

## Onzekerheidsanalyse bodemverandering Grensmaas

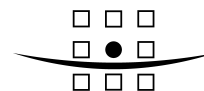
Een onderzoek naar de onzekerheid in de met SOBEK-graded gemodelleerde bodemverandering van de Grensmaas ten gevolge van de variatie in de afvoer

Augustus 2005  
Definitief rapport  
W. de Jong  
R0002/R/WDJ./Nij



Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Directie Limburg




**ROYAL HASKONING**
**HASKONING NEDERLAND B.V.  
COASTAL & RIVERS**

Barbarossastraat 35  
Postbus 151  
6500 AD Nijmegen  
+31 (0)24 328 42 84 Telefoon  
info@nijmegen.royalhaskoning.com E-mail  
www.royalhaskoning.com Internet  
Arnhem 09122561 KvK

Documenttitel Onzekerheidsanalyse bodemverandering  
Grensmaas  
Een onderzoek naar de onzekerheid in de met  
SOBEK-graded gemodelleerde  
bodemverandering van de Grensmaas ten  
gevolge van de variatie in de afvoer

Verkorte documenttitel Onzekerheidsanalyse bodemverandering  
Grensmaas

Status Definitief rapport afstudeeropdracht

Datum Augustus 2005

Projectnummer 9R2061

Referentie R0002/R/WDJ./Nij

Auteur Wiebe de Jong

In opdracht van Universiteit Twente, Civiele Techniek,  
Vakgroep Waterbeheer (Water Engineering &  
Management)

Royal Haskoning, afdeling Coastal & Rivers NL,  
Nijmegen

Afstudeercommissie Dr. ir. J.S. Ribberink (Universiteit Twente)  
Dr. Ir. M.J.Kolkman (Universiteit Twente)  
Dr. Ir. M van Ledden (Royal Haskoning)  
Ir. U.A. Boot (Rijkswaterstaat Directie Limburg)



## SAMENVATTING

Het kunnen vaststellen van onzekerheden in het morfologische gedrag van rivieren is noodzakelijk voor een veilig en duurzaam rivierbeheer. In dit onderzoek wordt de onzekerheid in het morfologisch gedrag van de Grensmaas beschouwd. De Grensmaas kenmerkt zich doordat het een rivier is met een gegradeerde rivierbedding en een afvoer met een korte responsietijd.

De laatste jaren is men bezig met de planvorming en voorbereiding van het Grensmaasproject. Dit project omvat een pakket van rivierverruimingsmaatregelen. Dit pakket moet leiden tot verhoging van het beschermingsniveau tegen hoogwater, het geven van een natuurlijker karakter aan de rivier en de winning van miljoenen tonnen grind. Om de milieueffecten van deze ingrepen vast te stellen is in 2003 door Royal Haskoning een Milieueffectrapportage (MER) opgesteld. Een onderdeel van dit MER is een studie naar het morfologisch gedrag. Door middel van een ééndimensionaal numeriek morfologisch model, SOBEK-graded, zijn de verwachte morfologische effecten gekwantificeerd voor de komende 50 tot 100 jaar. In deze voorspelling is de onzekerheid ten gevolge van de afvoer door middel van 4 verschillende afvoerscenario's meegenomen. Het is echter onbekend of deze afvoerscenario's de werkelijk heersende onzekerheid in de gemodelleerde bodemverandering goed vaststellen.

Recent onderzoek (Van der Klis (2003) en Van Vuren (2005)) heeft geresulteerd in toenemend inzicht in de toepassing van stochastische beschrijvingsmethoden om de onzekerheid in morfologische voorspellingen te kwantificeren. Deze methodes zijn toegepast op de Rijntakken, welke een meer uniforme rivierbedding hebben. In dit onderzoek wordt bepaald of deze methodes ook op een rivier met een gegradeerde bedding toepasbaar zijn. Door gebruik te maken van een stochastische beschrijvingsmethode is de onzekerheid in de voorspelde bodemverandering van de Grensmaas ten gevolge van de afvoervariatie vastgesteld.

De aanpak in dit onderzoek bestaat uit een aantal stappen. Ten eerste is geïnventariseerd welke onzekerheden er spelen binnen de modelinputs en modelparameters van het morfologisch model. De vastgestelde onzekerheidsbronnen zijn geclassificeerd met behulp van de indelingsmethode van Walker (2003). De onzekerheidsbronnen welke statistisch kunnen worden beschreven zijn meegenomen naar de gevoeligheidsanalyse. Het gaat om 9 onzekerheidsbronnen: De afvoer, de korrelsamenstelling van de rivierbedding, de zomer- en winterbedruwheid, de laagdikte van de toplaag, de riviergeometrie, de kritische Shieldswaarde, de hiding & exposure factor en de calibratiefactor.

Ten tweede is met behulp van een gevoeligheidsanalyse bepaald voor welke van deze onzekerheidsbronnen het model het gevoeligst is. De grootste mate van onzekerheid en mate van gevoeligheid blijkt te bestaan in de korrelsamenstelling van de rivierbedding en in de afvoer. Omwille van de beschikbare tijd en de beschikbare data is besloten om enkel de onzekerheid in het modelresultaat ten gevolge van de afvoervariatie te beschouwen. Uit een analyse van de belangrijke kenmerken van de afvoer blijkt dat dagafvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s een grote impact hebben op de hoeveelheid sedimenttransport. Ook blijkt dat de volgorde van piekafvoeren en de duur van de piekafvoeren belangrijke kenmerken zijn van de Maasafvoer op de bodemverandering.

De derde stap is het daadwerkelijk uitvoeren van een stochastische onzekerheidsanalyse. Onderzoek van Van der Klis (2003) en Van Vuren (2005) toont aan dat de Crude Monte Carlo methode een betrouwbare en goed toepasbare methode hiervoor is. In dit onderzoek is de Nearest Neighbour methode gebruikt voor de statistische beschrijving van de afvoer. De methode is een techniek waarin op basis van de historische afvoerreeks nieuwe meerjarige afvoerreeksen worden gegenereerd. De Nearest Neighbour methode blijkt een representatieve methode te zijn om de afvoer mee te beschrijven. Belangrijke kenmerken zoals de duur van de afvoergolf, de seizoensvariatie en de frequentie van piekafvoeren worden door de Nearest Neighbour methode goed weergegeven. Het maken van 300 simulaties blijkt voldoende te zijn om met voldoende nauwkeurigheid een 90% betrouwbaarheidsinterval op te stellen van de bodemverandering 10 jaar na uitvoering van het VKA.

Ten slotte zijn de modelresultaten van de Monte Carlo simulaties geëvalueerd. Er is geconcludeerd dat de verwachte gemiddelde bodemverandering over het gehele traject 10 jaar na uitvoering van het VKA zo'n 5 cm is. Met 90% zekerheid (enkel onzekerheid t.g.v. afvoervariatie verondersteld) kan op basis van het modelresultaat gesteld worden dat de gemiddelde bodemverandering over het traject na 10 jaar tussen de 1 en 10 cm zal liggen. Echter ter plaatse van de verruimingslocaties en vanaf rkm 50 is de verwachte bodemverandering en de onzekerheid hierin groter. De absolute onzekerheid in de 10-jarige bodemontwikkeling ten gevolge van de afvoervariatie is gemiddeld 16 cm. Volgens het model vertoont de grindlaag ter plaatse van Itteren, Aan de Maas en Urmond serieuze slijtage. De bodemligging op deze locaties verdient extra aandacht van de beheerder vanwege het gevaar op aansnijden van de fijne zandlaag.

De modelresultaten van de stochastische analyse zijn daarnaast ook vergeleken met de resultaten van de scenariobenadering. Het blijkt dat de 50% verwachtingswaarde van de bodemverandering berekend d.m.v. de stochastische analyse nagenoeg overeenkomt met de voorspelde bodemverandering berekend met het gemiddelde afvoerscenario. Door de stochastische analyse is gebleken dat er een grotere onzekerheid bestaat in de gemodelleerde 10-jarige bodemontwikkeling ten gevolge van de afvoervariatie dan op grond van de scenariobenadering werd verwacht. Op basis van de trend in de bodemontwikkeling in de eerste 10 jaar is een hypothese opgesteld over de ontwikkeling op de langere termijn. De hypothese is dat de verwachte bodemverandering na 50 jaar en de onzekerheid hierin minder groot is dan door de scenariobenadering in het MER 2003 is aangegeven.

Voor een stochastische analyse zijn een groot aantal simulaties nodig waardoor de rekentijden erg groot worden. Hierdoor is het onmogelijk geweest om een verwachte bodemontwikkeling voor een langere termijn dan 10 jaar te modelleren. Aanbevolen wordt om te bepalen welke karakteristieken een afvoerreeks moet hebben wil deze de 5%, 50% of 95% verwachtingswaarde benaderen. Gemiddeld genomen blijkt er verschil te bestaan tussen de karakteristieken van deze afvoerreeksen. Voor gegronde conclusies hierover is verder onderzoek nodig. Uiteindelijk zou dit ertoe kunnen leiden dat er met veel minder modelberekeningen een 90% betrouwbaarheidsinterval opgesteld kan worden. Daarnaast moet de statistische beschrijving van de afvoer door de Nearest Neighbour methode worden uitgebreid met een 'hoge afvoer voorspeller'. Ook moet een mogelijk aanwezige tijdtrend in de historische afvoerreeks worden meegenomen in de beschrijving.

## INHOUDSOPGAVE

<b>VOORWOORD</b>		<b>3</b>
<b>1 PROJECTKADER</b>		<b>5</b>
<b>2 ONDERZOEKSONTWERP</b>		<b>7</b>
2.1	Doelstelling en centrale vragen	7
2.2	Afbakening	7
2.3	Onderzoeksstructuur	7
2.4	Onderzoeksmateriaal	8
2.5	Structuur van rapport	9
<b>3 CASE STUDIE</b>		<b>11</b>
3.1	De Grensmaas	11
3.2	Het Grensmaasproject	14
3.3	Het Grensmaasmodel	15
<b>4 INVENTARISATIE EN CLASSIFICATIE ONZEKERHEDEN</b>		<b>17</b>
4.1	Classificatie methode van Walker	17
4.2	Overzicht onzekerheden	18
4.3	Afbakening voor gevoeligheidsanalyse	20
<b>5 GEVOELIGHEIDSANALYSE</b>		<b>23</b>
5.1	Methode	23
5.2	Resultaten	24
5.3	Afbakening voor onzekerheidsanalyse	26
<b>6 BELANGRIJKE KENMERKEN IN RELATIE AFVOER - TRANSPORT</b>		<b>27</b>
6.1	Invloed verschillende afvoerranges op transport	27
6.2	Invloed duur afvoerpieken	29
6.3	Invloed volgorde afvoerreeks op bodemverandering	31
6.4	Conclusies	33
<b>7 ONZEKERHEIDSANALYSE</b>		<b>35</b>
7.1	Monte Carlo simulaties	35
7.2	Statistische beschrijving afvoer	36
7.3	Representativiteit Nearest Neighbour methode	39
7.4	Aantal Monte Carlo simulaties	43
7.5	Conclusies	45
<b>8 RESULTATEN ONZEKERHEIDSANALYSE</b>		<b>47</b>
8.1	Resultaten Monte Carlo simulaties	47
8.2	Vergelijking stochastische benadering en scenariobenadering	55
8.3	Voorspelling bodemontwikkeling na periode langer dan 10 jaar	57
8.4	Bepalende karakteristieken afvoerreeks	62
8.5	Conclusies	65

<b>9</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>67</b>
9.1	Conclusies	67
9.2	Aanbevelingen	69
<b>10</b>	<b>LITERATUUR</b>	<b>73</b>
10.1	Literatuur	73
10.2	Websites	75
10.3	Contact	75

### Lijst met bijlagen

Bijlage 1:	Stroomgebied Grensmaas
Bijlage 2:	Statistieken Afvoer Maas
Bijlage 3:	Schematisatie van fracties in onderlagen
Bijlage 4:	Voorkeursalternatief Grensmaasproject
Bijlage 5:	Instellingen simulaties in SOBEK-graded
Bijlage 6:	Instellingen simulaties gevoeligheidsanalyse
Bijlage 7:	Instellingen simulaties onzekerheidsanalyse
Bijlage 8:	Resultaten Grensmaasmodel MER 2003
Bijlage 9:	Afvoer-transport relatie Duizendstra
Bijlage 10:	De Nearest Neighbour methode
Bijlage 11:	Representativiteit Nearest Neighbour methode
Bijlage 12:	Berekening verwachte aantal simulaties
Bijlage 13:	Onzekerheid bodemligging Grensmaas
Bijlage 14:	Ontwikkeling bodemsamenstelling na 10 jaar
Bijlage 15:	Bepalende afvoerreeksen

### Lijst met figuren

Figuur 3-1: De Maas ter plaatse van de brug bij Maaseik.....	11
Figuur 3-2: De rivierbedding van de Grensmaas in de zomer bij een lage afvoer. ....	13
Figuur 7-1: Een 3-jarige afvoerreeks beschreven met de methode van Van der Klis .....	37

### Lijst met tabellen

Tabel 4-1: Classificatie matrix van Walker (2003).....	21
Tabel 5-1: Ingevulde Indelingsmatrix van Janssen (1990) welke de mate van gevoeligheid en de mate van onzekerheid van de 9 beschouwde onzekerheidsbronnen weergeeft .....	26
Tabel 6-1: De data in kolom 2 en kolom 7 t/m 10 tonen de data van grafiek 6-1. Kolom 3 t/m 6 tonen de procentuele bijdrage aan het gemiddelde transport in m <sup>3</sup> /jaar per afvoerrange van 300 m <sup>3</sup> /s.....	28
Tabel 6-2: Modelresultaat gemiddelde bodemverandering tussen rkm 2-56 per afvoervariant ....	33
Tabel 7-1: Relatieve verschillen tussen de NN-reeksen en de historische reeks.....	42
Tabel 8-1: Overzicht van de 12 geplande ingrepen in het voorkeursalternatief. ....	49
Tabel 8-2: Modelresultaten gemiddelde bodem-verandering in de Grensmaas (rkm 2-56) 10 jaar na uitvoering van het VKA.....	51



Tabel 8-3: Verschil tussen de gemodelleerde bodemligging na 10 jaar en de onderkant van de grindlaag ter plaatse van de 3 locaties waar dit verschil het kleinst is .....	54
Tabel 8-4: Modelresultaten gemiddelde bodemverandering in de Grensmaas (rkm 2-56) 10 jaar na uitvoering van het VKA volgens de 3 scenario's uit het MER 2003. ....	55
Tabel 8-5: Waarden gemiddelde afvoer en standaardafwijking in m <sup>3</sup> /s van de 10 afvoerreksen welke het beste de 3 betrouwbaarheidsgrenzen benaderen.....	63
Tabel 8-6: Aantal dagen (abs. en perc.) dat afvoer binnen een bepaalde afvoerrange valt gedurende 10 jaar. Het aantal afvoergolven gedurende de 10 jaar. De waarden zijn afkomstig van de 3 sets van 10 reksen welke het beste de grenzen benaderen.....	63

## Lijst van Grafieken

Grafiek 3-1: Statistieken Maasafvoer bij Eijsden 1911-2003.....	12
Grafiek 3-2: De 4 afvoerscenario's uit het MER 2003 .....	16
Grafiek 5-1: Mate van gevoeligheid van het modelresultaat voor variatie van 10% voor elke parameter per 5 km .....	24
Grafiek 6-1: De frequentie (%) van de dagafvoeren tussen 1/9/1978 en 6/4/1995 per 300 m <sup>3</sup> /s en de absolute bijdrage per afvoerrange aan het gemiddelde transport in m <sup>3</sup> /jaar .....	28
Grafiek 6-2: De Q-S relaties van afvoeren > 1200 m <sup>3</sup> /s tussen 1978 en 1995 met verschillende duur opgesteld met behulp van SOBEK. ....	30
Grafiek 6-3: De bodemontwikkeling tussen 1/8/1978 en 31/7/1995 voor de 4 varianten .....	31
Grafiek 6-4: De afvoerreksen van de 4 varianten waarvan het afvoerproces is verwisseld. ....	32
Grafiek 6-5: Het verschil tussen het bodemniveau van de referentievariant op 31/7/1995 en het bodemniveau van de 3 varianten op 31/7/1995 gemiddeld per 5 km.....	33
Grafiek 7-1: Zes 10-jarige afvoerreksen welke door de Nearest Neighbour gegenereerd zijn....	39
Grafiek 7-2: De dichtheidscurve van de historische afvoerreks en van de NN-reeksen. ....	40
Grafiek 7-3: Dichtheidscurve van het absolute aantal afvoeren per maand van de historische reeks en van de 200 NN-reeksen.....	41
Grafiek 7-4: Dichtheidscurve voor de duur van de piekafvoeren van de historische afvoerreks en de 200 NN-reeksen.....	42
Grafiek 7-5: De bandbreedte na 300 simulaties voor het gehele Grensmaastraject (rkm 2-56). ...	44
Grafiek 7-6: De waarde van de bodemverandering van het 90% percentiel uitgezet tegen het aantal uitgevoerde simulaties op rkm 43.9 en 19.3 .....	45
Grafiek 8-1: De voorspelde bodemverandering 10 jaar na uitvoering van het VKA door elk van de 300 simulaties voor de hoofdgeul (boven) en de nevengeulen (onder).....	48
Grafiek 8-2: Het 90% betrouwbaarheidsinterval van de bodemverandering in de Grensmaas 10 jaar na uitvoering VKA. De Grafiek is opgesteld op basis van 300 simulaties in SOBEK-graded. In de simulaties is de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie meegenomen.....	49
Grafiek 8-3: De grote van de heersende onzekerheid (90% betrouwbaarheidsband) ten gevolge van de afvoervariatie in de gemodelleerde bodemverandering.....	50
Grafiek 8-4: Verwachte gemiddelde jaarlijkse transport in de Grensmaas (rkm 2-56) na uitvoering VKA en voor de autonome situatie. Het transport is bepaald op basis van 300 simulaties in Sobek-graded. ....	50
Grafiek 8-5: De verwachtingswaarde en het bijbehorende 90% betrouwbaarheidsinterval van de bodemontwikkeling als functie van de tijd bovenstrooms van de verruiming bij Iitteren (rkm 19,3). ....	53

Grafiek 8-6: Ligging onderkant grindlaag t.o.v. gemodelleerde bodemverandering.....	54
Grafiek 8-7: De grootte van de absolute betrouwbaarheidsband voor zowel de scenariobenadering als de stochastische benadering.....	56
Grafiek 8-8: Vergelijking tussen de bodemverandering voorspeld met het gemiddelde afvoerscenario en de 50% verwachtingswaarde van de MCS 10 jaar na uitvoering van het VKA.....	56
Grafiek 8-9: De ontwikkeling van de bodemverandering voor 3 trajecten in de Grensmaas.....	58
Grafiek 8-10: De bodemverandering per jaar voor 4 locaties die vlakbij een rivierverruiming liggen. ....	58
Grafiek 8-11: De Grensmaas is onderverdeeld in 3 trajecten waarvan de ontwikkeling van de 90% betrouwbaarheidsband per hydrologisch jaar is weergegeven.....	59
Grafiek 8-12: De ontwikkeling van de 90% betrouwbaarheidsband per hydrologisch jaar voor 4 locaties die vlakbij een rivierverruiming liggen.....	59
Grafiek 8-13: Vergelijking tussen de gemiddelde bodemverandering voorspelt met de scenario benadering (50 jaar) en met de stochastische benadering (10 jaar) .....	60
Grafiek 8-14: hypothese over de mogelijke gemiddelde bodemontwikkeling (5%,50% en 95% percentiel) in de Grensmaas in 50 jaar tijd in vergelijking met de scenariobenadering. .....	61
Grafiek 8-15: De modelresultaten van de 10 simulaties welke het beste de 95% verwachtingswaarde van de bodemverandering benaderen. ....	62
Grafiek 8-16: 4 modelresultaten uit SOBEK van 4 van de 10 simulaties welke het 95% percentiel benaderen. De grafiek toont de bodemverandering bovenstrooms van Itteren (rkm 19,3) gedurende de beschouwde 10 jaren (2015-2025) en toont daarnaast de bij de simulatie horende afvoerreeks.....	64

## Lijst met afkortingen en begrippen

AO	Autonome Ontwikkeling, situatie in 2015 van de Grensmaas inclusief het zandmaasproject volgens het tracébesluit van 2002 (Meijer, 2003)
CMC	Crude Monte Carlo sampling
DGR	Deltaplan grote rivieren, een noodplan in gang gezet na het hoogwater van 1995 om de veiligheid langs de Nederlandse rivieren te waarborgen
IPV	Individuele Parameter Variatie
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut gelegen in de Bilt (NL)
LHS	Latin Hypercube sampling
MCS	Monte Carlo simulaties
MER	Milieu-effectrapportage
NN-methode	Nearest Neighbour methode
NN-reeks(en)	Afvoereeksen die met behulp van de NN-methode zijn gegenereerd
QMS	Quasi Monte Carlo sampling
Q-S relatie	relatie tussen afvoer (Q) en sedimenttransport (S)
RIZA	Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling
rkm	Rivierkilometer, lengtemaat over de as van de rivier; voor de Maas begint de rivierkilometrerig op 2,5 km bij Eijsden. (Meijer, 2003)
SOBEK	Een software pakket voor het 1D of 2D modelleren van waterbeweging, bodemverandering, sedimenttransport, waterkwaliteit en zoutintrusie
SOBEK-graded	Een uitbreiding van SOBEK met een 'onderlaagboekhouding'.
TNO-NITG	Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO
VKA	Voorkeursalternatief 2003 Grensmaas
WL   delft	Waterloopkundig laboratorium in delft

*Sedimenttransport, transport* : In dit rapport worden de begrippen sedimenttransport en transport naast elkaar gebruikt. In beide gevallen gaat het enkel om het transport van bodemmateriaal. Het transport van gesuspendeerd materiaal is in alle gevallen buiten beschouwing gelaten.

*Afvoerpieken, piekafvoeren, afvoergolven* : In dit rapport worden deze begrippen naast elkaar gebruikt. De begrippen doelen op een situatie dat de afvoer bij Eijsden één of meerdere dagen achter elkaar hoger is dan  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$

*SOBEK, SOBEK-graded, model* : In dit rapport worden deze drie benamingen naast elkaar gebruikt. De benamingen doelen echter allemaal op het gebruikte software pakket om de hydraulische en morfologische effecten te bepalen. De in dit rapport gepresenteerde modelresultaten zijn allemaal afkomstig uit berekeningen in het Grensmaasmodel binnen het softwarepakket SOBEK-graded.

