij Lobith in de periodes 1 mei – 31 juli 1996 (A) en 1997 (B).

Figuur 4.8. De procentuele verdeling van de scheepspassages naar laadvermogenklasse bij Lobith in 1996 (jaartotaal) en volgens de meetreeks bij Druten in juni 1996.

Figuur 4.9. De procentuele verdeling van de scheepspassages naar laadvermogenklasse bij Lobith in 1996 (jaartotaal) en volgens de meetreeks bij St. Andries in juni 1997.

Figuur 4.10. De fractie van de variantie in de waterstandsaling (A), stroomsnelheid (B) en zandconcentratie (C) die, binnen een betrouwbaarheidsinterval van 95%, wordt verklaard met een neurale netwerk dat stap voor stap gebaseerd is op een set invoervariabelen met een toenemende ondergrens voor de minimale scheepslengte.

Figuur 4.11. Het effect van het onderwatervolume van schepen op de opwoeling van zand in kribvakken, weergegeven voor een gradueel verloop van onderwatervolume (y-as) en passageafstand (x-as) (in kleur) en voor 4 onderwatervolumes als troebelheid in afhankelijkheid van de passagesafstand (A t/m D).

Figuur 4.12. De kribvakken langs de Waal waar in de periode van maart 1995 – juni 1999 de bodemligging van het kribvakstrand periodiek is gemeten middels echolodgingen en waterpassing.

Figuur 4.13. De 3 raaien per kribvak waarvan periodiek de hoogteligging is bepaald. Voorbeeld dat geldt voor alle 23 gemonitoorde kribvakken.

Figuur 4.14. De toegepaste methode voor het inmeten van de hoogte langs de raai langs verschillende delen van het profiel.

Figuur 4.15. De meetposities langs het talud loodrecht op de oever voor een meetraai vóór (A) en ná (B) projectie op een rechte lijn loodrecht op de oever.

Figuur 4.16. De definitie van kribvakstrand, steil talud en rivierbedding in het hoogteprofiel van de gemonitoorde raaien.

Figuur 4.17. Principeschets van de erosie en sedimentatie langs het talud van het kribvakstrand over een lijn loodrecht op de oever (A) en tegen de diepte van posities op het profiel (B).

Figuur 4.18. Het talud van kribvakstranden langs de Waal.

Figuur 5.1. Stroompatronen, gemeten op 4 locaties, in een kribvak in de buiten- (A) en binnenbocht (B) van de Waal bij St. Andries voor de situatie zonder passerende scheepvaart.

Figuur 5.2. Een voorbeeld van een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie in het uitstroompunt van een kribvak (A) en een meetpositie boven het kribvakstrand (B). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. Voor de stroomsnelheden geldt: + = naar de rivier toe (loodrecht op de oever) respectievelijk stroomopwaarts (evenwijdig aan de oever).

Figuur 5.3.. De stroomsnelheid gemeten boven het kribvakstrand van vak 2 aan de zuidoever bij Druten tijdens de passage van een Rijnschip, de berekende schuifspanning tijdens deze passage, en de berekende schuifspanning op dezelfde meetlocatie op een moment zonder scheepspassage.

Figuur 5.4. De bijdragen van zuiging en secundaire golven als gevolg van passerende duwvaart aan de schuifspanning van de waterbeweging op het sediment van de kribvakstranden.

Figuur 5.5. De waterbeweging in kribvak 3 bij St. Andries (buitenbocht) voor, tijdens en na de passage van een groot, beladen schip (A), de hierdoor opgewekte schuifspanning bij de bodem en de zandconcentratie (B).

Figuur 5.6. De gemiddelde stroomsnelheid op 10 cm boven de bodem van het kribvakstrand in vak 1 (zie figuur 4...) in de binnenbocht bij St. Andries tijdens een aantal scheepspassages en voor de situatie zonder passerende scheepvaart.

Figuur 5.7. De gemiddelde stroomsnelheid op 10 cm boven de bodem van het kribvakstrand in vak 3 (zie figuur 4...) in de buitenbocht bij St. Andries tijdens een aantal scheepspassages en voor de situatie zonder passerende scheepvaart.

Figuur 5.8. Het effect van de passage van 2 beladen duwstellen (rode strepen) op de waterstand (A) en de stroomsnelheid (B) en concentratie zwevend zand (C) op 8.5 cm boven de bodem in het uitstroompunt van kribvak 2 bij Druten.

Figuur 5.9 De invloed van een korte tussentijd tussen opeenvolgende scheepspassages op de waterstand (boven) en de stroomsnelheid (midden) en de zandconcentratie (onder) op 10 cm boven de bodem van het kribvakstrand in vak 2 bij Druten.

Figuur 5.10. De invloed van de passagefrequentie op de gemiddelde zandconcentratie van de meetreeksen van de kribvakken 2 en 3 bij Druten.

Figuur 5.11. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie boven het kribvakstrand in de binnenbocht bij St. Andries(vak 1). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De eerste 2 passages (= rode strepen) zijn vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2

Figuur 5.12. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie in het uitstroompunt van het kribvak in de binnenbocht bij St. Andries(vak 1). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De eerste 2 passages (= rode strepen) zijn vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2

Figuur 5.13. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie boven het kribvakstrand in de buitenbocht bij St. Andries(vak 2). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De op een na laatste passage (= rode streep) is vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2

Figuur 5.14. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie in het uitstroompunt van het kribvak in de buitenbocht bij St. Andries(vak 2).. Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De op een na laatste passage (= rode streep) is vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2

Figuur 5.15. De variatie van het zandtransport per strekkende meter met het onderwatervolume en de passageafstand van schepen langs de zuid- en noordoever voor de meetposities boven het strand (links) en in het uitstroompunt (rechts) tijdens de op- respectievelijk afvaart.

Figuur 5.16. De invloed van 4 verschillende typen schepen in de opvaart op de zandopwoeling (A), het zandtransport per strekkende meter (B) en de maximale stroomsnelheid (C) in het uitstroompunt van kribvak 2 aan de zuidoever bij Druten, volgens het opgestelde neurale netwerk en de gemiddelde waardes voor de geregistreerde scheepskarakteristieken. In de rechter grafieken D, E en F zijn de waardes per schip uit de linkergrafieken vermenigvuldigd met het relatieve aandeel van het bewuste type schip in het totaal aan waargenomen scheepspassages van de 4 scheepstypen.

Figuur 5.17. De invloed van 4 verschillende typen schepen in de afvaart op de zandopwoeling (A), het zandtransport per strekkende meter (B) en de maximale stroomsnelheid (C) in het uitstroompunt van kribvak 3 aan de zuidoever bij Druten, volgens het opgestelde neurale netwerk en de gemiddelde waardes voor de geregistreerde scheepskarakteristieken. In de rechter grafieken D, E en F zijn de waardes per schip uit de linkergrafieken vermenigvuldigd met het relatieve aandeel van het bewuste type schip in het totaal aan waargenomen scheepspassages van de 4 scheepstypen.

Figuur 5.18. De verandering in de omvang van het transport over de Rijn bij Lobith in stroomopwaartse richting gedurende de periode 1975-2000, met een onderscheid in motorschepen (kanaal- en Rijnschepen) en duwvaart).

Figuur 5.19. De verdeling van de scheepvaart over de dwarsdoorsnede van de Waal bij Druten volgens de waarnemingen van de meetcampagne van 1996, met een onderscheid naar opvaart (A) en afvaart (B) .

Figuur 5.20. Het rivierwaarts gericht zandtransport (in 1000 kg/m/jaar) in de uitstroompunten van het kleine kribvak aan de zuidoever en het grote kribvak aan de noordoever (grote én kleine neer), berekend voor de situatie van op- en afvaart, en de jaren 1970, 2001 en 2010.

Figuur 5.21. Het erosieve effect van scheepspassages op de bodemligging van het kribvakstrand in het kleine vak aan de zuidoever en het grote vak aan de noordoever bij Druten, op jaarbasis gebaseerd op de zandfluxen van

Figuur 5.22. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis voor 3 situaties, berekend op basis van de informatie uit voorgaande figuren.

Figuur 5.23. De cumulatieve strandoppervlakte (A) langs de beide oevers van de Waal volgens de dataset van Schans (1998) en het cumulatieve zandverlies (B) uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis voor de situatie 2001, berekend op basis van de informatie uit voorgaande figuren.

Figuur 5.24. De scoretabel met de overheersende morfologische procesrichting van de 23 gemonitoorde kribvakken (vertikale as) gedurende 7 tijdvakken (8 opnames), direct gerelateerd aan het hierbij horende afvoerverloop bij Lobith.

Figuur 5.25. Vervlakking van het kribvakstrand tijdens een hoger afvoer (B) door erosie van het hoge en sedimentatie op het lage deel (A).

Figuur 5.26. Het verschil in het morfologisch gedrag van kribvakstranden tijdens een hoge afvoer in een buiten- (A) en binnenbocht (B).

Figuur 5.27. De hoeveelheid erosie (-) en sedimentatie (+) van/op het kribvakstrand van de 6 secties van de monitoring voor alle tijdvakken, voor het totale talud (A), het talud dat in het betreffende tijdvak onder water stond (B), en het droge talud (B). De linker diagrammen geven het ruimtelijke, de rechter diagrammen het temporele beeld weer.

Figuur 5.28. De, waarschijnlijk onjuiste, erosie en sedimentatie langs het strandtalud van sectie 1, uitgezet tegen de diepte van het talud voor 2 opeenvolgende verschildtijdvakken.

Figuur 5.29. De erosie (-) en sedimentatie (+) uitgezet tegen de dieptes van het talud van het kribvakstrand over een lijn loodrecht op de oever voor de periode van de lage afvoeren (maart 1995 – februari 1998) en het hoogwater effect (februari 1998 – juni 1999).

Figuur 5.30. Aanwijzingen voor verstuiwing van zand van het kribvakstrand naar het hogere talud tegen de vegetatielijn in de periode juli 1995 – februari 1998 in kribvak 6A.

Figuur 5.31. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis, volgens de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden én volgens de invloed van scheepvaart op basis van Neurale Netwerken. De boven- en ondergrens hebben betrekking op éénmaal de standaarddeviatie rond het gemiddelde.

Figuur 5.32. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis, volgens de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden én volgens de invloed van scheepvaart op basis van Neurale Netwerken. Dezelfde resultaten als figuur 5.29, maar nu zonder de boven- en ondergrens bij de resultaten van de monitoring.

Figuur 5.33. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis, met een onderscheid naar noord- en zuidoever, volgens de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden én volgens de invloed van scheepvaart op basis van Neurale Netwerken.

Figuur 5.34. De cumulatieve zandaanvoer naar kribvakken langs de Waal tijdens de periode van monitoring met het hoogwater effect van 1998, met een onderscheid naar noord- en zuidoever.

Figuur 5.35. De cumulatieve zandaanvoer naar kribvakken langs de Waal tijdens de periode van monitoring met het hoogwater effect van 1998 (A), en het cumulatieve zandverlies in de periode tussen de hoogwaters van 1995 en 1998 (B), beide met een onderscheid naar noord- en zuidoever.

Figuur 5.36. Het zandtransport tijdens een hoogwater vanuit de vaargeul naar de oeverzone voor de linkeroever van de Waal tussen km 900 en 930, voor de kribvakstranden (1998) en de oeverwal (1995).

Figuur 5.37. Het zandtransport tijdens een hoogwater naar het kribvakstrand voor de linkeroever van de Waal tussen km 900 en 930, uitgezet tegen de steilheid van het bijbehorende talud op de overgang van vaargeul naar kribvakstrand.

Figuur 5.38. De toename cq afname van de hoeveelheid zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar (in m³).

Figuur 5.39. De toename cq afname van de hoeveelheid zand tussen de kribben langs de Waal, bepaald aan de hand van luchtfoto's van de oevers van de Waal (m³/jaar).

Figuur 6.1. De relatie tussen onderwatervolume en de hierbij horende tonnenmaat van de verschillende scheepstypen in de binnenvaart (bron: www.binnenvaart.be).

Figuur 6.2. De erosieve druk van stroomopwaartse varende scheepvaart op het kribvakstrand, uitgedrukt per ton transport voor verschillende scheepstypen (in 10⁻⁹ m erosie van het strandoppervlak per ton getransporteerde vracht per jaar), voor de zuid- (A) en de noordzijde (B) van de Waal.

Figuur. 6.3. De balans voor zand (en grind) voor de Bovenrijn - Waal voor de periode 1990-2000 (in m³/jaar) (A) en het hoogwater van 1995 (in m³) (B). Bron: Ten Brinke et al., 2001.

Figuur 6.4. De herhalingsdij van hoge afvoeren bij Lobith.

Figuur 6.5. De afvoergolven van 1995, 1997 en 1998 bij Lobith.

Figuur 6.6. De cumulatieve erosie en sedimentatie van kribvakstranden langs de Waal tijdens de opeenvolging van periodes met lagere en hoge afvoeren, voor de stranden langs de zuid- (A) en noordoever (B).

Figuur 6.7. Een visualisatie van het ademen van de kribvakstranden langs de Waal in de periode 1970-2000, met geleidelijke erosie bij lagere afvoeren en snelle sedimentatie tijdens hoogwaters

Lijst met tabellen:

Tabel 1.1. Een rekensommetje dat aangeeft hoeveel zand gepaard gaat met een 10 cm bodemhoogte verandering van het strand in de kribvakken langs de Bovenrijn en Waal.

Tabel 2.1. Gekwantificeerde karakteristieken van kribben, kribvakken en oevers langs de Waal in de database van Schans (1998).

Tabel 2.2. Gemiddelde eigenschappen + standaarddeviatie van de kribvak karakteristieken langs de Waal volgens Schans (1998).

Tabel 4.1. Overzicht van de locaties van de kribvakken langs de Waal waar in 1996 en 1997 metingen zijn verricht aan de water- en sedimentbeweging.

Tabel 4.2. Onderscheiden scheepstypen bij het onderzoek naar scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal.

Tabel 4.3. De eigenschappen van scheepspassages die beschikbaar zijn als invoervariabelen voor de neurale netwerken.

Tabel 4.4. De samenstelling van 11 datasets, uitgedrukt in scheepsklasse, met verschillende ondergrens van nog in beschouwing genomen scheepslengtes bij opgestelde neurale netwerken.

Tabel 4.5. Overzicht van de data waarop de bodemligging van de 23 kribvakstanden is gemeten.

Tabel 5.1. De karakteristieken van scheepspassages langs de kribvakken 1 (binnenbocht) en 2 (buitenbocht) bij St. Andries in de registraties van de figuren . De schepen in de onderscheiden witte en grijze blokken in de tabel vormen steeds samen één rode streep in de figuren.

Tabel 5.2. De voorspelbaarheid van de water- en sedimentbeweging in kribvakken voor de ontwikkelde neurale netwerken, uitgedrukt in de correlatie R en de fractie verklaarde variantie.(FVV), voor de 10 netwerken (5 posities en op-/afvaart) en de zandconcentratie (boven), zandtransporten (midden) en stroomsnelheid (onder).

Tabel 5.3. Kwaliteitslabels voor de voorspelbaarheid van de water- en sedimentbeweging in kribvakken voor de ontwikkelde neurale netwerken (voor onderbouwing labels: zie intermezzo).

Lijst met foto's:

Foto 1.1. Het strand van een kribvak langs de Waal bij Druten tijdens een zeer lage rivierwaterstand.

Foto 1.2. Luchtfoto van kribvakstranden langs de Waal bij een lage rivierwaterstand.

Foto 1.3. De passage van een 4-baks duwstel langs een kribvak langs de Waal.

Lijst met intermezzo's:

Intermezzo 4.1. Feedforward, feedback, transfer-functies

Intermezzo 4.2. Trainen en valideren van neurale netwerken

Intermezzo 5.1. Een aantal testcriteria voor de kwaliteit van het model.

Samenvatting

De oevers langs de Nederlandse Rijntakken worden gekenmerkt door de aanwezigheid van zandstranden tussen kribben. Deze stranden danken hun aanwezigheid aan de kribben en zijn daardoor niet natuurlijk maar karakteristiek voor een genormaliseerde laaglandrivier. Deze situatie geldt voor de Rijntakken al meer dan 100 jaar. De stranden hebben zich tot op de dag van vandaag kunnen handhaven. Dit ondanks indicaties in het verleden als zouden de stranden aan erosie onderhevig zijn. Als potentiële oorzaak van deze erosie werd in het verleden gekeken naar de toenemende scheepvaart.

Dat scheepvaart een rol speelt bij het eroderen van zand van de kribvakstranden lijkt logisch. Zuiging en golfwerking langs de oevers zal zand vanuit de kribvakken naar de rivier voeren. Hoe sterk dit proces is, welke scheepstypen en eigenschappen van scheepspassages met name een rol spelen, en hoe een veranderende omvang en samenstelling van de binnenvaart doorwerkt in dit erosieproces, was tot voor kort niet bekend. Onderzoek, uitgevoerd in de jaren tachtig door WLIDelft Hydraulics en Rijkswaterstaat, was uitsluitend gericht op de 4- en 6-baksduwstellen. Bovendien bleven deze studies beperkt tot enkele 'model'-kribvakken. Een vertaalslag naar de invloed van de binnenvaart als geheel op de sedimenthuishouding van een riviertak als geheel kon op grond van dit onderzoek niet worden gemaakt.

De eroderende invloed van scheepvaart in combinatie met de blijvende aanwezigheid van de kribvakstranden geeft aan dat er ook momenten zijn dat zand vanuit de rivier naar het kribvakstrand wordt gevoerd. Het enige moment waarop dit in voldoende mate zou kunnen gebeuren is tijdens hoge afvoeren, als de kribben overstroomd raken. Het ziet er naar uit dat erosie door scheepvaart bij lage – gemiddelde afvoeren, en sedimentatie bij hoge afvoeren elkaar op een termijn van tientallen jaren in evenwicht houden. Deze hypothese is in de voorliggende studie onderzocht. Zowel erosie bij lage tot gemiddelde afvoeren als sedimentatie bij hoge afvoeren zijn onderzocht en gekwantificeerd. Hiervoor is de bodemligging van 23 kribvakstranden langs de Waal gedurende 4 jaar periodiek gemeten, met een onderscheid naar lage-gemiddelde afvoer en hoge afvoer processen. Daarnaast is de eroderende rol van scheepvaart in meer detail onderzocht door in kribvakken langs de Waal de water- en sedimentbeweging tijdens scheepspassages te meten en te relateren aan de eigenschappen van deze passages. Hiervoor zijn kunstmatige neurale netwerken toegepast.

Uit het onderzoek blijkt dat de hypothese van erosie bij lage – gemiddelde afvoer en sedimentatie bij hoge afvoer wordt bevestigd door de tijdreeks van de bodemligging van de kribvakstranden. Hoge afvoeren blijken in korte tijd veel zand naar de stranden te voeren dat in het tijdvak tussen hoogwaters geleidelijk aan weer aan de rivier wordt teruggeleverd. Dit transport naar de rivier wordt aangedreven door de scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in de kribvakken. Afvoeren die voldoende hoog zijn om zand naar de kribvakken te transporteren hebben een herhalingsperiode van ongeveer eens in de 5 jaar. Het hoogwater van 1998 voldoet hieraan. Dit hoogwater heeft volgens de monitoring van de bodemligging van de stranden ongeveer 370.000 m³ naar de kribvakken langs de Waal getransporteerd. Als de resultaten van de monitoring worden geëxtrapoleerd naar een periode van 5 jaar, levert dit een berekende erosie van 430.000 m³ op. Dit betekent dat op een tijdschaal van enkele tientallen jaren, als een voldoende representatieve verhouding van aantallen hoogwaters en lagere afvoertijdvakken is opgetreden, erosie en sedimentatie van de stranden in balans zijn. De toepassing van de berekende erosie- en

sedimentatiekentallen op de afvoerreeks van de Waal voor de periode 1970-2000 illustreert dit.

Uit de monitoring en de neurale netwerken blijkt dat de erosie door scheepvaart langs de zuidoever twee keer zo groot is als langs de noordoever. Dit is het gevolg van het verschil in beladen vaart stroomopwaarts langs de zuidoever en (grotendeels) onbeladen vaart terug naar Rotterdam langs de noordoever. Ook dit verschil in erosie van beide oevers wordt gecompenseerd door een hogere sedimentatie langs de zuidoever tijdens een hoogwater. Van de eigenschappen van scheepspassages zijn met name het onderwatervolume en de passage-afstand uit de oever bepalend voor het effect op de water- en sedimentbeweging in een kribvak.

Het eroderende effect van een individuele passage is het hoogst voor de beladen 4-baksduwvaart. Toch speelt de duwvaart ten opzichte van de rest van de binnenvaart een ondergeschikte rol bij de sedimenthuishouding van kribvakken. Het relatieve grote effect per passage wordt voor de duwvaart ruimschoots teniet gedaan door de geringe bijdrage van de duwvaart aan het totaal van scheepspassages op de Waal op jaarbasis. Met name de grotere motorschepen (Kanaal- en Rijnschepen) zijn dé drijvende kracht achter de erosie van zand uit de kribvakken langs de Waal. De omvang van dit deel van de binnenvaart is in de afgelopen jaar gestaag toegenomen terwijl de omvang van de duwvaart gelijk is gebleven. Als deze ontwikkeling wordt doorgetrokken, zal de relatieve invloed van de duwvaart op de sedimenthuishouding van kribvakken in de komende jaren nog verder afnemen. De duwvaart lijkt daarmee, voor de stabiliteit van de kribvakstranden, geen bedreiging te vormen.

1 Inleiding

1.1. De relevantie van het onderzoek

In de afgelopen jaren heeft het RIZA onderzoek verricht naar de sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal. Dit onderzoek omvatte veldmetingen aan de water- en sedimentbeweging, analyses met o.a. neurale netwerken, monitoring en analyse van een tijdreeks van bodemliggingen van kribvakstranden en luchtfotostudie. Al deze brokstukken dragen bij aan de kennis van de sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal. In dit rapport wordt het verhaal van de sedimenthuishouding met name verteld aan de hand van onderzoek sinds 1996. Maar al gedurende meerdere jaren hieraan voorafgaand, met name in de jaren tachtig, is de water- en sedimentbeweging in kribvakken onderwerp van studie geweest. De resultaten uit deze studies vormden het vertrekpunt van het onderzoek dat is uitgevoerd sinds 1996 en de belangrijkste bevindingen uit deze eerdere studies zijn in dit rapport samengevat en in de beschouwingen bij de analyses en discussie meegenomen.



Foto 1.1. Het strand van een kribvak langs de Waal bij Druten tijdens een zeer lage rivierwaterstand

Van alle Rijntakken wordt met name de Waal gekenmerkt door het voorkomen van stranden in de vakken tussen de kribben. Deze stranden kunnen een breedte van meerdere tientallen meters hebben, afhankelijk van de lengte van de kribben en de positie van de kribvakken ten opzichte van de stroomnaad van de rivier. Met name in binnenbochten langs de Waal zijn de stranden tussen de kribben veelal zeer uitgestrekt en vullen ze, bij lage afvoer, een groot deel van het vak (foto 1.1).



Foto 1.2. Luchtfoto van kribvakstranden langs de Waal bij een lage rivierwaterstand.

De rivier en de kribvakken wisselen onderling voortdurend zand uit. Deze zanduitwisseling is soms de kribvakken uit, en soms de kribvakken in gericht. Het vermoeden bestaat dat het zandtransport uit de vakken naar de rivier overheerst gedurende het grootste deel van de tijd, namelijk de periode dat de kribben boven water liggen en de kribvakken zelf niet direct worden beïnvloed door de rivierafvoer. Drijvende kracht achter dit zandverlies uit de kribvakken zou dan de scheepsgeïnduceerde waterbeweging moeten zijn. En compensatie van dit zandverlies zou dan plaatsvinden bij hogere afvoer als zand vanuit het zomerbed de kribvakken wordt ingevoerd, en deels op de oeverwallen wordt afgezet. Binnen een periode van hooguit enkele jaren zou er sprake kunnen zijn van een overheersing van het ene over het andere proces. Over een periode

van meerdere jaren is een balans tussen het resultaat van beide processen waarschijnlijk. Immers de kribvakstranden langs de grote rivieren weten zich al meer dan 100 jaar te handhaven (foto 1.2). Overigens is in het verleden wel melding gemaakt van kribvakerosie langs de Waal. Zo zou volgens Bruin (1977) in de periode 1960-1977 op het traject Hulhuizen-Zaltbommel 3-4 miljoen m³ erosie hebben plaatsgevonden, resulterend in een gemiddelde bodemdaling per kribvak van 0.5-0.75 m. Leemans en Reiling (1986) meldden dat halverwege de jaren tachtig ongeveer 15-20% van de oevers langs de Waal dermate door erosie bedreigd werd dat onmiddellijk oeververdedigingsmaatregelen nodig zouden zijn. Kornman (1993) concludeerde op basis van een luchtfotostudie dat er onvoldoende gegevens voorhanden zijn om de bodemontwikkeling in kribvakken te bepalen. Volgens Kornman waren de kribvakstranden mogelijk wel wat opgeschoven in de tijd (erosie begroeiing), maar waren hierover geen uitspraken te doen.

Gezien de breedte van de kribvakstranden langs de Waal vertegenwoordigen deze stranden een grote hoeveelheid zand. Een geringe verlaging of verhoging van het strandniveau betekent de uitwisseling van een relatief grote hoeveelheid zand tussen rivier en kribvakken. Een eenvoudig rekensommetje in tabel 1.1 laat dit zien: 10 cm verhoging of verlaging van het strandniveau betekent een zanduitwisseling met de rivier van bijna 400.000 m³. Een dergelijke hoogteverandering binnen een jaar is goed voorstelbaar. Dit zou betekenen dat de grootte van de zanduitwisseling tussen rivier en kribvakken dezelfde orde van grootte bedraagt als de jaarlijkse zandaanvoer in de Waal bovenstrooms (Ten Brinke et al., 2001). De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal is daarom een belangrijk onderdeel van de morfodynamica van de rivier als geheel. Voldoende reden dus om deze sedimenthuishouding nader te kwantificeren.

Tabel 1.1. Een rekensommetje dat aangeeft hoeveel zand gepaard gaat met 10 cm bodemhoogte verandering van het strand in de kribvakken langs de Bovenrijn en Waal.

	Noordoever	Zuidoever	Totaal
% strand langs de oeverlijn	78	83	81
Gemiddelde strandbreedte (m)	25	25	25
Strandoppervlakte per vak (m ²)	4651	4680	4651
Aantal vakken	400	399	799
Inhoudsverschil	186.000	187.000	373.000

1.2. Hypothese en doelstelling

In 1996 is gestart met het project 'Sedimenthuishouding Kribvakken'. De doelstelling van dit project is destijds als volgt geformuleerd:

De kwantificering van de temporele variatie in de netto aan-/afvoer van sediment naar/uit de kribvakken, de analyse van processen en factoren die de sedimentbeweging sturen, en de modellering van de sedimenthuishouding van kribvakken door parametrisatie van causale verbanden.

De temporele variatie van de sedimenthuishouding van kribvakken is sterk gerelateerd aan de hoogte van de rivierafvoer (cq waterstand) in combinatie met de invloed van passerende scheepvaart. Bij lage tot gemiddelde rivierafvoeren zal de stroming in de kribvakken zwak zijn en het karakter hebben van circulatiecellen. De stroming zal waarschijnlijk niet sterk genoeg zijn om zand vanuit de rivier het kribvak in te transporteren. Passerende scheepvaart zal de circulatiecellen versterken en deze stroming zal, in combinatie met de opgewekte golfwerking, periodiek voldoende sterk zijn om zand op te woelen en in beweging te brengen. Dit zand zal deels via de circulatiecellen het kribvak uit worden getransporteerd. De meest waarschijnlijke situatie bij lage tot gemiddelde rivierafvoeren lijkt daarom die van een gestaag, zij het per tijdseenheid gering, zandverlies uit de kribvakken te zijn. Aangezien de kribvakstranden zich op een tijdschaal van tientallen jaren weten te handhaven, moeten er ook momenten zijn waarop het zandtransport het kribvak in is gericht. Dit zou de situatie bij hoogwaters moeten zijn, als de kribben overstroomd zijn en het met het water meebewegende zand vanuit de rivier de kribvakken in kan komen. In een situatie waarbij kribvakstranden zich over een periode van tientallen jaren weten te handhaven zouden beide mechanismen min of meer met elkaar in evenwicht moeten zijn. Maar dit evenwicht kan verstoord raken als een van beide mechanismen wordt versterkt of verzwakt. Dit zou kunnen gebeuren door bijvoorbeeld veranderingen in de scheepvaart, in constructies langs de rivier of de afvoeren van de rivier.



Foto 1.3. De passage van een 4-baks duwstel langs een kribvak langs de Waal.

Bovenstaande theorie is aan het begin van het project geformuleerd als hypothese. Deze hypothese is onderzocht middels het uitvoeren van 3 typen onderzoek:

- ⇒ Het meten van de invloed van passerende scheepvaart op de water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal en de modellering van de processen onder invloed van passerende scheepvaart middels Kunstmatige Neurale Netwerken en gemeten data.
- ⇒ Het monitoren van de bodemligging van een reeks kribvakstranden langs de Waal, gemeten 8 keer gedurende 4 jaar, en het analyseren van deze dataset gericht op hoogwater versus laagwater effecten.
- ⇒ Het vaststellen van de lange-termijn variatie in de oppervlakte kribvakstrand langs de Waal op basis van de analyse van de strandoppervlakte op luchtfoto's op 4 momenten verspreid over een periode van 20 jaar.

2 Karakteristieken van het gebied

2.1. Kribben, kribvakken en oevers

Langs de beide oevers van de Bovenrijn en Waal komen in totaal ongeveer 1600 kribben voor. Schans (1998) heeft een database opgesteld met een reeks eigenschappen van alle kribben, kribvakstranden en oevers langs de Waal. Deze database is met name gebaseerd op een studie van luchtfoto's en rivierkaarten. Een overzicht van de variabelen in de database is weergegeven in tabel 2.1.

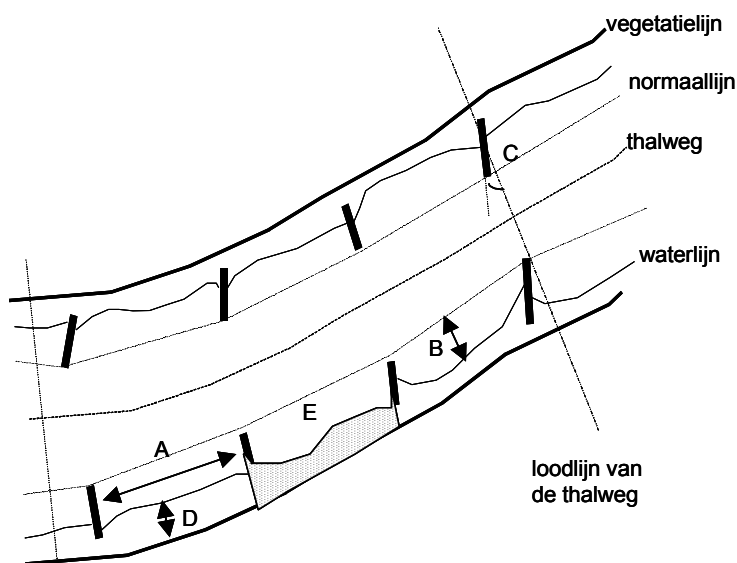
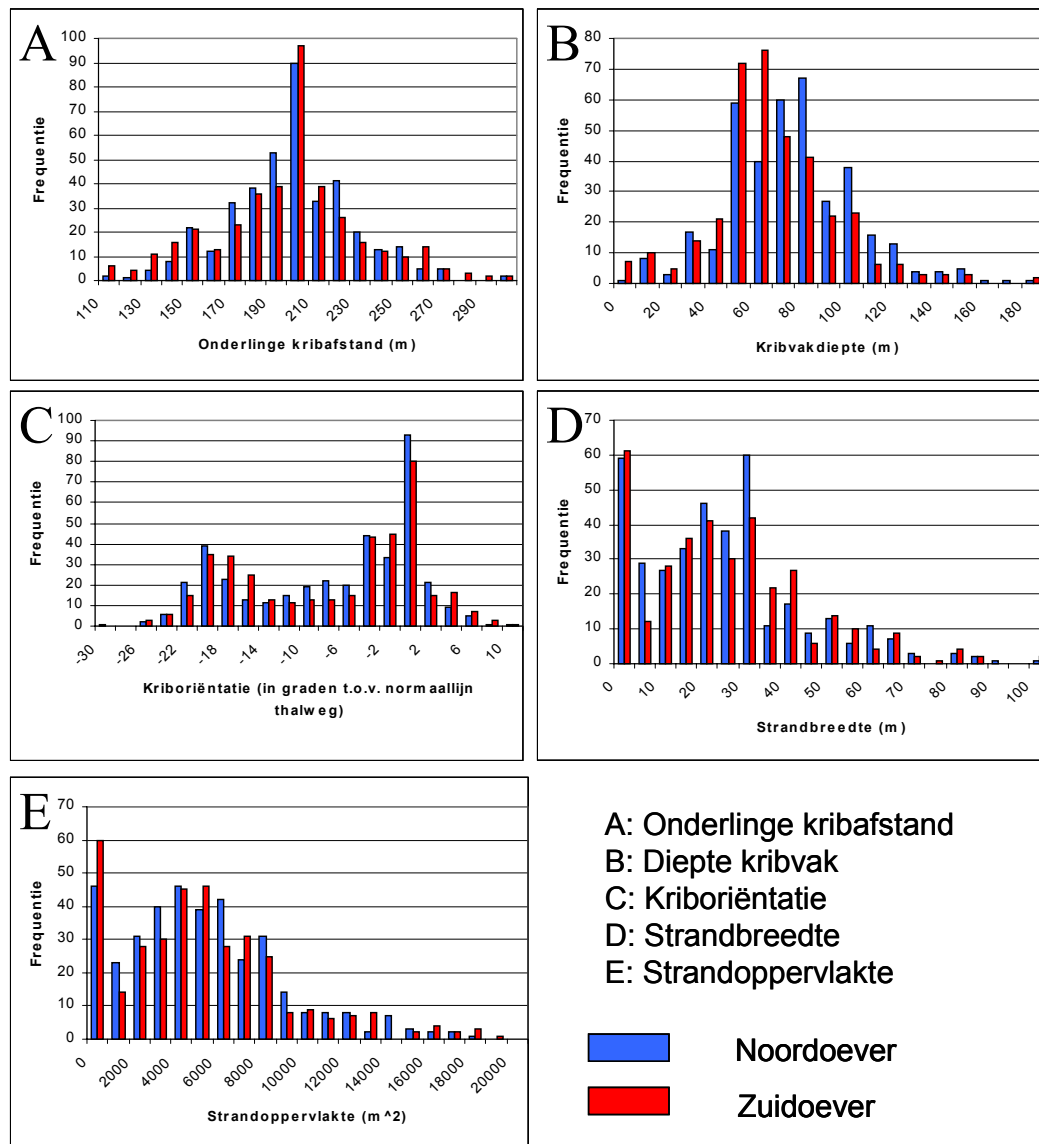
Tabel 2.1. Gekwantificeerde karakteristieken van kribben, kribvakken en oevers langs de Waal in de database van Schans (1998).

Variabele	Definitie	bron	Nauwkeurigheid
krib bovenstrooms (m)	aan de hand van de Rijnkilometrering de positie van de bovenstroomse krib vastleggen	rivierkaarten	
krib benedenstrooms (m)	idem maar nu voor benedenstroomse krib	rivierkaarten	
kribafstand (m)	afstand tussen de kribben	rivierkaarten	± 5 m
breedte kribvak (m)	afstand vanaf normaallijn tot waterlijn	luchtfoto's	± 5 m
oeverlengte (m)	werkelijke lengte van de waterlijn	luchtfoto's	± 10 m
oriëntatie kribben (°)	hoek van de krib ten opzichte van de loodlijn van de thalweg, vanaf het rivierwaartse deel van de loodlijn met de klok mee geeft een positieve hoek	rivierkaarten en luchtfoto's	± 3 °
oriëntatie kribvak (°)	hoek van de normaallijn ten opzichte van het noorden	rivierkaarten	± 3 °
afstand normaallijn tot thalweg (m)	normaallijn is de lijn die de kribkoppen verbindt	rivierkaarten	± 5 m
rivierbreedte (m)	normaalbreedte van de rivier	bestand RWS	± 5 m
breedte kribvakstrand (m)	afstand tussen waterlijn en vegetatielijn (is de grens tussen het zandige strand en het begroeide achterland) in het midden van het kribvak	luchtfoto's	± 5 m
oppervlakte kribvakstrand (m ²)	oppervlakte van het strand	luchtfoto's	± 50 m ²
oevertype (-)	onderscheiden worden: steilrand; geleidelijke overgang; bestort (verdedigd met steen); uitgang (haven, zandgat of natuurgebied); volgestort	rivierkaarten, luchtfoto's en bodempeilingen	
d ₅₀ kribvakmateriaal (m)	gemiddelde korrelgrootte van bodemsediment in een kribvak	literatuur (niet veel data!)	
talud kribvakbodem (m:m)	gemiddelde helling tussen waterlijn en normaallijn (of begin steilrand op de overgang van kribvak naar hoofdgeul als deze oeverwaarts van de normaallijn ligt)	bodempeilingen en literatuur	
bochttype (-)	onderscheiden worden: binnenbocht, buitenbocht en recht	rivierkaarten en bestand RWS	

De, voor deze studie, meest relevante karakteristieken uit de database van Schans zijn weergegeven in figuur 2.1, voor wat betreft de frequentieverdeling, en in tabel 2.2 als gemiddelden \pm de standaard deviatie. De kribben langs de Waal liggen gemiddeld 200 m uit elkaar. De onderlinge kribafstand varieert tussen 100 en 300 m. De kribvakdiepte geeft de afstand van de normaallijn tot de waterlijn in het kribvak weer, zoals waargenomen op luchtfoto's. Deze diepte ligt over het algemeen tussen 60 en 100 m. De kribben hebben een vrij geringe oriëntatie ten opzichte van de normaallijn of de thalweg. Dit betekent dat zij over het algemeen vrij loodrecht op de oever staan. De oriëntatie is enigszins negatief, hetgeen betekent dat de kribben enigszins in de stroomopwaartse richting van de rivier wijzen en de kribben onder een hoek van iets minder dan 90 ° worden aangestroomd. De strandbreedte op de luchtfoto's bedraagt gemiddeld 25 meter, maar de variatie is groot en breedtes tot 100 meter zijn waargenomen. Ook de strandoppervlakte varieert sterk, maar is over het algemeen minder dan 10.000 m² per kribvak. Er zijn voor de verschillende karakteristieken geen significante verschillen waar te nemen tussen noord- en zuidoever.

Tabel 2.2. Gemiddelde eigenschappen + standaarddeviatie van de kribvak karakteristieken langs de Waal volgens Schans (1998).

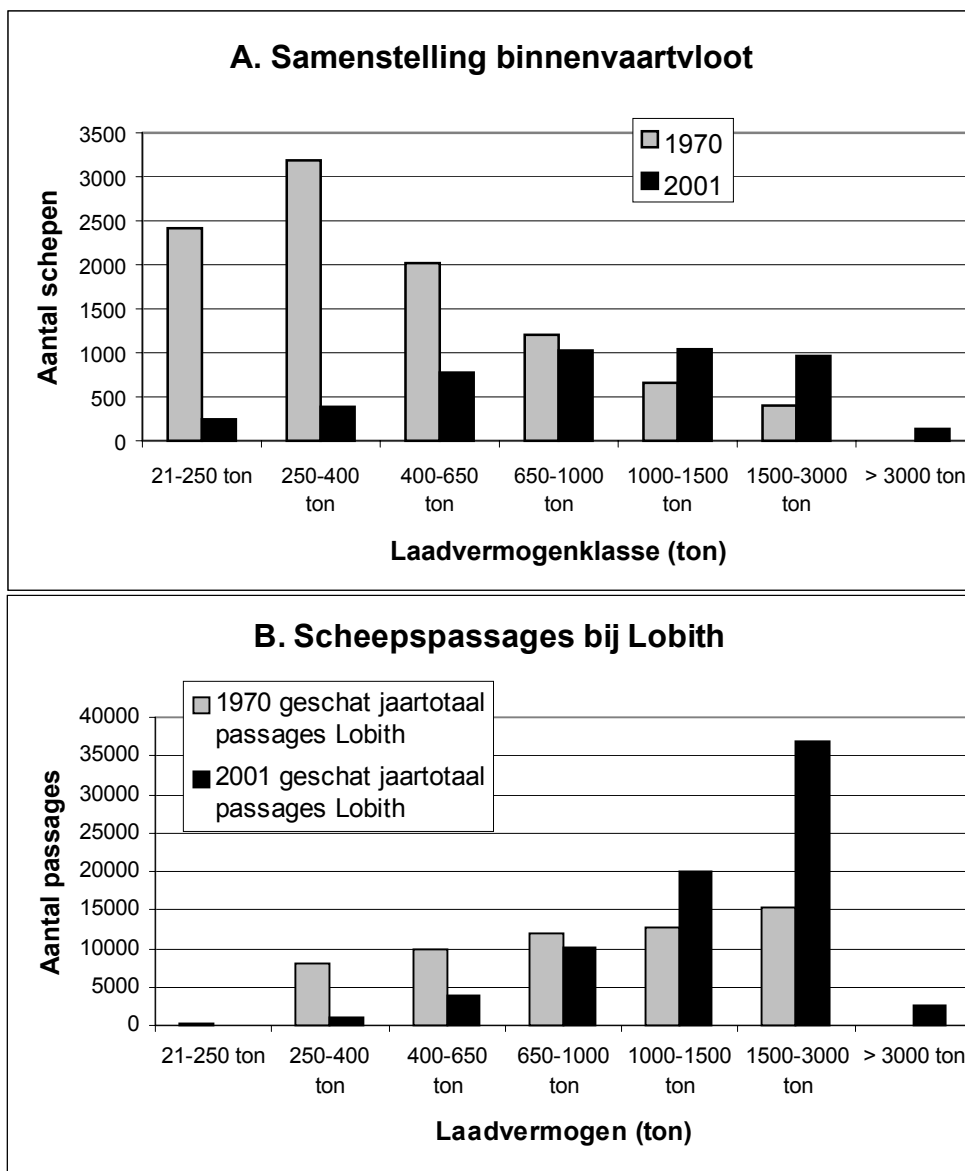
	Noordoever	Noordoever	Zuidoever	Zuidoever
	Gemiddelde	Standaard deviatie	Gemiddelde	Standaard deviatie
Onderlinge kribafstand (m)	199.6	36.0	196.7	39.3
Diepte kribvak (m)	73.4	32.1	63.2	27.8
Oriëntatie kribben	-8.0	8.6	-8.0	8.7
Breedte kribvakstrand (m)	24.7	21.6	25.4	20.8
Oppervlakte kribvakstrand (m2)	4650.6	3789.2	4680.3	4126.5



Figuur 2.1. De belangrijkste karakteristieken van kribben en kribvakstranden langs de Waal (Bron: Schans, 1998).

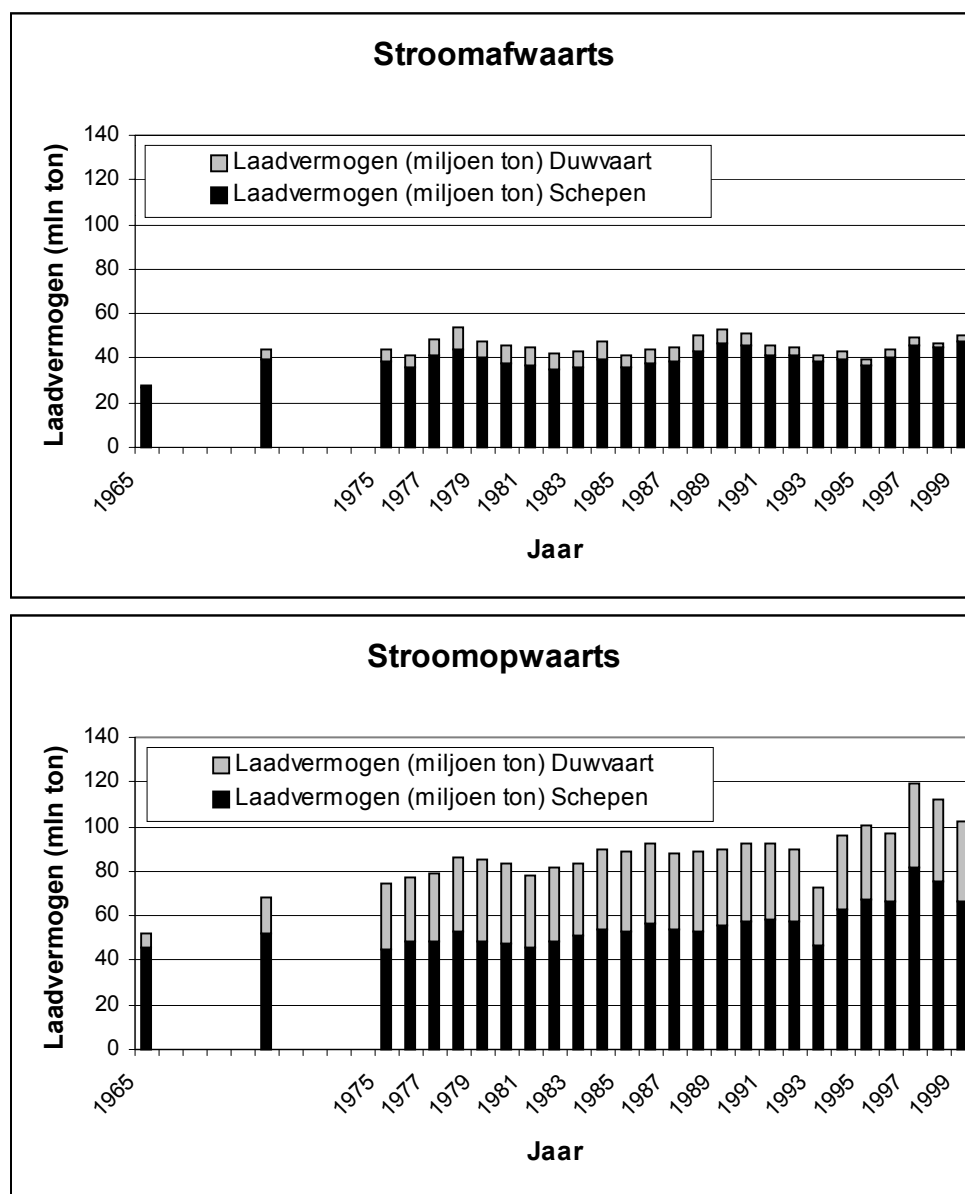
2.2. Scheepvaart op de Waal

In de tweede helft van de vorige eeuw is de intensiteit van de scheepvaart op de Waal sterk toegenomen. Niet alleen het aantal scheepsbewegingen op de rivier, maar ook het volume van de schepen is sterk toegenomen. Dit blijkt uit de cijfers van het CBS die voor de jaren 1970 en 2001 grafisch zijn weergegeven in figuur 2.2.A-B. Figuur 2.2.A toont de samenstelling van de binnenvaartvloot in 1970 en 2001 naar laadvermogenklasse. Het aantal kleine schepen is fors afgenomen en het aantal grote schepen is toegenomen. De afname van het aantal kleine schepen is aanmerkelijk groter dan de toename van het aantal grote schepen. Dit wil echter niet zeggen dat het op de rivier rustiger is geworden. De binnenvaart is, in vergelijking met 1970, veel meer een 24-uurs-gebeuren geworden. Met name de grote schepen zijn min of meer continu in de vaart. Dit betekent dat, hoewel het aantal (kleine) schepen is afgenomen, het aantal scheepspassages bij Lobith (figuur 2.2.B) sterk is toegenomen.



Figuur 2.2. De samenstelling van de Nederlandse binnenvaartvloot naar laadvermogenklasse in 1970 en 2001 (A), en de verdeling van het aantal scheepspassages bij Lobith naar laadvermogenklasse in 1970 en 2001 (B).

De scheepvaart op de Waal betreft voor een groot deel transport van goederen tussen Rotterdam en Duisburg. Veel van de schepen gaan vol naar Duitsland en komen leeg terug. Dit geldt met name voor de duwvaart (1- t/m 6-bakduwstellen) die het transport van bulkgoederen van de Maasvlakte naar het Duitse achterland verzorgt. De cijfers van het CBS laten dit verschil tussen op- en afvaart in het transport door duwvaart en schepen (eigen motorvermogen) goed zien (figuur 2.3). Voor de water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal is dit verschil van groot belang omdat de opvaart veelal de zuidoever en de afvaart veelal de noordoever volgt.

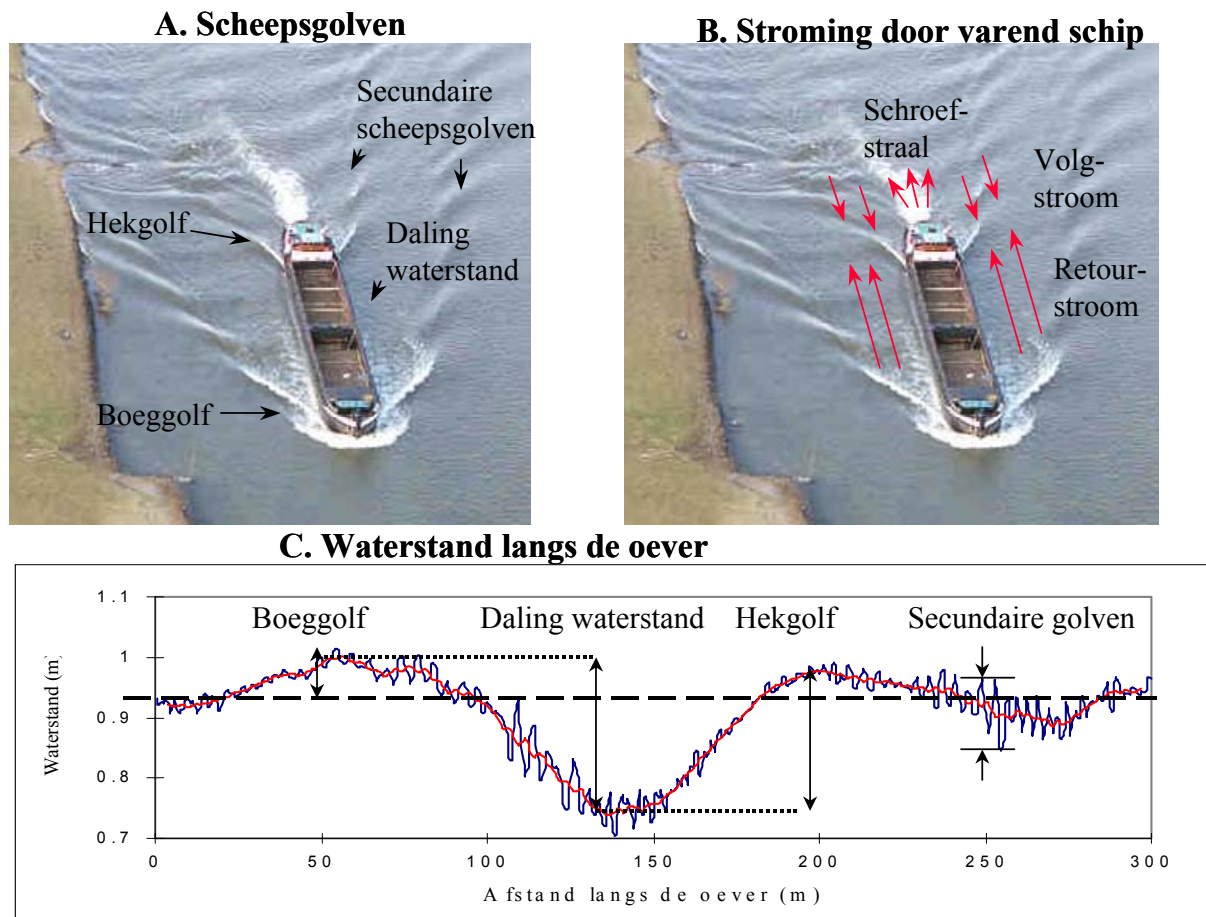


Figuur 2.3. De verandering in het vervoer per schip stroomopwaarts (boven) en stroomafwaarts (onder) bij Lobith sinds 1965, uitgedrukt in miljoen ton laadvermogen, met een onderscheid in duwvaart en andere schepen.

3 Water- en sedimentbeweging in kribvakken

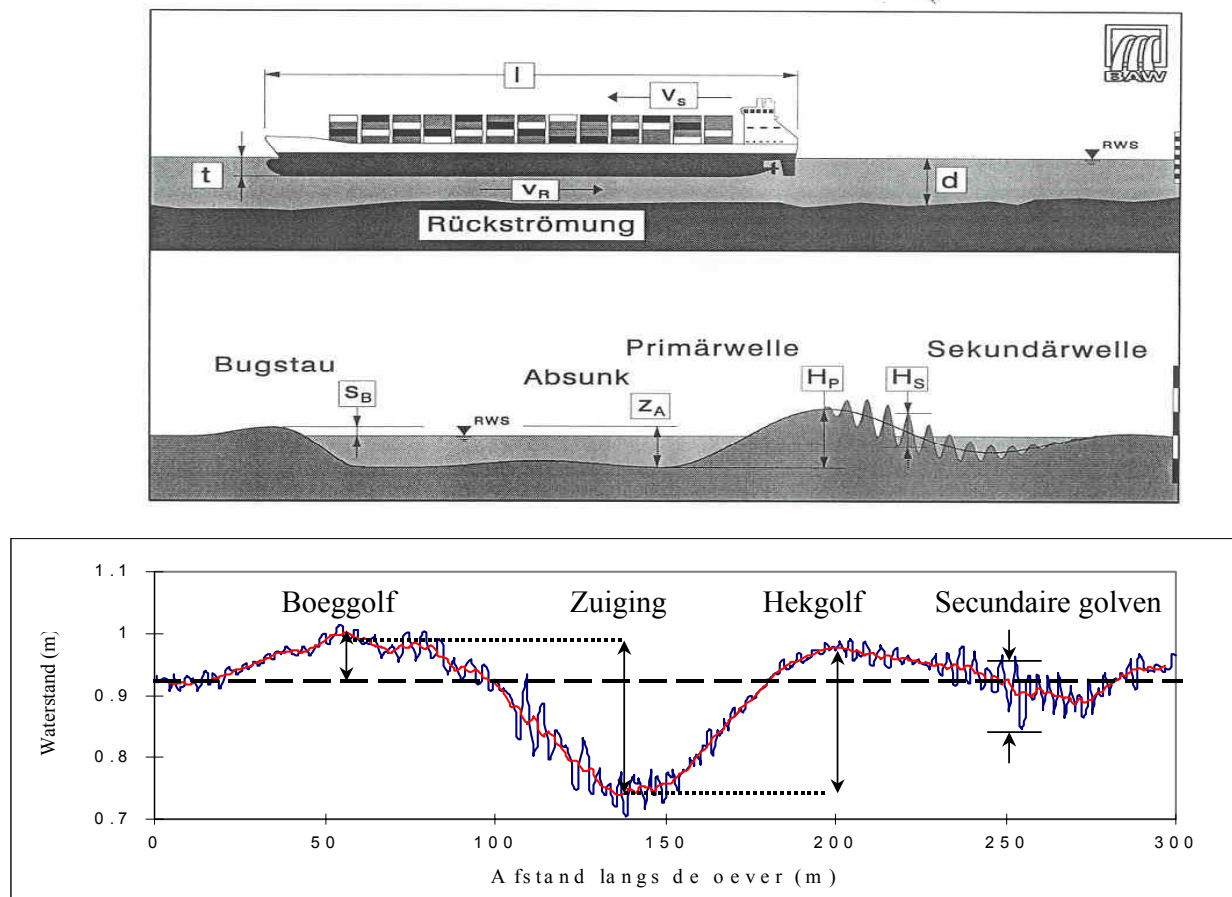
3.1. Scheepsgolven en scheepsgeïnduceerde stroming

Een varend schip wekt golven en stroming op. De golven worden onderverdeeld in primaire en secundaire golven. De primaire golf is de opstuwing van het water bij de boeg van het schip (boeggolf), de waterspiegeldaling aan de zijkant van het schip, en de haalgolf (hekgolf) bij het hek van het schip. De secundaire golven zijn de korte golven die naast en vlak achter een schip ontstaan. Deze secundaire golven ontstaan als gevolg van het drukpatroon op de scheepshuid waardoor ter plaatse van discontinuïteiten in het langsprofiel van het schip drukverschillen optreden (Verhey en Vermeer, 1987). Hierdoor ontstaat een golfpatroon. Het ruimtelijke patroon van deze golven is geïllustreerd in figuur 3.1.A. In figuur 3.1.C is weergegeven hoe deze golfpatronen worden waargenomen langs de oever. Deze waterstandsveranderingen zijn gemeten in een kribvak bij Druten in de zomer van 1996 (in het kader van het project voor dit rapport). Het golfpatroon rond een varend schip is in langsprofiel weergegeven in figuur 3.2, wederom met de meting bij Druten ter illustratie van het effect in het kribvak.



Figuur 3.1. Het ruimtelijk patroon van scheepsgolven (A) en scheepsgeïnduceerde stroming (B) gerelateerd aan een gemeten registratie van de waterstand langs de oever (C).

De door een varend schip opgewekte stroming bestaat uit de schroefstraal en de stroming als gevolg van de primaire golfbeweging. Laatstgenoemde stroming is voor de sedimenthuishouding van een kribvak van groot belang omdat deze de zuiging van water uit kribvakken veroorzaakt en met deze zuiging en het weer vollopen van het vak de neerstroming in het kribvak versterkt. De stroming horende bij de primaire golf bestaat uit de retourstroom en de volgroom. De retourstroom ontstaat doordat het bij de boeg opgestuwde water terugstroomt naar de waterstandsval aan de zijkant tot bij de achterzijde van het schip. De volgroom ontstaat door het opvullen van de waterstandsval tussen het schip en de oever vanuit de hogere waterstand achter het schip (Robberecht en Wentink, 1986). Het ruimtelijk patroon van de stroming is geïllustreerd in figuur 3.1.B.



Figuur 3.2. Opgewekte scheepsgolven langs de oever door een passerend schip. De onderste tijdreeks is een registratie gemeten in vak 2 bij Druten in de zomer van 1996.

3.2. Internationale literatuur

In de internationale literatuur wordt slechts sporadisch gepubliceerd over onderzoek naar de invloed van passerende scheepvaart op de water- en sedimentbeweging langs de oever. De specifieke situatie van scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken is al helemaal een uitzonderlijk onderwerp.

Publicaties over scheepvaart in relatie tot de opwoeling van sediment richten zich veelal op het aspect van de vergroting van de troebelheid en de ecologische implicaties. In de praktijk gaat het dan met name om slibrijke bodems en oevers en passerende recreatievaart (Hilton en Phillips, 1982; Garrad en Hey, 1987, 1988). Osborne en Boak (1999) presenteren meetresultaten van scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging boven een strand langs een baai waarbij de golven door passerende scheepvaart hoger zijn dan windgolven, met een aanmerkelijk groter effect op het zandtransport. Over de invloed van duwvaart op oevers wordt buiten Nederland feitelijk alleen op de Mississippi veel onderzoek gedaan. Uit deze studies blijkt dat passages van duwvaart een significant effect hebben op de opwoeling van sediment langs de oevers (Xia et al., 1994). Xia et al. stelden op grond van metingen vast dat de opwoeling van sediment langs de oevers groter was dan in de vaargeul. Het effect op de erosie bleek voor stroomopwaarts varende duwvaart groter dan voor stroomafwaarts varende duwvaart. In een publicatie van Bhowmik et al. (1995) wordt een overzicht gegeven van beschikbare formuleringen in de wetenschappelijke literatuur over de scheepsgeïnduceerde waterbeweging in rivieren. Volgens Ten Brinke et al (1999) zou van deze formuleringen de formule van Hochstein en Adams (1989) de meest geschikte voor de situatie op de Waal moeten zijn. Ten Brinke et al. (1999) vergeleken gemeten stroomsnelheden langs de oever van de Waal tijdens scheepspassages met de voorspelde scheepsgeïnduceerde stroomsnelheid langs de oever volgens de formule van Hochstein en Adams. Hieruit bleek evenwel dat deze formule niet mag worden toegepast op de situatie van de Waal. Overigens zijn door Ten Brinke et al. ook de andere formuleringen uit Bhowmik et al (1995) getoetst met data van de Waal. Maar ook deze formuleringen bleken de gemeten stroming langs de oevers van de Waal niet te kunnen reproduceren.

Over de scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken is wel wat informatie beschikbaar uit Duits onderzoek (Jurisch, 1986; Wirtz, ongepubliceerd). Jurisch verrichtte metingen aan de waterstandsdeling en de stroomsnelheid in kribvakken langs de Main. Deze kribvakken zijn niet goed vergelijkbaar met de Nederlandse situatie aangezien deze kribvakken ook in de langsrichting van de rivier voor een groot deel zijn afgesloten en de uitwisseling van water (en sediment) tussen rivier en kribvak slechts door een relatief kleine opening kan plaatsvinden. Jurisch concludeert dat de grootte van de waterstandsdeling in een kribvak door scheepspassages, bij gelijke vaarsnelheid, toeneemt met de scheepsgrootte. Tevens concludeert Jurisch dat de snelheid van de waterstandsdeling, bij gelijke scheepsgrootte, toeneemt met de grootte van de vaarsnelheid. Wirtz deed onderzoek naar de morfologische en korrelgrootte variatie binnen kribvakken langs de Elbe en relateerde deze aan stroompatronen. De onderzochte kribvakken zijn goed vergelijkbaar met de Nederlandse situatie. Wirtz vindt de stroompatronen en morfologische variatie die ook voor de Nederlandse situatie gelden.

3.3. Eerder onderzoek: veldmetingen langs de Waal

In september 1983 zijn metingen verricht in een kribvak langs de Waal bij Druten waarbij de water- en sedimentbeweging tijdens de passage van 4- en 6-bakduwstellen is gemeten (Havinga et al., 1984). De waterbeweging is op meerdere posities in het kribvak gemeten: zowel boven het strand

midden in het vak (oever- én rivierwaarts) als in het uitstroompunt naar de erosiekuil benedenstrooms van de krib. De sedimentbeweging is alleen in het uitstroompunt gemeten. Doel van het onderzoek was het bepalen van de invloed van 6- versus 4-baksduwvaart op de water- en sedimentbeweging in kribvakken. De metingen zijn uitgevoerd bij een minder dan jaargemiddelde Waalafvoer.

Uit de metingen bleek dat de passage van 6-baksduwvaart leidt tot grotere stroomsnelheden in het uitstroompunt benedenstrooms van de krib dan 4-baksduwvaart. De gemeten verschillen in maximale stroomsnelheden bedroegen 0.25-0.5 m/s, ofwel 25-45% van de snelheid bij passage van 4-baksduwvaart, afhankelijk van de meetpositie in het uitstroompunt. Bovendien bleek de invloed van zesbaksduwvaart in lange formatie (3 bakken achter elkaar) op zowel stroomsnelheid als zandtransport in het uitstroompunt groter dan die van dezelfde hoeveelheid duwbakken in brede formatie (3 bakken naast elkaar). Boven het strand in het vak zijn geen significante verschillen bij passage van 6- versus 4-baksduwvaart waargenomen. Uit de metingen kon geen verband worden afgeleid tussen de passageafstand uit de oever en de scheepsgeïnduceerde stroomsnelheid in het kribvak.

In 1986 zijn in hetzelfde kribvak bij Druten als het onderzoek van 1983 metingen uitgevoerd aan de water- en sedimentbeweging in dit kribvak voor situaties met en zonder passerende scheepvaart (De Haas en Van Essen, 1987a). Voor wat betreft de scheepvaart heeft het onderzoek zich beperkt tot de duwvaart, en wel die duwvaart waarbij niet tegelijkertijd ook een ander schip passeerde. In totaal zijn 13 passages van 4-baksduwstellen en 4 passages van 6-baksduwstellen bemeten. De metingen zijn uitgevoerd in 2 perioden: in juni-juli bij een jaargemiddelde tot iets meer dan jaargemiddelde Waalafvoer, en in november bij een minder dan jaargemiddelde Waalafvoer.

Uit de metingen bleek dat, bij de passage van duwstellen, de stroomsnelheid boven het kribvakstrand 1.5 (dicht bij de bodem) tot 3 (hogerop in de waterkolom) keer zo hoog werd. De stroomsnelheid in het uitstroompunt werd over de hele waterkolom 1.5 keer zo hoog. Opvallende verschillen in scheepsgeïnduceerde stroomsnelheden tussen 4- en 6-baksduwvaart zijn niet gemeten. Wel bleek de waterstands daling in het kribvak door zuiging uit het vak bij de passage van 6-baksduwvaart 36-45% groter te zijn dan bij de passage van 4-baksduwvaart. Op basis van een summier dataset concluderen De Haas en Van Essen (1987a) dat de passage van een 6-baksduwstel leidt tot een 5.5 keer zo groot sedimenttransport het kribvak uit als de passage van een 4-baksduwstel. Tevens werd geconcludeerd dat tijdens periodes zonder passerende scheepvaart de stroomsnelheid boven het kribvakstrand niet voldoende hoog was om zand in beweging te brengen.

In september 1986 zijn metingen uitgevoerd in een kribvak in een buitenbocht bij St. Andries (De Haas en Van Essen, 1987b). De Waalafvoer ten tijde van de metingen was iets minder dan jaargemiddeld. Volgens de metingen leidt de passage van duwstellen tot een verhoging van de stroomsnelheid in het kribvak met 20% (dichtbij de bodem) tot 50% (hogerop in de waterkolom). De stroomsnelheden in het kribvak waren voor de situatie zonder passerende scheepvaart hoger dan in het kribvak bij Druten. Volgens berekeningen van De Haas en Van Essen (1987b) zou het zand in het bovenstroomse deel van het kribvak ook zonder passerende scheepvaart in beweging moeten kunnen komen. Voor het

benedenstroomse deel van het kribvak leiden passerende duwstellen pas tot een situatie met voldoende hoge stroomsnelheden voor zandtransport. De gemeten waterstandsdalingen bij scheepspassages kwamen qua grootte overeen met de resultaten bij Druten. Uit de metingen bleek geen significant verband tussen passeerafstand en waterstandsdaling in het kribvak.

De meetresultaten in het kribvak bij St. Andries weken sterk af van die bij Druten. Belangrijkste verschillen tussen beide vakken waren de positie van het vak bij St. Andries in de erosieve buitenbocht, én de geringere onderlinge kribafstand bij St. Andries waardoor één neer het totale kribvak vulde. Volgens De Haas en Van Essen zal de erosie van kribvakstranden in de buitenbocht ten gevolge van passerende duwvaart verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de erosie die hier in het overgrote deel van het jaar (bij niet overstroomde kribben) plaatsvindt.

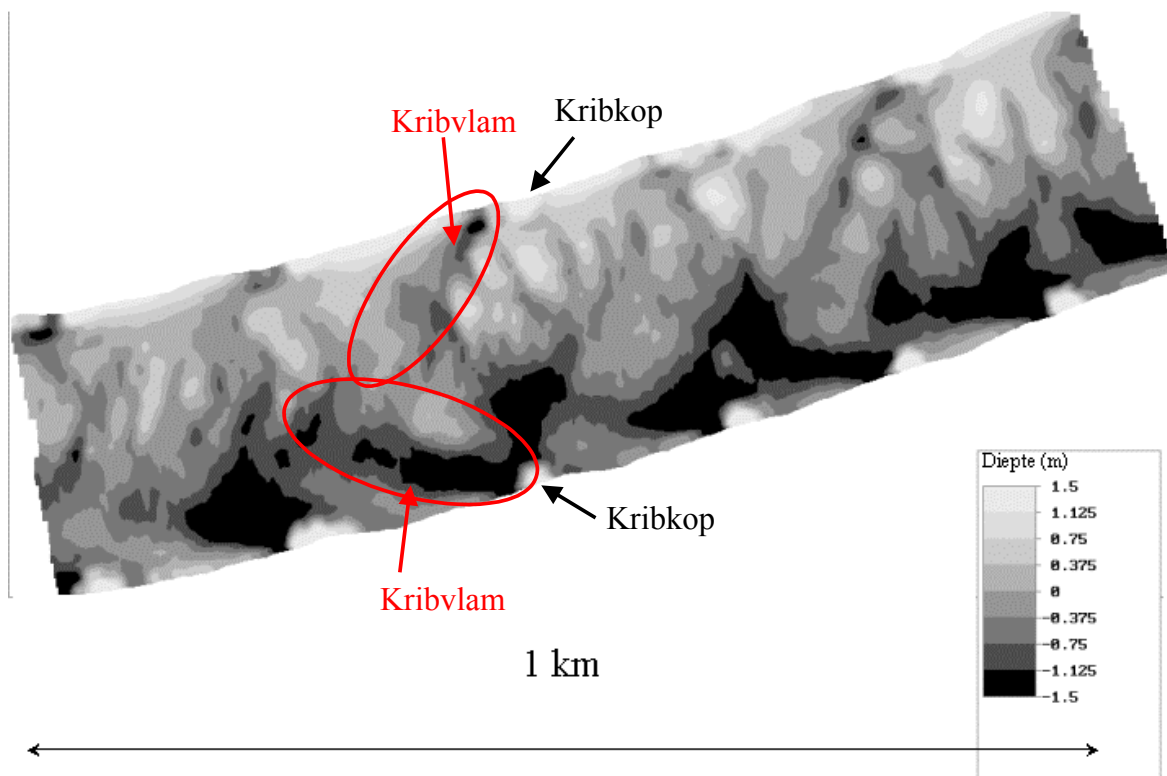
3.4. Eerder onderzoek: modelonderzoek WLIDelft Hydraulics

Aansluitend op het bovenbeschreven veldonderzoek is door WLIDelft Hydraulics in 1986 modelonderzoek verricht naar de water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal bij passage van duwstellen (Verhey en Vermeer, 1987). Dit onderzoek is uitgevoerd in een schaalmodel van het kribvak bij Druten waar in 1983 en 1986 de bovenbeschreven metingen zijn uitgevoerd (vaklengte = 200 m), en een schaalmodel van een naastgelegen kribvak met andere dimensies (vaklengte = 130 m). Centraal bij dit onderzoek stond de invloed van 6-baksduwvaart versus die van 4-baksduwvaart. De experimenten zijn uitgevoerd met geladen duwbakken en steeds een breedte van 2 duwbakken. Het schaalmodel was geijkt bij een Waalafvoer van $1450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Dit is iets minder dan de jaargemiddelde afvoer op de Waal. De, voor de sedimenthuishouding van kribvakken, belangrijkste conclusies uit deze studie zijn:

- De grootste stroomsnelheden traden op direct benedenstrooms van een krib in een richting loodrecht op de rivieras, en wel juist nadat het hek van de duwbakken was gepasseerd. Uit veldmetingen zijn snelheden gebleken van maximaal $1,30 \text{ m s}^{-1}$ voor een 4-baksduwstel tot $1,60$ á $1,75 \text{ m s}^{-1}$ voor een lang respectievelijk breed 6-baksduwstel.
- Deze snelheden zijn bij een 6-baksduwstel, bij gelijke vaarsnelheden, 35-50% hoger dan bij een 4-baksduwstel.
- Transport van tracer materiaal vanuit het kribvak vindt, bij passages van zowel 6- als 4-baksduwstellen, plaats direct benedenstrooms van een krib. Dit transport is het grootst bij de passage van 6-baksduwstellen.
- Een toename van de Waalafvoer van 1800 naar $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ leidt waarschijnlijk tot een afname van de scheepsgeïnduceerde stroomsnelheid in kribvakken.
- De gemeten maximale stroomsnelheden in het uitstroompunt net benedenstrooms van de krib zijn, bij vergelijkbare scheepspassage, groter bij een langer dan bij een korter kribvak.
- Bij een toename van de passage-afstand nemen de maximale stroomsnelheden af.

3.5. Wervels, kribvlammen en neerstroming

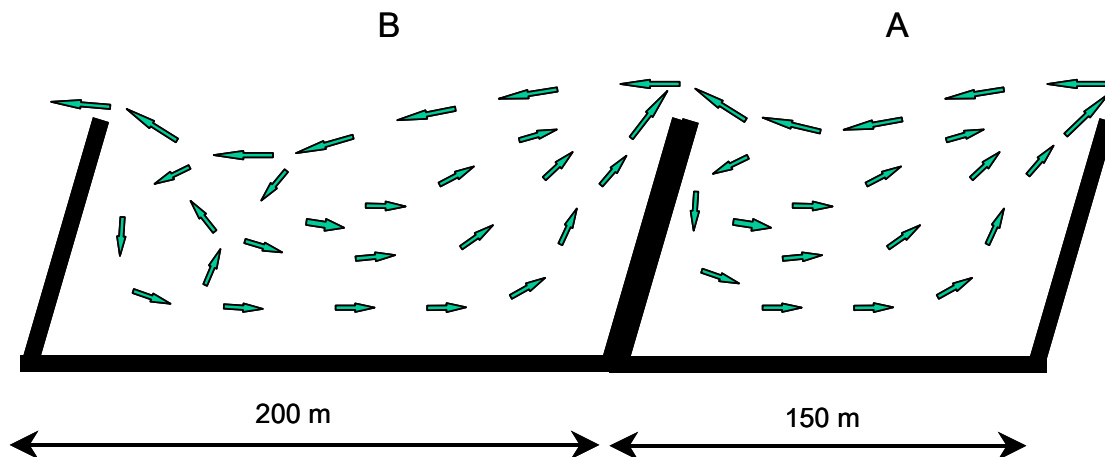
Bij een situatie zonder passerende scheepvaart en een waterstand waarbij de kribben niet zijn overstroomd, wordt door de rivierafvoer benedenstrooms van de kribben een wervel opgewekt. Deze wervel ontstaat doordat de stroming van de rivierafvoer de krib niet kan volgen en loslaat. Ten gevolge van deze wervels is de bodem net benedenstrooms van de kribben uitgeschuurd in de vorm van ontgrondingskuilen die, ten opzichte van de omliggende rivierbedding, veelal 1-2 meter diep zijn. Deze uitgeschuurde dieptes lopen in stroomafwaartse richting door naar de rivieras, worden geleidelijk aan minder diep, en doven zo als het ware uitgaande van de kribben naar de rivieras. Vanwege de vorm worden deze patronen ook wel kribvlammen genoemd (figuur 3.3).



Figuur 3.3. Kribvlammen in de bodemligging van het zomerbed van de Waal bij Druten.

Naast het optreden van deze wervels in de rivier boven het zomerbed, leidt de aanwezigheid van kribben tot het optreden van een neerstroming in het kribvak. In het benedenstroomse deel van het kribvak zal de rivierafvoer, zij het zwak, het kribvak instromen. Bij de benedenstroomse krib van het kribvak zal een deel van de rivierafvoer door de krib in een richting naar de oever worden geleid en van daaruit middels de neer naar de bovenstroomse krib terugstromen. Daar kan de stroming het vak weer verlaten. Deze situatie is geschetst in figuur 3.4. Situatie A geldt als de afstand tussen de kribben voldoende klein is om één neer het hele vak te laten beslaan. Voor de Waal zijn dit de kribvakken met een kribvaklengte (= onderlinge kribafstand) van 130-150 m. Veel kribvakken langs de Waal hebben echter een lengte van ± 200 m. In deze kribvakken kan de ene

neer, horende bij de wervel benedenstrooms van de krib, het hele kribvak niet beslaan, en ontstaat er een tweede, kleinere neer in het benedenstroomse deel van het kribvak (figuur 3.4.B).



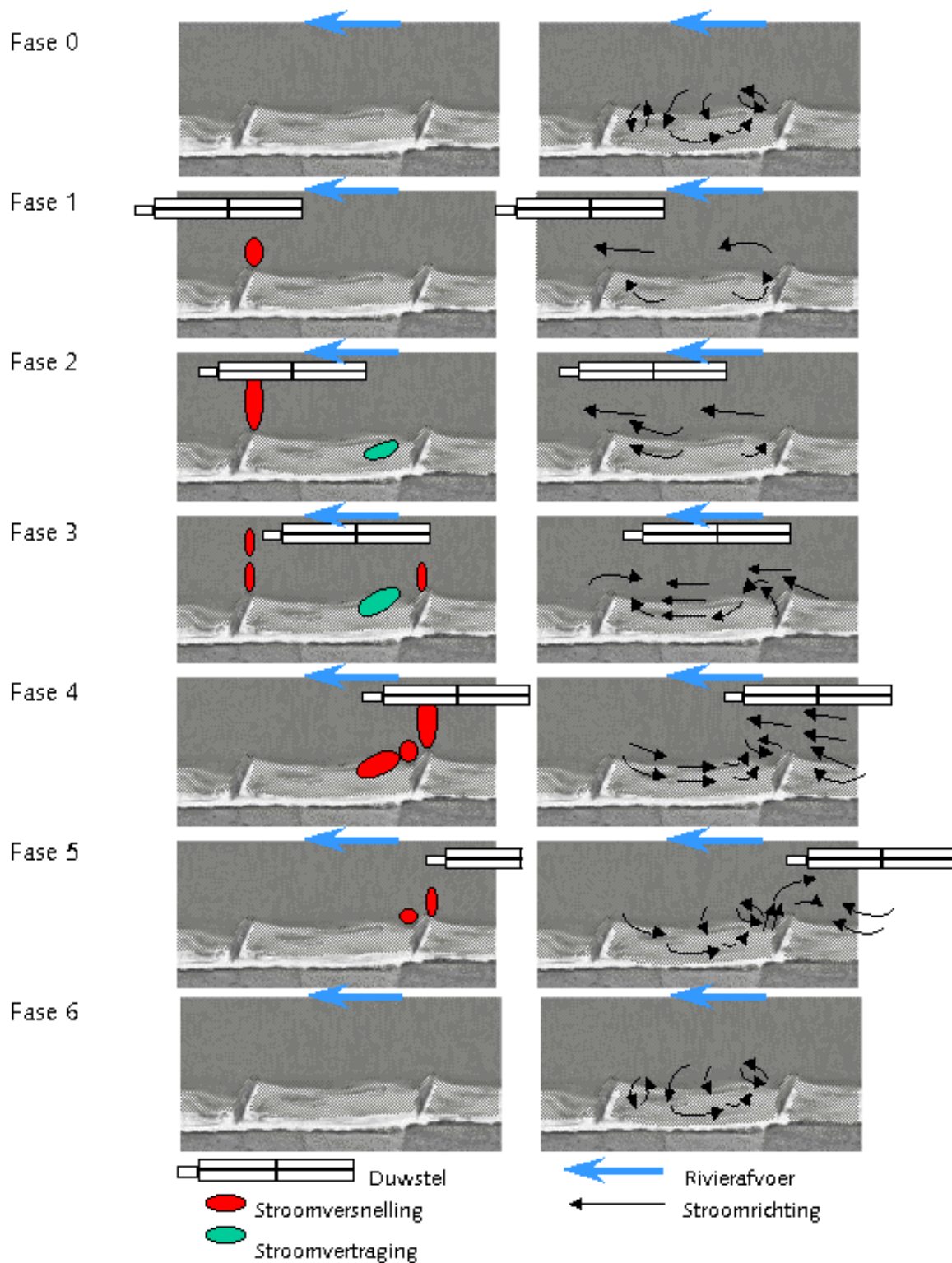
Figuur 3.4. Circulatiecellen van de waterbeweging in een kribvak die worden versterkt door de scheepsgeïnduceerde waterbeweging: A voor een klein kribvak (één neer), B voor een groot kribvak (2 neren).

3.6. Scheepsgeïnduceerde waterbeweging

De passage van een schip, en dan met name de passage van een beladen duwstel, heeft grote invloed op het stroompatroon in een kribvak. Deze invloed is, in stappen van de passage langs het kribvak, geschetst in figuur 3.5. De figuur is opgesteld aan de hand van schematische figuren in de rapportages van Robberecht en Wentink (1986), Verhey en Vermeer (1987) en Termes et al. (1991). Bij deze studies is de analyse en modellering van de water- en sedimentbeweging in een kribvak gebaseerd op de situatie van een kribvak bij Druten waar in de jaren tachtig veel veldmetingen zijn verricht. Dit kribvak is uit een loodrecht luchtfoto van de Waal bij Druten geselecteerd en als ondergrond van de figuur genomen. De figuur bestaat uit 2 delen. Het linkerdeel geeft in 7 tijdstappen aan hoe de passage van een 4-bakswduwstel de stroom in en nabij een kribvak vertraagt en versnelt. Het rechterdeel geeft, voor dezelfde 7 tijdstappen, aan welke stroomrichtingen bij deze vertragingen en versnellingen horen.

Op basis van Verhey en Vermeer (1987) kan de invloed van een passage van een beladen 4-bakswduwstel, varende in stroomopwaartse richting, aan de hand van figuur 3.5 als volgt worden beschreven. In de situatie vóór de passage van een duwstel is er sprake van een zwakke neerstroming in het kribvak, met een grote en kleine neer conform figuur 3.4B (fase 0). Op het moment dat de boeg van een duwstel een krib passeert (fase 1), ontstaat tussen boeg en kribkop een verhang (de frontgolf). Hierdoor wordt het bovenstroomse kribvak leeggezogen door de retourstroom. Hierdoor verdwijnt de kleine neer in het benedenstroomse deel van het kribvak vrijwel en wordt de hoofdneer in het bovenstroomse deel van het kribvak sterk gereduceerd (fase 2). Daarnaast ontstaat door de retourstroom tussen krib en duwstel een wervel benedenstrooms van de kribkop. Bij het hek van het duwstel houdt de retourstroom op en begint de volgstroom, waarbij de stroomrichting omkeert. Dit is te zien aan de pijltjes in fasen 3-5

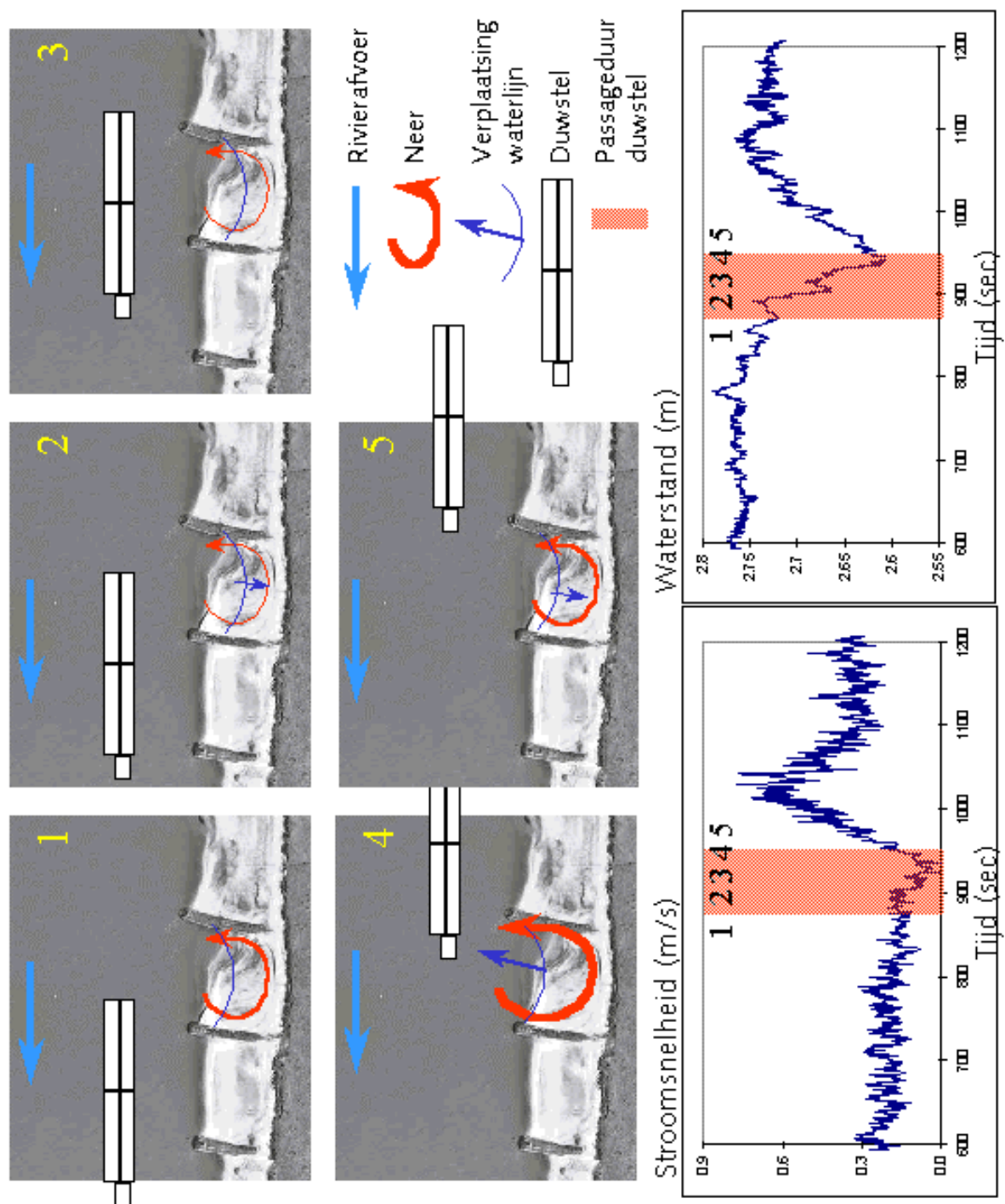
bij de achterzijde van het schip. Deze volgstroom vult het kribvak weer op. Passeert het hek een krib (fasen 4 en 5), dan wordt de volgstroom gedwongen vanuit het kribvak af te buigen in de richting van de rivieras. Deze volgstroom ontmoet bij de kribkop de retourstroom die net bovenstrooms van het hek de andere kant op gaat. Hierdoor wordt de neer net benedenstrooms van de krib versterkt. Als het hek de bovenstroomse krib passeert (fase 5), wordt de volgstroom merkbaar in het bovenstrooms van deze krib gelegen kribvak. Ná passage van het schip keert de situatie van vóór de passage weer terug (fase 6 = fase 0). Uit bovenstaande blijkt dat de maximale stroming optreedt juist benedenstrooms van de kribben tijdens de passage van het hek van het schip. Deze stroming wordt aangedreven door de retourstroom tussen kribkop en duwstel en de uittredende volgstroom. Volgens Verhey en Vermeer (1987) is deze stroming sterker bij langere kribvakken en langere duwstellen. Het effect van de langere kribvakken is een sterkere volgstroom omdat een groter waterverlies (groter vak) moet worden aangevuld. Het effect van de langere duwstellen is het langer aanhouden van de volgstroom.



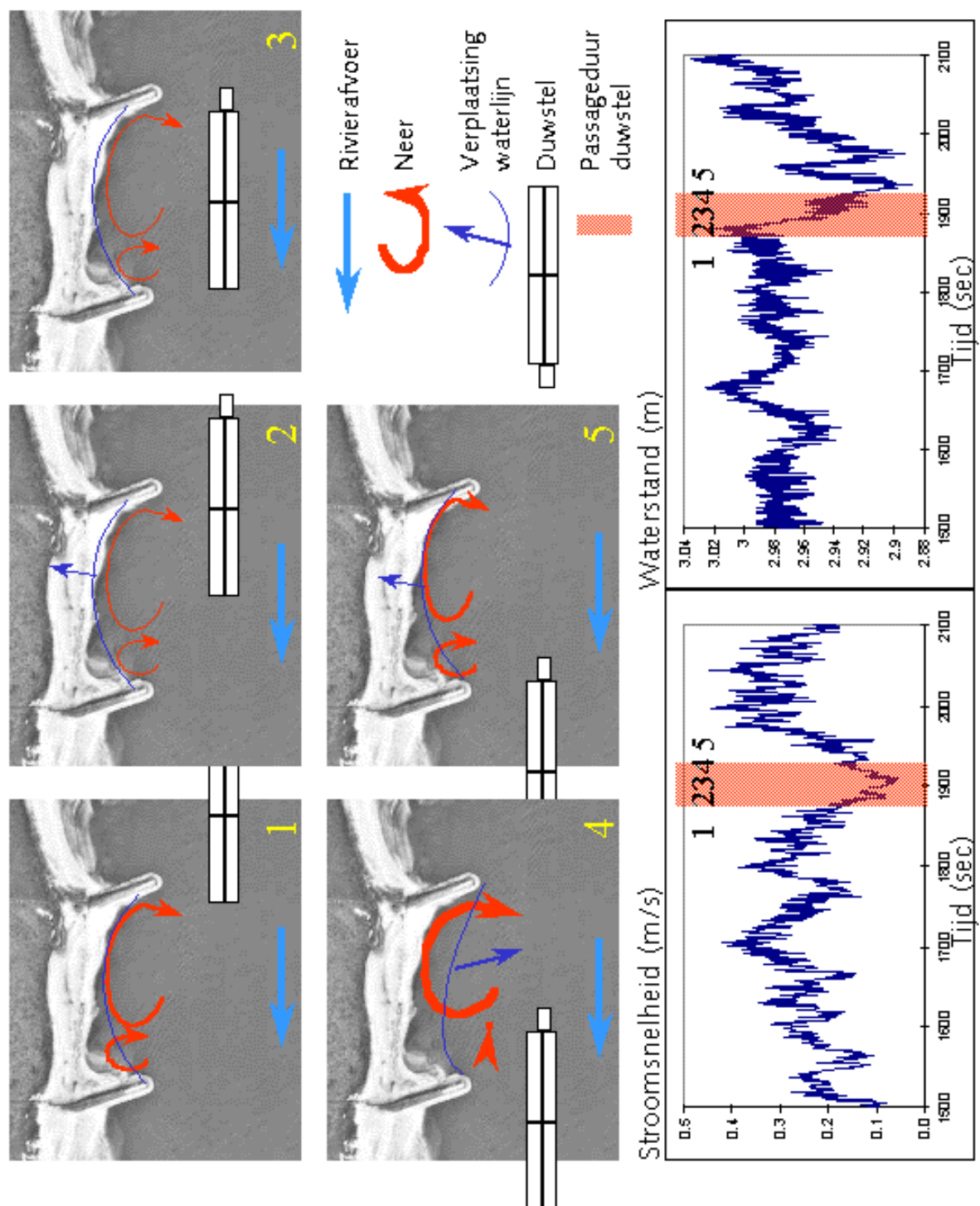
Figuur 3.5. De versnelling en vertraging van de stroom (links) en de bijbehorende stroompatronen (rechts) in opeenvolgende fasen van de passage van een 4-bakduwstiel langs een kribvak bij Druten (op basis van de beschrijvingen van Robberecht en Wentink (1986), Verhey en Vermeer (1987) en Termes et al. (1991)).

De fasering van de invloed van een scheepspassage op de waterbeweging in een kribvak kan over het algemeen goed in het kribvak zelf worden waargenomen. Ter illustratie tonen de figuren 3.6 en 3.7 het verloop van de waterbeweging in respectievelijk een klein kribvak aan de zuidoever (figuur 3.6) en een groot kribvak (met 2 neren) aan de noordoever (figuur 3.7). Het verloop van de waterbeweging is wederom gerelateerd aan de fasen van de passage van een 4-baks duwstel, waarbij als ondergrond luchtfoto's zijn gebruikt van het kleine kribvak 2 en het grote kribvak 3 van de meetcampagne van 1996 bij Druten. De getoonde registratie van de waterbeweging en de foto van het kribvak horen dus steeds bij elkaar. Met rood is de richting van de neerstroming aangegeven. Op de momenten dat de neerstroming wordt versterkt, is de rode lijn vetter aangezet. Met blauwe pijltjes is de verplaatsing van de waterspiegel in het kribvak (zuiging en weer vollopen) aangegeven.

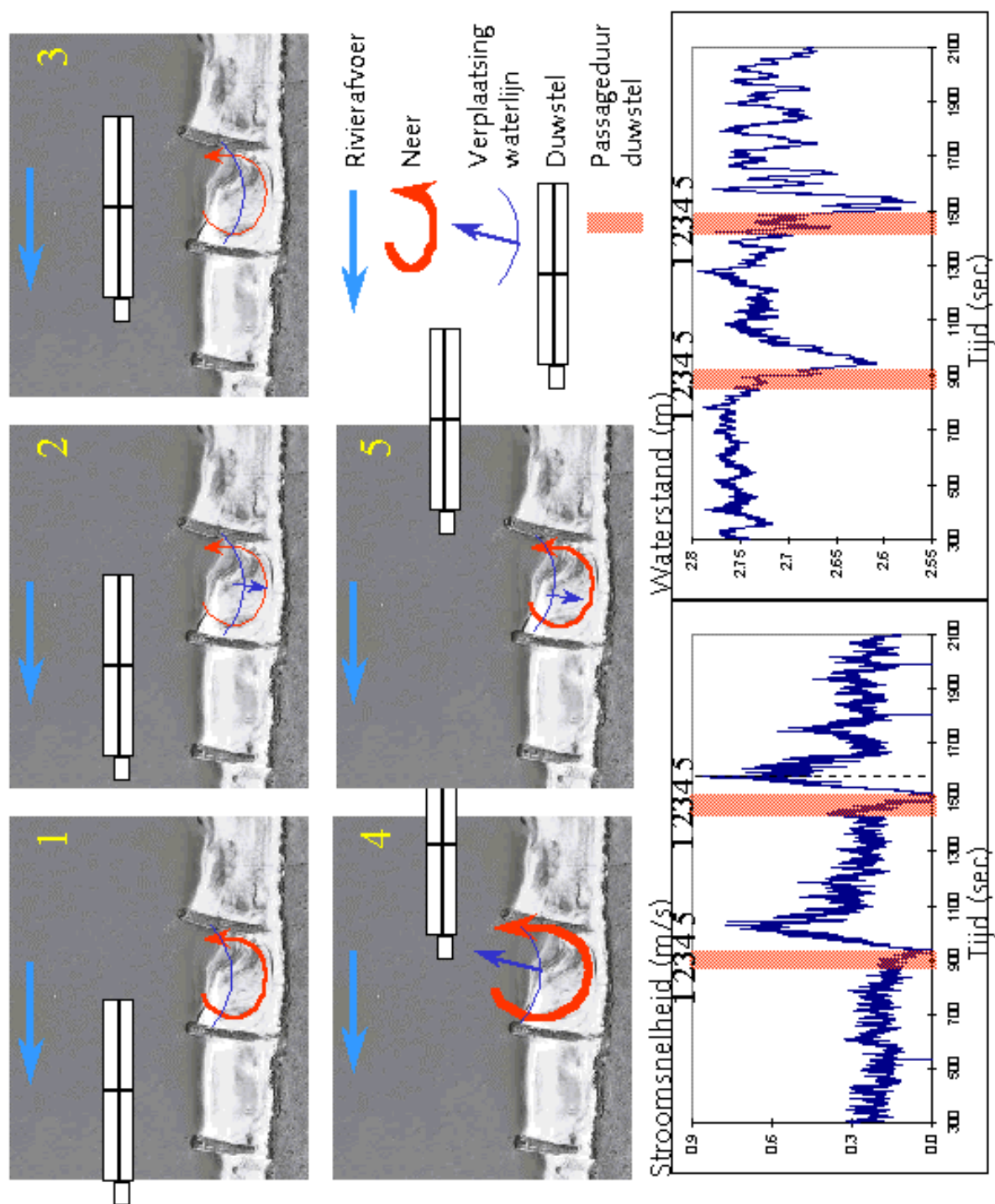
Twee vergelijkbare passages hebben hetzelfde effect mits de tijd tussen de passages maar voldoende lang is om interferentie van de waterbeweging door beide passages te voorkomen. Dit wordt geïllustreerd door figuur 3.8 waar in de tijdreeks met een tijdverschil van 10 minuten 2 keer een 4-baks duwstel langs kwam.



Figuur 3.6. Het effect van de passage van een 4-bakswaarsel langs het kleine kribvak 2 (1996) op de waterbeweging in het kribvak, weergegeven in de 5 fasen van de passage die zijn bediscussieerd aan de hand van figuur 3.5.



Figuur 3.7. Het effect van de passage van een 4-baksluik langs het grote kribvak 3 (1996) op de waterbeweging in het kribvak, weergegeven in de 5 fasen van de passage die zijn bediscussieerd aan de hand van figuur 3.5.



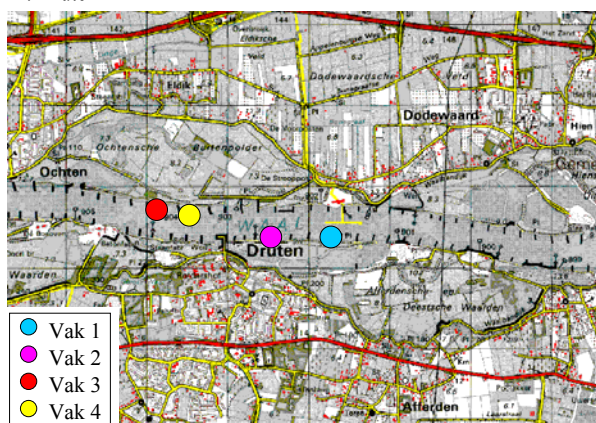
Figuur 3.8. Het effect van twee opeenvolgende passages van 4-baksduwstelen langs het kleine kribvak 2 (1996) op de waterbeweging in het kribvak, weergegeven in de 5 fasen van de passage die zijn bediscussieerd aan de hand van figuur 3.5.

4 Onderzoek in de Waal

4.1. Metingen aan de scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken

In de zomers van 1996 en 1997 zijn in 8 kribvakken langs de Waal metingen verricht aan de water- en sedimentbeweging in kribvakken voor de situatie met en zonder passerende scheepvaart. In 1996 betrof het 4 kribvakken in het relatief rechte traject bij Druten, en in 1997 4 kribvakken in de bocht bij St. Andries. Met de gekozen serie van 8 vakken is getracht de meetresultaten zoveel mogelijk karakteristiek te laten zijn voor het grootste deel van de variatie in kribvakeigenschappen langs de Waal (tabel 4.1). De locaties van deze kribvakken zijn weergegeven in figuur 4.1. Alle metingen zijn uitgevoerd bij een relatief lage en constante afvoer, te weten een Bovenrijn afvoer bij Lobith van ongeveer $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in 1996 en $1900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in 1997. In alle kribvakken was sprake van een flauw hellend zandstrand (2-6%) en een steilrand op de overgang van het kribvakstrand naar de vaarweg. Het sediment bij zowel Druten als St. Andries had een gemiddelde korreldeiameter van 300 micrometer (Lenders, 1997; Schans, 1998).

A. Druten



B. St. Andries



Figuur 4.1. De 8 kribvakken langs de Waal waar in de zomers van 1996 (A, Druten) en 1997 (B, St. Andries) metingen zijn verricht aan de water- en sedimentbeweging.

Voor de metingen in 1996 en 1997 is dezelfde procedure en hetzelfde meetinstrumentarium gebruikt. De metingen in de kribvakken zijn uitgevoerd met sensoren voor het meten van stroomsnelheid en troebelheid die waren bevestigd in meetframes. Er zijn per kribvak steeds 3 meetframes gebruikt waarmee synchroon is gemeten: een groot frame (figuur 4.2) met sensoren voor stroomsnelheid en troebelheid op 2 meetniveaus boven de bodem en een sensor voor de waterstand (druk), en 2 kleine (mini-)frames (figuur 4.3) met ieder één sensor voor stroomsnelheid, troebelheid en waterstand. Het grote frame kon gedurende meerdere dagen autonoom meten dankzij voeding en een computer in het frame zelf. Dit (autonome) meetframe heeft in elk van de kribvakken steeds een week in het uitstroompunt gestaan terwijl met de 2 miniframes op 4 opeenvolgende werkdagen (in principe van maandag t/m donderdag) op meerdere posities boven de stranden in het vak zelf is gemeten. Hierbij zijn de miniframes afwisselend geplaatst in het benedenstroomse deel van het kribvak (dag 1 en dag 3) en halverwege het

kribvak (dag 2 en dag 4). Daarbij heeft het ene miniframe steeds landwaarts en het andere miniframe steeds rivierwaarts in het kribvak gestaan. Als voorbeeld van de verkregen meetposities binnen een kribvak is de situatie voor kribvak 1 in figuur 4.4 weergegeven.

De miniframes konden niet autonoom meten. De metingen met de miniframes zijn steeds aangestuurd vanaf een vaartuig dat enkele tientallen meters van het frame verwijderd was en met de miniframes verbonden was middels kabels.

Met het grote frame (4 X 4 X 2.5 m, 600 kg) zijn stroomsnelheid en troebelheid gemeten op 8.5 en 34 cm boven de bodem, en de waterdruk op 40 cm boven de bodem. Met de miniframes (1.5 X 1.5 X 0.5 m, 70 kg) zijn stroomsnelheid en troebelheid gemeten op 10 cm boven de bodem, en de waterdruk op 50 cm boven de bodem. De oriëntatie van het grote frame werd gemeten met een kompas, automatisch aan het begin van elke meetburst. De oriëntatie van de miniframes is steeds ingemeten vanaf het strand. De coördinaten van de meetposities is steeds bepaald met een DGPS, dat hiervoor steeds even met een kraan vanaf het schip boven het frame werd gehouden.

Tabel 4.1. Overzicht van de locaties van de kribvakken langs de Waal waar in 1996 en 1997 metingen zijn verricht aan de water- en sedimentbeweging.

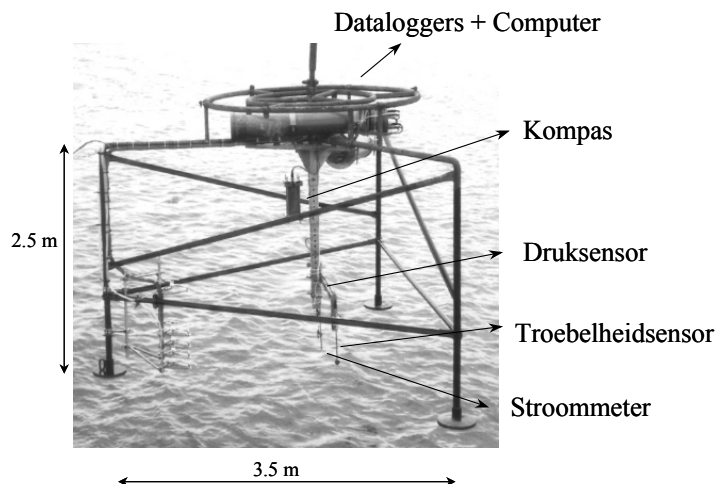
Metingen 1996 Druten						
Kribvak	Oever	Riviersectie	Km-raai	Meetperiode	Kribvak-lengte (m)	Kribvak-oriëntatie (° t.o.v. Noorden)
1	zuid	Recht	902.070	18 t/m 21 juni 1996	230	89
2	zuid	Recht	902.750	24 t/m 27 juni 1996	130	88
3	noord	Recht	904.075	1 t/m 4 juli 1996	210	187
4	noord	Recht	903.670	8 t/m 10 juli 1996	200	183
Metingen 1997 St. Andries						
Kribvak	Oever	Riviersectie	Km-raai	Meetperiode	Kribvak-lengte (m)	Kribvak-oriëntatie (° t.o.v. Noorden)
1	zuid	binnenbocht	929.315	2 t/m 4 juni 1997	220	27
2	noord	buitenbocht	929.270	9 t/m 12 juni 1997	160	202
3	noord	buitenbocht	928.780	16 t/m 19 juni 1997	200	226
4	zuid	binnenbocht	927.120	23 t/m 26 juni 1997	210	45

De metingen met de 3 frames zijn uitgevoerd in zogenaamde meetbursts. Een meetburst is een aaneengesloten periode waarin met een constante frequentie wordt gemeten. Tussen de meetbursts zit een constant tijdinterval gedurende welke niet wordt gemeten. Tijdens alle metingen in 1996 en 1997 is als meetprotocol gehanteerd dat gedurende meetbursts van 35 minuten is gemeten, waarbij deze meetbursts steeds werden opgestart op het hele uur. Ieder gemeten uur bestaat dus uit een tijdreeks van 35 minuten meetinformatie en 25 minuten geen informatie. Voor het grote meetframe heeft dit protocol steeds 24 uur per dag, 7 dagen per

week gefunctioneerd. Voor de miniframes heeft dit protocol alleen op de 4 aaneengesloten werkdagen per kribvak, 5-6 meturen per dag gefunctioneerd. Iedere week, wanneer het grote frame op een nieuwe locatie werd gepositioneerd, zijn de klokken van de computers voor de aansturing van de miniframes en de klok in het grote meetframe op elkaar gelijkgesteld. Er mag dan ook worden aangenomen dat de tijdreeksen van de 3 frames onderling goed vergelijkbaar zijn. De frequentie waarmee de meetinformatie is ingewonnen, bedroeg 4 Hz voor de miniframes en 2 Hz voor het grote frame. Het verschil in frequentie komt voort uit het feit dat met de miniframes ook golfeffecten op het ondiepe strand (orbitaalbeweging) moesten kunnen worden gemeten.

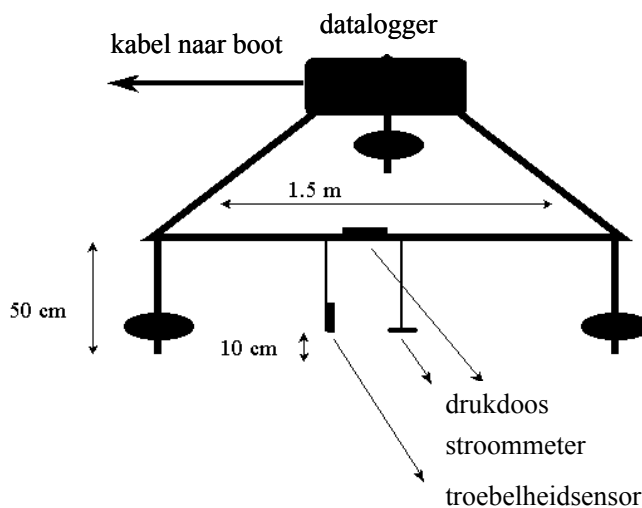
De sensor voor de stroomsnelheid was een Electromagnetic FlowMeter (EMF). De sensor voor de troebelheid was een Optical Backscatter Sensor (OBS). De sensor voor de waterstand was een drukdoos. Tijdens de metingen én bij de dataverwerking is veel aandacht besteed aan de calibratie van de sensoren. Dit bleek met name voor de OBS-sensoren, waarbij een gemeten optisch signaal moest worden omgerekend in een zandconcentratie, een groot probleem. De OBS-sensor bleek een lastig instrument omdat deze een verstrooiing van licht meet, hetgeen door zowel zwevend zand als slib wordt bepaald. Het venijn zit hem er in dat de gemeten verstrooiing het gevoeligst is voor slibconcentraties, terwijl het bij het onderzoek juist om de zandconcentratie ging. In de praktijk is dit probleem 'opgelost' in 2 stappen. De eerste stap betrof de ijkprocedure van de sensoren. De OBS-sensoren zijn in het laboratorium geijkt voor verschillende concentraties zand, en in het veld (kleine frames) door vaak monsters nabij de sensor (met slangetjes) te nemen en te filteren op zand- en slibgehalten. De tweede stap betrof een bewerking van de uiteindelijke concentratiewaarden (na de toepassing van laboratorium- en veld-ijking). Deze bewerking kwam er op neer dat de bijdrage van het slibgehalte aan het OBS-signaal mocht worden beschouwd als een constante achtergrondwaarde, terwijl de bijdrage van het zandgehalte sterk fluctueerde door de scheepspassages. Het slibgehalte is uiteindelijk gedefinieerd als de waarde die gedurende een meetperiode van 35 minuten (de duur van een meetburst) 5 (1997) – 10 (1996) % van de tijd werd onderschreden. Voor een groot aantal van de metingen kon het concentratiesignaal ná toepassing van de ijklijn uit het laboratorium (en gecontroleerd met veldmonsters) gecorrigeerd worden voor resterende slibvervuiling in het signaal door deze 5-10% onderschrijding van het concentratiesignaal af te trekken. Alleen voor de metingen met het grote frame in 1996 is voor deze tweede stap een andere procedure gehanteerd. Uit de meetresultaten bleek duidelijk dat op het OBS-meeetniveau 34 cm + bodem geen opgewerveld zand werd gemeten. Deze concentratiewaarde is daarom als de slibachtergrond beschouwd en van het signaal op 8.5 cm + bodem afgetrokken.

Groot meetframe



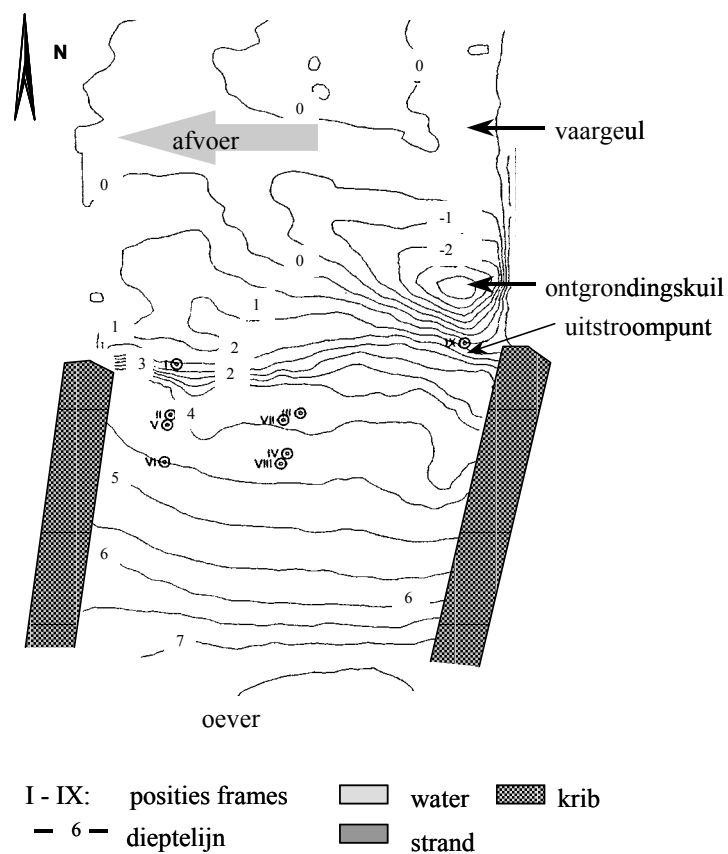
Figuur 4.2. Het grote meetframe voor het meten van de stroomsnelheid, zandconcentratie en waterstand in het uitstroompunt van de kribvakken.

Klein meetframe



Figuur 4.3. Het kleine meetframe voor het meten van de stroomsnelheid, zandconcentratie en waterstand boven de stranden van de kribvakken.

Gedurende de meetperiodes overdag dat met de miniframes werd gemeten, zijn de eigenschappen van alle passerende schepen genoteerd. Hierbij is een onderscheid gemaakt in 11 scheepstypen (tabel 4.2). Van deze passerende schepen is genoteerd: de beladingsgraad (leeg, half, vol); de vaarpositie in het water (bij voorkeur in meters uit de kribkop of anders met aanduiding: langs noordoever, over de as, langs zuidoever); scheepslengte, -breedte en diepgang; op- of afvaart; tijd tussen passage van boeg en hek.



Figuur 4.4. De meetposities van de 3 meetframes tijdens de metingen in kribvak 1 bij Druten in 1996

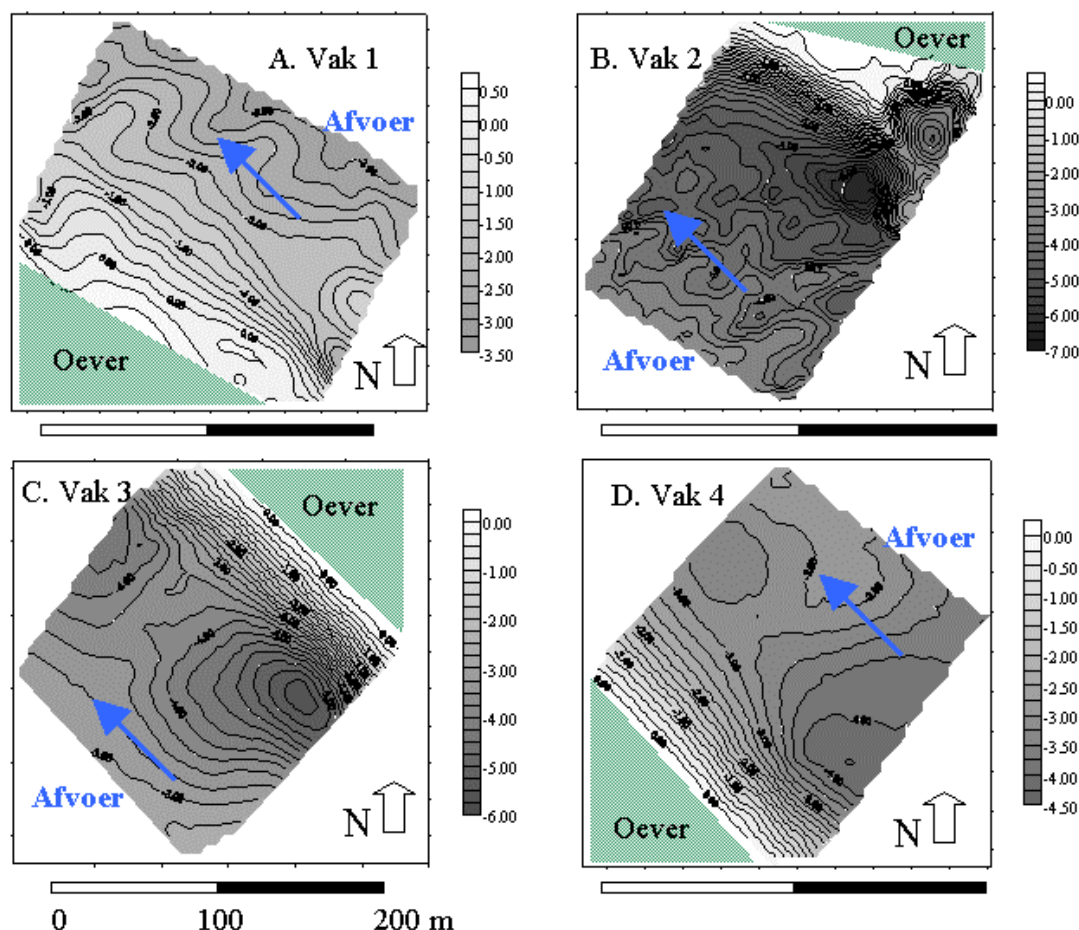
Tabel 4.2. Onderscheiden scheepstypen bij het onderzoek naar scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal.

Scheepstype	Lengte (m)	Breedte (m)
4-baksduwvaart	180	22.8
3-baksduwvaart	180	11-22.8
2-baksduwvaart	180	11
Koppelverband	180	11.5
Rijnschip	86-110	12
Kanaalschip	67-85	11.5
Dortmunder	55-67	8.2
Kempenaar	50-55	6.6
Spits	38-50	5.05
Coaster	variabel	variabel
Overige (baggerschip e.d.)	variabel	variabel

4.2. Representativiteit informatie

4.2.1. Keuze kribvakken water- en sedimentbeweging

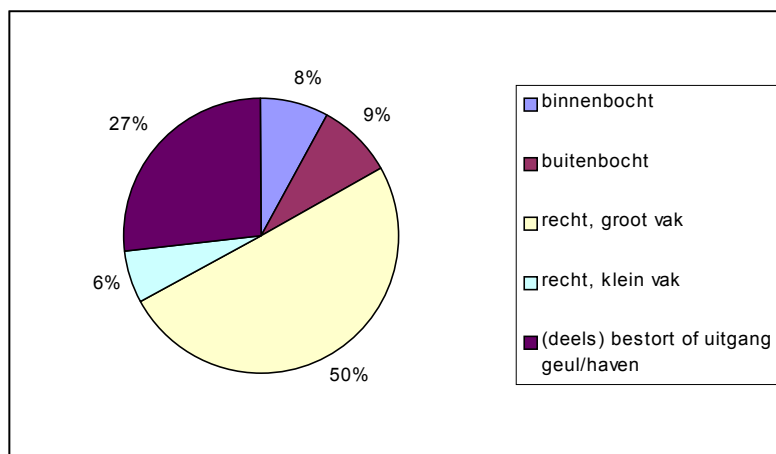
Met de keuze van de kribvakken waar metingen zijn verricht aan de water- en sedimentbeweging is er van uitgegaan dat een representatieve steekproef van de verscheidenheid aan kribvakken langs de Waal is verkregen. Met deze representatieve steekproef wordt gedoeld op de processen die de sedimenthuishouding van de kribvakken en het morfologisch gedrag van de kribvakstranden bepalen. Deze processen worden bepaald door de waterbeweging van de rivier en de scheepsgeïnduceerde waterbeweging. Ruimtelijke variaties in deze processen worden bepaald door ruimtelijke variaties in de waterbeweging van de rivier en de scheepvaart. Dit betekent dat de set met bemeten kribvakken in ieder geval moet bevatten de ruimtelijke variaties tussen binnenbocht, buitenbocht en recht traject (waterbeweging rivier), een groot versus een klein kribvak (2 neren versus 1 neer) en de noord- versus de zuidoever (onbeladen versus beladen scheepvaart). Met de gekozen 8 kribvakken (tabel 4.1) is hierin voorzien. Voorafgaand aan de definitieve keuze van de kribvakken voor de veldmetingen zijn de kribvakstranden bij een zeer lage waterstand (foto 1.1) bezocht en zijn vakken geselecteerd die weinig tot geen verstoring door bouwafval en prikkeldraad lieten zien.



Figuur 4.5. De bodemligging van de kribvakken 1 (binnenbocht) en 2 t/m 4 (buitenbocht) van De meetcampagne bij St. Andries in 1997.

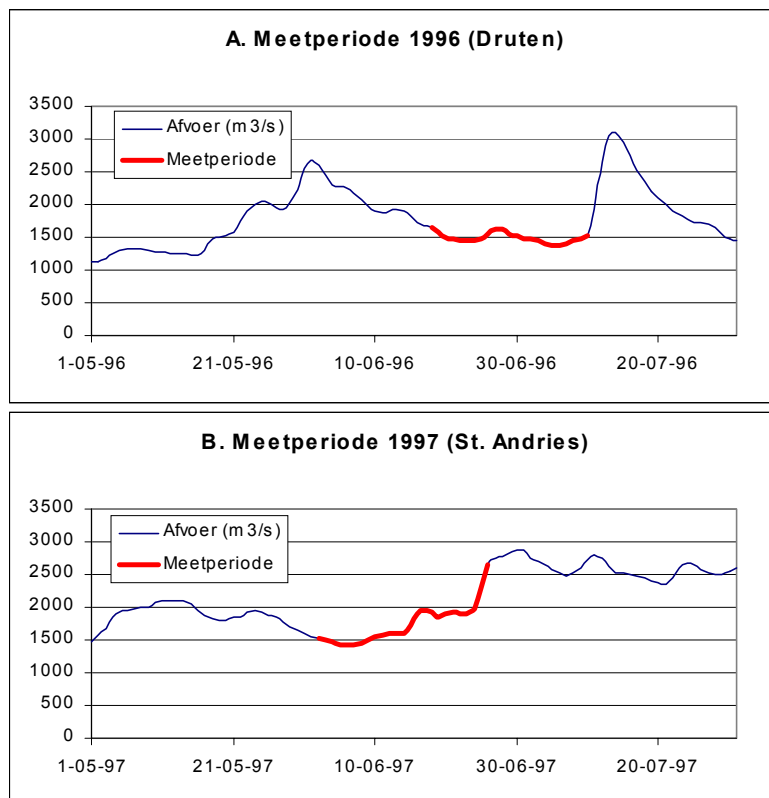
De ruimtelijke variatie in de karakteristieken van het kribvakstrand is met name sterk in de bochten. In de binnenbocht maakt het strand als het ware deel uit van de point bar en is het strand breed en de overgang naar het zomerbed van de rivier geleidelijk. In de buitenbocht is het strand smal en wordt de overgang naar het zomerbed gekenmerkt door een steil talud. Dit wordt geïllustreerd door figuur 4.5 met de kribvakmorfologie van de kribvakken 1 (binnenbocht) en 2 t/m 4 (buitenbocht) van de meetcampagne bij St. Andries in 1997.

Er is bij het onderzoek dus vanuit gegaan dat de 8 vakken op hoofdlijnen een goed beeld geven van de variatie in processen in kribvakken langs de Waal. Maar men dient zich tevens te realiseren dat de variatie in kribvakeigenschappen langs de Waal zeer groot is, veel groter dan men met 8 geselecteerde vakken zal kunnen beslaan. Feitelijk zijn geen 2 kribvakken hetzelfde. Naast de bovengenoemde variatie treedt variatie op in kriboriëntatie ten opzichte van de rivierafvoer, kriblengte, begroeiing van het strand, talud en korrelgrootte van het strand, onderlinge kribafstand, positie van het vak binnen de binnen- cq buitenbocht etc. Voor een vertaling van de gemeten morfologische veranderingen in de bemeten kribvakken en de gemeten transporten naar een totaalbeeld voor de hele Waal is inzicht nodig in de representativiteit van de meetlocaties voor de Waal als geheel. Dit onderzoek is uitgevoerd door Schans (1998). Schans heeft van alle kribvakken langs de Bovenrijn (63) en Waal (736) een aantal karakteristieken bepaald waarvan mag worden uitgegaan dat deze bepalend zijn voor de water- en sedimentbeweging in de kribvakken. Deze karakteristieken staan, met bronvermelding, vermeld in tabel 2.1. Op grond van de waarden van deze karakteristieken zijn de kribvakken in klassen onderverdeeld, zijn statistieken van deze klassen bepaald (gemiddelde, standaarddeviatie,) en zijn de bemeten kribvakken met deze statistieken vergeleken. Tevens is gekeken of de karakteristieken van de kribvakken een systematische variatie vertoonden in de ruimte (rivierlangse trends). De onderscheiden klassen zijn: vak in een binnenbocht, vak in een buitenbocht, groot vak in een recht traject, klein vak in een recht traject, overige (bestort, geen geleidelijk strandtalud).



Figuur 4.6. Procentuele verdeling van de kribvakken per klasse volgens Schans (1998).

Uit de classificatie van Schans blijkt dat de karakteristieken van de bemeten kribvakken vallen binnen een spreidingsband van 1 keer de standaarddeviatie rond het gemiddelde van de onderscheiden klassen. De bemeten vakken worden daarmee voldoende representatief verondersteld om de processen achter de sedimenthuishouding van kribvakken op te schalen naar het niveau van de Waal als geheel. Overigens blijkt dat 27% van de kribvakken een oevertype heeft dat niet door de meetlocaties wordt vertegenwoordigd. De andere 4 klassen zijn in de meetlocaties vertegenwoordigd. Van deze klassen blijkt met name het grote kribvak in een recht riviertraject vaak voor te komen (figuur 4.6). Van de 27% afwijkende oevertypes is 40% bestort, 16 % geheel volgestort, 18% de uitgang van een haven, nevengeul of zandgat, en heeft 25% een gedeeltelijk bestorte oever. Uit de studie van Schans blijkt verder dat enkele karakteristieken van de kribvakken een rivierlangse trend laten zien. De breedte en oppervlakte van het strand, en de korrelgrootte van het zand nemen af in stroomafwaartse richting. Daarnaast vertonen enkele parameters (kriboriëntatie, afstand tot de thalweg) een periodiciteit in langsrichting van de rivier die te herleiden is op het meanderende patroon van de rivier.



Figuur 4.7. De afvoer bij Lobith in de periodes 1 mei – 31 juli 1996 (A) en 1997 (B).

4.2.2. Meetperiodes water- en sedimentbeweging

De metingen in 1996 en 1997 zijn uitgevoerd bij vergelijkbare, lage afvoer (figuur 4.7). De afvoer was over het algemeen 1500-2000 m³s⁻¹ bij Lobith, en daarmee ruim beneden het jaargemiddelde. Er is bewust gekozen voor een lage afvoer omdat verwacht mag worden dat het effect van

scheepsgeïnduceerde waterbeweging dan relatief sterk zal zijn. Immers, er staat dan weinig water in het kribvak waardoor het effect van zuiging en scheepsgolven extra sterk zal zijn. Hoe hoger de waterstand, hoe minder de zuiging en golven de bodem zullen voelen, en dus hoe minder merkbaar het effect van scheepsgeïnduceerde waterbeweging in kribvakken. Qua hydrodynamica wordt aangenomen dat de data van 1996 en 1997 als een vergelijkbare dataset mogen worden beschouwd.

4.2.3. Monitoring bodemligging kribvakstranden

Gedurende een periode van 4 jaar is de bodemligging van een aantal kribvakstranden langs de Waal gevolgd. Dit is gedaan op 8 momenten verspreid over deze periode (zie sectie 4.4). Deze tijdreeks is zodanig samengesteld dat het effect van een hoge afvoer op de bodemligging van de kribvakstranden, ten opzichte van de situatie bij lagere afvoeren, kan worden gekwantificeerd. Qua ruimtelijke variatie langs de Waal is er voor gezorgd dat een reeks kribvakstranden is gevolgd waarmee de belangrijkste variatie in karakteristieken van kribvakken is vertegenwoordigd. In totaal zijn 23 kribvakken gemonitord. Al deze kribvakken lagen in de omgeving van de kribvakmetingen aan de water- en sedimentbeweging in 1996 (Druten) en 1997 (St. Andries), en de reeks omvat in ieder geval de 8 vakken van laatstgenoemde metingen. Koppeling van de resultaten van de monitoring van de 23 vakken met de dataset van alle kribvakken volgens Schans (1998) maakt het mogelijk de informatie uit deze meetreeks op te schalen naar de Waal als geheel.

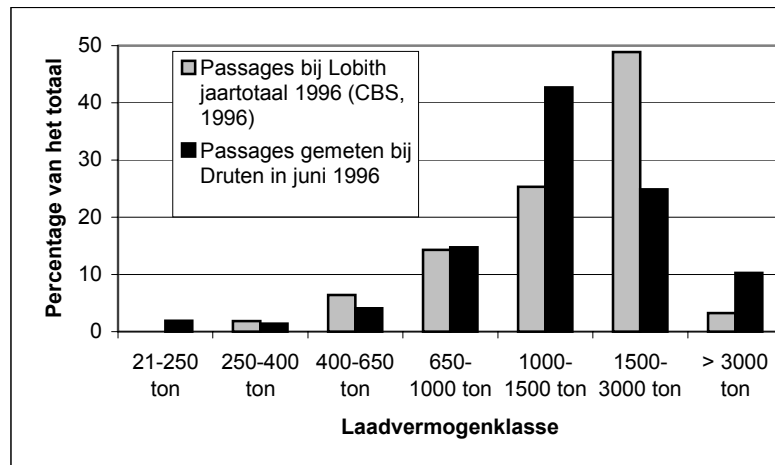
4.2.4. Luchtfoto's

Voor de studie zijn 4 opnames van alle kribvakken langs de Waal gebruikt, die zijn genomen in de periode 1976-1997. Aangenomen wordt dat deze periode voldoende lang is om de balans van hoogwater versus laagwater processen te kunnen bepalen.

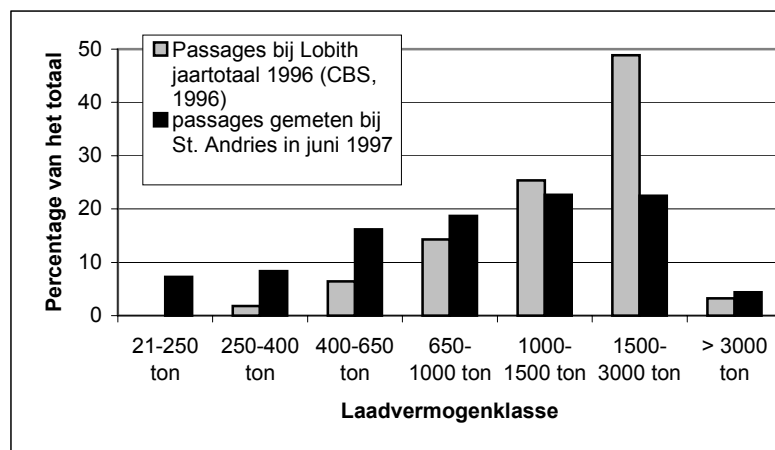
4.2.5. Dataset scheepspassages

Tijdens de meetcampagnes van 1996 en 1997 is de scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken gemeten voor in totaal 1146 scheepspassages in 1996 en 1035 scheepspassages in 1997. Deze passages betroffen verschillende scheepstypen, afhankelijk van wat er op het moment van de metingen langs kwam. Gezien het grote aantal passages mag verwacht worden dat alle scheepstypen in voldoende mate in de dataset vertegenwoordigd zijn. Gekeken is of deze dataset qua verdeling van aantal passages voor de verschillende scheepstypen een goede afspiegeling vormt van wat er op jaarbasis bij Lobith langs komt. Daartoe zijn de passage statistieken van Druten (1996) en St. Andries (1997) vergeleken met de jaarcijfers bij Lobith van 1996 (figuren 4.8 en 4.9). Hierbij is er van uitgegaan dat de jaarcijfers bij Lobith, qua verdeling van scheepstypen in de passage statistieken, ook als beeld voor de Waal mogen worden gehanteerd. Het blijkt dat de datasets van de meetcampagnes niet de verdeling van scheepstypen op jaarbasis vertegenwoordigen. Dit betekent dat voor berekeningen van langjarige

effecten van scheepspassages uit moet worden gegaan van de jaarstatistieken van het CBS.



Figuur 4.8. De procentuele verdeling van de scheepspassages naar laadvermogenklasse bij Lobith in 1996 (jaartotaal) en volgens de meetreeks bij Druten in juni 1996.



Figuur 4.9. De procentuele verdeling van de scheepspassages naar laadvermogenklasse bij Lobith in 1996 (jaartotaal) en volgens de meetreeks bij St. Andries in juni 1997.

4.3. De relatie tussen scheepspassages en de water- en sedimentbeweging in kribvakken: de toepassing van kunstmatige Neurale Netwerken

4.3.1. Neurale Netwerken: op zoek naar causale verbanden

De combinatie van de genoteerde karakteristieken van passerende schepen en de gemeten water- en sedimentbeweging in de kribvakken moet resulteren in relaties tussen de eigenschappen van de passerende scheepvaart en de sedimentuitwisseling tussen vaargeul en kribvakken. Deze relaties volgen niet uit gangbare lineaire regressietechnieken. Ook

bieden formuleringen in de wetenschappelijke literatuur en bestaande (numerieke) modellen geen uitkomst. Daarom is de keuze gemaakt om de mogelijkheden na te gaan van de toepassing van kunstmatige neurale netwerken bij dit probleem. Voor zover bekend, zijn neurale netwerken nog niet eerder toegepast op dergelijke morfologische problemen. Daarom is de toepassing van neurale netwerken op bescheiden wijze, stap voor stap uitgevoerd. Tussendoor steeds evaluerend of, en zo ja, hoe moest worden verdergegaan.

Met de bouw van neurale netwerken worden, op statistische wijze, causale verbanden gelegd tussen oorzaak en gevolg. Oorzaak is de passerende scheepvaart, gevolg is de opgewekte waterbeweging en het hierdoor opgewoelde zand in het kribvak. De passerende scheepvaart wordt per schip gekarakteriseerd door een aantal eigenschappen van het schip en het vaargedrag van het schip. Door deze eigenschappen te relateren aan enkele relevante karakteristieken van de water- en sedimentbeweging in de kribvakken, wordt een statistisch model verkregen waarmee kan worden gerekend. Dit rekenen kan uiteraard alleen binnen de marges waarvoor het model is opgesteld.

Het rekenen met neurale netwerken heeft als doel:

- (1) het, middels gevoeligheidsanalyses, aftasten van de bijdragen van verschillende scheepstypen met verschillende passage-karakteristieken aan de totale sedimentfluxen in kribvakken.
- (2) het berekenen van het effect van een in de toekomst veranderende binnenvaartvloot op de morfologische processen in de kribvakken.
- (3) het ontwikkelen van een 'eenvoudige' formule die de relatie tussen karakteristieken van passerende scheepvaart en de water- en sedimentbeweging in kribvakken beschrijft.

4.3.2. *Wat zijn Kunstmatige Neurale Netwerken?*

Het concept van kunstmatige neurale netwerken is van oorsprong ontwikkeld om het menselijk zenuwstelsel te modelleren. Deze modellen werden na verloop van tijd ook in andere discipline geïntroduceerd, als wiskundig gereedschap voor het oplossen van problemen. Een mens kan, als vanzelfsprekend, taken uitvoeren zoals herkenning, combinatie, generalisatie. Dit zijn functies die niet eenvoudig in een (computer) algoritme zijn vast te leggen. Een computer kan zeer nauwkeurig lange series berekeningen volgens een expliciet algoritme uitvoeren. Dit is een taak waarbij de mens snel fouten gaat maken. Een kunstmatig neuraal netwerk combineert het associatievermogen van de mens met het analytische karakter van een computer.

Het menselijk zenuwstelsel is opgebouwd uit neuronen. Deze neuronen zijn in een hecht netwerk met elkaar verbonden. Kunstmatige neurale netwerken worden ook opgebouwd uit (kunstmatige) neuronen (rekenelementen). De manier waarop de neuronen gegroepeerd zijn, bepaald de vorm van het netwerk.

Met name het zelflerende karakter van neurale netwerken maakt de techniek zeer krachtig. Op basis van de gegenereerde verschillen tussen modeluitkomsten en realisaties, fouten ofwel residuen, worden parameters in het model automatisch bijgesteld, zodat de uiteindelijke fout wordt

geminimaliseerd. Zo ontstaat een leerproces waarbij een neurale netwerk bij een bepaalde invoer de bijbehorende uitvoer kan reproduceren. Neuronale netwerken dienen net als andere modellen te worden gedefinieerd, te worden gecalibreerd en te worden gevalideerd. In plaats van calibratie wordt vaak gesproken over training. Hiermee wordt aangegeven dat het netwerk tijdens het calibreren combinaties van invoervariabelen moet leren koppelen (training) aan de eigenschappen van de uitvoervariabele.

Intermezzo 4.1. Feedforward, feedback, transfer-functies

Een belangrijk onderscheid wordt gemaakt tussen feedforward en feedback netwerken. In een feedback netwerk kan een neuron met alle andere neuronen in verbinding staan, zodat informatie die als input aan het netwerk wordt aangeboden, in het netwerk blijft rondcirkelen. Feedback netwerken zijn zeer geschikt voor patroonherkenning. In een feedforward netwerk gaat de informatie altijd in één richting, van input naar output. De neuronen worden in een bepaalde volgorde met elkaar verbonden. Door de fout terug te voeren door het netwerk ontstaat een wiskundig 'leerproces' waarbij het netwerk de gewichten aanpast om de fout te minimaliseren.

In een neurale netwerk vertalen transfer-functies de combinatie van waarden van de invoervariabelen in een waarde voor de uitvoer van een neuron. Deze uitvoerwaarde kan weer dienen als invoer voor een ander neuron. Transfer-functies zijn vaak eenvoudige mathematische functies zoals een sinus, sigmoïde, tangens hyperbolicus of lineaire functie.

Voor deze studie is aangetoond dat de sigmoïde functie als transferfunctie gehanteerd moet worden. De gehanteerde calibratie- of trainingsmethode is de meest bekende vorm van supervised learning, namelijk het backpropagation algoritme. Het kenmerk van supervised learning is dat tijdens de calibratie, ofwel training, bij elke invoer die aan het netwerk wordt aangeboden, ook de bijbehorende uitvoer wordt aangeboden. Het netwerk convergeert iteratief naar een bepaalde mathematische oplossing om de uitvoer zo goed mogelijk te reproduceren op basis van de aangeboden voorbeelden. Backpropagation zoekt iteratief naar een goede combinatie met behulp van de methode van steilste helling (steepest descent method).

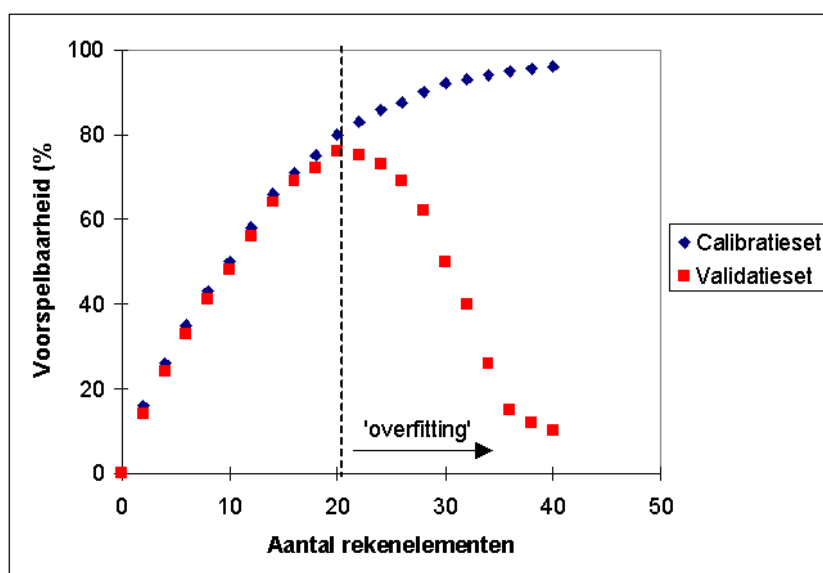
Hoewel neurale netwerken data-georiënteerde black-box modellen zijn, kan desalniettemin ook fysische kennis worden ingebracht door het geschikt kiezen van de invoeren en uitvoeren, en hun presentatie, dat wil zeggen de vorm waarin zij aan het neurale netwerk worden aangeboden. In zijn algemeenheid geldt dat met neurale netwerken alleen mag worden gerekend binnen de marges van de variabelen waarvoor het is opgesteld. Hiermee zijn deze modellen geschikt voor interpolatie maar ongeschikt voor extrapolatie. De modellen mogen niet worden gebruikt als voorspellingsmodel bij nieuwe, nog niet eerder gebruikte informatie. Ze zijn daarentegen weer wel geschikt als instrument voor gevoeligheidsanalyse. En daarmee kunnen deze modellen, hoewel black-box per definitie, toch meer begrip opleveren over processen in een gebied.

De neurale netwerken voor de kribvakken in de Waal zijn opgesteld voor metingen uitgevoerd in de zomer van 1996. Dit betekent dat de modellen alleen mogen worden gebruikt voor kribvakken met brede zandstranden, in een recht traject van de Waal, voor situaties met relatief lage waterstanden.

Intermezzo 4.2. Trainen en valideren van neurale netwerken

Voordat met het bouwen van een neuraal netwerk kan worden begonnen, dient te worden afgebakend welk aantal neuronen of rekenelementen moet worden meegenomen. Hiervoor is voor een deel van de dataset, te weten de data van de tweede meetweek bij Druten in 1996 (kribvak 2), een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om het optimale aantal rekenelementen te bepalen.

Het neurale netwerk is getraind met een deel van de dataset (training of calibratie set = 70%) en gevalideerd met het overige deel van de dataset (validatie set = 30%). De splitsing in beide deelsets moet random geschieden zodat training en validatie over hetzelfde parameterbereik worden uitgevoerd. De resultaten van de calibratie en validatie worden grafisch weergegeven door op de y-as de frakctie verklaarde variantie uit te zetten tegen het aantal rekenelementen in het neurale netwerk op de x-as. Een toename van het aantal neuronen betekent een hiërarchisch hoger model en derhalve een betere fit van de training set. Het aantal neuronen kan zo hoog worden opgevoerd dat het neurale netwerk de data perfect fit. In de praktijk zal dit betekenen dat hetzelfde netwerk de validatieset niet meer fit. Er is dus sprake van overfitting van de calibratieset. Indien men met dit model vervolgens gaat voorspellen zal het model volledig verkeerde en afwijkende voorspellingen genereren omdat het 'geforceerd' relaties probeert te leggen tussen oorzaak en gevolg waartussen geen relatie bestaat. Het beste model ligt dus een stukje lager in de hiërarchie en wel daar waar én de calibratieset een hoge frakctie verklaarde variantie laat zien, én de validatie set hier relatief dicht bij in de buurt ligt en bij een hoger hiërarchisch niveau alleen maar verder van de calibratieset gaat afwijken. Met behulp van eenvoudige statistische technieken en grafische analyses kan overparametrisatie worden getraceerd. Via deze technieken is het mogelijk het optimale aantal rekenelementen en parameters te schatten die resulteren in een optimale calibratie en een optimale validatie. Het blijkt dat 20 rekenelementen (neuronen) in één laag optimaal is. Over het algemeen kan worden geconcludeerd dat modellen met 2 neuronen voor de meeste uitvoervariabelen het meest nauwkeurig zijn. Gezien de opgedane bevindingen, en het streven naar uniformiteit onder de modellen, is besloten elk model op te bouwen uit 2 neuronen. Bij 2 neuronen bestaat geen risico voor overparametrisatie en heeft elk model voldoende vrijheidsgraden om relatief nauwkeurige verbanden te kunnen leggen.



Figuur Intermezzo 4.2. Het zoeken naar de optimale structuur van het neurale netwerk waarmee zowel training- als validatie-dataset zo goed mogelijk worden weergegeven.

4.3.3. Stap 1. Vaststelling mogelijke invoer- en uitvoervariabelen Waal bij Druten

Tijdens de 4 weken in de zomer van 1996 zijn metingen verricht in 4 kribvakken langs een relatief recht traject van de Waal bij Druten-Ochten. Steeds één week per kribvak. Tijdens de periodes waarin met de meetframes metingen werden verricht aan de water- en sedimentbeweging in de kribvakken, is een groot aantal eigenschappen van de passerende schepen genoteerd. Deze eigenschappen, of een selectie hiervan, zijn de invoervariabelen van het neurale netwerk. De keuze voor de serie genoteerde eigenschappen van de scheepspassages is gemaakt op grond van publicaties over de karakteristieken van passerende schepen die invloed hebben op de waterbeweging langs de oevers. Dit betreft resultaten van eerder onderzoek in de Nederlandse rivieren (Termes et al., 1991; Van Driel et al., 1993) en internationale literatuur (Bhowmik et al., 1995). Uit de tijdreeks van gemeten water- en sedimentbeweging zijn enkele karakteristieken afgeleid die als uitvoervariabelen worden gebruikt. Deze afleiding is gebaseerd op proceskennis van water- en sedimentbeweging.

De eigenschappen van de scheepspassages, die beschikbaar zijn als invoervariabelen voor het neurale netwerk, zijn weergegeven in tabel 4.3. In de tabel is aangegeven of de eigenschappen zelf zijn gemeten, zijn afgelezen van de zijkant van het schip, of zijn geschat. Tijdens het onderzoek was assistentie aanwezig van een ervaren binnenschipper, zodat de kwaliteit van de gemeten en geschatte eigenschappen van de schepen met ervaring is onderbouwd.

Tabel 4.3. De eigenschappen van scheepspassages die beschikbaar zijn als invoervariabelen voor de neurale netwerken.

	Invoervariabele	Eigenschap	Wijze van bepaling
1	tijdsduur scheepspassage	dt (s)	gemeten
2	vaardiepte schip	d (m)	geschat
3	natte rivierdoorsnede	Ac (m ²)	gemeten
4	natte dwarsdoorsnede schip	Am (m ²)	geschat
5	vaarsnelheid schip t.o.v. rivierafvoer	Us (m/s)	berekend uit meting en schatting
6	gemodificeerde scheepsbreedte (via formule literatuur)	b' (dimensieloos)	berekend uit schatting
7	afstand uit de oever (vanaf de kribkop)	X (m)	geschat
8	Scheepslengte	l (m)	afgelezen van schip (grote schepen) geschat (kleine schepen)
9	Scheepsbreedte	b (m)	afgelezen van schip (grote schepen) geschat (kleine schepen)
10	vaarrichting van het schip (1 = stroomopwaarts, 2 = stroomafwaarts)	R (1 of 2)	gemeten
11	vaarsnelheid schip t.o.v. oever	Vs (m/s)	gemeten
12	onder-water-volume schip	V (m ³)	berekend uit meting en schatting

De afstand van het schip tot de oever is geschat van het schip tot de kribkop. Hier moet in principe nog een afstand bij worden opgeteld van de normaallijn (de verbindingslijn van de kribkoppen) tot de meetposities in het kribvak. Gezien het feit dat over het algemeen relatief ver rivierwaarts in het kribvak is gemeten, en de passageafstand toch al is geschat, is aangenomen dat de passeerafstand tot de kribkop ook een goede indicatie is van de passageafstand tot de meetposities van de frames.

Voor de analyse is bij iedere scheepspassage één serie karakteristieken van water- en sedimentbeweging gekwantificeerd. Dit wil zeggen dat uit de 2 Hz (groot meetframe) cq 4 Hz (kleine meetframes) meetdata per scheepspassage één getal is afgeleid voor respectievelijk stroming, waterdiepte (= waterdruk) en sedimentconcentratie. Voor de stroming is gekozen voor de maximale stroomsnelheid tijdens de scheepspassage. Dit is de maximale zuiging die het passerende schip in het kribvak opwekt. Voor de waterstand is gekozen voor de maximale waterstandsval die tijdens de scheepspassage in het kribvak optreedt. Omdat de waterstand met druksensoren wordt gemeten, komt dit overeen met de grootste drukafname tijdens de scheepspassage. Voor de sedimentconcentratie is gekozen voor de integraal over de toename van de troebelheid tijdens de scheepspassage. Hierbij is de definitie gehanteerd dat van een toename van de troebelheid wordt gesproken als het troebelheidssignaal hoger is dan het gemiddelde plus de standaardafwijking van de totale meetperiode van 35 minuten. De integraal over de troebelheidspiek begint zodra het signaal de grenswaarde van het gemiddelde plus de standaardafwijking overschrijdt en duurt tot het moment dat deze waarde weer wordt onderschreden. Er is gekozen voor een integrale waarde in plaats van een piekwaarde van de troebelheid omdat de troebelheid altijd, ook als er geen schepen langs komen, kortdurende piekjes laat zien. Deze piekjes hebben niets te maken met het proces van sedimentbeweging maar zijn het gevolg van de gevoeligheid van de meetsensoren voor alle rommel die in het water drijft. Pas als de troebelheidspiek wat langer aanhoudt, is er daadwerkelijk sprake van sedimentopwerveling.

De drie, door het neurale netwerk te verklaren uitvoerparameters zijn dus:

	Uitvoervariabele	Symbool en eenheid
1	maximale stroomsnelheid tijdens scheepspassage	EMF (m/s)
2	maximale waterstandsval tijdens scheepspassage	DRUK (m)
3	integraal over de troebelheidsregistratie gedurende de passage	OBS (g*s/l)

4.3.4. Stap 2. Selectie van te gebruiken invoervariabelen

De lijst met invoervariabelen in tabel 4.3 is een volledige lijst met scheepseigenschappen die van invloed zouden kunnen zijn op de processen in de kribvakken. Maar wellicht zijn niet al deze variabelen nodig om de water- en sedimentbeweging te beschrijven en kan deze lijst worden uitgedund. Daarom is een parameteroptimalisatie uitgevoerd.

Parameteroptimalisatie is een iteratief proces. Middels een correlatieanalyse en een hoofdcomponentenanalyse zijn in eerste instantie de sterkste vormen lineaire samenhang tussen invoervariabelen onderling gekwantificeerd (Schulze, 1999). Voor de correlatieanalyse is gebruik gemaakt van de rangcorrelatietoets van Spearman. Deze toets verdiende

de voorkeur boven de meer gangbare Pearson correlatietoets omdat de basisgegevens niet normaal verdeeld zijn. Hoofddcomponentenanalyse (of factoranalyse) is een methode om zoveel mogelijk invoervariabelen als functie van elkaar te schrijven. Het aantal factoren dat nodig is om de gehele dataset (invoer) te kunnen beschrijven in termen van verklaarde variantie is een maat voor het aantal onafhankelijke variabelen dat uit de totale set van invoervariabelen kan worden gedestilleerd. Elke invoervariabele vertegenwoordigt een zeker percentage verklaarde variantie voor elke min of meer onafhankelijke factor. Zo kan voor elke factor een cluster invoervariabelen worden onderscheiden die voor die betreffende factor de meeste variantie verklaart. Variabelen binnen zo'n cluster corresponderen veelal met een bepaalde fysische en statistische samenhang of overlap (bijvoorbeeld lengte, breedte, diepte van het schip). Op basis van correlatieanalyse en op basis van hoofddcomponentenanalyse worden voor het kribvakonderzoek nagenoeg vergelijkbare clusters met afhankelijke variabelen onderscheiden. De beide methoden ondersteunen elkaar (Schulze, 1999). Onderscheiden zijn:

Cluster 1:	locatie (voor de kleine frames) en waterstand
Cluster 2:	vaarrichting
Cluster 3:	onderwatervolume, lengte, breedte, diepte, gemodificeerde scheepsbreedte, natte dwarsdoorsnede schip
Cluster 4:	snelheid t.o.v. oever, snelheid t.o.v. afvoer, passageduur
Cluster 5:	passage-afstand
Cluster 6:	natte dwarsdoorsnede van de rivier

Om een adequaat model te genereren dat geschikt is voor het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses, is het van belang een zogenaamde gids-variabele aan te wijzen die representatief is voor een bepaald cluster. Deze gids-variabele dient bij voorkeur die variabele te zijn die het meest bijdraagt aan de verklaring van het sedimenttransport door scheepspassages .

Middels een neurale netwerk zijn vervolgens de relatieve bijdragen geschat van de diverse afzonderlijke invoervariabelen op de water- en sedimentbeweging (Schulze, 1999). Van de passagekarakteristieken blijken de vaarrichting, de passage-afstand en het onderwatervolume van het schip belangrijke verklarende variabelen te zijn. De vaarrichting is echter deels gekoppeld aan het onderwatervolume van het schip omdat met name de grootste onderwatervolumes voorkomen bij de beladen vaart die stroomopwaarts richting Duitsland vaart. De relatie onderwatervolume en richting kan gezien worden als een vorm van schijnrelatie die een negatief effect kan uitoefenen op de uiteindelijke gevoeligheidsanalyse. Daarom zijn de datasets opgesplitst in een opwaarts en een afwaarts varende deel en zijn hiervoor apart neurale netwerken opgesteld waarmee de gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd.

De optimale combinatie van invoerparameters om de scheepskarakteristieken te relateren aan de uitvoervariabelen van water- en sedimentbeweging, is in tabel 4.3 met grijs aangegeven.

4.3.5. *Stap 3. De vaststelling van de ondergrens van de grootte van te beschouwen schepen*

De dataset van de scheepspassages met de bijbehorende gemeten water- en sedimentbeweging omvat alle schepen die tijdens de metingen de meetlocaties passeerden. Uit een bestudering van de meetresultaten bleek dat de kleinere schepen nauwelijks effect lijken te hebben op de sedimentbeweging in het kribvak. Op momenten dat kleine schepen passeren, worden in het kribvak geen opvallende veranderingen in de waterstand, stroomsnelheid of troebelheid waargenomen. Het enige effect van deze schepen is wat golfwerking langs de waterlijn. Maar van zuiging en hierdoor opgewekte erosie is geen sprake. De waargenomen variaties in stroomsnelheid en troebelheid in het kribvak tijdens passage van kleine schepen zijn de variaties die altijd wel in een dergelijk gebied voorkomen, ook zonder scheepvaart. Als nu in een neurale netwerk kleine én grote schepen als één set worden meegenomen, zal het neurale netwerk proberen de eigenschappen van de kleine schepen te correleren aan de grillige variaties (ruis). Dit komt de prestatie van het neurale netwerk voor de grotere schepen niet ten goede.

Het verdient daarom de voorkeur om in het neurale netwerk alleen die schepen mee te nemen waarvan een relatie tussen de eigenschappen van de scheepspassage en de processen in het kribvak verwacht mag worden. Daarom is onderzocht welke schepen in het vervolg verantwoord bij analyses mogen worden weggelaten om te komen tot een optimale relatie tussen scheepvaart en het effect op de oever in de kribvakken, zonder dat hierbij een deel van het veroorzakende proces wordt verwaarloosd.

De scheepsgrootte is uitgedrukt in de lengte van het schip. Om het effect van de scheepsgrootte op water- en sedimentbeweging te kwantificeren en te visualiseren zijn de schepen ingedeeld in klassen met een toenemende ondergrens voor de scheepslengte. De klassen onderscheiden zich dus door de minimale scheepslengte die in de betreffende klasse nog wordt meegenomen. Zo ontstaat een klasse-indeling waarbij het relatieve aandeel grote schepen in elke klasse verschillend is en toeneemt naarmate het klassennummer hoger is. De toename in stapgrootte van de kritische minimale scheepslengte die nog wel wordt meegenomen, loopt van 0 tot 100 meter met stappen van 10 meter. Zo ontstaan 11 klassen conform tabel 4.4. Afhankelijk van het aantal schepen binnen de scheepsklassen is vervolgens binnen elke scheepsklasse een calibratie- en een validatieset samengesteld. Voor zowel de calibratie- als de validatieset is de fractie berekende uitvoer die binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval rond de gemiddelde waarde ligt, geschat en uitgezet tegen de minimale scheepsgrootte in de betreffende scheepsklasse. Verwacht wordt dat die waarde voor de scheepsgrootte waarbij de fractie die binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval ligt, met een verdere toename van de minimale scheepsgrootte ook begint toe te nemen, de kritische waarde is die wordt gezocht. Kleinere schepen leveren dan kennelijk, bij toevoeging aan de dataset, geen verbetering op van de verklaring maar induceren wel extra ruis. Voor deze exercitie is voor het grote frame de dataset van de weken 2 en 3, en voor de miniframes de set van week 2 gebruikt. Allen van het meetgebied bij Druten.

Voor het samenstellen van calibratie- en validatiesets is gebruik gemaakt van een zogenaamde random-generator. Deze generator wijst willekeurig 75% van de scheepspassages toe aan de calibratieset en 25% aan de

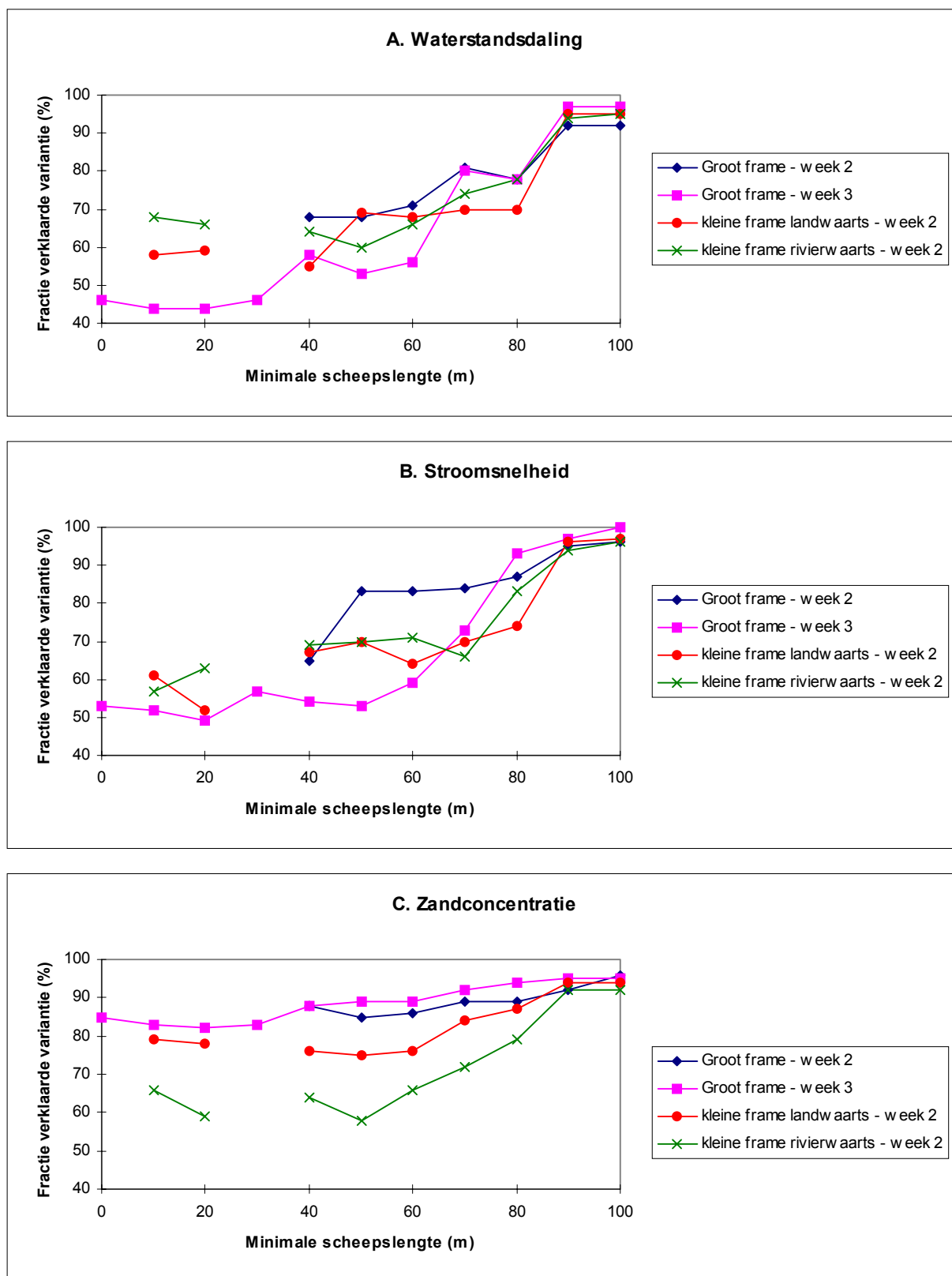
validatieset, zodanig dat een scheepspassage die is toegewezen aan de validatieset niet kan voorkomen in de bijbehorende calibratieset. Vanaf klasse 9 is het aantal schepen dat binnen een klasse valt dermate klein dat geen betrouwbare validatieset kan worden samengesteld. Voor deze klassen is dus alleen gecalibreerd.

Tabel 4.4. De samenstelling van 11 datasets, uitgedrukt in scheepsklasse, met verschillende ondergrens van nog in beschouwing genomen scheepslengtes bij opgestelde neurale netwerken.

Scheepsklasse	Beschouwde scheepslengte	Scheepsklasse	Beschouwde scheepslengte
0	Alle schepen	6	Alleen schepen > 60 m
1	Alleen schepen > 10 m	7	Alleen schepen > 70 m
2	Alleen schepen > 20 m	8	Alleen schepen > 80 m
3	Alleen schepen > 30 m	9	Alleen schepen > 90 m
4	Alleen schepen > 40 m	10	Alleen schepen > 100 m
5	Alleen schepen > 50 m		

De resultaten van de analyses staan vermeld in figuur 4.10 A-C, voor respectievelijk de waterstandsaling, de stroomsnelheid en de zandconcentratie. Op de x-as staan de klassen uit tabel 4.4, te interpreteren als de minimale lengte schepen die nog in de analyses zijn meegenomen. Bij een minimale lengte van 0 m zijn alle schepen meegenomen, bij een lengte van 100 m alleen de 4-baks en 6-baks duwvaart. De percentages op de y-as geven aan hoeveel procent van de variatie in waterstandsaling, stroomsnelheid en zandconcentratie verklaard wordt met een neurale netwerk dat is gebouwd voor een dataset met schepen tot een bepaalde minimale lengte. Hierbij is uitgegaan van een betrouwbaarheidsinterval van 95%.

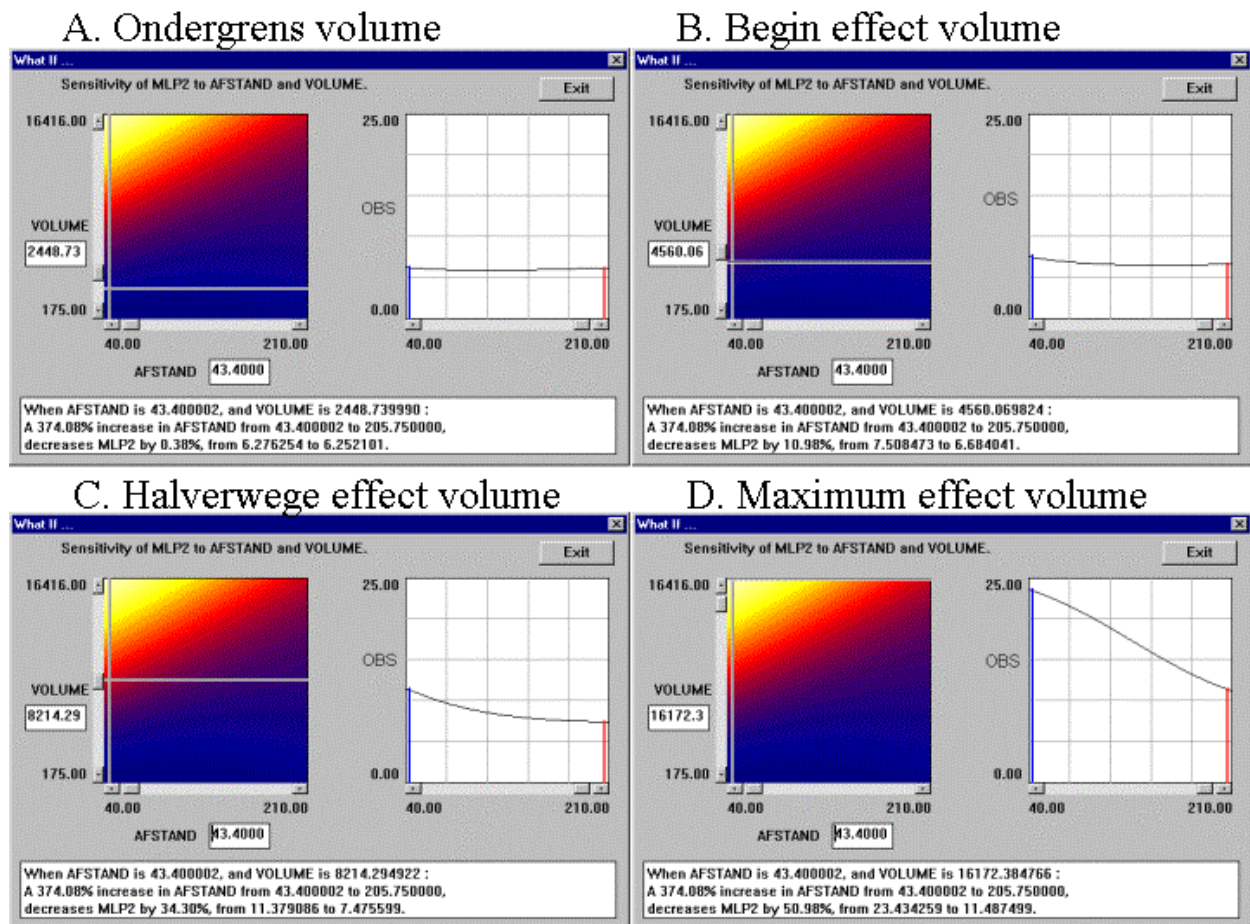
De resultaten laten zien dat er een knippunt ligt bij een minimale scheepslengte van ongeveer 60 m. Dit betekent dat het mee in beschouwing nemen van schepen kleiner dan 60 m geen meerwaarde heeft voor het verklaren van de water- en sedimentbeweging in kribvakken geïnduceerd door scheepvaart. Schepen kleiner dan 60 m mogen dus uit de dataset worden weggelaten.



Figuur 4.10. De fractie van de variantie in de waterstandsddaling (A), stroomsnelheid (B) en zandconcentratie (C) die, binnen een betrouwbaarheidsinterval van 95%, wordt verklaard met een neurale netwerk dat stap voor stap gebaseerd is op een set invoervariabelen met een toenemende ondergrens voor de minimale scheepslengte.

In een later stadium van het project is gebleken dat het onderwatervolume, naast de lengte van het schip, een goede maat is voor de grootte van het schip. Met de reeds ontwikkelde voorspelmodellen (Schulze, 1999) is tevens onderzocht vanaf welk onderwatervolume een duidelijk effect kan worden aangetoond op water- en sedimentbeweging in relatie met de passageafstand. Figuur 4.11 geeft het resultaat weer van het met dit model uitgevoerde onderzoek naar de ondergrens van te beschouwen schepen. In deze exercitie is alleen gekeken naar de zandopwoeling (=integraal over de troebelheidspiek).

Figuur 4.11 geeft het effect weer van het onderwatervolume van schepen op de opwoeling van zand in kribvakken. Dit is gedaan in 4 afbeeldingen waarbij van A naar D het effect van een toenemend scheepsvolume wordt aangegeven. Iedere afbeelding bestaat uit twee grafieken naast elkaar. In de linker grafiek is met een kleur de waarde voor de grootte van de troebelheidspiek (=integraal over de concentratietoename tijdens een scheepspassage) weergegeven als functie van de passageafstand uit de oever op de x-as (in m) en het onderwatervolume van het schip op de y-as (in m³). Van paars c.q. donkerblauw naar geel neemt de troebelheid toe. Voor één bepaalde waarde van het onderwatervolume (de horizontale lijn in de linker grafiek) is de troebelheidswaarte (OBS) uitgezet tegen de passageafstand. Dit is de rechter grafiek.



Figuur 4.11. Het effect van het onderwatervolume van schepen op de opwoeling van zand in kribvakken, weergegeven voor een gradueel verloop van onderwatervolume (y-as) en passageafstand (x-as) (in kleur) en voor 4 onderwatervolumes als troebelheid in afhankelijkheid van de passagesafstand (A t/m D).

Schepen met een onderwatervolume kleiner dan 1500 m³ hebben niet of nauwelijks een effect op het sedimenttransport in kribvakken ongeacht de afstand tot het kribvak. De concentraties behorende bij deze schepen vallen, gemiddeld genomen, binnen de basis- of achtergrondconcentratie. Vanaf een onderwatervolume van zo'n 2500 m³ (figuur A) is er een steeds duidelijker effect waarneembaar van een toenemend onderwatervolume op de opwoeling van zand als functie van de passage-afstand (zie achtereenvolgens figuren B, C en D).