## Lijst met symbolen

$A$	Dwarsdoorsnee	$m^2$
$B$	breedte	$m$
$C$	Chezy bodemruwheid	$[m^{1/2}/s]$
$c_\alpha$	Interval van de normale verdeling met betrouwbaarheidsinterval $\alpha$	$[-]$
$D$	korreldiameter	$[m]$
$D_x$	korreldiameter met onderschrijdingskans van x procent	$[m]$
$F$	stromingskracht	$[Kgm/s^2]$
$Fr$	Froudegetal	$[-]$
$g$	Gravitatie versnelling	$[m/s^2]$
$G$	zwaartekracht	$[Kgm/s^2]$
$h$	waterdiepte	$[m]$
$i$	verhang	$[-]$
$k$	Aantal geselecteerde Nearest Neighbours	$[-]$
$L$	Lengte	$m$
$Q$	afvoer	$[m^3/s]$
$q$	Debiet per strekkende meter	$[m^2/s]$
$r_k$	lag-k autocorrelatie met k=1,2,3	$[-]$
$S$	Sedimenttransport	$[m^3/s]$
$u$	snelheid	$[m/s]$
$\bar{u}$	gemiddelde snelheid	$[m/s]$
$w$	Grote van het moving window in de NN-methode	$[-]$
$\rho$	dichtheid van water	$[Kg/m^3]$
$\theta$	Shieldswaarde	$[-]$
$\xi$	Hiding&exposure factor	$[-]$
$\Delta$	Relatieve dichtheid van de bodem	$[-]$
$\sigma$ of $S$	standaardafwijking of standaarddeviatie	$[-]$
$\Delta\mu$	Relatieve verschil gemiddelde	$[-]$
$\tau_b$	bodemschuifspanning	$[Kg/ms^2]$
$\theta_c$	kritische Shieldswaarde	$[-]$
$\tau_c$	kritische schuifspanning	$[Kg/ms^2]$
$\sigma_G$	geometrische verdeling	$[-]$
$\Delta r_k$	Relatieve verschil voor lag-k autocorrelatie met k=1,2,3	$[-]$
$\rho_s$	dichtheid van de bodemmateriaal	$[Kg/m^3]$
$\Delta s$	Relatieve verschil standaarddeviatie	$[-]$
$\mu$	gemiddelde	$[-]$
$\mu$	Ribbelfactor	$[-]$

## VOORWOORD

Het voor u liggend rapport vormt de afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Vanaf februari 2005 kon ik bij Royal Haskoning in Nijmegen terecht om bij de afdeling Kust en Rivier een opdracht uit te gaan voeren. Van februari tot augustus heb ik op kantoor in Nijmegen aan dit onderzoek gewerkt. Vele uren modelleren in SOBEK en resultaten verwerken in Matlab hebben uiteindelijk tot dit resultaat geleid. Matrices vol getallen deden mijn hoofd soms overlopen, maar gelukkig brachten fietstochten langs de Waal of Maas de nodige nieuwe inspiratie en inzichten.

Ik wil graag degenen die bijgedragen hebben aan dit onderzoek bedanken voor hun hulp en ondersteuning. Ten eerste mijn dagelijkse begeleiders Mathijs van Ledden en Rien Kolkman. Mathijs wil ik bedanken voor zijn inzet, gedetailleerde reviews en zijn aanzet om met Matlab aan de slag te gaan. Rien wil ik bedanken voor zijn luisterend oor en kritische vragen. Daarnaast wil ik ook Udo Boot bedanken voor zijn vertegenwoordiging in de commissie vanuit Rijkswaterstaat Limburg. Jan Ribberink wil ik bedanken voor zijn rol als voorzitter en voor zijn inhoudelijke kennis.

Naast de commissie wil ik de volgende personen bedanken voor hun tips en inzichten. Dit zijn Saskia van Vuren, Hanneke van der Klis, Douwe Meijer, Daniëlle Noordam en Theo Buishand. Flip Dirksen wil ik bedanken voor zijn helpende hand bij mijn SOBEK problemen.

Verder wil ik mijn vrienden en in het bijzonder Marieke bedanken voor hun geduld. Mijn verhalen over zandkorrels en afvoerreeksen zullen jullie niet altijd geboeid hebben. Toch hoop ik dat ik enig enthousiasme hierover heb weten over te brengen.

Nijmegen, 9 augustus 2005

Wiebe de Jong



## 1 PROJECTKADER

In 1993 en 1995 heeft Nederland te maken gehad met zeer hoge rivierafvoeren in de Rijnakken en de Maas. Om te kunnen inspelen op deze hogere rivierafvoeren is in Nederland het Deltaplan Grote Rivieren (DGR) in snel tempo gestart. Het DGR heeft ten doel de afvoercapaciteit van de grote rivieren te vergroten. De 1<sup>e</sup> fase hiervan is inmiddels afgerond. Op dit moment wordt gewerkt aan de voorbereiding en uitvoering van de 2<sup>e</sup> fase, de rivierversuimingsmaatregelen. Deze geplande versuimingen hebben naast de gewenste waterstandverlaging ook morfologische effecten. Kennis over deze effecten is van belang voor het ontwerp van waterbouwkundige constructies, voor de scheepvaart en voor het optreden van ongewenste oever- of bodemerosie. Daarnaast heeft de bodemverandering effect op de waterstand, welke van belang is voor hoogtes van dijken en kades. Om de morfologische effecten in kaart te brengen wordt gebruik gemaakt van numerieke morfologische modellen, zoals SOBEK.

In dit onderzoek wordt ingezoomd op het Grensmaasproject. De Grensmaas is het deel van de Maas tussen Borgharen en Roosteren. Op dit traject zijn ook rivierversuimingen gepland, het Grensmaasproject. Royal Haskoning en Meander hebben in 2003 een morfologische studie voor het MER uitgevoerd. Gebruikmakend van het model SOBEK-graded is de bodemontwikkeling ten gevolge van deze geplande maatregelen in kaart gebracht. De morfologische berekeningen zijn op een deterministische manier uitgevoerd. Dit houdt in dat gerekend is met een zorgvuldige gekozen waarde voor elke inputparameter. Er is door middel van afvoerscenario's een verwachte en 2 extreme bodemveranderingen uitgerekend.

Een nadeel van een deterministische aanpak is dat geen rekening wordt gehouden met het stochastische karakter van de inputparameters. De waarden van de inputparameters hebben een bepaalde mate van onzekerheid. Zowel deze waarde als de bijbehorende mate van onzekerheid kunnen variëren in tijd en ruimte. Bij een deterministische aanpak wordt slechts één toekomstige bodemverandering uitgerekend. De vraag dringt zich echter op of de berekende toekomstige bodemverandering een betrouwbare waarde is. Deze bodemverandering ligt dan wel tussen de bepaalde extremen in, het is echter de vraag wat de kans van optreden van deze extremen is. Zijn deze waarden zo extreem dat ze nooit zullen voorkomen of is de kans van optreden groter?

Door de onzekerheden in de waarden van de inputparameters mee te nemen kan een stochastische voorspelling worden gedaan van de lange termijn morfologische veranderingen in de Grensmaas. Dit kan door gebruik te maken van Monte Carlo simulatie technieken. Op deze manier kan een deterministisch model vele malen worden doorlopen met steeds andere instelwaarden voor de inputparameters. Op basis van alle modelresultaten kan een verwachtingswaarde en een betrouwbaarheidsband van de lange termijn morfologische verandering worden verkregen.

Door een stochastische benadering kan de rivierbeheerder beter inzicht krijgen in de te verwachten bodemverandering. Daarnaast kan inzichtelijk worden gemaakt op welke locaties de grootste onzekerheid over de mogelijke bodemverandering bestaat. Dit inzicht in mogelijke probleemlocaties kan van belang zijn bij het nemen van tijdige maatregelen. Door de stochastische benadering zal de rivierbeheerder zich ook meer bewust worden van de heersende onzekerheid in morfologische voorspellingen.





## 2 ONDERZOEKSONTWERP

In dit hoofdstuk wordt het doel en structuur van het onderzoek beschreven. In §2.1 wordt de doelstelling met bijbehorende onderzoeksvragen geformuleerd. In §2.2 volgt de afbakening. De onderzoeksstructuur met bijbehorende onderzoeksvragen volgt in §2.3. §2.4 geeft een overzicht van het gebruikte onderzoeksmateriaal. Ten slotte volgt in §2.5 de opbouw van het rapport.

### 2.1 Doelstelling en centrale vragen

De doelstelling van dit onderzoek is als volgt geformuleerd:

*'Het inventariseren van de onzekerheden in de morfologische berekeningen van de Grensmaas en het stochastisch bepalen en evalueren van de invloed van de grootste onzekerheden op de lange termijn voorspelling van de bodemverandering in de Grensmaas met behulp van een 1D morfologisch model'*

### 2.2 Afbakening

In het onderzoek wordt van breed naar gedetailleerd gewerkt. Hierdoor wordt er tijdens het onderzoek afgebakend. Deze beslissing is genomen om niet in het begin van het onderzoek al zaken af te bakenen, welke mogelijk toch van belang zijn.

Naast deze afbakening tijdens het onderzoek zijn ook enkele zaken aan het begin afgebakend. Binnen het modelleren van de bodemverandering van de Grensmaas met SOBEK-graded spelen vele onzekerheden. In dit onderzoek wordt enkel ingegaan op de onzekerheid in het modelresultaat ten gevolge van de onzekerheden in de modelinputs en modelparameters. Dit houdt in dat onzekerheid in het modelresultaat ten gevolge van onzekerheden in de modelcontext, de modelstructuur en modeltechnische onzekerheden buiten beschouwing worden gelaten. Daarnaast wordt in dit onderzoek niet gesleuteld aan het Grensmaasmodel. Gemaakte keuzes over technische instellingen worden niet veranderd tijdens dit onderzoek. De conclusies over bodemveranderingen worden getrokken op basis van de modelresultaten van het 1D model SOBEK-graded. Onzekerheden voortvloeiend uit 2D/3D stromingsverschijnselen en sortingsverschijnselen van gegradeerd sediment zijn buiten beschouwing gelaten.

### 2.3 Onderzoeksstructuur

De doelstelling en de afbakening leiden tot 5 centrale onderzoeksvragen:

*1. Welke onzekerheden spelen er in de modelinputs en modelparameters van het Grensmaasmodel?*

Het inventariseren van de onzekerheden moet inzichtelijk maken welke onzekerheidsbronnen er spelen binnen de modelinputs en modelparameters van het Grensmaasmodel in SOBEK-graded.

*2. Welke onzekerheidsbronnen hebben de grootste invloed op de verandering van de bodem in de Grensmaas? Wat zijn de bepalende karakteristieken in deze onzekerheidsbron voor de bodemverandering?*

Met behulp van een gevoeligheidsanalyse wordt beoordeeld welke onzekerheidsbronnen de grootste invloeden hebben op de bodemverandering in de Grensmaas. Als deze onzekerheidsbron bekend is worden de relevante karakteristieken van deze onzekerheidsbron op de bodemverandering bepaald.

*3. Hoe kan deze onzekerheidsbron op representatieve wijze statistisch worden beschreven zodat een stochastische onzekerheidsanalyse uitgevoerd kan worden?*

Het doel van deze vraag is het bepalen van de invloed van de grootste onzekerheidsbron op de bodemverandering. Het bepalen van deze invloed wordt op stochastische wijze gedaan door middel van Monte Carlo simulaties. Om deze Monte Carlo simulaties te kunnen uitvoeren moet de onzekerheidsbron statistisch worden beschreven. Deze statistische beschrijving is een belangrijke stap in de stochastische onzekerheidsanalyse en moet daarom nauwkeurig worden gecontroleerd op haar representativiteit.

*4. Hoe groot is de invloed ten gevolge van de onzekerheidsbron op de gemodelleerde bodemverandering in de Grensmaas? Hoe verhoudt de stochastische benadering zich tot de scenariobenadering van het MER 2003?*

Deze vraag vormt de evaluatie van de resultaten uit de Monte Carlo simulaties. Uit de evaluatie moet de verwachte bodemverandering en de onzekerheid hierin naar voren komen. Daarnaast moet blijken hoe de stochastische benadering zich verhoudt tot de scenariobenadering.

*5. Wat zijn de conclusies en aanbevelingen over de bodemverandering in de Grensmaas voor de rivierbeheerder?*

Uiteindelijk moeten de resultaten van de stochastische voorspelling vertaald worden naar conclusies en aanbevelingen voor de rivierbeheerder.

## 2.4 Onderzoeksmateriaal

### Literatuur

In 2003 heeft Van der Klis een promotieonderzoek afgerond waarin ze onderzocht heeft hoe een onzekerheidsanalyse op numerieke morfologische modellen kan worden uitgevoerd. Van Vuren (2005) is in haar promotieonderzoek doorgedaan op dit onderwerp. Zij heeft onderzocht of een stochastische onzekerheidsanalyse toepasbaar is om de onzekerheid in de morfologische voorspelling van de Rijntakken kwantitatief te beschrijven.

Een ander belangrijk rapport is het Nader Onderzoek SOBEK morfologie Grensmaas (Meijer, 2003). Dit rapport vormt een aanvulling op het MER Grensmaas 2003 (Akkerman, 2003). In het rapport is de lange termijn morfologische ontwikkeling van de Grensmaas onderzocht.

Literatuur over de statistische beschrijvingsmethode is hoofdzakelijk afkomstig van het KNMI (Leander & Buishand (2004), Wojcik & Buishand (2002) en Beersma et al (2001)).

### Model

Het numerieke één dimensionale model SOBEK-graded is gebruikt om de benodigde berekeningen mee te maken. Tijdens het MER Grensmaas 2003 is in dit softwarepakket het Grensmaasmodel gemaakt. Dit model schematiseert de Grensmaas voor zowel de autonome situatie als voor de situatie na uitvoering van de verruimingsmaatregelen. De resultaten uit het model zijn met Excell en Matlab verwerkt.

## 2.5 Structuur van rapport

Het rapport is als volgt opgebouwd:

Hoofdstuk 3 geeft de achtergrond informatie over de Grensmaas, het Grensmaasproject en het Grensmaasmodel.

Hoofdstuk 4 gaat in op de heersende onzekerheden in de modelinputs en modelparameters van het Grensmaasmodel.

De kern van het onderzoek staat beschreven in hoofdstuk 5, 6, 7 en 8.

In hoofdstuk 5 wordt de gevoeligheidsanalyse beschreven. Hieruit wordt geconcludeerd welke onzekerheidsbron de grootste bijdrage levert aan de onzekerheid in het modelresultaat van het Grensmaasmodel.

In hoofdstuk 6 wordt verder ingegaan op deze onzekerheidsbron. Er wordt bepaald welke karakteristieken van de onzekerheidsbron bepalend zijn voor het transport en dus voor de te verwachten bodemverandering in de Grensmaas. Deze karakteristieken zijn van belang voor de statistische beschrijving van de onzekerheidsbron.

Hoofdstuk 7 vormt de beschrijving van de stochastische onzekerheidsanalyse. Er wordt beschreven hoe met behulp van Monte Carlo simulaties de onzekerheid ten gevolge van die onzekerheidsbron kan worden meegenomen. Daarnaast wordt beschreven met welke methode de onzekerheid in die onzekerheidsbron op een representatieve wijze kan worden beschreven.

In hoofdstuk 8 worden de resultaten van de stochastische onzekerheidsanalyse weergegeven. Er wordt geconcludeerd op welke locaties de grootste bodemverandering en onzekerheid in de bodemverandering valt te verwachten. Daarnaast wordt een vergelijking gemaakt met de scenariobenadering van het MER 2003. Aan het eind van het hoofdstuk wordt getracht de waarde van de bepalende karakteristieken van de onzekerheidsbron te vinden welke het best de verwachtingswaarde en de onzekerheidsgrenzen benadert.

In hoofdstuk 9 worden de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek gegeven.



### 3 CASE STUDIE

Het doel van dit hoofdstuk is om inzicht te geven in de verschillende relevante karakteristieken van de Grensmaas, het Grensmaasproject en het Grensmaasmodel. §3.1 behandelt de karakteristieken van de Grensmaas en gaat kort in op de heersende karakteristieke morfologische processen. In §3.2 volgt het doel en de geplande maatregelen van het Grensmaasproject. §3.3 gaat in op de het Grensmaasmodel in SOBEK-graded dat gebruikt is voor het morfologisch onderzoek van de MER 2003.

#### 3.1 De Grensmaas

##### 3.1.1 Rivierloop en afvoer

De Maas heeft een stroomgebied van 33.000 km<sup>2</sup>. De totale lengte is 891 km, waarvan 210 km in Nederland. De Maas ontspringt op het plateau van Langres in Frankrijk en stroomt bij Eijsden Nederland binnen. In bijlage 1 is het stroomgebied van de Maas weergegeven. Opvallend aan het stroomgebied is de geringe breedte en de vele zijrivieren. Het deel tussen de stuw bij Borgharen en Roosteren vormt de grens tussen Nederland en België; de Grensmaas. De Grensmaas heeft een lengte van circa 40 km (liggend tussen rkm 15 en rkm 56). De Grensmaas is onbevaarbaar voor beroepsvaart, welke daarom plaatsvindt via het parallellopende Julianakanaal. De stroomvoerende geul heeft een vrij constante breedte van 60 tot 80 m en meandert door het winterbed (figuur 3-1). Het bodemverhang van de Grensmaas is ongeveer  $5 \cdot 10^{-4}$ , tussen rkm 60 en 90 neemt dit af tot  $1 \cdot 10^{-4}$ .

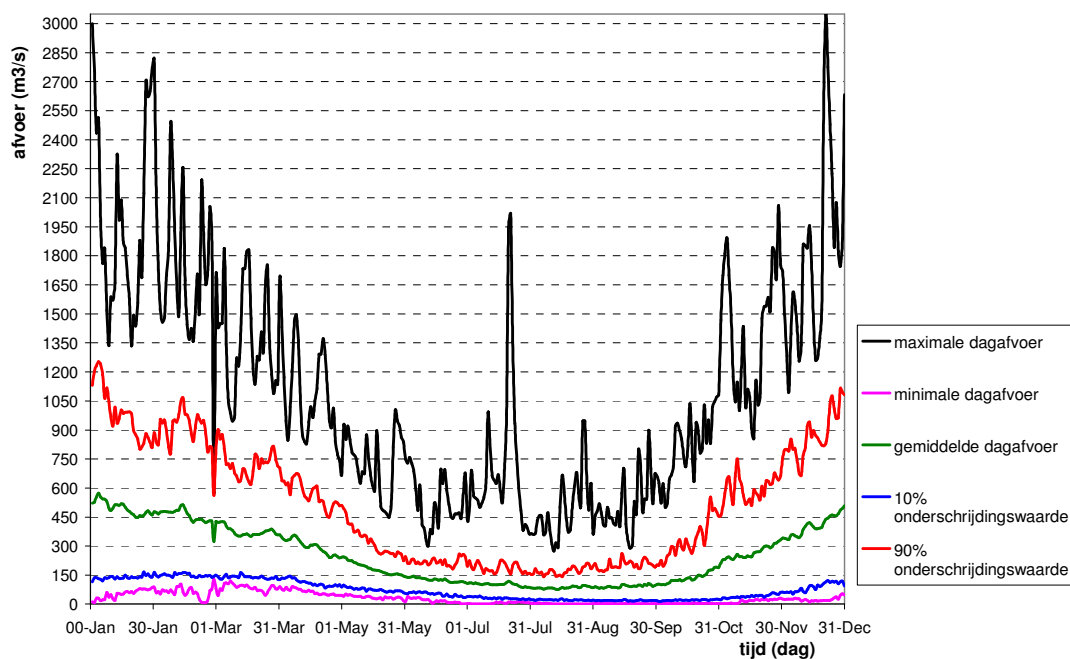


*Figuur 3-1: De Maas ter plaatse van de brug bij Maaseik*

De Maasafvoer is afhankelijk van regenwater en heeft een zeer korte responsietijd. Dit laatste wordt veroorzaakt door de geringe waterberging, de vele zijrivieren, de geringe breedte en hoge mate van reliëf in het stroomgebied. Extreme regenval in Frankrijk en België leidt binnen enkele dagen tot een piekafvoer in Nederland. Hierdoor is de Maasafvoer zeer variabel. Een gemiddelde hoogwatergolf duurt over het algemeen slechts enkele dagen en treedt meestal in de winter op. Sinds 1911 zijn er afvoerdata en waterhoogtes verzameld door Rijkswaterstaat<sup>1</sup>.

*[www.waterstat.nl](http://www.waterstat.nl); website waarop Rijkswaterstaat haar meetgegevens (o.a. afvoer) presenteert. Vanaf deze locatie is de afvoerreeks van 1/1/1911 tot 31/12/2003 bij Eijsden gedownload.*

Grafiek 3-1 toont enkele statistieken van de Maasafvoer tussen 1911-2003 bij Eijsden. Het toont dat de gemiddelde afvoer in het zomerseizoen (mei t/m oktober) lager is dan in het winterseizoen (november t/m april). De gemiddelde jaarafvoer bij Eijsden is 252 m<sup>3</sup>/s. De ooit gemeten hoogste afvoer is 3047 m<sup>3</sup>/s in 1993. Hoge afvoeren in de laatste jaren zijn naast die van 1993, een afvoer van 2746 m<sup>3</sup>/s in 1995 en 2740 m<sup>3</sup>/s in 2003. Grafiek 3-1 toont ook een zeer hoge afvoer in de maand juli. Deze piek kwam voor tijdens een 3-daagse afvoergolf in 1980. Meer statistieken van de Maasafvoer zijn weergegeven in bijlage 2.



Grafiek 3-1: Statistieken Maasafvoer bij Eijsden 1911-2003

### 3.1.2 Bodemsamenstelling

Een belangrijk kenmerk van de Grensmaas is dat de bodem uit breed gegradeerd sediment bestaat. Dit houdt in dat de spreiding van korreldiameters in de rivierbedding groot is. Door het verschil in korreldiameter bestaat er verschil in mobiliteit tussen de korrels. Door dit verschil treedt er sortering van de bodem op. Dit heeft effect op de kleinschalige morfologie, zoals bodemruwheid, de korrelsamenstelling van de bodem en de dimensies van bodemvormen. De kleinschalige morfologie heeft op haar beurt effect op de mate en samenstelling van het sedimenttransport, op de grootschalige morfologie en op de hydraulische condities zoals o.a. waterstanden.

De mate van gradering kan worden uitgedrukt met de geometrische verdeling:

$$\sigma_G = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad (\text{Raudkivi, 1990})$$

Bij een uniform verdeelde bodem heeft  $\sigma_G$  een waarde van één tot anderhalf. Bij een gegradeerde bodem ligt deze waarde hoger.

In gegradeerde rivierbeddingen vindt sortering van korrelgroottes plaats. De geleidelijke afname van korreldiameters in longitudinale richting wordt downstream fining genoemd.

Onder invloed van de in bochten optredende 3D-effecten ontstaat er een zijdelingse sortering van grof naar fijn sediment van de buiten- naar de binnenbocht. Ook in verticale richting vindt sortering van de korrelgroottes plaats. Over het algemeen wordt aan het oppervlak een toplaag van grof sediment aangetroffen, de afpleisteringslaag. Onder deze laag bevindt zich een sterk gegradeerd zand/grind mengsel, waaronder zich in grote delen van de Grensmaas nog een laag fijn zand bevindt. Bij waarden voor  $\sigma_G$  hoger dan 2 wordt verondersteld dat een afpleisteringslaag wordt gevormd (Duizendstra, 1995). De geometrische verdeling in de Grensmaas verschilt in ruimte en tijd. Op de meeste locaties ligt de waarde van  $\sigma_G$  boven de 2. De gemiddelde korreldiameter in de Grensmaas ligt tussen de 10 en 20mm. Benedenstrooms van de Grensmaas (tussen rkm 90-105) neemt de gemiddelde diameter af tot 3 mm (MER Grensmaas 2003). De korrelgroottes in de toplaag variëren van fijn zand van kleiner dan 0.25 mm tot grof grind en stenen met een diameter van 1 tot 2 dm (zie figuur 3-2). Bijlage 3 toont de variatie in korrelgrootte in verticale en horizontale richting.



*Figuur 3-2: De rivierbedding van de Grensmaas in de zomer bij een lage afvoer.*

### 3.1.3 Sedimenttransport

De afpleisteringslaag is een belangrijke factor in het sedimenttransport in de Grensmaas. In vlakke bodems (een bodem zonder grote bodemvormen) wordt tijdens perioden van lage afvoeren (afvoeren tot 1000-1200 m<sup>3</sup>/s) een afpleisteringslaag gevormd. De grotere korrels worden tijdens de stroomcondities niet of nauwelijks in beweging gebracht, maar de kleinere korrels wel. Doordat het sediment aanbod van bovenstrooms in de Grensmaas gering is, vindt tijdens een periode van lage afvoeren vergroving van de toplaag plaats. Deze grove toplaag is zeer resistent tegen eroderen en schermt het onderliggende (fijnere) sediment af. Hierdoor wordt het transport aanbod gelimiteerd (Knighton, 1998).

Als de afvoer en daardoor de bodemschuifspanning toeneemt kan het grove sediment in de toplaag toch in beweging komen. Op basis van metingen (zoals de metingen van Duizendstra, 1999) wordt verondersteld dat de afpleisteringslaag begint te bezwijken bij afvoeren hoger dan 1200 m<sup>3</sup>/s. Het sedimenttransport neemt in korte tijd flink toe

doordat het onderliggende fijnere sediment plotseling vrij komt. Het transport in de Grensmaas vindt hierdoor zeer pulsmatig plaats en is sterk afhankelijk van het afvoerverloop. Tussen 1978 en 1995 is gemiddeld jaarlijks 50.000 m<sup>3</sup> sediment getransporteerd tussen Borgharen en Maaseik (Duizendstra, 1999).

## 3.2 Het Grensmaasproject

Het Grensmaasproject kent haar oorsprong in 1992 toen een haalbaarheidsstudie werd begonnen. Door de hoge afvoeren in 1993 en 1995 werd het project opgenomen in het Deltaplan Grote Rivieren (DGR) en raakte het project in een stroomversnelling.

### 3.2.1 Doelstelling en streefbeeld

De doelstellingen van het Grensmaasproject zijn (MER 2003):

1. Beperking van de wateroverlast. Het beschermingsniveau van de door kades beschermde delen moet van 1/50 naar 1/250. Dit betekent dat de bekaide gebieden ontworpen moeten zijn op een waterstand met een jaarlijkse overschrijdingskans van 1 op de 250 jaar. Dit niveau moet uiterlijk in 2017 gerealiseerd zijn. Voor de bedijkte Maas geldt een beschermingsniveau van 1/1250 jaar.
2. Grootschalige natuurontwikkeling en ecologisch herstel van de rivier, waarbij een nieuw riviergebonden natuurgebied ontstaat van minimaal 1000 hectare. De Grensmaas moet weer ontwikkeld worden tot een natuurlijke levende grindrivier.
3. Winning van grind zoals vastgesteld in bestuursovereenkomsten (1990 en 1997) tussen rijk en provincie. Hierbij gaat het om totaal 35 miljoen ton grind.

Het streefbeeld is dat het Grensmaasgebied zich ontwikkelt tot een natuurgebied van internationale allure, het Rivierpark Grensmaas. Stroomgeulverbredingen en oeververlagingen moeten de rivier meer ruimte geven om zo een meer natuurlijke rivier te creëren, waar verschillende flora en fauna zich kunnen vestigen en ontwikkelen. Met de voorgestelde maatregelen wordt weer teruggegaan naar de situatie van 200 jaar geleden toen de Grensmaas een brede dynamische rivier met grindbanken was die meanderend door het landschap ging. De bekaide gebieden moeten beschermd zijn tegen overstromingen met een overschrijdingskans van 1/250 jaar.

### 3.2.2 Maatregelen en verwachte effecten

Er is een drietal maatregelen bedacht om tot deze doelstellingen te komen (MER 2003).

1. *Stroomgeulverbreding*. De stroomvoerende geul zal verbreed worden van de huidige tientallen meters tot plaatselijk 700 meter in de toekomstige situatie. Hierdoor worden de oevers zo'n 3 tot 7 meter verlaagd en kan veel grind gewonnen worden. Door deze rivierverbreding worden grindbanken en geulen ontwikkeld.
2. *Weerdverlaging*. Aansluitend op de geulverbreding worden de weerden verlaagd. De weerden worden zodanig afgegraven zodat het niveau geleidelijk toeneemt tot het huidige niveau. Hierdoor ontstaat in zijdelingse richting verschil in overstromingsfrequentie waardoor verschillende flora zich kunnen ontwikkelen.
3. *Nevengeulen*. Op plaatsen waar geen ruimte is voor geulverbreding wordt een nevengeul gegraven.

Deze maatregelen worden op twaalf verschillende locaties uitgevoerd, een overzichtskaart hiervan is weergegeven in bijlage 4. Op plaatsen waar geen ruimte is



voor deze maatregelen zal het beschermingsniveau tegen hoogwater gehaald worden door de aanleg van kaden.

De verwachting is dat door de maatregelen gemiddeld over het traject de waterstanden zullen dalen en het transport zal afnemen. Echter ter plaatse van de verruimingslocaties kunnen locale effecten optreden die mogelijk ongewenst zijn. In §3.3 wordt ingegaan op de effecten van de maatregelen, zoals deze met het Grensmaasmodel zijn vastgesteld.

### 3.3 Het Grensmaasmodel

#### 3.3.1 SOBEK-graded

Voor het morfologische onderzoek van het Grensmaasproject is gebruik gemaakt van het 1-dimensionale hydraulische en morfologische softwarepakket SOBEK-graded (SOBEK HTML help file, 2005). SOBEK is ontwikkeld door WL|Delft Hydraulics en RIZA. Het pakket is in staat om voor open waterlopen met uniforme bedding in een ééndimensionale schematisatie inzicht te geven in waterbeweging, bodemverandering, sedimenttransport, waterkwaliteit en zoutinvasie. In 1994 is gestart met het ontwikkelen van het softwarepakket SOBEK-graded. Dit pakket is een uitbreiding van SOBEK met een actieve transportlaag en een 'onderlaagboekhouding'. De basisprincipes van de waterbeweging in het model zijn gelijk gebleven. Door de toevoeging van een 'onderlaagboekhouding' kan de samenstelling en gelaagdheid van de onderlagen worden meegenomen. Vergelijkende modelberekeningen laten zien dat SOBEK-graded voor grindrivieren betere resultaten geeft (Duizendstra e.a. 1997-1999)

Het sedimenttransport wordt benaderd met behulp van transportvoorspellers. Het voorspellen van het transport in gegradeerde rivieren is door de aanwezigheid van verschillende sedimentfracties en een afpleisteringslaag zeer complex. In bijlage 5 wordt ingegaan op de transportvoorspeller, de instellingen, de complexiteit en de gebruikte data in het Grensmaasmodel.

In het Grensmaasmodel zijn grof gezegd twee situaties geschematiseerd; de autonome situatie (AO) en de situatie zoals deze is als het voorkeursalternatief (VKA) wordt uitgevoerd. De schematisatie van de autonome situatie gaat uit van de situatie in 2015 zonder de geplande ingrepen. De schematisatie van het voorkeursalternatief gaat uit van de situatie in 2015 met daarin de 12 geplande locaties waar de rivierverruiming plaats gaan vinden. Het model is gekalibreerd en geverifieerd met de gegevens van de situatie tussen 1978 en 1995.

Voor beide situaties (VKA en AO) zijn verschillende 100-jarige simulaties uitgevoerd. Voor elke situatie zijn 4 afvoerscenario's doorgerekend. Het verschil tussen de afvoerscenario's is weergegeven in grafiek 3-2 op de volgende pagina.

#### 3.3.2 Resultaten Grensmaasmodel MER 2003

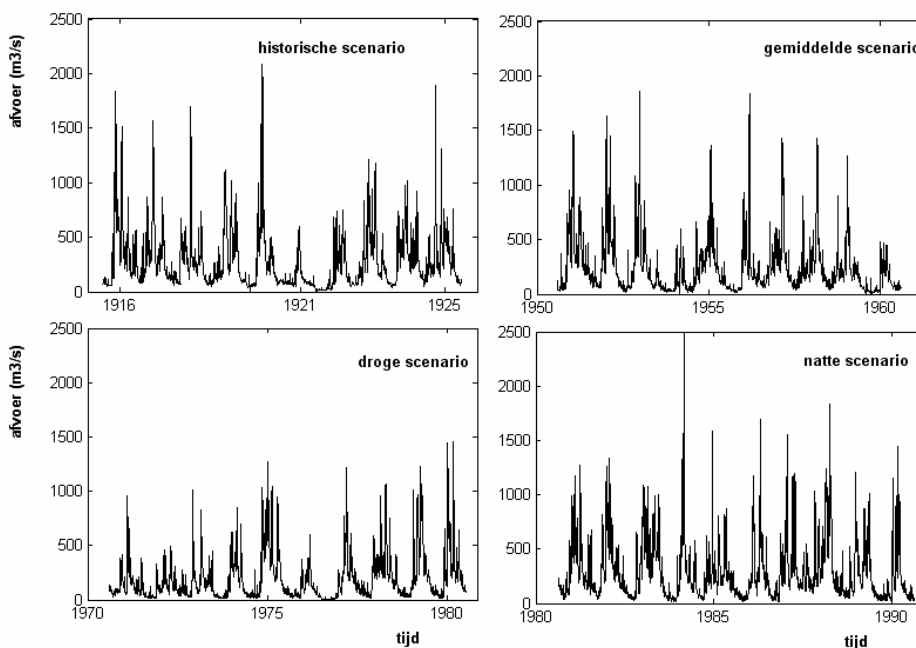
Met het Grensmaasmodel is de verwachte lange termijn bodemverandering vanaf 2015 gemodelleerd voor de autonome situatie en voor het voorkeursalternatief. In bijlage 8 wordt het sedimenttransport en de bodemverandering voor beide situaties getoond.

De verwachting voor de autonome situatie met het gemiddelde scenario is dat de hedendaagse trend van zo'n 1,5 cm erosie per jaar ook na 2015 door blijft gaan. In 2115 zal met dit scenario de grindlaag nog niet zijn weg geërodeerd, maar wel zijn aangetast. Met het natte afvoerscenario wordt voorspeld dat de grindlaag na 50 jaar weg

geërodeerd is en dat de erosiesnelheid dan snel toeneemt tot 6 cm/jaar. Met het droge scenario geldt een erosiesnelheid van nog geen cm/jaar, waardoor de grindlaag niet zal wegspoelen binnen 100 jaar. Het historische afvoerscenario laat een daling zien die tussen die van het natte en gemiddelde scenario in ligt.

De voorspelde bodemverandering met SOBEK voor de autonome situatie is dus een constante bodemdaling. Door de beperkte dikte van de grindlaag en de afwezigheid van inkomend sediment zal de grindlaag vroeg of laat doorslijten. Op welke termijn dit zal gebeuren is sterk afhankelijk van de optredende afvoer in de toekomst.

De modelresultaten voor het voorkeursalternatief laten zien dat door uitvoering van het voorkeursalternatief de hedendaagse bodemdaling grotendeels wordt stopgezet. Met het gemiddelde scenario wordt voorspeld dat de erosiesnelheid nog slechts enkele millimeters per jaar is. Het blijkt dat door de verruiming het sediment in het riviersysteem blijft. Uitzondering hierop is het benedenstroomse deel van de Grensmaas. Hier zal het sedimenttransport zich herstellen en zal de autonome bodemdaling wel doorgaan. Ter plaatse van de verruimingslocaties zullen erosiekuilen en sedimentatiepieken optreden. Bovenstrooms van de verruimingslocaties ontstaat een erosiekuil. Dit is te verklaren doordat ter plaatse van de verruiming een verlaging van de waterstand optreedt (het dwarsprofiel wordt tenslotte breder). Deze verlaging van de waterstand leidt bovenstrooms van de verruiming tot hogere stroomsnelheden en zodoende tot een erosiekuil. Ter plaatse van de verruiming neemt de stroomsnelheid af doordat het dwarsprofiel breder is. Dit zorgt vooral aan het begin van de verruiming voor een sedimentatiepiek. Benedenstrooms neemt de breedte van het dwarsprofiel weer af en zal de stroomsnelheid weer stijgen. Door de korte afstanden tussen de verruiming valt deze erosiekuil samen met die van de erosiekuil veroorzaakt door de volgende verruiming.



Grafiek 3-2: De 4 afvoerscenario's uit het MER 2003

## 4 INVENTARISATIE EN CLASSIFICATIE ONZEKERHEDEN

In hoofdstuk 3 zijn de karakteristieken van de Grensmaas, het Grensmaasproject en het Grensmaasmodel naar voren gekomen. Uit de beschrijving blijkt dat deze karakteristieken leiden tot een complex systeem waarbinnen tal van onzekerheden spelen. Zoals in de afbakening vermeld is wordt in dit onderzoek enkel naar de onzekerheden in de modelinputs en modelparameters gekeken. Een duidelijke classificatie van deze onzekerheden kan helpen om de onzekerheden te interpreteren en de onzekerheidsbron aan te pakken. Het doel van dit hoofdstuk is om de geïnterpreteerde onzekerheden dusdanig te classificeren zodat duidelijk wordt met welke onzekerheidsbronnen de gevoeligheidsanalyse moet worden ingegaan.

In §4.1 wordt de gebruikte classificatiemethode besproken. In §4.2 worden de geïnterpreteerde onzekerheden besproken aan de hand van deze classificatiemethode. In §4.3 wordt geconcludeerd met welke onzekerheidsbronnen doorgedaan wordt naar de gevoeligheidsanalyse.

### 4.1 Classificatie methode van Walker

In de op dit onderzoek aansluitende literatuur worden verschillende classificatie methodes gebruikt. Van der Klis (2003) gebruikt de methode van Van Asselt (2000) en Morgan (1990), Van Vuren (2005) gebruikt de methode van Van Gelder (2000) en Noordam (2005) gebruikt de methode van Walker (2003). De methode van Walker borduurt eigenlijk voort op de methode van Van Asselt. Gekozen is om gebruik te maken van de methode van Walker. Deze methode heeft als groot voordeel dat de eigenschappen van de onzekerheden in één matrix gecombineerd worden.

Om alle dimensies van onzekerheid te omvatten definieert Walker onzekerheid als *'elke afwijking van het onmogelijke ideaal van compleet determinisme'*. Walker heeft een classificatie methode opgesteld waarin hij 3 dimensies van onzekerheid specificeert; locatie, niveau en bron. Met behulp van een matrix van deze 3 dimensies ontstaat er een overzicht van de eigenschappen van de spelende onzekerheden.

Dimensie 1: locatie

Walker definieert 5 locaties waar de onzekerheidsbron zich manifesteert in het model:

1. *Context*. Dit doelt op de compleetheid en representativiteit van het systeem.
2. *Model onzekerheid*. Dit doelt op de onzekerheid die volgt uit de modelstructuur of uit de modeltechniek (technische implementatie).
3. *Model input*. Dit doelt op de onzekerheid in de data die het model beschrijven.
4. *Parameter onzekerheid*. Dit doelt op de parameters binnen de gebruikte formules.
5. *Modeluitkomsten*. Dit is de optelsom van de onzekerheden in de modelresultaten.

Dimensie 2: niveau

Walker definieert 3 niveaus van onzekerheid die tussen de twee uitersten (compleet determinisme en onbekende onbekendheid) in liggen:

1. *Statistische onzekerheid* is de onzekerheid die kan worden beschreven in statistische termen. Statistische onzekerheid kan op elke locatie in het model voorkomen.
2. *Scenario onzekerheid* is de onzekerheid die volgt uit gemaakte aannames over bepaalde toekomstige situaties.

3. *Bekende onbekendheid* is de fundamentele onzekerheid in mechanismen en relaties waarvan het bestaan bekend is, maar waarvan onbekend is hoe deze mechanismen werkelijk zijn.

Dimensie 3: bron

De aard van onzekerheid kan opgedeeld worden in twee extremen:

1. *Epistemologische onzekerheid*. Dit doelt op gebrek aan kennis en wordt veroorzaakt door onbetrouwbaarheid of door meer structurele onzekerheid.
2. *Onzekerheid door variabiliteit*. Deze onzekerheid kent verschillende bronnen:
  - a. Willekeurigheid in de natuur
  - b. Willekeurigheid in een samenleving
  - c. Technologische verrassingen

## 4.2 Overzicht onzekerheden

### 4.2.1 Onzekerheden in modelcontext en modelstructuur

In de afbakening (§2.2) is aangegeven dat enkel gekeken wordt naar de onzekerheden in de modelinputs en modelparameters. Op de onzekerheden binnen de modelcontext en modelstructuur wordt niet ingegaan. Om dit onderzoek in de juiste context te plaatsen worden de onzekerheden in deze locaties wel genoemd.

Binnen de modelstructuur spelen onzekerheden zoals de constante actieve laagdikte, het gekozen bodemlaag concept, de keuze van de transportvoorspeller en de wijze waarop het openbreken van de afpleisteringslaag is gemodelleerd. Recente onderzoeken van Blom (2003) en Kleinhans (2002) tonen nieuwe inzichten in morfologische processen welke nog niet verwerkt zijn in de huidige modelstructuur van SOBEK-graded. In bijlage 5.6 wordt nader ingegaan op de complexiteit van het modelleren van gegradeerd sedimenttransport

Binnen de modelcontext spelen de onzekerheden die veroorzaakt worden door de gestelde randvoorwaarden en schematisaties in het Grensmaasmodel. De grootste onzekerheid schuilt in de keuze om het Grensmaasproject met een 1D model te modelleren. Morfologische processen ter plaatse van nevengeulen worden veel gedetailleerder weergegeven door 2D modellen. Door het werken met een 1D model wordt de werkelijkheid, vooral ter plaatse van de ingrepen, sterk geschematiseerd.

Bovengenoemde onzekerheden in de context en de structuur van het model worden in dit onderzoek niet gekwantificeerd. Men moet zich echter wel bewust blijven van het bestaan van deze onzekerheden.

### 4.2.2 Onzekerheden in de modelinput en modelparameters

In tabel 4-1 op pagina 20 zijn de geïnventariseerde onzekerheden binnen de modelinputs en modelparameters van het Grensmaasmodel in de matrix van Walker weergegeven. Aan de hand van de nummers worden de onzekerheden toegelicht.

1. In het Grensmaasmodel is per rekenpunt de riviergeometrie ingevoerd. De riviergeometrie wordt bepaald door middel van metingen. Er worden echter verschillen waargenomen tussen de single-beam en multi-beam methode (Meijer, gesprek 30-3-2005). Daarnaast kan de variatie in de riviergeometrie langs de rivieras niet 100% waarheidsgetrouw worden weergegeven in het model.

De riviergeometrie is een statistische onzekerheid en vindt zijn aard in gebrek aan kennis (meetmethode) en willekeur in de natuur (variatie riviergeometrie langs de rivieras).

2. Het afvoerverloop van de Grensmaas is variabel in de tijd. De afvoer in het ene jaar is onafhankelijk van de afvoer het jaar daarvoor. Er kan dus geen zeker beeld worden gegeven van de afvoer het komende jaar, laat staan de komende 100 jaar. De afvoer kan enkel voorspeld worden op basis van historische afvoerdata. De toekomstige afvoer kan echter niet gemeten worden. Over de toekomstige afvoer blijft dus altijd onzekerheid bestaan.

Daarnaast bestaat er onzekerheid over de afvoer ten gevolge van klimaatverandering en veranderend bodemgebruik. De verwachting is dat door de klimaatverandering de gemiddelde afvoer van de Maas zal afnemen met 5%, maar de extreme afvoeren zullen stijgen met 5-10% (Booij, 2002). Ook ten gevolge van veranderend bodemgebruik, zoals verstedelijking, zal de piekafvoer toenemen.

De variabiliteit van de afvoer is een statistische onzekerheid welke bepaald wordt door willekeur in de natuur. De onzekerheid in de afvoer ten gevolge van klimaatverandering en groeiende verstedelijking is een scenario onzekerheid welke wordt veroorzaakt door gebrek aan kennis.

3. De bodemsamenstelling is variabel in de tijd en ruimte. De samenstelling verandert onder invloed van de afvoer en heeft invloed op de bodemruwheid en de mobiliteit van het sediment. In SOBEK zijn voor de initiële bodemsamenstelling per rekenpunt gegevens nodig over laagdiktes en korreldiameters per fractie per laag. Deze gegevens worden bepaald door boringen. Door de variatie in ruimte en tijd zijn er echter veel boringen nodig om een representatief beeld te krijgen. Voor het Grensmaasproject zijn echter vele boringen gedaan in het winterbed en veel minder in het zomerbed. De boringen van TNO/NITG zijn voornamelijk gedaan om de ontgronders een beeld te geven van de hoeveelheid bruikbaar materiaal. Uit morfologisch oogpunt is juist de bodemsamenstelling van het zomerbed interessant. Waarschijnlijk is de ondergrond van het zomerbed niet vergelijkbaar met de ondergrond van het winterbed. Voor gegevens van het zomerbed zijn de gegevens van het winterbed omgerekend, de vraag is of dit een representatief beeld geeft.

De onzekerheid door de variatie van de bodemsamenstelling is een statistische onzekerheid welke wordt veroorzaakt door willekeur in de natuur. De onzekerheid door het tekort aan representatieve metingen is een bekende onbekendheid welke wordt veroorzaakt door gebrek aan kennis.

4. De bodemruwheid kan worden gesplitst in een aantal elementen: korrel- en bodemvorm, ruwheid, weerstand van de geul, weerstand aan het vrije oppervlak, weerstand door vegetatie en weerstand door opgelost sediment. In het Grensmaasmodel is de zomerbed- en winterbedruwheid ingevoerd. Deze ruwheden zijn bepaald op basis van de resultaten uit de hydraulische modellen WAQUA en BASELINE. Naast de onzekerheid die in deze modellen voorkomt verschilt de ruwheid ook nog eens in ruimte en tijd. De geplande natuurontwikkeling zal zorgen voor een verandering van de ruwheid van de oevers. Deze veranderende ruwheid wordt voorspeld aan de hand van ecotopenkaarten. Deze kaarten zijn gebaseerd op aannames over welke vegetatie zich waar ontwikkelt.

De onzekerheid door de variatie in ruimte en tijd van de ruwheden is een statistische onzekerheid welke wordt veroorzaakt door willekeur in de natuur. De onzekerheid in de ruwheid ten gevolge van de hydraulische modellen is een bekende onbekendheid die wordt veroorzaakt door gebrek aan kennis.

5. De parameters in de transportvoorspeller van Wu et al (bijlage 5) zijn bepaald door middel van zowel laboratorium- als veldexperimenten. Voor elk riviersysteem kunnen de waarden weer iets anders liggen. In SOBEK kan binnen de voorspeller van Wu de instelwaarde van 2 parameters worden veranderd; de kritische Shieldsparameter en de hiding&exposure factor. Daarnaast is in het Grensmaasmodel gebruik gemaakt van een calibratiefactor. Deze factor vermenigvuldigt de totale formule met een bepaalde factor. De toegekende waarde van deze 3 parameters verschilt per locatie.  
Deze onzekerheid in deze 3 parameters is een statistische onzekerheid welke wordt veroorzaakt door zowel willekeur in de natuur als door gebrek aan kennis

### 4.3 Afbakening voor gevoeligheidsanalyse

In dit hoofdstuk zijn de onzekerheidsbronnen geïventariseerd en geclassificeerd. De onzekerheden binnen de context en de structuur van het model worden in het verder onderzoek niet meegenomen. Men moet zich echter bewust blijven van het bestaan van deze onzekerheden. Binnen de onzekerheden in de modelinput en de modelparameters zijn verschillende niveau's geclassificeerd. In de gevoeligheidsanalyse wordt enkel gekeken naar de onzekerheden welke een statistisch niveau hebben. Deze keuze is gemaakt omdat het mogelijk is deze onzekerheden in statistische termen uit te drukken. Het doen van een stochastische onzekerheidsanalyse is enkel mogelijk als de onzekerheidsbron in statistische termen kan worden beschreven.

In het volgende hoofdstuk, de gevoeligheidsanalyse, wordt dus enkel doorgewerkt met de onzekerheden in de modelinputs en modelparameters die het niveau van statistische onzekerheid hebben. Dit zijn de volgende onzekerheidsbronnen:

1. De **riviergeometrie**. Het gaat hierbij om de parameters die samen de geometrie van de rivier geven. Deze parameters zijn o.a. het dwarsprofiel, de rivieras, de rivierkilometer (rkm), het verhang van de bodem en de straal van de bochten.
2. De **afvoer**. Het gaat hierbij om de hoogte van de dagafvoeren bij Eijsden.
3. De **korrelgrootte**. Het gaat hierbij om de samenstelling van de bodem zoals deze in de ondergrondboekhouding van het Grensmaasmodel is ingevoerd.
4. De **laagdikte** van de **toplaag**. Het gaat hierbij om de dikte van de toplaag en de transportlaag.
5. De **zomerbedruwheid**. Het gaat hierbij om de zomerbedruwheden zoals deze zijn overgenomen uit de WAQUA-resultaten.
6. De **winterbedruwheid**. Het gaat hierbij om de winterbedruwheden zoals deze bepaald zijn met BASELINE op basis van ecotopenkaarten.
7. De **kritische Shieldswaarde**. Het gaat hierbij om de dimensieloze maat voor de kritische schuifspanning. In de formule van Wu is de waarde gesteld op 0,03.
8. De **hiding&exposure factor**. Het gaat hierbij om de dimensieloze factor die het onderlinge effect van korrels op de schuifspanning in rekening brengt.
9. De **calibratiefactor**. Hierbij gaat het om de vermenigvuldigingsfactor die is gebruikt om het voorspelde sedimenttransport door het model te calibreren.