In de dataset met schepen tot een onderwatervolume van gemiddeld 1500 m³ blijken voornamelijk schepen voor te komen met een scheepslengte tot circa 70 meter, breedte tot circa 7 meter en diepte kleiner dan 1 meter. De resultaten met het model komen nagenoeg overeen met de resultaten in een eerder stadium van het project (figuur 4.10), behaald op basis van klassenindeling conform tabel 4.4.

De resultaten afkomstig van het model gebaseerd op het onderwatervolume zijn echter het meest nauwkeurig omdat deze gebaseerd zijn op zowel lengte, breedte als diepte van schepen. De resultaten gebaseerd op klassenindeling en lengte kunnen worden gezien als een ondersteuning van het model gebaseerd op onderwatervolume.

4.3.6. Stap 4. De gerealiseerde Kunstmatige Neurale Netwerken

Met de optimalisatie van de set invoervariabelen en de vaststelling van de ondergrens van de te beschouwen scheepslengte, is de weg vrij voor het bouwen van de definitieve neurale netwerken van de kribvakken waar is gemeten. Dit zijn dus de rekenmodellen waarmee de zandfluxen worden berekend, en extrapolaties naar de hele Waal en de langjarige situatie worden gemaakt.

De neurale netwerken zijn gebouwd voor 2 van de 4 bemeten kribvakken bij Druten, te weten een groot kribvak (vak 3, 210 meter afstand tussen de kribben (tabel 4.1)) aan de noordoever en een kleine kribvak (vak 2, 130 meter afstand tussen de kribben) aan de zuidoever. De andere 2 vakken zijn buiten beschouwing gelaten omdat uit de meetresultaten bleek dat het grote frame daar niet precies in het uitstroompunt van het kribvak heeft gemeten waardoor de modellering van de processen minder betrouwbaar is. In totaal zijn 10 neurale netwerken gebouwd, 4 voor het kleine kribvak aan de zuidzijde en 6 voor het grote kribvak aan de noordzijde. De 4 neurale netwerken voor het kleine vak zijn een netwerk van het uitstroompunt (de metingen met het grote frame) en een netwerk van de ondiepe zone boven het strand (de metingen met de kleine frames), afzonderlijk voor schepen in de op- en afvaart. De 6 neurale netwerken voor het grote vak zijn een netwerk van het uitstroompunt, een netwerk van de ondiepe zone boven het strand (de metingen met de kleine frames in het midden van het vak), en een netwerk van het uitstroompunt van de tweede, kleine neer stroomafwaarts in het vak (de metingen met de kleine frames bij de benedenstroomse krib), wederom afzonderlijk voor schepen in de op- en afvaart. Bij de netwerken staan de variabelen passageafstand en onderwatervolume centraal en dienen de overige variabelen ter ondersteuning van de modellen.

Bij het bouwen van de neurale netwerken zijn nog wel enkele wijzigingen doorgevoerd in de in- en uitvoervariabelen, te weten:

Uitvoer: zandflux in plaats van waterstandsdeling

Besloten is om de uitvoervariabele waterstandsdeling te vervangen door de uitvoervariabele zandflux. De reden hiervoor is de volgende. Voor het beschrijven van het zandtransport, waar het bij dit onderzoek uiteindelijk om gaat, moeten zandconcentratie, stroomsnelheid en de hoogte van de waterkolom met elkaar worden vermenigvuldigd. Uit de metingen is gebleken dat het zandtransport in de kribvakken beperkt blijft tot een transport dichtbij de bodem. Het maakt voor het totale zandtransport niet uit hoe hoog de waterkolom is. Volstaan kan worden met het hanteren van een constante zandtransporterende waterdiepte als een maximale waarde. Deze is gedefinieerd als 34 cm (Ten Brinke et al., 1999). Hiermee is het kunnen voorspellen van de waterstandsdeling niet langer relevant. Er is voor gekozen om de zandflux per scheepspassage te berekenen uit de stroomsnelheid, de zandconcentratie en de vaste zandtransporterende hoogte, en deze extra uitvoervariabele mee te nemen in het te bouwen netwerk in plaats van de waterstandsdeling.

Invoer: extra invoervariabele ter aanduiding meetlokatie

Met de kleine meetframes is binnen een kribvak op 4 locaties gemeten. Deze locaties mogen niet zonder meer op één hoop worden gegooid. De grootte van de water- en sedimentbeweging kan van plaats tot plaats verschillen, doordat de waterdiepte varieert (rivierwaarts versus oeverwaarts), of doordat al dan niet in een tweede keer wordt gemeten. Voor het opstellen van de neurale netwerken moet deze ruimtelijke variatie als invoervariabele worden meegenomen. Deze ruimtelijke variatie is uitgedrukt in 2 extra invoervariabelen: de waterstand en een lokatie nummer. Met de variabele waterstand wordt een onderscheid verkregen tussen de metingen met het kleine frame aan de rivierwaartse zijde van het kribvakstrand, en die aan de oeverwaartse zijde. Deze variabele, feitelijk de waterdruk boven het frame, kan als invoer worden meegenomen nu de waterstandsdeling geen uitvoervariabele meer is. Met een lokatienummer als extra invoervariabele wordt een verschil geïntroduceerd tussen metingen in het midden van het kribvak en metingen nabij de benedenstroomse krib.

4.4. Hoogwater- versus laagwater-effecten: monitoring bodemligging kribvakstranden

4.4.1. *Tijdsreeks*

Gedurende een periode van 4 jaar is een tijdreeks opgebouwd van de bodemligging van 23 kribvakstranden langs de Waal (figuur 4.12). In totaal 8 keer is de bodemligging van het strand tussen de kribben gemeten. Gemeten is steeds langs raaien loodrecht op de oever. Het traject beslaat in alle gevallen een deel van de rivierbedding, het steile talud dat de kribvakstranden van de rivierbedding scheidt, en het strand tot aan de vegetatie bij de oeverwal. De eerste opname is uitgevoerd in maart 1995, net na het hoogwater van dat jaar. De laatste opname is uitgevoerd in juni 1999 en markeert de situatie na het hoogwater van 1998. De dataset bevat dus de effecten van lage en gemiddelde afvoeren én de effecten van een hoogwater. Elke opname bestaat uit een echoloding van de diepere delen (de rivierbedding, het steile talud en een deel van het strand) en een

hoogtemeting (tachymetrie) van de ondiepe delen en het droge strand. De momenten waarop de bodemligging van de 2 delen volgens beide methoden is gemeten, is niet altijd hetzelfde (tabel 4.5). Voor de berekeningen is als datum van de opname van het totale kribvakstrand een gemiddelde van de data van beide delen gekozen.

Tabel 4.5. Overzicht van de data waarop de bodemligging van de 23 kribvakstanden is gemeten.

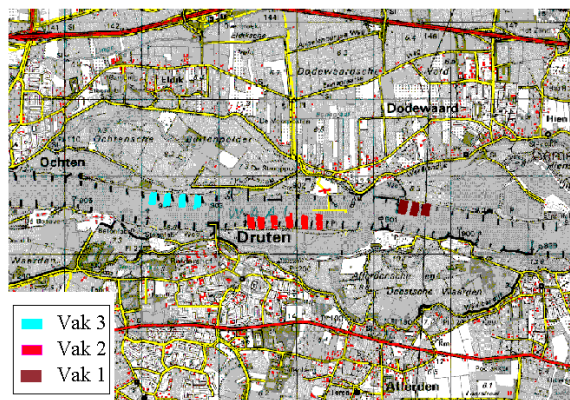
Echoloding	Waterpassing	Rekendatum
16-17 maart 1995	Idem	16 maart 1995
14-19 juli 1995	Idem	16 juli 1995
11-15 april 1996	Idem	13 april 1996
19-20 augustus 1996	Idem	19 augustus 1996
13-15 november 1996	Idem	14 november 1996
6-7 mei 1997	Idem	6 mei 1997
19 januari 1998 (deel Druten)	februari 1998	19 januari 1998
12 februari 1998 (deel St. Andries)	februari 1998	12 februari 1998
7-9 juni 1999	begin augustus 1999	8 juni 1999

4.4.2. De metingen

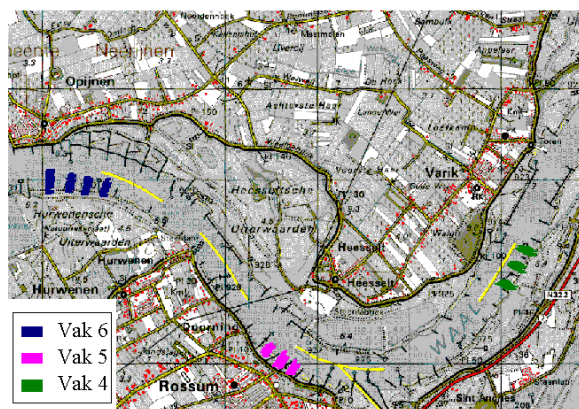
De bodemligging van de kribvakstranden is per strand bepaald langs 3 raaien loodrecht op de oever: een raai in het midden van het vak en 2 raaien aan weerszijden hiervan op een afstand van 25 meter (figuur 4.13). Met de keuze van deze 3 raaien wordt ervan uitgegaan dat een goed gemiddeld beeld van de verandering van de bodemligging van het strand in de tijd wordt verkregen. Er is bewust niet gemeten dicht bij de kribben vanwege lokale morfologische effecten die een te groot stempel op de tijdreeks zouden kunnen drukken. De 23 kribvakken zijn verdeeld over 6 secties langs de Waal: 3 secties nabij Druten in een relatief recht traject van de Waal en 3 secties bij de bocht van St. Andries (figuur 4.12). De secties bij Druten liggen zowel aan de noord- (secties 1 en 3) als aan de zuidoever (sectie 2). De secties bij St. Andries liggen zowel in een binnen- (sectie 6) als in een buitenbocht (secties 4 en 5). Binnen deze secties varieert de afstand tussen de kribben, de kribvakgrootte, tussen de vakken onderling enigszins. Al met al betekent dit dat met de gekozen reeks van 23 vakken de variatie in typen kribvakken langs de Waal goed is vertegenwoordigd: verschillen in kribvakgrootte, oriëntatie t.o.v. de rivierafvoer en de scheepvaart, binnen- en buitenbochteffecten, de invloed van beladen (zuidoever) versus onbeladen (noordoever) vaart.

Bij de metingen is het profiel van de rivierbedding, het talud en het strand vanaf de rivieras tot aan de vegetatielijn ingemeten. Steeds is met een boot gepeild varend vanaf de rivieras in een lijn loodrecht op de oever tot op een positie boven het strand waar het te ondiep werd. Vandaar is met een roeiboot verder oeverwaarts gevaren waarbij met een baak regelmatig op de bodem is geprikt en de hoogte van de baak vanaf het strand is ingemeten. Het hele ondiepe deel en het droge strand is eveneens met een baak en hoogtemeter (tachymetrisch) ingemeten (figuur 4.14).

A. Druten



B. St. Andries



Figuur 4.12. De kribvakken langs de Waal waar in de periode van maart 1995 – juni 1999 de bodemligging van het kribvakstrand periodiek is gemeten middels echolodingen en waterpassing.

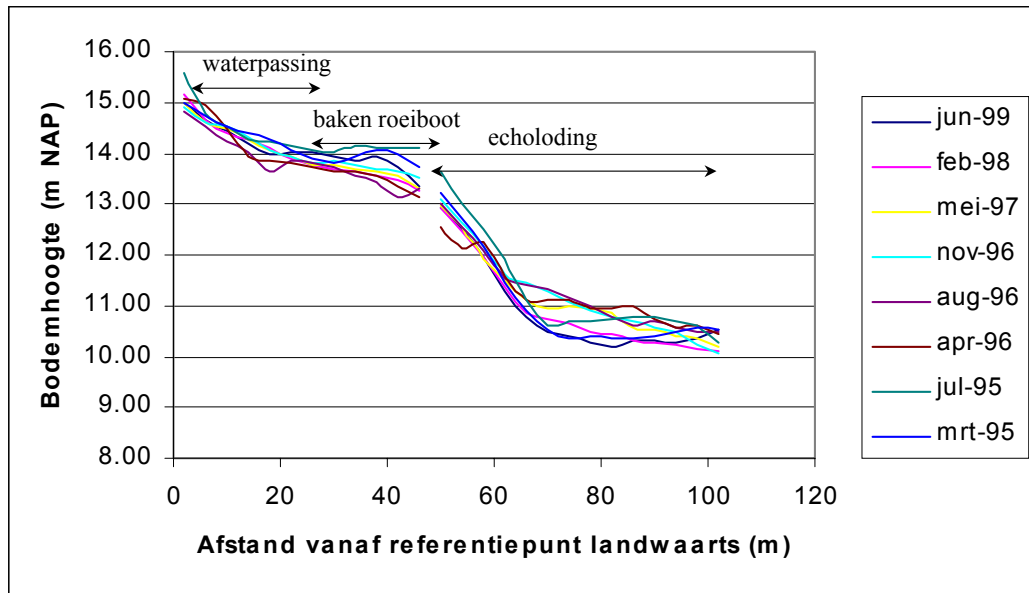


Figuur 4.13. De 3 raaien per kribvak waarvan periodiek de hoogteligging is bepaald. Voorbeeld dat geldt voor alle 23 gemonitorde kribvakken.

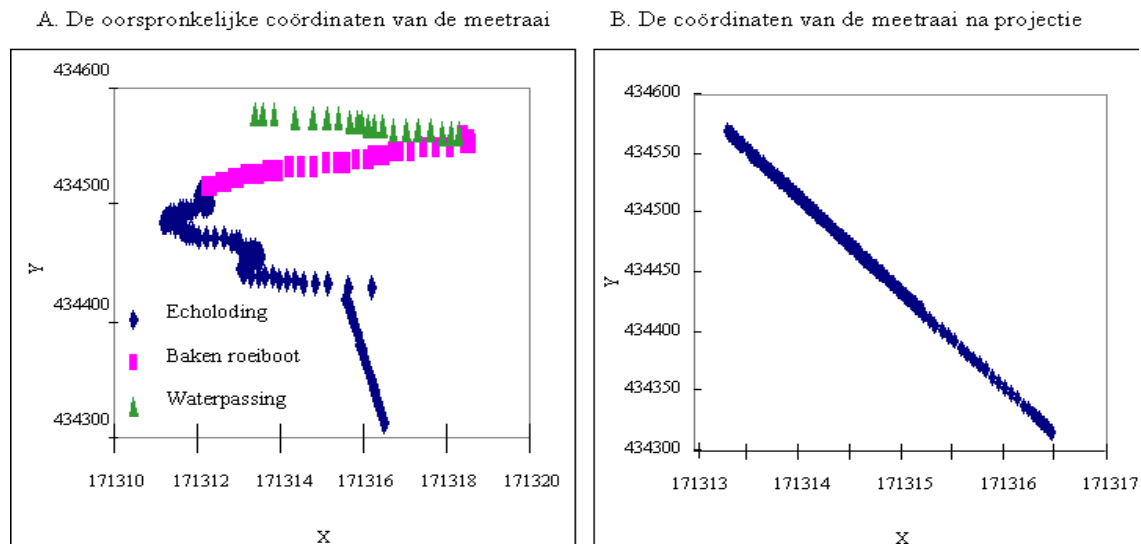
4.4.3. De dataverwerking

Nadat de hele tijdreeks was voltooid, zijn per meetraai de X-Y-coördinaten van de 8 gemeten profielen geprojecteerd op de rechte lijn loodrecht op de oever. Deze rechte lijn is steeds hetzelfde gehouden voor alle 8 opnames per raai. De oorspronkelijk, qua X-Y-coördinaten, veelal vrij grillige meetraai (figuur 4.15A) is hierbij omgezet tot een standaard raai voor alle 8 opnames (figuur 4.15B). Overigens roept figuur 4.15A een rommeliger meetbeeld op dan de realiteit was. Men dient zich te realiseren dat de afwijking op de x-as slechts in de orde van enkele meters was.

Vervolgens is uit deze geprojecteerde data de bodemligging berekend op regelmatige afstanden van 4 meter langs de geprojecteerde lijn. Steeds is voor alle 8 meetraaien hetzelfde beginpunt als 0-referentie genomen en ten opzichte van dit nulpunt is de afstand steeds met 4 meter vergroot. Op deze wijze zijn alle momentopnamen consistent verwerkt en onderling direct vergelijkbaar. Tijdens de analyses zijn uitbijters uit de dataset verwijderd. Een getal is als uitbijter beschouwd als deze een volstrekt irrealistische hoogte ten opzichte van omliggende waarden bedraagt.

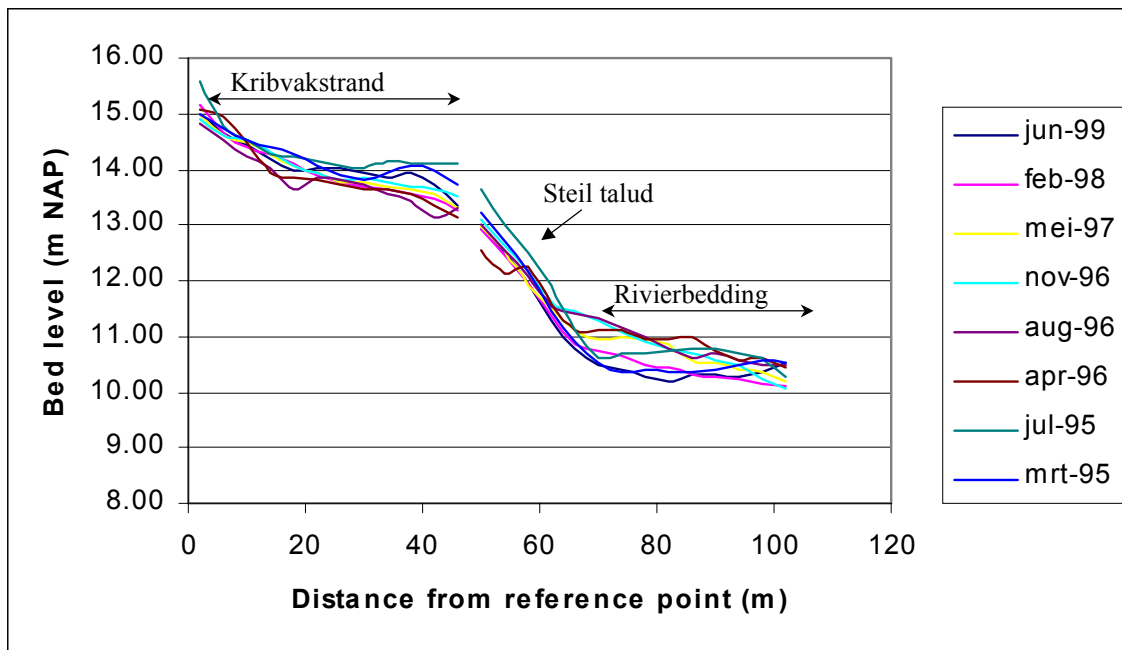


Figuur 4.14. De toegepaste methode voor het inmeten van de hoogte langs de raai langs verschillende delen van het profiel.



Figuur 4.15. De meetposities langs het talud loodrecht op de oever voor een meetraai vóór (A) en ná (B) projectie op een rechte lijn loodrecht op de oever.

De datasets omvatten, na projectie op de rechte lijn, veelal niet het gehele bereik van de geprojecteerde profielen bij de gehanteerde onderlinge afstand van 4 m tussen de hoogtewaardes. De ontbrekende waardes zijn daarom alsnog ingevuld op basis van interpolatie tussen omliggende hoogtewaardes. Bij de gehanteerde procedures is geïnterpoleerd op basis van omliggende punten in dezelfde momentopname (bij maximale 2 opeenvolgende missende waardes) of op basis van de hoogtes op dezelfde posities van een eerdere en een latere momentopname (bij meer dan 2 opeenvolgende missende waardes). De interpolaties zijn alleen uitgevoerd voor dat deel van de meettraaien die betrekking hebben op het kribvakstrand. Het kribvakstrand is gedefinieerd als dat deel van het profiel van de rivierbedding naar de oeverwal tussen de vegetatielijn aan de oeverzijde en de overgang naar het steile profiel aan de rivierzijde (figuur 4.16).



Figuur 4.16. De definitie van kribvakstrand, steil talud en rivierbedding in het hoogteprofiel van de gemonitoorde raaian.

De geprojecteerde en geïnterpoleerde hoogtedata konden vervolgens, voor opeenvolgende hoogteopnamen in de tijdreeks, van elkaar af worden getrokken. De verkregen verschillen, te interpreteren als sedimentatie in de beschouwde periode (+) of erosie (-), zijn vervolgens in grafieken uitgezet. Er is gekozen voor 2 soorten grafieken: grafieken met een presentatie van sedimentatie en erosie langs het profiel in de horizontale ruimte, en grafieken met een presentatie van sedimentatie en erosie uitgezet tegen de diepte van het profiel.

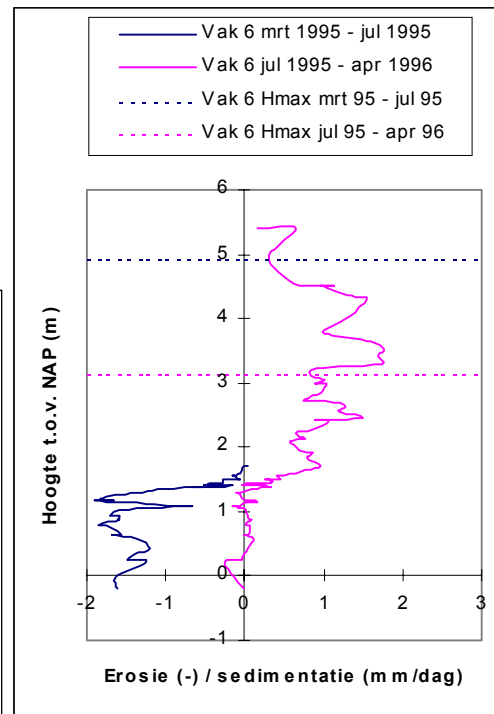
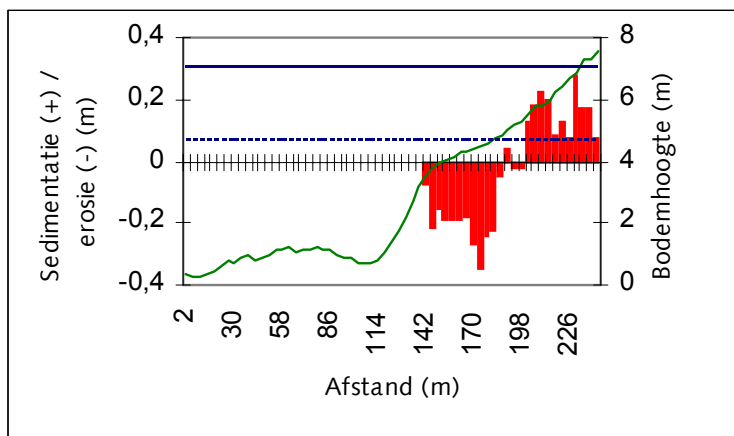
Een voorbeeld van het eerste type toont figuur 4.17A. De groene lijn is de profiellijn van het strand, het onderwatertalud en de rivierbedding. Met rode staafjes is sedimentatie (+) en erosie (-) aangegeven. In dit voorbeeld is tussen de 2 beschouwde tijdstippen in het meest landwaartse deel van het strand tegen de vegetatie op de oever aan sedimentatie opgetreden, en op het vlakkere strand tot aan het onderwatertalud erosie. De

getrokken en gestippelde horizontale lijnen geven de maximale en minimale waterstand in de beschouwde periode weer.

Een voorbeeld van de presentatie van sedimentatie en erosie tegen de diepte geeft figuur 4.17B. In dit voorbeeld zijn 2 vershilleberekeningen getoond. In dit voorbeeld is in de periode maart - juli 1995 erosie opgetreden in het diepere deel van het profiel. In de daarop volgende periode juli 1995 - april 1996 is in een groot deel van het hoogtebereik van het profiel sedimentatie opgetreden. Met de stippellijnen is aangegeven wat de hoogste waterstand in de beschouwde periode was. Met de combinatie van de sedimentatie en erosie in de ruimte langs het profiel (A) in de dieptezonering van het profiel (B) en steeds in combinatie met het bereik van de waterstanden kan goed worden geïnterpreteerd wat de ontwikkelingen in een bepaalde periode waren en hoe dit is gerelateerd aan de waterstanden.

B Presentatie sedimentatie (+)/erosie (-) uitgezet tegen de diepte van het profiel

A Presentatie sedimentatie (+)/erosie (-) langs profiel in het horizontale vlak

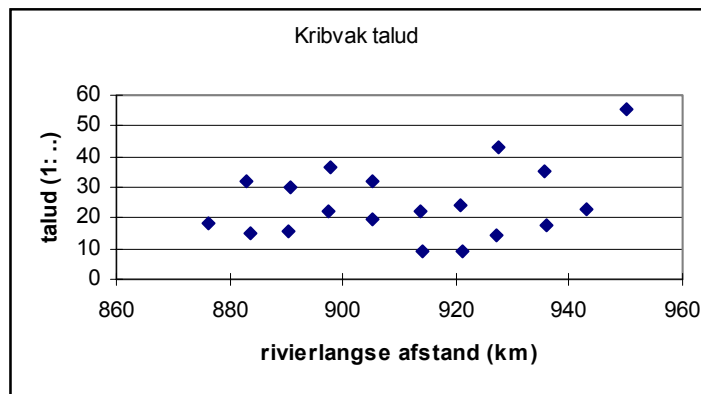


Figuur 4.17. Principeschets van de erosie en sedimentatie langs het talud van het kribvakstrand over een lijn loodrecht op de oever (A) en tegen de diepte van posities op het profiel (B).

4.5. De lange termijn balans van kribvakstranden: een analyse van luchtfoto's over 20 jaar

Van de kribvakstranden langs de Waal zijn luchtfoto's beschikbaar die als reeks een tijdspanne bestrijken van 20 jaar. De loodrecht luchtfoto's zijn genomen van alle kribvakken (en dus kribvakstranden) langs de Waal in de jaren 1976, 1985, 1992 en 1997. In alle gevallen was de afvoer laag (jaargemiddeld of minder) zodat de kribvakstranden goed zichtbaar waren.

De strandoppervlakten zijn ingemeten, en alle strandoppervlakten zijn gecorrigeerd naar dezelfde afvoer. Deze omrekening naar één afvoer is gebaseerd op informatie over de helling van het strand en het onderwatertalud. Deze informatie is helaas slechts voor een beperkt aantal locaties langs de rivier beschikbaar (figuur 4.18) waardoor deze omrekening met veel onzekerheid is omgeven. Maar deze dataset is de enige langjarige dataset van kribvakstranden die beschikbaar is. De voor de waterstand gecorrigeerde strandoppervlakten zijn onderling vergeleken en gekeken is of in bepaalde periodes sedimentatie of erosie is opgetreden. Hierbij zijn ook volumeberekeningen van hoeveelheden sedimentatie en erosie uitgevoerd, waarbij wederom gebruik is gemaakt van de gegevens over het kribvaktalud om oppervlaktegetallen te kunnen omrekenen naar volumes zand.



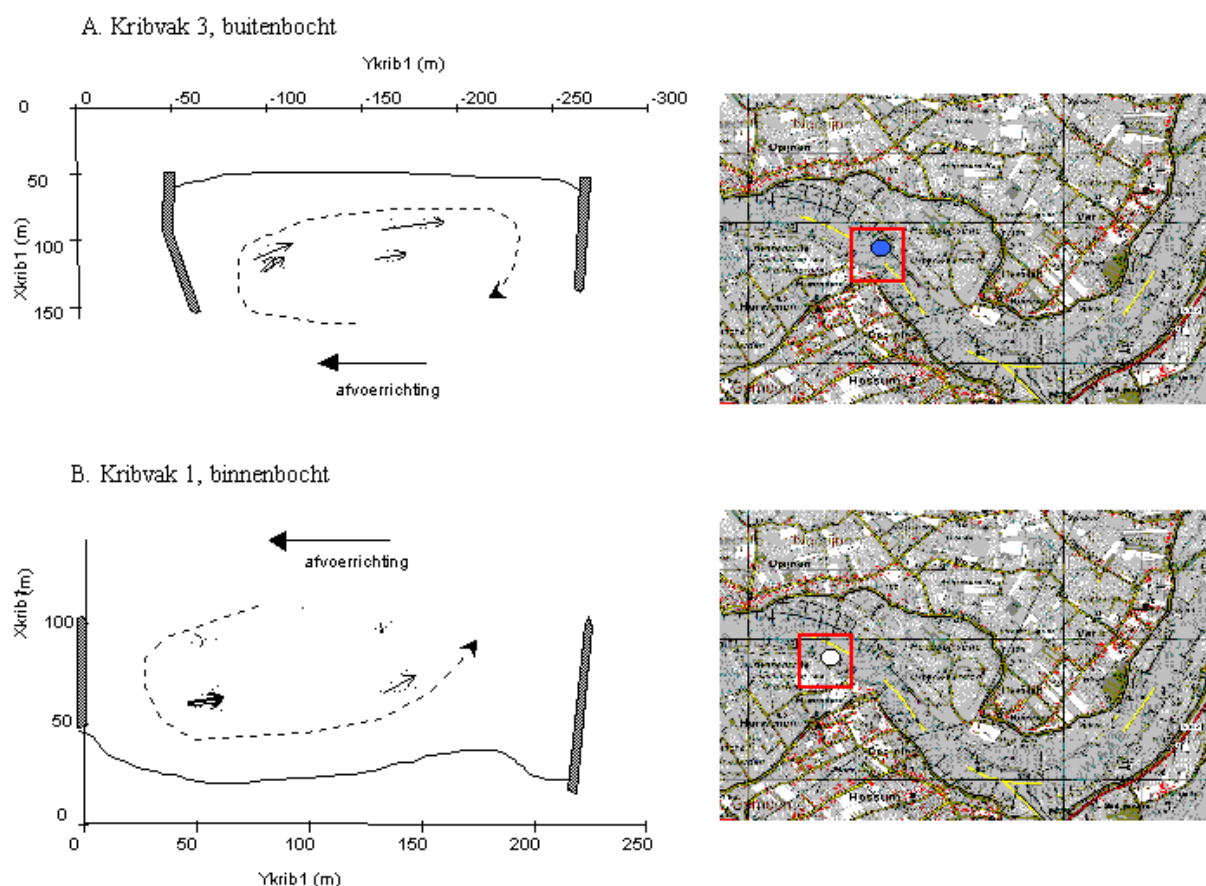
Figuur 4.18. Het talud van kribvakstranden langs de Waal.

5 Resultaten

5.1. Scheepsgeïnduceerde waterbeweging in kribvakken langs de Waal

5.1.1. Laagwater stroompatronen zonder scheepvaart: recht traject Waal

De stroompatronen die onder invloed van de rivierafvoer in kribvakken optreden, voor de situatie van niet-overstroomde kribben, is al eerder geschetst in figuur 3.4. Althans voor de situatie van een relatief recht riviertraject zoals de Waal bij Druten. Langs de Waal treden 2 typen stroompatronen op: het patroon van één stroomneer bij een relatief korte afstand tussen de kribben, en het patroon van één grote en één kleine neer bij een afstand tussen de kribben die zo groot is dat een tweede neer benedenstrooms in het kribvak kan ontstaan. Onderzoek laat zien dat de situatie van één stroomneer geldt voor kribvakken met een onderlinge kribafstand van 150 meter of minder. Figuur 2.1 laat zien dat deze situatie langs de Waal weinig voorkomt. Over het algemeen zal er sprake zijn van 2 stroomneren in het kribvak.



Figuur 5.1. Stroompatronen, gemeten op 4 locaties, in een kribvak in de buiten- (A) en binnenbocht (B) van de Waal bij St. Andries voor de situatie zonder passerende scheepvaart.

5.1.2. *Laagwater stroompatronen zonder scheepvaart: binnen- buitenbocht Waal*

Het onderzoek met betrekking tot de stroompatronen in kribvakken is in het verleden vrijwel uitsluitend gericht geweest op kribvakken langs een recht traject van de Waal. De situatie in rivierbochten kan anders zijn doordat de secundaire stroming daar sterker zijn invloed zal doen gelden. Hierbij moet een onderscheid worden gemaakt in binnen- en buitenbocht. In de buitenbocht ligt de stroomnaad dicht bij het kribvak en zal de rivierafvoer in sterkere mate het stroompatroon in het vak bepalen. In de binnenbocht geldt precies het omgekeerde en zal de neerstroming aanmerkelijk minder krachtig zijn. Dit blijkt ook uit de meetresultaten van 1997 in de bocht bij St. Andries. Figuur 5.1 laat de gemiddelde stroming zien voor langdurige (minstens 10 minuten) periodes zonder passerende scheepvaart (Touwen, 1997) op de 4 meetposities boven het kribvakstrand waar met de kleine frames is gemeten. De lengte van de pijlen is een maat voor de sterkte van de stroming. De gestippelde lijnen geven de marges van de stroomrichting aan waarbinnen deze varieert. Zowel in binnen- als buitenbocht zijn de neerstroompatronen herkenbaar. In de buitenbocht (figuur 5.1A) zijn deze aanmerkelijk sterker dan in de binnenbocht (figuur 5.1B). Dit uit zich niet alleen in hogere stroomsnelheden, maar ook in minder variatie in de richting van de stroom.

5.1.3. *De invloed van passerende scheepvaart*

Het principe van de waterbeweging die wordt opgewekt door passerende scheepvaart, en het effect hiervan op het stroompatroon in kribvakken, is al eerder besproken in hoofdstuk 3. In dit hoofdstuk wordt meer in detail ingegaan op meetresultaten van de bemeeten kribvakken langs de Waal.

De passage van een schip leidt in principe tot een lichte verhoging van de waterstand (boeggolf), gevolgd door een aanmerkelijk forsere daling van de waterstand (leegzuigen kribvak) en daarna het weer stijgen van de waterstand (vollopen kribvak en passage hekgolf), gevolgd door een reeks secundaire golven achter het schip (zie ook figuren 3.1 en 3.2). Over het algemeen zijn de daling van de waterstand en de secundaire golven de meest markante verschijnselen die aan het kribvakstrand worden waargenomen. De waterstandsverhoging door de boeggolf wordt niet of nauwelijks waargenomen.

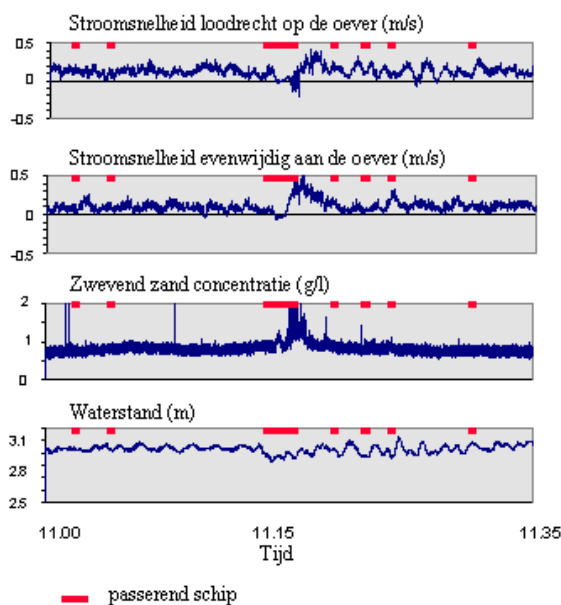
Figuur 5.2 toont een voorbeeld van de waterbeweging die in het kribvak bij passage van scheepvaart wordt geïnduceerd, voor zowel de waterbeweging boven het kribvakstrand (figuur 5.2.B) als in het uitstroompunt (figuur 5.2.A). Het beeld van de waterbeweging boven het kribvakstrand is karakteristiek voor alle meetposities boven het strand. Het gaat bij deze illustratie met name om de passage van een beladen 4-baksduwstel die stroomopwaarts van Rotterdam naar Duisburg vaart. Deze passage is de langste rode streep die om 11.15 passeert.

De passage leidt tot een daling van de waterstand in het kribvak met maximaal 20 cm. De stroomsnelheid boven het kribvakstrand (op ongeveer 10 cm boven de bodem) laat een toename zien van de stroomsnelheid evenwijdig aan de oever in een stroomopwaartse richting (negatief teken) die maximaal 20-25 cm/s bedraagt en vrij kort duurt. Loodrecht op de oever ontstaat een stroomsnelheidstoename die afwisselend naar de rivier toe (positief teken, leegstromen kribvak) en naar de oever toe (negatief

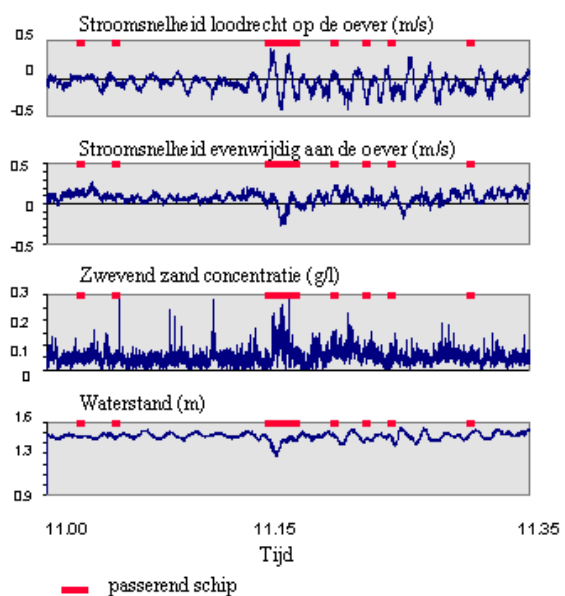
teken, volstromen kribvak) is gericht. Te zien is dat er geen sprake is van één keer leeg- en weer volstromen, maar dat er een op- en neergaande waterbeweging plaatsvindt die langzaam uitdempt. Kennelijk blijft de golfbeweging van leeg- en volstromen nog een tijdje naijlen. De op- en neergaande waterbeweging kan niet het gevolg zijn van de secundaire golven aangezien deze orbitaalbeweging zich op een veel kleinere tijdschaal afspeelt. Aanmerkelijk hogere stroomsnelheden treden op in het uitstroompunt, met waarden tot 40 cm/s op ongeveer 8.5 cm boven de bodem. Deze stroming houdt vrij lang aan om vervolgens langzaam af te zwakken.

De opgewekte stroming wervelt een merkbare hoeveelheid zand op die met name in het uitstroompunt is terug te vinden in een sterke verhoging van de zandconcentratie op 8.5 cm boven de bodem. In de registratie van de zandconcentratie is het effect van de passage van andere, kleinere schepen niet terug te vinden. De verhoging van de zandconcentratie boven het kribvakstrand is, hoewel ook goed merkbaar, toch veel minder dan in het uitstroompunt.

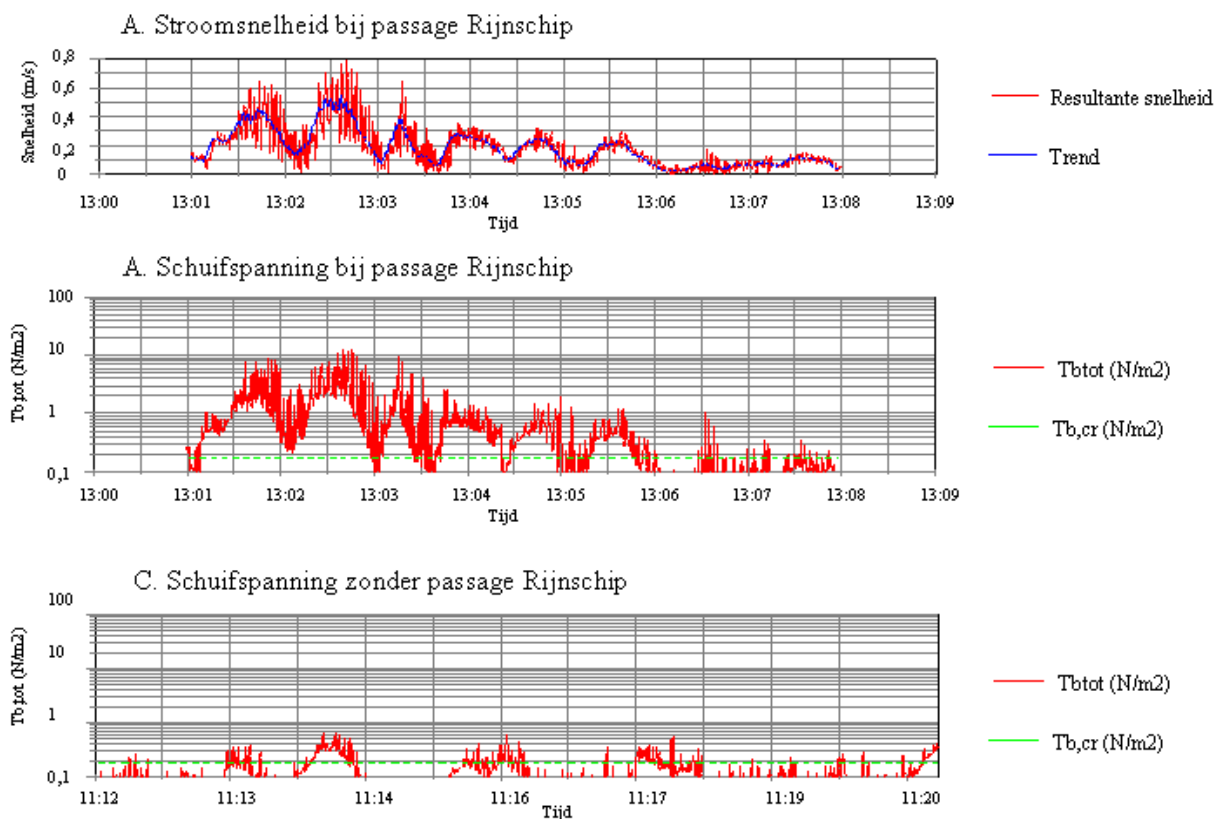
A. Positie: in het uitstroompunt



B. Positie: boven het strand



Figuur 5.2. Een voorbeeld van een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie in het uitstroompunt van een kribvak (A) en een meetpositie boven het kribvakstrand (B). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. Voor de stroomsnelheden geldt: + = naar de rivier toe (loodrecht op de oever) respectievelijk stroomopwaarts (evenwijdig aan de oever).

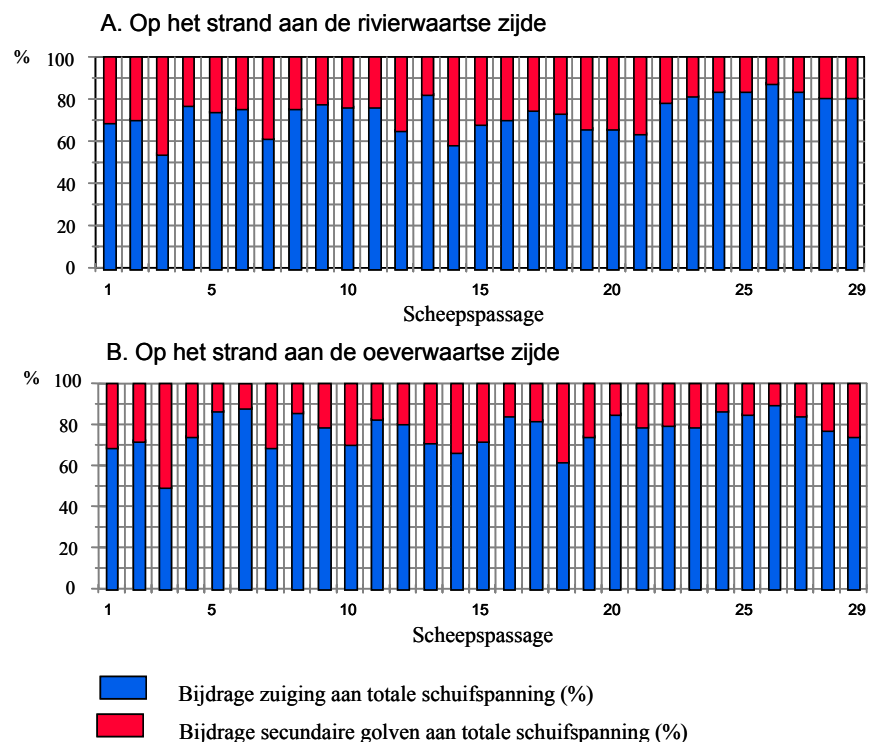


Figuur 5.3. De stroomsnelheid gemeten boven het kribvakstrand van vak 2 aan de zuidoever bij Druten tijdens de passage van een Rijnschip, de berekende schuifspanning tijdens deze passage, en de berekende schuifspanning op dezelfde meetlocatie op een moment zonder scheepspassage.

Kennelijk leidt de passage van grote, beladen schepen tot een dusdanig sterkere stroming in de kribvakken dat zand wordt geërodeerd en via het uitstroompunt naar de rivier wordt gevoerd. Dit betekent dat de scheepsgeïnduceerde waterbeweging leidt tot een verhoging van de bodemschuifspanning boven het zandstrand tot boven de kritische erosieschuifspanning van het zand. Door Lenders (1998; gebaseerd op formules uit Van Rijn, 1993) is uit de meetresultaten van de meetcampagne bij Druten de opgewekte bodemschuifspanning onder invloed van golven en stroming berekend voor een aantal karakteristieke scheepspassages. Een voorbeeld van de resultaten wordt getoond in figuur 5.3. De passage van een Rijnschip leidt in dit voorbeeld tot stroomsnelheden van 40-50 cm/s, met uitschieters tot 80 cm/s, op een hoogte van 10 cm boven het strandoppervlak (figuur 5.3.A). Omrekening van de stroomsnelheid in de schuifspanning levert waarden op die ruim boven de kritische schuifspanning voor erosie van het betreffende zand (groene lijn in de figuur) liggen (figuur 5.3.B). Deze hoge waarden, met erosie van zand tot gevolg, houden in dit voorbeeld meerdere minuten aan. Ter vergelijking voor de situatie zonder scheepvaart is van dezelfde locatie een verloop van de berekende schuifspanning zonder passage van een schip getoond (figuur 5.3.C). Volgens het getoonde voorbeeld wordt de drempelwaarde voor erosie in dat geval slechts af en toe kort overschreden. Opgemerkt moet worden dat bij de berekeningen die aan figuur 5.3 ten grondslag liggen,

een aantal aannames gedaan moest worden aangezien slechts op één positie boven de bodem is gemeten. Dit maakt de absolute waarden van de schuifspanningen onbetrouwbaar. Maar de illustratieve waarde van het effect van scheepspassage versus geen scheepvaart is er niet minder om.

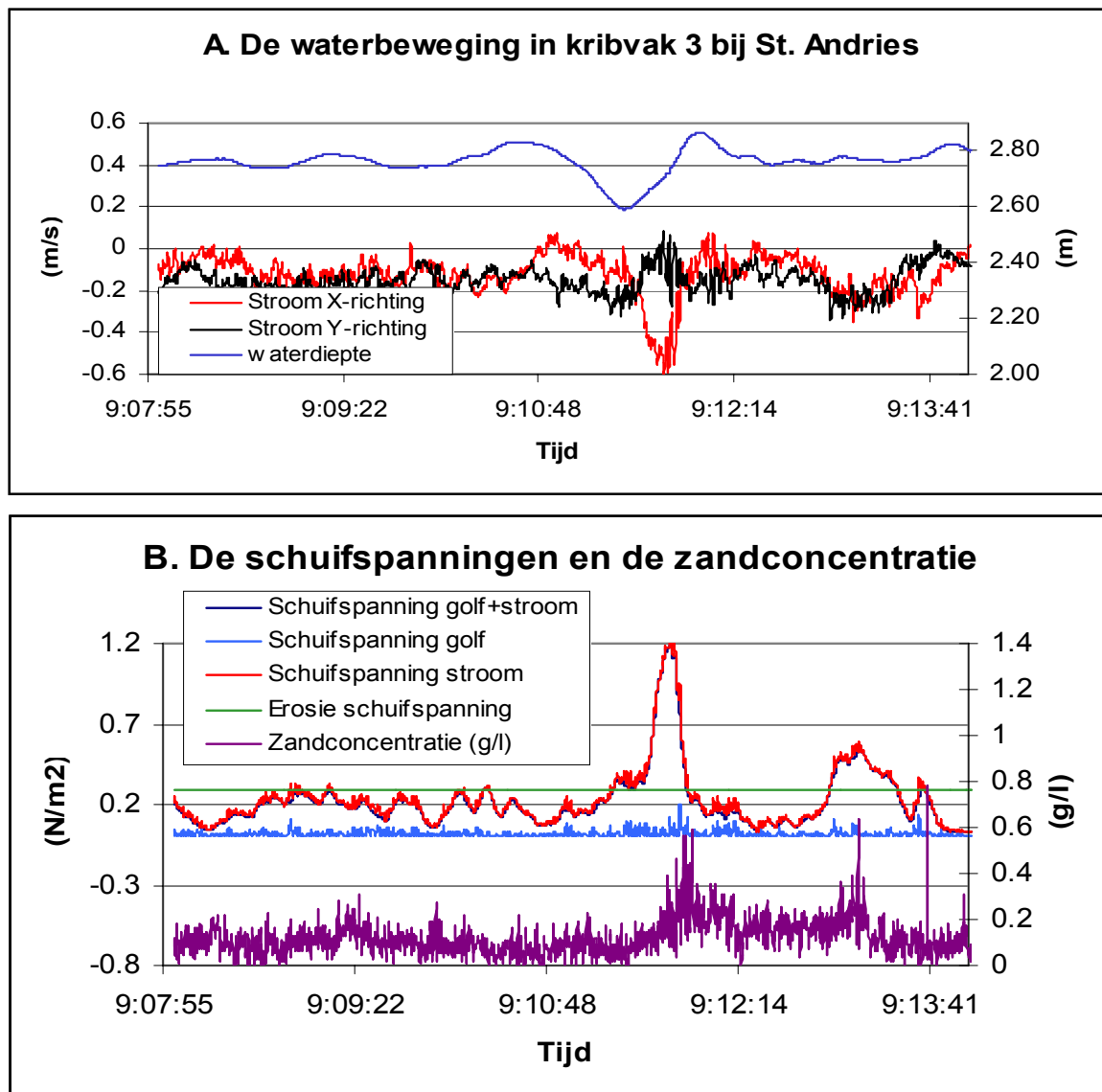
De schuifspanning in figuur 5.3. is de som van de schuifspanning door stroming en golven. Van Maren (1998) heeft, voor een aantal scheepspassages bij Druten, uitgerekend wat de bijdrage van stroming en golven is aan de totale schuifspanning. Figuur 5.4 toont het resultaat, voor 2 posities op het strand: de meetlocaties rivierwaarts (A) en landwaarts (B). Duidelijk is dat de stroming door het leeglopen (zuiging) van het kribvak een veel grotere bijdrage levert aan de totale schuifspanning dan de orbitaalbeweging van de secundaire golven. Deze situatie is hetzelfde voor beide meetposities binnen het kribvak.



Figuur 5.4. De bijdragen van zuiging en secundaire golven als gevolg van passerende duwvaart aan de schuifspanning van de waterbeweging op het sediment van de kribvakstranden, voor in totaal 29 scheepspassages.

De relatief geringe bijdrage van secundaire golven aan de totale schuifspanning op het kribvakstrand bij Druten is ook waargenomen voor de kribvakken in de binnen- en buitenbocht bij St. Andries (Schans, 1997). Het leegzuigen en weer volstromen van kribvakken door passerende scheepvaart is kennelijk het dominante proces dat in kribvakken de hoge schuifspanningen voor erosie van zand oplevert. Deze waterbeweging, vertaalt in schuifspanningen, is in meer detail onderzocht door Schans (1997), voor de kribvakken in de bocht bij St. Andries. Figuur 5.5.A laat de waterstand en de stroomsnelheid loodrecht op de oever en parallel aan de oever tijdens en na een passerende schip zien (+ = naar de rivier (X-richting) respectievelijk stroomopwaarts (Y-richting)). Figuur 5.5.B. laat de schuifspanningen zien die door de golven en de stroming op de bodem van

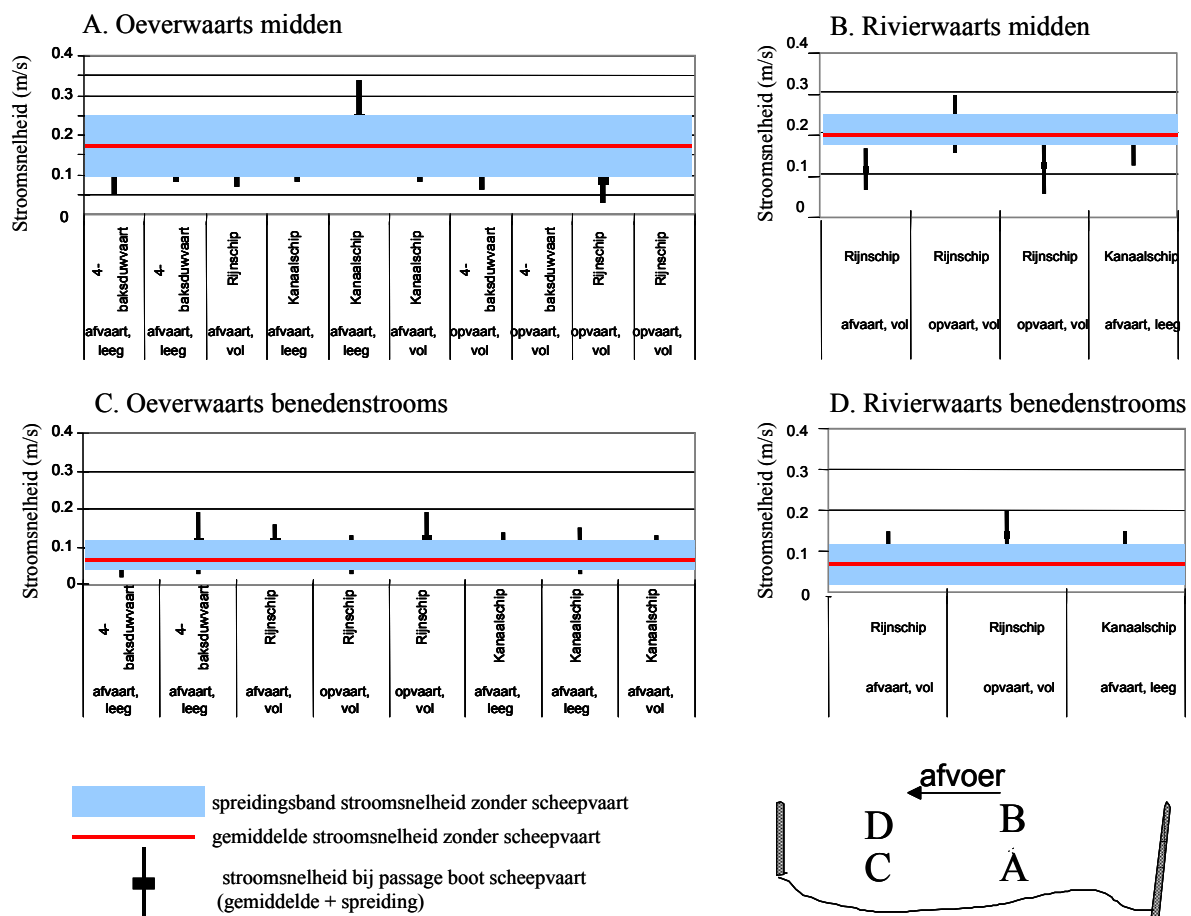
het strand worden uitgeoefend. Het is duidelijk dat de hoogste schuifspanningen optreden bij de stroming in de richting loodrecht op de oever en gericht naar de oever toe, met andere woorden op het moment dat het leeggezogen vak weer volstroomt. De hoogste zandconcentraties ijlen hier enigszins op na. Een en ander betekent dat de waterbeweging boven het kribvakstrand ten gevolge van een passerend schip niet leidt tot een relatief groot zandverlies als het vak wordt leeggezogen. De zandbeweging komt pas goed op gang als het vak weer volstroomt. Dit betekent dat het zandverlies door passerende scheepvaart plaatsvindt doordat het geërodeerde zand met de neerstroming naar het uitstroompunt wordt gevoerd en daar de rivier in stroomt.



Figuur 5.5. De waterbeweging in kribvak 3 bij St. Andries (buitenbocht) voor, tijdens en na de passage van een groot, beladen schip (A), de hierdoor opgewekte schuifspanning bij de bodem en de zandconcentratie (B).

5.1.4. Scheepsinvloeden in bochten

De water- en sedimentbeweging in kribvakken in bochten, en de invloed van passerende scheepvaart hierop, zal afwijken van de situatie in een recht traject van de rivier. De reden hiervoor is gelegen in het zware stempel dat de secundaire stroming (en dus de spiraalstroming) drukt op de water- en sedimentbeweging, en morfologie in rivierbochten. Hierdoor zal de rivierafvoer sterker merkbaar zijn in kribvakken in buitenbochten (zie 5.1.2) terwijl de kribvakstranden daar minder uitgestrekt zijn. In kribvakken in binnenbochten zijn de stranden juist wel uitgestrekt maar zijn deze onderdeel van de pointbar die er mede toe leidt dat schepen ver uit de oever passeren. Bovenstaande maakt het aannemelijk dat scheepsgeïnduceerde waterbeweging in kribvakken in binnen- en buitenbochten een minder belangrijke rol speelt ten opzichte van de rivierafvoer dan in kribvakken langs een recht riviertraject.

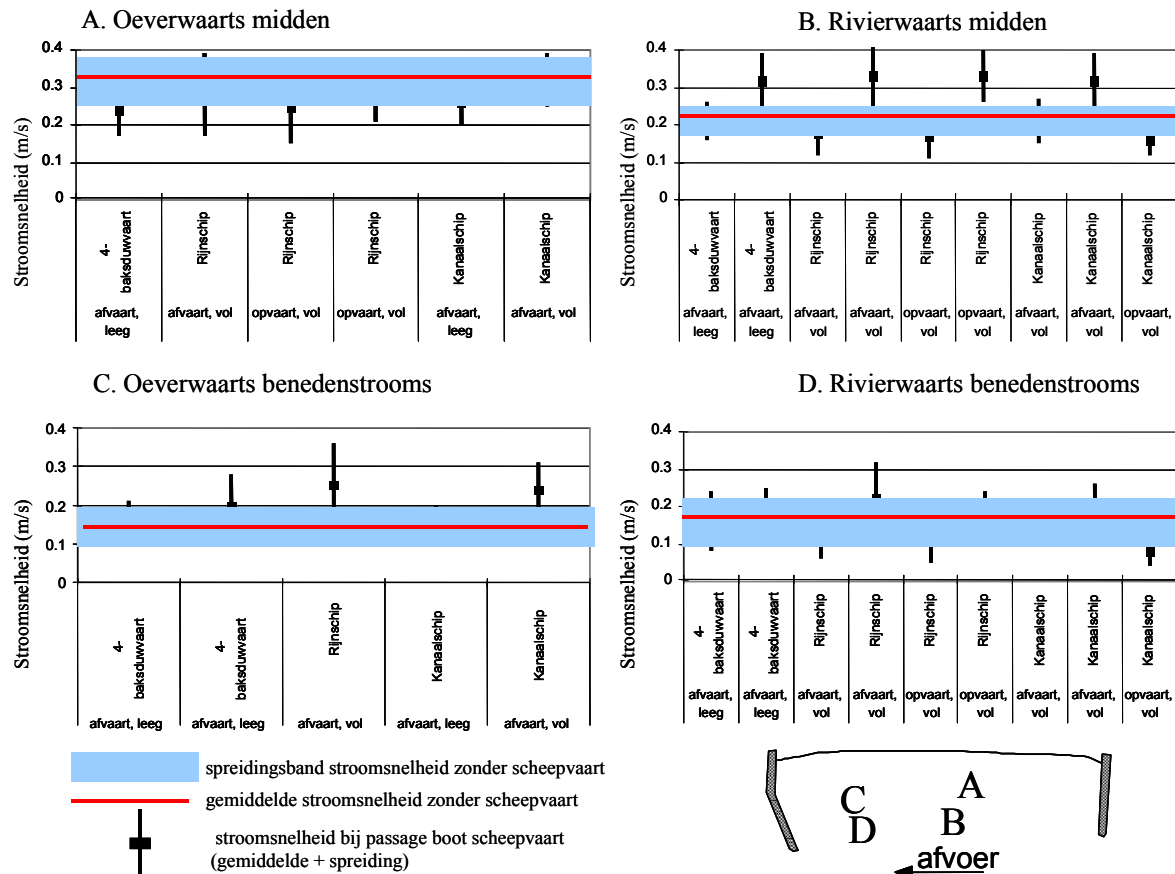


Figuur 5.6. De gemiddelde stroomsnelheid op 10 cm boven de bodem van het kribvakstrand in vak 1 (zie figuur 4.1) in de binnenbocht bij St. Andries tijdens een aantal scheepspassages en voor de situatie zonder passerende scheepvaart.

De invloed van scheepspassages op stroomsnelheden boven het kribvakstrand in een binnen- en buitenbocht bij St. Andries is geanalyseerd door Touwen (1997). Zij heeft dit gedaan voor de 4 meetposities van de kleine meetframes in 2 kribvakken: vak 1 in de binnenbocht en vak 3 in de

buitenbocht (figuur 4.1). Zij heeft de gemiddelde stroomsnelheid bepaald in een periode van 10 minuten zonder passerende schepen en zonder opvallende najling van eerdere passages. Vervolgens heeft zij voor een aantal scheepspassages de gemiddelde stroomsnelheid (+/- standaarddeviatie) bepaald gedurende de periode tussen het moment van passage van de boeg van het schip en 3 minuten na de passage van de achtersteven van het schip.

De resultaten van deze analyses zijn gepresenteerd in de figuren 5.6 (binnenbocht) en 5.7 (buitenbocht).



Figuur 5.7. De gemiddelde stroomsnelheid op 10 cm boven de bodem van het kribvakstrand in vak 3 (zie figuur 4.1) in de buitenbocht bij St. Andries tijdens een aantal scheepspassages en voor de situatie zonder passerende scheepvaart.

De resultaten in de figuren 5.6 en 5.7 laten zien dat de gemiddelde stroomsnelheid boven het strand door de neerstroming, zonder passerende scheepvaart, in de buitenbocht groter is dan in de binnenbocht, en in zowel buiten- als binnenbocht in het midden van het vak groter is dan in het benedenstroomse deel van het vak. Hieruit blijkt de sterke invloed van de neer in het midden van het vak. De spreiding rond de gemiddelde stroomsnelheid is in alle gevallen groot.

De invloed van passerende scheepvaart langs kribvakken in de binnenbocht leidt niet tot opvallend hogere stroomsnelheden boven het strand gedurende de hele tijdsduur van de passages. Boven kribvakstranden in de buitenbocht heeft passerende scheepvaart in een aantal gevallen wel duidelijk invloed op de stroomsnelheid. Deze invloed is lokaal een versterking van de stroomsnelheid, met name in het midden van

het kribvak aan de rivierwaartse zijde. Maar aan de oeverwaartse zijde in het midden van het vak lijkt de stroomsnelheid bij passerende schepen juist af te nemen. Waarschijnlijk betekent passerende scheepvaart naast een versterking van de neerstroming ook een verschuiving van de neer waardoor de stroomsnelheid op een bepaalde lokatie kan afnemen terwijl de neerstroming zelf versterkt.

In de figuren 5.6 en 5.7 zijn passages in de op- en afvaart, en leeg en beladen opgenomen. Er kan uit deze resultaten geen invloed van vaarrichting of beladingsgraad worden afgeleid.

5.2. De erosie van zand tijdens scheepspassages

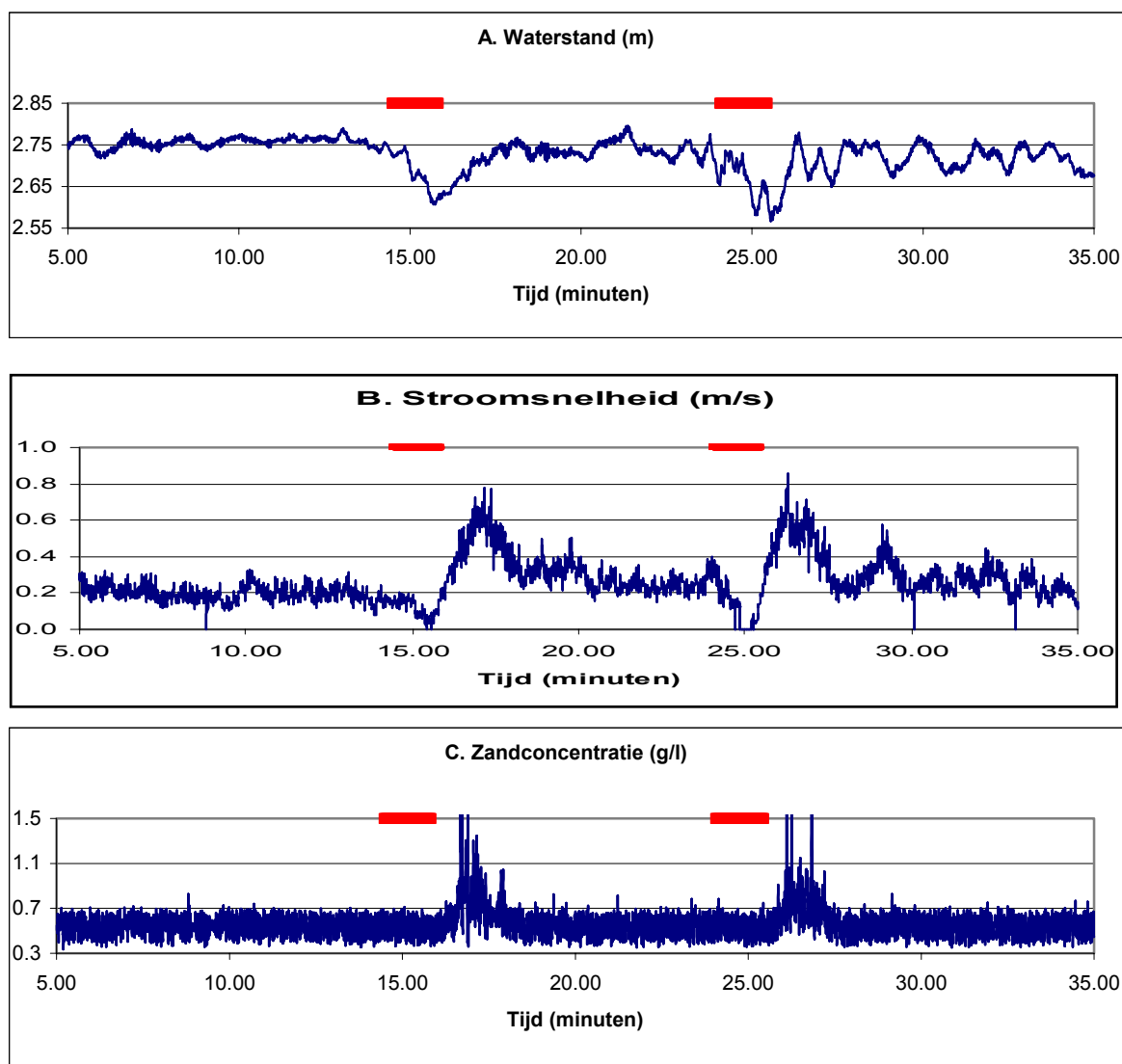
5.2.1. *Scheepsinvloeden langs het rechte traject bij Druten*

Figuur 5.2 laat zien dat passerende schepen in staat kunnen zijn om de stroomsnelheid en golfwerking in het kribvak dusdanig te verhogen dat de schuifspanning op de bodem het zand kan opwervelen en in de richting van het uitstroompunt kan transporteren. Hierbij nemen met name de zandconcentraties in het uitstroompunt net benedenstrooms van de krib fors toe. Waarschijnlijk zijn deze concentraties zo hoog doordat het geërodeerde zand van het strand zich, middels de neerstroming, concentreert in het nauwe uitstroompunt. Het zijn met name de passages van de grote, beladen schepen die dit effect laten zien. Als 2 vergelijkbare passages optreden, met voldoende tijd hiertussen om het water weer enigszins tot rust te laten komen, is het effect op de water- en sedimentbeweging in het uitstroompunt vergelijkbaar (figuur 5.8).

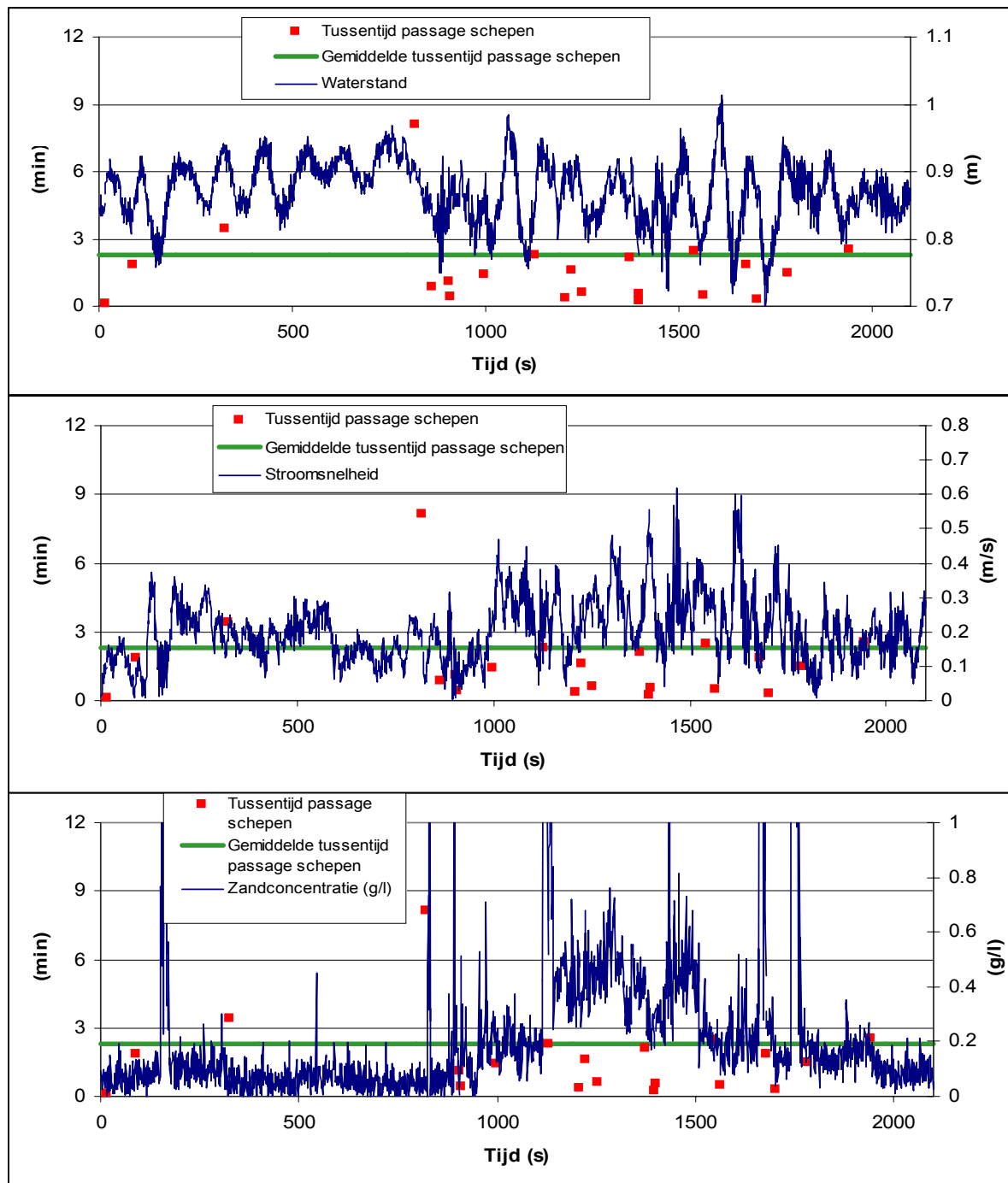
5.2.2. *Interferentie van scheepsinvloeden*

De situatie van figuur 5.8, waarbij er sprake is van 2 passages van grote schepen en verder nauwelijks enig ander scheepvaartverkeer, is uitzonderlijk. Veelal is het scheepvaartverkeer grillig en druk. Tijdens de 4 meetweken in 1996 passeerde gemiddeld iedere 2.3 minuten een schip de meetlokatie. Soms meerdere tegelijk, soms 5-10 minuten lang niets. Het gevolg hiervan is dat er vaak niet zozeer sprake is van het effect van afzonderlijke passages op de water- en sedimentbeweging in het kribvak, maar dat de effecten van verschillende passages elkaar beïnvloeden. Een extreem voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 5.9. In dit voorbeeld is de tijd tussen opeenvolgende passages in het tweede kwartier van de meetregistratie van 35 minuten aanmerkelijk korter dan het gemiddelde van 2.3 minuten. Dit leidt er toe dat de waterbeweging tussen de passages niet tot rust komt en dat er extra veel zand van het strand wordt geërodeerd. Er is dus sprake van een interferentie van de waterbeweging van verschillende passages met extra veel zanderosie (en transport) tot gevolg.

De situaties van de figuren 5.8 en 5.9 kunnen worden beschouwd als uitersten tussen de afzonderlijke invloed van schepen (figuur 5.8) en de sterke interferentie van passages (figuur 5.9). De werkelijkheid ligt hier over het algemeen tussen in. Wel kan worden opgemerkt dat de scheepvaart op de Waal dermate intensief is dat er vrijwel nooit sprake is van een situatie van rust voordat een schip passeert. Ook als er geen schepen passeren is het effect van (voorafgaande) scheepvaart altijd wel in het kribvak merkbaar.

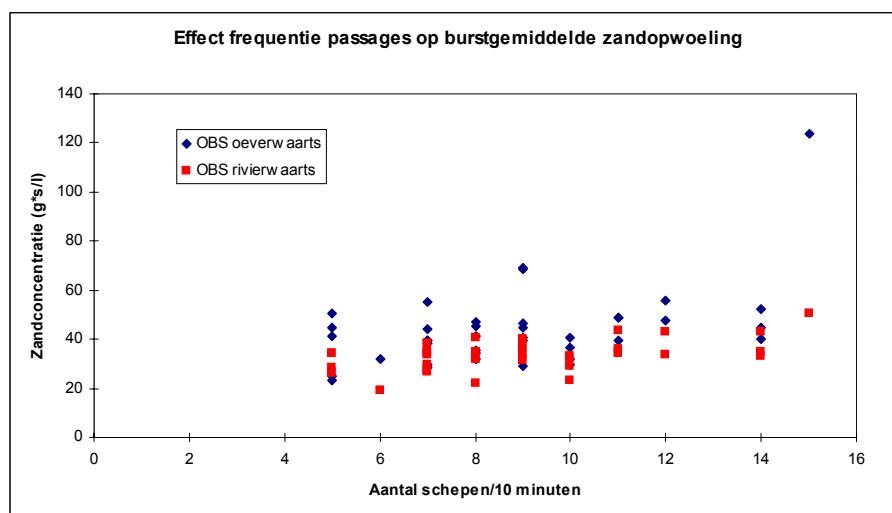


Figuur 5.8. Het effect van de passage van 2 beladen duwstellen (rode strepen) op de waterstand (A) en de stroomsnelheid (B) en concentratie zwevend zand (C) op 8.5 cm boven de bodem in het uitstroompunt van kribvak 2 bij Druten (zie figuur 4.1).



Figuur 5.9 De invloed van een korte tussentijd tussen opeenvolgende scheepspassages op de waterstand (boven) en de stroomsnelheid (midden) en de zandconcentratie (onder) op 10 cm boven de bodem van het kribvakstrand in vak 2 bij Druten.

Voor de realiteit van de situaties tussen die van de figuren 5.8 en 5.9 in is gekeken of er een relatie kan worden gelegd tussen de intensiteit van de scheepvaart en de gemiddelde zandconcentratie per meetreeks van 35 minuten. Figuur 5.10 laat zien dat er geen verband tussen passagefrequentie en gemiddelde zandconcentratie kan worden gelegd. Wel blijkt dat de meetreeks met opvallend hoge zandconcentratie overeenkomt met het moment met de hoogste scheepvaartintensiteit.



Figuur 5.10. De invloed van de passagefrequentie op de gemiddelde zandconcentratie van de meetreeksen van de kribvakken 2 en 3 bij Druten.

5.2.3. Scheepsinvloeden in bochten

De invloed van passerende scheepvaart op de water- en sedimentbeweging in kribvakken in bochten kan afwijken van de situatie langs een recht traject. In een buitenbocht doordat de stroomnaad van de rivierafvoer de scheepsinvloeden domineert. In de binnenbocht doordat de kribvakstranden tegen de scheepsinvloeden worden beschermd door de ondiepe pointbar.

Gekeken is hoe het beeld van figuur 5.2, waar het effect van een passerend groot en vol beladen schip op de water- en sedimentbeweging boven het strand en in het uitstroompunt zo duidelijk zichtbaar is, er uit ziet voor eenzelfde passage langs binnen- en buitenbocht. Figuren 5.11-5.12 en 5.13-5.14 tonen de situatie voor vak 1 (binnenbocht) en vak 2 (buitenbocht) bij St. Andries.

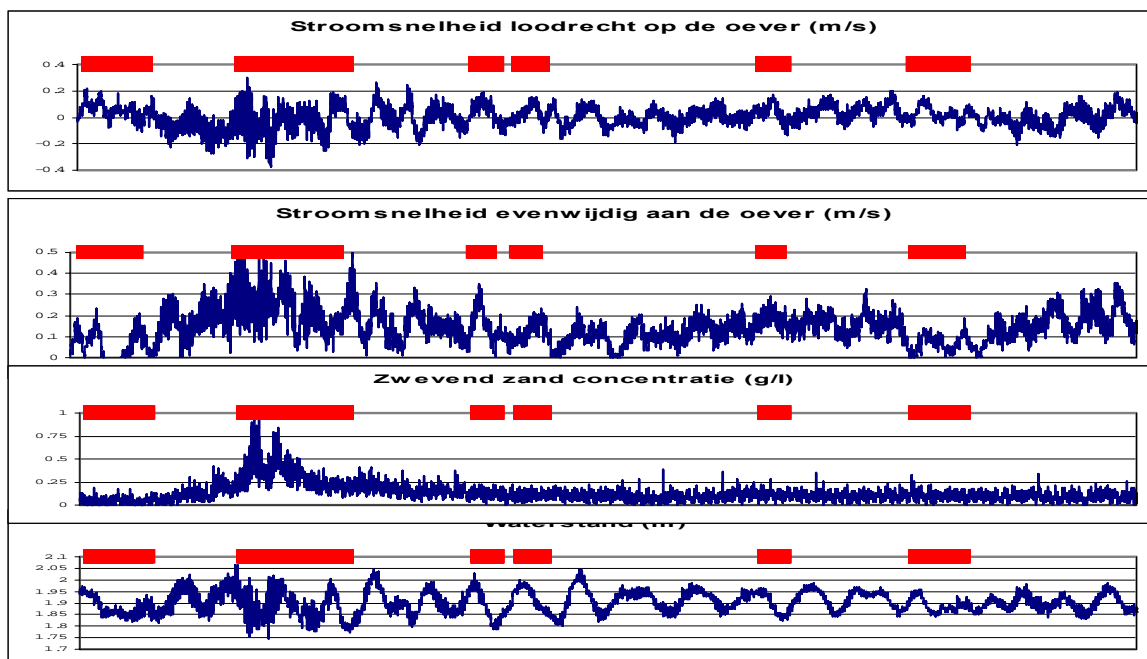
In de figuren 5.11-5.12 is de eerste rode streep een passage die vergelijkbaar is met de passage van 11.15 in figuur 5.2. Het gaat om een vol beladen 4-baks duwstiel in de opvaart. De andere passages in de figuur zijn aanmerkelijk kleinere schepen en/of niet beladen (tabel 5.1). Figuur 5.11 heeft betrekking op een meetregistratie met een van de kleine meetframes boven het strand. Figuur 5.12 is een registratie van dezelfde periode met het grote frame in het uitstroompunt van het kribvak. Uit deze figuren blijkt dat de eerste rode streep, die met name wordt bepaald door de passage van een beladen 4-baks duwstiel, niet leidt tot een verhoging van de concentratie zwevend zand. Pas de tweede rode streep, bestaande uit de passage van 5 schepen op min of meer hetzelfde moment (tabel 5.1), leidt tot een erosie van zand van het kribvakstrand. Gedurende de rest van de meetregistratie gebeurt er niet zoveel. Kennelijk is een combinatie van schepen, met het effect van interferentie (zie discussie bij figuur 5.9), nodig om het zand van het strand in de binnenbocht in beweging te krijgen. Figuur 5.12 laat zien dat er in het uitstroompunt geen sprake is van een verhoogde zandconcentratie tijdens en na de passage. Gedurende de hele meetregistratie is de zandconcentratie constant. Boven het kribvakstrand is de stroomsnelheid door het leeg- en weer vollopen laag ten opzichte van de situatie bij Druten, maar de stroomsnelheid evenwijdig aan de oever is relatief hoog, stroomopwaarts gericht. In het

uitstroompunt is de resultante stroomsnelheid relatief laag. Het beeld van de figuren sluit aan bij het beeld van de stroompatronen in figuur 5.1.A, waaruit blijkt dat de neerstroming in het vak in de binnenbocht relatief zwak is. Hoewel een combinatie van passerende schepen kan leiden tot een vergelijkbare erosie van zand van het strand als bij Druten is de neerstroming te zwak om dit zand via het uitstroompunt naar de rivier te voeren. Het netto resultaat zal een relatief geringe erosie zijn doordat het geërodeerde zand het kribvak niet kan verlaten en weer zal bezinken zodra de stroming in het vak weer tot rust komt.