In totaal zijn er dus 9 onzekerheidsbronnen geselecteerd voor de gevoeligheidsanalyse.

In onderstaande matrix staan de geïnterpreteerde onzekerheden binnen de modelinputs en modelparameters van het Grensmaasmodel weergegeven. De matrix is de classificatiematrix van Walker (2003) waarmee onzekerheden kunnen worden geclassificeerd naar locatie, niveau en bron.

Locatie	Niveau			Aard / Bron van onzekerheid			
	Statistische onzekerheid	Scenario onzekerheid	Bekende onbekendheid	Epistemologische (gebrek aan kennis)	variabiliteit		
					Willekeur in natuur	Willekeur in samenleving	Technologische verrassingen
<b>Inputs</b>							
- riviergeometrie (1)	x (variatie langs rivieras)		x (meetmethode)	x (meetmethode)	x (variatie langs rivieras)		
- Afvoer (2)	x (variabiliteit in tijd)	x (bodemgebruik + klimaatverandering)		x (bodemgebruik + klimaatverandering)	x (variatie in tijd + klimaatverandering)	x (veranderend bodemgebruik)	
- Bodemsamenstelling (3) + Laagdikte + Korreldiameters	x (variatie in tijd en ruimte)		x (tekort aan metingen)	x (tekort aan metingen)	x (variatie in tijd en ruimte)		
- Ruwheden (4) + Chezy coefficient + Nikuradse waarden	x (variatie in tijd en ruimte)		x (hydraulische modellen)		x (variatie in tijd en ruimte)		
<b>Parameters</b>							
in transportvoorspeller: (5) - Hiding and exposure factor - Kritische Shieldsparameter - calibratiefactor	x (variatie in tijd en ruimte)		x (nieuwe inzichten)	x (nieuwe inzichten)	x (variatie in tijd en ruimte)		

Tabel 4-1: Classificatie matrix van Walker (2003)





## 5 GEVOELIGHEIDSANALYSE

In §4.3 is weergegeven welke onzekerheden in de modelinputs en modelparameters het niveau van statistische onzekerheid hebben. In dit hoofdstuk worden de geselecteerde 9 onzekerheden getoetst door middel van een gevoeligheidsanalyse. Janssen (1990) definieert de gevoeligheidsanalyse als *'een studie naar de invloed van variaties in modelparameters [...] op de modeluitkomsten'*. Met behulp van de gevoeligheidsanalyse moet inzichtelijk worden gemaakt wat de bijdrage is van elk van de 9 beschouwde onzekerheidsbronnen aan de onzekerheid in het modelresultaat. De parameter die de grootste bijdrage levert wordt meegenomen naar de onzekerheidsanalyse.

In §5.1 wordt ingegaan op de gebruikte methode om de gevoeligheid van de parameters te toetsen. §5.2 geeft de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weer. In §5.3 volgt de afbakening voor de stochastische onzekerheidsanalyse.

### 5.1 Methode

De gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd met behulp van de Individuele Parameter Variatie studie (IPV). IPV is een eenvoudige, directe methode om inzicht te krijgen in de gevoeligheden. Een nadeel van de methode is dat de correlaties tussen de parameters niet wordt meegenomen (Janssen, 1990). Met de IPV methode wordt elke parameter afzonderlijk rond de instelwaarde gevarieerd. Ondertussen worden de instelwaarden van de andere parameters constant gehouden. Zodoende wordt de gevoeligheid van de modeluitkomsten zichtbaar voor de gevarieerde parameter.

Om de instelwaarde van de parameter te kunnen variëren moet een variatieruimte worden gekozen. Elke parameter zal met dezelfde factor gevarieerd moeten worden om de gevoeligheden onderling vergelijkbaar te maken. De vraag is echter welke variatieruimte fysisch realistisch is, een bepaalde factor zal voor de ene parameter realistischer zijn dan de andere.

In de literatuur is gezocht naar een antwoord op deze vraag. Van der Klis (2003) gebruikt ook de IPV methode en past daarbij een variatiefactor van 15% toe. Hierbij gelden dus de bovengenoemde voor- en nadelen. Van Vuren (2005) past ook de IPV methode toe, maar zij maakt hierin niet gebruik van een constante variatiefactor. Zij kiest ervoor om de instelwaarden van elke parameter te variëren over hun 80% betrouwbaarheidsinterval. Deze aanpak heeft het voordeel dat je altijd een fysisch realistische variatieruimte beschouwt. Het nadeel is echter dat voor elke parameter een 80% betrouwbaarheidsinterval moet worden opgesteld. Het opstellen van een representatief betrouwbaarheidsinterval is voor veel van de 9 parameters complex vanwege het gebrek aan data. Er is gekozen om ondanks de nadelen toch een constante variatiefactor te hanteren in deze gevoeligheidsanalyse.

Om uiteindelijk toch een valide uitspraak te doen over welke parameter welke bijdrage levert aan de onzekerheid in het modelresultaat, wordt gebruik gemaakt van een indelingsmethode van Janssen (1990). Deze indelingsmethode beschouwt de mate van onzekerheid en de mate van gevoeligheid. Als de mate van onzekerheid groot is en ook de mate van gevoeligheid groot is, zal de onzekerheid in die parameter een grote bijdrage leveren aan de onzekerheid in het modelresultaat.

De mate van gevoeligheid voor de onzekerheid in de riviergeometrie wordt echter niet bepaald met de IPV methode. De riviergeometrie is weggelaten omdat de moeite van

het aanpassen van de geometrie van elk van de 166 rekenpunten niet opweegt tegen het uiteindelijke resultaat. De mate van onzekerheid in de riviergeometrie is vele malen kleiner dan de mate van onzekerheid in bijvoorbeeld de bodemsamenstelling of de afvoer.

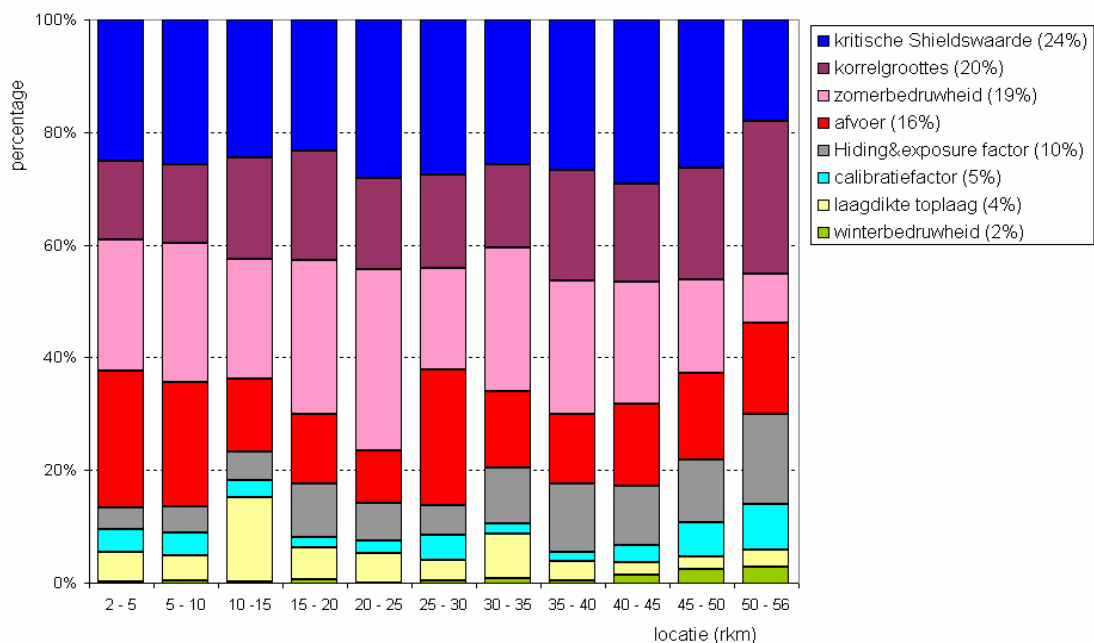
Totaal zijn er 16 simulaties gemaakt; 8 waarin steeds 1 van de 8 instelwaarden is verhoogd met 10% en 8 waarin steeds 1 van de 8 instelwaarden is verlaagd met 10%. De simulaties zijn uitgevoerd met de schematisatie van de autonome situatie. De simulaties lopen van 1/9/1978 tot 6/4/1995 met een tijdsstap van 3 uur. De overige instellingen van het model voor de gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven in bijlage 6.

## 5.2 Resultaten

### 5.2.1 Mate van gevoeligheid

Het modelresultaat van elk van de 16 simulaties geeft inzicht in het bodemniveau op 6/4/1995. Als maat voor de gevoeligheid wordt het begrip ‘bandbreedte’ gebruikt. De bandbreedte wordt als volgt berekend:

1. Van elk van de 8 parameters wordt voor beide simulaties (instelwaarde 10% omhoog of omlaag) het bodemniveau per rekenpunt op 6/4/1995 vastgesteld.
2. Per parameter wordt het absolute verschil in bodemniveau tussen beide simulaties (instelwaarde 10% omhoog of omlaag) bepaald, dit wordt de bandbreedte genoemd.



Grafiek 5-1: Mate van gevoeligheid van het modelresultaat voor variatie van 10% voor elke parameter per 5 km

In grafiek 5-1 is de gemiddelde bandbreedte per 5 km van elke gevarieerde parameter uitgezet als percentage van de totale gemiddelde bandbreedte. Oftewel van alle rekenpunten per 5 km zijn de berekende bandbreedtes van de 8 parameters opgeteld. Per parameter is het aandeel van deze som bepaald. Op deze manier wordt voor elke parameter de mate van gevoeligheid inzichtelijk. Enkel het resultaat van het werkelijke

Grensmaastraject (rkm 2-56) is beschouwd, aangezien de modelresultaten benedenstrooms van rkm 56 minder betrouwbaar zijn. Een toelichting hierop is te vinden in bijlage 5.2. De percentages die in de legende van grafiek 5-1 genoemd staan, vermelden het gemiddelde aandeel aan de bandbreedte over de gehele rivieras

Met behulp van grafiek 5-1 wordt het volgende geconcludeerd over de mate van gevoeligheid van de verschillende parameters:

1. Het modelresultaat is nauwelijks gevoelig voor variatie van de winterbedruwheid, voor variatie van de laagdikte van de toplaag en voor variatie van de calibratie-factor.
2. Het modelresultaat is in ruime mate gevoelig voor de variatie van de zomerbedruwheid, de variatie van de afvoer, de variatie van de kritische Shieldswaarde en de variatie van de korrelgroottes.

### 5.2.2 Mate van onzekerheid

Naast de mate van gevoeligheid wordt ook de mate van onzekerheid getoetst van elke parameter. Voor de mate van onzekerheid is ook de riviergeometrie weer beschouwd. De mate van onzekerheid is bepaald op basis van literatuur en enkele gesprekken met mensen (D. Meijer, M. van Ledden) uit het vakgebied. Dit heeft geleid tot een inschatting over de mate van onzekerheid van elke parameter. De mate van onzekerheid is moeilijk te kwantificeren, daarom is gekozen om de mate van onzekerheid globaal op te delen in drie niveaus; klein, medium en groot.

Per parameter wordt nagegaan hoe de mate van onzekerheid is.

1. De **afvoer** kent een hoge mate van onzekerheid doordat de toekomstige afvoer onzeker is. Afvoeren in jaar 1 hebben geen samenhang met afvoeren in jaar 2. Enkel op basis van historische data en seizoensverwachtingen kan een beeld gegeven worden over de verwachte toekomstige afvoerreeks. De toekomstige afvoerreeks kan echter niet gemeten worden zoals dit het geval is bij de overige 8 parameters. (Van der Klis, 2003)
2. De **korrelgrootte** in de bedding van de Grensmaas kent ook een hoge mate van onzekerheid. Dit wordt veroorzaakt door de sterke gradatie van de bodem en het ontbreken van voldoende boringen in het zomerbed. (Meijer, gesprek maart 2005)
3. De **zomerbedruwheid** kent een gemiddelde mate van onzekerheid. De zomerbedruwheid is bepaald op basis van hydraulische modellen die ook onzekerheid bevatten (Van der Klis, 2003 p.40)
4. De mate van onzekerheid in de waarde van de **kritische Shieldswaarde** is moeilijk in te schatten. Wu et al (2000) hebben de waarde van 0,03 uit vele lab- en velddata bepaald. Ingeschat wordt dat de mate van onzekerheid kleiner is dan de mate van onzekerheid in de afvoer, korrelgrootte en de ruwheid. (Meijer, gesprek maart 2005)
5. De mate van onzekerheid in de **riviergeometrie** is klein, ondanks kleine verschillen tussen de single-beam en multi-beam meetmethode. De mate van gevoeligheid wordt echter hoog ingeschat. (Meijer, gesprek maart 2005)
6. De mate van onzekerheid in de **hiding&exposure factor** is gemiddeld. De omstandigheden in de Grensmaas verschillen in tijd en plaats, hetgeen vergelijkingen met de lab- en velddata lastig maakt.
7. De mate van onzekerheid in de **laagdikte van de toplaag** is groot. De dikte van de toplaag zal verschillen in ruimte en tijd. (MER 2003).

8. De mate van onzekerheid in **de winterbedruwheid** is gemiddeld. De ruwheid is bepaald op basis van ecotopenkaarten en is afhankelijk van de natuurontwikkeling. (MER 2003)
9. De mate van onzekerheid in de **calibratiefactor** is gemiddeld. De factor is wel per riviertak vastgesteld wat de mate van onzekerheid verlaagt t.o.v van een factor voor de gehele rivier, maar niet per rekenpunt wat de onzekerheid verhoogt.

In tabel 5-1 is de mate van onzekerheid en de mate van gevoeligheid geïntegreerd in een matrix (Janssen, 1990). De onzekerheid van een parameter zal het meest bijdragen aan de onzekerheid in het modelresultaat als de mate van gevoeligheid en de mate van onzekerheid groot is. Uit tabel 5-1 kan geconcludeerd worden dat dit het geval is voor de korrelgrootte en de afvoer.

mate van onzekerheid	hoog	laagdikte toplaag		afvoer
	medium	winterbedruwheid		korrelgrootte zomerbedruwheid
	klein	calibratiefactor	hiding&exposure factor	kritische Shieldswaarde
				riviergeometrie
		0% tot 7,5%	7,5% tot 15%	hoger dan 15%
		<b>mate van gevoeligheid</b>		

Tabel 5-1: Ingevulde Indelingsmatrix van Janssen (1990) welke de mate van gevoeligheid en de mate van onzekerheid van de 9 beschouwde onzekerheidsbronnen weergeeft .

### 5.3 Afbakening voor onzekerheidsanalyse

De onzekerheid in de korrelgrootte en de afvoer veroorzaken de grootste bijdrage in de onzekerheid van het modelresultaat. Het ideale beeld is om van beide parameters de onzekerheid met behulp van een stochastische onzekerheidsanalyse te onderzoeken en daarnaast de interactie tussen de twee onzekerheden te bepalen. Echter omwille van de tijd moet een keuze gemaakt worden tussen deze twee. Gekozen is om enkel de onzekerheid in het modelresultaat ten gevolge van de afvoer te onderzoeken. De argumentatie voor deze keuze is als volgt:

1. De afvoer in de Grensmaas kent een zeer hoge variabiliteit, hetgeen het interessant maakt om de onzekerheid ten gevolge van deze hoge variabiliteit te onderzoeken.
2. Van de afvoer bestaat een nauwkeurige datareeks vanaf 1911. Over de beschikbare afvoerdata bestaat dan ook geen onzekerheid, hetgeen een degelijke statistische beschrijving van de afvoerdata mogelijk maakt.
3. Over de bodemsamenstelling van het zomerbed van de Grensmaas zijn weinig data beschikbaar. De beschikbare data zijn reeds gebruikt in de schematisatie van de huidige bodemsamenstelling in SOBEK. Het beschikbaar krijgen van meer data en het statistisch beschrijven van de data zal voor de bodemsamenstelling van het zomerbed erg complex en tijdrovend zijn. Voor een stochastische onzekerheidsanalyse is een degelijke statistische beschrijving van de bodemsamenstelling nodig. Het is maar de vraag of deze gegeven kan worden.

In het vervolg van dit onderzoek, de stochastische onzekerheidsanalyse, wordt dus enkel nog de onzekerheid ten gevolge van de variatie van de afvoer beschouwd.

## 6 BELANGRIJKE KENMERKEN IN RELATIE AFVOER - TRANSPORT

In hoofdstuk 5 is geconcludeerd dat de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie een grote bijdrage levert aan de onzekerheid in de gemodelleerde bodemverandering. Bodemveranderingen worden veroorzaakt door gradiënten in het sedimenttransport. De relatie tussen afvoer en transport is in een rivier met een gegradeerde bodem anders dan in een rivier met een uniforme zandbodem. Door de aanwezigheid van een afpleisteringslaag heeft de duur en de frequentie van hoge afvoeren een grote impact op de grootte van het transport.

In dit hoofdstuk wordt inzicht gegeven in de kenmerken van het afvoerverloop die van belang zijn voor het sedimenttransport. Inzicht in deze kenmerken is van belang voor de onzekerheidsanalyse (Hoofdstuk 7) waarin gebruik gemaakt wordt van Monte Carlo simulaties. Voor deze techniek is het noodzakelijk om het afvoerverloop statistisch te beschrijven. Dit hoofdstuk heeft ten doel om inzicht te geven in de belangrijke kenmerken van de afvoer voor het sedimenttransport, zodat bekend is waar de statistische beschrijving aan moet voldoen.

In §6.1 wordt onderzocht hoe verschillende afvoerranges bijdragen aan het transport. Op deze manier is bepaald welke afvoer de grootste bijdrage levert aan het jaarlijkse transport. Daarnaast is ook het belang van piekafvoeren voor het transport bepaald. Ook de duur van de piekafvoeren is mogelijk van belang voor het transport. Dit is onderzocht in §6.2. In §6.3 is nagegaan in hoeverre de volgorde van het afvoerverloop invloed heeft op het sedimenttransport.

### 6.1 Invloed verschillende afvoerranges op transport

Op grond van de factoren die in bovenstaande inleiding zijn genoemd heeft Duizendstra (1999) verondersteld dat de afpleisteringslaag tussen twee uitersten in kan liggen:

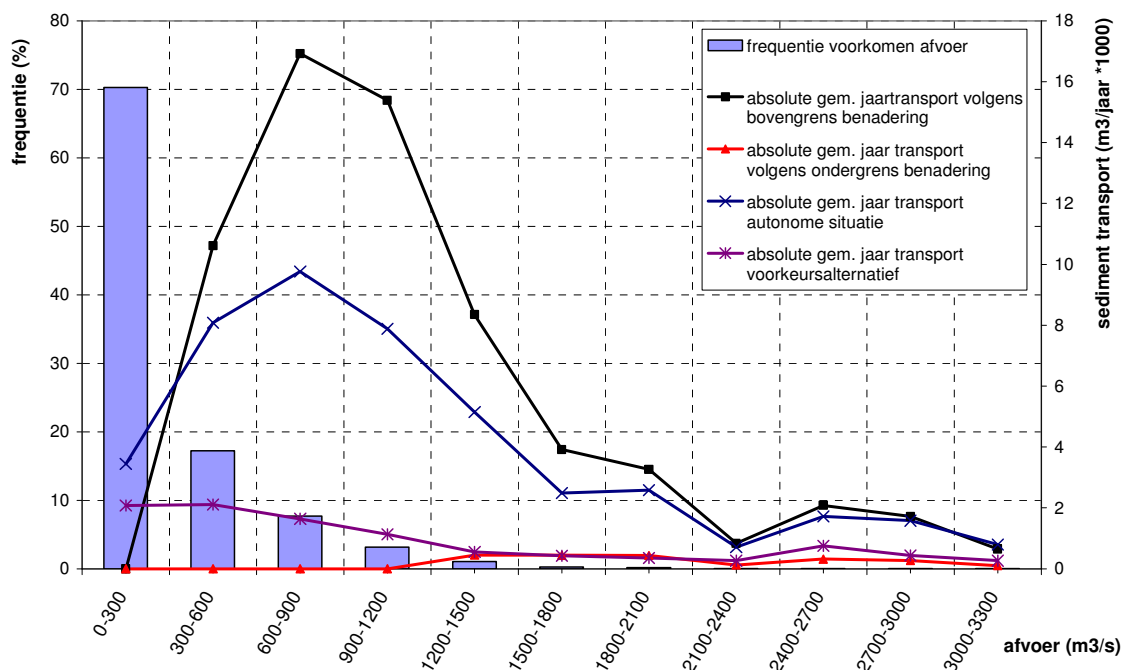
1. de bodem is totaal afgepleisterd waardoor het transport “aanbod gelimiteerd” is.
2. de bodem is niet afgepleisterd waardoor het transport “capaciteit gelimiteerd” is.

Op basis van transportmetingen bij de brug van Maaseik (rkm 50) heeft Duizendstra een boven- en een ondergrensbenadering van de afvoer-transportrelatie (Q-S relatie) opgesteld (Duizendstra, 1999). De ondergrens is een benadering voor de Q-S relatie als de bodem totaal afgepleisterd is. In dat geval wordt verondersteld dat pas bij afvoeren hoger dan  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  transport op gang komt. Een totaal afgepleisterde bodem komt voor als er al geruime tijd geen hoge afvoeren zijn geweest en ook het achtergebleven fijnere sediment bovenop de afpleisteringslaag is weggespoeld. De bovengrens is een benadering voor de Q-S relatie als de bodem niet afgepleisterd is. Een niet afgepleisterde bodem komt voor tijdens en na een piekafvoer ( $Q > 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Na een piekafvoer blijft een grote hoeveelheid fijner sediment achter op de bedding. In dat geval wordt verondersteld dat al bij afvoeren vanaf  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  transport plaats vindt.

De Q-S relaties van de boven en ondergrensbenadering zijn weergegeven in bijlage 9. Op grond van deze twee benaderingen kan geconcludeerd worden dat afvoeren vanaf  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  de grootste hoeveelheid transport veroorzaken. Echter doordat deze hoge afvoeren slechts enkele dagen per jaar voorkomen is het de vraag of deze afvoeren over een geheel jaar genomen wel zo'n grote impact hebben op het jaarlijkse transport.

Om deze vraag te kunnen beantwoorden is voor de autonome situatie (AO) en het voorkeursalternatief (VKA) het transport tussen 1/9/1978 - 6/4/1995 gesimuleerd met

SOBEK. Vervolgens is gekeken naar de resultaten ter plaatse van Maaseik (rkm 50). Van de afvoerreeks in deze periode is een dichtheidscurve opgesteld per afvoerrange van 300 m<sup>3</sup>/s. Voor beide situaties is bepaald wat het gemiddelde jaartransport is binnen zo'n afvoerrange. Er is bijvoorbeeld bepaald hoe vaak een afvoer tussen de 300 en 600 m<sup>3</sup>/s voorkomt in de periode 1978-1995 en hoeveel het gemiddelde jaarlijkse transport binnen deze afvoerrange is. Ditzelfde is ook uitgevoerd voor de boven- en ondergrens benadering. In grafiek 6-1 en tabel 6-1 zijn de resultaten weergegeven.