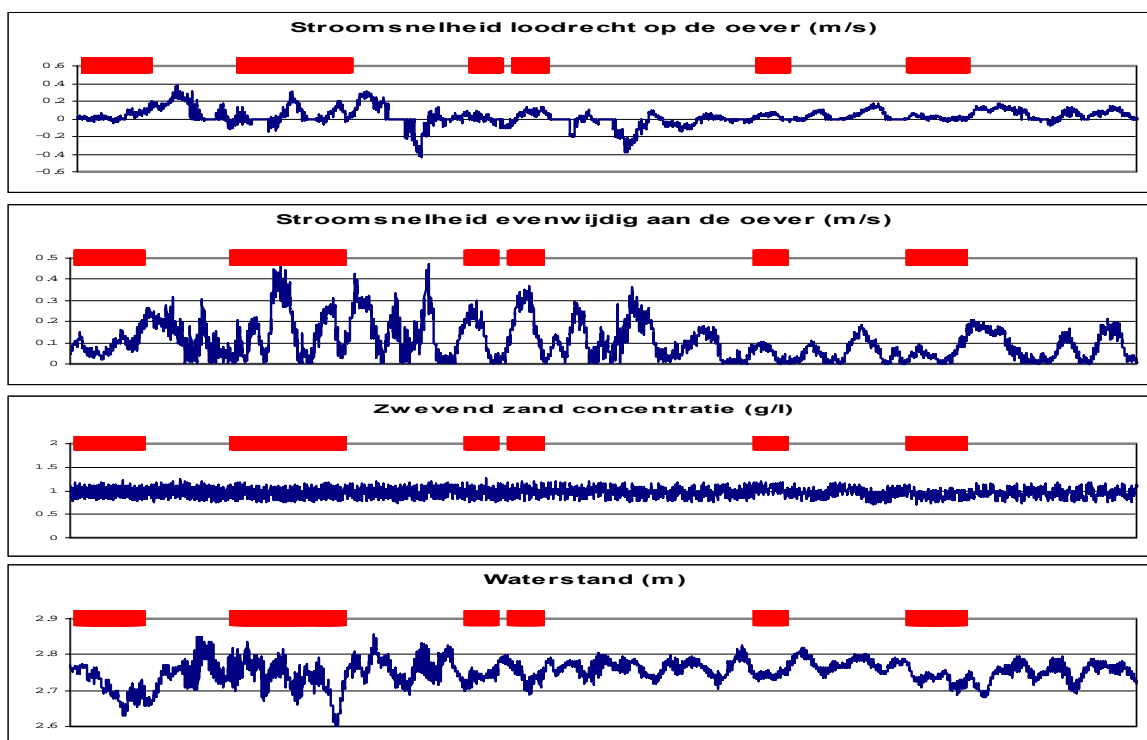
In figuren 5.13 en 5.14 is de op een na laatste passage (= rode streep, tabel 5.1) weer vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2. Figuur 5.13 heeft weer betrekking op een meetregistratie boven het strand. Figuur 5.14 is een registratie van dezelfde periode in het uitstroompunt van het kribvak. Uit deze figuren blijkt dat de bewuste passage noch boven het strand, noch in het uitstroompunt leidt tot een opvallende verhoging van de concentratie zand in suspensie. De stroomsnelheden die met de passage gepaard gaan, zijn wel vergelijkbaar met de situatie bij Druten. Maar dit leidt kennelijk niet tot een versterkte erosie en toename van het zandtransport. De zandconcentratie is, zowel boven het strand als in het uitstroompunt, gedurende de hele meetregistratie opvallend hoog, veel hoger dan bij Druten (figuur 5.2) en in de binnenbocht (figuren 5.11-5.12). Verder valt op dat de stroomsnelheid op de meetlocatie boven het strand gedurende de hele meetperiode vrij sterk is, en het vak in is gericht. Het beeld sluit aan bij het beeld van de stroompatronen in figuur 5.1.B, waaruit blijkt dat de neerstroming in het vak in de buitenbocht relatief sterk is, en boven het strand duidelijk het vak in is gericht. Kennelijk leidt passerende scheepvaart niet tot een dusdanige verhoging van de schuifspanning dat alsnog zand in het vak wordt geërodeerd en via de neer naar de rivier wordt gevoerd. Het zand dat in beweging is, zal sterk gerelateerd zijn aan het zandtransport in de buitenbocht. Verwacht mag worden dat de kribvakstranden in evenwicht zijn met de relatief sterke stroming in de buitenbocht. Dit zal een minder breed en dieper gelegen strand betekenen, met grover sediment, waar scheepspassages geen extra invloed betekenen.

Tabel 5.1. De karakteristieken van scheepspassages langs de kribvakken 1 (binnenbocht) en 2 (buitenbocht) bij St. Andries in de registraties van de figuren 5.11 t/m 5.14. De schepen in de onderscheiden witte en grijze blokken in de tabel vormen steeds samen één rode streep in de figuren.

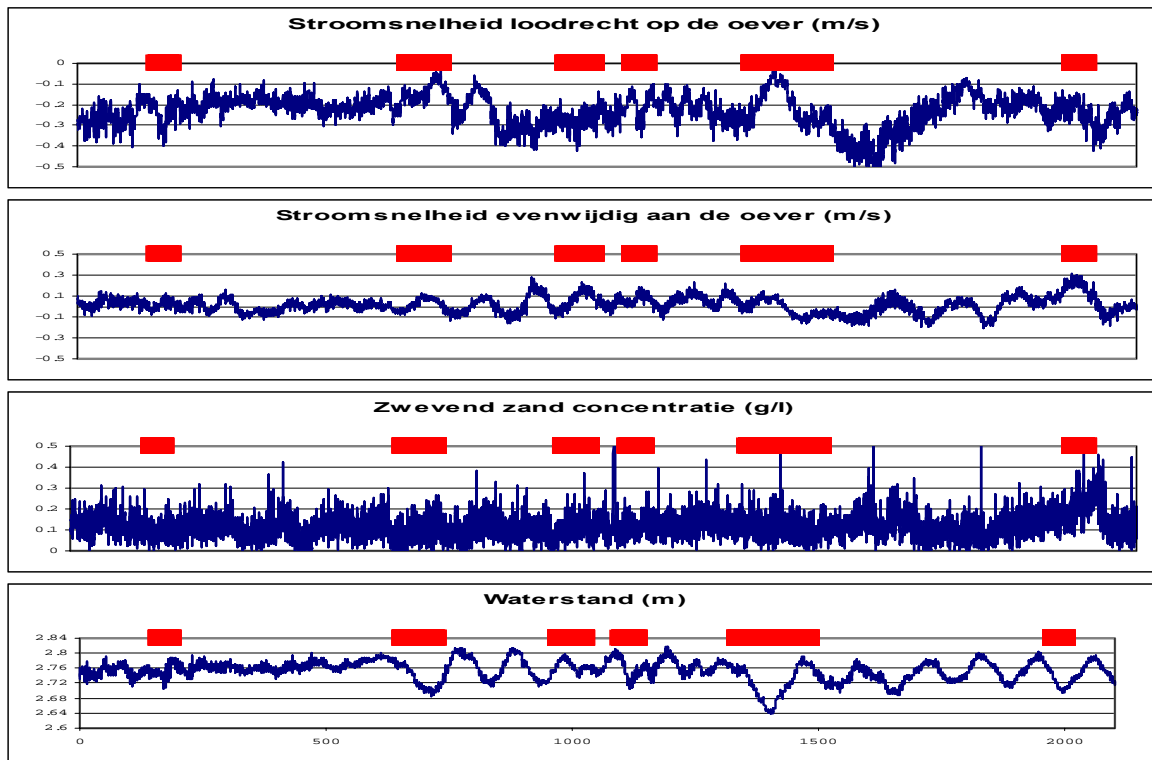
lengte m	breedte m	diepte m	op-/afvaart afstand t.o.v. kribkop	tijd passage boeg	tijd passage hek	passageduur s	snelheid m/s	
Binnenbocht, kribvak 1, 04-06-1997								
60	6.5	2	A	202	11:00:36	11:00:48	12	5.00
180	22.4	4	O	135	11:00:53	11:02:02	69	2.61
108.5	11.4	2	O	67	11:06:54	11:07:33	39	2.78
60	7	2.75	A	202	11:05:45	11:06:06	21	2.86
105	11	3	O	67	11:08:05	11:08:37	32	3.28
76	8.2	0.9	A	202	11:05:43	11:05:59	16	4.75
95	9.5	1	A	202	11:08:24	11:08:40	16	5.94
67	8.2	0.9	O	67	11:13:27	11:13:38	11	6.09
55	6.48	2.7	O	67	11:14:52	11:15:11	19	2.89
67	7.4	2.8	A	202	11:22:56	11:23:09	13	5.15
110	11.4	2	O	202	11:27:55	11:28:24	29	3.79
85	9.5	2.75	O	67	11:28:38	11:29:04	26	3.27
Buitenbocht, kribvak 2, 10-06-1997								
57	7.02	2.8	A	99	12:02:48	12:02:59	11	5.18
110	11.4	4	A	135	12:11:03	12:11:35	32	3.44
80	8.2	0.9	O	168	12:11:20	12:11:56	36	2.22
193	22.8	0.4	A	99	12:16:18	12:16:59	41	4.71
80	9.5	2.8	A	67	12:18:28	12:18:44	16	5.00
193	22.8	4	O	135	12:22:24	12:23:39	75	2.57
76	7.2	0.9	A	67	12:24:24	12:24:34	10	7.60
67	8.2	2.8	A	67	12:33:02	12:33:15	13	5.15



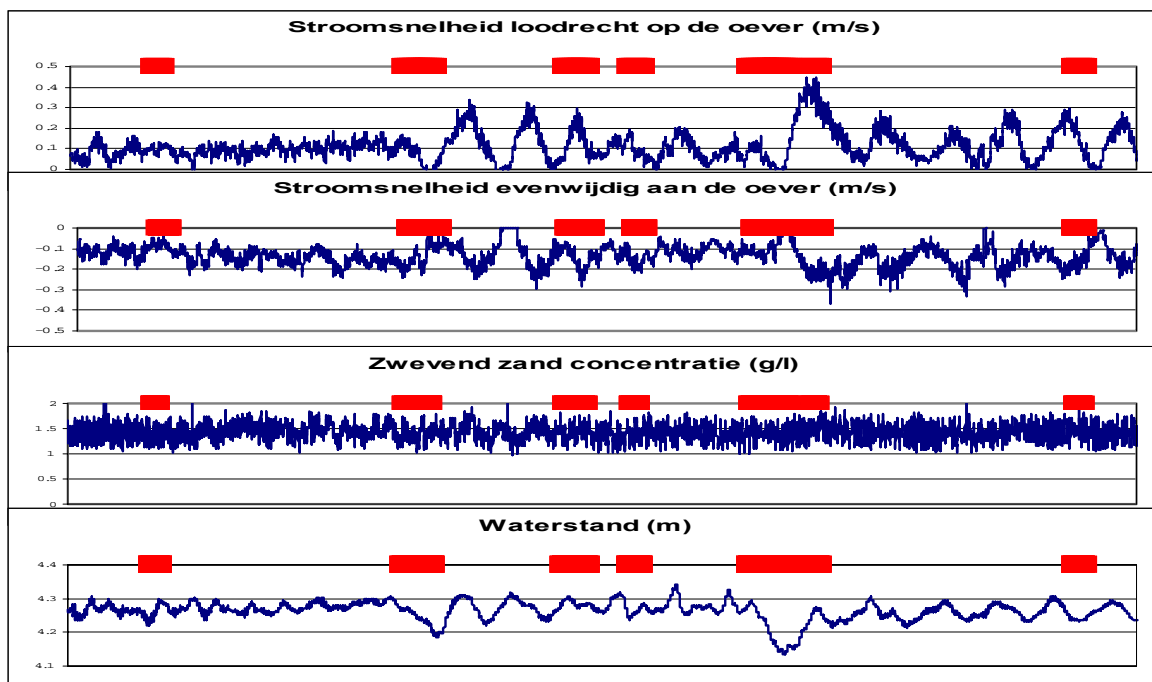
Figuur 5.11. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie **boven het kribvakstrand in de binnenbocht** bij St. Andries(vak 1). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De eerste 2 passages (= rode strepen) zijn vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2



Figuur 5.12. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie **in het uitstroompunt van het kribvak in de binnenbocht** bij St. Andries(vak 1). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De eerste 2 passages (= rode strepen) zijn vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2



Figuur 5.13. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie **boven het kribvakstrand in de buitenbocht** bij St. Andries(vak 2). Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De op een na laatste passage (= rode streep) is vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2



Figuur 5.14. Een meetserie van 35 minuten van de stroomsnelheid loodrecht op en evenwijdig aan de oever, de zandconcentratie en de waterstand voor een meetpositie **in het uitstroompunt van het kribvak in de buitenbocht** bij St. Andries(vak 2).. Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke een boot de meetlocatie passeerde. De op een na laatste passage (= rode streep) is vergelijkbaar met de passage van 11.15 in figuur 5.2

5.3. De toepassing van Neurale Netwerken

5.3.1. Stap 5. De voorspelbaarheid van Kunstmatige Neurale Netwerken

Om te kunnen beoordelen hoe goed een bepaalde variant, dus een opgesteld netwerk, de werkelijkheid benadert, is gebruik gemaakt van diverse statistische testcriteria (Intermezzo 5.1, Schulze (2000)). De waarden van deze testcriteria zijn berekend voor alle neurale netwerken en samengevat in onderstaande tabel 5.2. In deze tabel zijn de data voor het zandtransport per strekkende meter voor de meetlocaties boven het strand in het grote kribvak in één neurale netwerk bij elkaar genomen. Op grond van de criteria in intermezzo 5.1 kunnen de waarden voor de correlatie R en de fractie verklaarde variantie FVV worden geïnterpreteerd als kwaliteitslabel van de neurale netwerken voor het beschrijven van de relatie tussen passerende scheepvaart en de water- en sedimentbeweging in de kribvakken. Deze interpretatie is gegeven in tabel 5.3. Op grond van deze tabel wordt geconcludeerd dat de water- en sedimentbeweging in de onderzochte kribvakken bij Druten voor de scheepspassages in de afvaart slecht en voor de scheepspassages in de opvaart redelijk tot goed kan worden beschreven met de opgestelde neurale netwerken. Met name het zandtransport per strekkende meter laat zich bij scheepspassages in de opvaart over het algemeen goed met de netwerken modelleren. Voor de opvaart is de voorspelbaarheid over het algemeen beter voor het kribvak aan de zuidoever in vergelijking met het kribvak aan de noordoever. Er is geen opvallend verschil in voorspelbaarheid tussen het strand en het uitstroompunt voor beide kribvakken.

Tabel 5.2. De voorspelbaarheid van de water- en sedimentbeweging in kribvakken voor de ontwikkelde neurale netwerken, uitgedrukt in de correlatie (R) en de fractie verklaarde variantie (FVV), voor de 10 netwerken (5 posities en op-/afvaart) en de zandconcentratie (boven), zandtransporten (midden) en stroomsnelheid (onder).

Zandconcentratie

Criterium Vaarrichting →	R		FVV (%)	
	opwaarts	afwaarts	opwaarts	afwaarts
1 uitstroompunt klein kribvak zuidoever	0.90	0.63	78	40
2 strand klein kribvak zuidoever	0.85	0.56	68	32
3 uitstroompunt groot kribvak noordoever	0.74	0.72	50	49
4 strand groot kribvak noordoever	0.71	0.73	49	49
5 tweede uitstroompunt groot kribvak noordoever	0.69	0.71	47	49

Zandtransporten (per strekkende meter)

Criterium Vaarrichting →	R		FVV (%)	
	opwaarts	afwaarts	opwaarts	afwaarts
1 uitstroompunt klein kribvak zuidoever	0.75	0.90	50	50
2 strand klein kribvak zuidoever	0.77	0.60	50	30
3 uitstroompunt groot kribvak noordoever	0.68	0.71	44	49
4 strand en tweede uitstroompunt groot kribvak noordoever (totaal)	0.81	0.77	65	50

Stroomsnelheid

Criterium vaarrichting →	R		FVV (%)	
	opwaarts	afwaarts	opwaarts	afwaarts
1 uitstroompunt klein kribvak zuidoever	0.77	0.50	66	20
2 strand klein kribvak zuidoever	0.76	0.70	62	49
3 uitstroompunt groot kribvak noordoever	0.65	0.45	47	25
4 strand groot kribvak noordoever	0.72	0.82	54	74
5 tweede uitstroompunt groot kribvak noordoever	0.87	0.74	78	64

Tabel 5.3. Kwaliteitslabels voor de voorspelbaarheid van de water- en sedimentbeweging in kribvakken voor de ontwikkelde neurale netwerken (voor onderbouwing labels: zie intermezzo 5.1).

	Voorspelling concentratie		Voorspelling stroomsnelheid		Voorspelling Zandflux	
	Opvaart	Afvaart	Opvaart	Afvaart	Opvaart	Afvaart
uitstroompunt klein kribvak zuidoever	Zeer goed	Slecht	Goed	Slecht	Redelijk	Redelijk
strand klein kribvak zuidoever	Goed	Slecht	Goed	Redelijk	Redelijk	Slecht
uitstroompunt groot kribvak noordoever	Redelijk	Redelijk	Redelijk	Slecht	Redelijk	Redelijk
strand groot kribvak noordoever	Redelijk	Redelijk	Redelijk	Goed	Goed	Redelijk
tweede uitstroompunt groot kribvak noordoever	Redelijk	Redelijk	Zeer goed	Goed	Goed	Redelijk

Intermezzo 5.1. Een aantal testcriteria voor de kwaliteit van het model

Om tot een optimaal model te kunnen komen is het aantal neuronen, de soort transferfunctie, de grootte van de rekenstap en de optimalisatiemethode iteratief bepaald. Het iteratieve karakter bestaat uit het doorrekenen van diverse varianten die zich onderscheiden in aantal neuronen, soort transferfunctie (sigmoïde, sinus, tangens hyperbolicus of lineaire functie), grootte van de rekenstap en soort optimalisatiemethode. Om te kunnen beoordelen hoe goed een bepaalde variant de werkelijkheid benadert, is gebruik gemaakt van diverse statistische testcriteria. Het testen is voornamelijk gericht op de vergelijking tussen gemeten output en de door het netwerk berekende data. Ruwweg zijn drie testcriteria gehanteerd om de modellen te kunnen beoordelen.

1. *Fractie Verklaarde Variantie (Adjusted R^2 ofwel FVV):* De FVV geeft de fractie weer van de totale waargenomen variantie c.q. variatie die door het KNN kan worden verklaard. Als FVV = 100% wil dat zeggen dat het KNN in staat is de volledige variantie ofwel alle variatie in de metingen te kunnen verklaren ofwel te kunnen reproduceren. In onderhavige studie kunnen globaal de volgende klassen worden gedefinieerd: [0%-40%]: niet of nauwelijks te verklaren, [40%-60%]: redelijk te verklaren, [60%-70%]: goed te verklaren en [70%-100%]: zeer goed te verklaren.
2. *Correlatie (R):* De R is een maat voor de lineaire samenhang tussen de berekende uitkomsten met het KNN en de gemeten waarden. Als $R = 1$ dan liggen de berekende en de gemeten waarden op een rechte lijn.
3. *Normaalwaarschijnlijkheidsplot:* Dit is een grafische manier om te controleren of verschillen tussen waargenomen en berekende waarden ofwel residuen bij benadering normaal zijn verdeeld. Eventuele systematische afwijkingen in het model zoals de invloed van ontbrekende- en/of onbekende-verklarende variabelen kunnen zo globaal worden opgespoord en de orde van grootte er van kan worden ingeschat.

Als criterium voor de voorspel/nauwkeurigheid wordt het volgende gehanteerd:

- Zeer goed:** De uitvoer variabele kan zeer goed worden voorspeld indien de FVV voor de validatieset ligt tussen 70% en 100% en de correlatie, R, ligt tussen 0.85 en 1;
- Goed:** De uitvoer variabele kan goed worden voorspeld indien de FVV voor de validatieset ligt tussen 60% en 70% en de correlatie, R, ligt tussen 0.75 en 0.85;
- Redelijk:** De uitvoer variabele kan redelijk worden voorspeld indien de FVV voor de validatieset ligt tussen 40% en 60% en de correlatie, R, ligt tussen 0.65 en 0.75;
- Slecht:** De uitvoer variabele kan niet of nauwelijks worden voorspeld indien de FVV voor de validatieset ligt tussen 0% en 40% en de correlatie ligt tussen 0 en 0.65.

5.3.2. Stap 6. Gevoeligheidsanalyse

Bij de gevoeligheidsanalyse met de opgestelde neurale netwerken is onderzocht hoe gevoelig de netwerken zijn voor variaties in de belangrijkste variabelen: onderwatervolume, passageafstand en vaarsnelheid. Dit is gedaan afzonderlijk voor de op- en afvaart, zodat ook de vaarrichting in de gevoeligheidsanalyse is meegenomen. Een uitgebreide presentatie van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse wordt gegeven in Schulze (2000). Een samenvatting van de belangrijkste resultaten is weergegeven in figuur 5.15. In deze figuur is voor één van de gemodelleerde uitvoervariabelen, het zandtransport per strekkende meter, de variatie weergegeven die de netwerken berekenen als het onderwatervolume en de passageafstand worden gevarieerd binnen de bandbreedte waarvoor de netwerken zijn opgesteld (en dus waarvoor meetgegevens beschikbaar zijn). De resultaten voor de invoervariabele vaarsnelheid worden niet getoond omdat het effect van de gemeten variatie in deze variabele op de water- en sedimentbeweging in de kribvakken verwaarloosbaar is (Schulze, 2000).

Middels de 8 getoonde situaties kan de waargenomen variatie goed worden beschreven. De bovenste 4 situaties hebben betrekking op het vak langs de zuidoever, de onderste 4 situaties gelden voor het vak langs de noordoever. De situaties aan de linkerzijde gelden voor de meetposities boven het kribvakstrand, de situaties aan de rechterzijde voor het uitstroompunt. Daarnaast worden op- en afvaart van elkaar onderscheiden. Van de meetposities boven het kribvakstrand is steeds slechts één van de 4 meetposities getoond. Maar het beeld van de 4 meetposities boven het strand is onderling steeds goed vergelijkbaar.

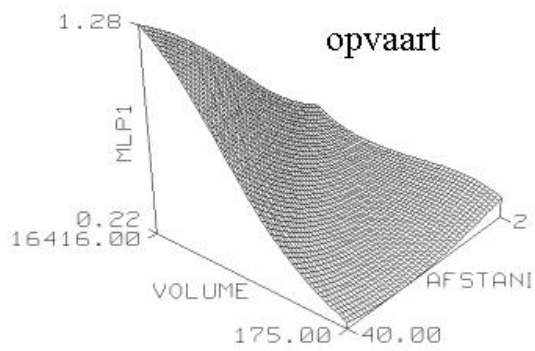
Duidelijk is dat de grootste variatie optreedt in het uitstroompunt, en dan met name in het vak aan de zuidoever waar de opvaart, die over het algemeen de zuidoever volgt, relatief dicht langs het kribvak komt. De afvaart vaart veel verder weg, langs de noordoever, en heeft dan ook nauwelijks enig effect op het zandtransport in het vak aan de zuidoever. Voor het uitstroompunt aan de noordoever geldt dat op- en afvaart een vergelijkbaar en nog vrij sterk effect hebben op het zandtransport. De opvaart doordat het gaat om grote onderwatervolumes en dus grote waterverplaatsingen. De afvaart doordat deze dicht langs de noordoever vaart. Boven het strand heeft de opvaart een groter effect op het zandtransport dan de afvaart. Dit geldt in vergelijkbare mate voor het kribvak aan noord- en zuidoever. In zijn algemeenheid blijkt de variatie in het zandtransport sterker te variëren met de variatie in het onderwatervolume (binnen het meetbereik) dan met de variatie in de passageafstand.

Kort samengevat tonen de resultaten dat

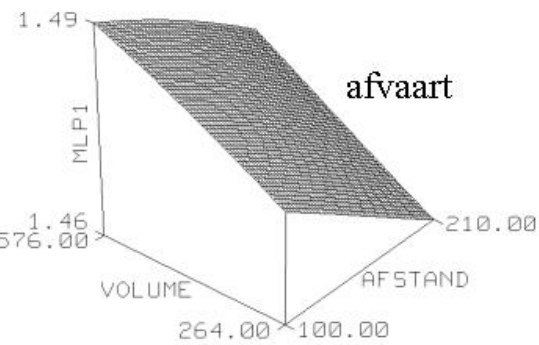
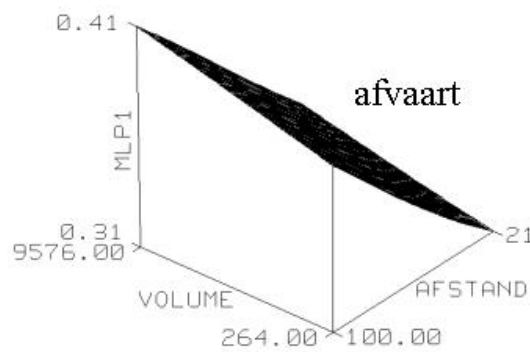
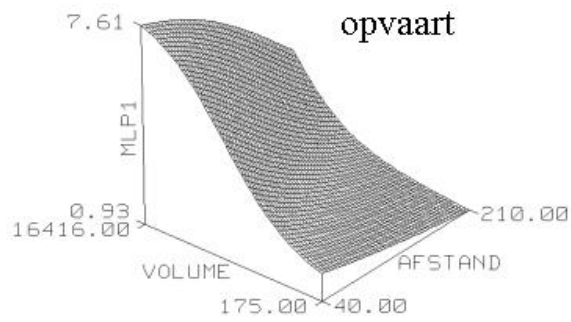
- (1) De opvaart leidt tot erosie en het transport van zand boven de stranden van de kribvakken aan noord- en zuidoever, en wel in vergelijkbare mate per strekkende meter.
- (2) De opvaart leidt tot relatief veel zandtransport per strekkende meter in de uitstroompunten van zuid- én noordoever. De waterverplaatsing van de beladen opvaart is kennelijk dermate groot dat deze langs beide oevers merkbaar is, zij het sterker langs de zuidoever.
- (3) De afvaart nauwelijks leidt tot erosie en transport van zand boven de stranden van de kribvakken aan noord- en zuidoever.

-
- (4) De afvaart leidt tot zandtransport in het uitstroompunt langs de noordoever, maar nauwelijks merkbaar is in het uitstroompunt langs de zuidoever. Kennelijk is de waterverplaatsing van de onbeladen vaart te klein om ook in de verder weggelegen kribvakken langs de zuidoever nog veel invloed op de waterbeweging te hebben. Verder is het opvallend om te zien dat de kortere passageafstand van de afvaart langs de noordoever een vergelijkbaar effect heeft op het zandtransport in het uitstroompunt als de grotere waterverplaatsing van de opvaart.
 - (5) Het onderwatervolume de belangrijkste variabele is die de grootte van het zandtransport in kribvakken tijdens scheepspassages bepaalt.

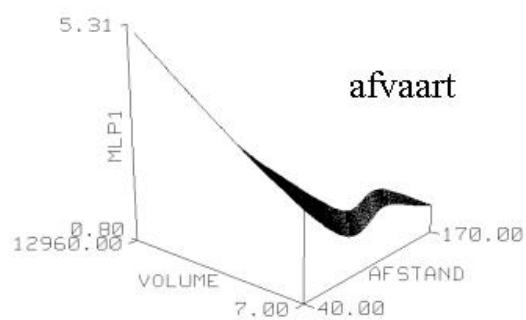
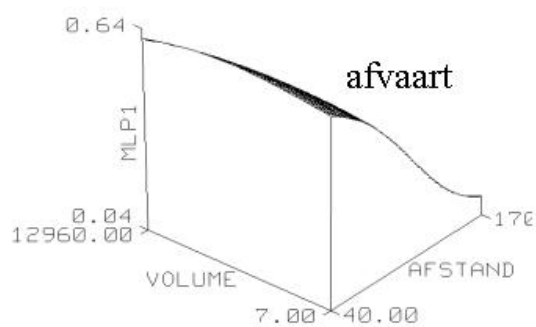
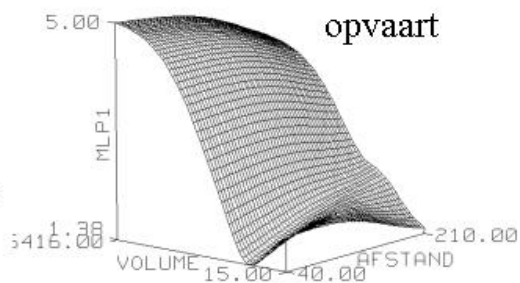
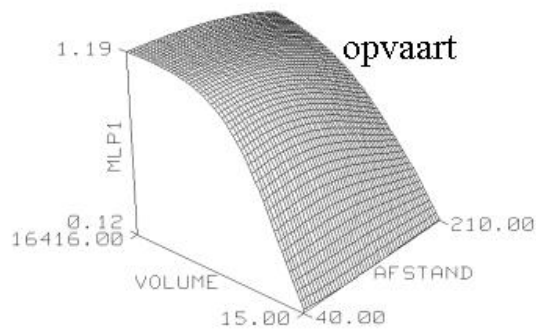
Strand zuidoever



Uitstroompunt zuidoever



Strand noordoever



Figuur 5.15. De variatie van het zandtransport per strekkende meter met het onderwatervolume en de passageafstand van schepen langs de zuid- en noordoever voor de meetposities boven het strand (links) en in het uitstroompunt (rechts) tijdens de op- respectievelijk afvaart.

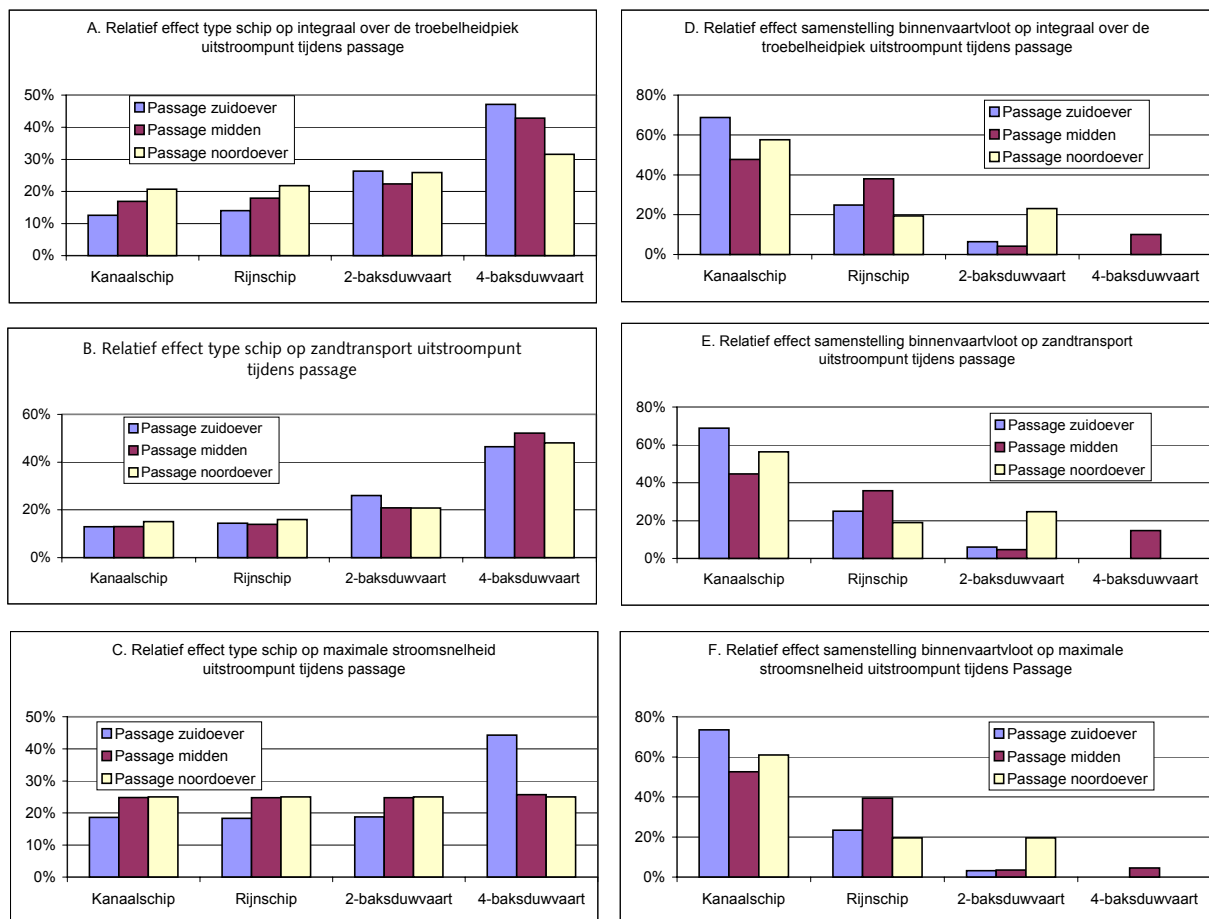
5.3.3. *Stap 7. Afleiding vereenvoudigde procesvergelijkingen*

Op basis van de gevoeligheidsanalyse in voorgaande paragraaf, uitgevoerd met vereenvoudigde formuleringen die weer zijn afgeleid voor de meest sturende invoervariabelen, kunnen vereenvoudigde procesvergelijkingen worden uitgeschreven. Het betreft dus niet de voorspelmodellen, maar de vereenvoudigde modellen die zijn gebruikt voor de gevoeligheidsanalyses. Het uitschrijven van de matrixvergelijkingen van de neurale netwerken geschiedt in een viertal stappen (Schulze, 2000). In bijlage 1 zijn deze stappen gegeven voor een voorbeeld, namelijk het neurale netwerk van het uitstroompunt in kribvak 1 bij Druten (zuidoever) voor opwaarts varende schepen. De op deze wijze afgeleide vergelijkingen voor de scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in de kribvakken bij Druten boven het strand en in het uitstroompunt zijn gerapporteerd door Schulze (2000).

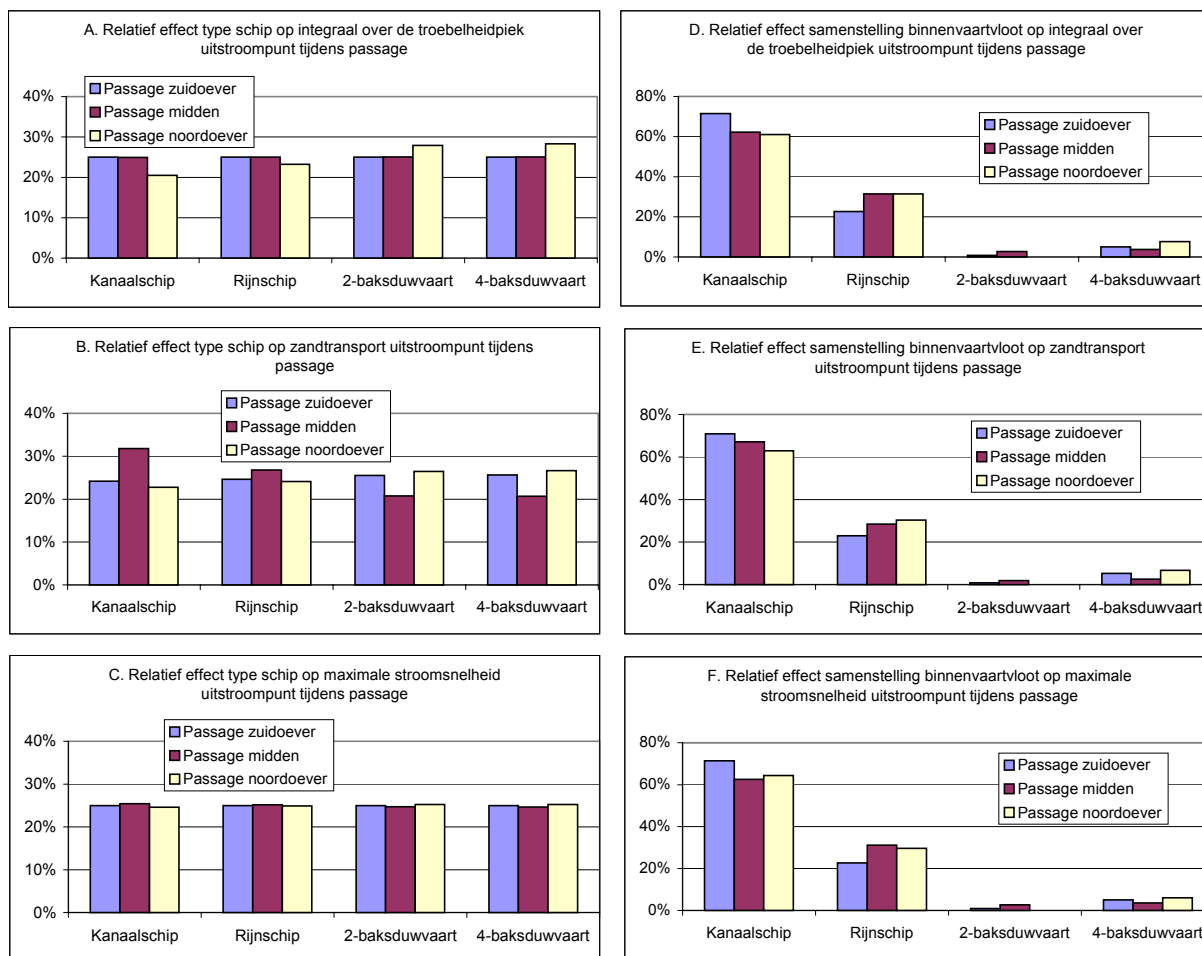
5.4. De invloed van scheepvaart op de sedimenthuishouding van kribvakken

5.4.1. Het effect per schip versus de frequentie van passages

Uit de gevoeligheidsanalyse (figuur 5.15, paragraaf 5.3.2) blijkt dat met name het onderwatervolume en de passage-afstand uit de oever bepalen in welke mate een passerend schip de water- en sedimentbeweging in een kribvak beïnvloedt. Op basis van de neurale netwerkmodellen kunnen deze effecten nu worden berekend voor de verschillende scheepstypen groter dan de ondergrens waarvoor een effect verwacht mag worden. Deze effecten per scheepstypen kunnen vervolgens gecombineerd worden met de frequentieverdeling van waargenomen scheepstypen tijdens de onderzoeksperiode zodat het totaal-effect van de verschillende scheepstypen gedurende een bepaalde periode duidelijk wordt. Deze berekeningen zijn gemaakt voor de situatie van opvaart langs het kleine kribvak aan de zuidoever bij Druten (figuur 5.16), en afvaart langs de het grote kribvak aan de noordoever (figuur 5.17).



Figuur 5.16. De invloed van 4 verschillende typen schepen in de opvaart op de zandopwoeling (A), het zandtransport per strekkende meter (B) en de maximale stroomsnelheid (C) in het uitstroompunt van kribvak 2 aan de zuidoever bij Druten, volgens het opgestelde neurale netwerk en de gemiddelde waarden voor de geregistreerde scheepskarakteristieken. In de rechter grafieken D, E en F zijn de waarden per schip uit de linkergrafieken vermenigvuldigd met het relatieve aandeel van het bewuste type schip in het totaal aan waargenomen scheepspassages van de 4 scheepstypen.



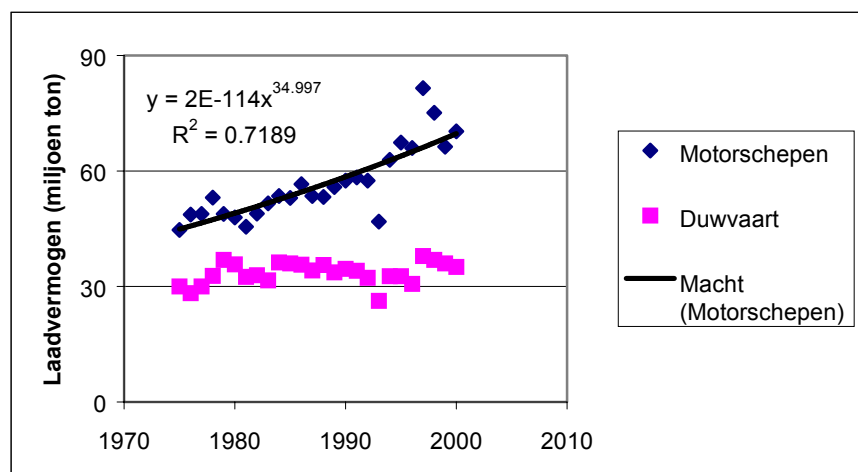
Figuur 5.17. De invloed van 4 verschillende typen schepen in de afvaart op de zandopwoeling (A), het zandtransport per strekkende meter (B) en de maximale stroomsnelheid (C) in het uitstroompunt van kribvak 3 aan de noordoever bij Druten, volgens het opgestelde neurale netwerk en de gemiddelde waarden voor de geregistreerde scheepskarakteristieken. In de rechter grafieken D, E en F zijn de waarden per schip uit de linkergrafieken vermenigvuldigd met het relatieve aandeel van het bewuste type schip in het totaal aan waargenomen scheepspassages van de 4 scheepstypen.

De figuren A, B en C tonen de invloed van de scheepstypen op de water- en sedimentbeweging in het uitstroompunt van het kribvak. De figuren D, E en F tonen hetzelfde effect als het effect per schip wordt vermenigvuldigd met het relatieve vóórkomen van dit scheepstype in de frequentieverdeling van de passages van de onderzoeksperiode in de zomer van 1996. Duidelijk is dat de invloed van een bepaald scheepstype met name wordt bepaald door de frequentie van vóórkomen van dit scheepstype in de tijdreeks van scheepspassages, en niet door het individuele grotere effect van een bepaald type schip. Het relatief grote effect van een 4-bakduwstel in de opvaart ten opzichte van een kanaalschip wordt volledig teniet gedaan door het grote aantal kanaalschepen dat het kribvak passeert.

5.4.2. Effect van scheepvaart op jaarbasis: noord- versus zuidoever

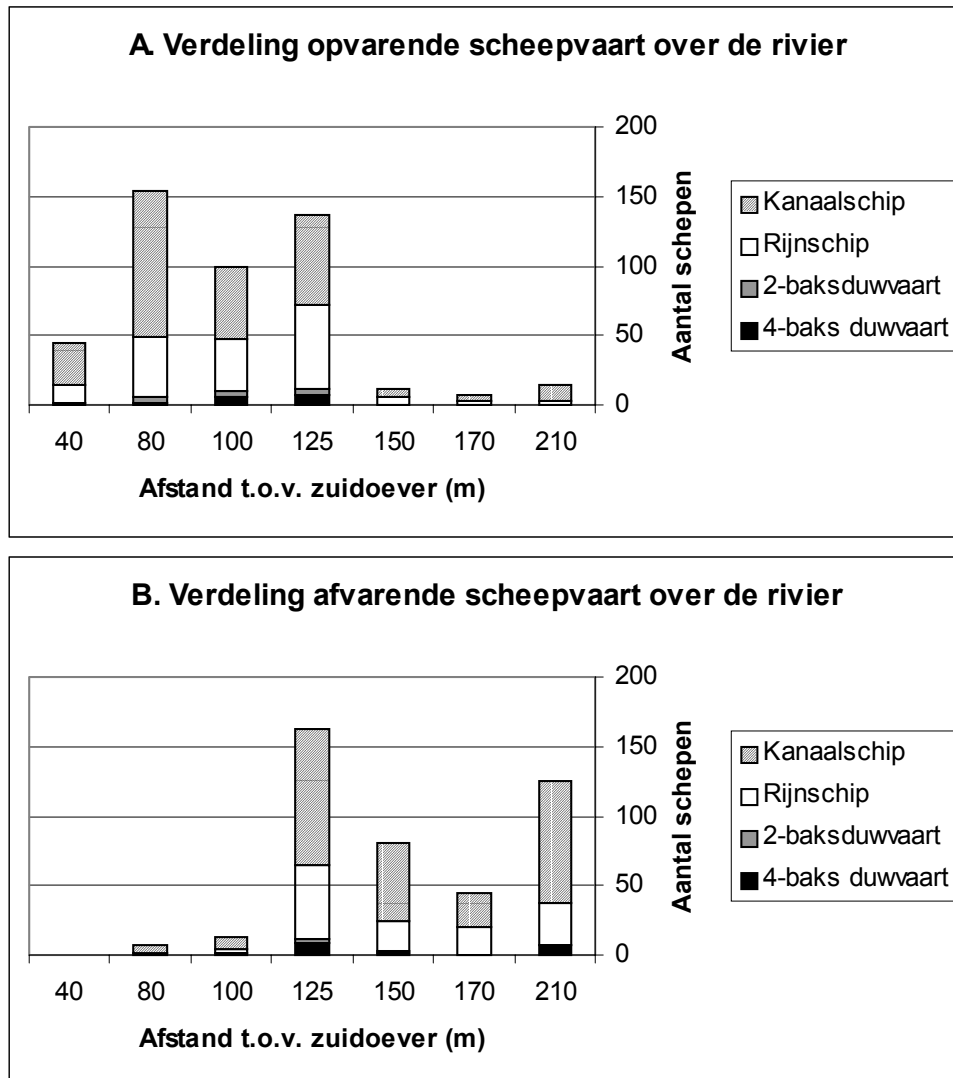
Bij het opschalen van het effect van scheepspassages naar de situatie op jaarbasis moeten de uitkomsten van de neurale netwerkmodellen worden gecombineerd met statistieken over aantallen passages van op- en afvaart, met een onderscheid naar scheepstypen, en informatie over de verdeling van de op- en afvaart dwars over de rivier. Deze exercitie is uitgevoerd voor de uitvoerparameter zandflux (= zandtransport per strekkende meter) in het uitstroompunt van het kleine kribvak 2 aan de zuidoever en de uitstroompunten van de grote en kleine neer in het grote kribvak 3 aan de noordoever bij Druten. Het resultaat van deze exercitie is het zandtransport per strekkende meter op jaarbasis. Vermenigvuldiging van dit getal met de zandtransporterende breedte van het uitstroompunt levert de zanduitwisseling tussen hoofdgeul en kribvak op. Dit kan worden gedaan voor beide oevers, met de mogelijkheid tot opschaling van deze zandtransporten naar (grote delen van) de Waal dankzij de dataset van kribvakeigenschappen van Schans (1998). Bovendien kunnen de relatieve bijdragen van verschillende scheepstypen aan dit zandtransport worden berekend.

De statistieken over scheepspassages zijn ontleend aan de jaarrapportages van het CBS. Gebruikt zijn de getallen voor 1970 en 2001. De keuze voor deze jaartallen schept tevens inzicht in de verandering van de samenstelling van de binnenvaart in de afgelopen 30 jaar, met een berekening van het veranderd effect op de water- en sedimentbeweging langs de oever. Bovendien is een verwachting gemaakt van de scheepvaart situatie in 2010 door, voor de opgaande scheepvaart bij Lobith, de ontwikkeling in de omvang van het transport naar laadvermogen in de afgelopen 25 jaar te extrapoleren (figuur 5.18). Deze extrapolatie betekent een toename van het aantal passages van Rijn- en kanaalschepen in de opvaart met 17.6% in 2010 ten opzichte van 2000 en het constant blijven van het aantal opgaande passages van de duwvaart. Deze verandering voor de opvaart is bij de berekeningen voor 2010 ook gehanteerd voor de afvaart. Alle statistieken hebben betrekking op Lobith. Aangenomen is dat deze data met name betrekking hebben op de scheepvaartroute van de Waal naar Duisburg en daarmee ook van toepassing zijn op de Waal.



Figuur 5.18. De verandering in de omvang van het transport over de Rijn bij Lobith in stroomopwaartse richting gedurende de periode 1975-2000, met een onderscheid in motorschepen (kanaal- en Rijnschepen) en duwvaart).

De informatie over de verdeling van de scheepvaart dwars over de rivier is ontleend aan de totale set van ruim 1100 passages uit het onderzoek bij Druten in 1996. Uit deze dataset zijn de schepen > 60 meter geselecteerd en is, per scheepstype, de gemiddelde verdeling dwars over de rivier (de passage-afstand uit de oever) bepaald (figuur 5.19). Dit is gedaan voor de op- en afvaart afzonderlijk.



Figuur 5.19. De verdeling van de scheepvaart over de dwarsdoorsnede van de Waal bij Druten volgens de waarnemingen van de meetcampagne van 1996, met een onderscheid naar opvaart (A) en afvaart (B).

De resultaten van deze combinatie van gegevens levert het beeld van figuur 5.20. Hierin staat het zandverlies uit het kribvak weergegeven in 1000 kg per strekkende meter per jaar voor 6 situaties, namelijk op- en afvaart langs beide oevers én de uitstroompunten van de grote en kleine neer in het grote kribvak 3 aan de noordoever. Het totale effect voor een oever is de som van op- en afvaart én de grote en kleine neer. Er is een onderscheid gemaakt tussen het effect van duwvaart (2-, 3- en 4-bakseenheden) en motorschepen (Rijn- en kanaalschepen). De figuur laat zien dat voor alle 4 situaties het effect van duwvaart in het niet valt bij het effect van de motorschepen. Dit is de observatie die al in

de vorige paragraaf werd gedaan. In 1970 was er nog geen duwvaart. De figuur laat een toename zien van het zandverlies door passerende scheepvaart. Volgens de berekeningen zal het effect van scheepvaart op het zandverlies uit de 2 onderzochte kribvakken in 2010 ten opzichte van 1970 zijn verdubbeld. Opvallend is dat de hoeveelheid zandverlies in beide kribvakken ongeveer even groot is voor vergelijkbare situaties (op- resp. afvaart). Dit betekent echter niet dat er geen verschil bestaat tussen noord- en zuidoever. Beide vakken verschillen aanmerkelijk in grootte. Het zandverlies in het uitstroompunt / de uitstroompunten is de resultante van de scheepsgeïnduceerde sedimentbeweging in het bereik van de ne(e)r(en). Dit bereik zal in het grote vak aan de noordoever groter zijn dan in het kleine vak aan de zuidoever. Als het zandverlies in het uitstroompunt wordt vertaald naar een erosie van het strand per oppervlakte-eenheid zal deze erosie aan de noordoever kleiner zijn dan aan de zuidoever. Deze vertaling is voor beide kribvakken uitgevoerd onder aanname dat

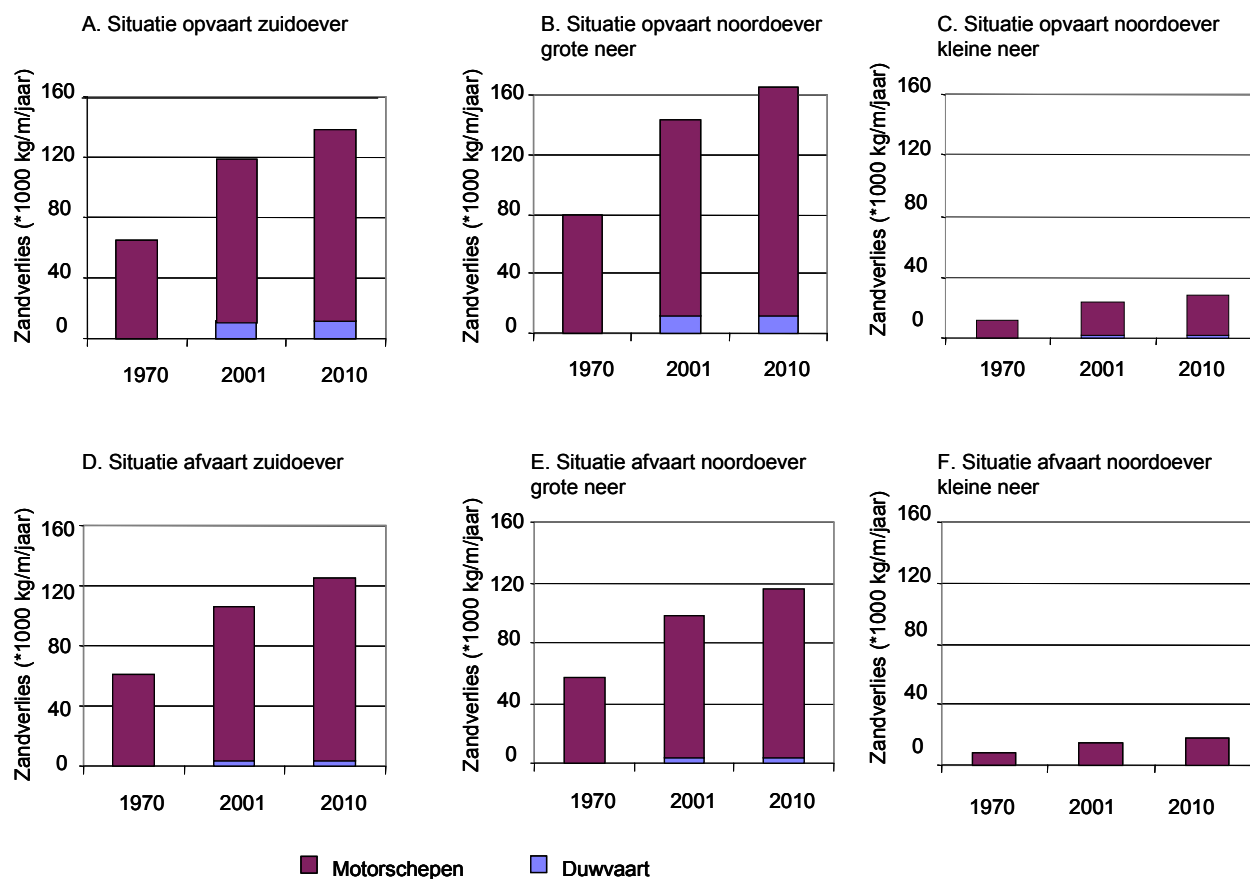
- (1) de zandfluxen voor de grote en kleine neer in het grote vak bij elkaar mogen worden opgeteld en worden vertaald naar een gezamenlijk effect op de gemiddelde bodemligging van het strand in het vak,
- (2) de zandtransporterende breedte in het uitstroompunt van een kribvak 5 meter bedraagt,
- (3) de oppervlakte kribvakstrand voor beide vakken kan worden ontleend aan het gemiddelde volgens de luchtfoto's van de 4 jaren die zijn bestudeerd door Schans (1998), en
- (4) de droge dichtheid van het strandzand 1500 kg m^{-3} bedraagt.

De resultaten staan in figuur 5.21. Nu blijkt duidelijk dat de hoeveelheid zandverlies per eenheid van oppervlakte in het vak aan de zuidoever groter is dan in het vak aan de noordoever. De grootte van de bodemverlaging van het strand op jaarbasis is de som van het erosieve effect van de op- en afvaart en bedraagt volgens deze berekeningen een halve tot maximaal twee decimeter. Dit is een realistische orde van grootte.

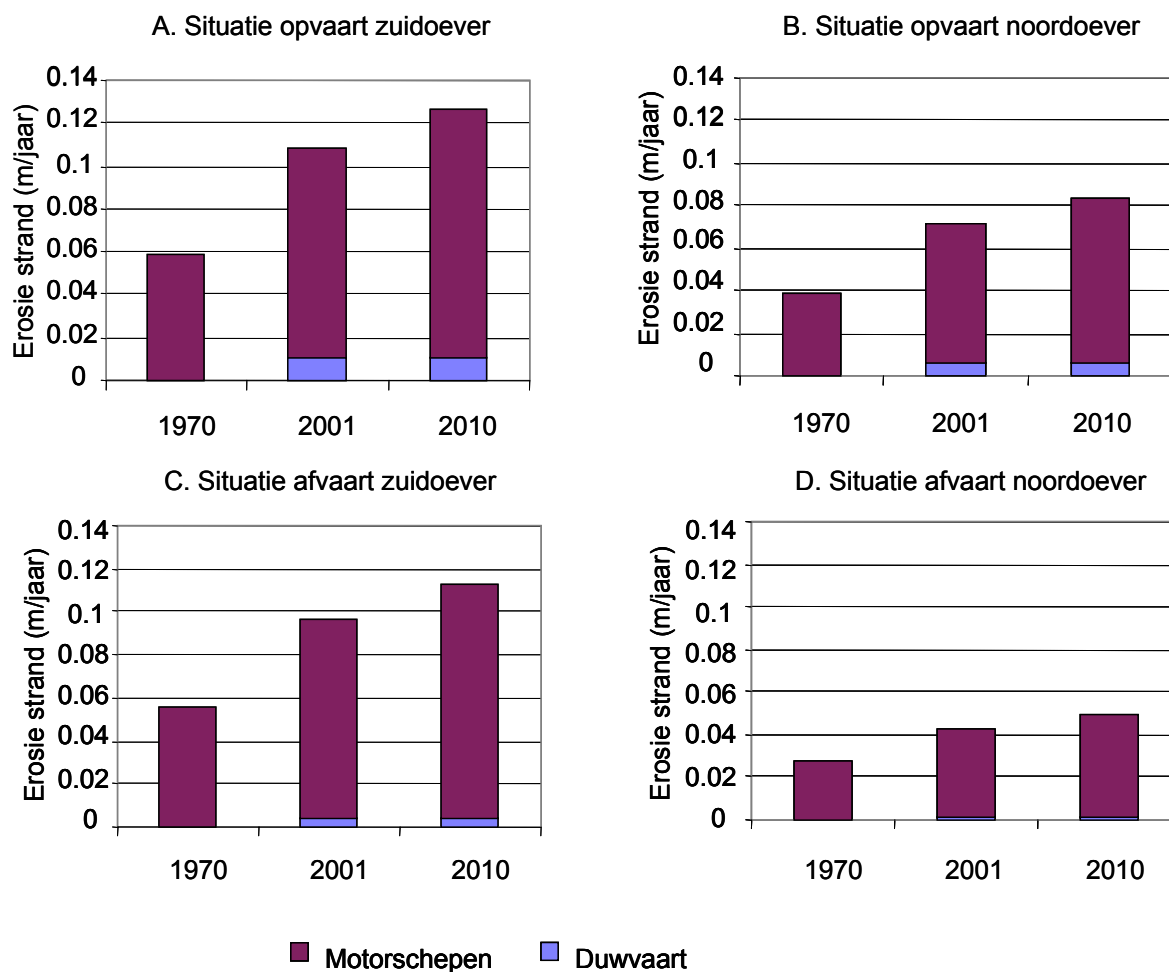
5.4.3. *Vertaling effecten naar de hele Waal op jaarbasis*

Met de getallen van stranderosie per m^2 en de dataset van Schans (1998) met de oppervlaktes van alle kribvakstranden langs de Waal op 4 momenten gedurende de afgelopen 20 jaar, kan een berekening worden gemaakt van het zandverlies uit kribvakken door scheepvaart voor de rivier als geheel. Ook voor de uitvoering van deze berekening gelden aannames:

- (1) het zandverlies door scheepspassages uit kribvakken in binnen- en buitenbocht is verwaarloosbaar ten opzichte van de rechte trajecten (zie paragraaf 5.2.3),
- (2) het zandverlies per m^2 dat is berekend voor één kribvak aan noord- respectievelijk zuidoever is representatief voor alle kribvakken in de rechte riviertrajecten langs noord- respectievelijk zuidoever,
- (3) het gemiddelde van de strandoppervlaktes van de 4 opnames uit de studie van Schans (1998) is een goede maat voor het oppervlak strand waarop de scheepsgeïnduceerde waterbeweging zijn invloed doet gelden.



Figuur 5.20. Het rivierwaarts gericht zandtransport (in 1000 kg/m/jaar) in de uitstroompunten van het kleine kribvak aan de zuidoever en het grote kribvak aan de noordoever (grote én kleine neer) bij Druten, berekend voor de situatie van op- en afvaart, en de jaren 1970, 2001 en 2010.

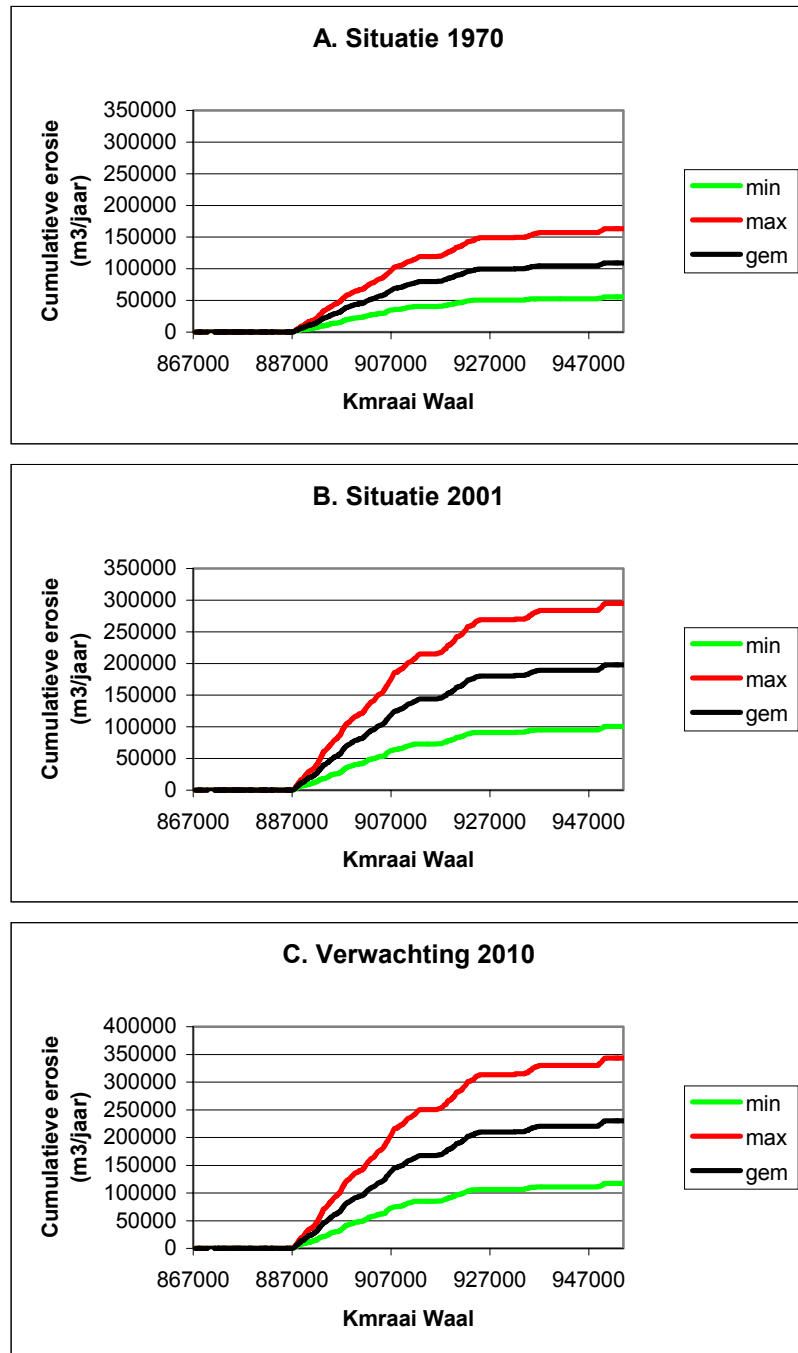


Figuur 5.21. Het erosieve effect van scheepspassages op de bodemligging van het kribvakstrand in het kleine vak aan de zuidoever en het grote vak aan de noordoever bij Druten, op jaarbasis gebaseerd op de zandfluxen van figuur 5.20 en de strandoppervlakten volgens Schans (1998).

Het resultaat van deze berekening voor de hele Waal is weergegeven in figuur 5.22. Gekozen is voor een weergave waarbij de berekende zandverliezen per kribvak in stroomafwaartse richting cumulatief worden opgeteld. Het getal aan de stroomafwaartse zijde kan dan op realiteitsgehalte worden geëvalueerd door het te vergelijken met termen in de zandbalans van de Rijntakken (Ten Brinke et al., 2001). De waarden van maximum en minimum hebben betrekking op een spreidingsband van éénmaal de standaarddeviatie rond het gemiddelde van de strandoppervlakte volgens de 4 opnames.

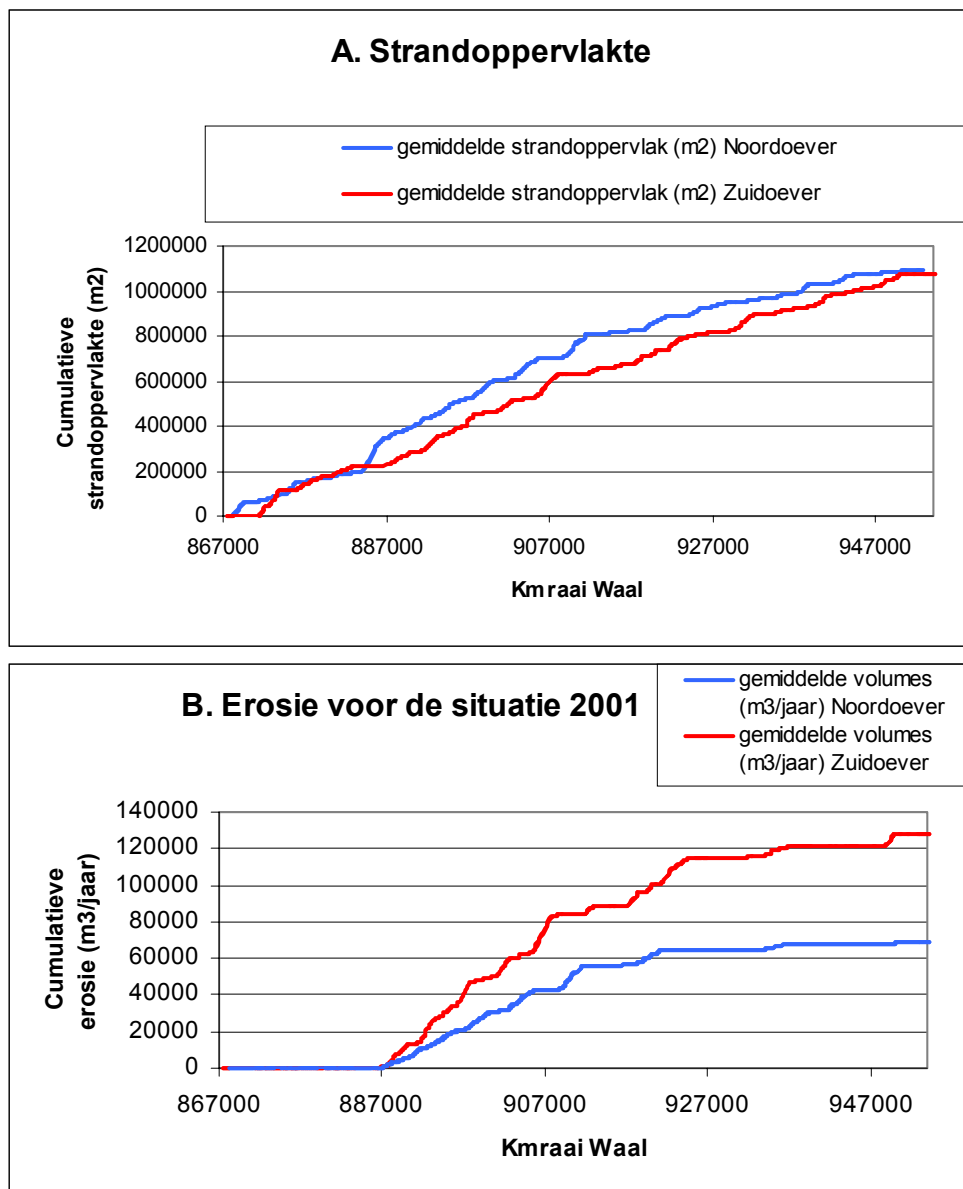
De cumulatieve waarden aan de benedenstroomse zijde passen qua orde van grootte goed bij de waarden van de zandstromen in de Waal zoals die in de sedimentbalans van Ten Brinke et al. zijn samengevat. In de discussie zal de evaluatie van de realiteit van deze getallen meer in detail worden gevoerd door de getallen te vergelijken met de zandaanvoer naar de kribvakken bij hoogwater en de vergelijking van hoog- met laagwaterfluxen te plaatsen in het kader van de langjarige sedimentbalans.

Uit de figuur blijkt dat de berekeningen een verdubbeling van het zandverlies vanuit de kribvakken naar de vaargeul laten zien van 1970 naar 2001, al zijn de spreidingsbanden groot. De extrapolatie van 2001 naar 2010 levert in de berekeningen geen al te grote veranderingen op. Het verloop van de figuren laat duidelijk de aannames zien van geen zandverlies door scheepvaart uit kribvakken in de bochten. Op grond van deze aanname zou pas vanaf 20 km benedenstrooms van de Pannerdensche Kop zandverlies uit kribvakken een rol gaan spelen.



Figuur 5.22. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis voor 3 tijdstippen, berekend op basis van de informatie uit voorgaande figuren.

Op grond van de resultaten uit voorgaande mag verwacht worden dat de bijdragen van de noord- en zuidoever aan het beeld in figuur 5.2 onderling sterk zal verschillen. Figuur 5.23B laat zien dat dit inderdaad het geval is. Voor de situatie van 2001 leveren de kribvakstranden langs de zuidoever, volgens de berekeningen, door erosie ten gevolge van scheepspassages ongeveer 2 keer zoveel zand aan de rivier als de kribvakstranden langs de noordoever. Dit is geen gevolg van een verschil in hoeveelheid strandoppervlak zoals Figuur 5.23A laat zien, maar het gevolg van een verschil in erosie per m². In deze figuur is geen spreidingsband gegeven omdat beide oevers voor de 4 tijdsopnamen dezelfde variatie in de tijd laten zien en een spreidingsband op grond van standaarddeviatie bij deze onderlinge vergelijking daarmee geen zin heeft.



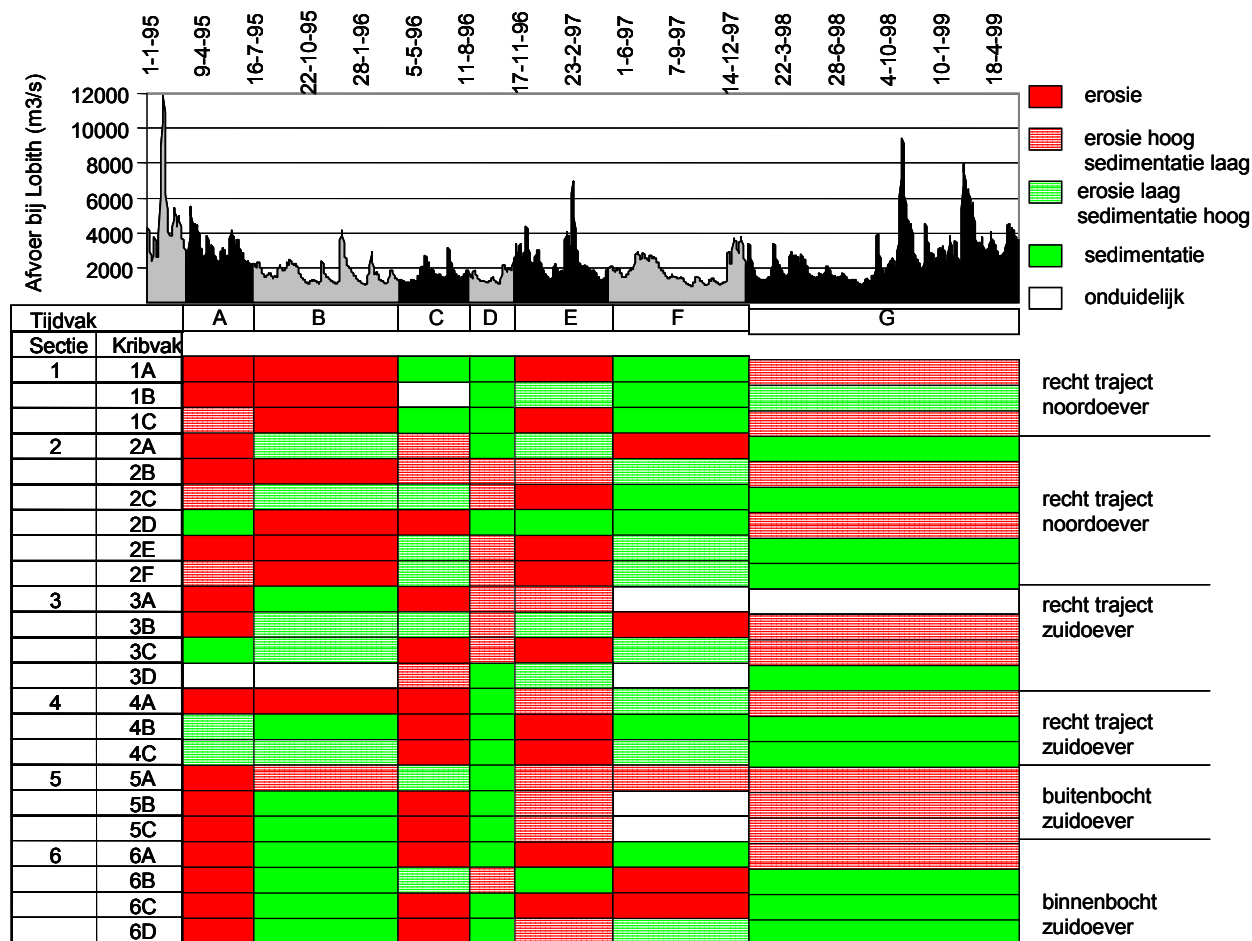
Figuur 5.23. De cumulatieve strandoppervlakte (A) langs de beide oevers van de Waal volgens de dataset van Schans (1998) en het cumulatieve zandverlies(B) uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis voor de situatie 2001, berekend op basis van de informatie uit voorgaande figuren.

5.5. Langjarige monitoring bodemligging kribvakstranden

5.5.1. Temporele dynamiek: hoogwater versus laagwater

De temporele dynamiek in de bodemligging van kribvakstranden kan worden afgeleid uit de monitoring van de bodemligging van een groot aantal stranden langs de Waal, die in paragraaf 4.4 is beschreven. In het bijzonder gaat het hierbij om de variatie in de bodemligging gedurende een periode met lage tot gemiddelde afvoeren versus de variatie voor en na een afvoergolf.

De interpretatie van de temporele dynamiek is gebaseerd op de concepten van Figuur 4.17. Middels de presentatie van alle resultaten van de monitoring van de bodemligging volgens de concepten van Figuur 4.17 wordt de discussie van de dynamiek gevoerd. Hierbij worden enkele resultaten naar voren gehaald. Het totaal aan resultaten is in de bijlagen 2 t/m 4 opgenomen.



Figuur 5.24. De scoretabel met de overheersende morfologische procesrichting van de 23 gemonitoorde kribvakken (vertikale as) gedurende 7 tijdvakken (8 opnames), direct gerelateerd aan het hierbij horende afvoerverloop bij Lobith.

Als eerste stap bij de interpretatie van de resultaten in de bijlagen is een scoretabel opgesteld waarin per kribvak en per tijdvak van monitoring is

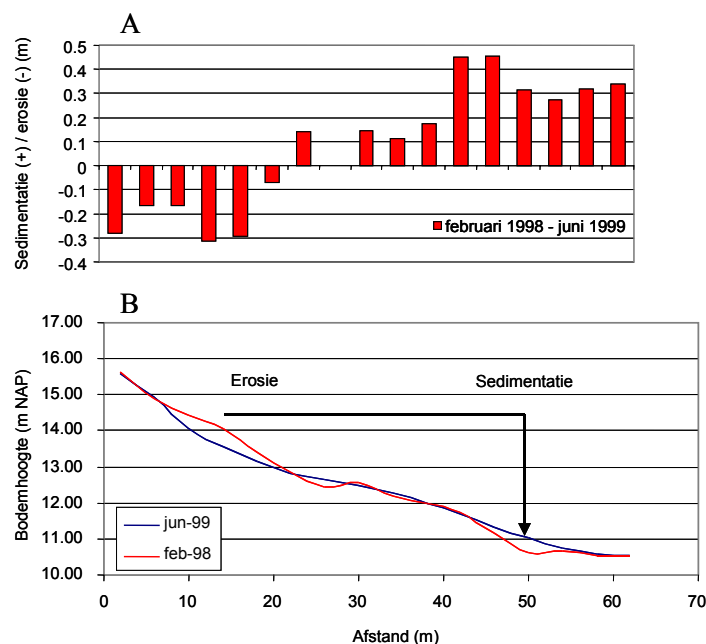
aangegeven wat het algemene beeld van de verandering van de bodemligging van het kribvakstrand is. Er zijn 5 klassen onderscheiden:

1. erosie over het hele kribvakstrand
2. erosie van het hoge deel van het strand en sedimentatie op het lage deel
3. sedimentatie op het hoge deel van het strand en erosie van het lage deel
4. sedimentatie over het hele kribvakstrand
5. onduidelijk patroon van verandering, geen procesrichting herkenbaar

Deze keuze van 5 klassen geeft een goed inzicht in de grootschalige processen in het kribvak. Perioden van aanzanding en erosie worden geïdentificeerd, naast perioden waarin het profiel van het strandtalud verandert door verplaatsing van zand binnen het kribvak. Presentatie in een scoretabel geeft een algeheel overzicht van de variatie in grootschalige processen in ruimte en tijd. De resultaten van deze interpretaties zijn in de scoretabel van figuur 5.24 aangegeven. De tijdvakken A t/m G zijn in deze figuur direct gerelateerd aan het afvoerverloop bij Lobith in de betreffende periode.

Uit figuur 5.24 kan het volgende worden afgeleid:

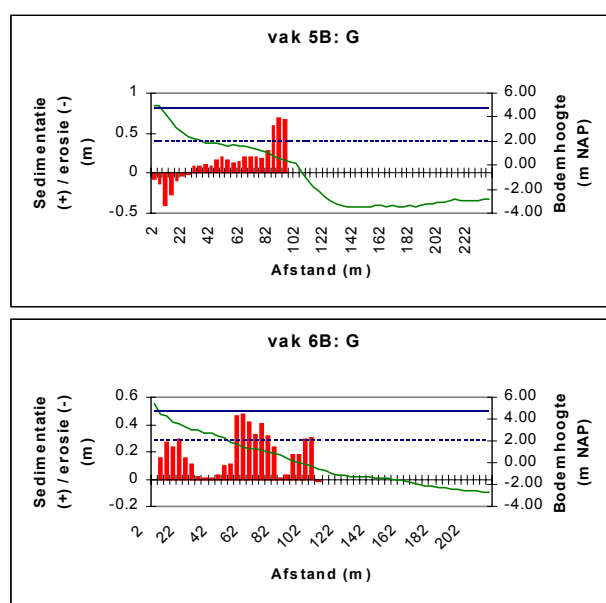
- Het eerste tijdvak, meteen na het hoogwater van 1995, wordt gekenmerkt door erosie van de stranden in vrijwel alle gemonitoorde kribvakstranden. Ervan uitgaande dat het hoogwater van 1995 heeft geleid tot de sedimentatie van veel zand in de kribvakken ('natuurlijke suppletie'), is een periode van erosie die hierop volgt als het water weer zakt volgens verwachting.



Figuur 5.25. Vervlakking van het kribvakstrand tijdens een hoge afvoer (B) door erosie van het hoge en sedimentatie op het lage deel (A).

- Het laatste tijdvak, met daarin het hoogwater van 1998, wordt gekenmerkt door hetzij sedimentatie over het hele profiel, hetzij erosie in het hoogste deel van het profiel en sedimentatie in het laagste deel van het profiel. Dit tijdvak laat het aanzandend effect van een hoogwater

zien. In de helft van de bestudeerde kribvakken trad erosie op in het hoge deel van het profiel, gekoppeld aan aanzanding in het lage deel. Kennelijk kunnen hoogwaters het profiel van het strand doen veranderen. Er ontstaat een vlakker en breder strand. Meer in detail is deze situatie geschetst in figuur 5.25, met een voorbeeld van kribvak 6A. De erosie en sedimentatie zijn weergegeven in figuur 5.25A, de vormverandering van het profiel in figuur 5.25B. Kennelijk leidt het meestromen van kribvakken vaak tot erosie van het kribvakstrand dicht bij de vegetatielijn. Dit zand verdwijnt naar diepere delen van het talud, waar het waarschijnlijk wat meer buiten het bereik van de hydrodynamische krachten komt, en wellicht voor een deel naar de oeverwallen. De vergelijking van het gedrag van het strandprofiel bij storm aan de kust dient zich aan: de golven voelen de bodem hoog op het strand en nemen het zand mee naar diepere delen van het profiel, waar het zand buiten bereik van de golven komt en kan bezinken. Bij hoogwater in een rivier treden natuurlijk andere processen op, maar verwacht mag worden dat ook hier hydrodynamische krachten relatief sterk werken in ondiep water, en dus hoog op het strand. In dit verband is het interessant om te zien dat de kribvakken in de secties 5 en 6, respectievelijk buitenbocht en binnenbocht, in het tijdvak met het hoogwater van 1998 zich verschillend gedragen. In de buitenbocht treedt het bovenbeschreven proces van profielaanpassing op (figuur 5.26A). In de binnenbocht treedt over het hele strandoppervlak aanzanding op (figuur 5.26B). Bij hoogwater worden de secundaire stromingen die sediment van de buiten- naar de binnenbocht voeren, sterker (Hooke, 1975).



Figuur 5.26. Het verschil in het morfologisch gedrag van kribvakstranden tijdens een hoge afvoer in een buiten- (A) en binnenbocht (B).

- De tijdvakken B t/m F, die allen betrekking hebben op situaties met geen extreme afvoeren (de zeer kort durende piekafvoer van 1997 daargelaten), laten wisselend erosie en sedimentatie zien. Echt duidelijk en makkelijk interpreteerbaar is het beeld niet. Zo kan de aanzanding in de kortdurende, lage afvoer periode D niet worden verklaard.

De dataset met de bodemligging van de kribvakken is omvangrijk en biedt veel informatie over het gedrag van verschillende delen van het kribvaktalud in relatie tot morfologische processen. Aanvullend op bovenstaande eerste indruk middels de scoretabel kunnen aspecten van de morfologische ontwikkelingen meer in detail naar voren worden gehaald en worden bediscussieerd. Dit is gedaan door de erosie en sedimentatie voor verschillende delen van het kribvaktalud te presenteren, met een duidelijk onderscheid in variatie in ruimte (tussen de 6 secties onderling) en in tijd (hoog- en laagwatereffecten). Deze presentatie is weergegeven in figuur 5.27. In deze figuur geven de linker diagrammen het ruimtelijke beeld van de morfologische variatie en de rechter figuren het temporele beeld. Voor wat betreft de verschillende delen van het kribvaktalud is voor alle kribvakken in alle secties een onderscheid gemaakt tussen het deel waar in de beschouwde periode water boven het strand heeft gestaan, en het deel dat de gehele periode droog heeft gestaan. In de diagrammen kort het natte en droge talud genoemd. De morfologische ontwikkelingen van het natte talud zijn het gevolg van de waterbeweging en (voor een klein deel) de wind. De morfologische ontwikkelingen van het droge talud zijn uitsluitend het gevolg van verstuing door de wind. De getallen op de verticale as zijn steeds de totale hoeveelheid erosie op het talud(deel) per strekkende meter.