Grafiek 6-1: De frequentie (%) van de dagafvoeren tussen 1/9/1978 en 6/4/1995 per 300 m<sup>3</sup>/s en de absolute bijdrage per afvoerrange aan het gemiddelde transport in m<sup>3</sup>/jaar

Afvoer-range	Aandeel Q	bijdrage gem. jaarlijkse transport volgens:				absolute gemiddelde jaartransport			
		boven-grens	onder-grens	Sobek autonome situatie	Sobek voorkeurs alternatief	autonome situatie	voorkeurs alternatief	onder-grens	boven-grens
[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[Km <sup>3</sup> /jaar]	[Km <sup>3</sup> /jaar]	[Km <sup>3</sup> /jaar]	[Km <sup>3</sup> /jaar]
0-300	70.2	0.0	0.0	7.8	20.7	3.4	2.1	0.0	0.0
300-600	17.2	16.7	0.0	18.3	21.0	8.1	2.1	10.6	0.0
600-900	7.7	26.6	0.0	22.1	16.4	9.8	1.6	16.9	0.0
900-1200	3.2	24.1	0.0	17.8	11.3	7.9	1.1	15.4	0.0
1200-1500	1.0	13.1	21.0	11.6	5.6	5.1	0.6	8.3	0.5
1500-1800	0.3	6.1	20.6	5.6	4.3	2.5	0.4	3.9	0.4
1800-2100	0.2	5.1	20.4	5.8	3.5	2.6	0.4	3.3	0.4
2100-2400	0.0	1.3	5.7	1.6	2.7	0.7	0.3	0.8	0.1
2400-2700	0.1	3.3	14.9	3.9	7.5	1.7	0.8	2.1	0.3
2700-3000	0.0	2.7	12.5	3.6	4.4	1.6	0.4	1.7	0.3
3000-3300	0.0	1.0	4.8	1.8	2.7	0.8	0.3	0.6	0.1
totaal						44.2	10.0	63.7	2.2

Tabel 6-1: De data in kolom 2 en kolom 7 t/m 10 tonen de data van grafiek 6-1. Kolom 3 t/m 6 tonen de procentuele bijdrage aan het gemiddelde transport in m<sup>3</sup>/jaar per afvoerrange van 300 m<sup>3</sup>/s

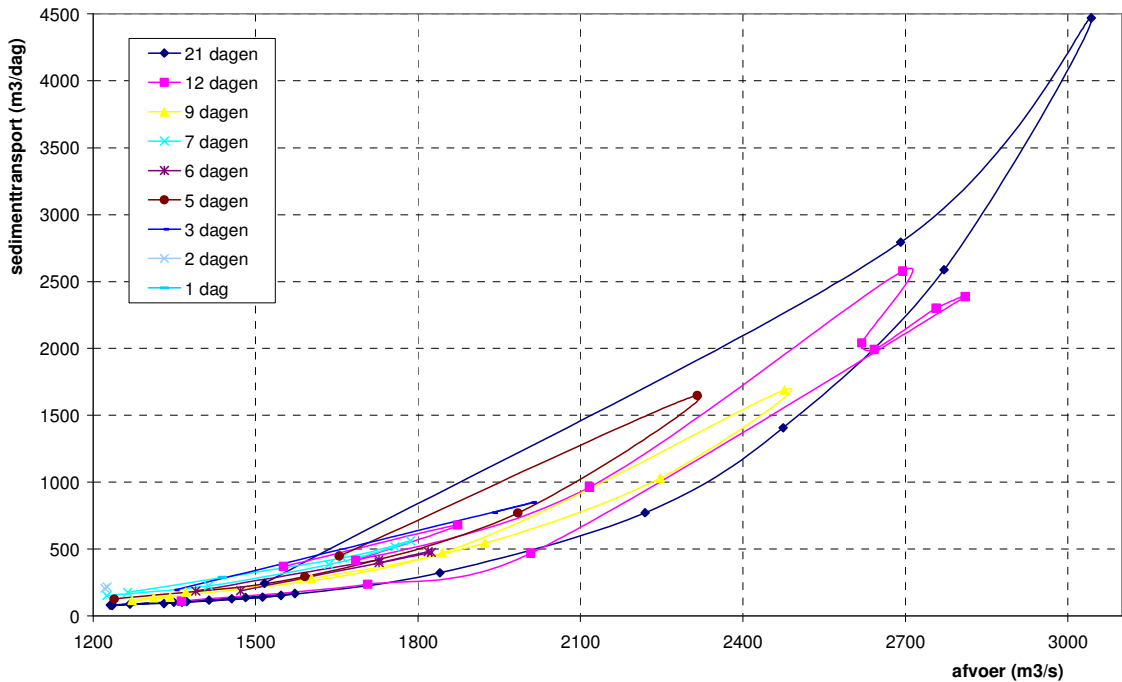
De getoonde gegevens in grafiek 6-1 en tabel 6-1 maken verschillende zaken duidelijk. Let wel dat onderstaande conclusies zijn gebaseerd op modelresultaten.

1. In het MER werd geconcludeerd dat het transport door uitvoering van het voorkeursalternatief tot stilstand komt. Dit wordt bevestigd in grafiek 6-1. Vergeleken met het transport in de autonome situatie neemt het transport ter plaatse van Maaseik in het voorkeursalternatief flink af. Het lijkt erop dat de bovengrens benadering het meest realistische beeld geeft van het transport in de autonome situatie. Welke van de twee benaderingen het beste het transport in het voorkeursalternatief benadert, kan niet gezegd worden. De benaderingen zijn opgesteld op basis van transportmetingen in de autonome situatie.
2. Uit de grafiek blijkt dat de grootste cumulatieve bijdrage aan het transport in de autonome situatie geleverd wordt door de afvoeren tussen 600 en 900 m<sup>3</sup>/s. Gemiddeld over de periode 1978-1995 vindt 22% van het jaartransport plaats in deze afvoerrange. Voor het voorkeursalternatief ligt de afvoerrange die de grootste cumulatieve bijdrage levert aan het transport lager. In deze situatie levert een afvoerrange tussen de 300 tot 600 m<sup>3</sup>/s en 0 tot 300 m<sup>3</sup>/s de grootste cumulatieve bijdrage aan het transport.
3. Uit de Q-S relaties van Duizendstra (Bijlage 9) valt af te leiden dat vanaf afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s het transport sterk toeneemt. In grafiek 6-1 is de cumulatieve bijdrage aan het transport van elke afvoerrange getoond. Ondanks dat bij afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s het transport sterk toeneemt dragen afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s slechts voor 31% (VKA) en 34% (AO) bij aan het jaarlijkse transport. Echter dit beeld vertekend doordat de kans van voorkomen op deze afvoeren meegenomen moet worden. De kans op voorkomen van een afvoer boven de 1200 m<sup>3</sup>/s is ongeveer 2%. Dit houdt in dat 2% van de tijd goed is voor een derde van het jaarlijkse transport. Afvoeren tot 1200 m<sup>3</sup>/s hebben een kans op voorkomen van 98%. Echter deze 98% van de tijd is slechts verantwoordelijk voor 2/3 deel van het jaarlijkse transport. Kijkend naar afvoeren boven de 2100 m<sup>3</sup>/s, kan geconcludeerd worden dat deze slechts zo'n 0.1% van de tijd voorkomen maar wel verantwoordelijk zijn voor zo'n 10% (AO) en 17% (VKA) van het jaarlijkse transport.
4. Volgens de benaderingen van Duizendstra vindt er geen transport plaats bij afvoeren lager dan 300 m<sup>3</sup>/s. De resultaten uit de SOBEK simulaties voorspellen echter wel degelijk transport bij afvoeren lager dan 300 m<sup>3</sup>/s. In VKA is deze range zelfs verantwoordelijk voor 20% van het transport. Hieruit blijkt verschil tussen de metingen en voorspellingen van het Grensmaasmodel.

De belangrijkste conclusie is de conclusie in punt 3. Volgens het model heeft de frequentie van afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s een grote impact op het jaarlijkse transport.

## 6.2 Invloed duur afvoerpieken

Naast de hoogte van de afvoerpieken is mogelijk ook het aantal dagen dat een afvoerpiek duurt een belangrijke bepalende factor voor het transport. Tijdens een afvoerpiek verandert de samenstelling van de toplaag. Het zou zo kunnen zijn dat de duur van de afvoerpiek een rol gaat spelen. Om dit te onderzoeken is voor de periode van 1/9/1978 tot 6/4/1995 beschouwd wat de duur van de piekafvoeren is geweest. Een afvoer wordt als een afvoerpiek gerekend als de dagafvoer boven de 1200 m<sup>3</sup>/s uitkomt. In de beschouwde periode komen 27 afvoerpieken met verschillende lengtes voor. Totaal komt in deze ±17 jaar de afvoer 100 dagen boven de 1200 m<sup>3</sup>/s uit. De langst durende afvoerpiek duurt 21 dagen en de kortste één dag.



Grafiek 6-2: De Q-S relaties van afvoeren > 1200 m<sup>3</sup>/s tussen 1978 en 1995 met verschillende duur opgesteld met behulp van SOBEK.

Voor elk van de 27 afvoerpieken is bepaald wat de Q-S relatie is. Als de duur van de piek effect heeft op het transport dan zou dit moeten blijken uit de Q-S relaties van de afvoerpieken. In grafiek 6-2 zijn de Q-S relatie weergegeven voor pieken met een verschillende lengte die tussen 1978 en 1995 zijn voorgekomen. De Q-S relatie is vastgesteld op basis van modelresultaten van een simulatie met het voorkeursalternatief. De conclusies moeten dus enigszins genuanceerd worden doordat deze Q-S relaties niet geïverifieerd zijn met daadwerkelijke metingen

De grafiek is enigszins onduidelijk doordat de Q-S relaties van de verschillend durende afvoerpieken over elkaar heen lopen. Dit over elkaar heen lopen van de Q-S relaties duidt er echter op dat volgens het model de duur van de piek geen groot effect heeft op het sedimenttransport. Als de duur een groot effect zou hebben dan zouden de Q-S relaties allemaal uit elkaar liggen. Deze conclusie volgt logischerwijs uit de gebruikte transportvoorspeller van Wu et al. In deze voorspeller is geen tijdsrelatie opgenomen. De resultaten uit grafiek 6-2 geven dus enkel weer dat volgens het model de duur van de piekafvoer niet van belang is. Duizenstra (1999) kwam echter met de hypothese dat niet enkel de momentane afvoer van belang is voor het transport, maar ook de recente geschiedenis. Recent onderzoek van Blom (2003) heeft aangetoond dat er verticale sortering in bodemvormen plaats vindt tijdens piekafvoeren. Deze twee onderzoekers stellen dus dat in werkelijkheid de duur van de piekafvoeren wel degelijk effect heeft op de Q-S relatie. Het model geeft in deze dus geen representatief beeld over de invloed van de duur van de piekafvoeren op het transport.

Grafiek 6-2 onderstreept echter nog wel eens het belang van hoge afvoeren. Het sedimenttransport neemt exponentieel toe met de afvoer. Bij afvoeren rond de 1200 m<sup>3</sup>/s ligt het sedimenttransport volgens SOBEK rond de 100 á 200 m<sup>3</sup>/dag. Voor een afvoer van 3000 m<sup>3</sup>/s is dit volgens SOBEK gestegen tot 4500 m<sup>3</sup>/dag. Op grond van de

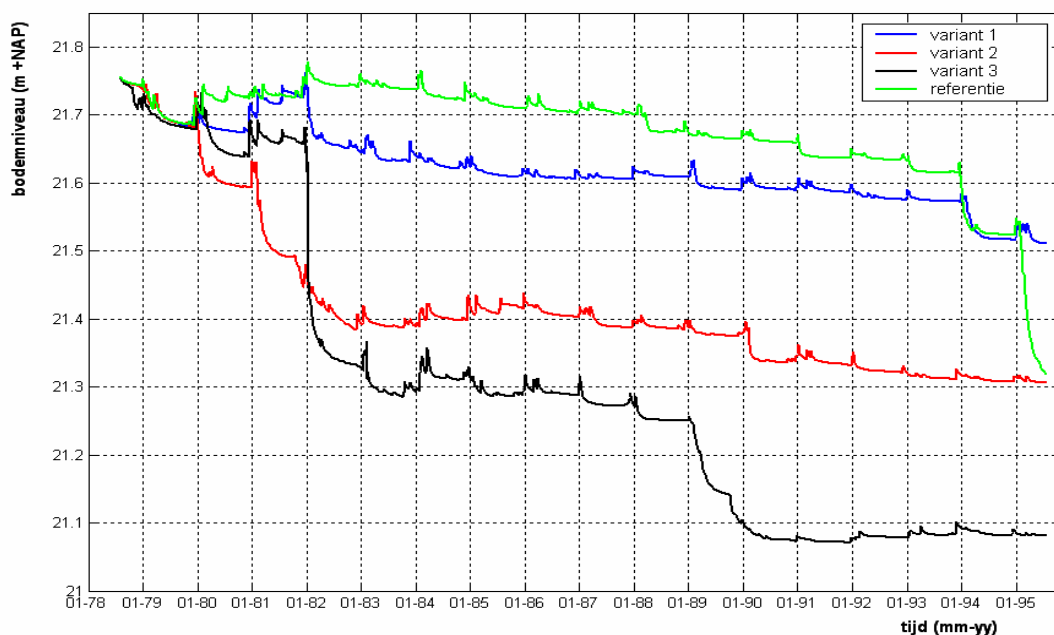


pieken tussen 1978 en 1995 zou gezegd kunnen worden dat er samenhang bestaat tussen de duur van de pieken en de gemiddelde hoogte van de piek. Tussen 1978 en 1995 komt de afvoer 16 maal boven de 2000 m<sup>3</sup>/s uit. Van deze 16 dagen vallen er 12 binnen de twee langst durende afvoergolven. Uit de historische afvoerreeds van 1911-2003 blijkt ook dat de extreem hoge afvoer (>2000 m<sup>3</sup>/s) voornamelijk in pieken met een lange duur voorkomen. In de historie is slechts 30 maal de dagafvoer bij Eijsden groter geweest dan 2000 m<sup>3</sup>/s. Van die 30 maal had de afvoergolf 25 maal een duur van één week of langer.

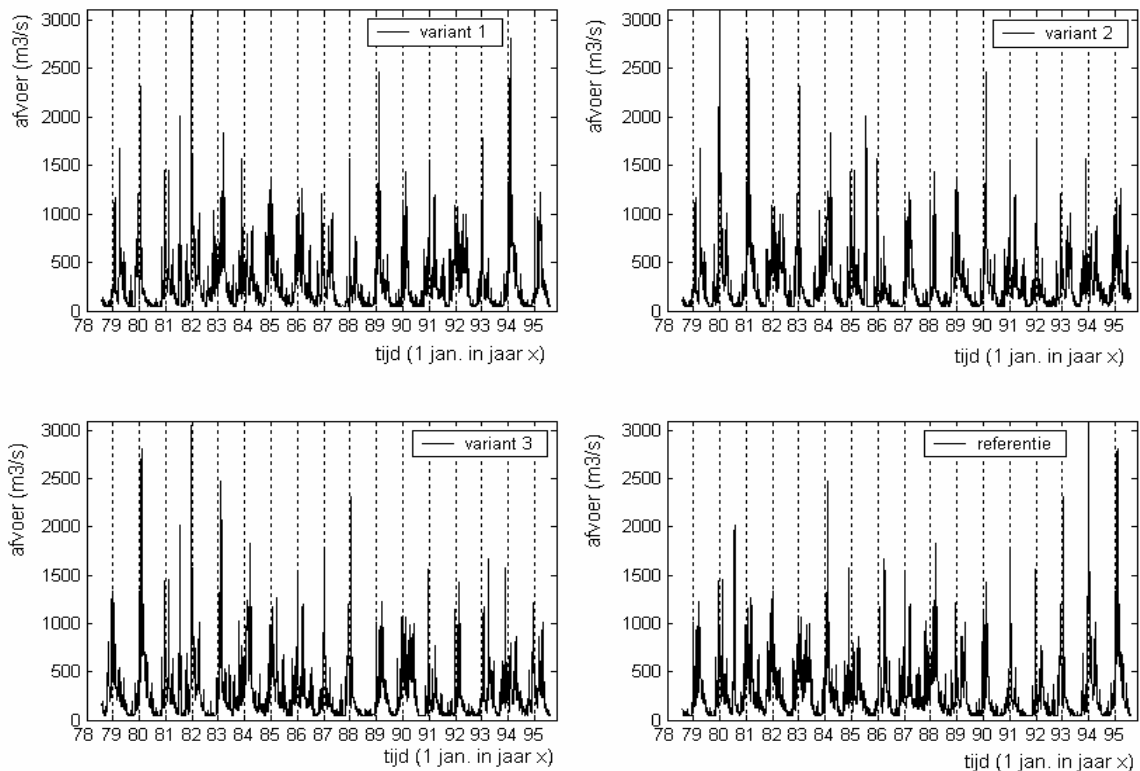
### 6.3 Invloed volgorde afvoerreeds op bodemverandering

In deze paragraaf wordt onderzocht of de bodemontwikkeling gevoelig is voor de volgorde van afvoerpieken in het afvoerverloop. Om dit te onderzoeken zijn vier simulaties gemaakt in SOBEK voor de autonome situatie met het afvoerverloop van 1/8/1978 tot 31/7/1995 als invoer. Binnen deze periode komt vier maal een afvoergolf voor met afvoeren boven de 2000 m<sup>3</sup>/s. Een simulatie vormt de referentieberekening, hierin wordt gerekend met het historische afvoerverloop van 1978 tot 1995. De andere 3 simulaties vormen de 3 varianten waarin de volgorde van de jaren is verwisseld. De reeds loopt van 1/8/1978 tot 31/7/1995, oftewel 17 hydrologische jaren. De 17 hydrologische jaren binnen de reeds zijn willekeurig verwisseld. Hierdoor ontstaan er vier verschillende afvoerreedsen; drie varianten en één referentie. Grafiek 6-4 toont deze vier afvoerreedsen.

Grafiek 6-3 toont de ontwikkeling van het bodemniveau in de tijd op een locatie 1 km bovenstrooms van Roosteren. De figuur toont voor elk van de 4 simulaties een ander verloop van de bodemverandering. Doordat de piekafvoeren op een ander moment in de tijd plaats vinden, ontwikkelt de bodem zich voor elke variant anders. De grafiek toont dat de grootste bodemverandering steeds tijdens het winterseizoen (de verticale grid ligt op 1 januari van elk jaar) plaatsvindt. In het winterseizoen komen de piekafvoeren voor.



Grafiek 6-3: De bodemontwikkeling tussen 1/8/1978 en 31/7/1995 voor de 4 varianten .

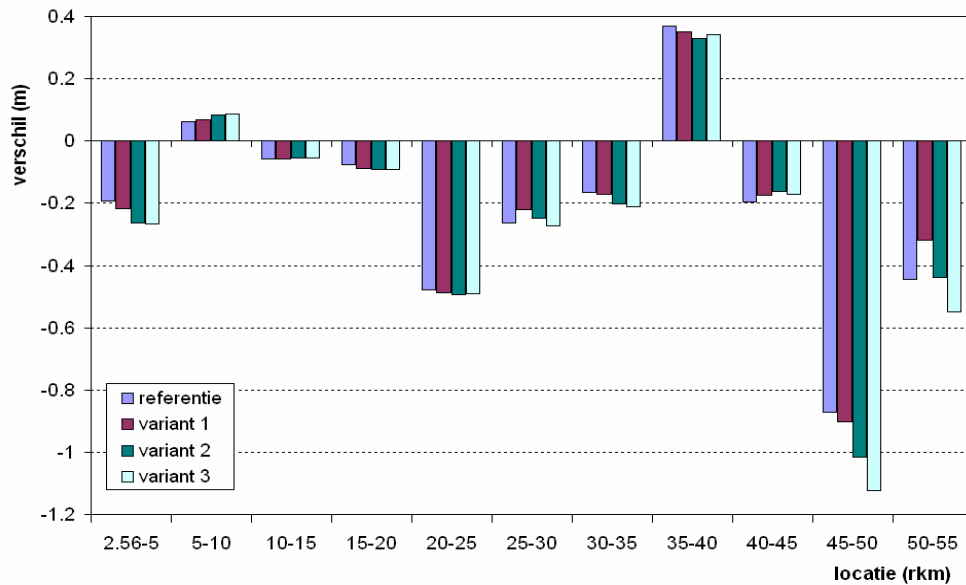


Grafiek 6-4: De afvoerreeksen van de 4 varianten waarvan het afvoerverloop is verwisseld.

Echter de bijdrage van een bepaalde piek aan de bodemverandering is voor de verschillende varianten ongelijk. Zo leidt de afvoergolf van eind 1993 (met een piekafvoer van 3050 m<sup>3</sup>/s) in variant 1 slechts tot ongeveer 10 cm erosie, terwijl dit in variant 3 meer dan 30 cm is. Deze afvoergolf vindt in beide varianten in de winter van 1981/1982 plaats. Het gesignaleerde verschil moet dus voortkomen uit de afvoer in de voorgaande jaren (1978 tot 1980). Hieruit blijkt dat de geschiedenis van de afvoerreeks van belang is voor de bodemverandering op een bepaald moment.

Een ander opvallend feit is dat de 4 varianten een verschillend bodemniveau hebben op 31/7/1995. Tussen variant 3 en variant 1 ontstaat na 17 jaar een verschil van meer dan 40 cm ter plaatse van rkm 49. Ondanks dat de 4 afvoeren voor een periode van 17 jaar eenzelfde sedimentvoerende afvoer hebben, is er klaarblijkelijk een verschil in transport opgetreden op deze locatie.

Grafiek 6-5 toont dat dit verschil in bodemniveau op 31/7/1995 ook op andere locaties optreedt. Het Grensmaatraject (rkm 2-56) is opgedeeld in stukken van 5 km. Per 5 km is de gemiddelde bodemverandering gedurende 17 jaar in de referentiesituatie en in de 3 varianten weergegeven. Het verschil in hoogte van de balken geeft aan dat er verschillen ontstaan in bodemniveau door toepassing van verschillende afvoervarianten. Tussen rkm 45 en 50 is een gemiddeld verschil in de gemodelleerde bodemverandering van meer dan 20 cm tussen variant 1 en 3. Dit gemodelleerde verschil is een verschil na 17 jaar, logischerwijs zal dit verschil groter zijn voor een langere periode.



Grafiek 6-5: Het verschil tussen het bodemniveau van de referentievariant op 31/7/1995 en het bodemniveau van de 3 varianten op 31/7/1995 gemiddeld per 5 km

In tabel 6-2 zijn de gemiddelde bodemveranderingen per variant tussen rkm 2 en 56 weergegeven zoals deze met SOBEK-graded zijn berekend. Het model geeft aan dat het veranderen van de volgorde van de piekafvoeren leidt tot enkele centimeters verschil in gemiddelde bodemverandering na 17 jaar. Voor 100-jarige simulaties zal dit verschil zeer waarschijnlijk nog enkele malen groter zijn.