In figuur 5.27 zijn de hoeveelheden erosie en sedimentatie van het hele talud (diagram A) opgesplitst in de hoeveelheden voor het natte talud (diagram B) en het droge talud (diagram C). De figuur laat enkele belangrijke aspecten zien:

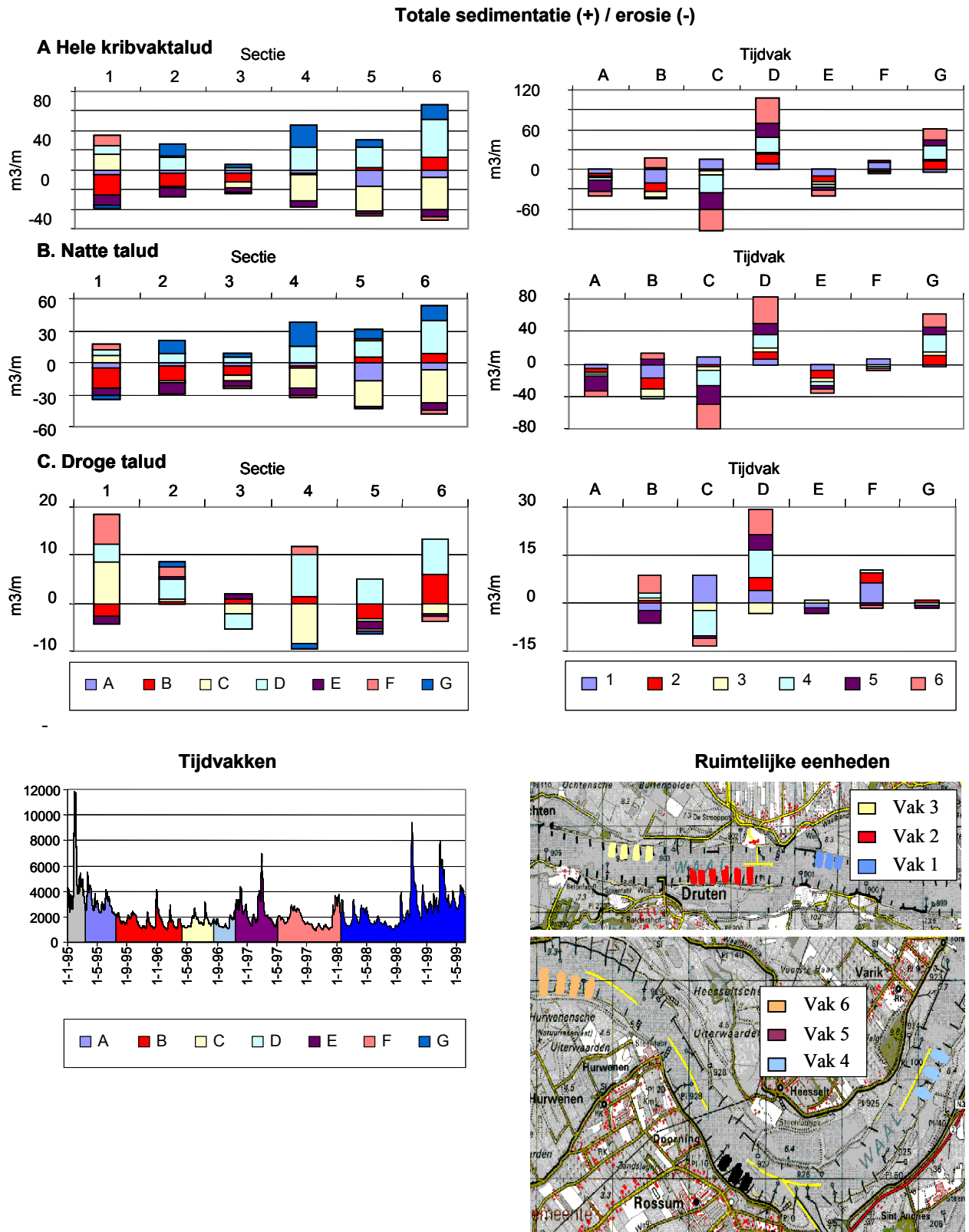
- Het droge talud laat nog redelijk veel sedimentatie zien. Dit suggereert dat op de kribvakstranden eolische activiteit voor de morfologie van de stranden een rol van betekenis speelt. Er lijkt af en toe ook wel wat erosie op te treden. Dit zou uitblazen door de wind kunnen zijn, maar gezien de grootte-orde mogen meetonnauwkeurigheden als oorzaak niet worden uitgesloten. De aanzanding door verstuing is relatief groot in vak 1 (noordoever) en vak 6 (zuidoever binnenbocht).
- De opvallende sedimentatie in tijdvak D in de scoretabel komt ook in deze figuur weer duidelijk naar voren. In de rechter diagrammen is te zien dat deze sedimentatie in de meeste kribvakken wordt voorafgegaan door een vergelijkbare erosie in de daaraan voorafgaande periode C. In dergelijke gevallen is alertheid geboden. Deze opeenvolging van erosie en sedimentatie kan het gevolg zijn van een systematisch foute bodemhoogte opname op de overgang van beide tijdvakken. Het bijzondere in dit geval is echter dat de forse sedimentatie voorkomt op zowel het natte als het droge deel van het talud, en dus voor 2 verschillende methoden van hoogte opname (echoloding en waterpassing). Daarmee lijkt een foute hoogte opname als foutenbron uitgesloten.
- De morfologische ontwikkelingen in de deelgebieden bij Druten (secties 1-3) en St. Andries (secties 4-6) zijn verschillend. Dit blijkt met name voor het natte talud. De hoeveelheden erosie en sedimentatie zijn bij St. Andries hoger. Verder valt op dat de kribvakken bij Druten in de eerste 2 tijdvakken na het hoogwater van 1995 erosie laten zien terwijl bij St. Andries de erosie in het eerste tijdvak omslaat in sedimentatie in het tweede tijdvak (B, rode kleur).

Bovenstaande interpretatie van de langjarige monitoring is met name gebaseerd op de presentatie van de resultaten van erosie en sedimentatie in het ruimtelijke vlak (figuur 4.17.A) in bijlage 2. Zoals eerder vermeld zijn

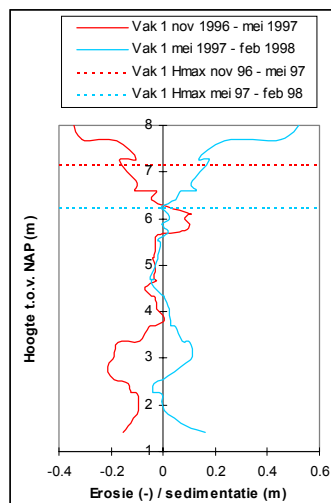
dezelfde resultaten uitgezet tegen de diepte in het profiel volgens het concept van figuur 5.17.B. Deze resultaten zijn voor alle 6 secties weergegeven in bijlagen 3 en 4. De resultaten in bijlage 3 zijn de hoeveelheden erosie en sedimentatie in de betreffende tijdvakken. De resultaten in bijlage 4 zijn de erosie en sedimentatie per tijdseenheid. De meerwaarde van deze presentatie tegen de diepte van het talud schuilt in een betere onderlinge vergelijking van hoeveelheden erosie en sedimentatie van bepaalde dieptezones in verschillende tijdvakken. En dan met name in relatie tot het dieptebereik van de waterstanden in de beschouwde periodes.

Uit de resultaten van bijlage 3 kan het volgende worden afgeleid:

- Het eerste vershiltijdvak maart 1995 – juli 1995 wordt gekenmerkt door erosie, met name in het diepere deel van het strandtalud.
- Het laatste tijdvak februari 1998 – juni 1999 wordt gekenmerkt door sedimentatie, in ongeveer dezelfde dieptezone waar in het eerste tijdvak erosie optrad.
- De beelden van de hiertussen liggende tijdvakken geven geen eenduidig proces weer. Dit is al eerder opgemerkt naar aanleiding van figuur 5.24. Hierbij werd gemeld dat de resultaten in deze tussenliggende tijdvakken van relatief lage afvoeren suggereren dat de bodemhoogte-opname op bepaalde momenten onjuist is. De figuren in bijlage 3 laten zien dat dit zeer waarschijnlijk het geval is voor de opname van mei 1997. Alle secties laten in meer of mindere mate zien dat de erosie/sedimentatie in de tijdvakken november 1996 – mei 1997 en mei 1997 – februari 1998 elkaars spiegelbeeld zijn. Dit wijst erop dat een foutieve erosie of sedimentatie in het daaropvolgende tijdvak wordt 'gecorrigeerd' door een gespiegelde sedimentatie of erosie. De peilingen voor sectie 1 laten dit heel duidelijk zien (figuur 5.28). Een extra aanwijzing voor onbetrouwbare data is de berekende erosie in het tijdvak november 1996 – mei 1997 in het hoogste deel van het strandtalud, bóven het niveau van de hoogste waterstand. Erosie op het hoogste deel van het strand is zeer onwaarschijnlijk. Door de wind zal eerder sedimentatie met van elders op het strand aangewaaid zand plaatsvinden.

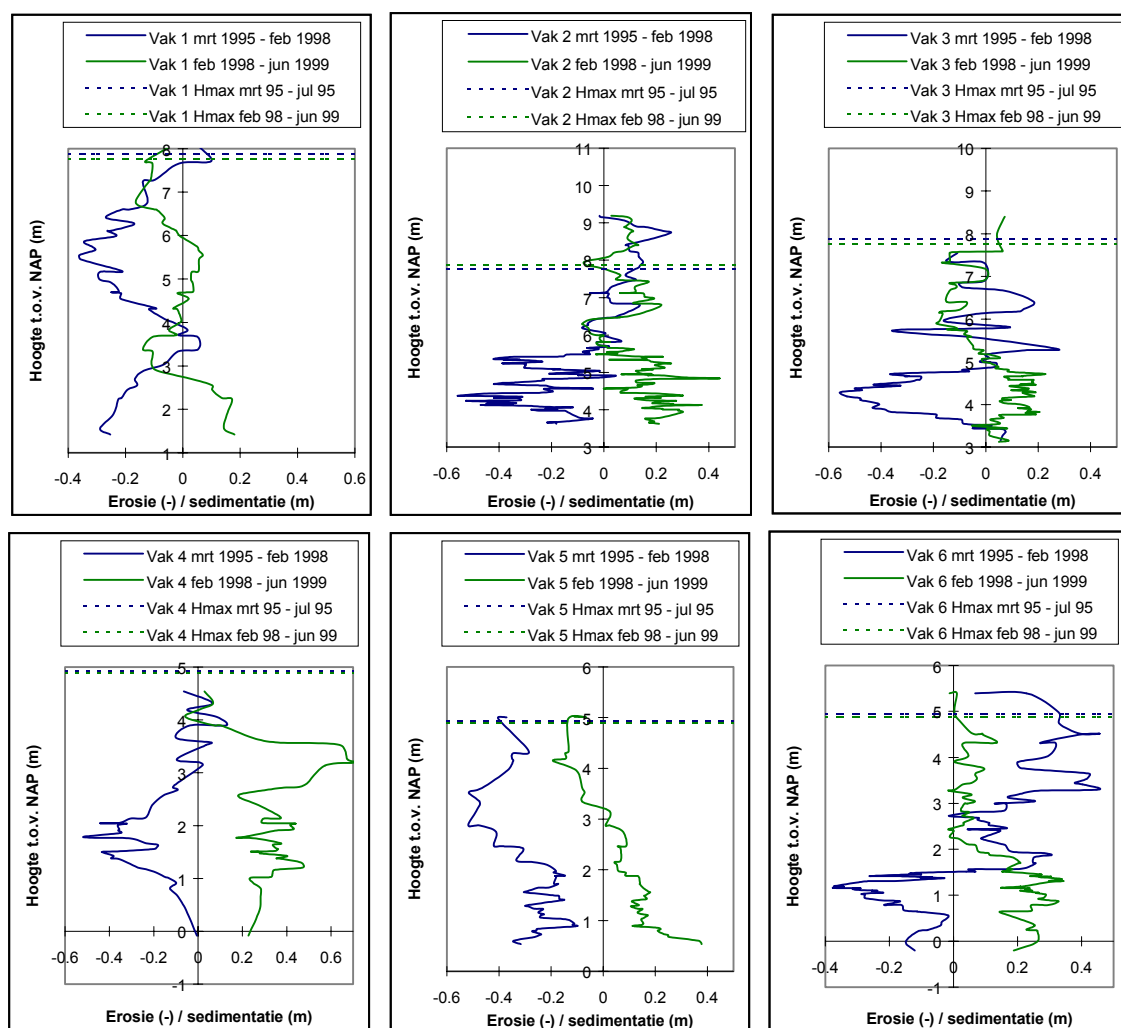


Figuur 5.27. De hoeveelheid erosie (-) en sedimentatie (+) van/op het kribvakstrand van de 6 secties van de monitoring voor alle tijdvakken, voor het totale talud (A), het talud dat in het betreffende tijdvak onder water stond (B), en het droge talud (B). De linker diagrammen geven het ruimtelijke, de rechter diagrammen het temporele beeld weer.



Figuur 5.28. De, waarschijnlijk onjuiste, erosie en sedimentatie langs het strandtalud van sectie 1, uitgezet tegen de diepte van het talud voor 2 opeenvolgende verschiltijdvakken.

Bovenstaande constatering pleiten ervoor de figuren in bijlage 3 te vereenvoudigen tot slechts 2 verschiltijdvakken: maart 1995 – februari 1998 en februari 1998 – juni 1999. Hiermee wordt het probleem van de onbetrouwbare hoogte-opnamen halverwege de tijdreeks omzeild, en het meest essentiële uit de tijdreeks naar voren gehaald: de vergelijking van de morfologische veranderingen bij lage afvoeren versus het hoogwater effect. Figuur 5.29 toont het resultaat. Duidelijk is dat de 2 periodes worden gekenmerkt door erosie respectievelijk sedimentatie. De sedimentatie vindt over het algemeen plaats in die dieptezones waar in de voorgaande 3 jaar erosie optrad. Opvallend zijn de verschillen tussen secties 5 en 6: in sectie 5 (de buitenbocht) kan de sedimentatie de erosie niet compenseren; in sectie 6 (binnenbocht) overheerst de sedimentatie ruimschoots.

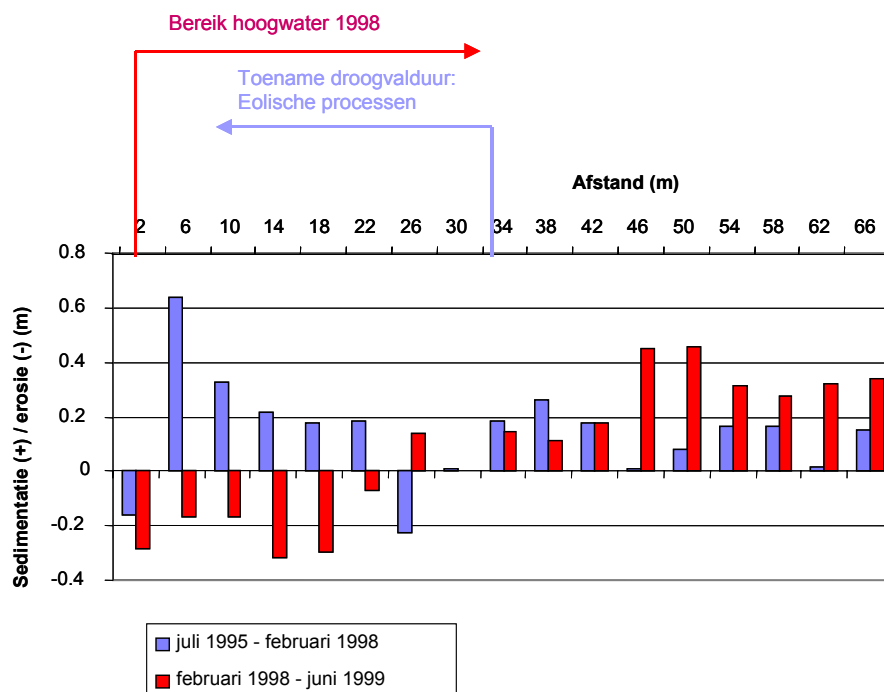


Figuur 5.29. De erosie (-) en sedimentatie (+) uitgezet tegen de dieptes van het talud van het kribvakstrand over een lijn loodrecht op de oever voor de periode van de lage afvoeren (maart 1995 – februari 1998) en het hoogwater effect (februari 1998 – juni 1999).

5.5.2. Lage – gemiddelde afvoer: aanwijzingen voor eolische processen

In figuur 5.27 is de hoeveelheid erosie en sedimentatie per ruimtelijke eenheid en tijdvak voor het totale kribvaktalud (A) onderverdeeld in de bijdrage van het natte talud (B) en de bijdrage van het droge talud (C). Deze onderverdeling betekent een onderverdeling in het deel van het talud dat hoofdzakelijk onder invloed stond van de waterbeweging en het deel waar alleen de wind een rol gespeeld kan hebben. In tijdvak A heeft het talud van alle bemeten kribvakken voortdurend onder water gestaan.

Duidelijk is dat de morfologische veranderingen voor het droge deel, in hoeveelheden verplaatst sediment, slechts een klein deel van de morfologische veranderingen van het hele talud uitmaken. Voor het droge deel geldt dat de meetnauwkeurigheid van de bodemligging relatief hoog is aangezien deze metingen met nauwkeurige waterpassing zijn uitgevoerd. Peilingen vanaf een schip zijn veel onnauwkeuriger. Daarom kan aan de informatie van het droge talud toch het een en ander over de invloed van verstuiving worden opgemerkt.



Figuur 5.30. Aanwijzingen voor verstuiving van zand van het kribvakstrand naar het hogere talud tegen de vegetatielijn in de periode juli 1995 – februari 1998 in kribvak 6A.

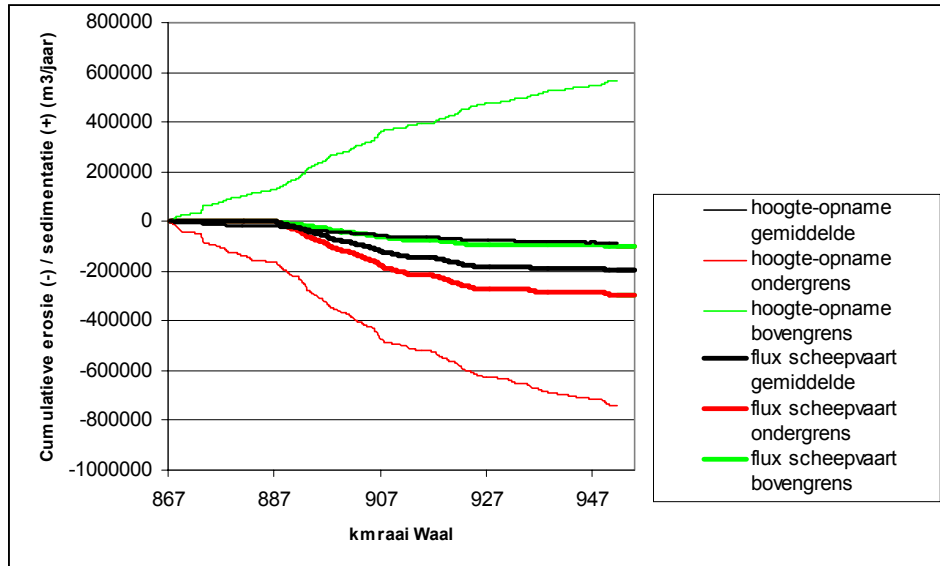
Figuur 5.27 C laat zien dat zowel momenten van sedimentatie als erosie voorkomen, maar dat de sedimentatie overheerst. Dit is een indicatie van verstuiving van, door de rivier naar het kribvakstrand aangevoerd, zand naar hogere delen tegen (en in) de vegetatie. Dit proces wordt beter geïllustreerd door de situatie voor één kribvak te presenteren. Bijvoorbeeld kribvak 6A, als vervolg op figuur 5.25. Figuur 5.30 laat de erosie en sedimentatie langs dit kribvak talud zien in de periode februari 1998 – juni 1999, conform figuur 5.25 A, maar nu aangevuld met de erosie en

sedimentatie in de periode met lagere afvoeren die hieraan voorafging. Aangegeven is het bereik van het hoogwater van 1998, én de zone waar eolische activiteit heeft plaatsgevonden in de 3 jaar voorafgaande aan dit hoogwater. In de richting van de pijl neemt de tijd van de periode van 3 jaar gedurende welke het strandtalud droog lag, toe. Met een toenemende droogvalduur neemt ook de hoeveelheid waargenomen sedimentatie toe. Het beeld van figuur 5.30 past bij het proces van verstuiwing waarbij zand van het strand naar hogere delen en tegen de vegetatielijn wordt geblazen. De invloed van de wind op het ontstaan van kleine duintjes in deze hoge taludzone is voor de kribvakken van de Waal al eerder in kwalitatieve zin waargenomen (Van den Ancker en Jungerius, 1997). Figuur 5.30 maakt aannemelijk dat verstuiwing in kribvakken gedurende langere periodes met lage afvoeren tot een significante aanzanding van het hogere taluddeel kan leiden. Hierbij gaat het om aanzanding van enkele decimeters. Deze waarde sluit goed aan bij resultaten van onderzoek naar verstuiwing in kribvakken bij het Millingerduin (Kroon en Vermeer, 2000).

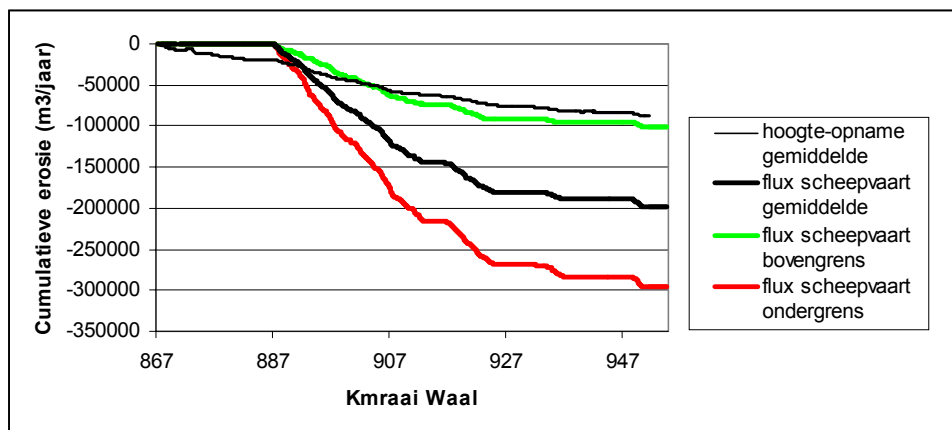
5.5.3. *Lage – gemiddelde afvoer: de sedimenthuishouding van kribvakken*

In paragraaf 5.4.3. is een berekening gepresenteerd van de zandverliezen uit kribvakken langs de Waal, uitgaande van de invloed van scheepvaart volgens de opgestelde neurale netwerken. Op basis van de monitoring van de bodemligging van de 23 kribvakstranden langs de Waal kan een vergelijkbare berekening worden gemaakt. Deze berekening is uitgevoerd voor de totale dataset van juni 1995 – februari 1998. Van deze dataset mag worden uitgegaan dat hier alleen laagwater processen (invloed scheepvaart) in zitten. Op basis van deze monitoring van 3 jaar is de jaarlijkse sedimentuitwisseling tussen kribvakken en hoofdgeul bepaald. Hiertoe zijn alle kribvakken langs de Waal verdeeld in klassen (binnen- en buitenbochten, rechte vakken langs noord- en zuidoever) en zijn de oppervlaktes van deze kribvakstranden (Schans, 1998) vermenigvuldigd met een gemiddelde waarde voor erosie of sedimentatie, die uit de monitoring van de 23 vakken is afgeleid. Standaard deviaties rond de gemiddelde waarden zijn gehanteerd voor de bepaling van boven- en ondergrenzen. Conform de presentaties voor het zandverlies door scheepvaart (figuren 5.22 en 5.23) is weer gewerkt met cumulatieve grafieken. De resultaten voor het cumulatieve zandverlies van beide oevers samen is weergegeven in figuur 5.31. In deze figuur zijn ook de resultaten van figuur 5.22 voor de situatie van 2001 opgenomen. Duidelijk is dat de spreidingsband voor het zandverlies op basis van de monitoring van de bodemligging zeer groot is. De totale bandbreedte is ongeveer 6 keer de gemiddelde waarde. In figuur 5.32 zijn dezelfde resultaten gepresenteerd maar nu zonder de boven- en ondergrenzen van de monitoring. Het gemiddelde verloop van de cumulatieve sedimentuitwisseling tussen kribvakstranden en de vaargeul op basis van de monitoring is een sedimentverlies die qua vorm erg lijkt op de resultaten voor de invloed van scheepvaart. De waarde is wel lager dan voor het gemiddelde van het scheepvaarteffect werd berekend. Conform de resultaten van figuur 5.23 B is deze cumulatieve berekening ook gemaakt voor noord- en zuidoever afzonderlijk. Figuur 5.33 toont de resultaten, waarbij ook de resultaten uit figuur 5.23 B in deze figuur zijn opgenomen. Opvallend is dat het verschil in cumulatieve erosie van noord- en zuidoever hetzelfde is voor de berekening met de neurale netwerken en

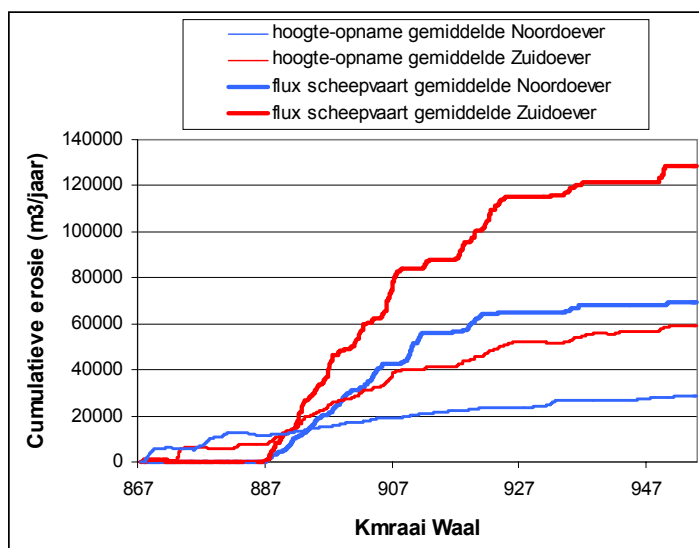
de berekening op basis van de monitoring. Dit wordt niet veroorzaakt door de parameter strandoppervlakte, die in beide berekeningen is meegenomen, omdat de hoeveelheid strandoppervlakte langs beide oevers niet verschilt (figuur 5.23 A). De resultaten wijzen in de richting van een verschillend gedrag van de kribvakstranden langs beide oevers, waarbij de scheepvaart een belangrijke causale rol speelt.



Figuur 5.31. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis, volgens de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden én volgens de invloed van scheepvaart op basis van Neurale Netwerken. De boven- en ondergrens hebben betrekking op éénmaal de standaarddeviatie rond het gemiddelde.



Figuur 5.32. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis, volgens de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden én volgens de invloed van scheepvaart op basis van Neurale Netwerken. Dezelfde resultaten als figuur 5.31, maar nu zonder de boven- en ondergrens bij de resultaten van de monitoring.



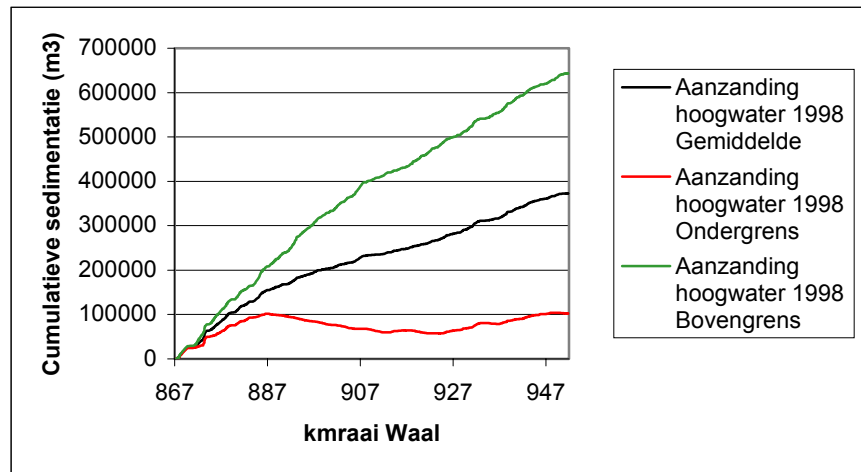
Figuur 5.33. Het cumulatieve zandverlies uit kribvakken langs de Waal op jaarbasis, met een onderscheid naar noord- en zuidoever, volgens de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden én volgens de invloed van scheepvaart op basis van Neurale Netwerken.

5.5.4. Hoogwater: aanzanding kribvakken

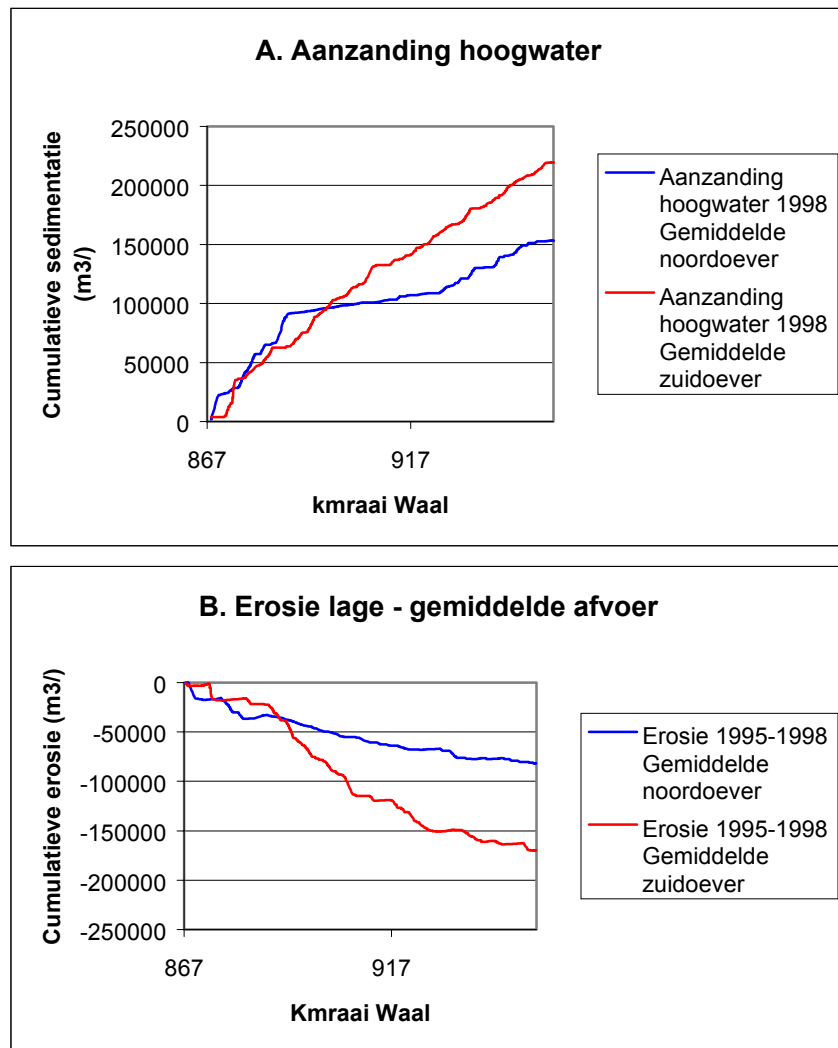
Op basis van de dataset van de monitoring van de bodemligging van de kribvakstranden kan, net als voor de situatie van de lage – gemiddelde afvoeren, de zanduitwisseling tussen vaargeul en kribvakken tijdens een hoogwater worden berekend. Dit is in dit geval een aanzanding van de kribvakstranden. Deze aanzanding is in figuur 5.34 cumulatief langs de Waal weergegeven. De eenheid op de y-as is aanzanding tussen de laatste 2 monitoring tijdstippen. Met enige voorzichtigheid mag dit worden geïnterpreteerd als aanzanding door het hoogwater van 1998. De spreidingsband (1 keer standaarddeviatie) is groot maar maakt een eventuele erosie toch wel zeer onwaarschijnlijk. De grootte van de gemiddelde waarde voor de aanzanding is vrij constant langs de rivier en komt voor de hele Waal uit op een kleine 400.000 m³.

In het voorgaande is getoond dat in periodes van lage – gemiddelde afvoeren erosie van de stranden optreedt en dat deze erosie sterker is voor de stranden aan de zuidoever dan aan de noordoever. Volgens de hypothese dat hoogwaters de zandverliezen, die zijn opgetreden in tijden van lagere afvoeren tussen 2 hoogwaters in, compenseren zodat de stranden op een tijdschaal van meerdere jaren min of meer in balans zijn, moet de zandaanvoer bij een hoogwater aan de zuidoever dan groter zijn dan aan de noordoever. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn. Figuur 5.35 laat de cumulatieve aanzanding van het hoogwater van 1998 langs de Waal zien, apart voor de zuidoever en de noordoever (A). In figuur 5.35 B is de totale berekende erosie voor noord- en zuidoever in de periode tussen de hoogwaters van 1995 en 1998 weergegeven. De zuidoever laat bij lage – gemiddelde afvoeren een sterkere erosie, en bij hoogwater een sterkere sedimentatie zien dan de noordoever. Geheel in overeenstemming

met de eerder vermelde hypothese. Zelfs de groottes van de waardes voor erosie en sedimentatie houden elkaar heel aardig in evenwicht.



Figuur 5.34. De cumulatieve zandaanvoer naar kribvakken langs de Waal tijdens de periode van monitoring met het hoogwater effect van 1998, met een onderscheid naar noord- en zuidoever.



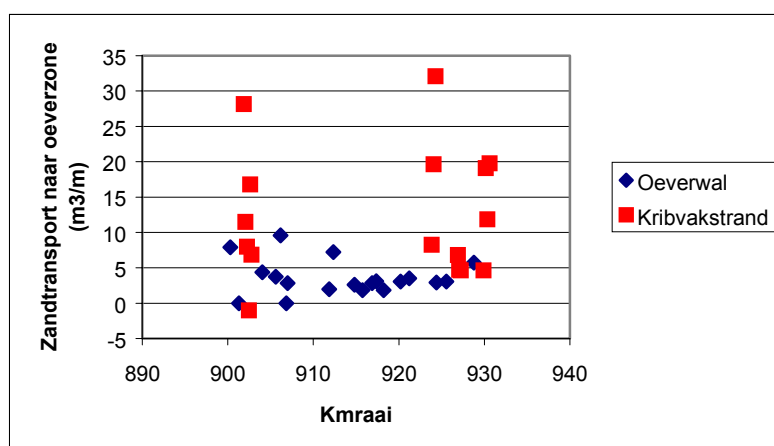
Figuur 5.35. De cumulatieve zandaanvoer naar kribvakken langs de Waal tijdens de periode van monitoring met het hoogwater effect van 1998 (A), en het cumulatieve zandverlies in de periode tussen de hoogwaters van 1995 en 1998 (B), beide met een onderscheid naar noord- en zuidoever.

5.5.5. Hoogwater: invloed uitwisseling zomer – winterbed en taludkarakteristieken op zandtransport

Uit de grootte van de sedimentatie op de kribvakstranden tijdens het hoogwater van 1998 kan het zandtransport naar de kribvakken tijdens dit hoogwater per strekkende meter oever worden berekend. Verwacht mag worden dat de grootte van dit transport wordt beïnvloed door (1) de ligging van het kribvak ten opzichte van het 2D stroompatroon van rivier én uiterwaarden, en (2) de steilheid en hoogte van het talud dat het kribvakstrand van de rivierbedding scheidt.

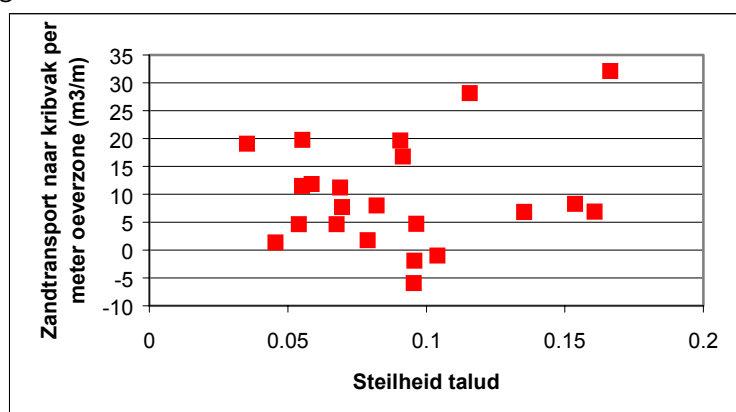
Ten aanzien van het eerste aspect mag verwacht worden dat er relatief veel zandtransport vanuit de rivier naar de kribvakken plaatsvindt op locaties waar het water vanuit de geul de uiterwaarden instroomt. Voor het zandtransport naar de oeverwallen is een dergelijk verband geconstateerd voor de hoogwaters van 1993/1994 en 1995 (Sorber, 1997; Ten Brinke et

al., 1998). Voor de kribvaksedimentatie van 1998 is hiernaar gekeken. Geconstateerd is dat te weinig kribvakstranden (23) zijn onderzocht om hierover uitspraken te doen. Bovendien was de variatie in ligging van de stranden ten opzichte van de debietuitwisseling tussen zomer- en winterbed te gering om verschillen te constateren die aan deze ligging te relateren zou zijn. Er is nog wel een vergelijking gemaakt tussen de zandtransporten naar de kribvakstranden tijdens het hoogwater van 1998 en de zandtransporten naar de oeverwallen tijdens het hoogwater van 1995 (figuur 5.36). Hieruit blijkt dat het zandtransport naar de kribvakken aanmerkelijk groter is dan het transport naar de oeverwallen.



Figuur 5.36. Het zandtransport tijdens een hoogwater vanuit de vaargeul naar de oeverzone voor de linkeroever van de Waal tussen km 900 en 930, voor de kribvakstranden (1998) en de oeverwal (1995).

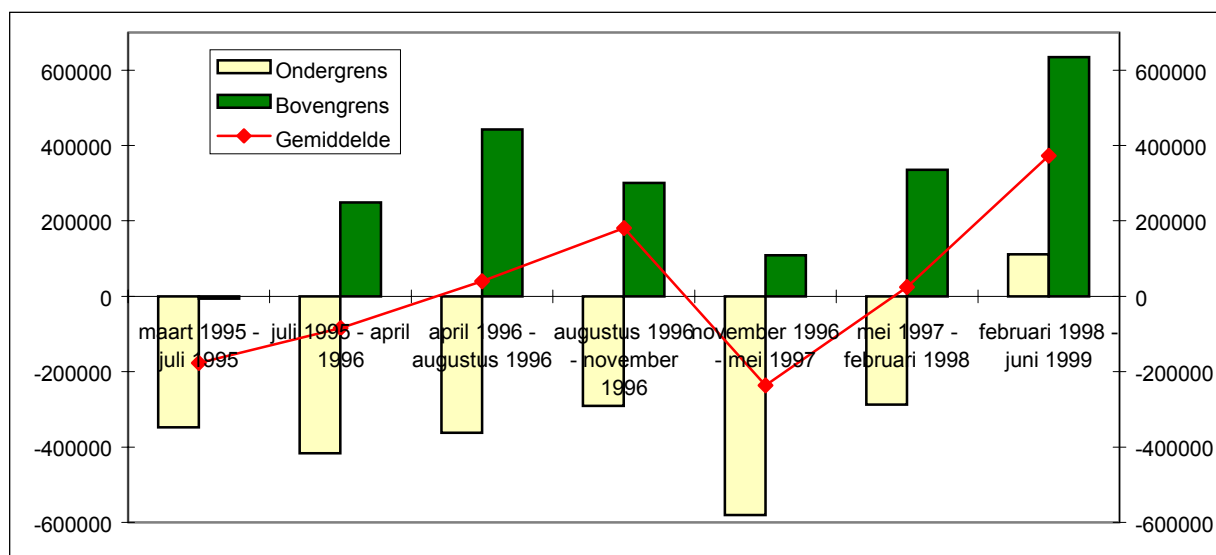
Ten aanzien van het tweede aspect mag verwacht worden dat het zandtransport vanuit de rivier naar de kribvakken wordt gehinderd door een relatief hoog en steil talud van de grens tussen strand en vaargeul. Dit zou kunnen betekenen dat een hoger en/of steiler talud leidt tot een geringer zandtransport naar de kribvakken. De zandtransporten uit figuur 5.36 zijn uitgezet tegen de steilheid van het bijbehorende talud naar de vaargeul in figuur 5.37. Er is geen relatie aan te tonen tussen taludsteilheid en het transport naar het kribvakstrand. Hetzelfde geldt voor de hoogte van de overgang van vaargeul naar kribvakstrand en het zandtransport (figuur niet getoond).



Figuur 5.37. Het zandtransport tijdens een hoogwater naar het kribvakstrand voor de linkeroever van de Waal tussen km 900 en 930, uitgezet tegen de steilheid van het bijbehorende talud op de overgang van vaargeul naar kribvakstrand.

5.5.6. Hoogwater versus laagwater sedimentbudget kribvakken

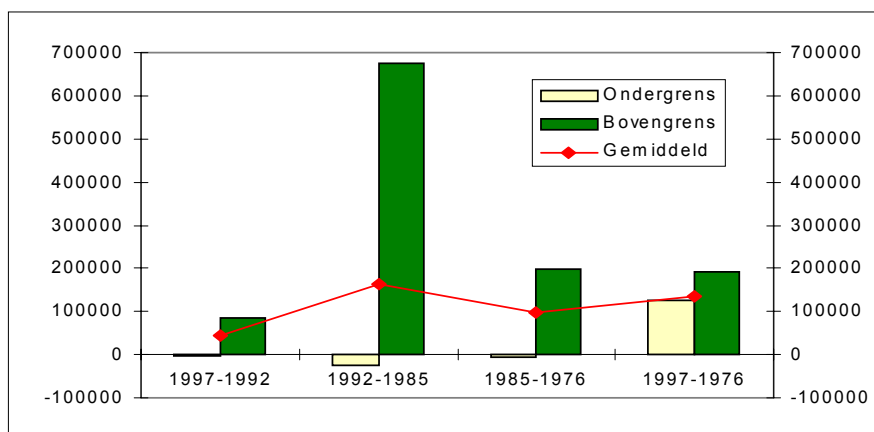
De sedimentuitwisseling tussen kribvakken en de Waal is voor alle 7 verschiltijdvakken van de tijdreeks van 4 jaar berekend. Zowel voor alle 6 secties apart (bijlage 3) als samenvattend voor alle kribvakken langs de Waal bij elkaar (figuur 5.38). De spreiding rond de gemiddelde waardes is groot. Voor veel van de verschilberekeningen zelfs zo groot dat geen uitsluitsel kan worden gegeven over erosie of sedimentatie van de kribvakstranden. Een uitzondering hierop vormen de eerste en laatste verschilberekening. Opvallend genoeg zijn dit nu juist de tijdvakken waar hoogwatereffecten in zitten. Het eerste tijdvak is een periode ná het hoogwater van 1995. Volgens de hypothese dat hoge afvoeren leiden tot zandtransport naar de kribvakken mag verwacht worden dat direct ná het hoogwater van 1995 de kribvakken goed gevuld waren. Een periode van significante erosie in de eerste maanden ná dat hoogwater is dan een logisch beeld dat goed bij deze hypothese past en een indirecte ondersteuning van die hypothese. De hypothese van sedimentatie tijdens hoogwater wordt direct ondersteund door de laatste verschilberekening met daarin de invloed van het hoogwater van 1998. Alle tijdvakken met een bovengrens sedimentatie en een ondergrens erosie hebben betrekking op relatief lage afvoeren. Al met al is het resultaat in figuur 5.38 in overeenstemming met de hypothese over zandaanvoer naar de kribvakken bij hoogwaters, waarmee het zandverlies bij lagere afvoeren onder invloed van scheepspassages wordt gecompenseerd. Over de periode van 4 jaar komt de netto verandering in zandinhoud van alle kribvakken langs de Waal tezamen op een totaal van 30.000 m³/jaar. In het licht van de onzekerheid rond dit getal, en in relatie tot de grootte van transport-, bron- en puttermen in de langjarige zandbalans van de Rijntakken (Ten Brinke et al., 2001) is dit getal verwaarloosbaar. De aanvoer van zand naar de kribvakken tijdens een hoogwater is wel hoog: gemiddeld 370.000 m³ voor alle kribvakken langs de Waal voor het hoogwater van 1998.



Figuur 5.38. De toename cq afname van de hoeveelheid zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar (in m³).

5.6. Het langjarig gedrag van kribvakstranden op basis van luchtfoto's

De 4 luchtfoto's bestrijken een tijdspanne van 20 jaar. De loodrecht luchtfoto's zijn genomen van alle kribvakken (en dus kribvakstranden) langs de Waal in de jaren 1976, 1985, 1992 en 1997. Getoetst is of de verschillen in strandoppervlakte tussen de verschillende jaren statistisch significant zijn. Dit bleek inderdaad het geval (Wilcoxon, betrouwbaarheid 99%). De berekeningen suggereren een jaarlijkse toename van de hoeveelheid zand tussen de kribben langs de Waal van gemiddeld 40.000 tot 160.000 m³/jaar (figuur 5.39).



Figuur 5.39. De toename cq afname van de hoeveelheid zand tussen de kribben langs de Waal, bepaald aan de hand van luchtfoto's van de oevers van de Waal (m³/jaar).

Een jaarlijkse sedimentatie in de kribvakken gedurende meerdere jaren is in strijd met de eerder beschreven hypothese en de uitkomsten uit de serie van 8 bodempeilingen in kribvakken langs de Waal. De uitkomsten van de bodempeilingen worden veel betrouwbaarder geacht dan de uitkomsten van de luchtfotostudie. Een zwak punt bij de luchtfotostudie is immers de omrekening van de 4 opnames naar eenzelfde waterstand (afvoer) en vervolgens de verschilberekening van de hoeveelheid zand tussen de kribben. Deze 2 stappen zijn uitgevoerd op basis van een zeer beperkte hoeveelheid informatie over de strandhelling (Schans, 1998). Zeer waarschijnlijk is deze informatie te beperkt om de resultaten uit de luchtfotostudie zodanig om te rekenen dat deze onderling vergelijkbaar worden.

Om dit te toetsen is door Ten Brinke et al. (2001) een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de rekenmethode met de luchtfoto's. Hierbij is de strandhelling gevarieerd binnen het bereik van de scatter van de beschikbare strandhellingen. Hieruit bleek dat het resultaat van de verschilberekening op grond van luchtfoto's sterk af hangt van de gekozen strandhelling en de gekozen series luchtfoto's die onderling worden vergeleken.

6 Discussie

6.1. Scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken langs de Waal

Stroomneren zonder scheepvaart:

Voorgaande studies naar de invloed van scheepspassages op processen in kribvakken geven een goed beeld van met name stromingspatronen in kribvakken (Havinga et al., 1984; De Haas en Van Essen, 1987ab; Verhey en Vermeer, 1987). Voor een kribvak met een afstand tussen de kribben van 200 m in een recht traject van de Waal kan de scheepsgeïnduceerde waterbeweging in stappen tijdens een scheepspassage goed worden beschreven (figuur 3.5). Deze kribafstand is min of meer de standaard, waarbij afwijkingen mogelijk zijn tussen 150 en 300 m (figuur 2.1). 50% van de kribvakken langs de Waal heeft een geometrie en oriëntatie die vergelijkbaar is met het voorbeeld van figuur 3.5, dat in voorgaande studies steeds als uitgangspunt is genomen. 27% van de kribvakken heeft een bestortte oever of vormt de uitgang van een geul of haven. Kleine kribvakken en kribvakken in bochten maken minder dan een kwart van het totaal aan kribvakken langs de Waal uit. Dit betekent dat de situatie van een groot kribvak met 2 stroomneren en een passage van schepen parallel aan de normaallijn, zoals geschetst in figuur 3.5, voor de Waal het meeste voorkomt.

De stroomneren zijn goed herkenbaar in de metingen uitgevoerd met meetframes. Het vóórkomen van 2 stroomneren in een kribvak van 200 m en 1 stroomneer in een kribvak van 150 m (figuur 3.4) kon goed uit de metingen met de meetframes worden afgeleid. Uit de metingen in de kribvakken in de bocht bij St. Andries blijkt dat de stroomneer in kribvakken in de buitenbocht sterker, en in de binnenbocht minder sterk is dan in kribvakken langs het rechte traject bij Druten (figuur 5.1). De sterkte van de stroomneren voor situaties zonder scheepvaart wordt dus sterk bepaald door de ligging van de stroomnaad van de rivier ten opzichte van het kribvak.

Stroomneren met scheepvaart:

Over het algemeen zijn de stroomneren in kribvakken, als gevolg van de rivierafvoer, niet sterk genoeg om zand van het strand te eroderen. Deze situatie verandert als grote schepen passeren. Met name voor de kribvakken langs het rechte traject bij Druten leiden passerende grote schepen vaak tot erosie van zand en transport van dit zand via het uitstroompunt naar de rivier. Bij de kribvakken in bochten speelt dit veel minder. In de binnenbocht doordat de kribvakstranden deel uitmaken van de pointbar waardoor de schepen wat verder uit de oever passeren. In de buitenbocht doordat de invloed van de rivierafvoer al zo sterk in het kribvak merkbaar is, dat scheepspassages nauwelijks tot een toename van schuifkrachten op de bodem, en daarmee zandtransport in het kribvak leiden.

De combinatie van een minder sterke invloed van scheepvaart op de water- en sedimentbeweging in kribvakken in bochten met het geringe percentage kribvakken in bochten ten opzichte van het totaal voor de Waal, betekent dat de rol van scheepvaart in relatie tot het gedrag van kribvakstranden hoofdzakelijk een verhaal is van de rechte trajecten van de rivier. Het is daarmee verantwoord om de kwantificering van de invloed van scheepvaart

op de zandbalans van kribvakken langs de Waal te baseren op de resultaten van de vakken bij Druten.

Ontwikkeling scheepvaart en effect op kribvakken:

Ten aanzien van scheepvaart op de Waal moeten 2 aspecten van elkaar worden onderscheiden: de samenstelling van de binnenvaartvloot en de wijze waarop de scheepvaart is georganiseerd. De samenstelling van de binnenvaartvloot is in de afgelopen tientallen jaren veranderd met een verschuiving van kleine naar grote schepen (figuur 2.2.A). Het totaal aantal schepen is hierbij afgenomen. De organisatie van de scheepvaart is ook fors veranderd in de zin dat het veel meer een 24-uurs activiteit is geworden. Dit betekent dat het aantal passages van grote schepen sterker in de richting van de grote schepen is geschoven dan op grond van de samenstelling van de binnenvaartvloot zou worden afgeleid (figuur 2.2.B). Wat betreft de toename van het aantal passages van grote schepen valt op dat dit met name betrekking heeft op de zogenaamde motorschepen, de schepen met eigen aandrijving (figuur 5.18). De duwvaart is, na een snelle opkomst in de zeventiger jaren, sindsdien min of meer constant gebleven.

Bovenstaande ontwikkeling van de scheepvaart drukt zijn stempel op de sedimenthuishouding van kribvakken. Verwacht mag worden dat de invloed van passerende scheepvaart op de water- en sedimentbeweging in kribvakken in de afgelopen 30 jaar fors is toegenomen. Op grond van neurale netwerken, statistieken van de scheepvaart en aannames over kribvak(strand) eigenschappen is een berekening gemaakt van deze verwachte toename van scheepsinvloeden. Voor de periode 1970-2001 wordt bijna een verdubbeling berekend van het jaarlijks zandverlies uit kribvakken (figuur 5.20) en de erosie van het strand (figuur 5.21) bij lage – gemiddelde afvoeren. Opvallend is de geringe bijdrage van de duwvaart aan dit zandverlies. Als de toename van het aantal scheepspassages van de afgelopen jaren wordt doorgetrokken naar 2010 is de verwachting dat de invloed van scheepvaart, op grond van de gedane aannames, nog met zo'n 15% zal toenemen. Deze toename zou dan geheel het gevolg zijn van de motorschepen. De relatieve invloed van de duwvaart zou nog verder afnemen.

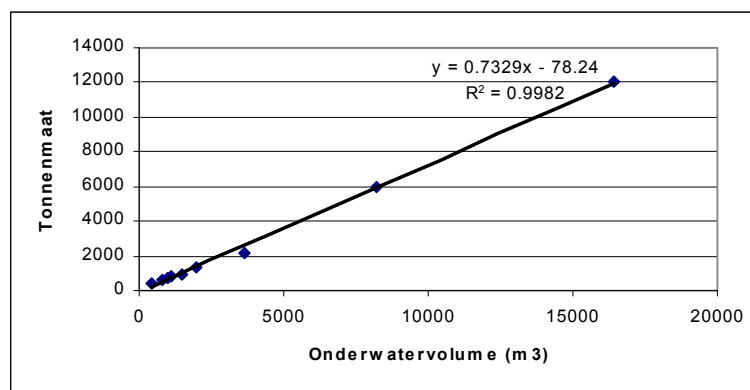
Rol duwvaart:

De, volgens de berekeningen in dit rapport, geringe invloed van de duwvaart ten opzicht van de rest van de scheepvaart is een opvallende conclusie. Te meer daar in de jaren tachtig en begin jaren negentig veel onderzoek is verricht naar de invloed van 4- en 6-baksduwvaart op de water- en sedimentbeweging in kribvakken. Zowel veldonderzoek (paragraaf 3.3) als modelonderzoek (paragraaf 3.4). Destijds verwachtte men de opkomst van 6-baksduwvaart. Er was inzicht gewenst in de consequenties van de verschuiving naar meer 6-baksduwvaart voor de sedimenthuishouding van de kribvakstranden. Op grond van de resultaten in deze studie lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat men destijds de rol van duwvaart voor processen in kribvakken heeft overschat. Het effect van een enkele passage van een 4-baksduwstel op de water- en sedimentbeweging in kribvakken, in vergelijking met de passage van een gewoon schip, is weliswaar enkele tot vele malen zo groot. De frequentie van vóórkomen van passages van gewone schepen is nog veel groter dan de passage-frequentie van duwstellen. Met name het effect van de grotere passage-frequentie van de grotere motorschepen domineert over het effect van een grotere invloed van individuele passages van duwstellen. In dit opzicht is bij studies in het verleden wellicht te snel de beperking gelegd bij onderzoek

naar alleen de duwvaart. Uit veld- en modelonderzoek bleek dat 6-baksduwstellen, ten opzichte van 4-baksduwstellen, leiden tot maximaal 50% hogere stroomsnelheden in de uitstroompunten van kribvakken met wellicht een 5.5 keer zo groot sedimenttransport tot gevolg. De opkomst van 6-baksduwvaart heeft overigens nauwelijks plaatsgevonden. Op grond van de inzichten in dit rapport lijkt het waarschijnlijk dat een niet al te grote verschuiving van 4-baks- naar 6-baksduwvaart geen grote gevolgen voor de kribvakstranden zou hebben gehad. Duwvaart lijkt geen bedreiging voor de stabiliteit van kribvakstranden. Sterker nog, als met de opgestelde neurale netwerken een scenario wordt doorgerekend waarbij de totale omvang van het vrachtvervoer over de Waal per jaar uitsluitend met 4-baksduwstellen zou worden uitgevoerd, betekent dit zelfs een afname van de invloed van scheepvaart op het zandverlies uit kribvakken. De afname van de scheepvaart intensiteit is dan zo sterk dat dit effect het individuele effect per scheepspassage overheerst.

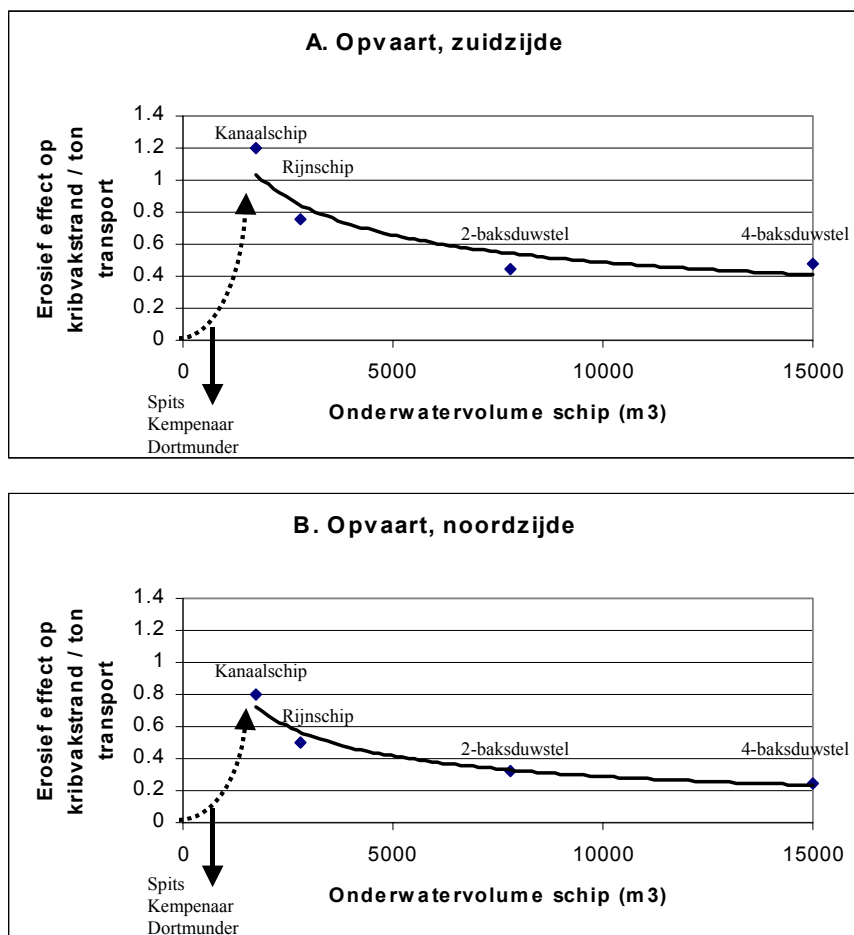
Vuistregels erosief effect scheepsgrootte:

Uit de interpretatie van de invloed van de grotere schepen en duwstellen op de sedimenthuishouding van kribvakken kan de vuistregel worden afgeleid dat de invloed op deze sedimenthuishouding per getransporteerd volume afneemt met een toename van het laadvermogen van het daarvoor gebruikte schip. Maar dit geldt alleen voor de grotere schepen. Aan de andere kant blijkt er een ondergrens te zijn waar onder schepen een verwaarloosbare invloed hebben (figuren 4.10 en 4.11). Op grond van de combinatie van deze resultaten zal de relatie tussen het effect per getransporteerde ton vracht en de scheepsgrootte waarschijnlijk het karakter hebben van de curve in figuur 6.2. Deze figuur is gebaseerd op alle voorgaande informatie over de passagestatistieken per jaar en de effecten per schip volgens de neurale netwerken. Als tussenstap moest nog wel eerst een relatie worden gelegd tussen onderwatervolume en de tonnenmaat (= transport in tonnen gewicht). Deze relatie is gebaseerd op statistieken van de Belgische binnenvaart op internet (www.binnenvaart.be) en is weergegeven in figuur 6.1. Dankzij de combinatie van al deze informatie kan in figuur 6.2 het erosief effect op de kribvakstranden per ton vervoerde vracht worden uitgezet tegen het hiervoor gebruikt schip, qua grootte uitgedrukt in onderwatervolume. De situatie in deze figuur geldt voor de situatie van opgaande vaart. Voor de afgaande vaart is een figuur als die van figuur 6.2 niet te maken omdat de relatie tussen onderwatervolume en gewicht getransporteerde vracht niet bekend is als niet kan worden uitgegaan van het maximale laadvermogen, zoals in figuur 6.1.



Figuur 6.1. De relatie tussen onderwatervolume en de hierbij horende tonnenmaat van de verschillende scheepstypen in de binnenvaart (bron: www.binnenvaart.be).

De eenheid op de y-as is 10^{-9} m erosie van het strandoppervlak per ton getransporteerde vracht per jaar. Maar deze eenheid is op zich niet zo relevant. Het gaat om het relatieve verloop van de curve. De curve kan worden beschouwd als de erosieve druk van scheepvaart op het strand langs de oever. Afgaand op de resultaten in figuur 6.2 is de trend van een toename van de scheepvaartintensiteit voor de motorschepen en het gelijk blijven van de intensiteit van de duwvaart (figuur 5.18) een ongewenste situatie en zou een grotere rol van duwvaart gunstig kunnen uitpakken.



Figuur 6.2. De erosieve druk van stroomopwaartse varende scheepvaart op het kribvakstrand, uitgedrukt per ton transport voor verschillende scheepstypen (in 10^{-9} m erosie van het strandoppervlak per ton getransporteerde vracht per jaar), voor de zuid- (A) en de noordzijde (B) van de Waal.

Met de stippellijn is aangegeven hoe de relatie tussen erosief effect per ton transport en de scheepsgrootte vermoedelijk zal zijn voor de schepen kleiner dan de grenswaarde waarvoor de neurale netwerken zijn opgesteld. Meer dan een vermoeden kan hiervoor niet worden gegeven, vandaar de stippellijn. Het vermoeden van een verwaarloosbare rol voor de schepen in de klassen Spits, Kempenaar en Dortmunder bleek uit de gevoeligheidsanalyses met neurale netwerken. Een onderbouwing van dit vermoeden werd ook gevonden in de analyse van de bijdragen van zuiging

en secundaire golven aan de schuifspanning van de waterbeweging op het sediment in de kribvakken, voor de passage van de grotere schepen (figuur 5.4). De schuifspanning bleek voor 80% te worden veroorzaakt door de zuiging. Secundaire golven spelen bij de grotere schepen dus een ondergeschikte rol. Deze secundaire golven zijn voor de kleinere schepen juist de enige component die in het kribvak merkbaar is.

Opgemerkt moet worden dat bij de invloed van scheepvaart op milieu-omstandigheden in de rivier verder moet worden gekeken dan alleen de sedimenthuishouding van de kribvakken. Als gekeken wordt naar de invloed van bijvoorbeeld stroming (zuiging) op bodemleven in het kribvak en/of de vaargeul, kunnen conclusies anders uitpakken.

Succes toepassing neurale netwerken:

Voor het vaststellen van relaties tussen eigenschappen van scheepspassages en de water- en sedimentbeweging in kribvakken is gekozen voor het gebruik van kunstmatige neurale netwerken. Gezien het vernieuwende karakter van deze toepassing is de inzet van neurale netwerken in kleine stappen uitgevoerd. Het geheel aan resultaten overziend, mag gesteld worden dat neurale netwerken een geschikt middel zijn om de invloed van scheepvaart op de water- en sedimentbeweging langs de oever te kwantificeren. De kwaliteit van de voorspelbaarheid (tabel 5.3) was in zijn algemeenheid niet erg hoog. Maar deze kwaliteit moet beschouwd worden in het licht van de complexiteit van de processen en de beperkte kwaliteit van de invoer- en uitvoergegevens. Wat betreft de invoergegevens moest een aantal essentiële eigenschappen van de scheepspassages worden geschat. Met name de passage-afstand uit de oever zou moeten worden gemeten in plaats van geschat. Wat betreft de uitvoergegevens was de gebruikte meettechniek voor het kwantificeren van de zandconcentratie (en dus het zandtransport) onnauwkeurig. Inmiddels zijn betere meettechnieken beschikbaar. Inzet van deze meettechnieken voor het verkrijgen van uitvoergegevens zal waarschijnlijk leiden tot beter presterende neurale netwerken. Op grond van de ervaring uit het hier gerapporteerde onderzoek wordt gesteld dat neurale netwerken succesvol kunnen worden toegepast bij het vaststellen van relaties tussen scheepvaart en de water- en sedimentbeweging in kribvakken.

Uit meetresultaten blijkt dat bij het onderzoek naar scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging in kribvakken vooralsnog moet worden teruggevallen op 'black box' technieken als neurale netwerken. Het beschrijven van de processen in een meer inzichtelijk oorzaak – gevolg verband ('white – grey box') ligt (nog) niet binnen handbereik. Een belangrijke factor die complicerend werkt is de interferentie van de waterbeweging ten gevolge van verschillende scheepspassages. Het komt op de Waal zelden voor dat de passage van een schip als één event kan worden beschouwd die in zijn geheel de gemeten water- en sedimentbeweging verklaart. De werkelijkheid is dat deze gemeten waardes het gevolg zijn van de betreffende passage én naijleffecten van daaraan voorafgaande passages. Dit leidt er toe dat de effecten van scheepspassages elkaar kunnen versterken of afzwakken, en dat ook zonder direct aanwijsbare scheepspassages naijleffecten een rol kunnen spelen. Al deze verschijnselen zijn meerdere keren waargenomen. Overigens zullen deze effecten de voorspelbaarheid van neurale netwerken negatief beïnvloeden doordat scheepspassages als events worden beschouwd, en dus 'losgeknipt' worden van de voorgeschiedenis.

6.2. De sedimenthuishouding van kribvakken bij lage – gemiddelde afvoeren

Erosie strand op jaarbasis door scheepvaart volgens neurale netwerken:

De invloed van scheepvaart, zoals gemodelleerd met de neurale netwerken, zal spelen bij lage tot gemiddelde afvoeren. Deze invloed zal relatief groot zijn bij lage afvoeren, als de zuiging sterk is en de schuifspanningen bij de bodem door de geringe waterdiepte hoog zijn. Met een toename van de afvoer zal de invloed van scheepvaart op de water- en sedimentbeweging in kribvakken afnemen. Hoe de relatie tussen scheepsinvloeden en afvoer in elkaar steekt, is niet bekend. Het uitgevoerde onderzoek biedt niet de mogelijkheid om hier uitspraken over te doen. Daartoe zijn metingen nodig in één bepaald kribvak bij verschillende afvoeren (verspreid over het jaar), die voldoende lang duren om per meetmoment in het jaar een representatieve steekproef van scheepspassages te hebben.

In dit onderzoek is er van uitgegaan dat de meetseries van de zomers van 1996 en 1997 representatief zijn voor de gehele periode met gemiddelde en lagere afvoeren. Dit is het grootste deel van het jaar en daarom zijn jaarstatistieken van scheepspassages gebruikt voor de berekening van het langjarige effect van scheepspassages op de sedimenthuishouding van kribvakken voor de Waal als geheel. Deze jaarstatistieken zouden eigenlijk moeten worden verminderd met de passages tijdens hoge afvoeren. Maar deze correctie zou de conclusies in dit rapport niet hebben beïnvloed en is daarom buiten beschouwing gelaten.

Er wordt dus vanuit gegaan dat met de neurale netwerken, de eigenschappen van kribvakstranden langs de Waal en jaarstatistieken van de scheepvaart een goed beeld kan worden verkregen van de sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal bij gemiddelde en lage afvoeren. De berekeningen wijzen op een erosie van de kribvakstranden van een halve tot maximale 2 decimeter per jaar (figuur 5.21). Dit is een realistische orde van grootte. Als de totale erosie van kribvakstranden langs de Waal wordt berekend, levert dit aan de stroomafwaartse zijde van de Waal een zandbron op die goed past bij de zandstromen in de sedimentbalans van Ten Brinke et al. (2001).

Het jaarlijkse zandverlies uit kribvakken door passerende scheepvaart is berekend voor de zuid- en noordoever afzonderlijk. Dit zandverlies is volgens de berekeningen aan de zuidzijde ongeveer 2 keer zo groot als aan de noordzijde (figuren 5.21 en 5.23).

Erosie strand op jaarbasis volgens monitoring bodemligging:

Een onderbouwing van de resultaten die zijn gebaseerd op de neurale netwerken wordt verkregen met de resultaten van de langjarige monitoring van de bodemligging van kribvakstranden. Uit deze resultaten blijkt dat in periodes van lage afvoeren erosie van de kribvakstranden langs de Waal optreedt. De omvang van deze erosie op jaarbasis is, berekend als gemiddelde, lager dan de erosie op jaarbasis volgens de scheepsinvloeden. Maar de orde van grootte is vergelijkbaar. Bovendien dient men zich te realiseren dat de berekende gemiddelde termen met name voor de resultaten van de monitoring met een brede spreidingsband (1 keer de standaarddeviatie) zijn omgeven. Overigens is een wat lagere waarde voor de erosie volgens de monitoring in overeenstemming met de hiervoor gemaakte opmerking dat de jaarlijkse erosie door scheepsinvloeden

overschat zal zijn doordat periodes met hogere afvoeren niet buiten beschouwing zijn gelaten.

Een en ander betekent dat de resultaten volgens de monitoring en de scheepsinvloeden volgens de neurale netwerken elkaar goed onderbouwen. Het bij de monitoring geconstateerde zandverlies uit kribvakken bij lagere afvoeren kan dus heel goed het gevolg zijn van de scheepsgeïnduceerde waterbeweging. Meer zekerheid hierover wordt verkregen door ook voor de monitoring een onderscheid naar noord- en zuidoever te maken. Dit is gedaan in figuur 5.31 en ook hieruit blijkt voor de zuidoever een ongeveer 2 keer zo grote erosie als voor de noordoever. Het verhaal wordt zelfs nóg sterker als de aanzanding van kribvakstranden tijdens het hoogwater van 1998 wordt berekend. Op een tijdschaal van meerdere jaren mag je een balans van erosie en sedimentatie verwachten. Dit betekent dat een grotere erosie aan de zuidoever moet worden gecompenseerd met een vergelijkbare grotere sedimentatie tijdens een hoogwater. In figuur 5.32 is aangetoond dat dit inderdaad het geval is.

Het samengaan van een grotere erosie aan de zuidoever met een vergelijkbaar grotere sedimentatie bij hoogwater, mag dan uit oogpunt van een langjarige balans volgens verwachting zijn, logisch is dit niet zonder meer. Uit een oogpunt van processen is een hoger zandtransport naar de zuidoever bij hoogwater op dit moment niet te verklaren. Mogelijk bereiken strandtaluds in de kribvakken bij hoogwater een soort evenwichtsprofiel horende bij die omstandigheden. Een groter zandtekort aan de zuidoever wordt dan door het hoogwater 'vereffend'.

De invloed van scheepvaart op gedrag strand bij lage en gemiddelde afvoeren:

Uit bovenstaande mag geconcludeerd worden dat het wel zeer waarschijnlijk is dat kribvakstranden langs de Waal tijdens gemiddelde en lage afvoeren eroderen, en dat deze erosie in ieder geval grotendeels het gevolg is van scheepsgeïnduceerde water- en sedimentbeweging. De verschillen in beladen opvaart langs de zuidoever en grotendeels onbeladen afvaart langs de noordoever leidt tot een, waarschijnlijk 2 keer, sterkere erosie van kribvakstranden langs de zuidoever. Deze sterkere erosie aan de zuidoever wordt gecompenseerd door een grotere aanzanding van kribstranden langs de zuidoever tijdens hoge afvoeren.

Aanwijzingen voor de grote invloed van scheepvaart op het gedrag van sediment in de Waal, resulterend in de verschillen tussen noord- en zuidoever, kwamen al eerder uit andere studies. Zo constateerden Ten Brinke et al. (1998) dat de korrelgrootte van het zand in de bovenste 5 cm van de rivierbedding bij de zuidoever fijner was dan bij de noordoever. Zij relateerden dit aan een groter zandverlies uit de kribvakken (met relatief fijn zand) door de passerende beladen scheepvaart. Geheel in lijn dus met bovenstaande resultaten. Ten Brinke en Wilbers (1999) vonden in onderzoek naar de eigenschappen van beddingvormen op de bedding van de Waal systematische verschillen tussen noordelijke en zuidelijke helft die niet konden worden verklaard met het meanderpatroon van de rivier. Een relatie met de scheepvaart ligt ook hier voor de hand. Ook wat betreft bodemleven in het kribvakstrand bleken noord- en zuidoever systematisch van elkaar te verschillen: de zuidoever is armer aan bodemleven (Klink, 2001). Een armer bodemleven is verklaarbaar met hogere stroomsnelheden door scheepspassages.

6.3. De sedimenthuishouding van kribvakken bij hoge afvoeren

Transport naar de kribvakken – aanzanding van stranden:

De sedimenthuishouding van kribvakken bij hoge afvoeren kan alleen worden afgeleid uit de monitoring van de kribvakstranden. Deze dataset bevat het effect van het hoogwater van 1998, en aanwijzingen over het hoogwater van 1995 (een aangezand kribvak als vertrekpunt van de monitoring).

In voorgaande is al besproken dat het aanzandend effect van het hoogwater van 1998 goed uit de beschikbare dataset is af te leiden. De grootte van de gemiddelde waarde voor aanzanding in de kribvakken is vrij constant langs de rivier en komt voor de hele Waal uit op 373.000 m³. De onzekerheidsband (1 keer de standaarddeviatie) rond dit gemiddelde is vrij groot, maar een eventuele erosie kan vrijwel zeker worden uitgesloten. De gemiddelde waarde voor de aanzanding is slechts 134.000 m³ minder dan de jaarlijkse zandaanvoer naar de Waal over het tijdvak 1990-2000 (Ten Brinke et al., 2001). Hiermee lijkt dit getal hoog. Ten Brinke et al. (2001) lieten zien dat de zandbalans van de Waal voor een hoogwater zeer grote transporttermen bevat ten opzichte van de langjarige zandbalans (figuur 3.6). Zo werd tijdens het hoogwater van 1995 180.000 m³ zand afgezet op de oeverwallen langs de Waal (Ten Brinke et al., 1998). Een hoeveelheid die goed aansluit op de berekende aanzanding van de kribvakken tijdens het hoogwater van 1998. Een vergelijkbare hoeveelheid oeverwalsedimentatie zal hebben plaatsgevonden tijdens het hoogwater van 1998. Dit betekent dat tijdens het hoogwater van 1998 waarschijnlijk ruim 500.000 m³ zand vanuit de rivier naar de kribvakken en oeverwallen is getransporteerd. Dit is de aanvoer van bovenstrooms op jaarbasis, en twee keer de aanvoer tijdens de afvoergolf zelf (Ten Brinke et al., 2001). Dit betekent dat tijdens een fors hoogwater zoals die van 1995 en 1998 er kennelijk veel zand uit de bedding geërodeerd wordt en beschikbaar komt voor transport naar de oeverzone.

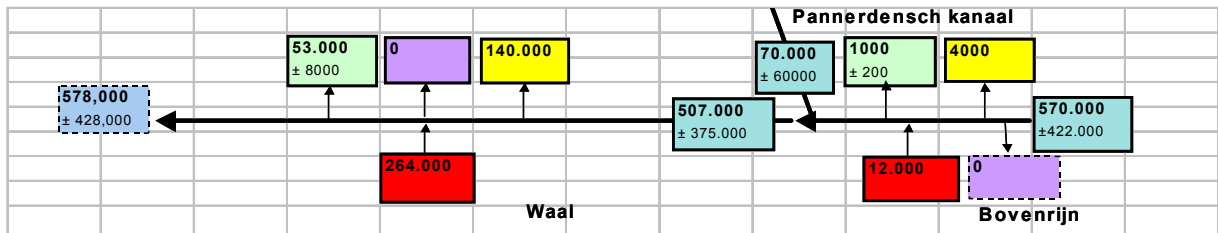
De verschilberekening van de eerste hoogteopnames uit de dataset, daterend van kort na het hoogwater van 1995, laten duidelijk een relatief grote erosie van de kribvakstranden zien. Dit is een aanwijzing dat aan het begin van de langjarige monitoring veel zand in de kribvakken beschikbaar was, waarschijnlijk afgezet door het hoogwater van 1995.

Profielaanpassing strandtalud:

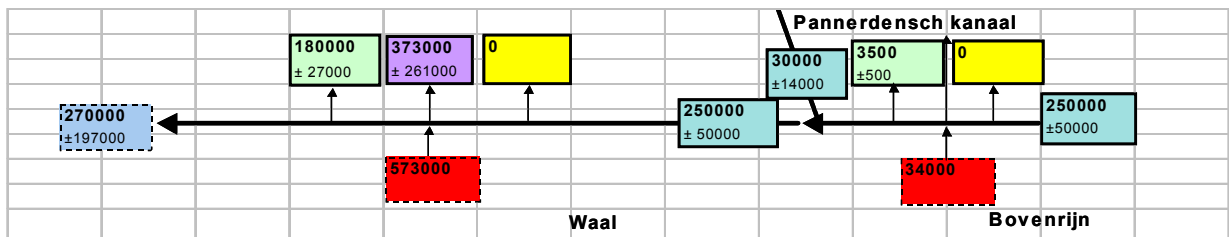
Een hoogwater zal niet alleen de hoeveelheid zand in een kribvak doen verhogen. Ook het profiel van het strand tussen vegetatielijn en de normaallijn zal veranderen. Van de stranden langs de kust is bekend dat deze tijdens een storm vlakker en breder worden: er wordt zand van het hoge deel van het strand naar het diepere talud gevoerd. Nu is een hoogwater op de rivier niet vergelijkbaar met een storm aan de kust. Maar wel is in beide gevallen sprake van meer energiedissipatie op de hogere delen van het strand, waardoor zand in beweging komt dat weer uitzakt daar waar de krachten van de waterbeweging weer wat minder zijn. Aan zee is dat het diepere onderwatertalud. Voor een rivier zullen dat oeverwal en uiterwaard zijn, maar wellicht ook het diepere talud van het kribvakstrand. In de profielen is te zien dat dergelijk vormveranderingen van het talud inderdaad zijn opgetreden (figuur 5.25).

Wellicht is een dergelijk vormverandering van het talud door een hoogwater een schakel in de langjarige stabiliteit van kribvakstranden. In de periodes tussen hoogwaters zullen met name de lagere delen van het strand eroderen omdat boven de hogere delen veel minder vaak water staat. Daar komt nog bij dat de hogere delen eerder een trend van aanzanding zullen laten zien door verstuing van zand van het strand naar de vegetatielijn (en verder de vegetatie in). Figuur 5.28 laat dit mooi zien. Uit de vorm van de profielen zijn dus aanwijzingen te halen dat hoogwaters en periodes met lage afvoeren leiden tot profielveranderingen die elkaar in evenwicht houden.

A. Periode 1990 – 2000 (m³/jaar)



B. Hoogwater 1995 (m³/hoogwater)



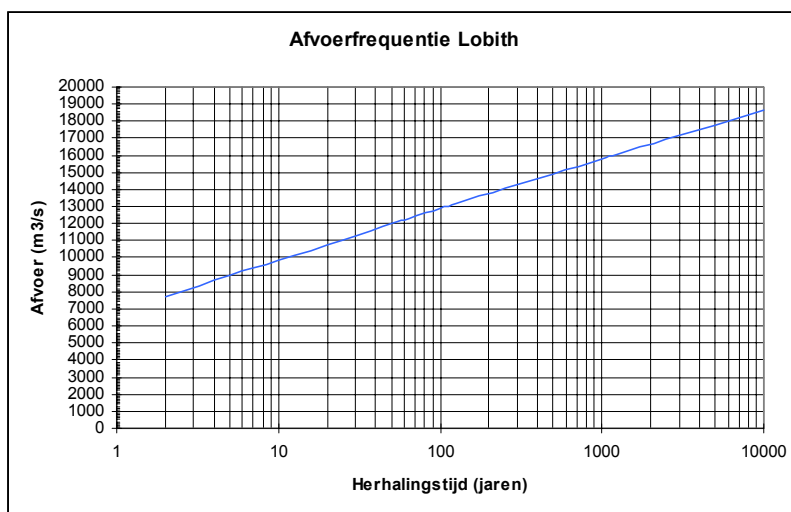
Waarden in m ³ /jaar			
	Input sediment		Hard gegeven, uit onafhankelijke bron
	Bodem verlaging/verhoging		Berekende waarde, geverifieerd
	Baggeren		Volgt uit andere waarden/aangepaste
	Kribvak erosie/depositie		
	Oeverwal depositie		
	Output sediment		

Figuur. 6.3. De balans voor zand (en grind) voor de Bovenrijn - Waal voor de periode 1990-2000 (in m³/jaar) (A) en het hoogwater van 1995 (in m³) (B). Bron: Ten Brinke et al., 2001.

6.4. De langjarige zandbalans van kribvakstranden langs de Waal

De dataset van de monitoring van de bodemligging van kribvakstranden van 1995-1999 geeft veel informatie over het langjarig gedrag van de kribvakstranden. Zelfs voor een korte tijdreeks van slechts 4 jaar. De datareeks biedt de mogelijkheid om de erosie bij lage en gemiddelde afvoer op jaarbasis te berekenen én de aanzanding tijdens een hoogwater. Met name de combinatie van deze informatie in figuur 5.33 is zeer verhelderend. Hierin wordt de cumulatieve erosie in de periode tussen de

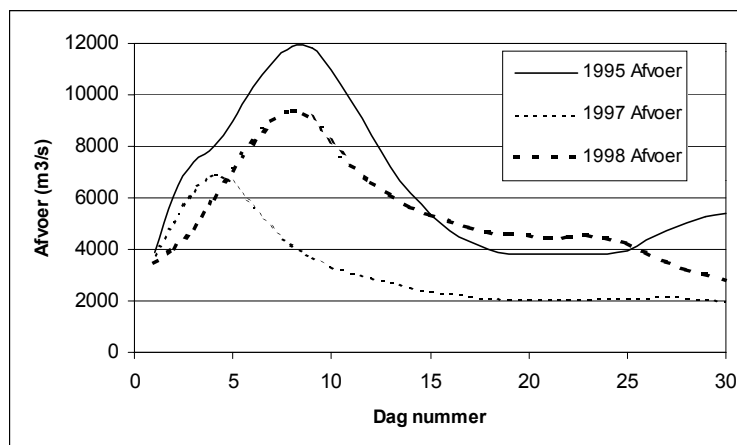
hoogwaters van 1995 en 1998 getoond samen met de sedimentatie tijdens het hoogwater van 1998. Het beeld in deze figuur is volledig in overeenstemming met de hypothese van erosie, door de scheepsgeïnduceerde waterbeweging, bij lage – gemiddelde afvoer en sedimentatie door hoogwater, waarbij beide processen langjarig met elkaar in balans zijn. Zelfs het onderscheid tussen het gedrag van de stranden aan noord- en zuidoever levert een logisch beeld op en sluit aan bij de bevindingen op grond van de berekeningen met de neurale netwerken. Figuur 5.33 laat zien dat de sedimentatie tijdens het hoogwater van 1998 groter was dan de erosie in de periode tussen de hoogwaters van 1995 en 1998. Althans, afgaand op de gemiddelde waardes want de spreiding rond deze waardes is groot en niet vermeld in figuur 5.33. Maar zelfs als wordt aangenomen dat het beeld in deze figuur de realiteit volledig weergeeft, dan nog is het verschil logisch en goed te verklaren op basis van de frequentie van voorkomen van hoge afvoeren. De tijd tussen de hoogwaters van 1995 en 1998 is namelijk aanmerkelijk korter dan op grond van de herhalingsperiode van hoogwaters mag worden verwacht (figuur 6.4). Als wordt aangenomen dat de kribvakstranden op een tijdschaal van tientallen jaren in evenwicht zijn (de hypothese), dan betekent dit dat de tijdsduur tussen hoogwaters op deze tijdschaal voldoende erosie opleveren om te worden gecompenseerd met sedimentatie tijdens een hoge afvoer. Maar binnen deze tijdschaal zullen er periodes zijn waarbij de tijdsduur van lage afvoeren langer of korter is dan gemiddeld. Dit kan er toe leiden dat over kortere tijdschalen het ene proces over het andere overheerst. In het geval van de huidige monitoring, met de uitzonderlijk hoge frequentie van optreden van hoge afvoeren in de afgelopen 10 jaar, lijkt de sedimentatie te overheersen over de erosie.