Variant	gem. bodemverandering tussen rkm 2-56 na 17 jaar	gem. bodemverandering tussen rkm 2-56 per jaar
Referentie berekening	22,6 cm	1,3 cm
Afvoervariant 1	21,0 cm	1,2 cm
Afvoervariant 2	24,2 cm	1,4 cm
Afvoervariant 3	26,8 cm	1,6 cm

Tabel 6-2: Modelresultaat gemiddelde bodemverandering tussen rkm 2-56 per afvoervariant

## 6.4 Conclusies

Het doel van dit hoofdstuk was om inzicht te geven in de belangrijke kenmerken van de afvoer voor het sedimenttransport. Dit is uitgevoerd op basis van de modelresultaten van SOBEK. De belangrijkste conclusies zijn:

1. De frequentie van afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s heeft volgens SOBEK een grote impact op de hoeveelheid sedimenttransport. Ondanks dat deze afvoeren slechts een kans op voorkomen hebben van 2% per jaar, zijn deze afvoeren volgens SOBEK verantwoordelijk voor een derde deel van het jaarlijkse transport. Een hogere frequentie van het aantal afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s veroorzaakt een grote verandering in het totale transport.
2. De duur van de afvoerpieken heeft volgens SOBEK op zichzelf geen groot effect op de afvoer-transport relatie van het model. Het modelresultaat geeft aan dat de Q-S relatie van een afvoerpiek met een lange duur niet anders is dan die van een

afvoerpiek met een korte duur. Duizendstra (1999) geeft echter op basis van metingen aan dat de recente geschiedenis van afvoeren wel degelijk invloed heeft op het transport. Mogelijk heeft de duur van de pieken in werkelijkheid dus wel effect, maar is dit effect niet opgenomen in de modelstructuur van SOBEK. Daarnaast komen in pieken met een langere duur over het algemeen extremere dagafvoeren voor dan in kortere pieken.

3. De volgorde van afvoerpieken binnen een afvoerreeks leidt volgens SOBEK tot flinke verschillen in de bodemontwikkeling. 3 varianten op de volgorde van de afvoerpieken in de afvoerreeks van 1978-1995 toont dat door verandering van de volgorde de gemodelleerde bodemverandering verschilt. In 17 jaar tijd kan dit gemiddeld over het traject zo'n 5 cm zijn en lokaal zelfs 40 cm. Voor periodes langer dan 17 jaar zijn deze verschillen logischerwijs groter. In lange termijn voorspellingen van de bodemverandering kan de volgorde van optreden van piekafvoeren een belangrijk kenmerk zijn voor het sedimenttransport.

Bij het statistisch beschrijven van de afvoer in hoofdstuk 7 moet dus zeker op het afvoerverloop (volgorde van piekafvoeren), de duur en de frequentie van afvoerpieken gelet worden.

## 7 ONZEKERHEIDSANALYSE

In hoofdstuk 5 is door middel van de gevoeligheidsanalyse geconcludeerd dat de variatie in de afvoer een grote bijdrage levert aan de onzekerheid in het modelresultaat. Het doel van dit hoofdstuk is om een methode te vinden waarmee de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie op een representatieve wijze kan worden vastgesteld.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt. In §7.1 wordt ingegaan op de Monte Carlo simulatie techniek en wordt een keuze gemaakt tussen de verschillende varianten. In §7.2 wordt uit drie beschrijvingsmethodes een methode geselecteerd welke de afvoerdata statistisch kan beschrijven. §7.3 toetst of deze beschrijvingmethode de karakteristieken van de Maasafvoer representatief beschrijft. In §7.4 wordt nagegaan hoeveel Monte Carlo simulaties uitgevoerd moeten worden alvorens het gewenste betrouwbaarheidsinterval kan worden gegeven. §7.5 vat de conclusies van het hoofdstuk samen.

### 7.1 Monte Carlo simulaties

Uit de gebruikte literatuur (Van Vuren (2002-2005), Van der Klis (2003), Oosting (2001)) blijkt dat voor de onzekerheidsanalyse van morfologische modellen vaak gebruik wordt gemaakt van Monte Carlo simulatie (MCS). Deze methode is volgens Van der Klis zeer goed bruikbaar doordat het met bijna alle kenmerken van morfologische modellen kan omgaan. Zo kan het goed omgaan met het niet-lineaire gedrag, de tijd- en plaatsafhankelijkheid en de mate van onzekerheid in model- en inputparameters. Een praktisch nadeel van de toepassing van MCS is dat een groot aantal simulaties moet worden gemaakt om een bepaald betrouwbaarheidsniveau te bereiken, hetgeen zal leiden tot een lange simulatieduur. Een citaat van Beck <sup>1</sup> (1985) geeft in één zin de voor- en nadelen van MCS weer: *“when computing power is available, there can, in general, be no strong argument against the use of MCS”*

De MCS methode gaat uit van de veronderstelling dat de onzekerheid in de parameters in statistische termen (kansverdelingen en correlaties) kan worden beschreven. Uit de statistische beschrijving worden door middel van trekkingen nieuwe waarden voor de parameters gegenereerd. Deze nieuwe waarden vormen de nieuwe invoer voor steeds een nieuwe simulatie. Op deze wijze wordt vele malen een deterministische simulatie gedaan, waardoor uiteindelijk een stochastisch resultaat ontstaat. Het aantal simulaties is afhankelijk van het gewenste betrouwbaarheidsniveau van het modelresultaat. §7.4 gaat in op de betrouwbaarheidseis en het aantal daarvoor benodigde simulaties.

MCS kent verschillende varianten; de Crude MCS (CMC), de Latin Hypercube MCS (LHS) en de Quasi MCS (QMC). Deze varianten verschillen hoofdzakelijk in de wijze waarop de trekkingen plaatsvinden.

1. De CMC methode is de ‘standaard’ MCS methode. In deze methode worden de trekkingen uit de opgestelde kansverdeling compleet willekeurig gedaan. Hierdoor kan het zijn dat de trekkingen minder effectief gebeuren, doordat bijvoorbeeld veel trekkingen in deze hoek van de verdeling vallen.
2. De LHS methode is een meer effectieve methode. In deze methode vinden de trekkingen gestratificeerd plaats. Door de kansverdeling in intervallen met gelijke kansen op te splitsen zijn er minder simulaties nodig.

---

<sup>1</sup> Het citaat is afkomstig uit Van der Klis, 2003, pagina 73

3. De QMS methode is een vrij recente techniek. De methode is als het ware een uitbreiding van de LHS methode. De trekkingen worden zo gekozen dat ze gelijk verdeeld zijn over het domein van de verdeling. Deze methode is gebaseerd op het feit dat niet zozeer de willekeur van de trekkingen van belang is, maar meer dat de trekkingen uniform verdeeld zijn over het domein van de verdeling.

Uit de 3 bovenstaande varianten is gekozen om gebruik te maken van de CMC methode. Deze keuze is gemaakt met de volgende beweegredenen:

1. Van der Klis (2003) toont in haar onderzoek aan dat CMC een betrouwbare en goed toepasbare methode is voor de onzekerheidsanalyse van morfologische modellen. Ook Van Vuren (2005) maakt de keuze voor de CMC methode.
2. In de LHS methode kan de nauwkeurigheid enkel getoetst worden door de simulaties enkel malen te herhalen, wat ten koste gaat van de gewonnen efficiëntie. Met de CMC methode kan de nauwkeurigheid gemakkelijker worden getoetst.
3. In de CMC methode kan het aantal simulaties achteraf gemakkelijk vergroot worden als blijkt dat dit aantal niet voldoende is om aan de betrouwbaarheidseis te voldoen. Bij de LHS methode is dit niet het geval (Van der Klis, 2003).
4. Door een gesprek met Van der Klis (11-2-2004) bleek dat de QMC methode waarschijnlijk extra werk zou opleveren doordat deze methode nog vrij onbekend is.

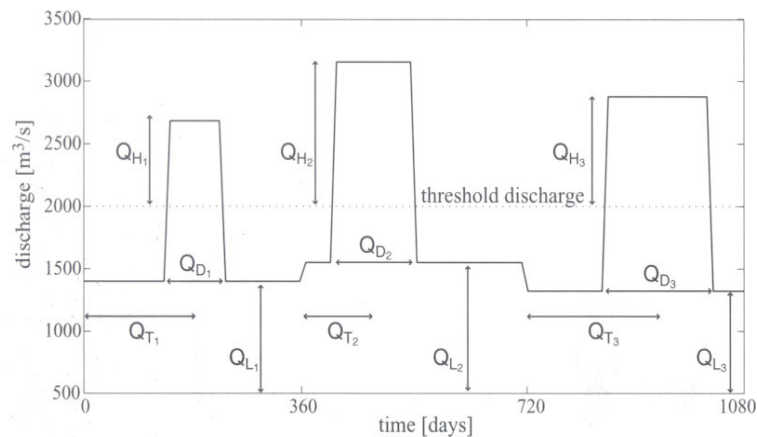
## 7.2 Statistische beschrijving afvoer

Voor de CMC methode is het noodzakelijk om de afvoer in statistische termen te beschrijven. Door middel van de statistische beschrijving worden nieuwe afvoerrekeningen gegenereerd. Voor het statistisch beschrijven van de afvoerdata zijn verschillende technieken toepasbaar. Hierbinnen zijn 2 extreme methodes te onderscheiden; een zeer gedetailleerde methode of een sterk gesimplificeerde methode. Het voordeel van de één is het nadeel van de ander. Door een zeer gedetailleerde beschrijving blijft de duur van de simulatie lang. Echter een sterk gesimplificeerde beschrijving maakt het modelresultaat zeer onnauwkeurig.

In hoofdstuk 6 zijn enkele belangrijke kenmerken van de afvoerrekeningen op het sedimenttransport naar voren gekomen. Het is zaak om de afvoerdata dusdanig te beschrijven zodat deze kenmerken ook in de nieuw gegenereerde afvoerrekeningen terugkomen. De nieuwe rekeningen moeten dezelfde kenmerken vertonen als de historische afvoer. Dit wil zeggen dat de nieuwe rekeningen een karakteristieke Maasafvoer moeten blijven. Met dit in het achterhoofd is een statistische beschrijvingsmethode geselecteerd.

### 7.2.1 Beschrijvingsmethode Van der Klis

Van der Klis (2003) focust in haar onderzoek op de afvoer in de Rijn. Zij heeft getracht een statistische beschrijving van de afvoer te maken die tot realistische morfologische verandering leidt, die weinig parameters bevat en die tot reductie van de simulatieduur leidt. Hiermee zoekt ze een beschrijvingsmethode die tussen de twee extreme beschrijvingsmethodes in ligt. Uiteindelijk heeft van der Klis de afvoer aan de hand van 4 variabelen weten te schematiseren. Deze 4 variabelen zijn een hoge ( $Q_H$ ) en een lage ( $Q_L$ ) afvoer, de tijdsduur van een hoge afvoer ( $Q_D$ ) en het moment van de hoge afvoer ( $Q_T$ ). Van der Klis heeft de afvoerdata bij Lobith (1946-2000) opgesplitst in 10-daagse afvoerrekeningen van één jaar. Een gekozen drempelwaarde maakt onderscheid tussen



*Figuur 7-1: Een 3-jarige afvoerreeks beschreven met de methode van Van der Klis*

hoge en lage afvoeren. Alle hoge en alle lage afvoeren worden geschematiseerd door een gemiddeld lage ( $Q_L$ ) en een gemiddeld hoge afvoer ( $Q_H$ ). Alle afvoeren binnen één jaar die boven de drempelwaarde uitkomen worden gecombineerd tot één periode ( $Q_D$ ) van hoog water. Het moment waarop dit hoog water plaatsvindt ( $Q_T$ ) is gelijk aan het moment waarop de hoogste afvoerpiek in dat historische jaar voorkwam. Door voor elk jaar tussen 1946 en 2000 de waarde van deze 4 variabelen te bepalen heeft Van der Klis 4 waarschijnlijkheidsverdelingen opgesteld. Vanuit deze verdeling zijn trekkingen gedaan volgens de CMC methode. Door 3 maal een trekking te doen uit alle 4 de verdelingen wordt één nieuwe 3-jarige afvoerreeks samengesteld (figuur 7-1).

### 7.2.2 Bootstrap Re-sampling

Van Vuren focust zich in haar onderzoek naast enkele andere modelinputs ook op de afvoer in de Rijnakten. Voor het genereren van nieuwe afvoerreeksen gebruikt zij de Bootstrap Re-sampling techniek. Deze techniek is gebaseerd op het doen van willekeurige trekkingen met teruglegging uit een dataset. Door het vele malen herhalen van deze trekkingen zal de verkregen dataset dezelfde statistische eigenschappen vertonen als de originele dataset. Van Vuren heeft deze techniek toegepast op de 100-jarige dataset van de afvoer bij Niederrhein. Uit deze historische dataset worden willekeurig een  $x$  aantal jaren getrokken. Deze  $x$  aantal jaren worden geordend tot nieuwe  $x$ -jarige afvoerreeksen. Als dit  $n$  aantal malen wordt herhaald vertonen de nieuwe afvoerreeksen gezamenlijk dezelfde statistische kenmerken als de gebruikte historische dataset. Daarnaast maakt Van Vuren gebruik van een “hoogwater voorspeller”. Hierdoor is het mogelijk om ook afvoerhoogtes te genereren die buiten het domein van de historische dataset vallen.

### 7.2.3 De Nearest Neighbour methode

De Nearest Neighbour methode is een beschrijvingsmethode die o.a. wordt toegepast bij het KNMI<sup>2</sup>. Van Vuren noemde in een gesprek deze techniek als mogelijk interessant om nieuwe afvoerreeksen mee te genereren. Lall & Sharma (1996) ontwikkelden deze techniek en gaven daarbij aan dat de techniek nuttig kan zijn bij de analyse van hydrologische problemen. De Nearest Neighbour methode is een techniek waarin door middel van een algoritme, een reeks van 6 opdrachten, een afvoer voor dag  $t$  wordt

<sup>2</sup> Leander & Buishand (2004), Wojcik & Buishand (2002) en Beersma et al.(2001)

bepaald. Door dit algoritme vele malen te herhalen kan een reeks voor meerdere jaren worden gegenereerd. Kortweg komt het erop neer dat voor elke nieuwe dag  $t$  in de nieuwe afvoerreeks, de afvoer wordt bepaald door  $k$  dagen te selecteren uit de historische dataset. Deze  $k$  dagen hebben als eigenschap het minimale verschil in afvoer met de afvoer op dag  $t-1$  (de voorafgaande dag in de nieuwe reeks). Eén van deze  $k$  dagen, dag  $x$ , wordt door middel van weging geselecteerd. De afvoer op dag  $t$  in de nieuwe reeks is de afvoer op dag  $x+1$  (de opeenvolgende dag van dag  $x$ ). Een uitvoerige uitleg van de methode en de toepassing van de methode op de Maasafvoer is te vinden in bijlage 10.

#### 7.2.4 Keuze beschrijvingsmethode

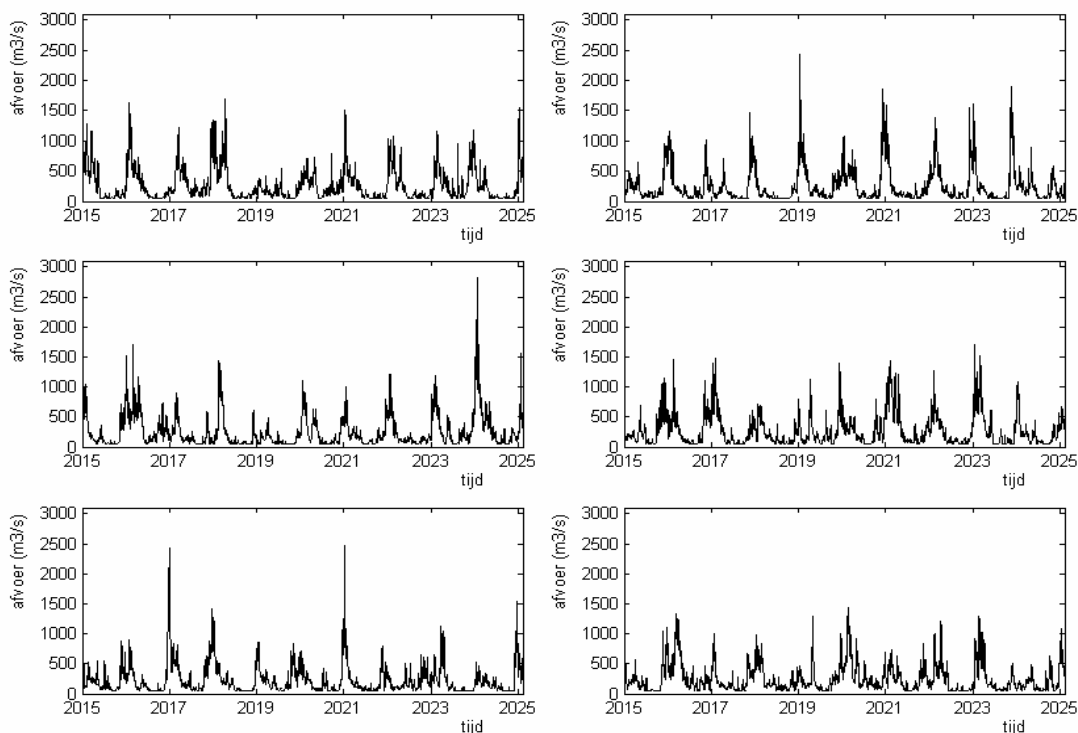
Van Vuren maakt in haar onderzoek een keuze tussen 4 methodes waaronder de methode van Van der Klis. Van Vuren komt tot de conclusie dat de methode van Van der Klis leidt tot onnauwkeurigheden in de morfologische voorspellingen van de Rijntakken. In hoofdstuk 6 is aangegeven dat het afvoerverloop, de hoogte en de duur van de afvoerpieken belangrijke bepalende factoren zijn voor het sedimenttransport. Het sterk schematiseren van de Maasafvoer leidt ertoe dat deze belangrijke kenmerken van de Maasafvoer voor het sedimenttransport deels verloren gaan. Door de gegradeerde bodem en de aanwezigheid van een afpleisteringslaag leidt een grote mate van schematisering tot een hoge mate van onnauwkeurigheid in het modelresultaat. Van der Klis maakte gebruik van de 10-daagse afvoer. De gemiddelde duur van piekafvoeren in de Maas is 3 á 4 dagen. Rekenen met de 10-daagse afvoer zou voor de Maas inhouden dat vele pieken weggemiddeld worden. Het is daarom noodzakelijk om de 1-daagse afvoer te beschouwen.

Daarnaast laat het sedimenttransport in de Grensmaas zich niet voorspellen door één gemiddeld hoge en één gemiddeld lage afvoer. Het is waarschijnlijk noodzakelijk om meerdere drempelwaardes te kiezen. Daarnaast is de volgorde en frequentie van piekafvoeren van belang voor het transport. Dit betekent dat het samen nemen van verschillende afvoerpieken tot één afvoerpiek ook tot onnauwkeurigheid leidt. Het schematiseren van de afvoer in 4 variabelen volgens de methode van Van der Klis, zal in het geval van de Grensmaas leiden tot een grote mate van onnauwkeurigheid in de morfologische voorspelling.

Een groot voordeel van de Nearest Neighbour methode ten opzichte van de Re Bootstrap methode is dat het de afhankelijke structuur en de autocorrelatie tussen de data meeneemt. De autocorrelatie is de samenhang tussen opeenvolgende dagen. Met de Re Bootstrap methode kan deze afhankelijke structuur niet worden meegenomen. Feitelijk blijft bij de Re Bootstrap methode de structuur van de afvoer van een zeker jaar in tact. Bij de Nearest Neighbour methode worden echter ook de structuur binnen een jaar gewijzigd. Het genereren van nieuwe afvoerreeksen is echter met de Re Bootstrap methode eenvoudiger dan met de Nearest Neighbour methode.

Bovengenoemde feiten in overweging genomen is gekozen om in dit onderzoek de afvoerdata met de Nearest Neighbour methode te beschrijven. Grafiek 7-1 toont zes afvoerreeksen welke met behulp van de NN-methode zijn gegenereerd. Ondanks dat alle 6 afvoerreeksen van elkaar verschillen blijven de afvoerreeksen op het eerste gezicht wel echte karakteristieke Maasafvoeren. Zo hebben de piekafvoeren een korte duur en komt ook de seizoensvariatie op het oog goed terug.





Grafiek 7-1: Zes 10-jarige afvoerreeksen welke door de Nearest Neighbour gegenereerd zijn.

### 7.3 Representativiteit Nearest Neighbour methode

In hoofdstuk 6 is aangegeven dat het afvoerverloop, de hoogte en de duur van de afvoerpieken belangrijke bepalende factoren zijn voor het sedimenttransport. In deze paragraaf wordt getoetst in hoeverre deze kenmerken ook in de nieuw gegenereerde afvoerreeksen terugkomen. Daarnaast wordt ook kort naar het gemiddelde, de standaardafwijking en de autocorrelatie gekeken. Het doel van deze toetsing is het bepalen van de representativiteit van de nieuw gegenereerde afvoerreeksen. De representativiteit wordt getoetst aan de hand van 200 nieuw gegenereerde afvoerreeksen. Deze reeksen hebben dezelfde duur, 92 jaar, als de historische reeks.

Voor de grafieken in deze paragraaf geldt het volgende:

1. De blauwe lijn of balk geeft de karakteristieken van de historische reeks 1911-2003.
2. De paarse lijn of balk geeft de karakteristieken van de gemiddelde waarde van de 200 nieuw gegenereerde afvoerreeksen (gemiddelde NN-reeksen).
3. In de grafieken zijn boxplots weergegeven. Deze boxplots geeft de extremen (hoogste en laagste waarde) en de 25% en 75% overschrijdingswaarde. Hiermee wordt de spreiding binnen de 200 nieuw gegenereerde afvoerreeksen zichtbaar.

#### 7.3.1 Representativiteit gemiddelde en standaardafwijking

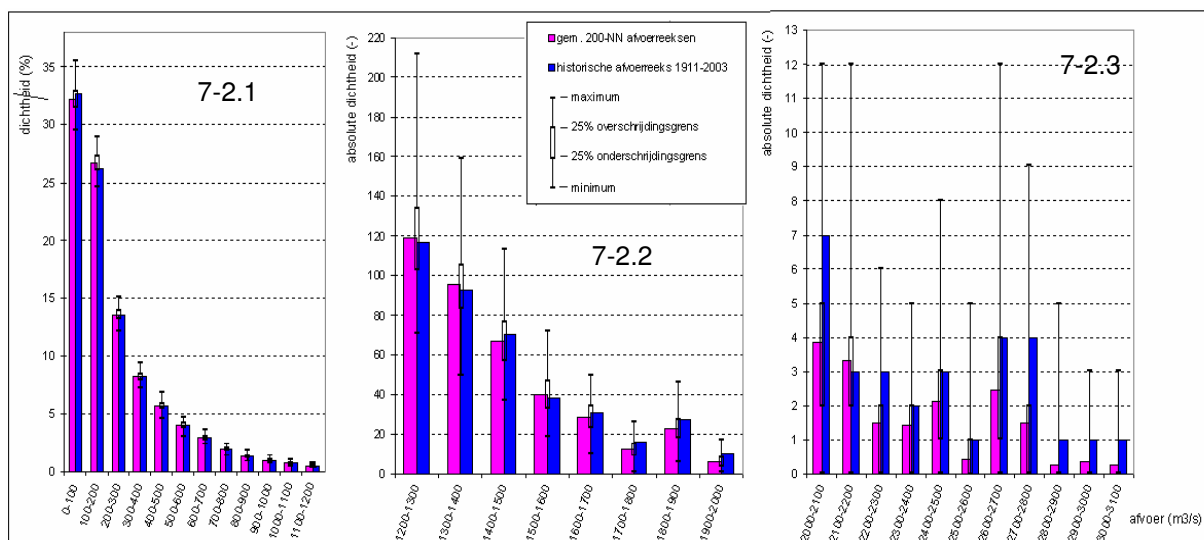
Een belangrijke eigenschap van de Maasafvoer is de seizoensvariatie, deze kan getoetst worden met de gemiddelde afvoer per maand. De spreiding van de afvoeren per maand kan getoetst worden met de standaardafwijking. Grafiek B.12 in bijlage 11 toont de representativiteit van de NN-reeksen voor deze statistische termen. De

belangrijkste conclusies over de representativiteit van het maandgemiddelde en de spreiding per maand zijn:

- 1) De gemiddelde maandgemiddeldes van de 200 NN-reeksen is gelijk aan die van de historische reeks.
- 2) De gemiddelde standaardafwijking van de 200 NN-reeksen is voor bijna alle maanden vrijwel gelijk aan die van de historische reeks. Het verschil in spreiding tussen het winter- en zomerseizoen wordt door de NN-reeksen goed weergegeven. Enkel de gemiddelde afwijking van de NN-reeksen voor de maand juli is iets lager dan in de historische reeks. Dit kan komen doordat het moving window mogelijk iets te groot is gekozen. Doordat deze 31 dagen groot is, kunnen voor een bepaalde dag in juli ook afvoeren uit juni of augustus worden gekozen. Dit zal de spreiding weer dempen.