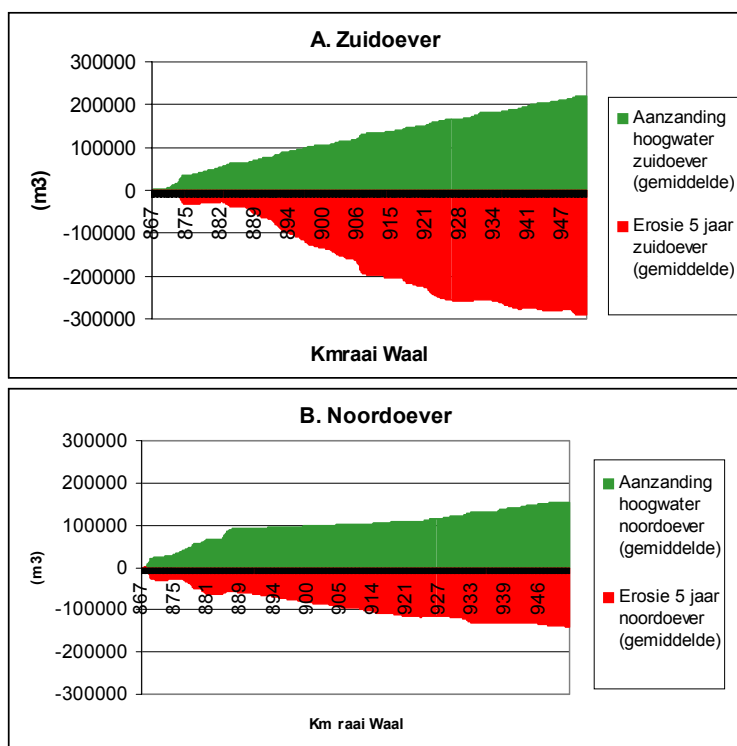
Figuur 6.4. De herhalingsperiode van hoge afvoeren bij Lobith.

De inschatting van het evenwicht tussen erosie en sedimentatie wordt bemoeilijkt door het feit dat niet bekend is hoe de grootte van de sedimentatie in kribvakken varieert met de hoogte van de afvoer. Men mag zich zelfs afvragen of een dergelijk verband wel is te leggen omdat niet alleen de hoogte van de piekafvoer maar ook de vorm en duur van de afvoergolf een rol zal spelen. Toch is wel iets te zeggen over dit evenwicht. Zo blijkt uit de monitoring dat de afvoerpiek van 1997 (7000 m³/s bij Lobith) te gering was voor aantoonbare sedimentatie in de kribvakken. Verder bleek al eerder dat de hoogwaters van 1993/1994, 1995 en 1998

ongeveer evenveel zand op de oeverwallen hebben afgezet, en dat deze zandaanvoer niet leek te variëren met de onderlinge verschillen in vorm, duur en piekhoogte van de afvoergolven (Ten Brinke et al., 2001). Uit de combinatie van deze gegevens kan, met enig voorbehoud, de conclusie worden getrokken dat afvoeren die leiden tot een aantoonbare sedimentatie van kribvakken hoger zijn dan de piekafvoer van 1997 en kleiner of gelijk aan de afvoer van 1998 (9400 m³/s bij Lobith) (figuur 6.5). Uit figuur 6.4 kan dan worden afgeleid dat het dan waarschijnlijk gaat om afvoeren met een herhalingsperiode van ongeveer 5 jaar. Dit blijft natuurlijk een inschatting, maar het is interessant om deze inschatting door te berekenen in het beeld van figuur 5.33 door de erosie van het strand door te trekken naar een duur van 5 jaar en dan te vergelijken met de sedimentatie.



Figuur 6.5. De afvoergolven van 1995, 1997 en 1998 bij Lobith.



Figuur 6.6. De cumulatieve erosie en sedimentatie van kribvakstranden langs de Waal tijdens de opeenvolging van periodes met lagere en hoge afvoeren, voor de stranden langs de zuid- (A) en noordoever (B).

Dit is gedaan in figuur 6.6, voor de zuid- en de noordoever afzonderlijk. Volgens deze berekening zijn erosie en sedimentatie goed met elkaar in balans. Het is dus zeer aannemelijk gemaakt dat erosie en sedimentatie van kribvakstranden langs de Waal over een tijdschaal van enkele tientallen jaren met elkaar in balans zijn.

In paragraaf 1.2 is de doelstelling van deze studie geformuleerd:

De kwantificering van de temporele variatie in de netto aan-/afvoer van sediment naar/uit de kribvakken, de analyse van processen en factoren die de sedimentbeweging sturen, en de modellering van de sedimenthuishouding van kribvakken door parametrisatie van causale verbanden.

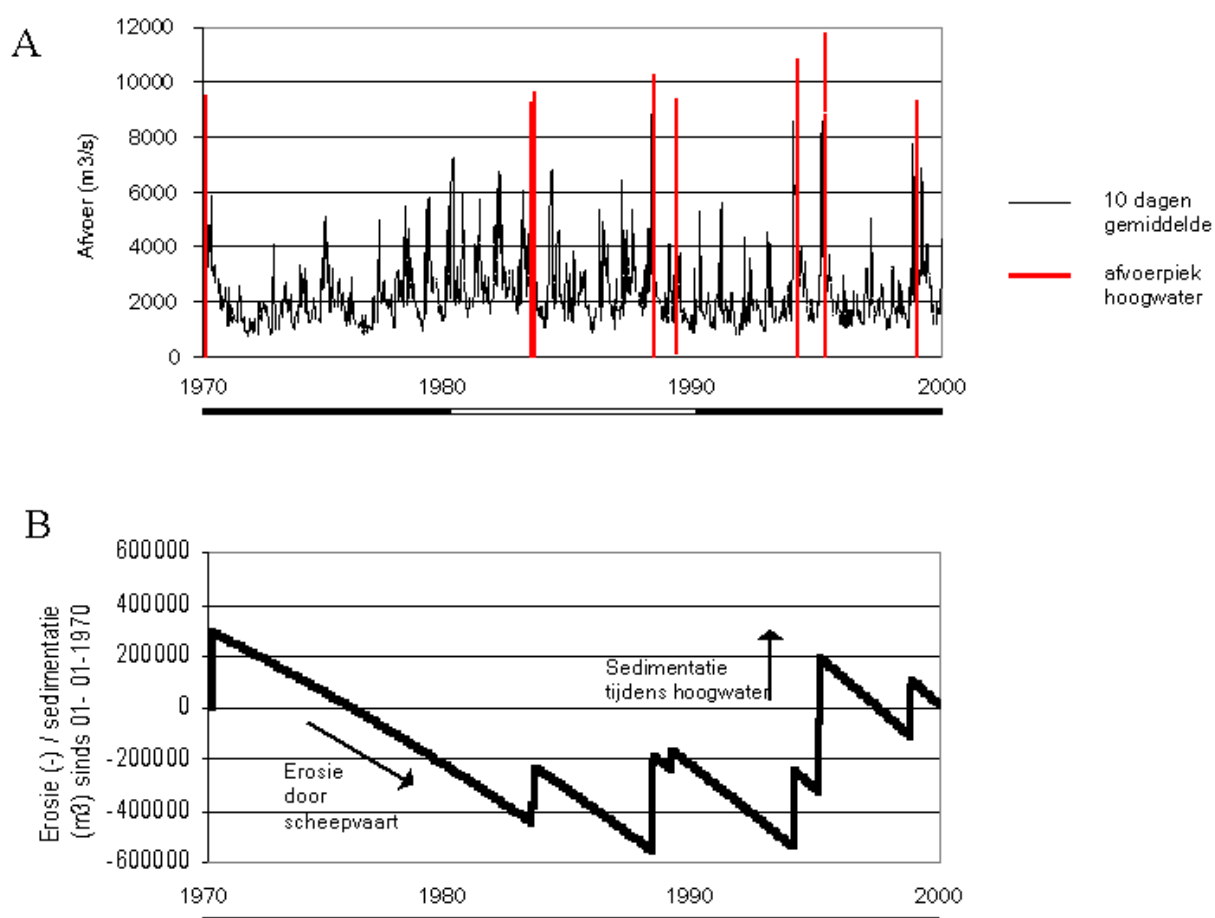
Geconcludeerd kan worden dat de aan- en afvoer van sediment naar en uit de kribvakken met de beschikbare data voldoende betrouwbaar kan worden gekwantificeerd om inzicht te krijgen in het grootschalig en lange termijn gedrag van de kribvakstranden. De sturende processen achter dit grootschalige gedrag zijn duidelijk in beeld gekomen. Voor de periodes tussen hoge afvoeren kunnen de causale verbanden tussen oorzaak (scheepvaart) en gevolg (erosie van het strand) met een redelijke betrouwbaarheid relaties worden vastgelegd.

Het grootschalig en lange termijn gedrag van de kribvakstranden kan worden beschouwd als een ademen van de stranden waarbij op een tijdschaal van enkele tientallen jaren erosie tijdens periodes met lage en gemiddelde afvoeren en sedimentatie tijdens hoogwaters elkaar afwisselen. Op grond van de informatie in dit rapport kan dit ademen worden gevisualiseerd. Dit is gedaan voor de periode 1970-2000 door aan de dagafvoer een waarde voor erosie of sedimentatie toe te kennen. Hierbij zijn de volgende aannames gedaan:

- de periode 1970-2000 is voldoende lang om genoeg periodes met erosie en depositie te omvatten
- de erosie gedurende 1995-1998 volgens de tijdserie van de bodemhoogtes is een goede weergave voor de situatie van 2000
- de erosie voor de situatie van 1970 volgt uit de erosie voor 2000 en de erosie-ratio die kan worden berekend uit de analyses met de neurale netwerken (scheepvaartintensiteit 1970 – 2000)
- van 1970 naar 2000 neemt de erosie-intensiteit geleidelijk aan toe met de toename van de scheepvaartintensiteit
- sedimentatie tijdens hoge afvoeren vindt alleen plaats bij afvoeren $> 9850 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (herhalingstijd eens in de 5 jaar), en deze sedimentatie per dag is steeds de sedimentatie per dag volgens de data van het hoogwater van 1998 ongeacht de daadwerkelijke hoogte van de afvoer $> 9850 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Het resultaat van deze simulatie van aanzanding en erosie staat in figuur 6.7. In deze figuur is 1 januari 1970 als startpunt gekozen. De bovenste figuur toont de afvoercurve, de onderste figuur de visualisatie van de afwisseling van erosie en sedimentatie. In deze figuur is als startwaarde op de linker verticale as 0 gekozen. Op basis van het afvoerverloop groeit of vermindert de hoeveelheid zand in de kribvakken langs de Waal (de blauwe curve). De figuur illustreert het proces van geleidelijke erosie in periodes met lagere afvoeren en momenten met snelle sedimentatie tijdens hoogwaters. Met rode lijnen is de afvoer tijdens de afvoergolven $> 8950 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ aangegeven. Deze afvoergolven leiden er toe dat de hoeveelheid zand in

de kribvakken in korte tijd op een hoger plan wordt getild, waarna dit zand weer geleidelijk aan naar de rivier wordt gevoerd. Hoewel deze visualisatie op aannames is gebaseerd, en het verloop van de blauwe curve wellicht een sterk geschematiseerd beeld van de werkelijkheid geeft, geeft het waarschijnlijk in grote lijnen toch een goede interpretatie van het ademen van de kribvakstranden. In de eerste plaats doordat de aannames in dit rapport redelijk goed zijn onderbouwd. In de tweede plaats doordat met deze aannames de afwisseling van erosie en sedimentatie na 30 jaar niet ontspoort in een overheersing van het ene proces over het andere, hetgeen in overeenstemming is met de werkelijkheid. De rekenresultaten uit de neurale netwerken en de monitoring van de stranden, toegepast op een afvoerreeks van de afgelopen 30 jaar levert dus het beeld op van een ademend strand dat op een tijdschaal van tientallen jaren geen overheersing van erosie of sedimentatie laat zien.



Figuur 6.7. Een visualisatie van het ademen van de kribvakstranden langs de Waal in de periode 1970-2000, met geleidelijke erosie bij lagere afvoeren en snelle sedimentatie tijdens hoogwaters.

7 Conclusies

Invloed scheepvaart – ontwikkelingen bij lage tot gemiddelde afvoer:

Volgens de berekeningen met de neurale netwerken, statistieken van de scheepvaart en eigenschappen van de kribvakstranden langs de Waal is de erosie van zand uit de kribvakken door passerende scheepvaart bij lage – gemiddelde afvoeren in de periode 1970 – 2001 bijna verdubbeld. Op grond van een extrapolatie van de groei van de binnenvaart naar 2010 zal deze erosie in 2010, t.o.v. 2001, naar verwachting met 15% toenemen.

De berekeningen met de neurale netwerken wijzen op een eroderend effect van de scheepvaart op de kribvakstranden in de orde van 0.5-2 dm per jaar. Dit is een realistische orde van grootte. Als de totale erosie van kribvakstranden langs de Waal wordt berekend, levert dit aan de benedenstroomse zijde van de Waal een zandbron op die goed past bij de zandstromen in de sedimentbalans van Ten Brinke et al. (2001).

De duwvaart levert een zeer geringe bijdrage aan de erosie van zand uit de kribvakken langs de Waal. Per scheepspassage is het effect van duwstellen ten opzichte van motorschepen op de water en sedimentbeweging in kribvakken weliswaar groter, maar dit effect wordt ruimschoots teniet gedaan door de grotere frequentie van vóórkomen van de motorschepen (Kanaalschepen en Rijnschepen). Op grond van een extrapolatie van de groei van de binnenvaart zal de relatieve bijdrage van duwvaart aan de erosie van kribvakstranden langs de Waal in de komende 10 jaar nog verder afnemen.

Bij de huidige omvang van de binnenvaart vormt de duwvaart geen bedreiging voor de stabiliteit van de kribvakstranden langs de Waal. Een verschuiving van de samenstelling van de binnenvaart naar meer duwvaart ten kosten van de kleinere schepen zal, bij een gelijkblijvende omvang van het transport met de binnenvaart, geen sterker eroderend effect op de kribvakstranden hebben.

Secundaire golven worden met name opgewekt door passerende kleine schepen. De grote schepen veroorzaken veel meer de zuiging. Studies met de neurale netwerken laten zien dat schepen korter dan 65 meter geen rol van betekenis spelen voor de sedimenthuishouding van kribvakken. Voor de grotere schepen die de zuiging veroorzaken, is de vuistregel afgeleid dat de invloed op de sedimenthuishouding van kribvakken, per getransporteerde ton goederen, afneemt met een toename van het laadvermogen van het daarvoor gebruikte schip. De 4-baksduwvaart is voor de stabiliteit van kribvakstranden langs de Waal dus een relatief gunstige vorm van binnenvaart. De trend van een toename van de scheepvaartintensiteit voor de motorschepen en het gelijk blijven van de intensiteit van de duwvaart is voor de stabiliteit van kribvakstranden een ongunstige situatie.

Op de Waal volgt de beladen opvaart over het algemeen de zuidoever en de minder of zelfs onbeladen afvaart de noordoever. Hierdoor is het jaarlijkse zandverlies uit kribvakken door passerende scheepvaart voor de zuidzijde ongeveer 2 keer zo groot als voor de noordoever.

De resultaten uit de monitoring van de bodemligging van de kribvakstranden zijn in overeenstemming met de resultaten volgens de neurale netwerken. Ook de monitoring laat tijdens een periode van lage –

gemiddelde afvoer erosie van het strand zien, en wel eveneens een twee keer zo grote erosie aan de zuid- ten opzichte van de noordoever.

De resultaten uit dit onderzoek ten aanzien van de rol van scheepvaart bij de water- en sedimentbeweging langs de oevers van de Waal zijn in overeenstemming met eerdere bevindingen ten aanzien van de rol van scheepvaart: systematische verschillen in korrelgrootte (Ten Brinke et al. (1998)) en beddingvormen (Ten Brinke en Wilbers (1999) tussen noord- en zuidoever van het zomerbed, en systematische verschillen in de rijkdom aan bodemleven in het kribvakstrand tussen noord- en zuidoever (Klink, 2001).

De langjarige balans:

Voldoende hoge afvoeren leiden tot aanzanding van kribvakstranden. De term 'voldoende hoog' kan redelijk goed worden gedefinieerd: een afvoer tussen de hoogwaters van 1997 en 1998 in. Voor het hoogwater van 1998 wordt een totaal zandtransport vanuit de rivier naar de kribvakken berekend van 373.000 m³. Samen met het zandtransport naar de oeverwallen betekent dit een zandtransport naar de oeverzone van ruim 500.000 m³. Dit is de zandaanvoer bovenstrooms op jaarbasis, en twee keer de aanvoer naar de Waal tijdens de afvoergolf zelf. Dit betekent dat tijdens een fors hoogwater kennelijk veel zand uit de bedding geërodeerd wordt en beschikbaar komt voor transport naar de oeverzone.

De 'voldoende hoge' afvoer voor aanzanding van kribvakstranden heeft een herhalingsperiode van ongeveer 5 jaar. Dit betekent dat deze afvoer, uitgaande van de hypothese van een langjarig evenwicht, de erosie gedurende een periode van 5 jaar moet compenseren. Als de erosie volgens de monitoring wordt doorgetrokken naar een periode van 5 jaar, blijken deze hoeveelheid erosie (430.000 m³) en bovengenoemde sedimentatie (373.000 m³) inderdaad goed in balans.

Periodes met lagere afvoeren leiden niet voor het hele kribvakthalud tot erosie. Het hoogste deel van het strand nabij de aansluiting met de vegetatie van de oeverwal laat veelal sedimentatie zien door verstuuving van het zand vanaf het strand naar de vegetatielijn. Deze sedimentatie wordt bij hoge afvoer teniet gedaan als het strand weer afvlakt door erosie van het hoge en sedimentatie van het lage deel van het strandthalud.

De monitoring van de bodemligging van de kribvakstranden onderbouwt de hypothese die aan de basis van dit onderzoek staat: periodes van erosie bij lage en gemiddelde afvoeren en periodes van sedimentatie bij hoge afvoeren wisselen elkaar af, en wel dusdanig dat op een termijn van tientallen jaren de kribvakstranden in evenwicht zijn. Dit zogenaamde ademen van de kribvakstranden kan voor de periode 1970-2000 aannemelijk worden gemaakt door de in deze studie berekende kentallen voor sedimentatie en erosie aan de afvoerreeks van 30 jaar te koppelen. De rekenresultaten uit de neurale netwerken en de monitoring van de stranden, toegepast op een afvoerreeks van de afgelopen 30 jaar levert dus het beeld op van een ademend strand dat op een tijdschaal van tientallen jaren geen overheersing van erosie of sedimentatie laat zien

Processen en methodiek:

De erosie van zand van de kribvakstranden wordt met name bepaald door de zuiging van het water uit de kribvakken bij de passage van schepen, en het weer vollopen van de kribvakken na de passage. De invloed van secundaire golven is, ten opzichte van de invloed van deze zuiging, verwaarloosbaar.

Neurale netwerken kunnen succesvol worden toegepast bij het vaststellen van relaties tussen scheepvaart en de water- en sedimentbeweging in kribvakken.

De scheepvaartintensiteit op de Waal is dermate hoog dat de (nailende) invloed van (reeds gepasseerde) scheepvaart op de waterbeweging in kribvakken vrijwel altijd aanwezig is. Ook speelt interferentie van de effecten van verschillende passages een rol. Dit stelt grenzen aan de voorspelbaarheid met neurale netwerken doordat scheepspassages als 'events' worden gezien waarbij de invloed van de voorgeschiedenis op de water- en sedimentbeweging ten onrechte, maar noodgedwongen, wordt verwaarloosd.

Aanbevelingen voor nader onderzoek

Het zou al te gemakkelijk zijn om hier een uitgebreide lijst met aanbevelingen voor nader onderzoek te formuleren. In dit rapport zijn vele vragen beantwoord of deels beantwoord. Maar met deze beantwoording doemen nog veel meer vragen op. Een drietal vragen dient hier toch zeker genoemd te worden met een aanbeveling voor nader onderzoek. Omdat het hier gaat om lacunes in onze kennis van het grootschalige morfologische gedrag van de rivier.

1. De berekende zandaanvoer naar kribvakken en oeverwallen langs de Waal tijdens hoogwater is aanmerkelijk hoger dan de aanvoer van bovenstrooms. Dit suggereert dat hoogwater op de Waal leidt tot een daling van het zomerbed. Wellicht als netto resultaat van lokaal sterke sedimentatie en erosie. Kan deze bodemdaling uit beschikbare peilingen van het zomerbed vóór en ná een afvoergolf worden afgeleid en onderbouwt dit resultaat de bevindingen uit deze nota?

2. Het zandverlies uit kribvakken door scheepvaart is alleen gemeten bij constante, lage afvoer. Verwacht mag worden dat dit zandverlies per eenheid van tijd (of reeks scheepspassages) afneemt als de afvoer (waterstand) toeneemt. Deze afname kan worden vastgesteld uit een tijdreeks van metingen aan water- en sedimentbeweging over een voldoende variabele afvoercurve. Hoe ziet deze curve er uit en in welke mate is deze curve in strijd met de aannames gedaan in deze nota?

3. De resultaten in deze nota laten zien dat een 2 keer zo grote erosie van kribvakstranden langs de zuidoever bij lage – gemiddelde afvoeren wordt gecompenseerd door een 2 keer zo grote sedimentatie bij hoogwater. Een opmerkelijk resultaat dat lijkt aan te geven dat de kribvakstranden bij hoogwater steeds weer een morfologisch evenwichtsprofiel verkrijgen waarbij grotere verliezen door erosie sterker worden gecompenseerd. Klopt deze hypothese en is er inderdaad sprake van morfologische evenwichtsprofielen van de stranden bij hoogwater? Zo ja, kan dit evenwicht worden verstoord door grotere erosie tussen hoogwaters in?

Dankwoord

Dit rapport is voor een groot deel gebaseerd op studies die sinds 1996 in kribvakken langs de Waal zijn uitgevoerd. Voor een deel zijn deze studies gerapporteerd als producten van uitbesteding en doctoraalverslagen van afstudeerders en stagiaires. Voor een deel zijn de resultaten nog niet eerder in rapport verschenen. Het totaal aan gepubliceerde en ongepubliceerde resultaten vorm het fundament van dit rapport. De auteurs van de gepubliceerde resultaten hebben hun werk uitgevoerd in samenwerking met, onder begeleiding van, of in opdracht van de auteur van deze nota. Laatstgenoemde heeft dankbaar gebruik gemaakt van de 'krenten uit de pap' van al deze publicaties. Deze dank gaat uit naar oud-studenten Bas van Maren, Jan-Willem Mol, Roger Lenders, Hennie Schans, Ineke Touwen en Aldo Janssen; (oud-)medewerkers van de Universiteit Utrecht Claus Kruyt, Aart Kroon, Jan-Rik van den Berg en Marcel van Maarseveen; Floris Schulze (Witteveen+Bos). Verder is de auteur dank verschuldigd aan de Meetdienst van de Directie Oost-Nederland en de Meetkundige Dienst, beide van Rijkswaterstaat, voor het uitvoeren van de metingen (sedimenttransport respectievelijk bodemhoogte-opnames). En natuurlijk aan enkele collega's die door te rekenen, te tekenen en mee te denken mede hun stempel op dit verhaal hebben gedrukt: Leonie Bolwidt, Leo van Hal en Emiel van Velzen.

Delen van dit onderzoek zijn gefinancierd door de Directie Oost-Nederland en het Hoofdkantoor van Rijkswaterstaat.

Referenties:

- Ancker, J.A.M. van den en P.D. Jungerius, 1997. Eolische processen langs de Waal zomer 1997. Rapport Universiteit van Amsterdam ICG-97/9.
- Bhowmik, N.G., Xia, R., Mazumder, B.S. en T.W. Soong, 1995. Return flow in rivers due to navigation traffic. *Journal of Hydraulic Engineering* 121: 914-918.
- Brinke, W.B.M. ten, Schoor, M.M., Sorber, A.M. en 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* 23: 809-824.
- Brinke, W.B.M. ten, N.M. Kruijt, A. Kroon en J.H. van den Berg, 1999. Erosion of sediments between groynes in the River Waal as a result of navigation traffic. *Spec. Publs int. Ass. Sediment.* 28: 147-160.
- Brinke, W.B.M. ten en A.W.E. Wilbers, 1999. Spatial and temporal variability of dune properties and bedload transport during a flood at a sand bed reach of the Dutch Rhine River system. *Proc. I.A.H.R. Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics. Vol. 2:* 309-318.
- Brinke, W.B.M. ten, Bolwidt, L., Snippen, E. en L.W.J. van Hal, 2001. Sedimentbalans Rijntakken 2000. Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand en grind van de Rijntakken in het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland. RIZA rapport 2001.043.
- Bruin, D. de, 1977. De Waal in de jaren 70. Rijkswaterstaat Directie Bovenrivieren Nota LTP 1977-1.
- Centraal Bureau voor de Statistiek, 1971. Statistisch Zakboek 71.
- Centraal Bureau voor de Statistiek, 1971. Statistisch Jaarboek 2002.
- Driel, G. van, D.G. Meijer en H.J. Verheij, 1993. Scheepsgeïnduceerde waterbeweging in kribvakken. Rapport WLIDelft Hydraulics Q1046.
- Garrad, P.N. en R.D. Hey, 1987. Boat traffic, sediment resuspension and turbidity in a broadland river. *Journal of Hydrology* 95: 289-297.
- Garrad, P.N. en R.D. Hey, 1988. River management to reduce turbidity in navigable broadland rivers. *Journal of Environmental Management* 27: 273-288.
- Haas, A.W. de en J.A.F. van Essen, 1987a. Onderzoek naar de invloed van duwvaart op de water- en zandbeweging in "kribvak Druten". Rijkswaterstaat Dienst Binnewateren/RIZA Nota 87.007.
- Haas, A.W. de en J.A.F. van Essen, 1987b. Onderzoek naar de invloed van duwvaart op de water- en zandbeweging in "kribvak St Andries". Rijkswaterstaat Dienst Binnewateren/RIZA Nota 87.008.

Havinga, H., H. Slootweg en J. Zeekant, 1984. Kribvakmeting t.b.v. zesbaksduwvaart op de Waal bij Druten. Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging Nota 84.9.

Hilton, J. en G.L. Phillips, 1982. The effect of boat activity on turbidity in a shallow broadland river. *Journal of Applied Ecology* 19: 143-150.

Hochstein, A.B., 1967. Navigation use of industrial canals. *Water Transportation*, Moscow Publishing House, U.S.S.R.

Hochstein, A.B. en C.E. Adams, 1989. Influence of vessel movements on stability of restricted channels. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering* 115: 444-465.

Hooke, R. LeB., 1975. Distribution of shear stress and sediment in a meander bend. *Journal of Geology* 83: 543-565.

Jurisch, R., 1986. Auswirkungen der vorbeifahrenden Schifffahrt auf den Wasserspiegel in Altwässern Messungen während der Schifffahrtsversuche auf dem Main. *Schiff & Hafen/Kommandobrücke*, Heft 11.

Klink, A., 2001. Zandsuppletie in kribvakken in de Waal. Effecten op de macrofauna. 1. T-O situatie. *Hydrobiologisch Adviesburo Klink Rapporten en Mededelingen* nr. 71.

Kornmanm, B.A., 1993. Onderzoek naar de erosie en sedimentatie in kribvakken langs de Waal. *RIZA Werkdocument* 93.149X.

Kroon, A. en S. Vermeer, 2000. Eolische processen Millinger Duin. Eolische activiteit langs de oevers van de Waal. *Rapport Universiteit Utrecht ICG* 00/5.

Leemans, J.A.A.M. en R. Reiling, 1986. Probleemverkenning naar de landschapsekologische gevolgen van oevererosie langs de Waal. *Stichting voor Toegepaste Landschapsekologie Rapport* 22.

Lenders, R.J.M., 1998. Kribvakmetingen Druten/Ochten. De opgewekte bodemschuifspanningen tijdens scheepspassages. *Afstudeerverslag Universiteit Utrecht, Fysische Geografie*.

Maaren, B. van, 1997. Kribvakmetingen Druten/Ochten. Stromingspatroon en sedimenttransport. *Afstudeerverslag Universiteit Utrecht, Fysische Geografie*.

Osborne, P.D. en E.H. Boak, 1999. Sediment suspension and morphological response under vessel-generated wave groups: Torpedo Bay, Auckland, New Zealand. *Journal of Coastal Research* 15: 388-398.

Rijn, L.C. van, 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. *Aqua Publications*, Amsterdam, The Netherlands.

Robberecht, P.C. en R. Wentink, 1986. Studie naar de invloed van (zesbaks-) duwvaart op de waterbeweging in een kribvak en op de kribstabiliteit.

Schans, H., 1998. Representativiteit van kribvakmetingen uit 1996 en 1997 ten opzichte van de hele Waal. Rapport Universiteit Utrecht ICG 98/15.

Schulze, F.H., 2000. De relatie tussen scheepspassages en de water- en sedimentbeweging in kribvakken: de toepassing van Kunstmatige Neurale Netwerken. Rapport SECI/PANH/rap.001.

Sorber, A.M., 1997. Oeversedimentatie tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995. RIZA rapport 97.015.

Termes, A.P.P., M. van der Wal en H.J. Verhey, 1991. Waterbeweging door scheepvaart op rivieren en in kribvakken. Rapport WLIDelft Hydraulics Q1046.

Touwen, I.J., 1997. Scheepsgeïnduceerde stroming in kribvakken in een bochtig deel van de Waal. Internal report of practical work no. 97.03, Universiteit Utrecht, afdeling Fysische Geografie.

Verhey, H.J. en K. Vermeer, 1987. Kribvakerosie door zes- en vierbaksduwvaart op de Waal. Verslag modelonderzoek. Rapport WLIDelft Hydraulics Q93/Q576.

Wirtz, C., ongepubliceerd. Morphodynamische Strukturen in Bühnenfeldern der Mittleren Elbe. Poster Freie Universität Berlin.

Xia, R., T.W. Soong en N.G. Bhowmik, 1994. Temporal and spatial variations of suspended sediment concentration during navigation traffic in a natural river. Hydraulic Engineering '94: 1131-1135.

Bijlage 1:

De afleiding van vereenvoudigde vergelijkingen voor de beschrijving van de invloed van scheepspassages op de water- en sedimentbeweging in kribvakken. De afleiding is gebaseerd op de neurale netwerken die zijn opgesteld voor de gevoeligheidsanalyses in paragraaf 5.3.2. Deze bijlage is een voorbeeld, te weten het neurale netwerk van het uitstroompunt in kribvak 1 bij Druten (zuidoever) voor opwaarts varende schepen.

stap 1: Normalisatie van de invoer

De invoervariabelen V en X worden genormaliseerd in Z, conform:

$$Z_{V1(OBS,FLUX)} = \frac{(V - \mu_V)}{\sigma_V} = \frac{(V - 2502.152344)}{3045.019287}; Z_{V2(EMF)} = \frac{(V - \mu_V)}{\sigma_V} = \frac{(V - 2618.250244)}{3240.791016}$$
$$Z_{X(OBS,FLUX,EMF)} = \frac{(X - \mu_X)}{\sigma_X} = \frac{(X - 101.544708)}{38.435524}$$

Hierin zijn:

V	:	onderwatervolume van het schip
X	:	passageafstand
Z _{VX}	:	genormaliseerde variabele voor het onderwatervolume of de passageafstand
μ _{VX}	:	gemiddelde Onderwatervolume of passageafstand
σ _{VX}	:	standaarddeviatie onderwatervolume of passageafstand

en staat OBS voor de integraal over de piek van de zandconcentratie (gemeten met OBS), FLUX voor het zandtransport per strekkende meter en EMF voor de stroomsnelheid (gemeten met EMF).

stap 2: transformatie van de genormaliseerde invoervariabelen naar neuronvergelijkingen

De genormaliseerde invoervariabelen Z_X en Z_V en een constante worden binnen elk van de twee neuronen weer omgezet in twee getransformeerde output variabelen, T_{1,2}, van elk neuron, conform:

$$T_{11} = \tanh((c \times w_{1,1}) + (Z_X \times w_{1,2}) + (Z_V \times w_{1,3})) = \tanh((1 \times 2.523573) + (Z_X \times 0.708455) + (Z_V \times -0.695017))$$
$$T_{12} = \tanh((c \times w_{1,1}) + (Z_X \times w_{1,2}) + (Z_V \times w_{1,3})) = \tanh((1 \times -0.039837) + (Z_X \times -0.024247) + (Z_{V1} \times -0.183680))$$
$$T_{21} = \tanh((c \times w_{2,1}) + (Z_X \times w_{2,2}) + (Z_V \times w_{2,3})) = \tanh((1 \times 0.069808) + (Z_X \times -0.105436) + (Z_{V1} \times 0.067784))$$
$$T_{22} = \tanh((c \times w_{2,1}) + (Z_X \times w_{2,2}) + (Z_V \times w_{2,3})) = \tanh((1 \times 1.657706) + (Z_X \times 0.333879) + (Z_{V1} \times -0.531532))$$
$$T_{31} = \text{sig}((c \times w_{3,1}) + (Z_X \times w_{3,2}) + (Z_V \times w_{3,3})) = \text{sig}((1 \times -7.263394) + (Z_X \times -0.872129) + (Z_{V2} \times -6.897413))$$
$$T_{32} = \text{sig}((c \times w_{3,1}) + (Z_X \times w_{3,2}) + (Z_V \times w_{3,3})) = \text{sig}((1 \times 13.197270) + (Z_X \times 2.772035) + (Z_{V2} \times -2.833196))$$

Hierin zijn:

V	:	onderwatervolume van het schip
X	:	passageafstand
Z _{VX}	:	genormaliseerde variabele voor het onderwatervolume of de passageafstand
T _{p,q}	:	getransformeerde outputvariabele Neuron p (p is hier 1, 2) en target q (q is V, X is 1, 2)
w _{i,j}	:	geschatte modelparameters c.q. gewichten voor i-de neuron en j-de variabele

Naast direct te berekenen van Tanh en SIG, kunnen Tanh en SIG ook worden benaderd door:

$$\text{Tanh}(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}; \text{SIG}(z) = \left(\frac{1}{1 + e^{-z}} \right)$$

stap 3: Totale geschaalde KNN-output

De twee getransformeerde outputvariabelen T_1 en T_2 voor elke neuron en een constante worden omgezet naar één geschaalde modeloutput-variabele, Y , voor de integraal over de piek zandconcentratie (OBS), het zandtransport (FLUX) en de piekstroomsnelheid (EMF) conform:

$$\begin{aligned} \text{OBS} : Y_1 &= ((c \times w_{1,out}) + (T_{11} \times w_{2,out}) + (T_{12} \times w_{3,out})) = ((1 \times 1.658014) + (T_{11} \times -1.805037) + (T_{12} \times -1.028997)) \\ \text{FLUX} : Y_2 &= ((c \times w_{1,out}) + (T_{21} \times w_{2,out}) + (T_{22} \times w_{3,out})) = ((1 \times 1.40879) + (T_{21} \times 0.866911) + (T_{22} \times -1.679857)) \\ \text{EMF} : Y_3 &= ((c \times w_{1,out}) + (T_{31} \times w_{2,out}) + (T_{32} \times w_{3,out})) = ((1 \times 5.802643) + (T_{31} \times 3.085901) + (T_{32} \times -6.016922)) \end{aligned}$$

Hierin zijn:

Y_i	:	geschaalde model-output i ($i=1$ tot 3)
c	:	constante
$T_{p,q}$:	getransformeerde outputvariabele Neuron p (p is hier $1, 2$) en target q (q is V, X is $1, 2$)
$w_{123,out}$:	geschatte modelparameters c, q . gewichten voor de transformatie naar de output

stap 4: Normalisatie c.q. herschaling naar de uiteindelijke model-output

De berekende modeloutput wordt teruggeschaald naar de reële output, OBS (g^*s/l), FLUX (kg/m) en EMF (m/s) conform:

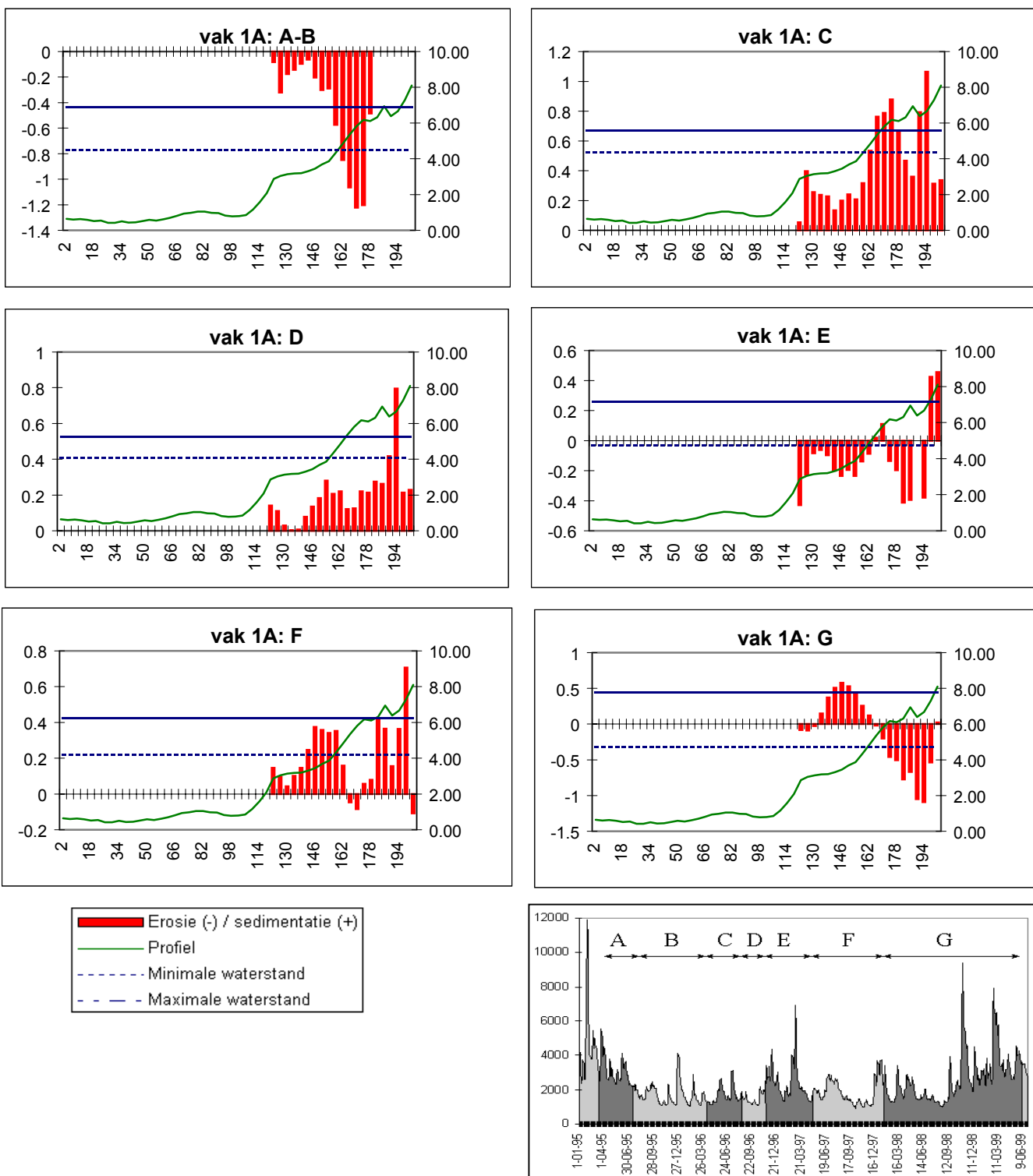
$$\begin{aligned} \text{OBS}(g^*s/l) &= (Y_1 \times \sigma_{OBS}) + \mu_{OBS} = (Y_1 \times 4.078628) + 6.260849 \\ \text{FLUX}(kg/m) &= (Y_2 \times \sigma_{FLUX}) + \mu_{FLUX} = (Y_2 \times 1.763086) + 1.806178 \\ \text{EMF}(m/s) &= (Y_3 \times \sigma_{EMF}) + \mu_{EMF} = (Y_3 \times 0.050445) + 0.210524 \end{aligned}$$

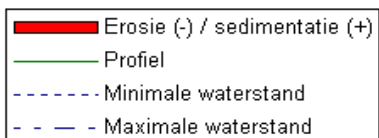
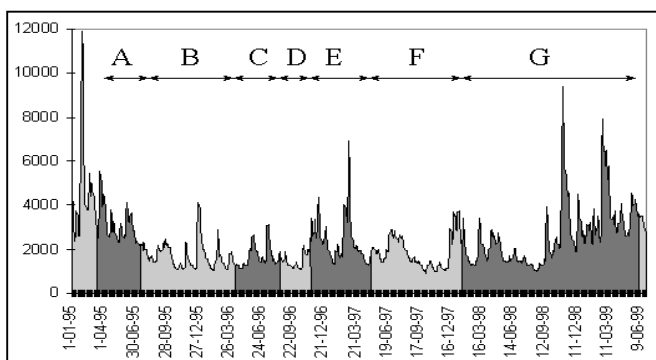
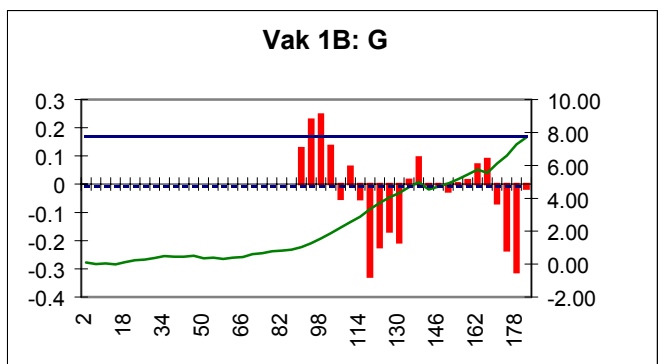
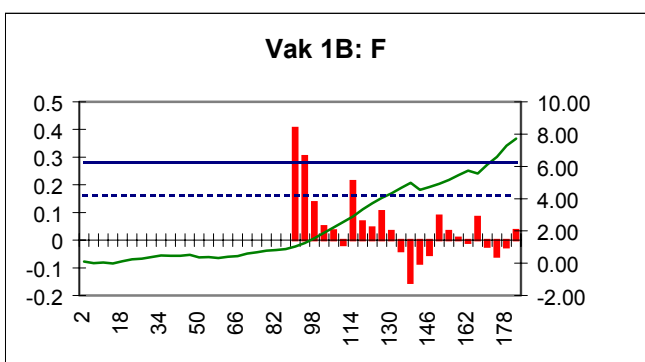
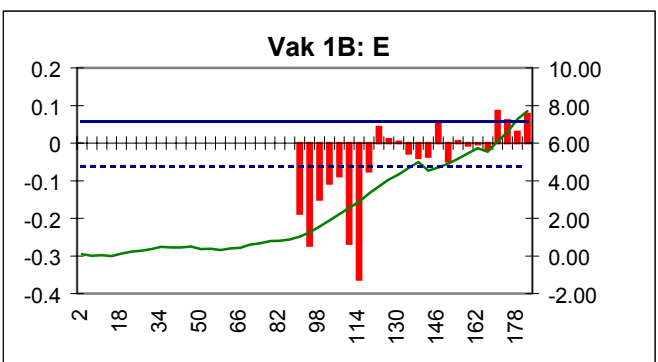
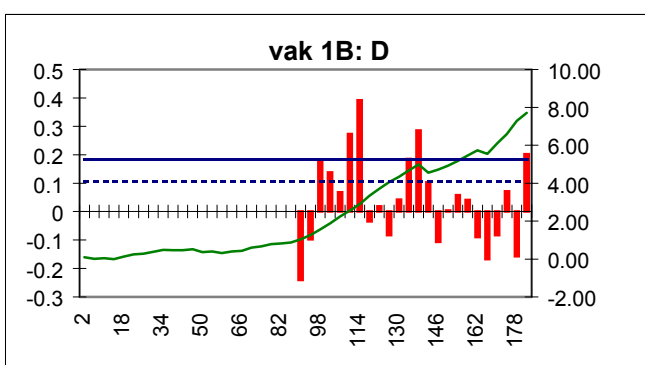
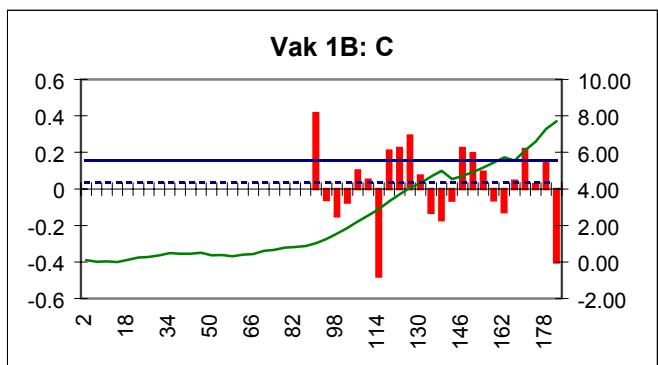
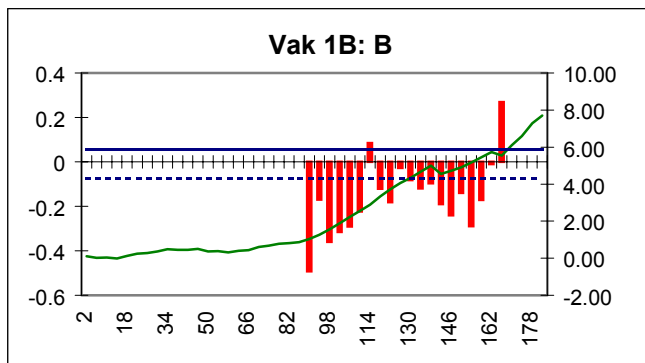
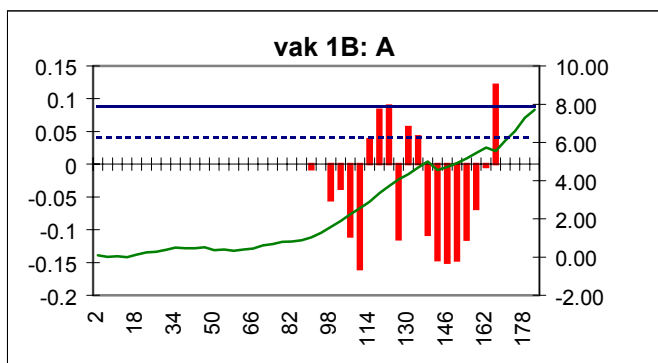
Hierin zijn:

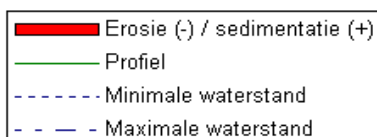
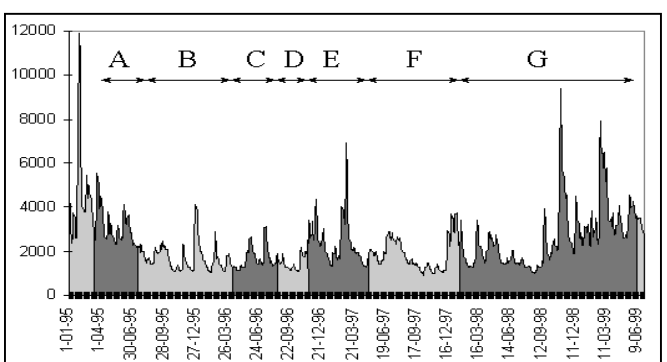
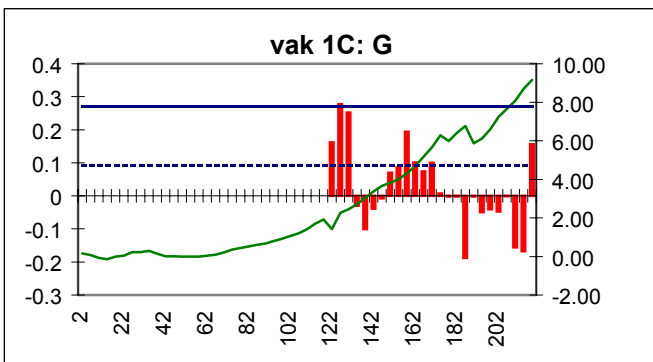
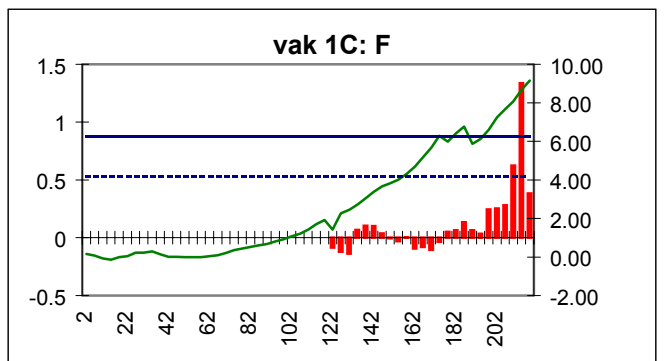
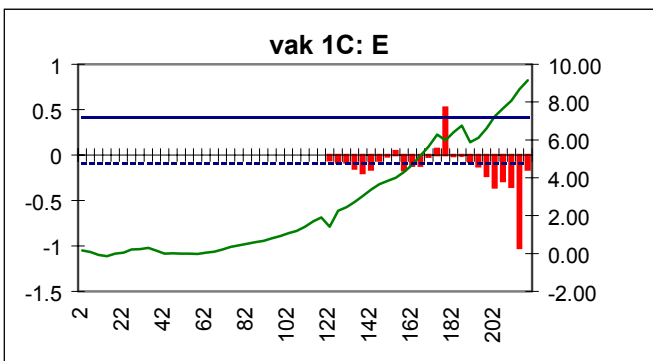
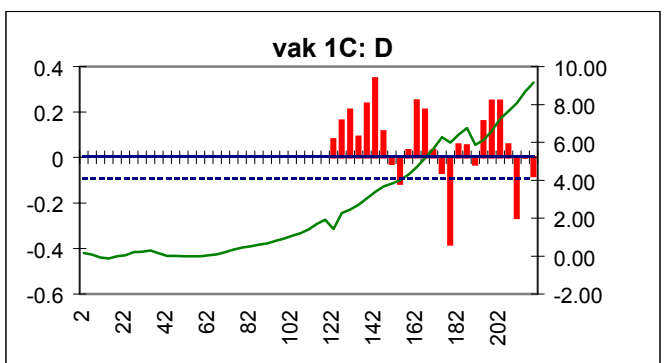
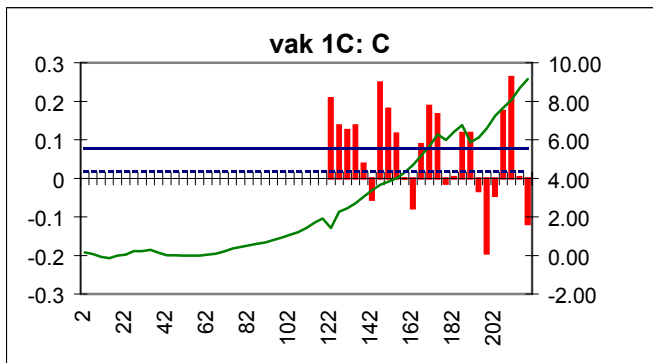
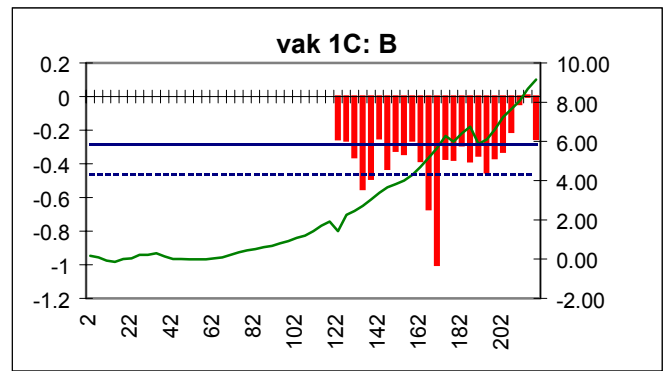
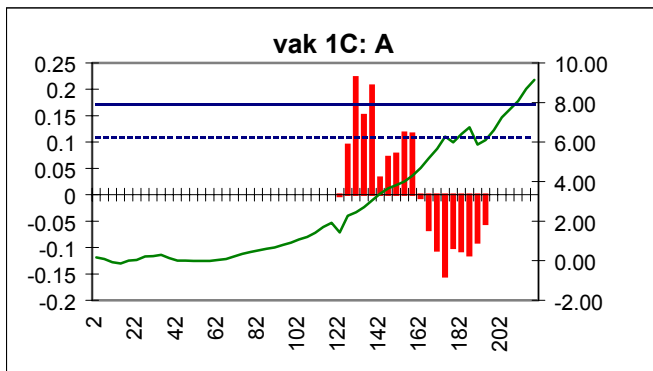
OBS	:	door het model geschatte zandopwoeling (g^*s/l)
FLUX	:	zandflux per strekkende meter (kg/m)
EMF	:	maximale stroomsnelheid tijdens scheepspassage (m/s)
Y_i	:	geschaalde model-output ($i = 1$ tot 3)
$\mu_{OBS, FLUX, EMF}$:	gemiddelde OBS, FLUX, EMF uit de gemeten dataset
$\sigma_{OBS, FLUX, EMF}$:	standaarddeviatie OBS, FLUX, EMF uit de gemeten dataset

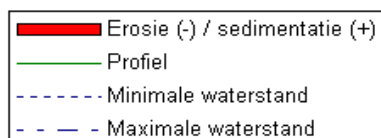
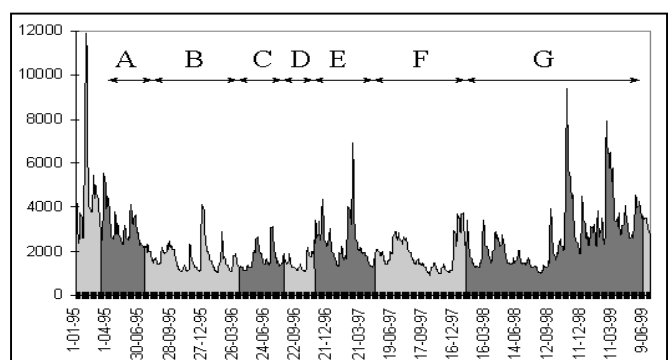
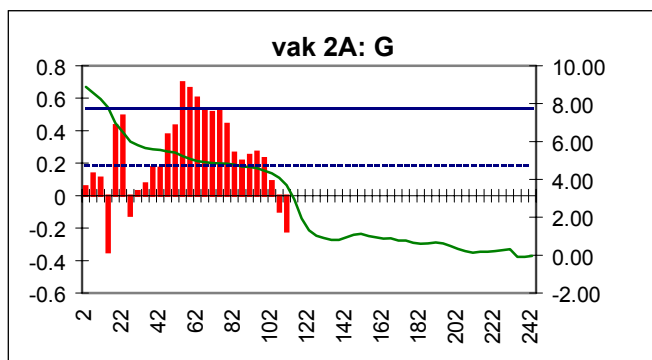
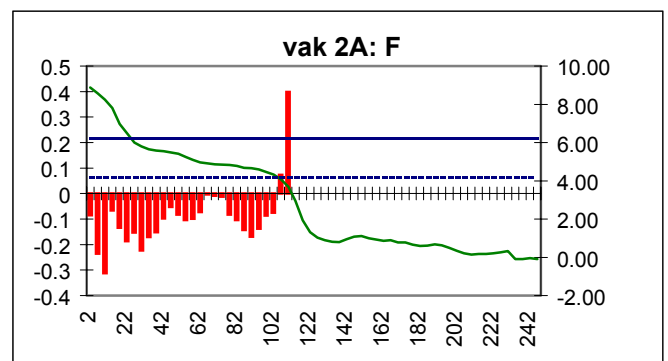
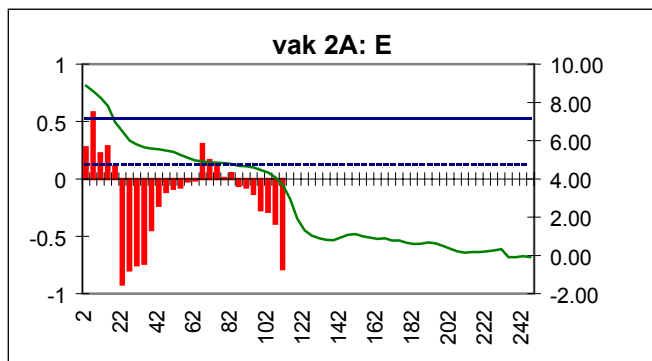
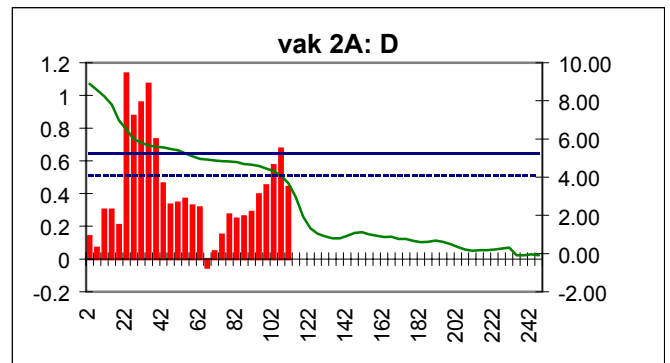
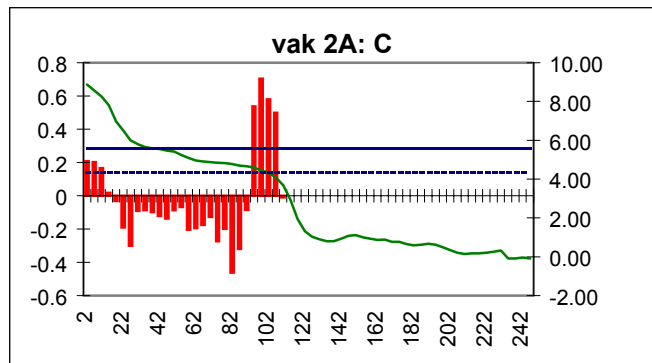
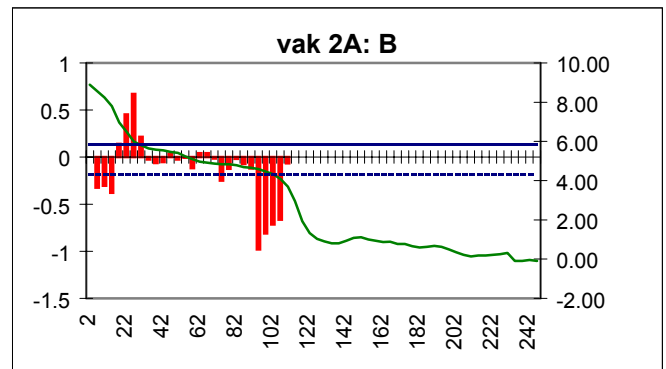
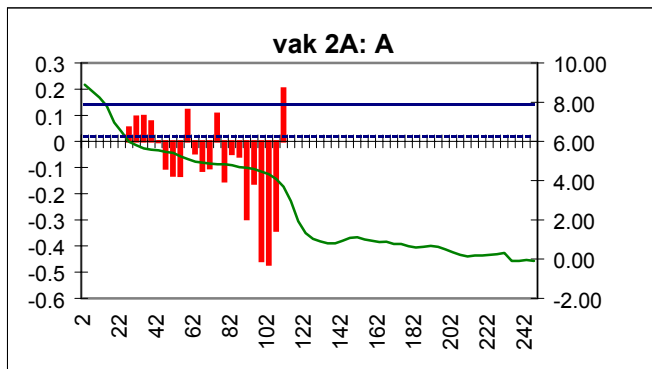
Bijlage 2:

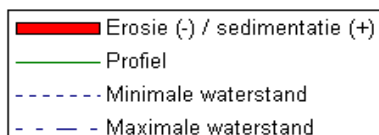
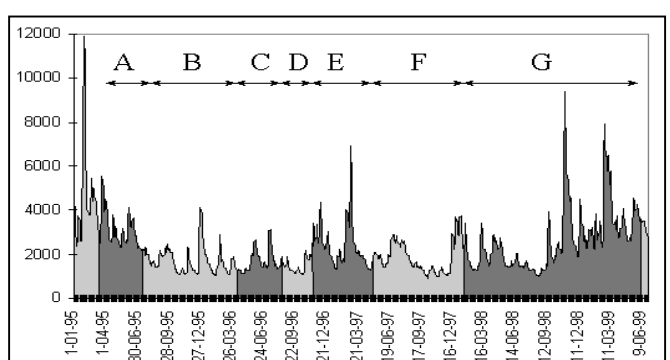
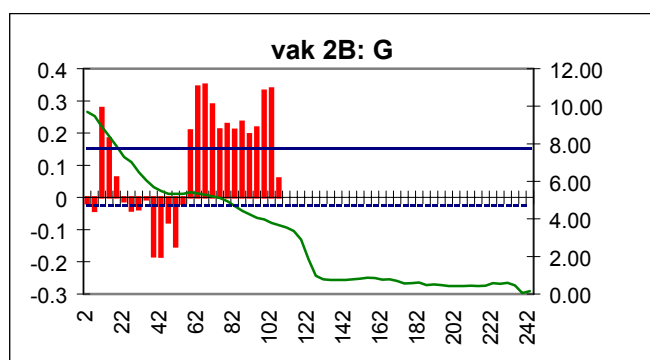
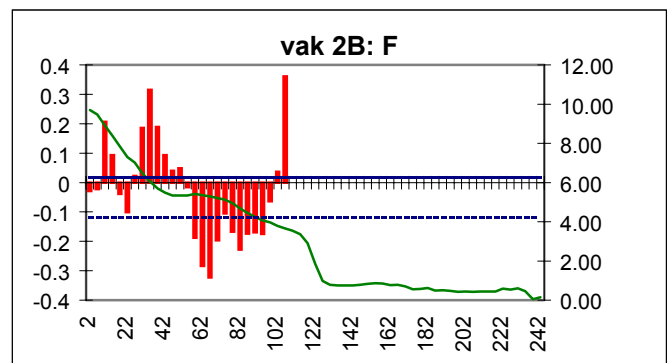
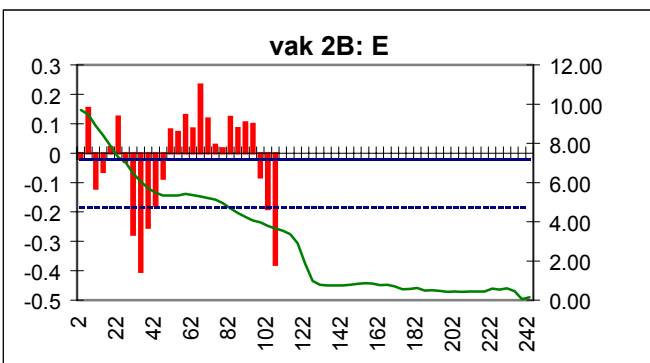
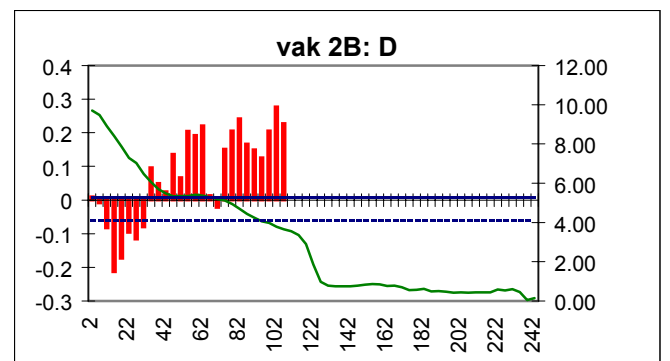
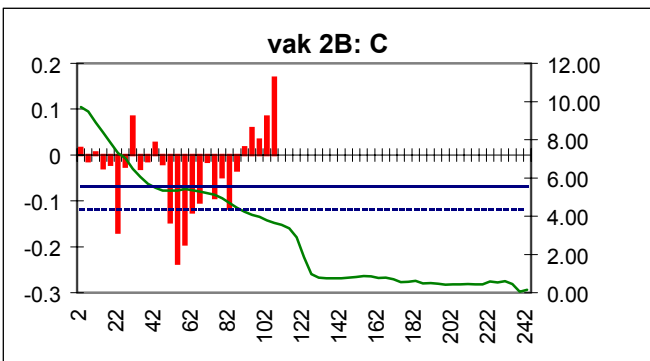
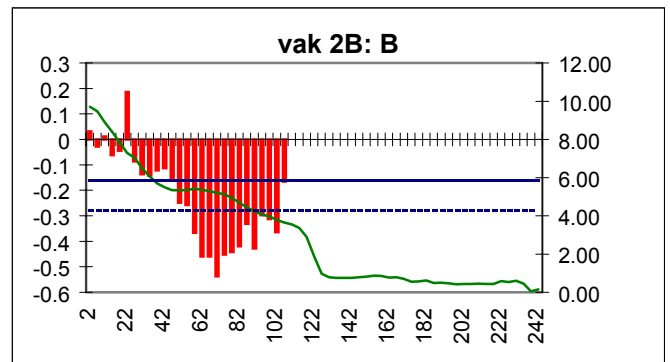
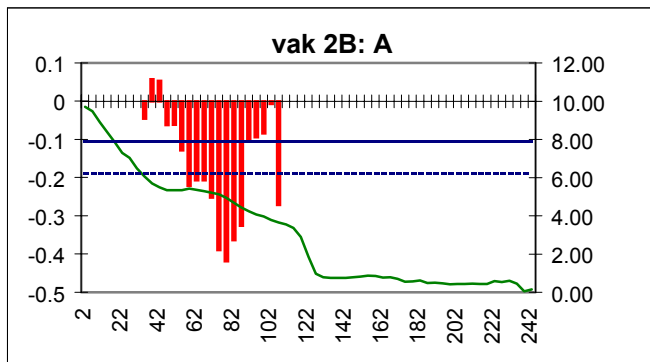
De erosie (-) en sedimentatie (+) langs het talud van het kribvakstrand over een lijn loodrecht op de oever, alsmede de minimale en maximale waterstand boven dit talud tijdens de betreffende periode van monitoring.

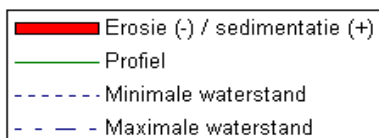
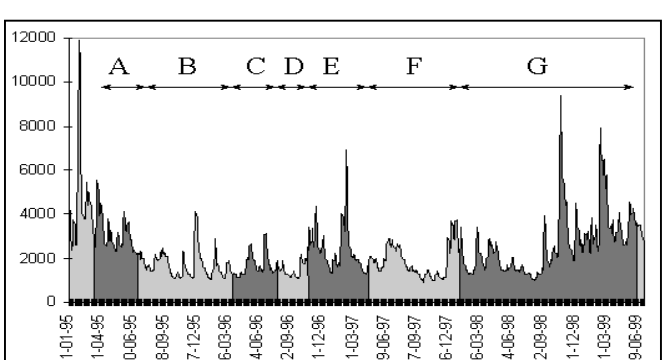
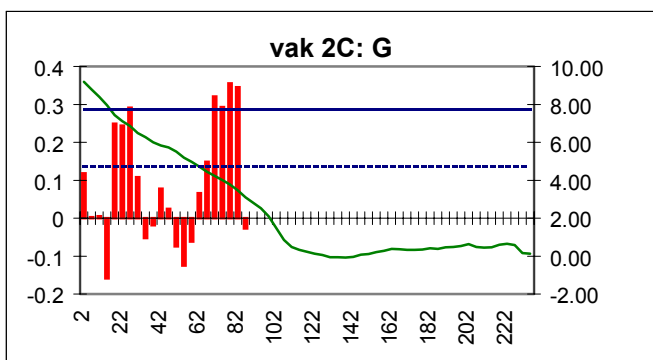
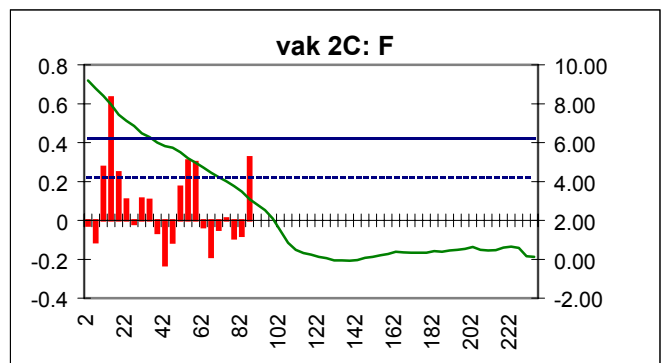
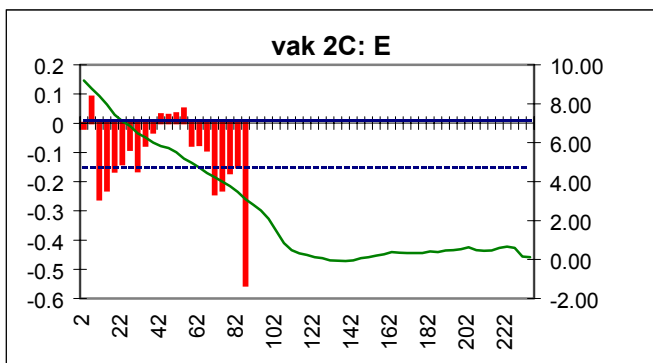
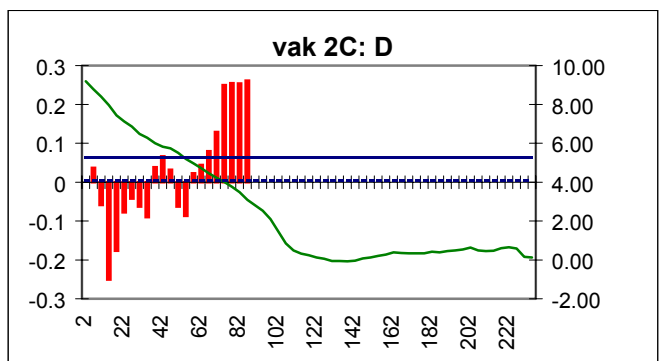
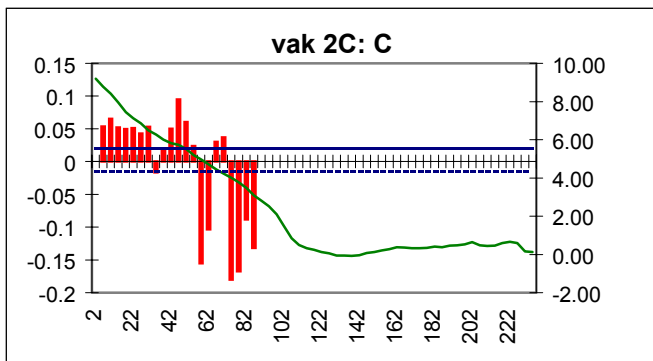
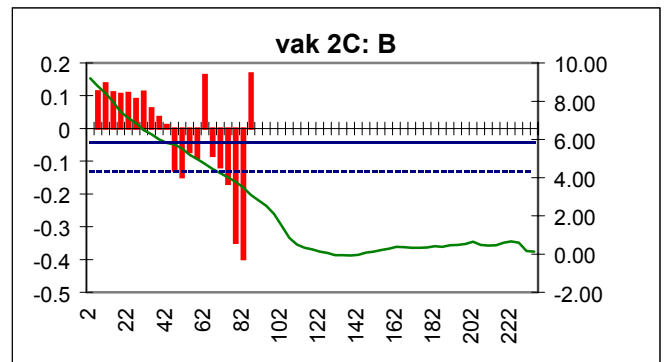
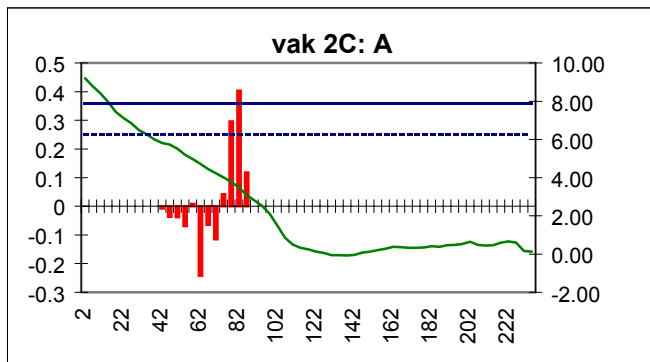


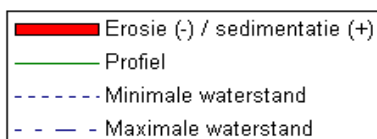
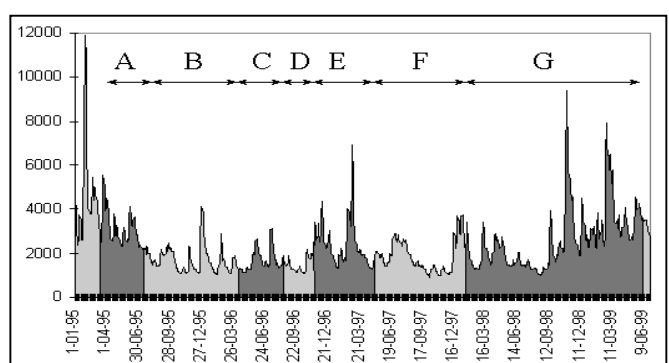
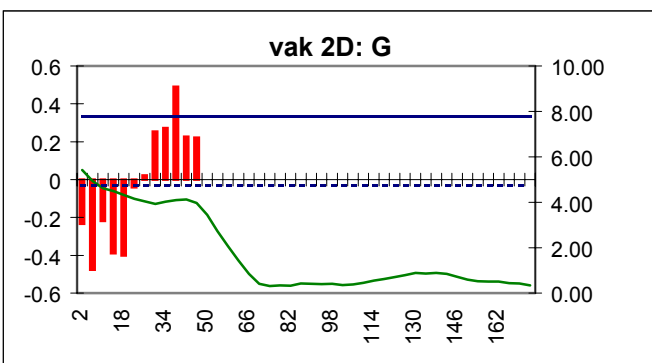
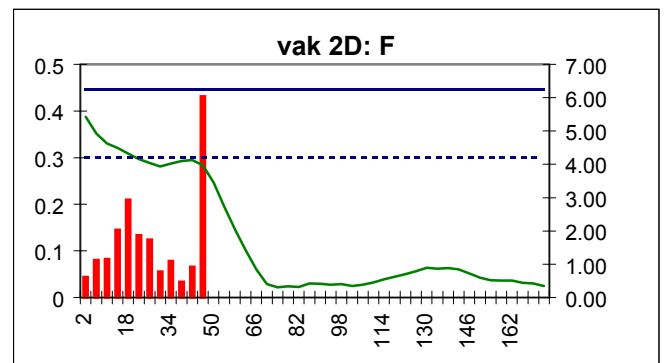
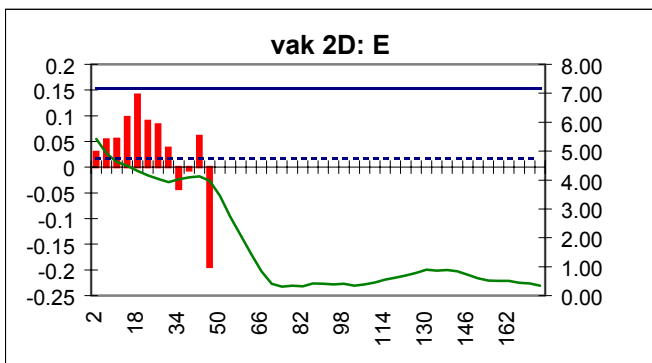
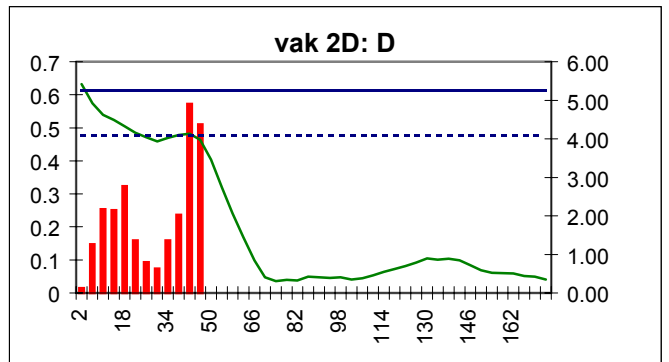
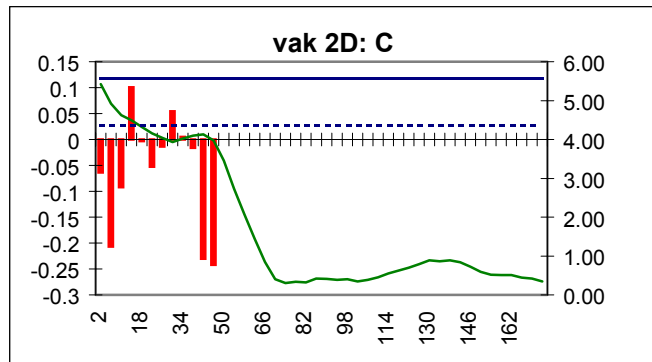
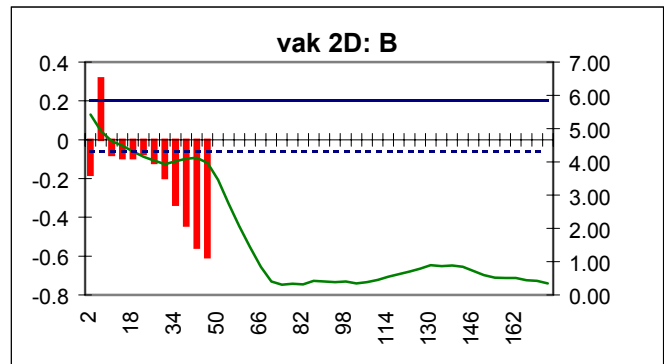
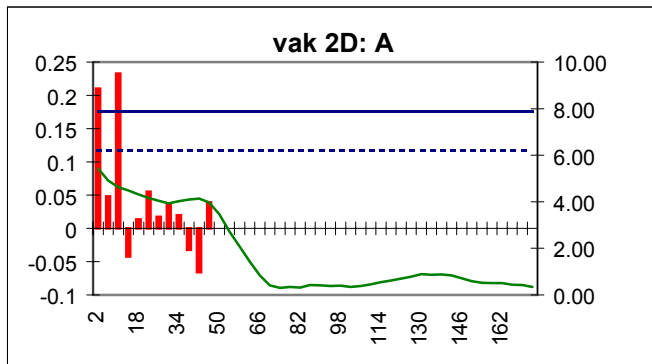


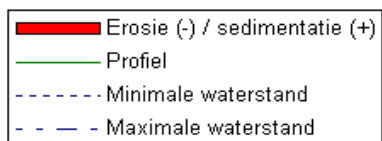
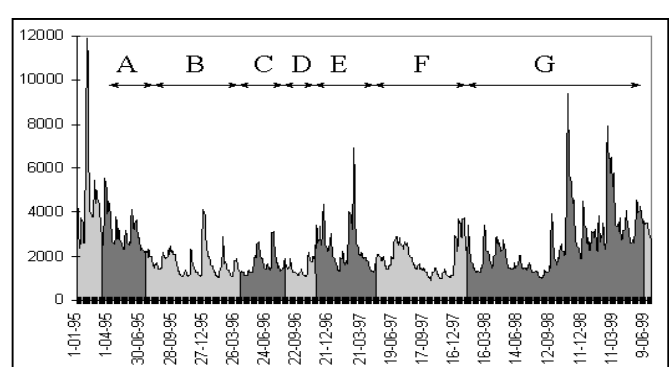
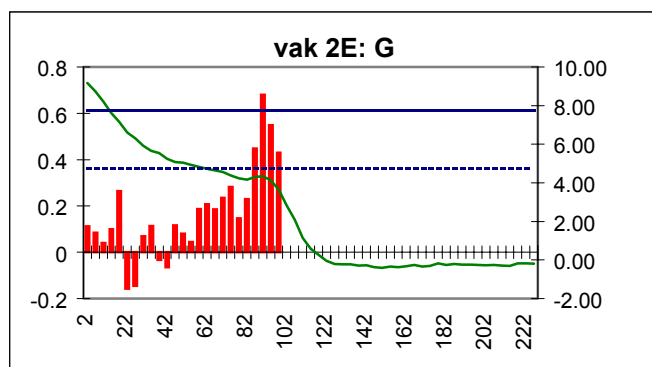
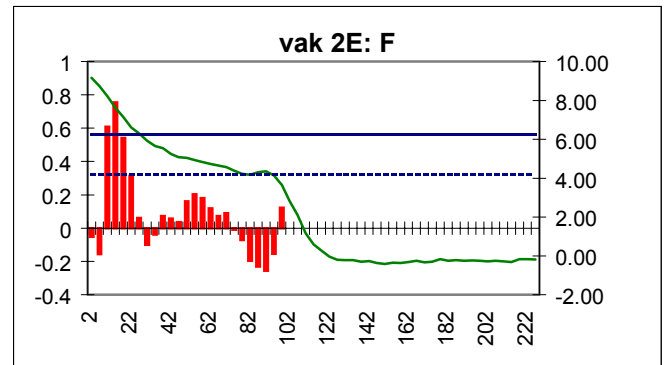
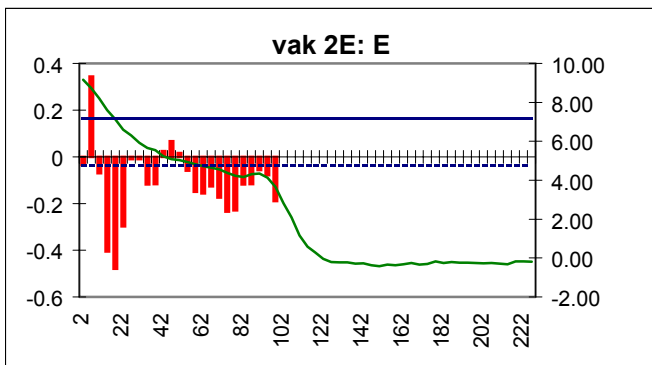
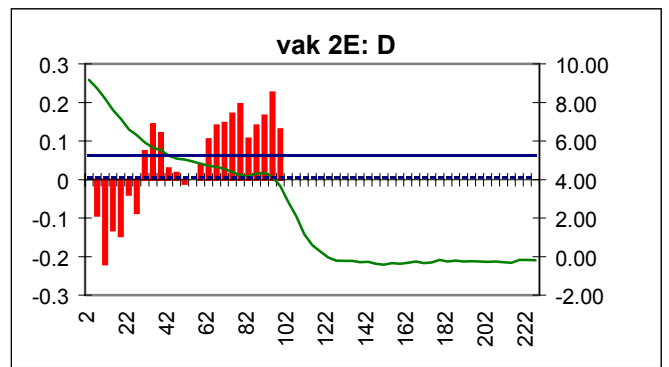
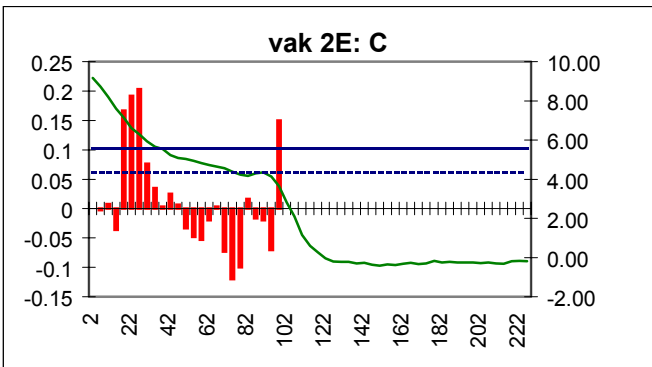
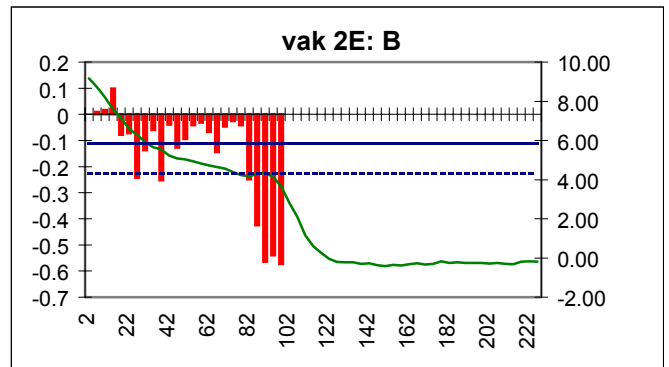
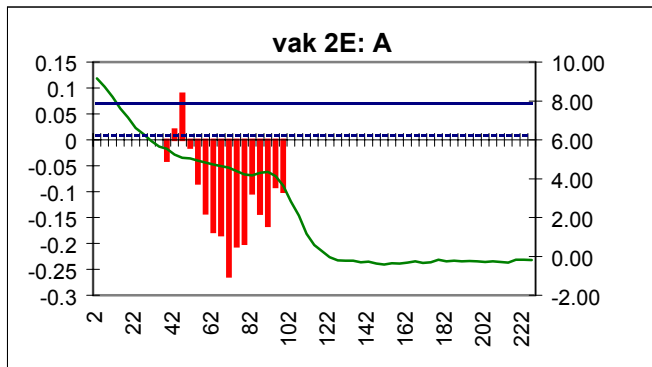