### 7.3.2 Representativiteit dichtheidscurve

De dichtheidscurve toont hoe vaak een afvoer binnen een bepaald interval voorkomt. Op deze manier wordt de spreiding van de verschillende afvoerhoogtes getoetst. In hoofdstuk 6 is aangegeven dat de frequentie van afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s een relatief grote impact heeft op de hoeveelheid sedimenttransport. Grafiek 7-4 toont de dichtheidscurve per afvoerrange van 100 m<sup>3</sup>/s, de dichtheid wordt kleiner bij hogere afvoeren. Om de staart van de dichtheidscurve zichtbaar te maken is de dichtheidscurve in 3 grafieken gesplitst. Hierdoor is extra aandacht vereist voor de schaal van de y-as. Grafiek 7-2.1 geeft de dichtheid in procenten voor afvoeren tot 1200 m<sup>3</sup>/s. Grafiek 7-2.2 en 7-2.3 geeft de dichtheid in absoluut aantal dagen voor afvoeren van 1200 m<sup>3</sup>/s tot 2000 m<sup>3</sup>/s (grafiek 7-2.2) en 2000 m<sup>3</sup>/s tot 3100 m<sup>3</sup>/s (grafiek 7-2.3).



Grafiek 7-2: De dichtheidscurve van de historische afvoerreeks en van de NN-reeksen.

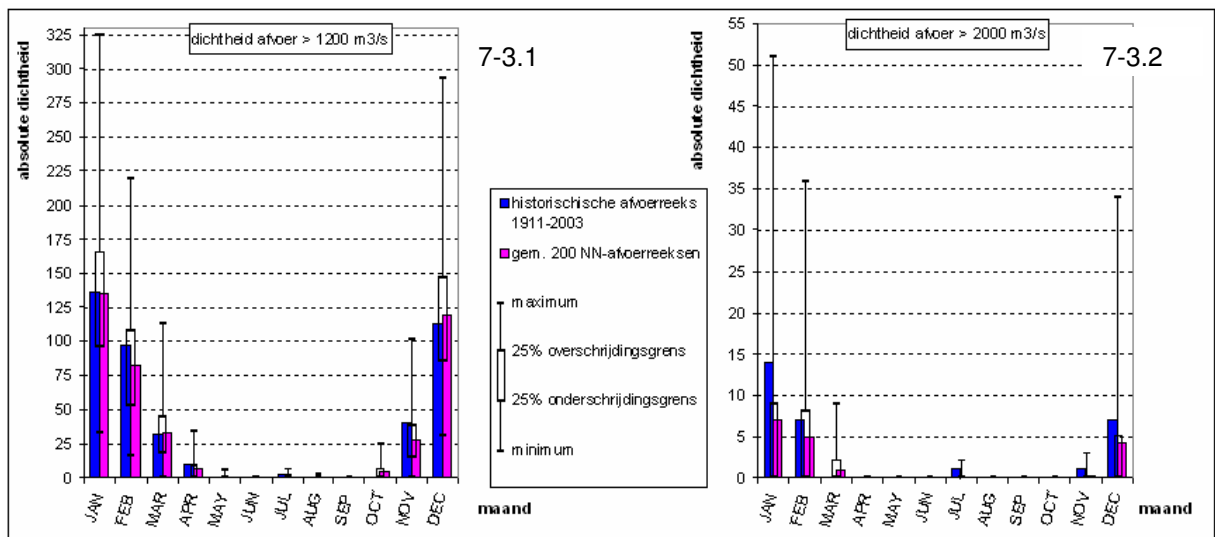
De belangrijkste conclusies over de representativiteit van de dichtheidscurve zijn:

1. De dichtheid van afvoeren tot 1700 m<sup>3</sup>/s in de NN-reeksen is zeer representatief. De boxplots tonen een goede spreiding binnen de 200 NN-reeksen.
2. Voor afvoeren boven de 1700 m<sup>3</sup>/s ligt de gemiddelde dichtheid van de NN-reeksen één tot enkele dagen lager dan in de historische reeks. Ongeveer 25% van de 200 NN-reeksen heeft een hogere dichtheid.

Ook de dichtheid per maand is getoetst. Op deze manier is getoetst of de seizoensvariatie goed wordt meegenomen in de NN-reeksen. Grafiek 7-3.1 toont de dichtheid in aantal dagen van afvoeren die groter zijn dan 1200 m<sup>3</sup>/s. Grafiek 7-3.2 toont de dichtheid in aantal dagen van afvoeren die groter zijn dan 2000 m<sup>3</sup>/s.

De belangrijkste conclusies over de representativiteit van de dichtheid per maand zijn:

1. De seizoensvariatie wordt door de NN-reeksen goed weergegeven. Grafiek 7-3 toont dat de pieken voorkomen in het winterseizoen. In het zomerseizoen komen nauwelijks pieken voor. Enkel in juli zijn enkele pieken zichtbaar
2. De gemiddelde dichtheid van de NN-reeksen voor afvoeren boven de 2000 m<sup>3</sup>/s ligt enkele dagen lager dan die van de historische reeks. De dichtheid van afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s wordt goed weergegeven door de NN-reeksen, vooral in de maand december, januari en maart komt dit zeer goed overeen met de historische data.



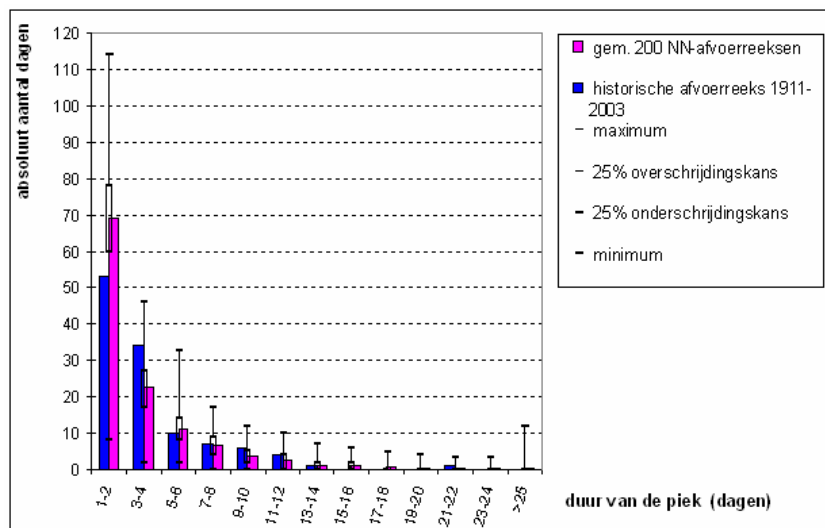
Grafiek 7-3: Dichtheidscurve van het absolute aantal afvoeren per maand van de historische reeks en van de 200 NN-reeksen.

### 7.3.3 Representativiteit duur van afvoergolf

Het is zaak dat de NN-reeksen een goede variatie in duur van de pieken laat zien en dat deze variatie enigszins overeenkomt met die in de historische reeks. In zowel de historische reeks als in alle 200 NN-reeksen is van elke afvoergolf (afvoeren groter dan 1200 m<sup>3</sup>/s) de duur bepaald. Oftewel er is geteld hoe lang een periode van afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s aanhoudt. Opvallend hierin is dat het aantal voorspelde afvoergolven nagenoeg gelijk is. In de historische data komen 116 afvoergolven voor in 92 jaar, in de NN-reeksen komt een gemiddeld aantal van 119 afvoergolven voor in 92 jaar.

In grafiek 7-4 is een histogram gegeven van het aantal pieken met een bepaalde duur. De grafiek toont dat in de NN-reeksen het aantal pieken met een duur van 1 à 2 dagen gemiddeld veel vaker voorkomt dan in de historische reeks. In de historische reeks komen echter pieken van 3 à 4 dagen weer vaker voor. Het aantal pieken met een duur tussen 5 tot 10 dagen komt in de historische reeks nagenoeg even vaak voor als in het gemiddelde van de NN-reeksen. Verder valt op dat in de NN-reeksen pieken voorkomen

met een langere duur dan ooit zijn waargenomen in de historische reeks. De boxplots tonen dat er een goede spreiding van de duur van de pieken in de NN-reeksen aanwezig is.



Grafiek 7-4: Dichtheidscurve voor de duur van de piekafvoeren van de historische afvoerreeks en de 200 NN-reeksen.

### 7.3.4 Representativiteit autocorrelatie

De autocorrelatie is een waarde die de mate van afhankelijkheid tussen opeenvolgende data uitdrukt. Uit publicaties van het KNMI<sup>3</sup> over toepassing en toetsing van de Nearest Neighbour methode blijkt dat voor toetsing van de representativiteit vooral de lag 1 en lag 2 autocorrelatie relevant zijn. In de publicaties wordt gesignaleerd dat over het algemeen vanaf de lag 3 autocorrelatie grotere verschillen tussen de historische reeks en de nieuwe reeks worden waargenomen. De lag k autocorrelatie geeft de samenhang weer tussen dagen die k-1 dagen uit elkaar liggen. Lag 2 geeft dus de correlatie tussen dag 1 en 3.

Grafiek B.13 in bijlage 11 toont de representativiteit van de NN-reeksen voor de autocorrelatie. Het berekenen van de autocorrelatie is nogal tijdsintensief. De representativiteit is daarom getoetst op een representatieve steekproef van 15 NN-reeksen. Tabel 7-1 toont het relatieve verschil tussen de NN-reeksen en de historische reeks. De hiervoor gebruikte vergelijkingen zijn weergegeven in bijlage 11.

	$\Delta\mu$ [%]	$\Delta s$ [%]	$\Delta r_1$ [%]	$\Delta r_2$ [%]	$\Delta r_3$ [%]
<b>jaar</b>	-1.3	-3.4	-0.23	2.39	5.36
<b>zomer</b>	-0.3	-4.0	-0.4	1.86	3.16
<b>winter</b>	-2.2	-3.2	-0.35	3.38	8.03

Tabel 7-1: Relatieve verschillen tussen de NN-reeksen en de historische reeks

<sup>3</sup> Leander & Buishand (2004), Wojcik & Buishand (2002) en Beersma et al.(2001)

De belangrijkste conclusies hieruit zijn:

1. De gemiddelde waarde van de lag 1 en lag 2 autocorrelatie van de NN-reeksen vertoont een relatief verschil van minder dan 5% met de historische reeks. Dit wil zeggen dat de samenhang tussen dag 1 en 2 en tussen dag 1 en 3 in de NN-reeksen nauwelijks verschil vertoont met die in de historische reeks.
2. De gemiddelde waarde van de lag 3 autocorrelatie van de NN-reeksen vertoont een relatief verschil dat groter is dan 5% met de historische reeks. Dit wil zeggen dat de samenhang tussen dag 1 en 4 in de historische reeks niet meer in dezelfde mate aanwezig is in de NN-reeksen. Vanaf de lag 3 correlatie wordt het verschil tussen de NN-reeksen en de historische reeks groter.

### 7.3.5 Conclusie representativiteit

In de KNMI publicaties wordt de representativiteit van de NN-reeksen beoordeeld op basis van het relatieve verschil tussen de NN-reeksen en de historische reeks. In deze publicaties wordt de representativiteit veelal getoetst op basis van het gemiddelde, de standaardafwijking en de autocorrelatie. Als het relatieve verschil kleiner is dan 5% worden de NN-reeksen als representatief beoordeeld. In dit onderzoek is de representativiteit ook getoetst voor de dichtheid van de pieken, de dichtheid van de pieken per maand en de duur van de pieken.

Tabel 7-1 geeft de relatieve verschillen tussen de NN-reeksen en de historische reeks voor het gemiddelde ( $\Delta\mu$ ), voor de standaardafwijking ( $\Delta S$ ) en de autocorrelatie ( $\Delta r_{1,2,3}$ ). De vergelijkingen die voor deze berekening zijn gebruikt zijn weergegeven in bijlage 11. Uit tabel 7-1 blijkt dat het relatieve verschil in deze drie kenmerken kleiner is dan 5%. De dichtheidscurve voor afvoeren tot 1700 m<sup>3</sup>/s en de dichtheidscurve per maand voor afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s laten slechts kleine verschillen tussen de NN-reeksen en de historische reeks zien. De dichtheidscurve voor afvoeren boven de 1700 m<sup>3</sup>/s toont dat in de NN-reeksen gemiddeld minder pieken boven de 1700 m<sup>3</sup>/s voorkomen. Dit verschil is echter niet verontrustend groot. Over het algemeen geeft ongeveer 25% van de NN-reeksen een groter aantal pieken dan in de historische reeks voorkomen. De duur van de afvoergolven wordt door de NN-reeksen goed weergegeven. De NN-reeksen blijken daarnaast een goede spreiding te geven in de duur van de pieken.

Aangezien het verschil van de statistische kenmerken tussen de NN-reeksen en de historische reeks over het algemeen relatief klein is, wordt de Nearest Neighbour methode als een representatieve methode beschouwd.

## 7.4 Aantal Monte Carlo simulaties

In §7.1 is geconcludeerd dat de onzekerheidsanalyse met behulp van de Crude Monte Carlo methode wordt uitgevoerd. In §7.2 is de Nearest Neighbour methode gekozen om nieuwe afvoerreeksen mee te genereren. Totaal zijn er met deze methode 200 reeksen van 92 jaar gegenereerd. In deze paragraaf wordt bepaald hoeveel simulaties er uiteindelijk nodig zijn om aan de betrouwbaarheidsniveau te voldoen.

### 7.4.1 Betrouwbaarheidseis

Het aantal simulaties is afhankelijk van het gewenste betrouwbaarheidsniveau. In dit onderzoek is ten doel gesteld om het 90% betrouwbaarheidsinterval van de

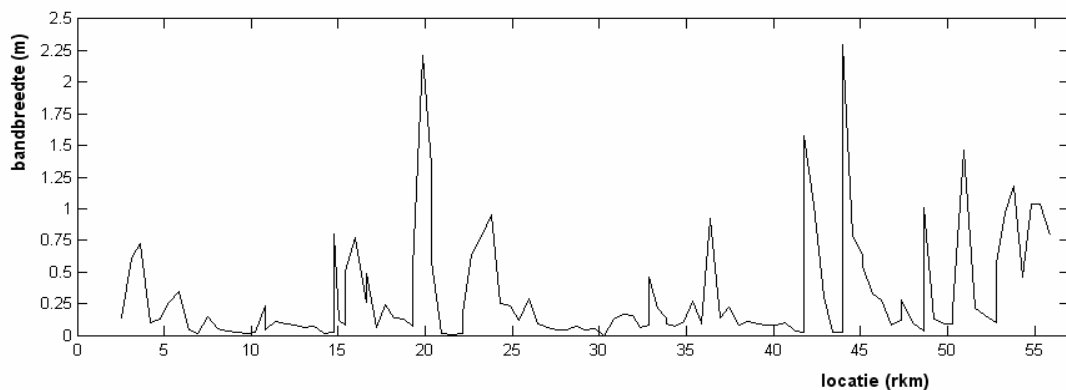
bodemverandering op te stellen. Als eis aan dit betrouwbaarheidsinterval wordt gesteld dat het 95% zeker moet zijn dat de 10% overschrijdingskans van de bodemverandering na 10 jaar een nauwkeurigheid heeft van plus of min 5 cm. Deze eis moet gelden voor elke locatie in de Grensmaas (rkm 2-56).

#### 7.4.2 Aantal benodigde simulaties

Op basis van deze betrouwbaarheidseis kan een eerste indicatie worden gegeven van het verwachte aantal simulaties dat nodig is om aan deze eis te voldoen. De simulaties zijn uitgevoerd met de modelschematisatie van het voorkeursalternatief. Er is gekozen om een simulatieduur van 10 jaar aan te houden. Voor deze keuze is voornamelijk de rekentijd van het model doorslaggevend geweest. Een toelichting op deze keuze is samen met de overige instellingen van de onzekerheidsanalyse te vinden in bijlage 7. De benodigde 10-jarige afvoerreeksen voor de simulaties zijn uit de 200 92-jarige afvoerreeksen gehaald.

De verwachting is dat er ongeveer 300 simulaties nodig zijn om aan de betrouwbaarheidseis te voldoen. Deze schatting is gebaseerd op de bodemverandering ter plaatse van rkm 19,3. In bijlage 12 is de berekening weergegeven welke voor de bepaling van deze verwachting is gebruikt.

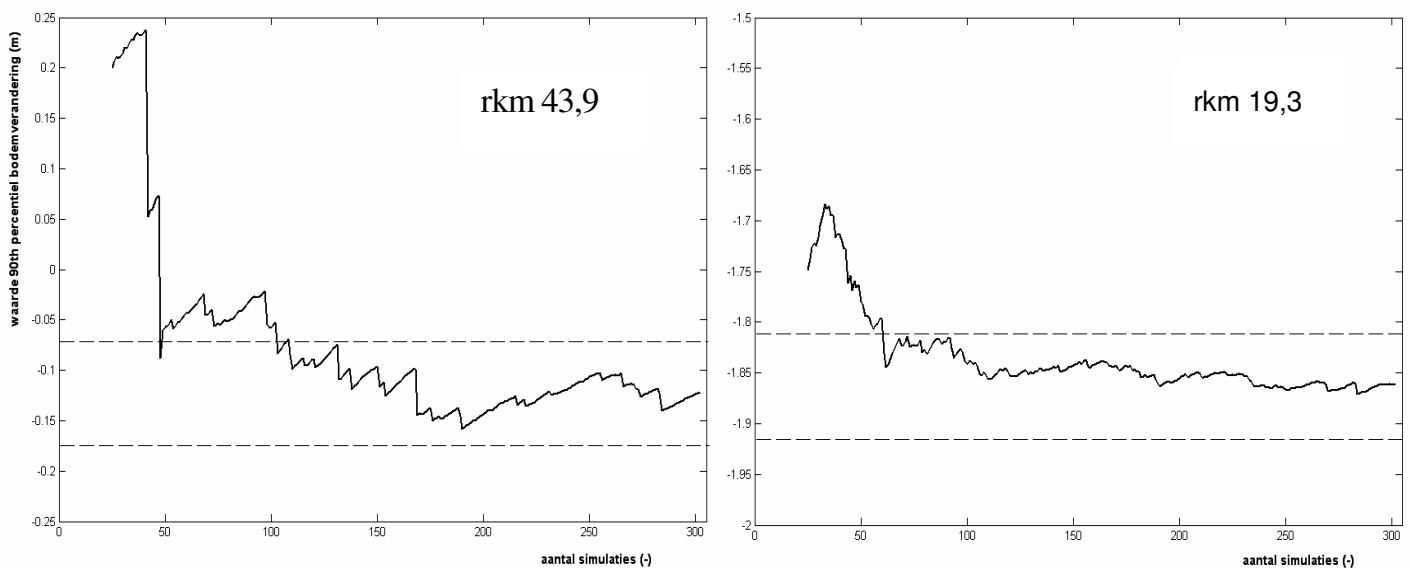
De feitelijke check of er voldoende simulaties zijn gemaakt wordt gedaan door de 10% overschrijdingswaarde van de bodemverandering op een bepaalde locatie uit te zetten tegen het aantal uitgevoerde simulaties. Als de waarde hiervan convergeert of binnen een interval van 10 cm blijft, is aan de betrouwbaarheidseis voldaan.



Grafiek 7-5: De bandbreedte na 300 simulaties voor het gehele Grensmaatraject (rkm 2-56).

Op basis van grafiek 7-5 is bepaald voor welke locatie waarschijnlijk het grootste aantal simulaties nodig is om de 10% overschrijdingswaarde (het 90<sup>e</sup> percentiel) te laten convergeren. In de grafiek is van elk rekenpunt tussen rkm 2 tot 56 het verschil tussen de maximaal berekende bodemverandering en de minimale bodemverandering weergegeven. Dit verschil is de bandbreedte genoemd. Op locaties waar de bandbreedte klein is zal het 90<sup>e</sup> percentiel sneller geconvergeerd zijn dan op locaties waar de bandbreedte groot is. In grafiek 7-5 is te zien dat de bandbreedte na 300 simulaties op rkm 19.3 en op rkm 43.9 het grootst is, deze locaties zijn maatgevend voor het aantal benodigde simulaties.

In grafiek 7-6 is voor deze twee locaties de waarde van het 90e percentiel uitgezet tegen het aantal simulaties. Na 100 tot 150 simulaties blijkt dat het 90th percentiel op rkm 19.3 nagenoeg stabiel wordt. Echter op rkm 43.9 blijkt dit nog niet het geval te zijn. Het model lijkt op deze locatie instabiliteit te vertonen, in hoofdstuk 8 en bijlage 5.5 wordt op deze modelinstabiliteit ingegaan. Ook na 300 simulaties kan nog niet worden gesproken van een stabiele situatie, al voldoet de waarde van het 90e percentiel wel aan de nauwkeurigheidseis. Er wordt dan ook geconcludeerd dat het maken van 300 simulaties voldoende is om het 90% betrouwbaarheidsinterval te geven.



Grafiek 7-6: De waarde van de bodemverandering van het 90% percentiel uitgezet tegen het aantal uitgevoerde simulaties op rkm 43.9 en 19.3

## 7.5 Conclusies

In §7.1 is gekozen om de stochastische onzekerheidsanalyse met behulp van de Crude Monte Carlo methode te doen. Deze methode kan goed omgaan met de complexe karakteristieken van morfologische modellen. Een nadeel van de methode is de benodigde simulatieduur.

In §7.2 is gekozen om de afvoerreeksen met behulp van de Nearest Neighbour methode te beschrijven. Deze Nearest Neighbour methode kan de afhankelijke structuur en de autocorrelatie in een datareeks meenemen. Met de Nearest Neighbor methode zijn 200 afvoerreeksen van 92 jaar gegenereerd.

In §7.3 is aangetoond dat de methode inderdaad een nuttige methode is om nieuwe afvoerreeksen mee te genereren. De statistische kenmerken en kenmerken zoals de duur van de afvoergolf, seizoensvariatie en de dichtheid van piekafvoeren worden door de Nearest Neighbour methode op een representatieve wijze beschreven.

In §7.4 blijkt dat het maken van 300 simulaties voldoende is om de onzekerheid in het modelresultaat ten gevolge van de afvoervariatie vast te stellen. De benodigde 300 10-jarige afvoerreeksen zijn uit de 200 92-jarige afvoerreeksen gehaald. Door 300 simulaties te maken kan het 90% betrouwbaarheidsinterval van de bodemverandering na 10 jaar worden gegeven. Dit betrouwbaarheidsinterval voldoet dan op elke locatie tussen rkm 2 en 56 aan de nauwkeurigheidseis.





## 8 RESULTATEN ONZEKERHEIDSANALYSE

In hoofdstuk 7 is aangegeven dat er 300 simulaties nodig zijn om met voldoende nauwkeurigheid het 90% betrouwbaarheidsinterval van de bodemverandering 10 jaar na uitvoering van het VKA te kunnen geven. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze 300 simulaties weergegeven. Deze resultaten moeten inzicht geven in de onzekerheid die heerst in de voorspelling van de bodemverandering in de Grensmaas ten gevolge van de afvoervariatie

In §8.1 worden de resultaten van de 300 Monte Carlo simulaties weergegeven. In deze paragraaf wordt is uit de modelresultaten een 90% betrouwbaarheidsinterval opgesteld van de verwachte bodemontwikkeling na 10 jaar. In §8.2 is dit interval vergeleken met de scenariobenadering uit het MER 2003. Hierdoor is een antwoord gevonden op de vraag hoe de stochastische benadering zich verhoudt tot de scenariobenadering. In §8.3 wordt getracht om op basis van de bodemontwikkeling in de eerste 10 jaar een voorspelling te doen voor de verwachte bodemontwikkeling na een periode langer dan 10 jaar. In §8.4 wordt getracht de karakteristieken te bepalen van de afvoerreeks die het beste de verwachte bodemverandering na 10 jaar benadert. In §8.5 zijn de belangrijkste conclusies uit dit hoofdstuk op een rij gezet.