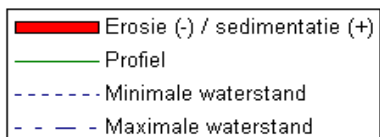
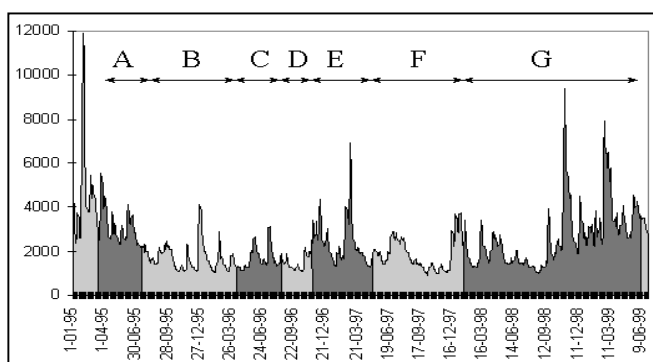
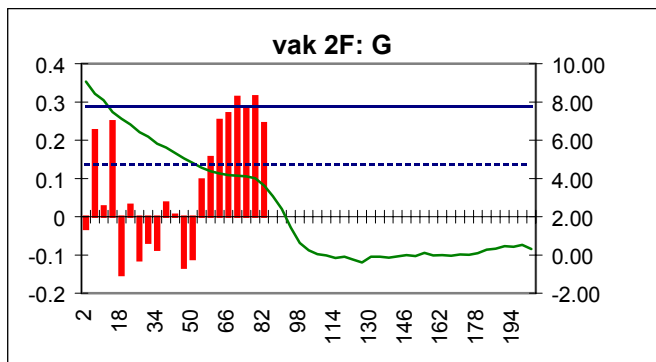
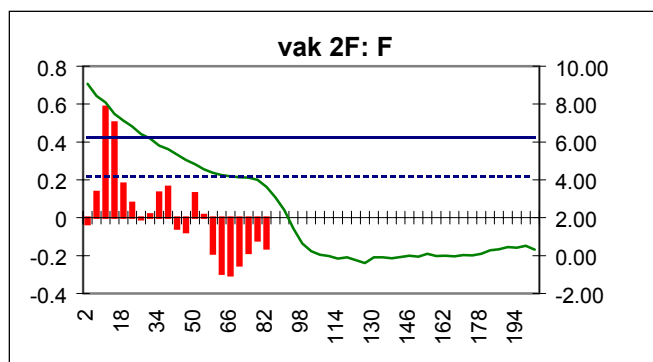
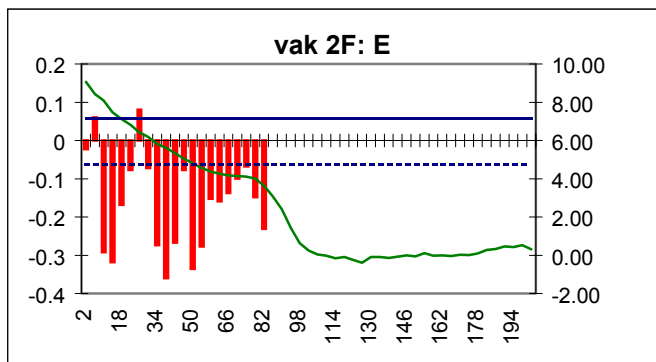
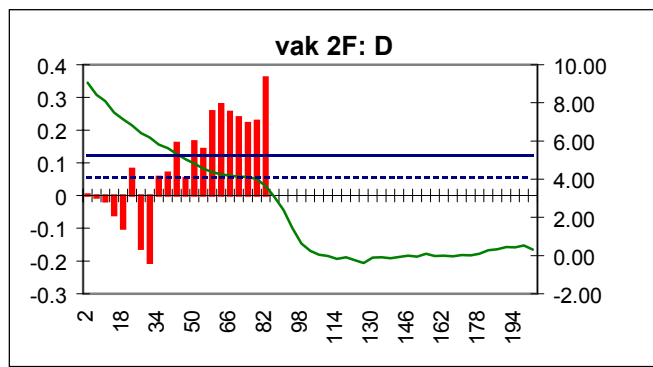
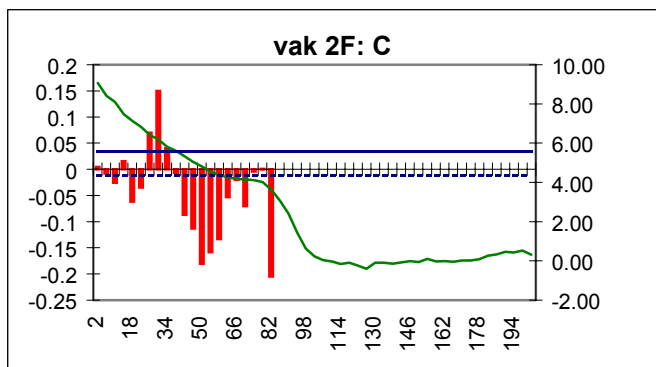
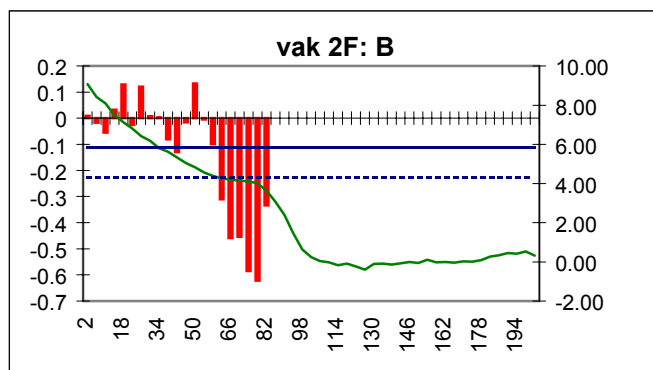
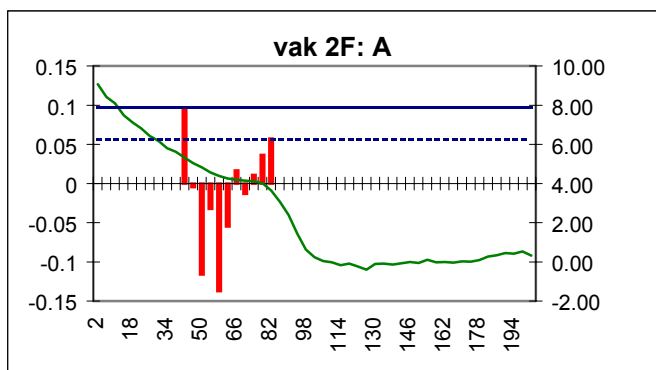


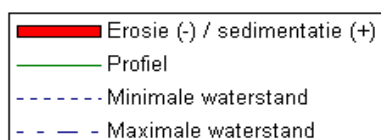
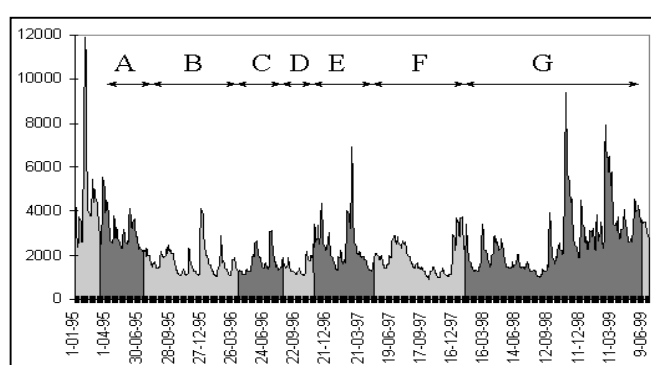
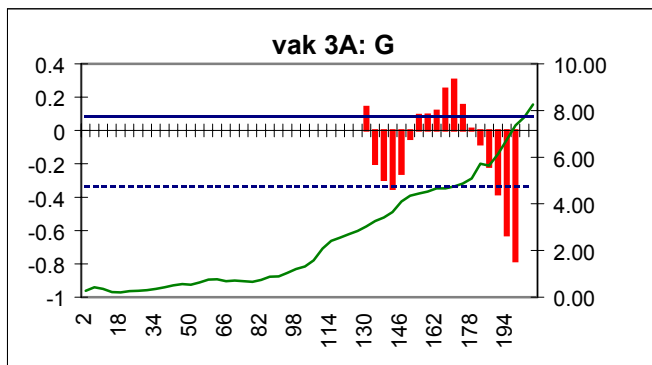
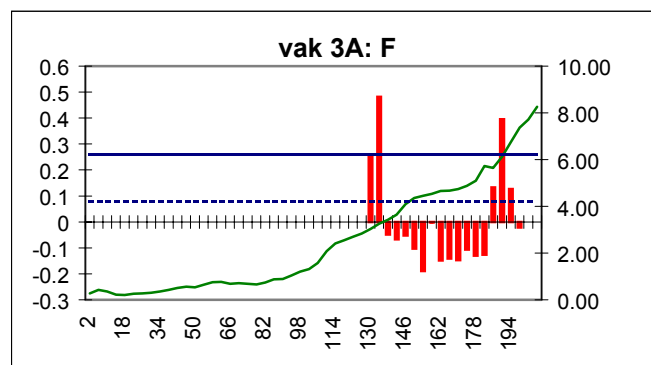
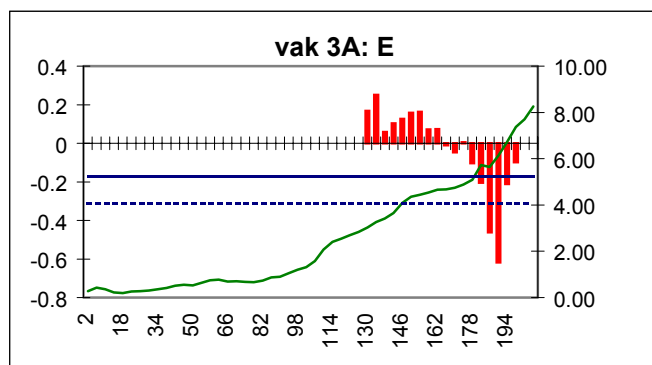
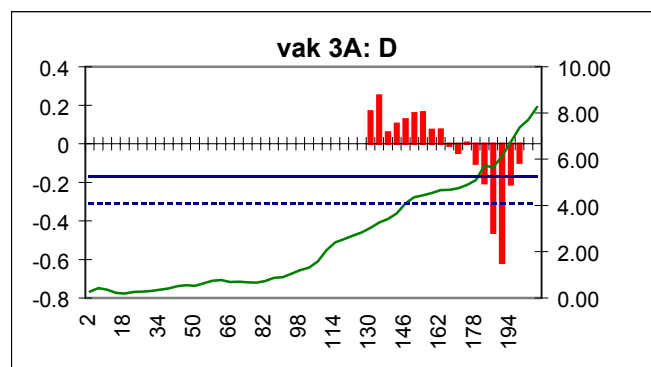
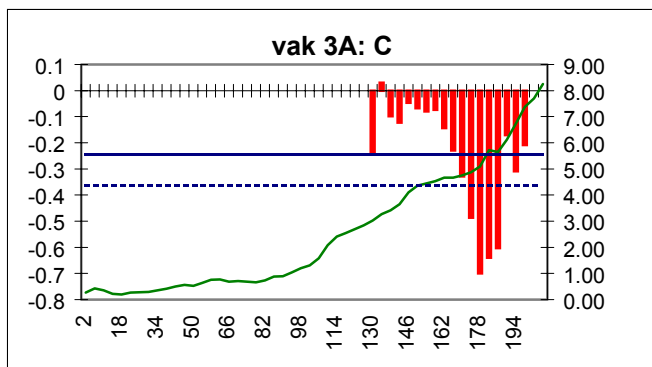
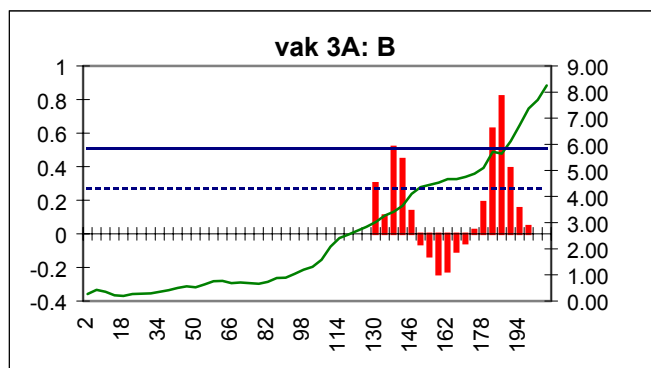
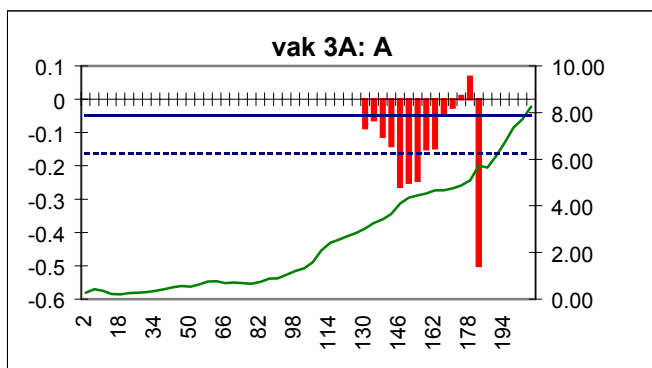


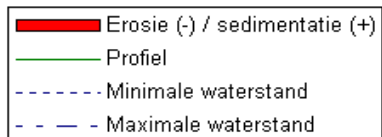
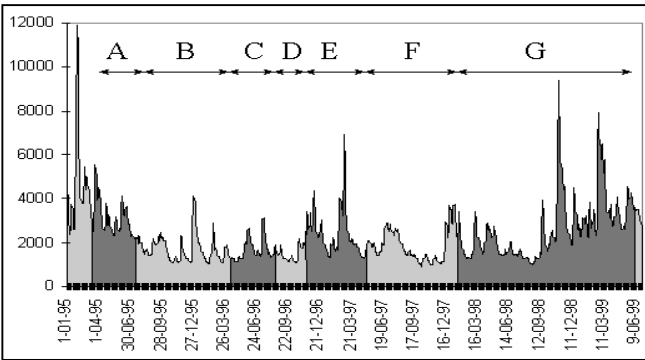
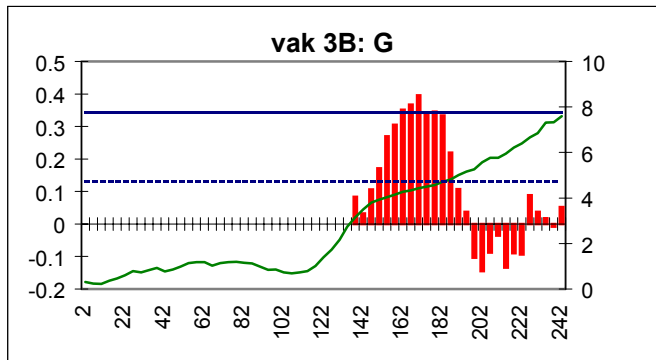
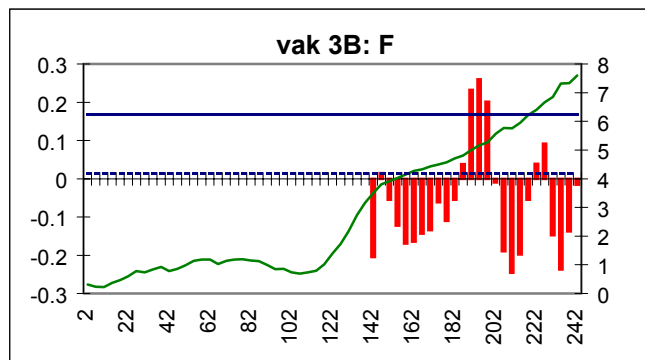
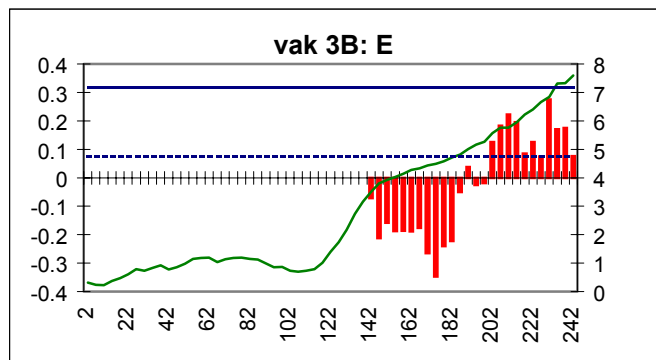
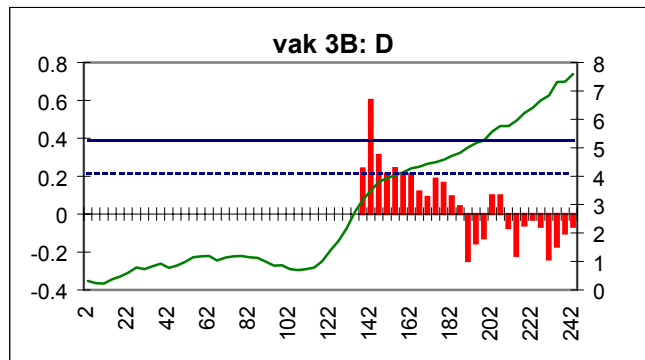
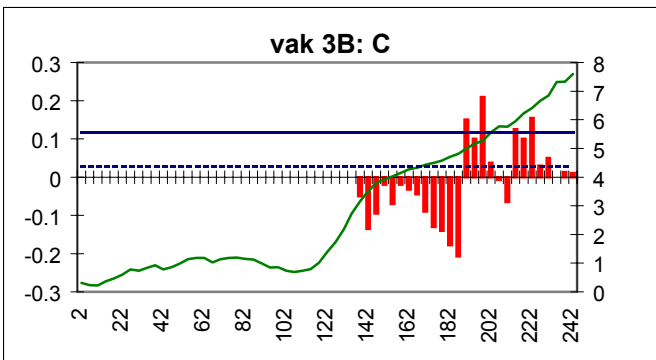
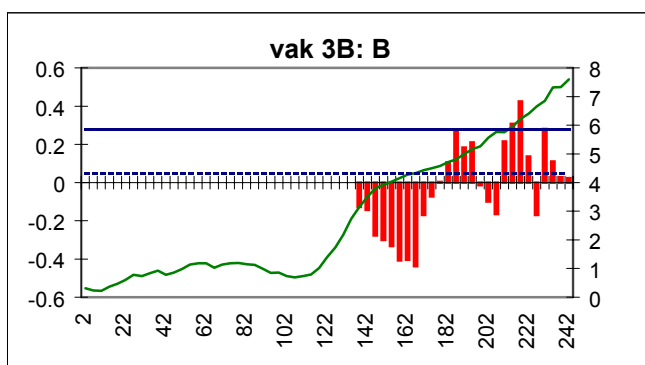
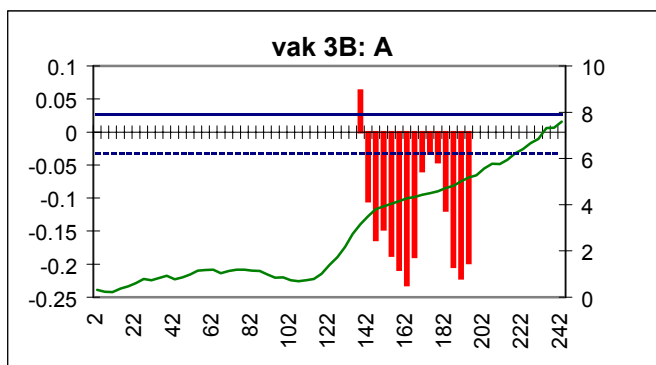


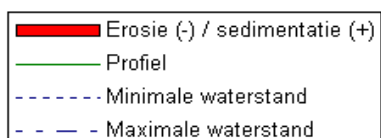
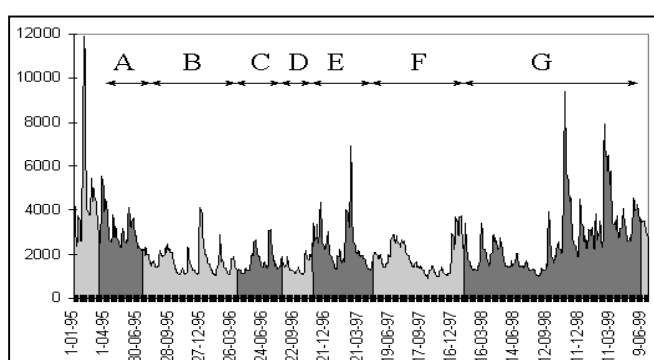
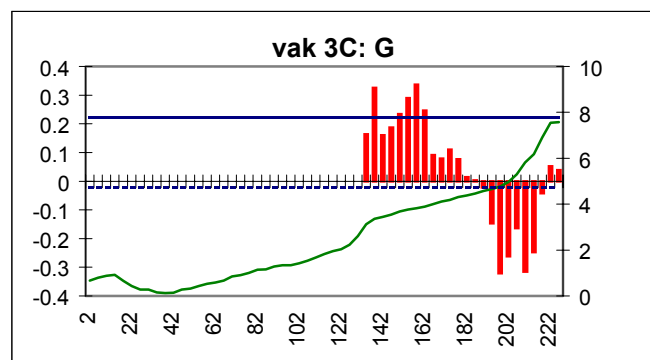
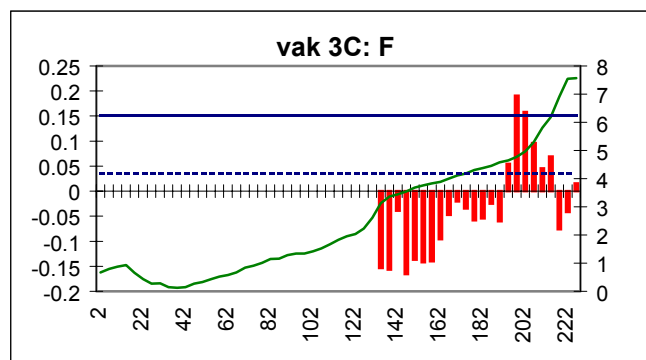
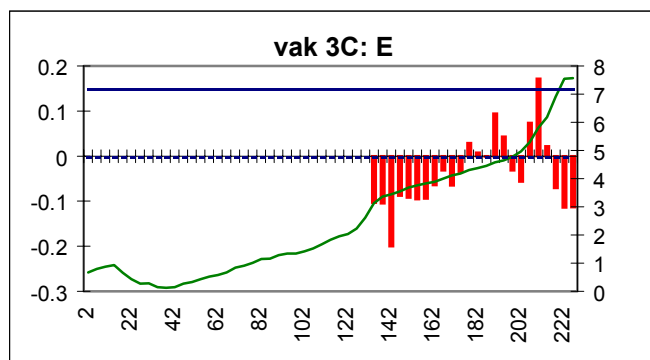
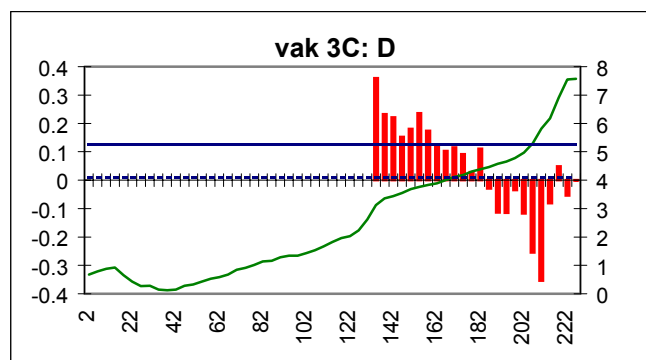
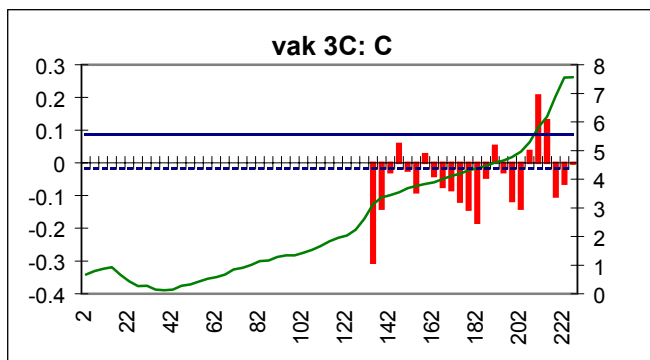
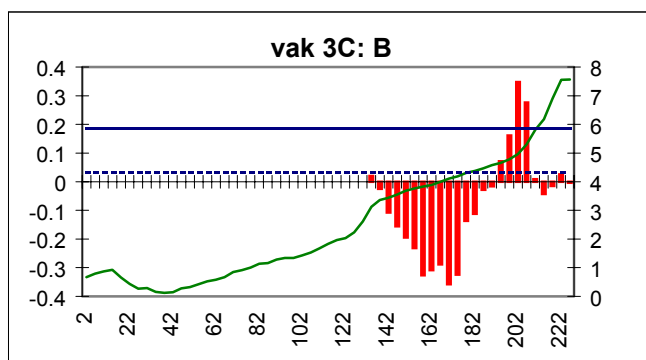
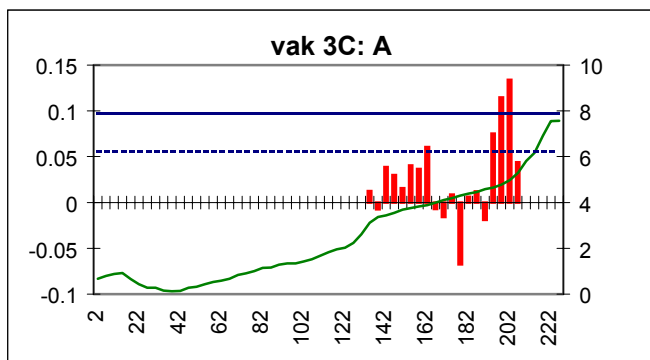


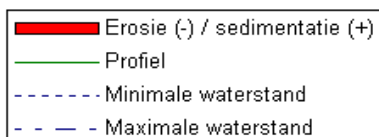
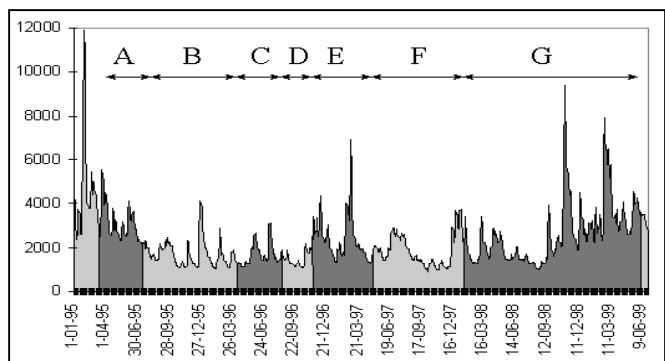
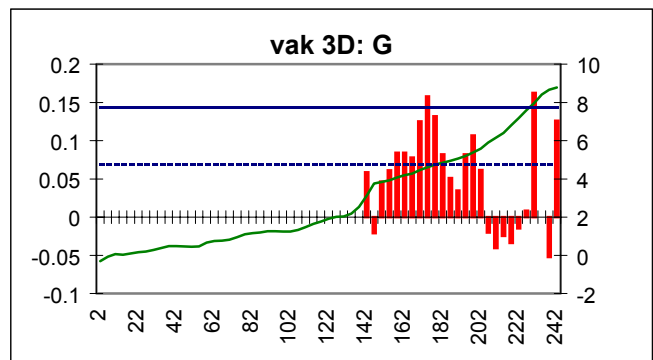
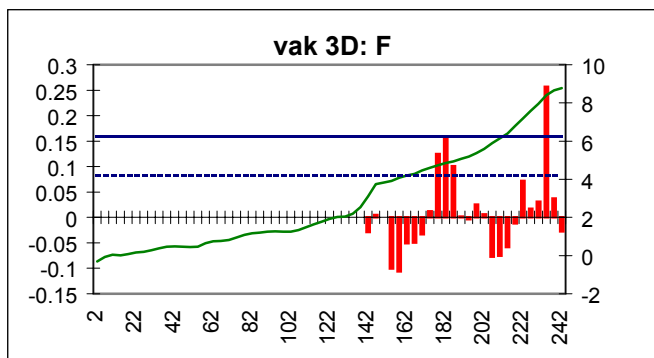
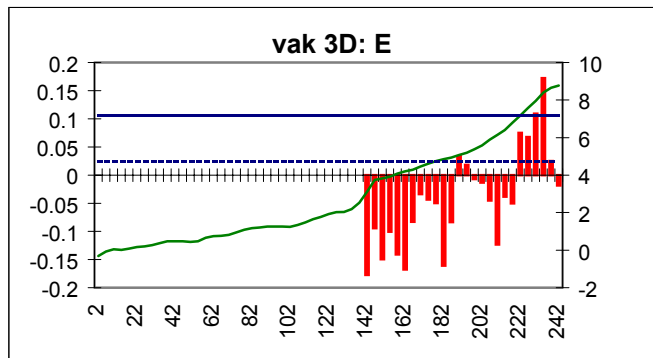
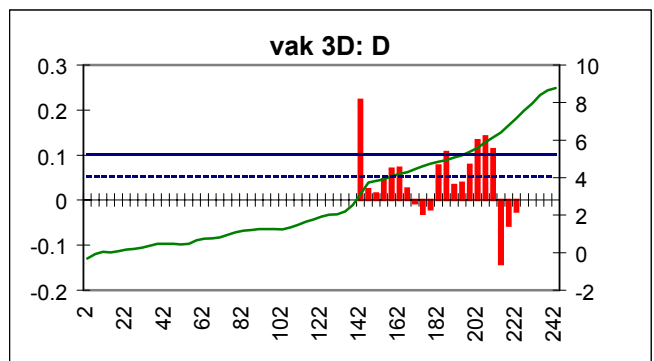
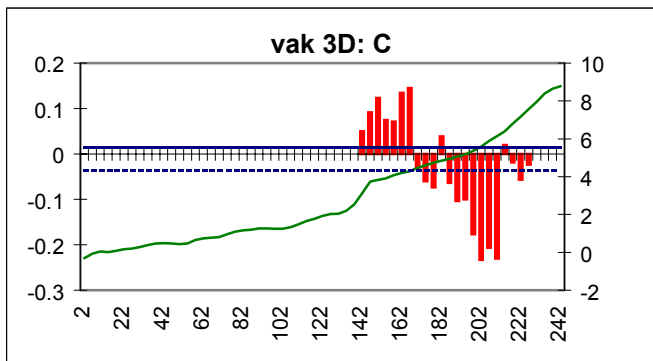


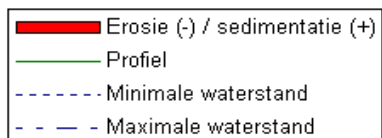
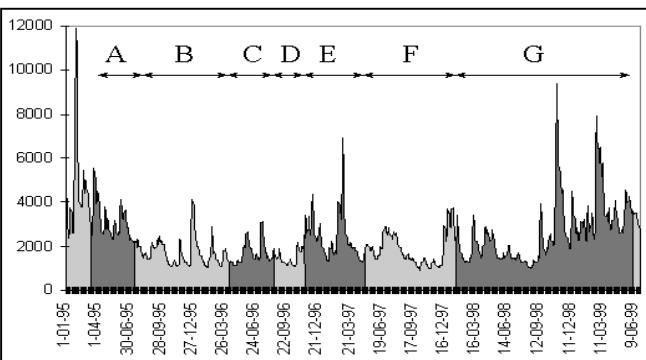
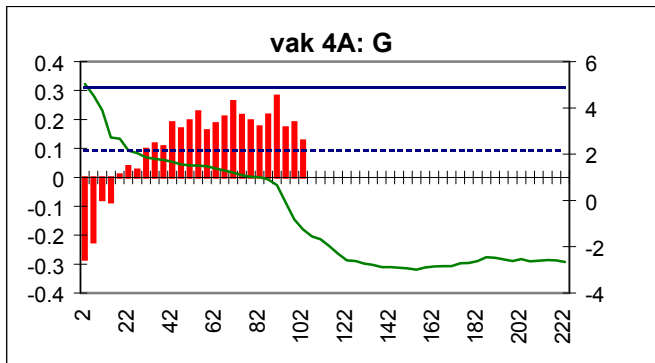
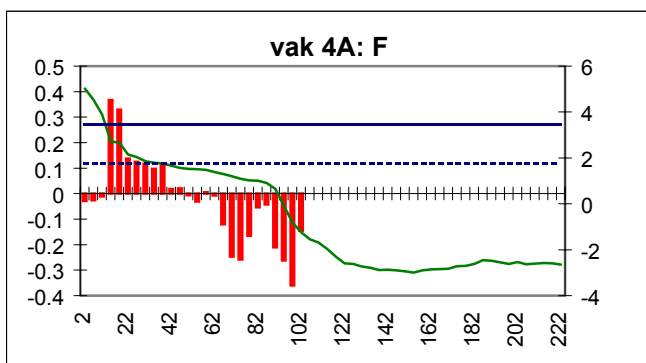
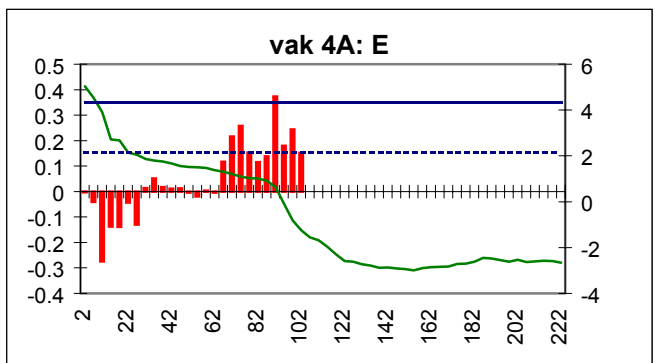
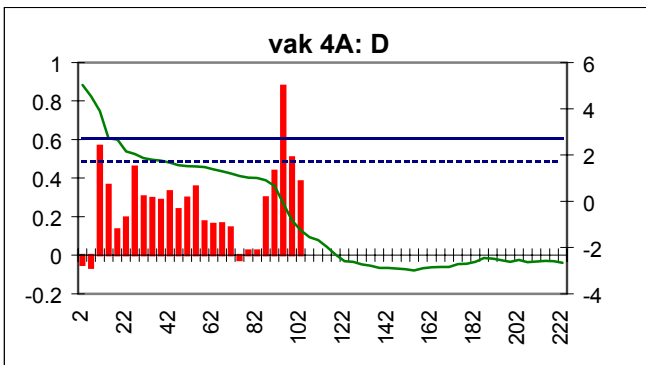
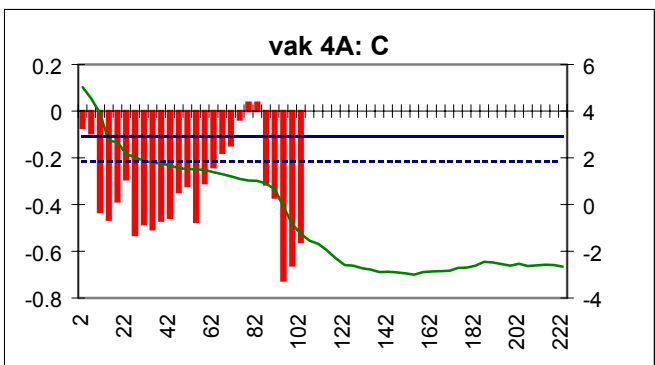
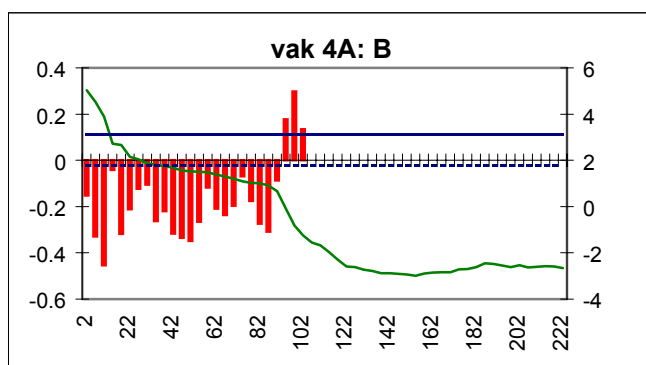
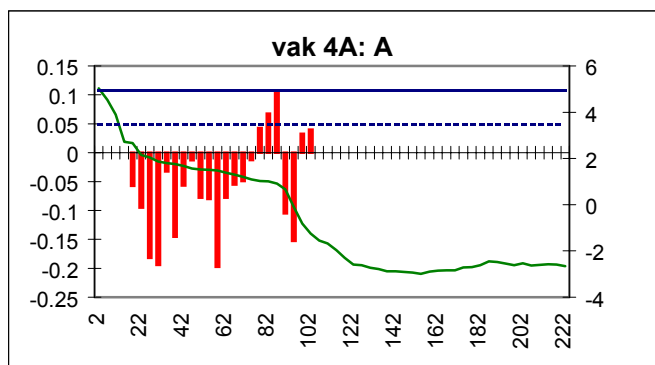


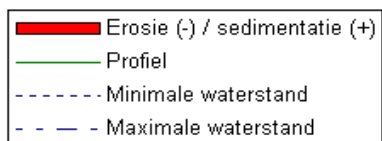
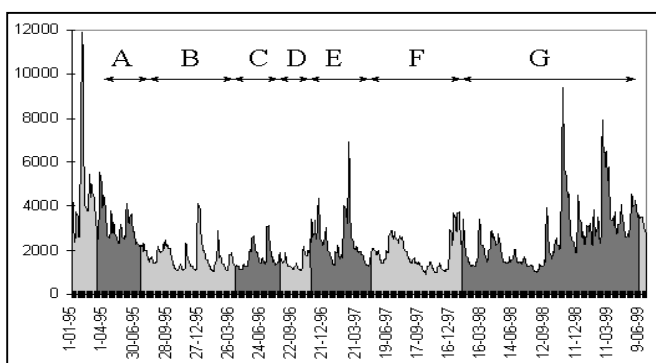
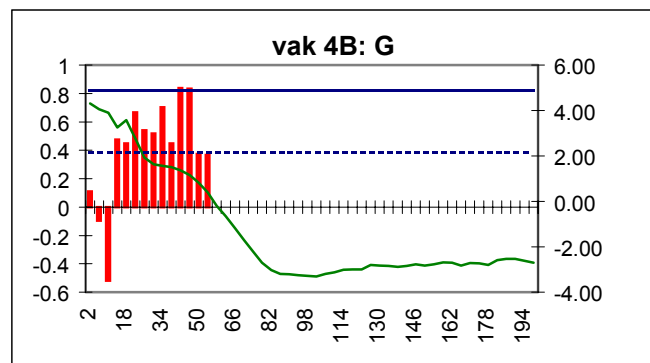
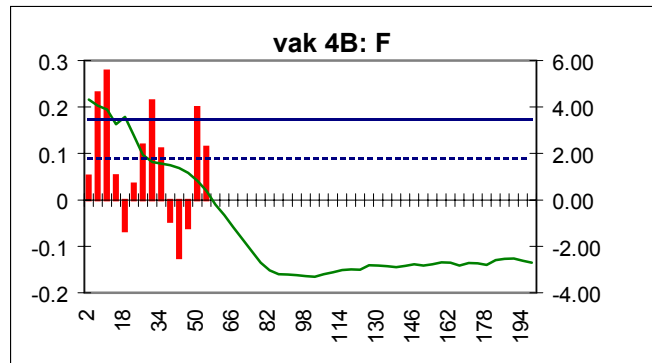
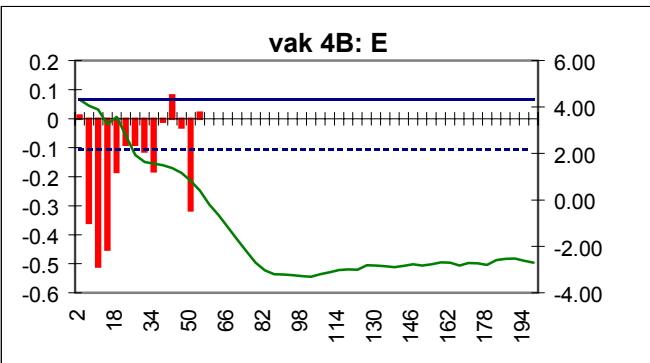
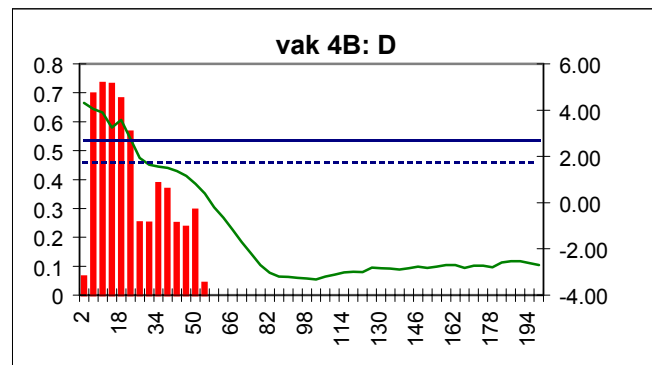
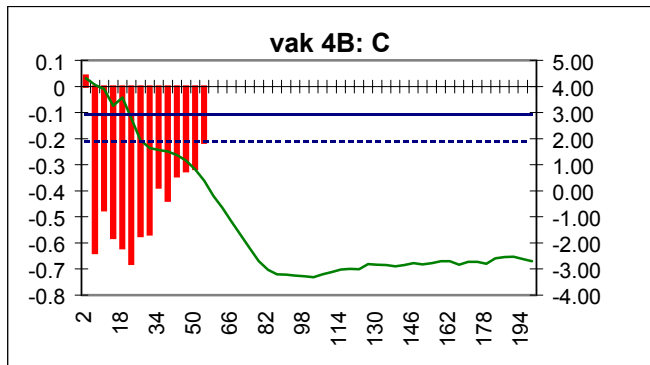
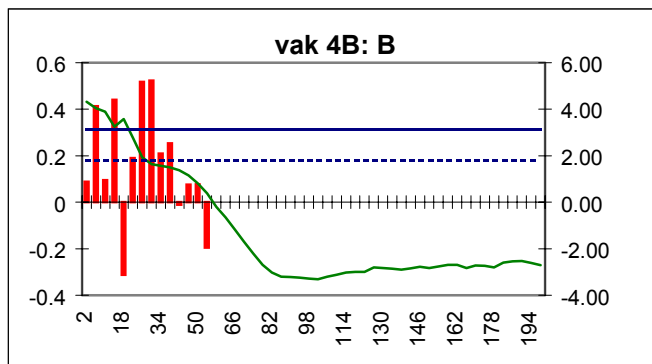
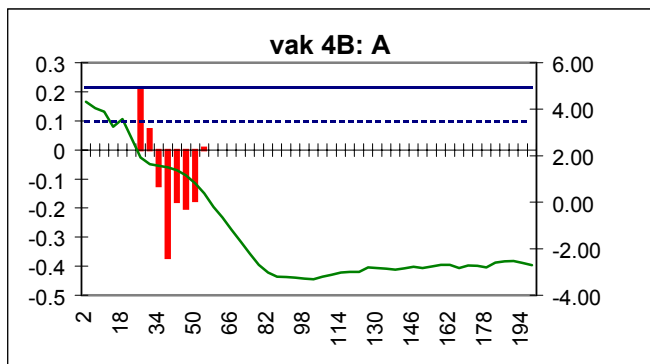


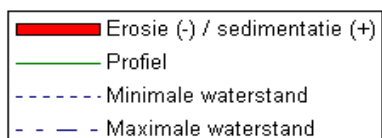
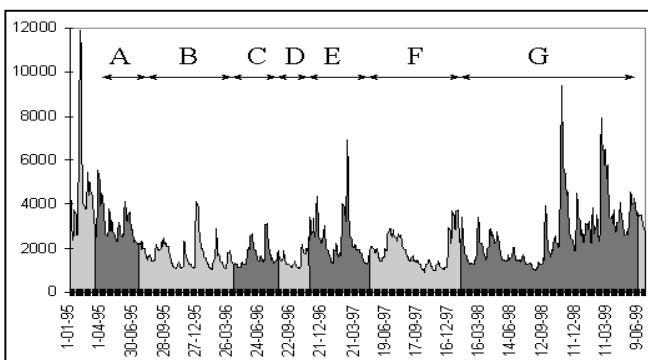
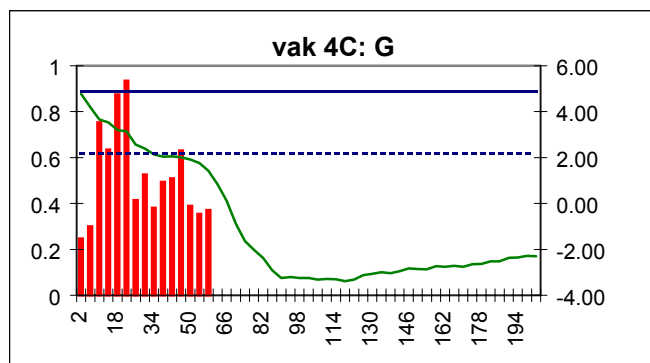
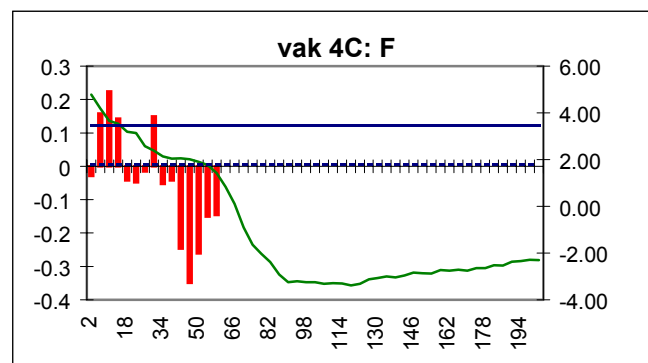
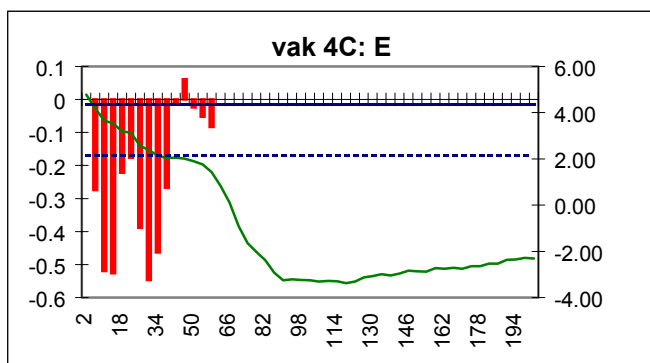
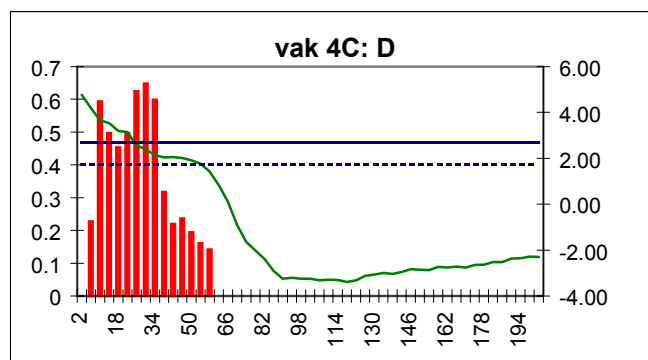
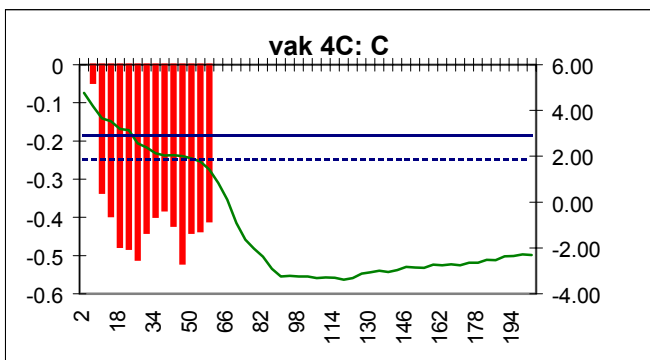
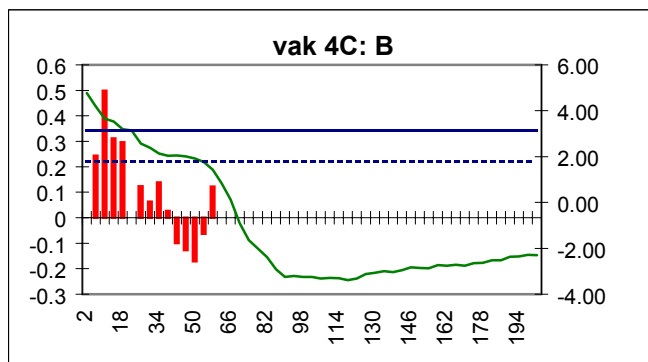
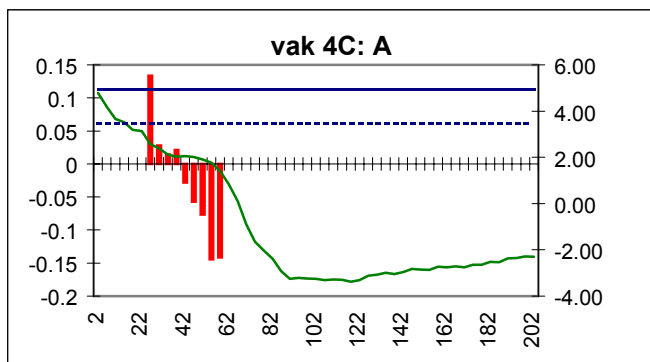


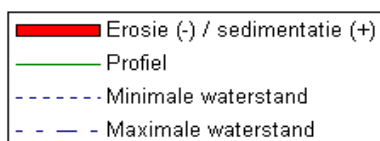
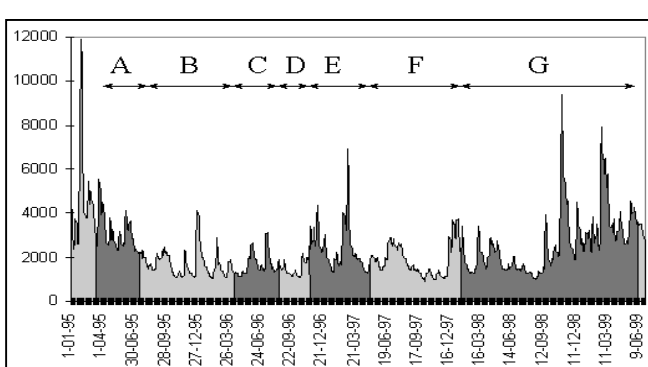
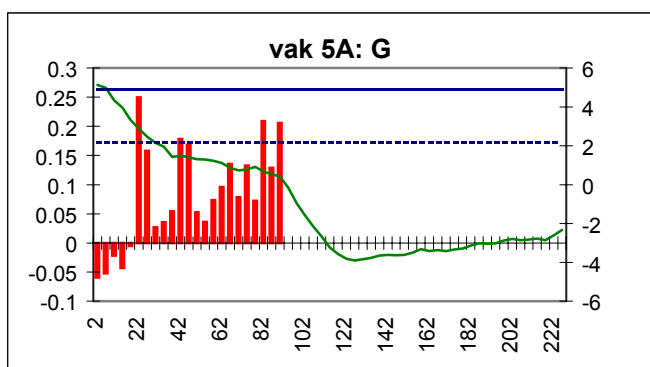
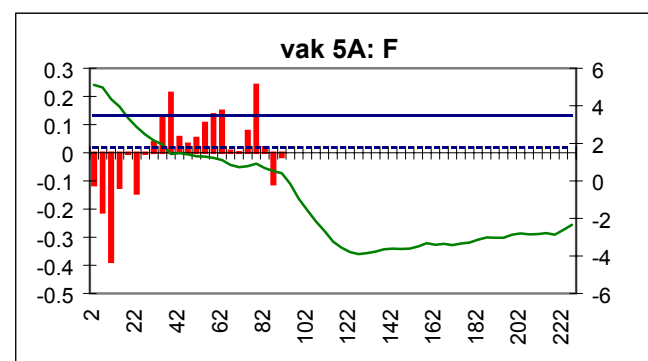
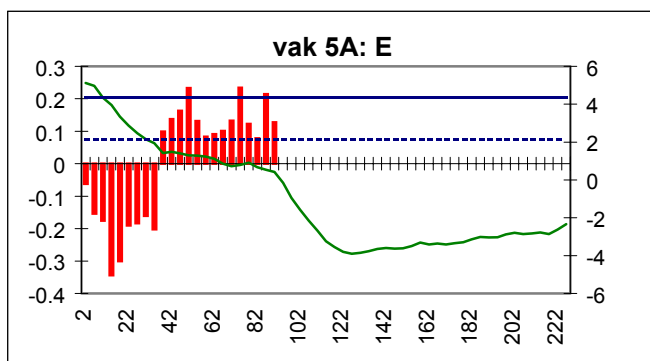
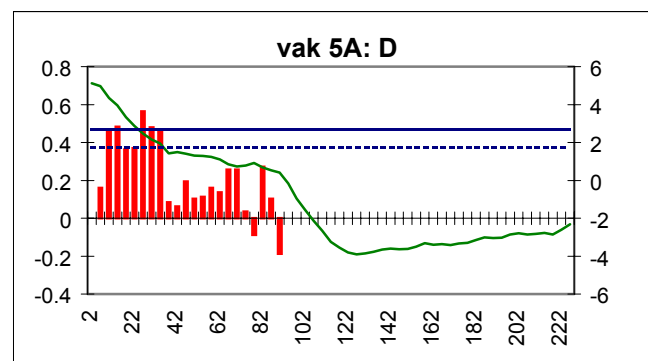
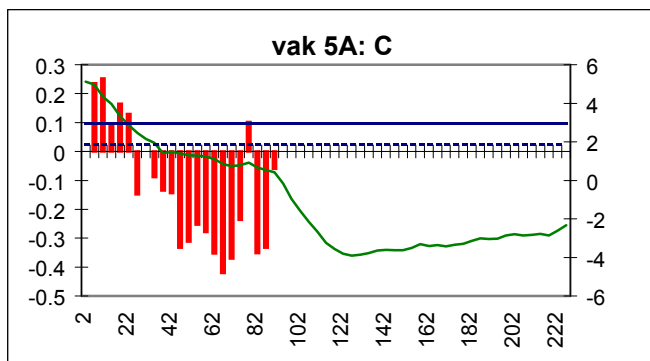
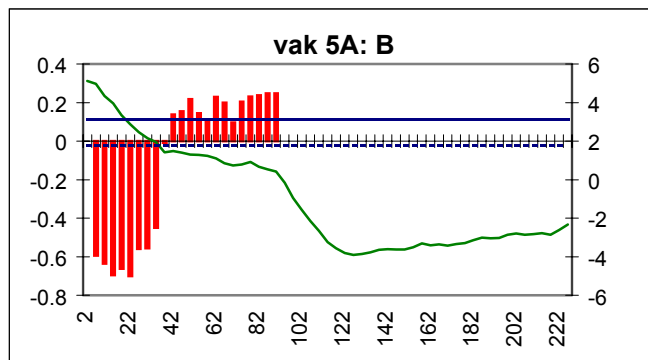
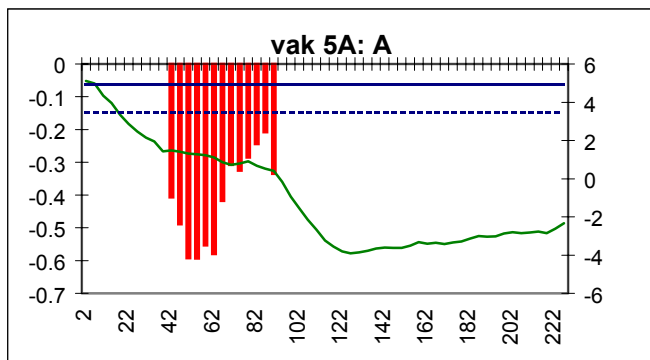


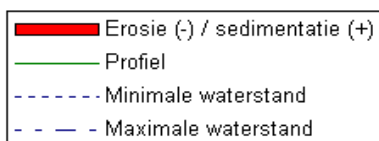
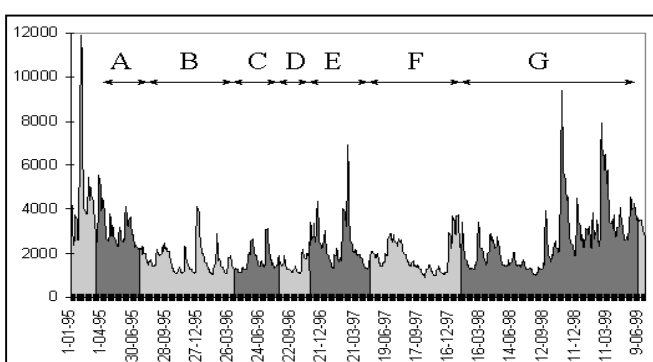
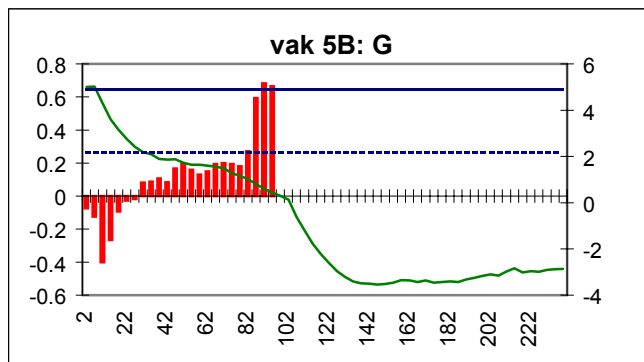
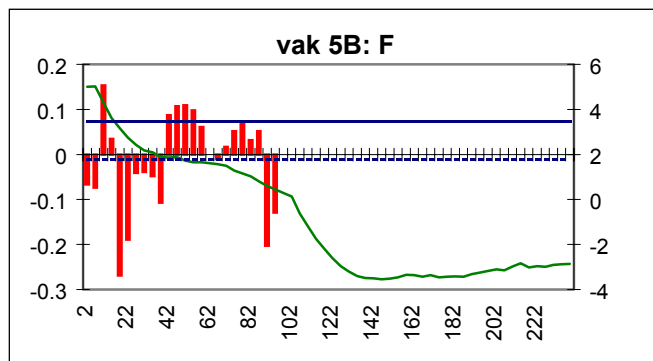
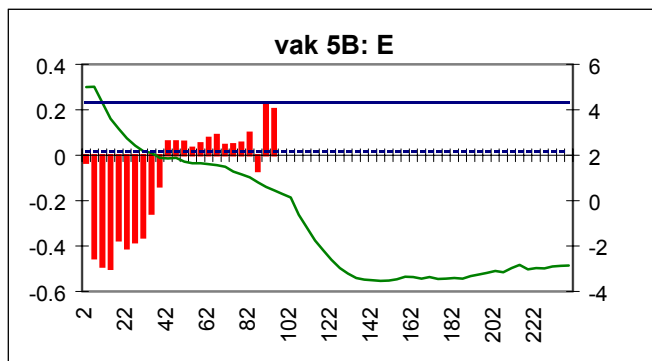
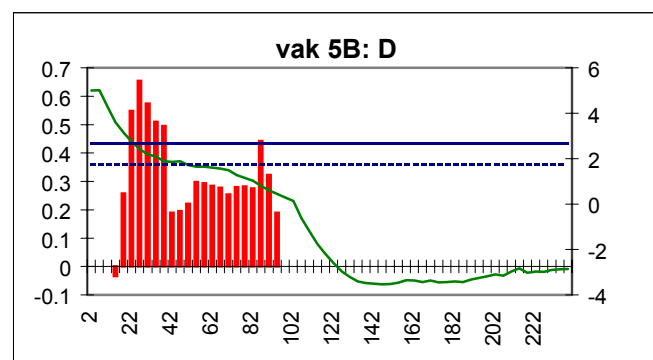
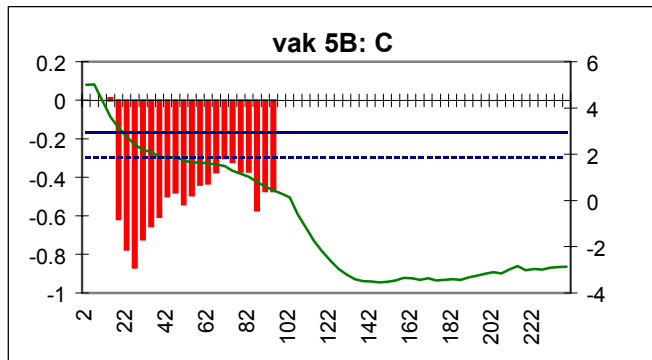
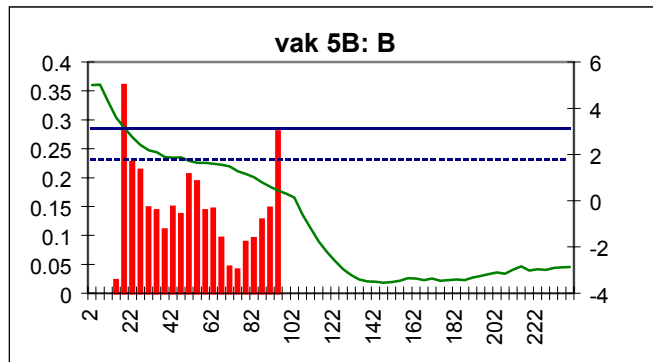
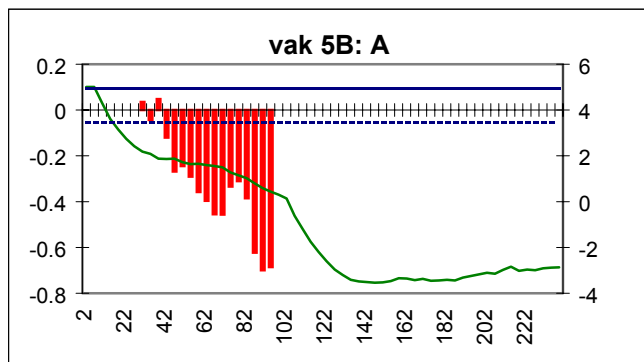


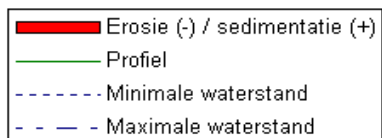
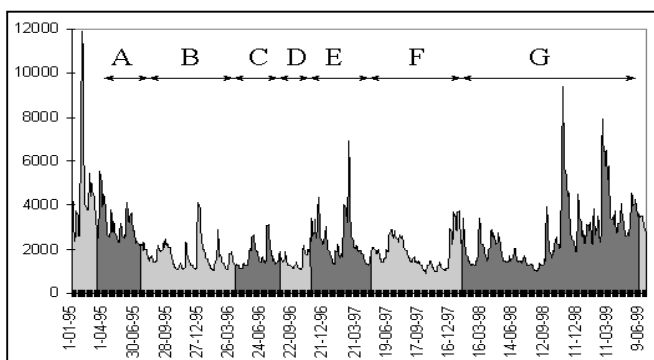
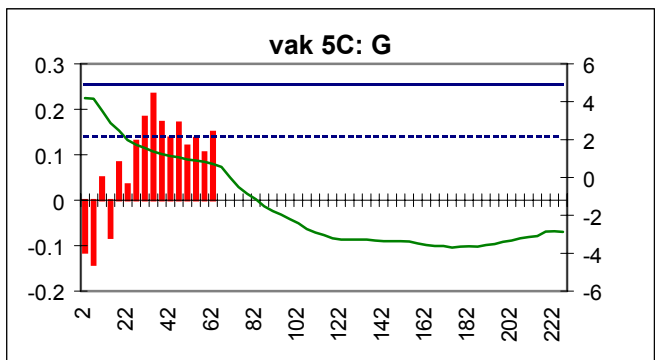
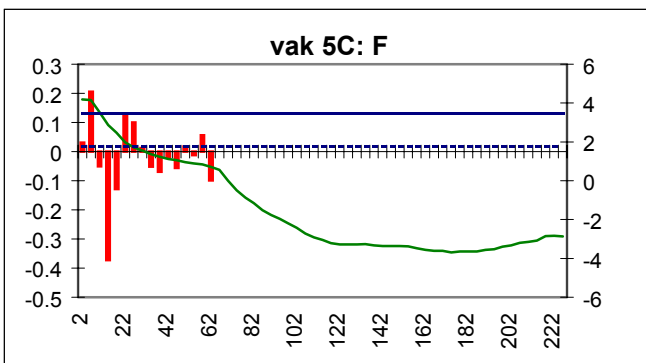
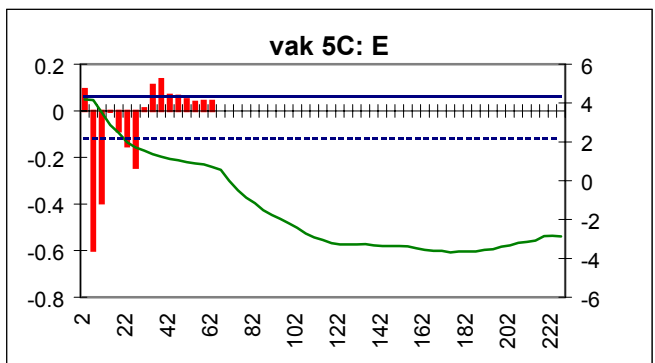
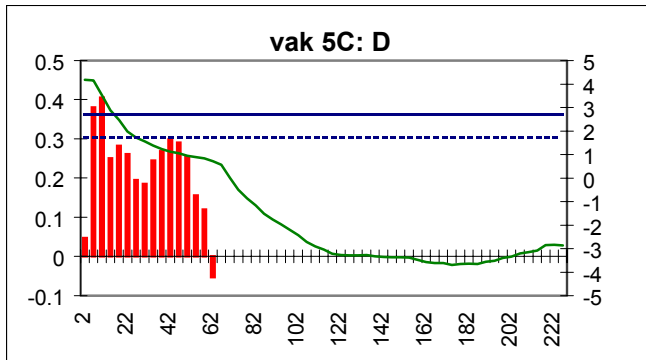
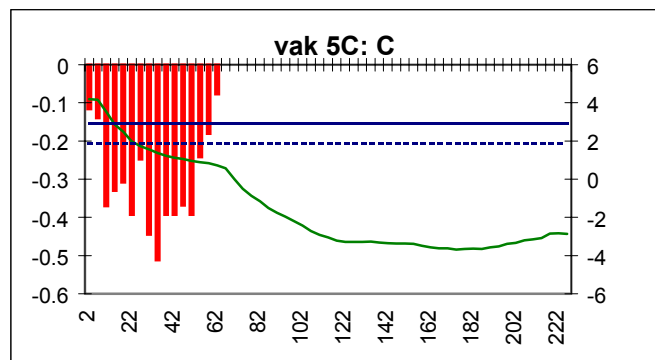
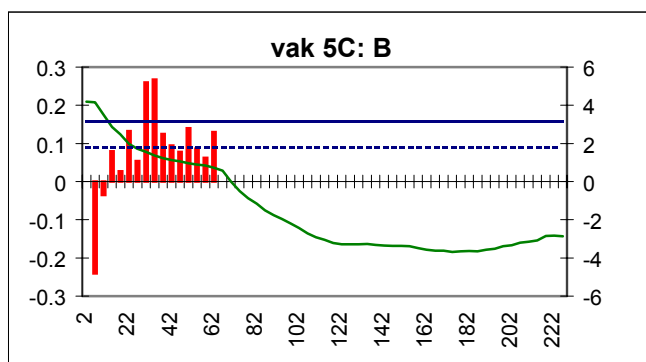
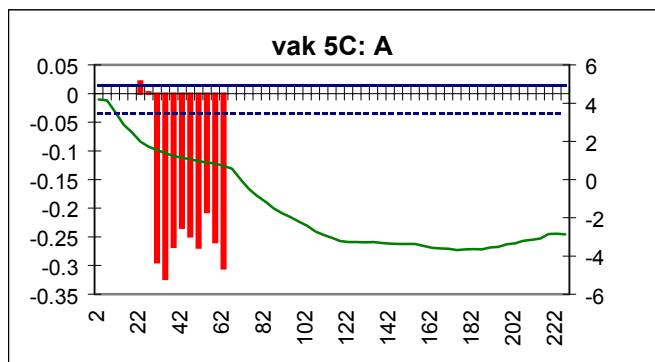


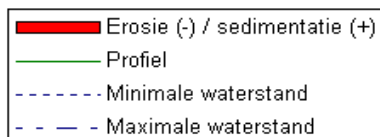
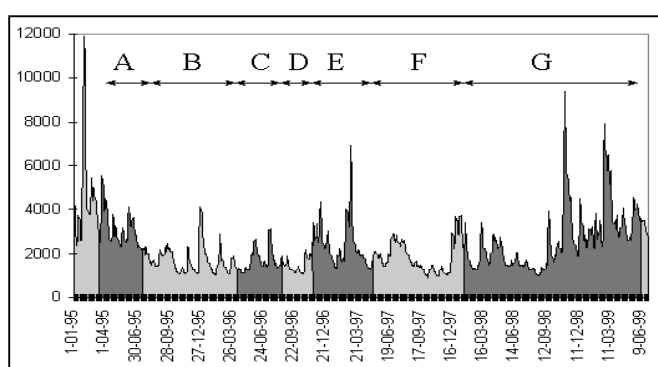
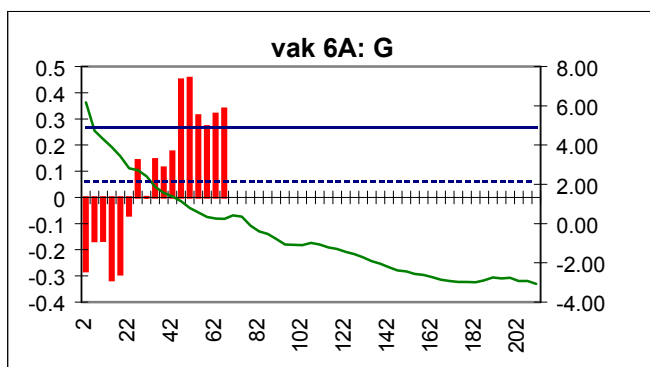
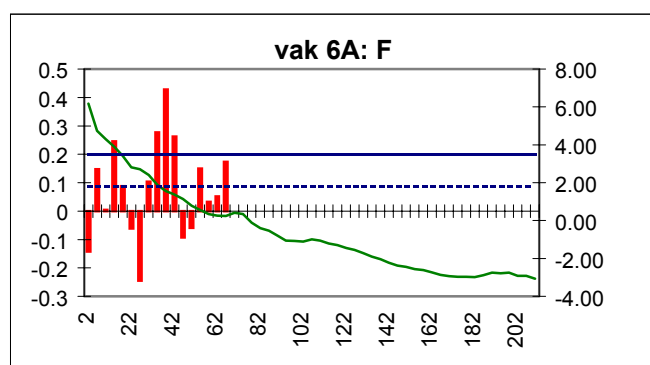
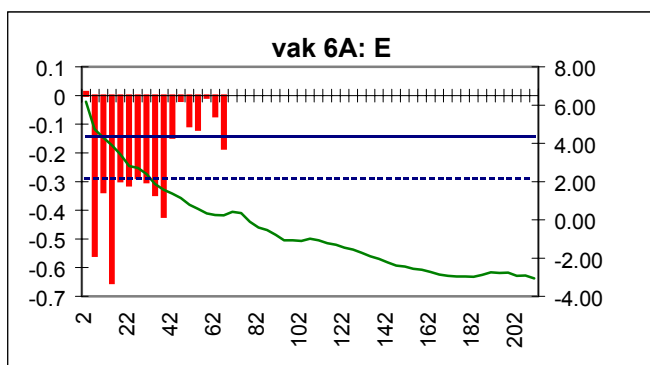
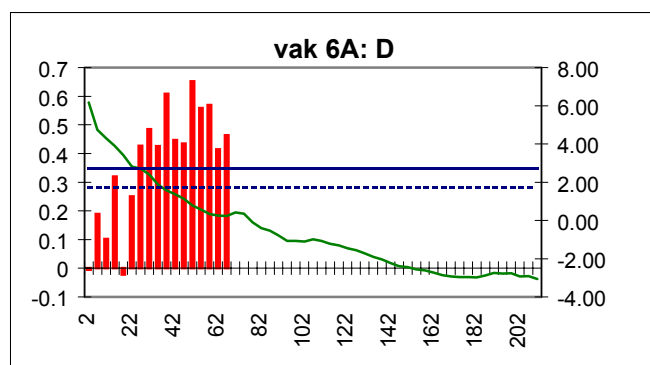
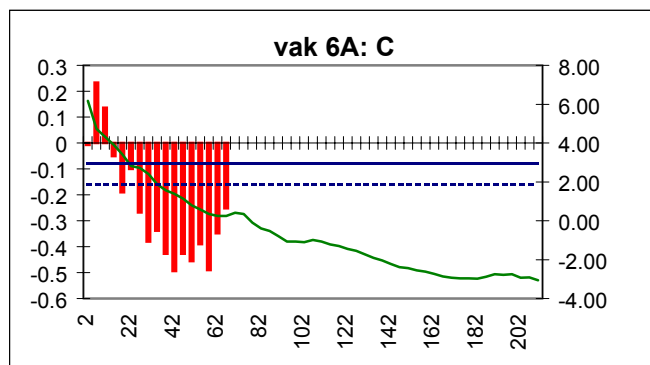
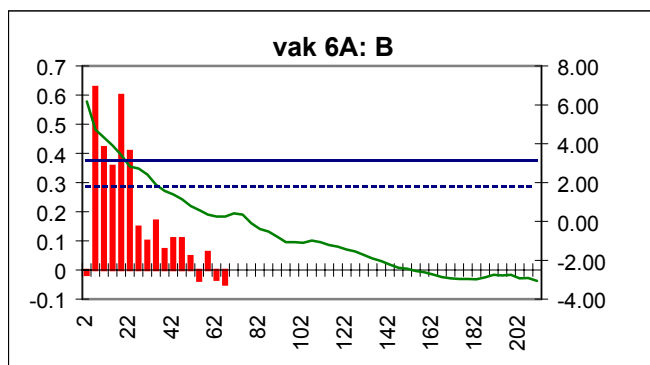
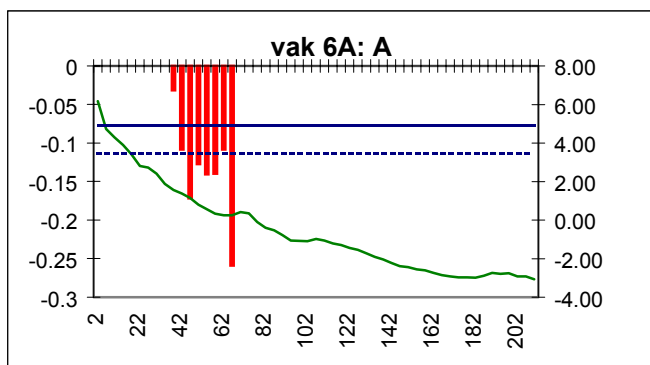


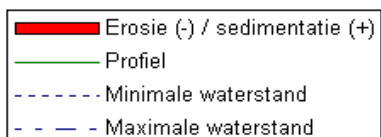
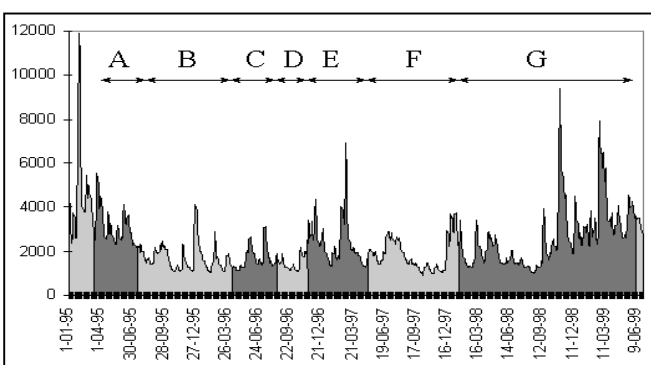
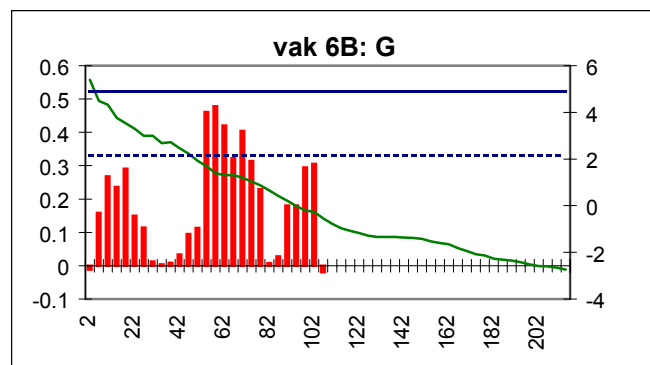
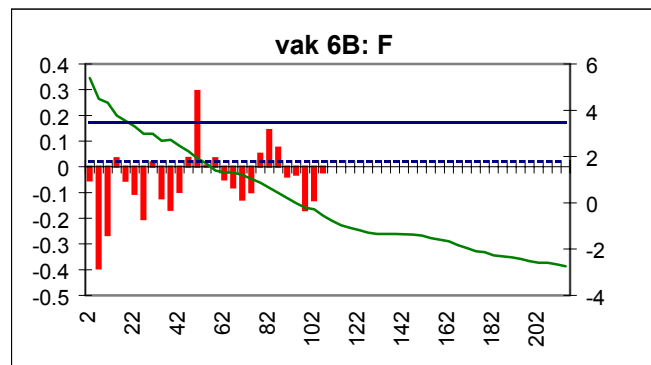
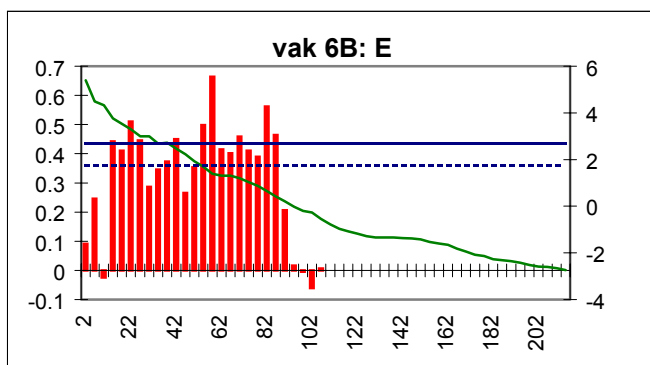
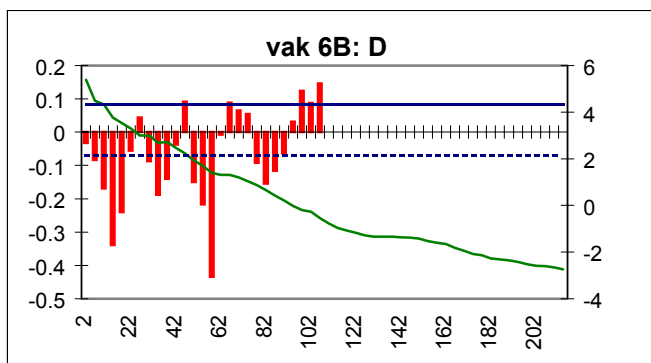
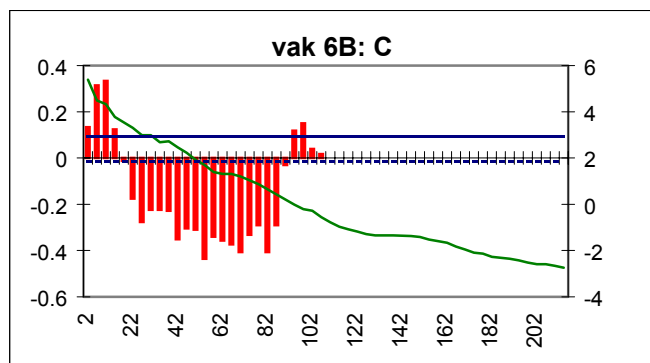
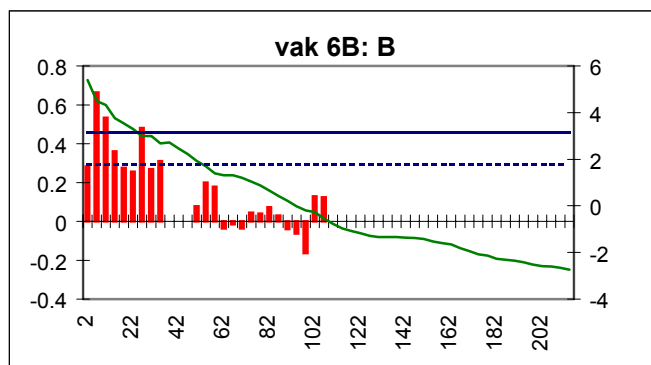
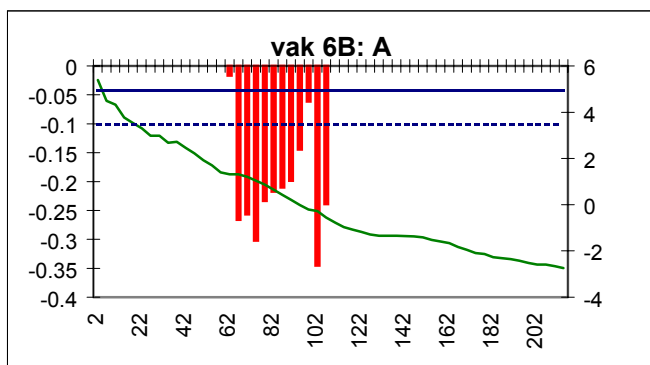


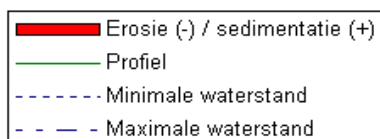
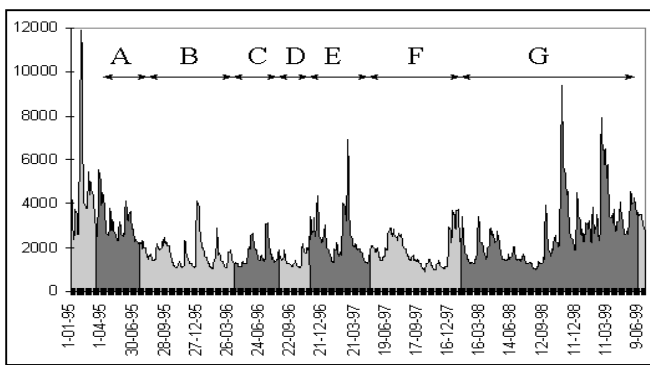
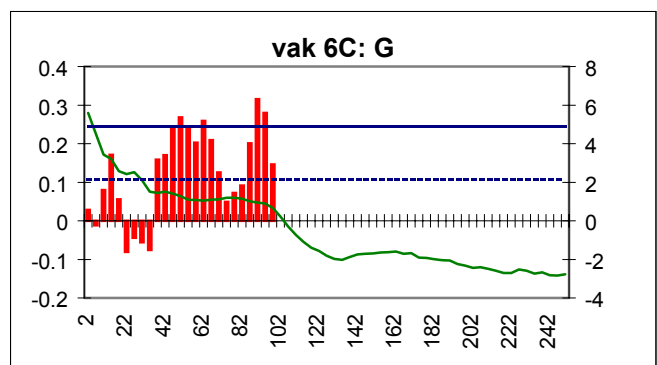
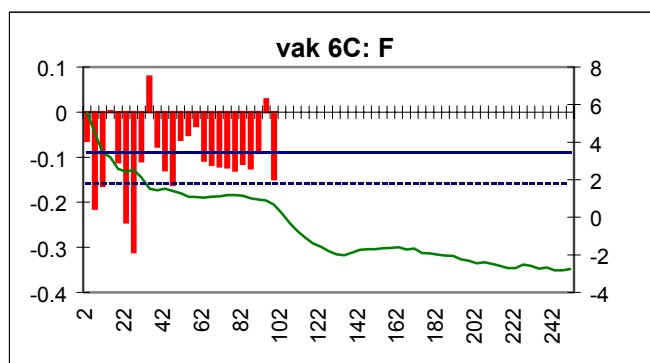
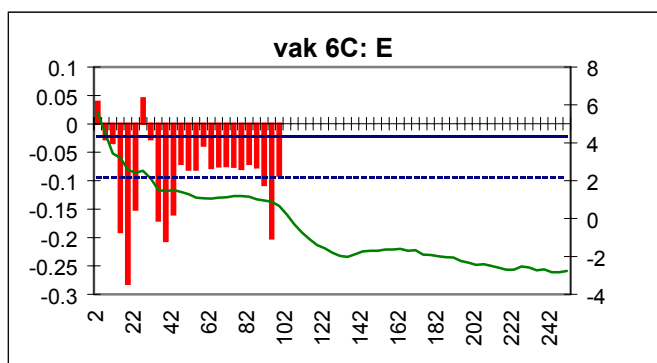
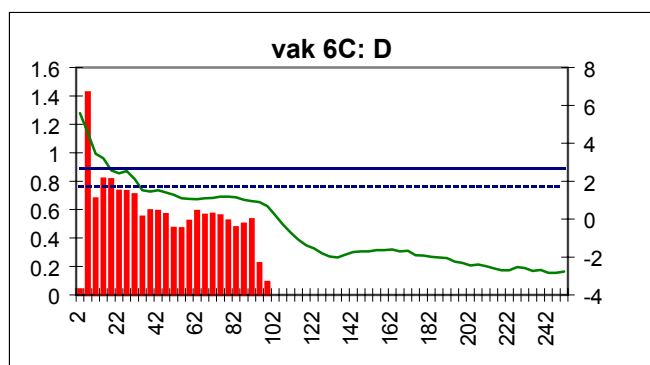
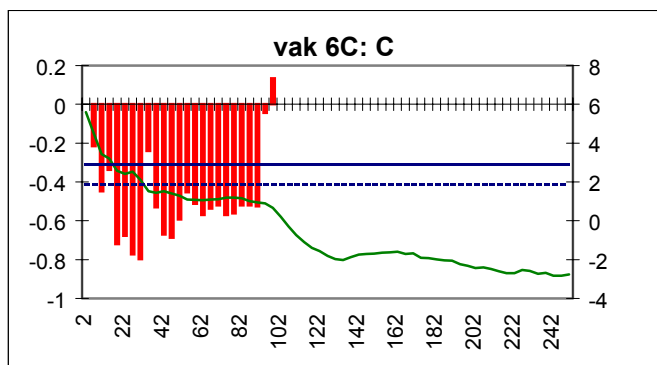
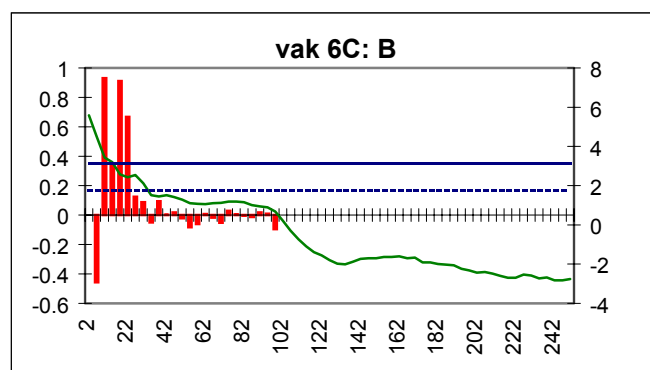
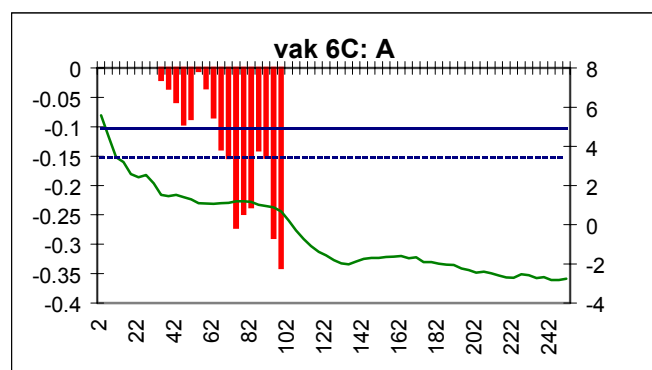


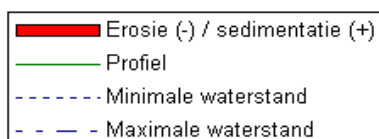
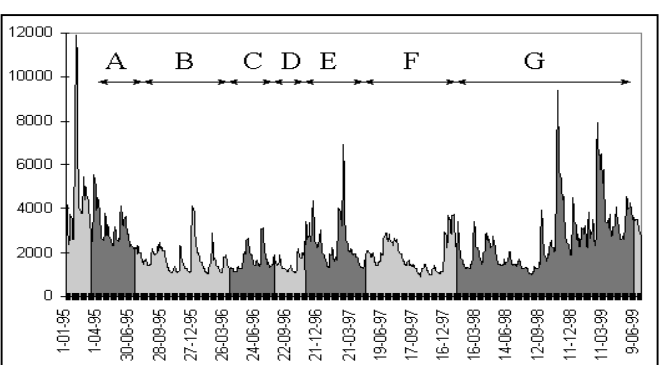
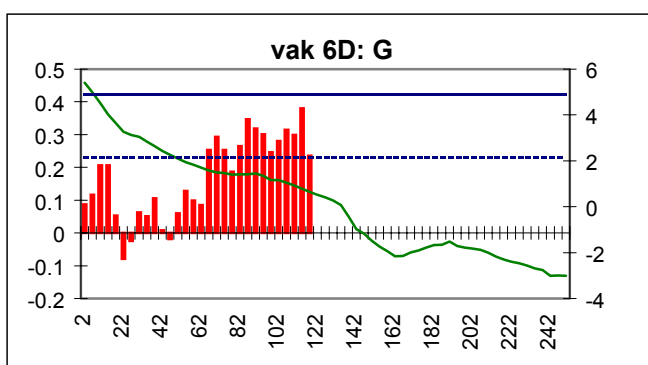
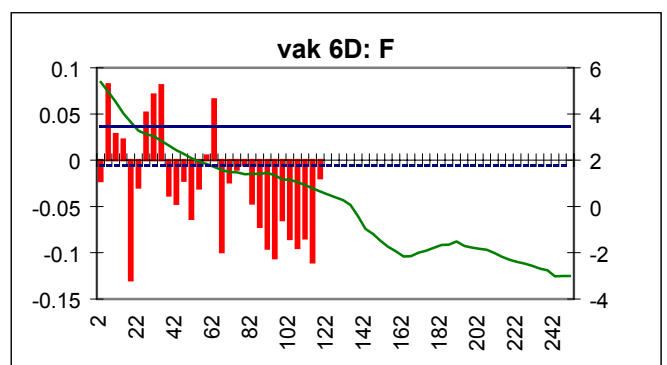
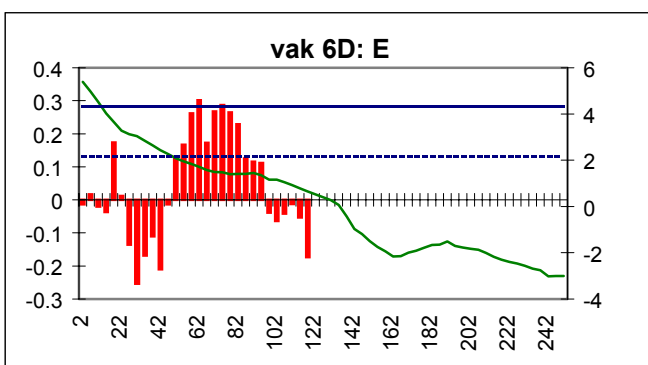
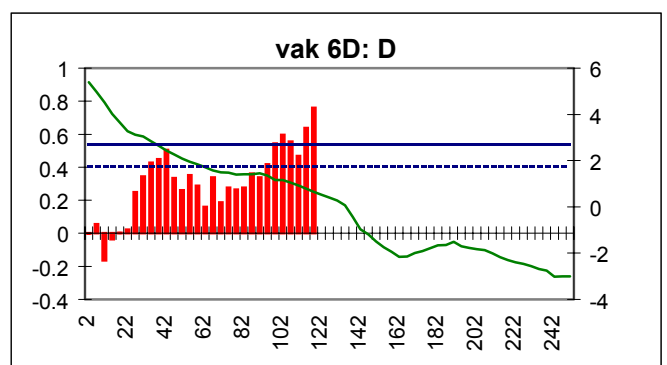
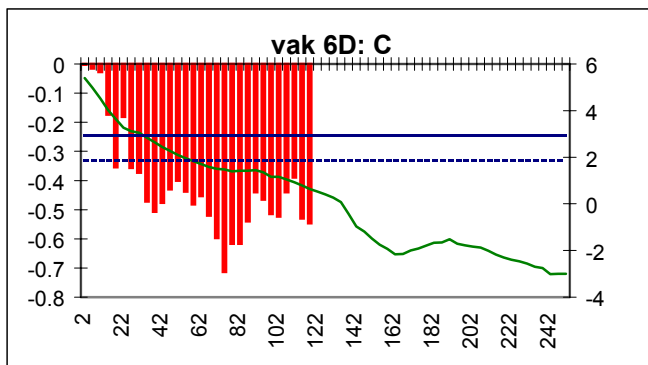
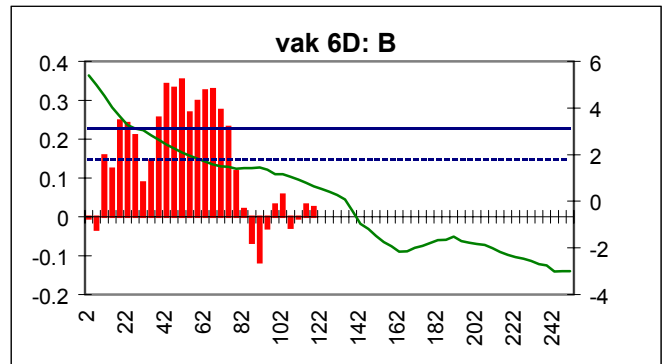
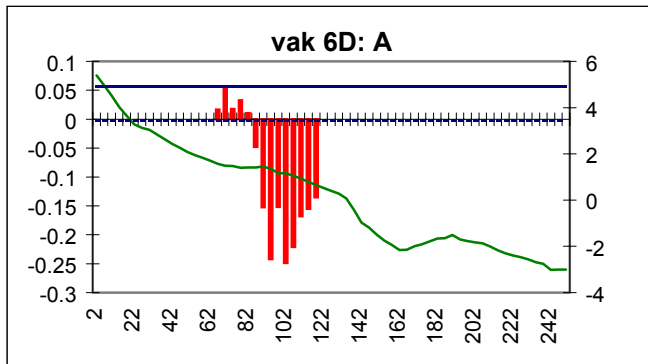






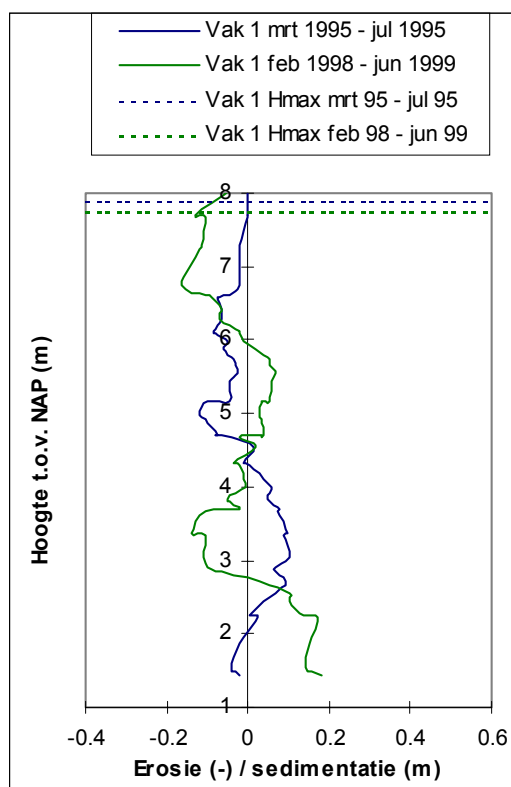
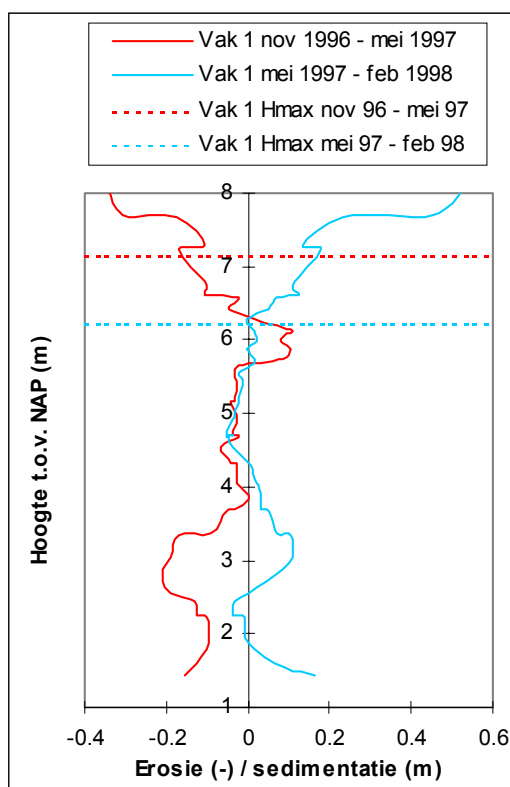
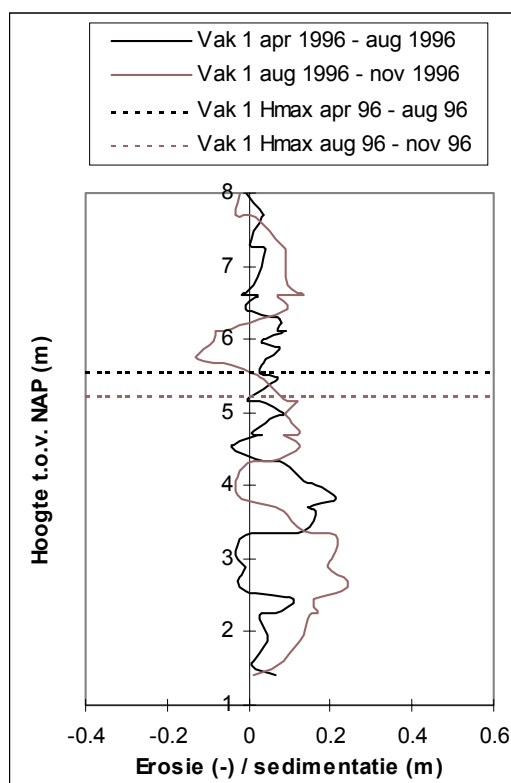
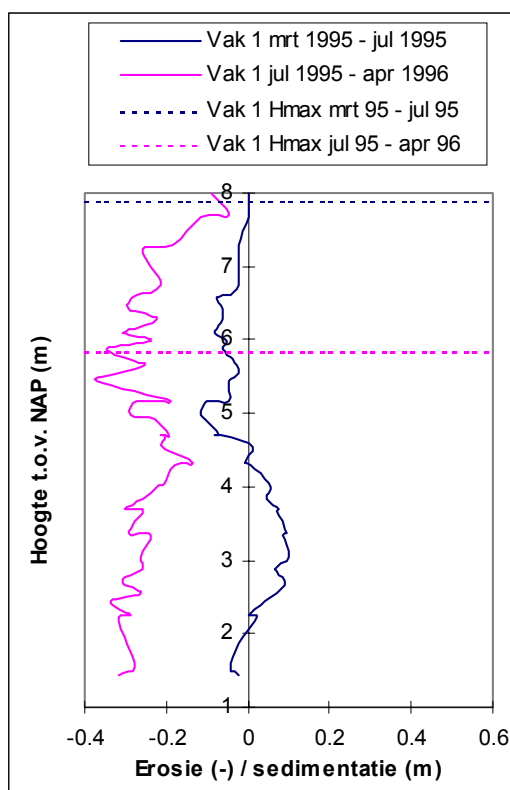


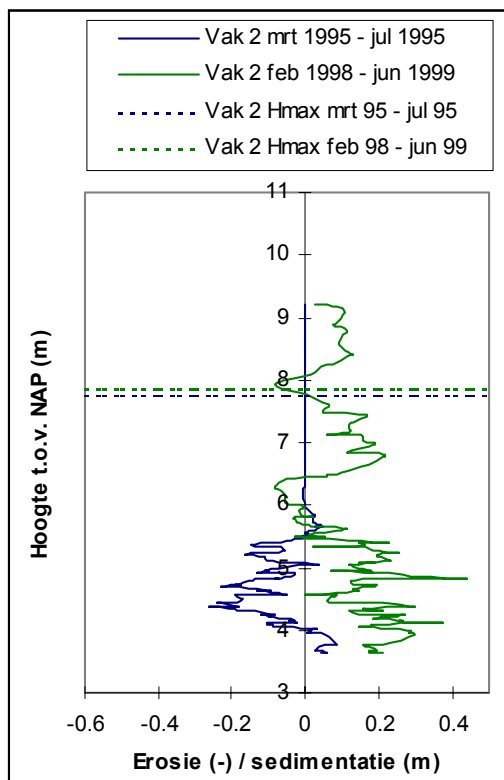
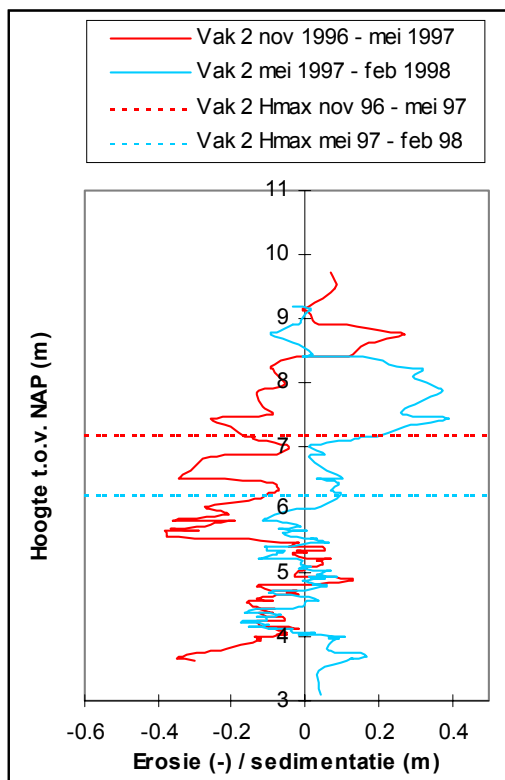
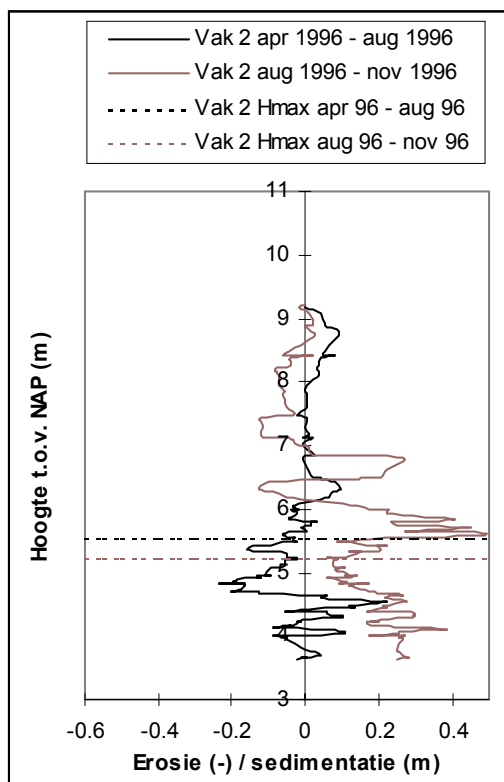
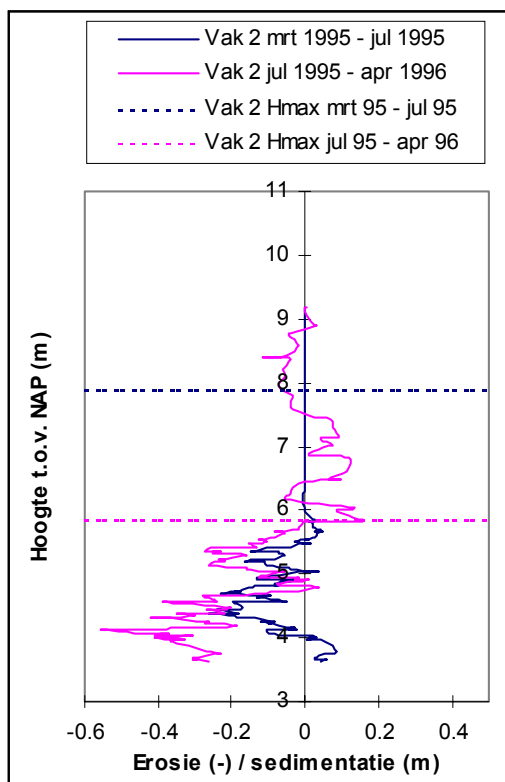


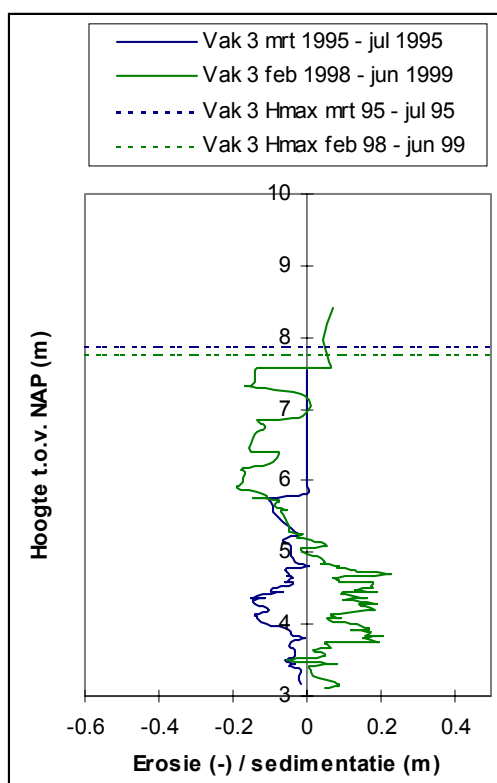
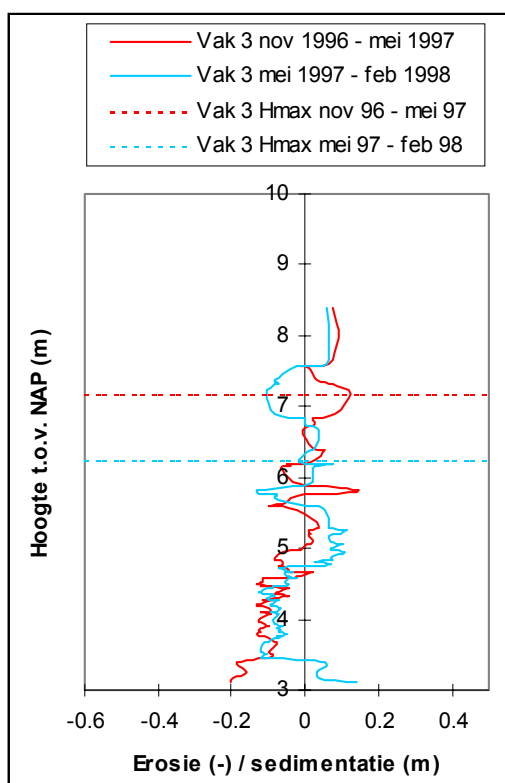
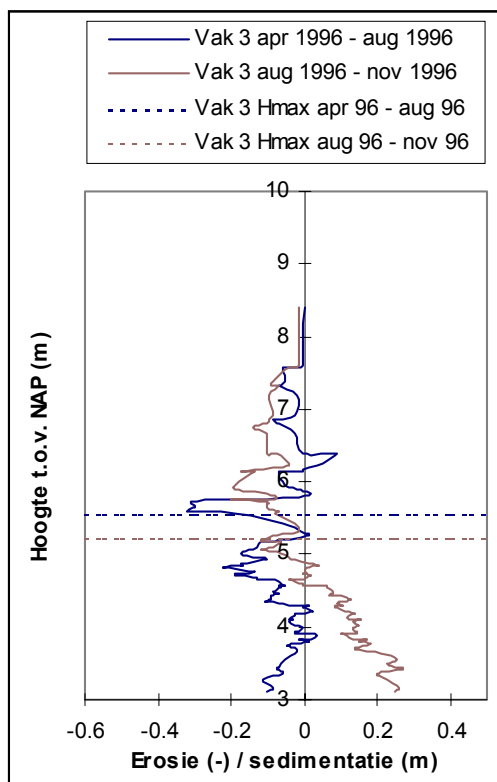
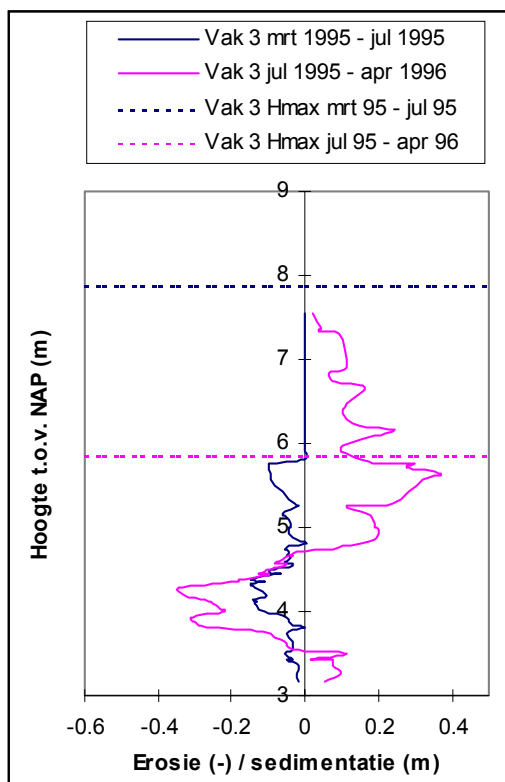


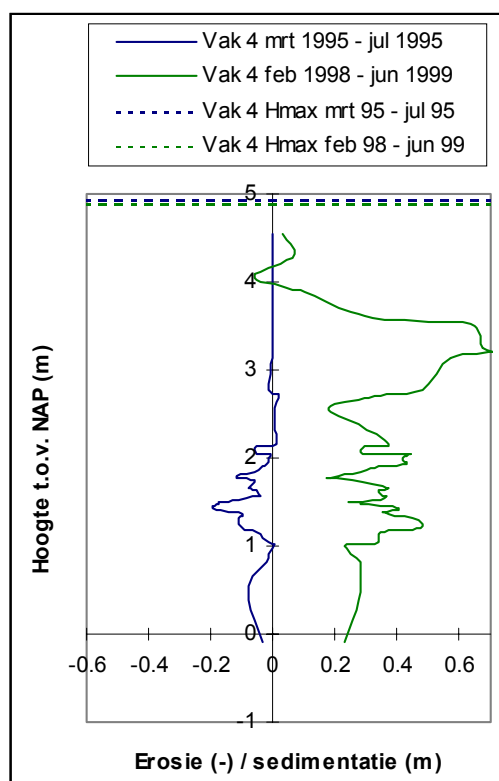
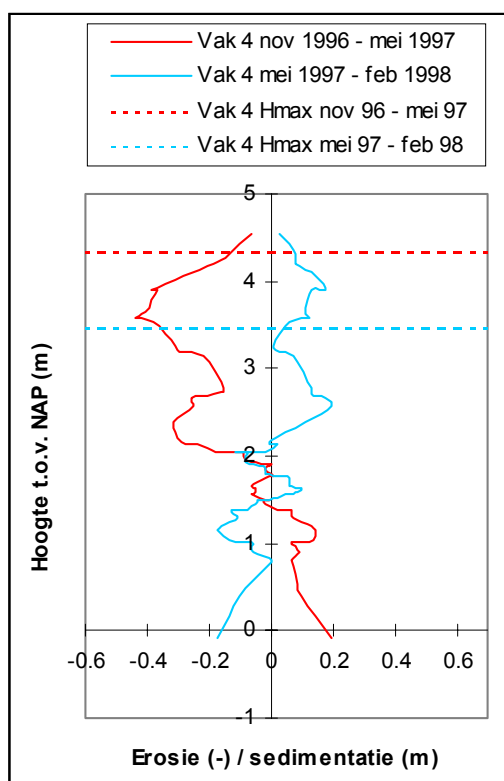
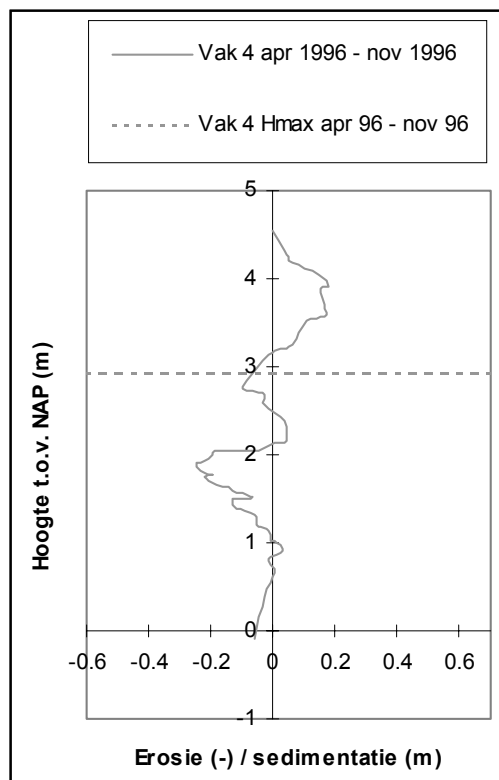
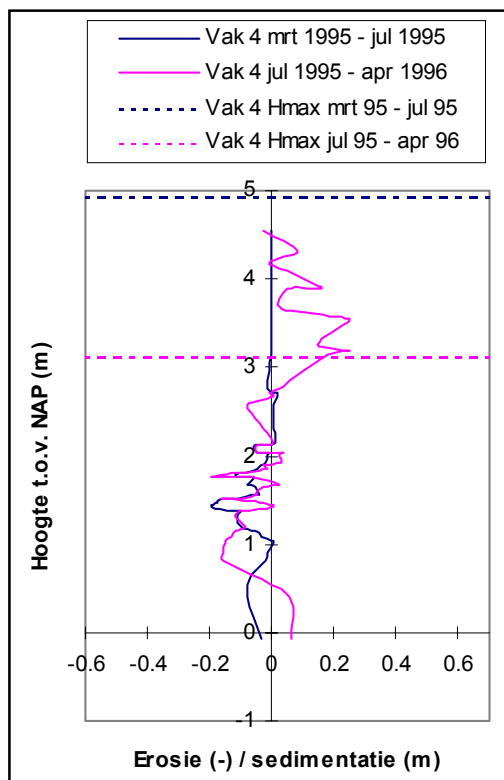
Bijlage 3:

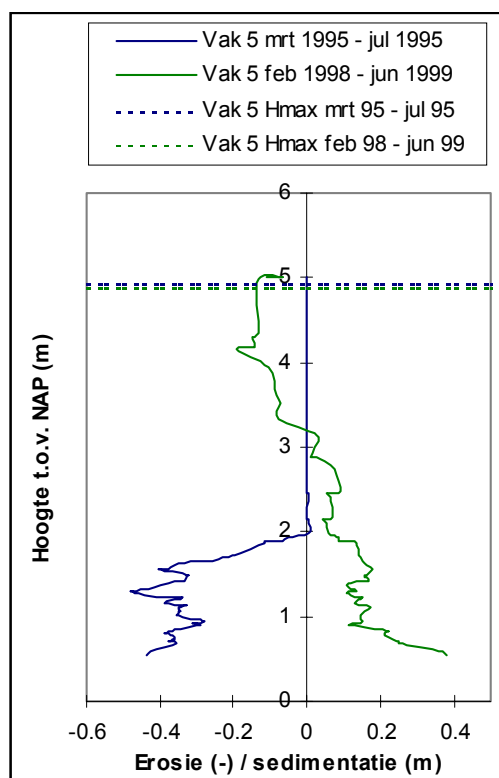
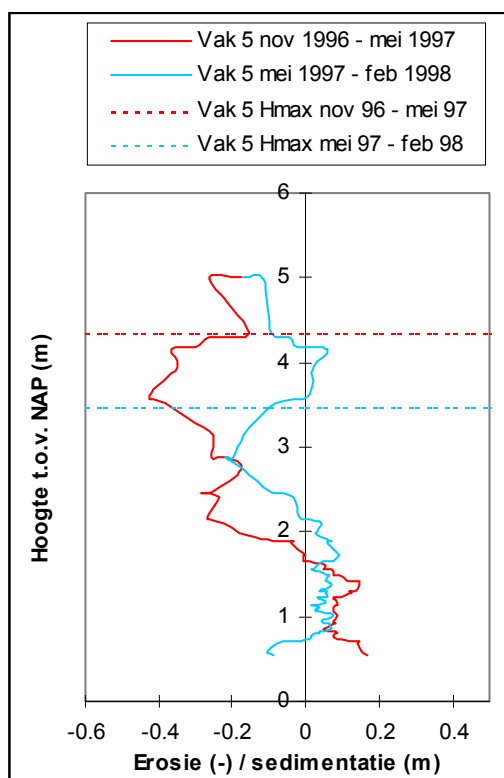
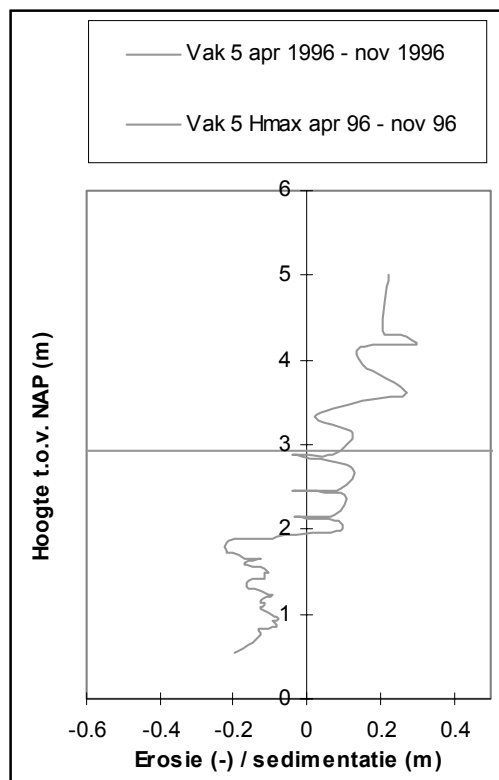
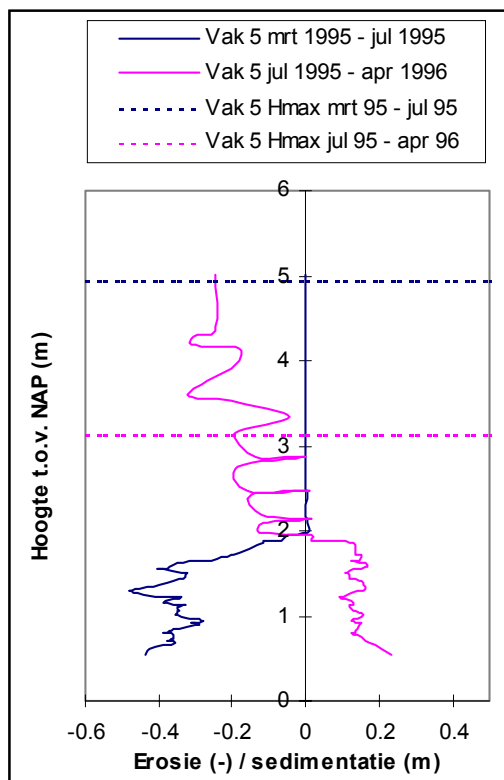
De erosie (-) en sedimentatie (+) uitgezet tegen de dieptes van het talud van het kribvakstrand over een lijn loodrecht op de oever voor opeenvolgende periodes van monitoring, alsmede de maximale waterstand boven dit talud tijdens de betreffende periodes van monitoring.

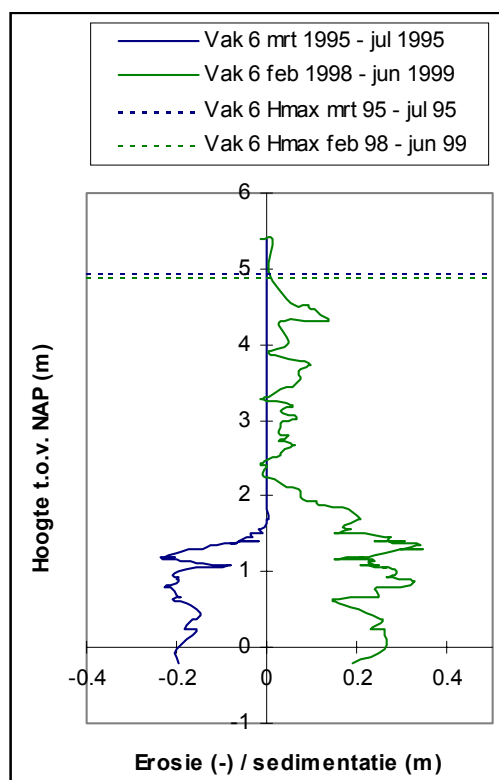
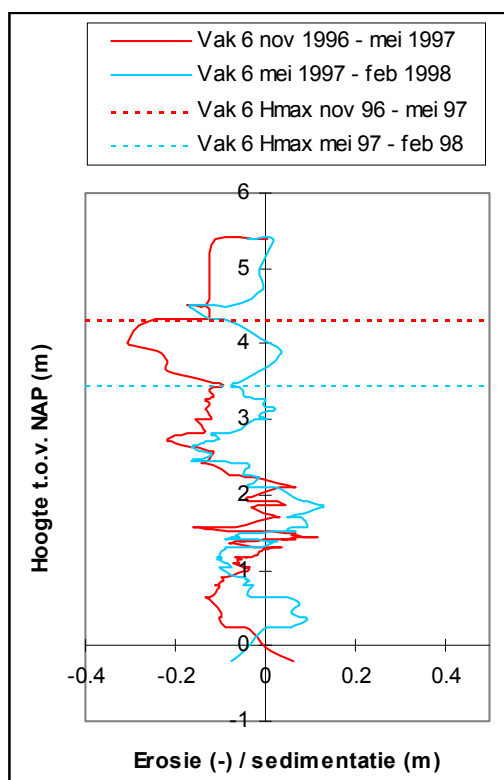
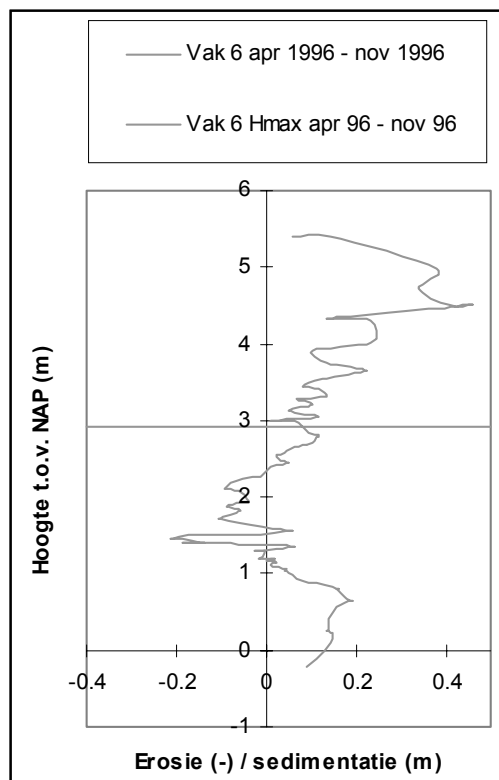
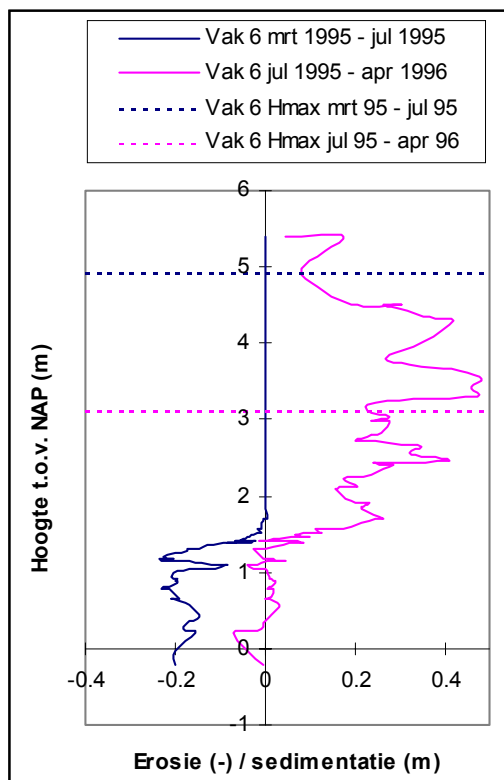






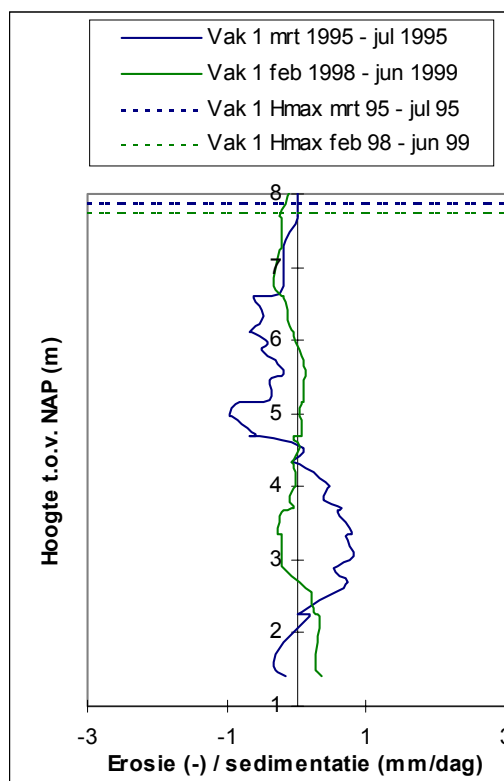
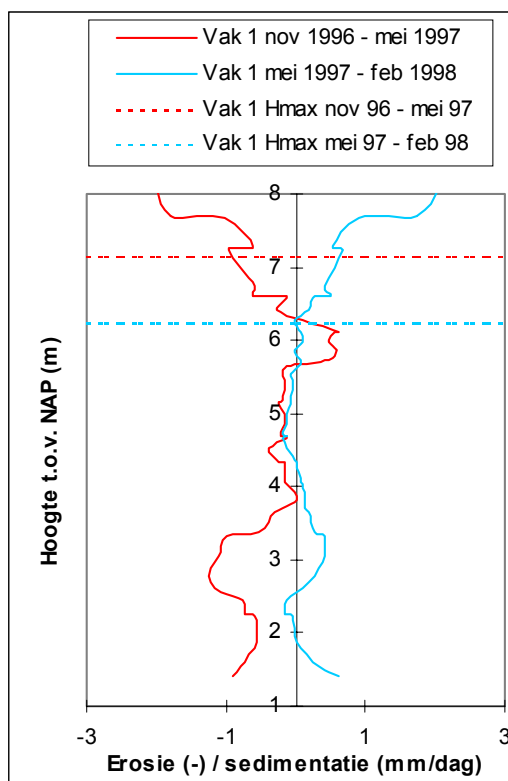
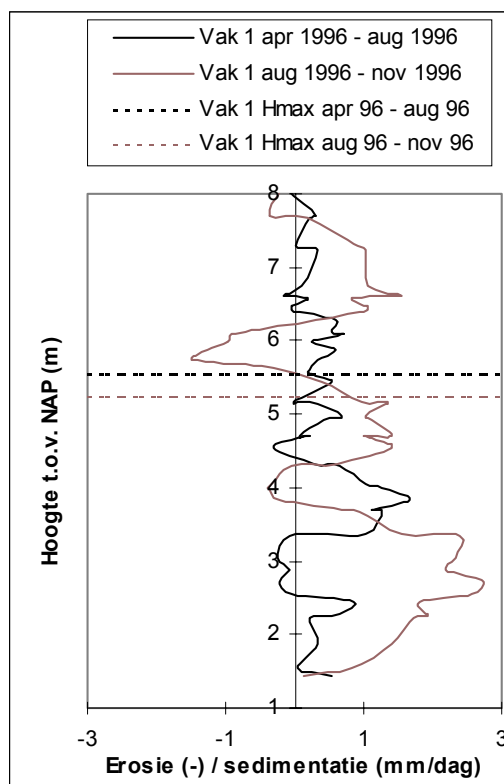
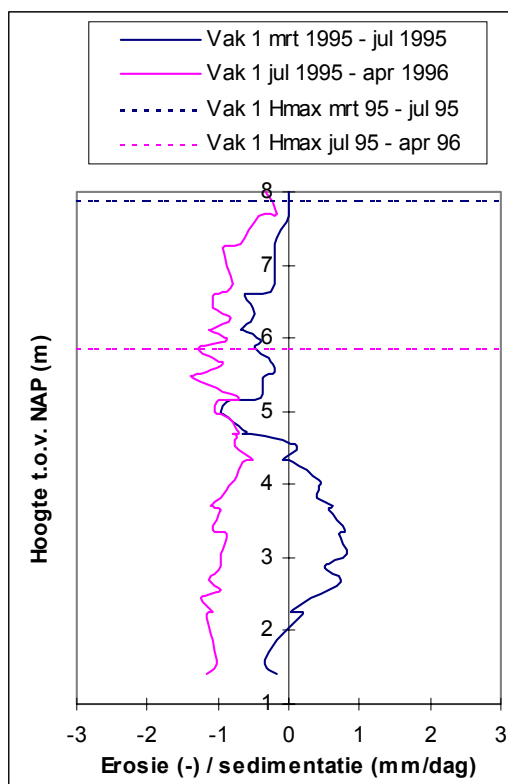


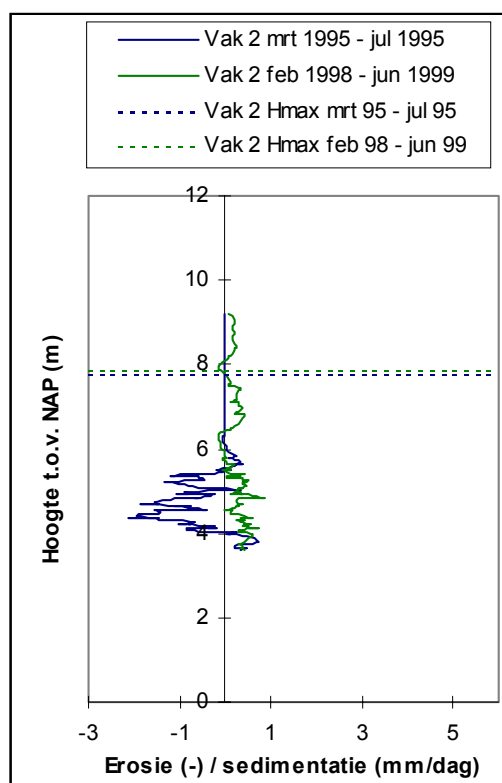
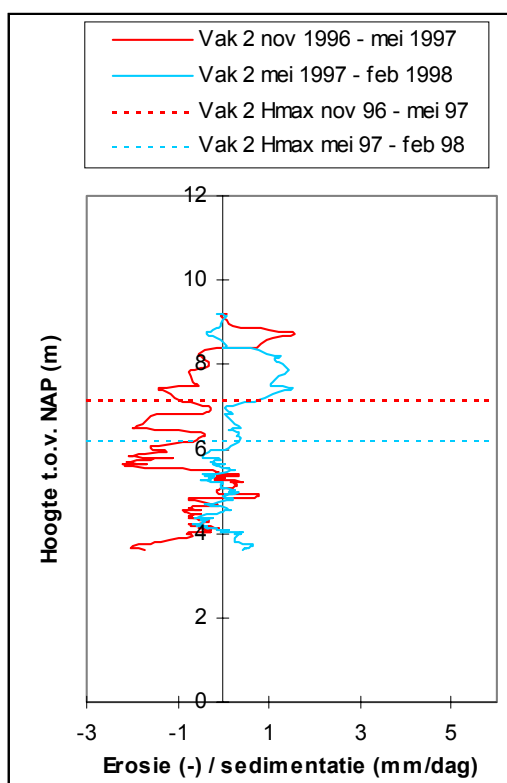
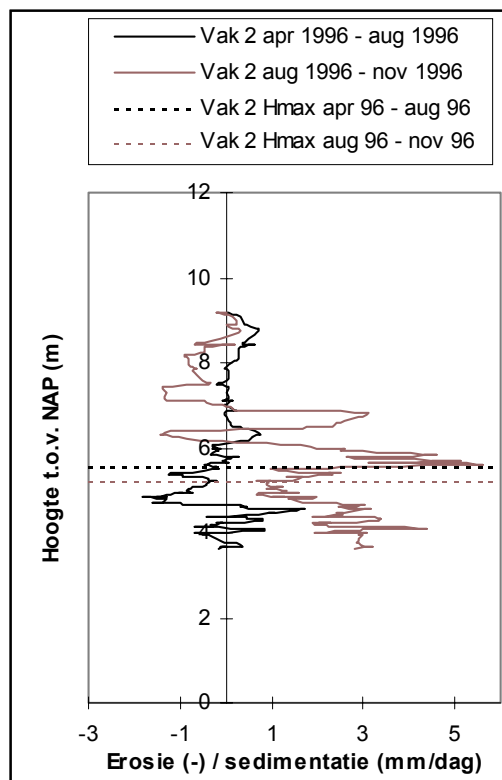
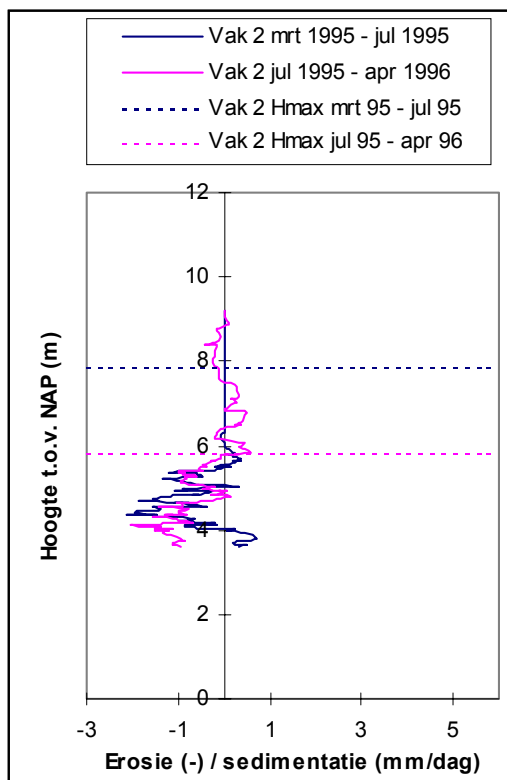


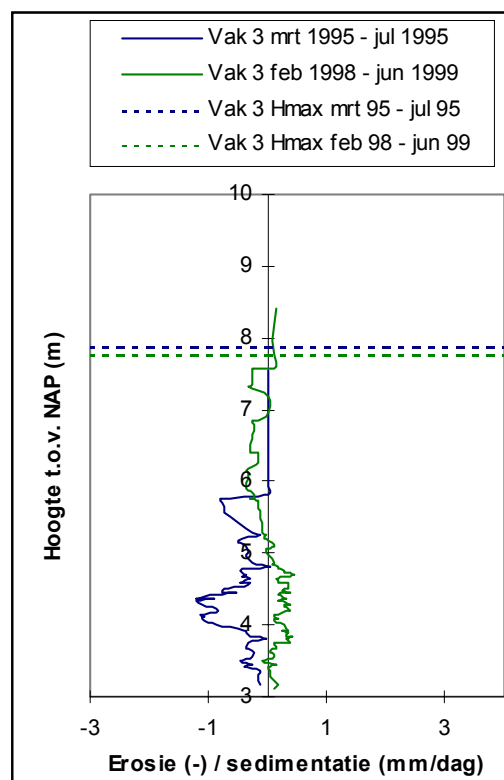
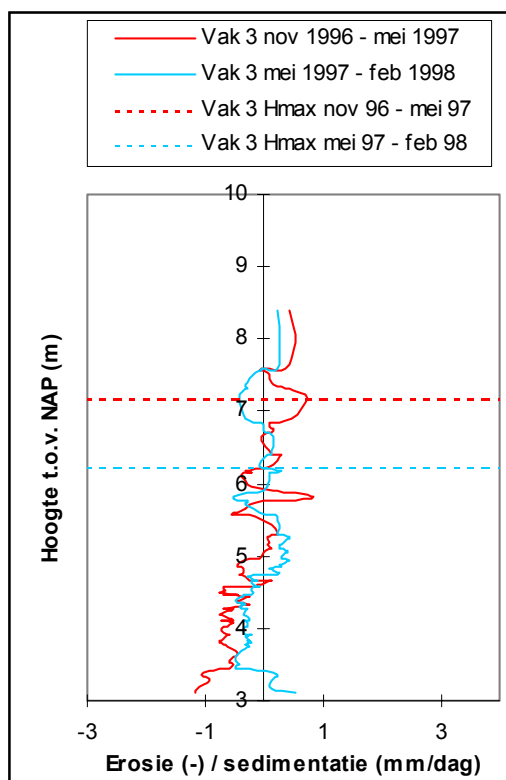
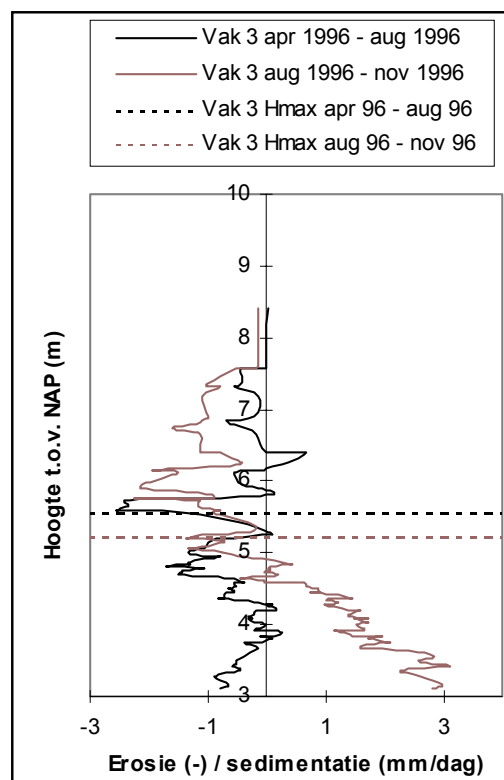
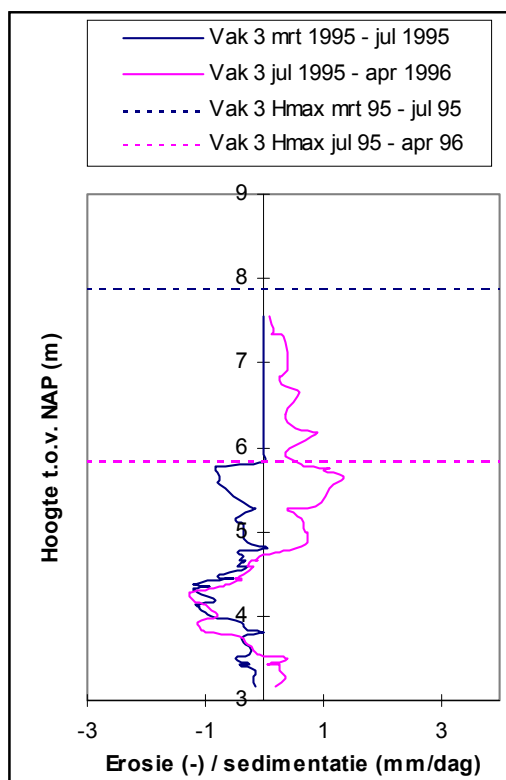


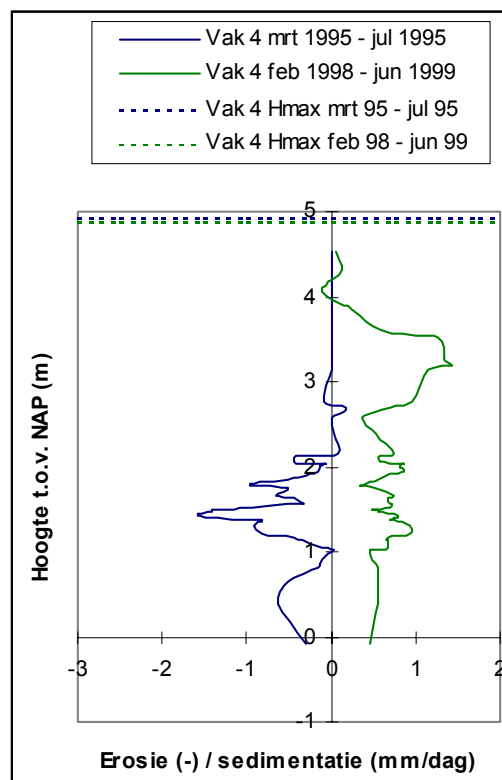
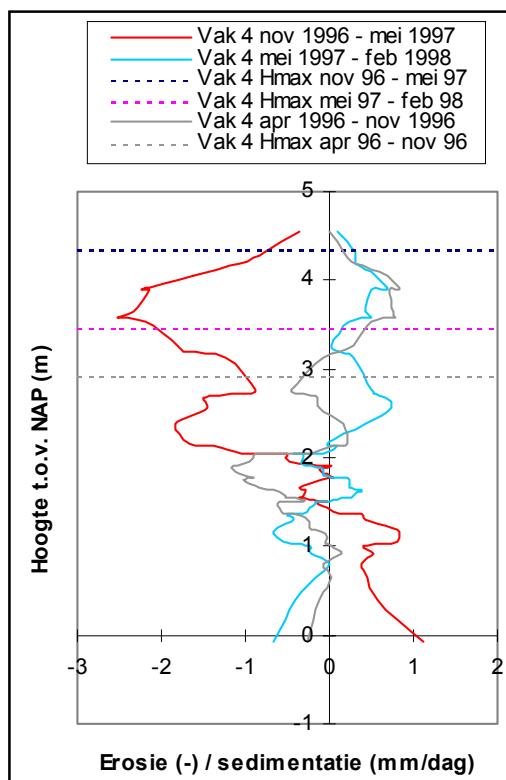
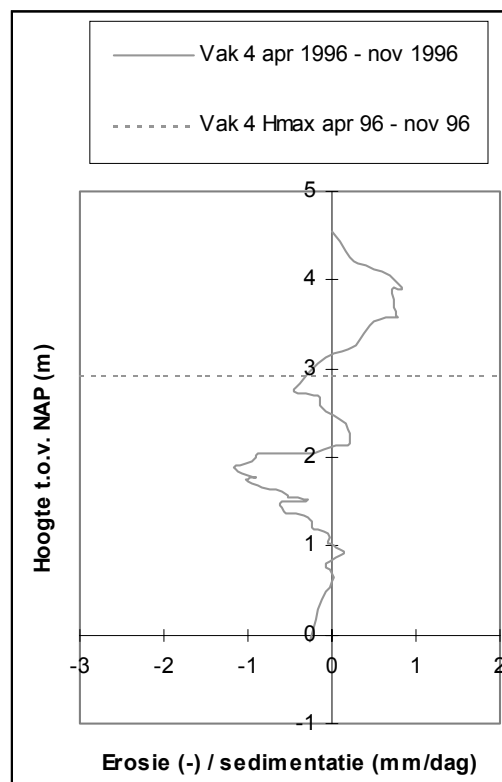
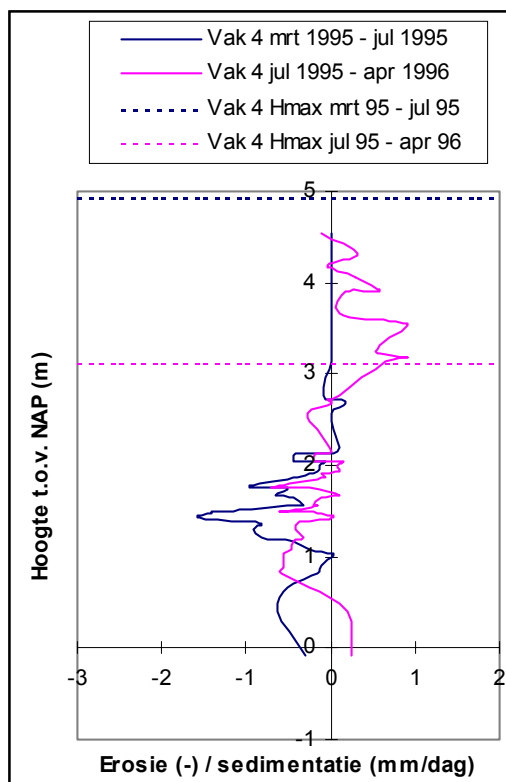
Bijlage 4:

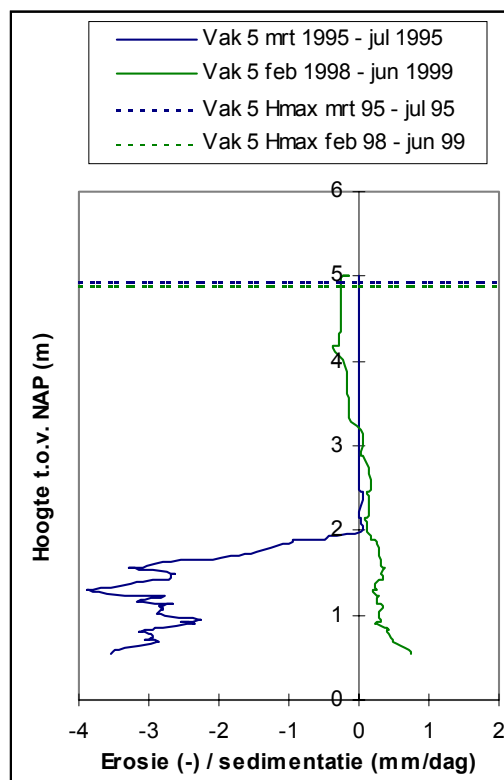
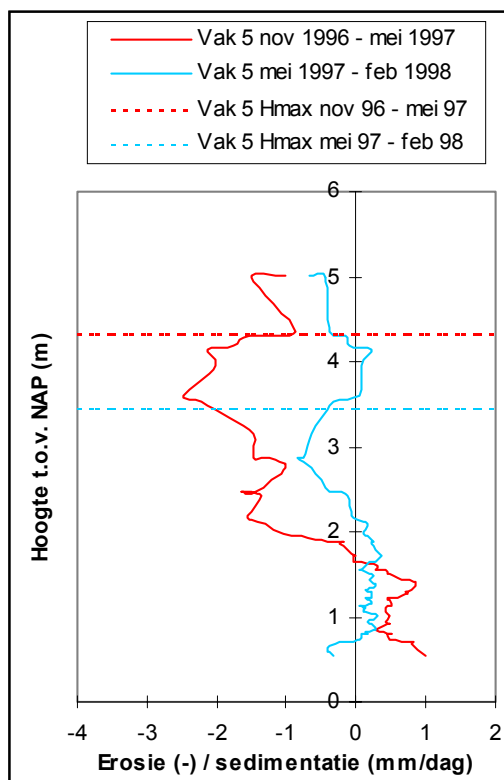
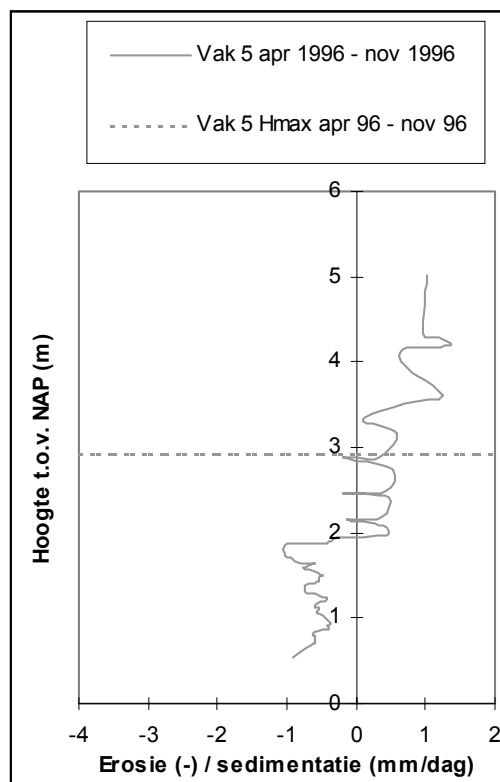
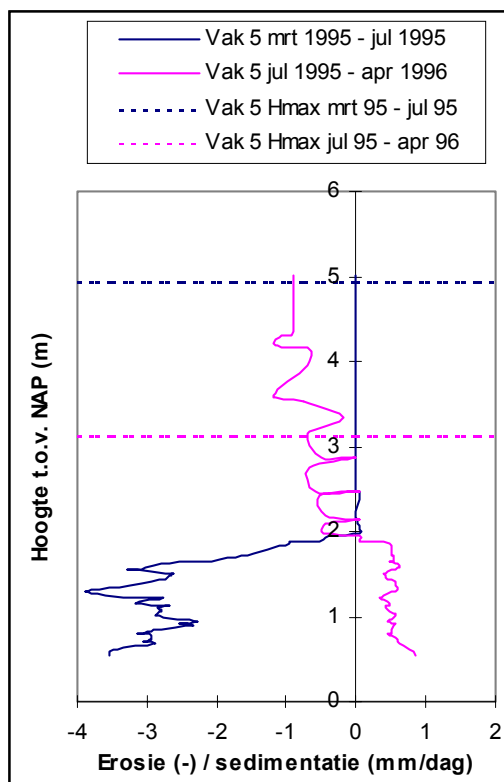
De erosie- (-) en sedimentatiesnelheid (+) uitgezet tegen de dieptes van het talud van het kribvakstrand over een lijn loodrecht op de oever voor opeenvolgende periodes van monitoring, alsmede de maximale waterstand boven dit talud tijdens de betreffende periodes van monitoring.

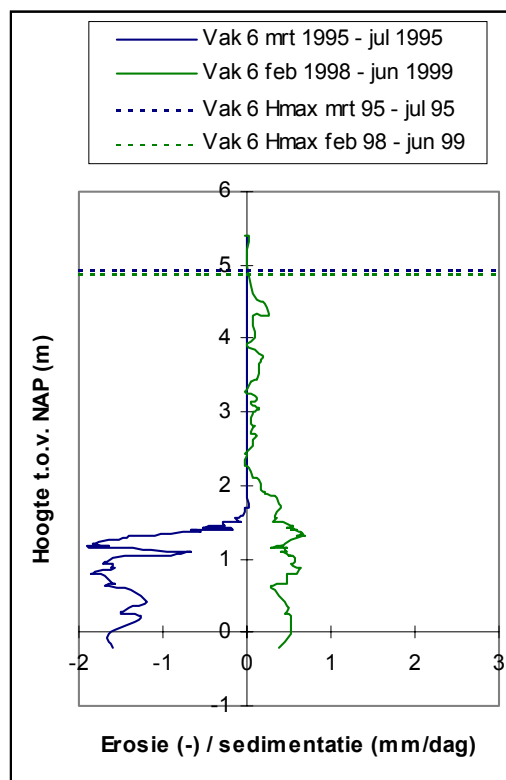
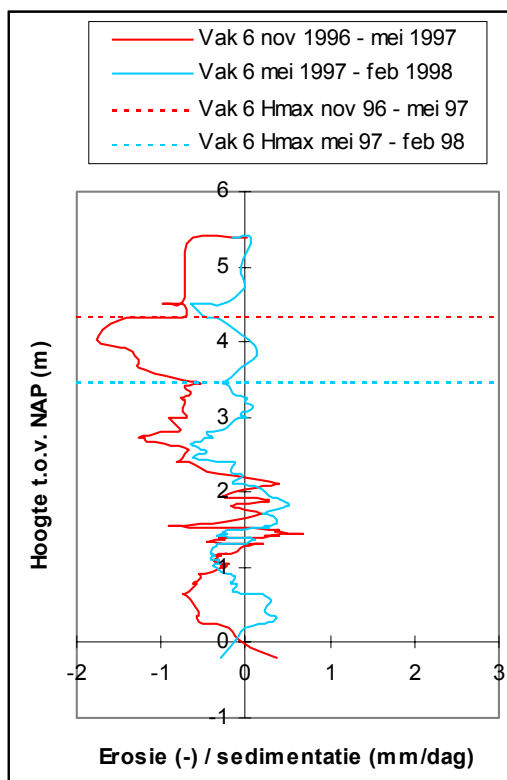
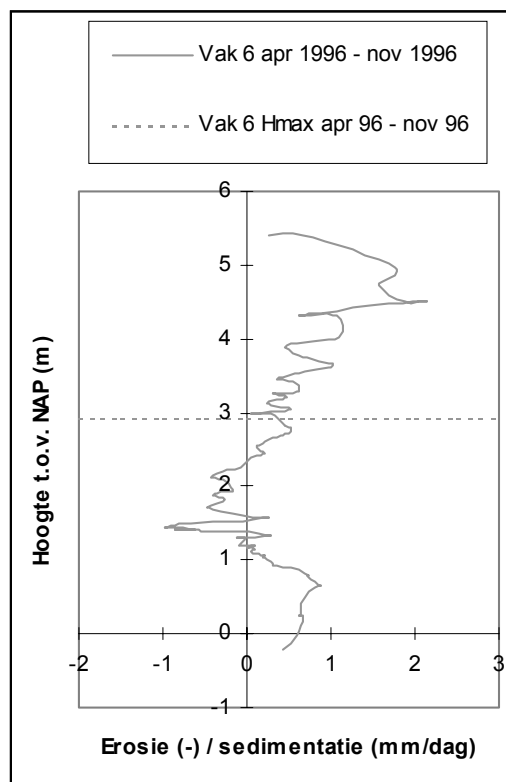
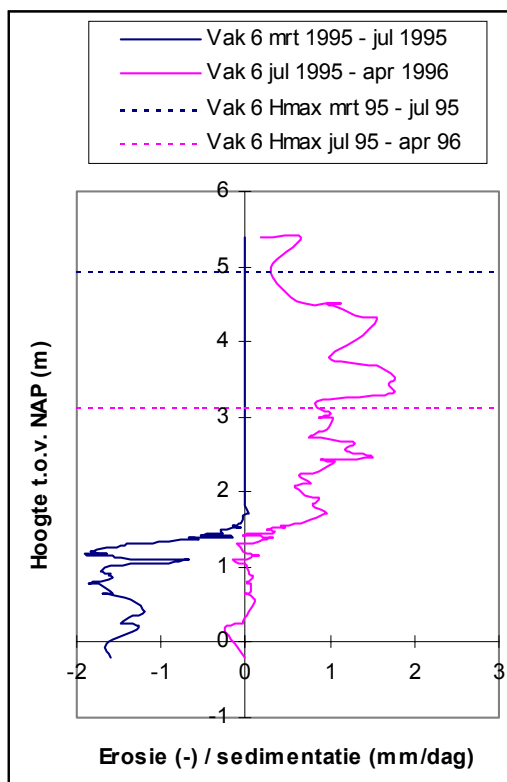




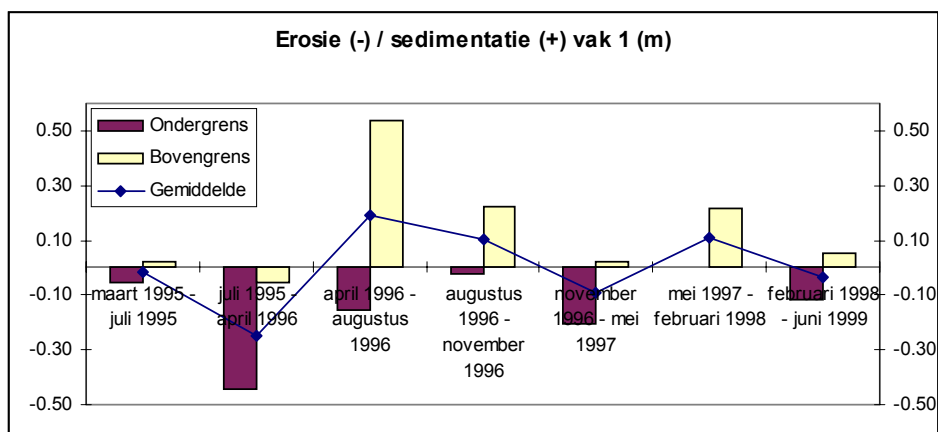




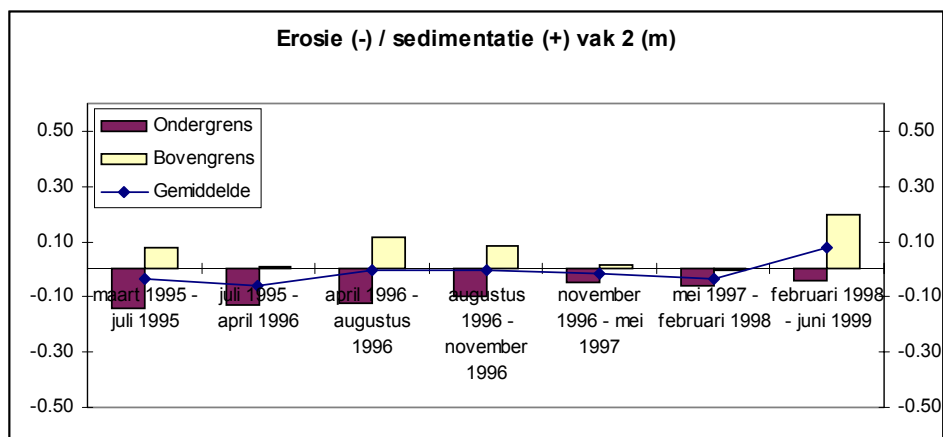




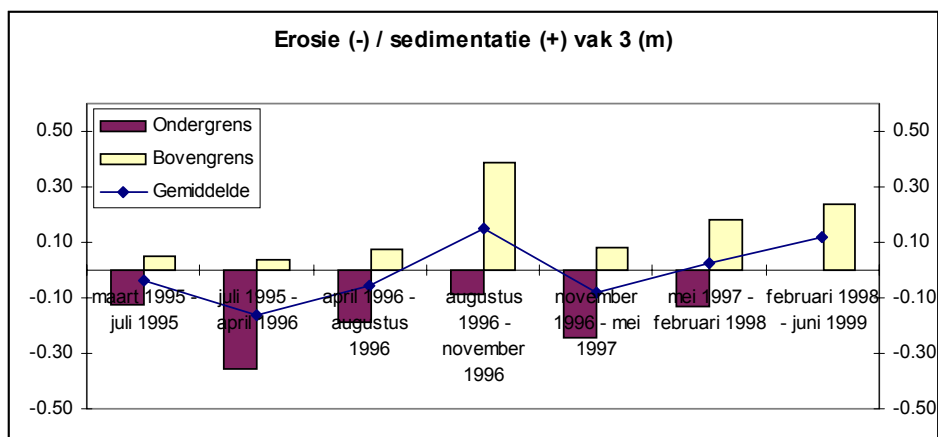
Bijlage 5



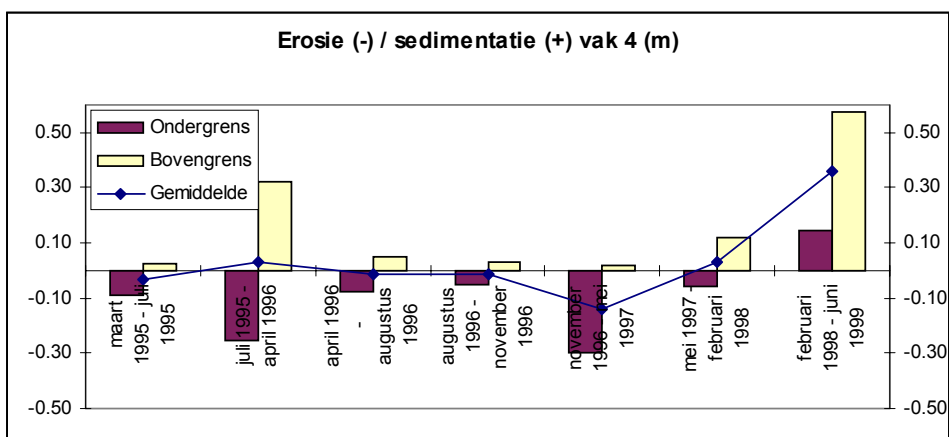
Figuur Bijlage 4.1. De sedimentatie cq erosie van zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar, voor de kribvakken van sectie 1 (zie figuur 4.12).



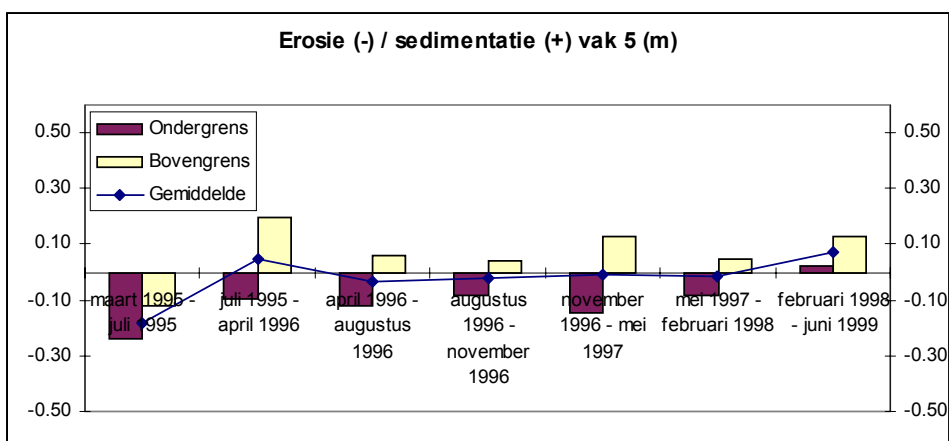
Figuur Bijlage 4.2. De sedimentatie cq erosie van zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar, voor de kribvakken van sectie 2 (zie figuur 4.12).



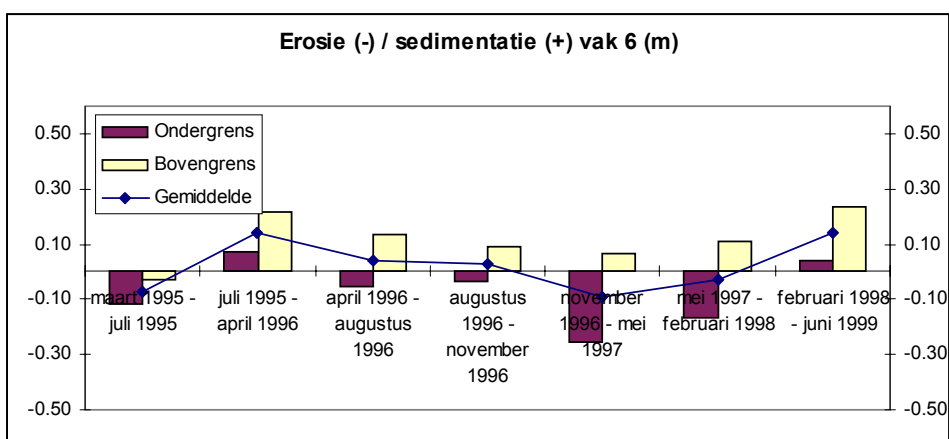
Figuur Bijlage 4.3. De sedimentatie cq erosie van zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar, voor de kribvakken van sectie 3 (zie figuur 4.12).



Figuur Bijlage 4.4. De sedimentatie cq erosie van zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar, voor de kribvakken van sectie 4 (zie figuur 4.12).



Figuur Bijlage 4.5. De sedimentatie cq erosie van zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar, voor de kribvakken van sectie 5 (zie figuur 4.12).



Figuur Bijlage 4.6. De sedimentatie cq erosie van zand tussen de kribben langs de Waal tussen opeenvolgende bodempeilingen gedurende een periode van 4 jaar, voor de kribvakken van sectie 6 (zie figuur 4.12).