### 8.1 Resultaten Monte Carlo simulaties

#### 8.1.1 Inleiding

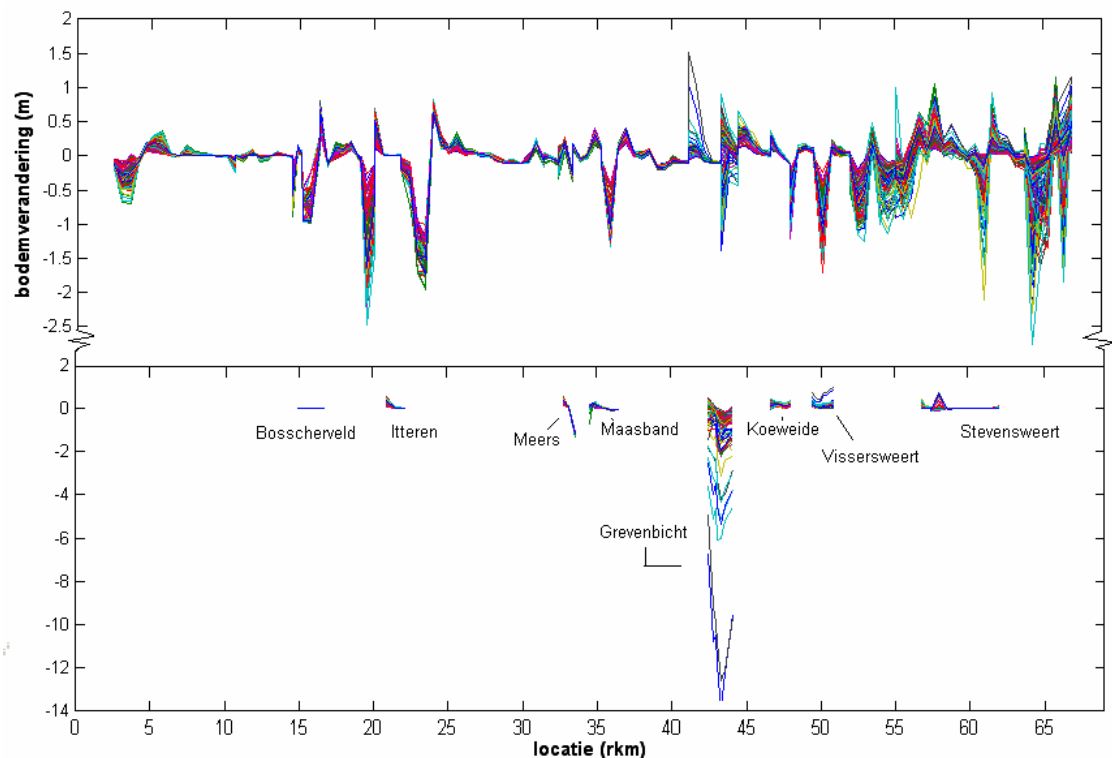
Totaal zijn er 300 Monte Carlo simulaties gemaakt voor het voorkeursalternatief. Elke simulatie in SOBEK-graded kenmerkte zich door een andere 10-jarige afvoerreeks. Als gevolg van deze variatie van de afvoer is elke simulatie uniek en leidt tot een ander modelresultaat. In grafiek 8-1 is weergegeven dat ten gevolge van deze afvoervariatie er een band ontstaat van voorspelde bodemveranderingen. Elk lijntje representeert een voorspelde bodemverandering na 10 jaar door één van de 300 simulaties. Doordat geen van de gegenereerde afvoerreeksen hetzelfde is, is ook geen van de voorspelde bodemveranderingen na 10 jaar hetzelfde. In bijlage 13 is de berekende bodemligging na 10 jaar weergegeven van elk van de 300 simulaties.

In grafiek 8-1 is goed te zien dat de band van de berekende bodemveranderingen verschillend is per locatie. Dit geeft aan dat op de ene locatie meer onzekerheid heerst ten gevolge van de afvoervariatie dan op andere locaties.

In grafiek 8-1 is het gehele Grensmaatraject weergegeven zoals dat in het Grensmaasmodel is ingevoerd. In de gevoeligheidsanalyse is echter al genoemd dat het traject benedenstrooms van Roosteren (rkm 56 tot 68) mogelijk niet representatief is aangezien dit laatste traject niet geverifieerd kon worden (bijlage 5.2). Dit laatste gedeelte van het traject wordt in het vervolg van dit hoofdstuk buiten beschouwing gelaten. Er wordt enkel gekeken naar het traject tussen Eijsden (rkm 2) en Roosteren (rkm 56) en de daar tussenliggende nevengeulen.

Een ander opvallend feit dat aandacht verdient zijn de berekende bodemveranderingen rond km 42-45. Door enkele van de 300 simulaties wordt een zeer extreme bodemdaling in de nevengeul bij Grevenbicht voorspeld en een daarmee samenhangende sedimentatiepiek in de hoofdgeul bij Grevenbicht en de Koeweide. Dit resultaat wordt veroorzaakt door 'modelinstabiliteit'. Het gaat hierbij niet om een echte instabiliteit in het model maar waarschijnlijk is het een gevolg van de gestelde randvoorwaarde op de

splitsingspunten. In het model wordt verondersteld dat bij de splitsingspunten het transport zich evenredig met de afvoer verdeeld (zie ook bijlage 5.5). In werkelijkheid zal door 3D effecten deze verdeling niet evenredig zijn. Het is daarom mogelijk beter een exponentiële relatie te veronderstellen tussen de verdeling van afvoer en transport bij het splitsingspunt. Het is helaas niet gelukt om dit in het model te veranderen.

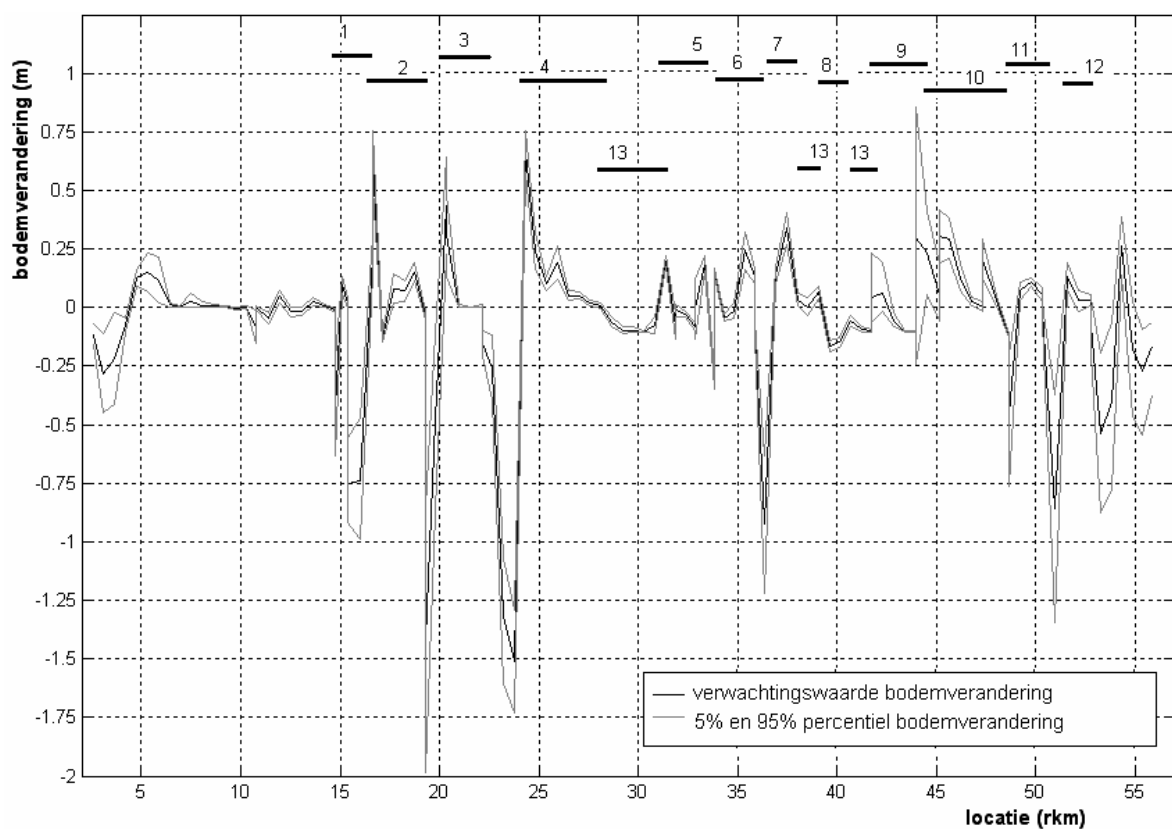


Grafiek 8-1: De voorspelde bodemverandering 10 jaar na uitvoering van het VKA door elk van de 300 simulaties voor de hoofdgeul (boven) en de nevengeulen (onder).

### 8.1.2 Voorspelling bodemverandering na 10 jaar

Met de resultaten van de 300 Monte Carlo simulaties kan het 90% betrouwbaarheidsinterval van de bodemverandering na 10 jaar worden opgesteld. Dit is gedaan door per rekenpunt van de 300 voorspelde bodemveranderingen na 10 jaar een normale verdeling op te stellen. Het blijkt dat de berekende bodemveranderingen per rekenpunt normaal verdeeld zijn. Om modelinstabiliteit bij de Koeweide en Grevenbicht enigszins op te heffen is besloten deze normale verdeling te gebruiken. Uit deze normale verdeling is per rekenpunt de 5%, 50% en 95% betrouwbaarheidswaarde bepaald. Met deze betrouwbaarheidswaarden is het 90% betrouwbaarheidsinterval voor het gehele Grensmaastraject opgesteld. Dit interval geeft aan dat de kans 90% is dat de toekomstige bodemverandering na 10 jaar binnen dit interval valt. Hierbij moet wel worden aangetekend dat in dit betrouwbaarheidsinterval enkel de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie is meegenomen. De onzekerheid ten gevolge van de korrelgrootte of de bodemruwheid is niet meegenomen in dit betrouwbaarheidsinterval. Daarnaast zijn alle resultaten vastgesteld op basis van modelresultaten. In werkelijkheid zal het betrouwbaarheidsinterval groter zijn ten gevolge van de onzekerheden in andere modelinputs, modelparameters of op andere locaties (context of structuur) in het model.

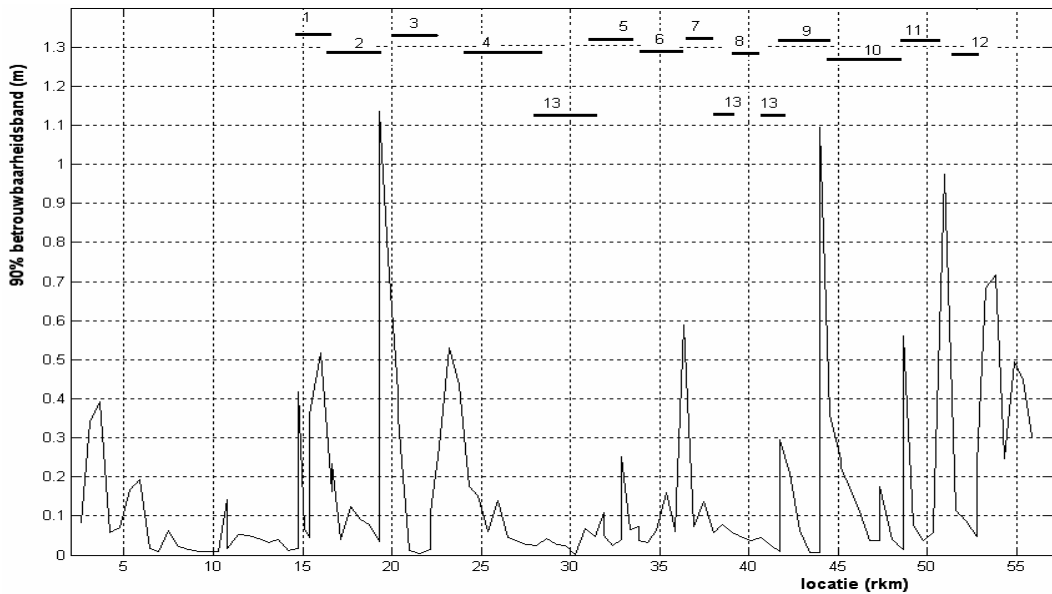
In grafiek 8-2 is het betrouwbaarheidsinterval voor de bodemverandering van de Grensmaas na 10 jaar weergegeven. In de grafiek is het 5%, 50% en 95% percentiel weergegeven. Het 50% percentiel geeft de verwachte bodemverandering na 10 jaar weer. Het 5% en 95% percentiel geven een bodemverandering na 10 jaar aan met resp. een onder- en overschrijdingskans van 5%. Grafiek 8-3 geeft de grootte van het 90% betrouwbaarheidsinterval weer. Voor elke locatie is het absolute verschil tussen de waarde van het 95% percentiel en die van het 5% percentiel genomen. Door deze grafiek wordt duidelijk op welke locatie veel onzekerheid in de voorspelde bodemverandering heerst (brede betrouwbaarheidsband) of juist weinig (smalle betrouwbaarheidsband). In beide grafieken zijn d.m.v balkjes de locaties van de ingrepen verwerkt.



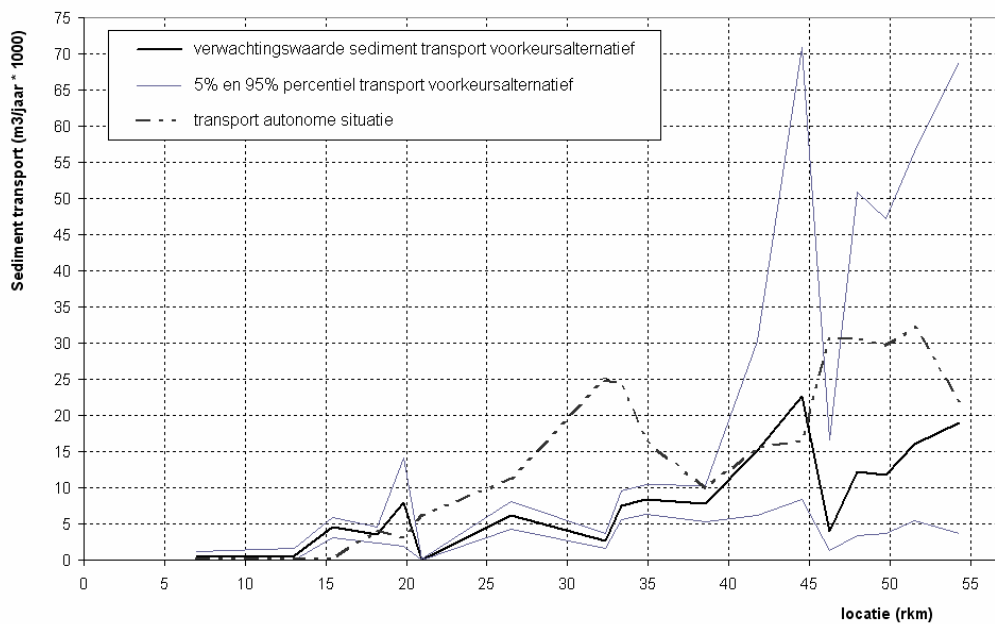
Grafiek 8-2: Het 90% betrouwbaarheidsinterval van de bodemverandering in de Grensmaas 10 jaar na uitvoering VKA. De Grafiek is opgesteld op basis van 300 simulaties in SOBEK-graded. In de simulaties is de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie meegenomen.

nummer	ingreep
1	weerdverlaging bij Bosscherveld
2	stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Borgharen
3	stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Ilteren
4	stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Aan de Maas
5	nevengeul en weerdverlaging bij Meers
6	nevengeul en weerdverlaging bij Maasband
7	stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Urmond
8	weerdverlaging bij Nattenhoven
9	nevengeul bij Grevenbicht
10	stroomgeulverbreding en weerdverlaging in de Koeweide
11	stroomgeulverbreding, nevengeul en weerdverlaging bij Vissersweert
12	stroomgeulverbreding en natuurontwikkeling bij Roosteren
13	bodembescherming

Tabel 8-1: Overzicht van de 12 geplande ingrepen in het voorkeursalternatief.



Grafiek 8-3: De grote van de heersende onzekerheid (90% betrouwbaarheidsband) ten gevolge van de afvoervariatie in de gemodelleerde bodemverandering



Grafiek 8-4: Verwachte gemiddelde jaarlijkse transport in de Grensmaas (rkm 2-56) na uitvoering VKA en voor de autonome situatie. Het transport is bepaald op basis van 300 simulaties in Sobek-graded.

Grafiek 8-4 toont het gemiddelde sedimenttransport per jaar voor zowel het VKA als voor de autonome situatie. Per riviertak is het gemiddelde jaarlijkse transport bepaald over een periode van 10 jaar. Doordat het gemiddeld per tak is genomen is de in werkelijkheid aanwezige gepiektheid weggevallen. Vooral het transport in het VKA is vrij gepiekt door de aanwezigheid van de verruimingslocaties. Het transport na uitvoering van het VKA is berekend op basis van de 300 modelresultaten. Het transport voor de autonome situatie is bepaald op basis van de resultaten uit de simulatie met het gemiddelde afvoerscenario.

In bijlage 14 is de verandering van de bodemsamenstelling na 10 jaar weergegeven. Weergegeven is hoe de verwachtingswaarde en het 5% en 95% percentiel van zowel de D10, D50 en D90 volgens het model na 10 jaar veranderd zijn. De verandering van de bodemsamenstelling geeft belangrijke achtergrondinformatie over het sedimenttransport en de bodemverandering. Een vergroving van de samenstelling van de bodem (bv. een grotere D90) duidt op een toename in het transport. Een verfijning duidt op een afname van het transport.

Uit de modelresultaten en uit de grafieken 8-2 tot 8-4 het volgende geconcludeerd: Ten eerste is de integrale bodemverandering over het Grensmaatraject (rkm 2-56) beschouwd. De gemiddelde bodemveranderingen van de drie beschouwde percentielen zijn weergegeven in tabel 8-2. In grafiek 8-2 is echter te zien dat de bodemverandering niet constant is over het traject, maar dat er erosie en sedimentatiepieken zijn. Hier wordt in het tweede punt (pagina 49) op ingegaan.

Verwachtingswaarde	gemiddelde bodemverandering rkm 2-56 na 10 jaar	gemiddelde bodemverandering rkm 2-56 per jaar	Gemiddelde erosie na 10 jaar	Gemiddelde sedimentatie na 10 jaar
	[m]	[mm]	[m]	[m]
5% percentiel	-0.011	1.1	-0.16 (25 km)	0.12 (28 km)
50% percentiel	-0.054	5.4	-0.26 (24 km)	0.12 (29 km)
95% percentiel	-0.099	9.9	-0.31 (30 km)	0.18 (23 km)
grote betrouwbaarheidsband (relatief)			8,8 cm	
grote betrouwbaarheidsband (absoluut)			16,4 cm	

*Tabel 8-2: Modelresultaten gemiddelde bodemverandering in de Grensmaas (rkm 2-56) 10 jaar na uitvoering van het VKA.*

Volgens het model is de verwachte gemiddelde bodemverandering in de Grensmaas (rkm 2-56) 10 jaar na uitvoering van het VKA een bodemdaling van 5,4 cm. Met 95% zekerheid (enkel onzekerheid afvoer beschouwd) zal de bodemdaling minder dan 10 cm zijn en groter dan 1 cm. Volgens het model is op 29 km van het traject een gemiddelde sedimentatie van 12 cm te verwachten. Op 24 km van het traject is een gemiddelde erosie van 26 cm te verwachten. Het 95% percentiel (natte afvoerreksen) geeft zowel een hogere erosie als een hogere sedimentatie aan vergeleken met het 5% percentiel (droge afvoerreksen). Dit betekent dat lokaal geërodeerd sediment elders binnen het traject weer neerslaat. Groter erosiepieken leiden ook tot grote sedimentatiepieken iets verder benedenstrooms. Het sediment blijft hierdoor grotendeels in de Grensmaas.

De bodemdaling in de Grensmaas tussen 1978 en 1995 was gemiddeld 16 mm/jaar (Meijer, 2003, p 42). Voor de autonome situatie is de verwachting dat deze bodemdaling met dezelfde snelheid blijft doorgaan. In 10 jaar tijd zou de bodemdaling dus zo'n 16 cm zijn. Dit is duidelijk meer dan de verwachte bodemverandering 10 jaar na uitvoering van het VKA. Grafiek 8-4 onderstreept dit verschil in bodemdaling. De grafiek toont dat het verwachte sedimenttransport na uitvoering van het voorkeursalternatief over bijna het gehele traject lager ligt dan het transport in de autonome situatie. Hierbij moet de kanttekening geplaatst worden dat voor de autonome situatie de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie niet is beschouwd.

Ten tweede is de lokale bodemverandering beschouwd. De gemiddelde bodemdaling neemt door uitvoering van het VKA af t.o.v de autonome situatie. Ter plaatse van de verruimingslocaties nemen de verwachte bodemveranderingen na 10 jaar echter toe. Over het algemeen is in grafiek 8-2 bovenstrooms van de verruimingslocaties een erosiekuil waar te nemen. Aan het begin van de verruimingslocaties is over het algemeen aanzanding waarneembaar. In §3.3.2 is dit proces nader beschreven. De grootste verwachte erosie vindt plaats bovenstrooms van de verruimingen bij Borgharen (-0,75m), Itteren (-1,25m), Aan de Maas (-1,5m), Urmond (-1,0m), Vissersweert (-0,5m) en Roosteren (-0,8m). De grootste verwachte sedimentatie vindt plaats aan het begin van de verruimingslocaties bij Borgharen (+0,5m), Itteren (+0,4m) en Aan de Maas (+0,65m).

Vanaf Roosteren (rkm 50) neemt de bodemverandering toe. Volgens het model is de verwachte bodemverandering van rkm 2 tot 50 een gemiddelde bodemdaling van 4 cm na 10 jaar. Op traject rkm 50 tot 56 is de verwachte bodemdaling 15 cm na 10 jaar. De bodemverandering op dit deel van het traject neemt na uitvoering van het VKA toe t.o.v. de autonome situatie. Doordat er minder sediment vanaf bovenstrooms binnenkomt bij Roosteren wordt de capaciteit van het transport vanaf Roosteren grotendeels gevoed door bodemmateriaal. Dit laatste leidt er toe dat er vanaf Roosteren bodemerosie plaatsvindt. In grafiek 8-4 is te zien dat in het VKA vanaf rkm 50 het transport weer toeneemt. De piek in het transport bij rkm 44 voor het voorkeursalternatief wordt gegenereerd door de erosie bij Grevenbicht. Het dal bij rkm 46 komt door de aanzanding bij de Koeweide.

Ten derde is gekeken naar de mate van onzekerheid in de verwachte verandering van de bodem ten gevolge van de afvoervariatie (grafiek 8-3). De gemiddelde absolute mate van onzekerheid over het gehele Grensmaatraject (rkm 2-56) is 16,4 cm. De normale gemiddelde maat is 8,8 cm. Dit verschil komt doordat in de absolute maat er geen verschil is tussen erosie of sedimentatie. In de relatieve gemiddelde maat wordt de onzekerheid in de erosiediepte gecompenseerd door de aanwezige onzekerheid in de sedimentatiehoogte. In de gemiddelde absolute onzekerheidsmaat is dit niet het geval. Op ongeveer 75% van het traject is de onzekerheid kleiner dan 20 cm (waarvan 5% groter dan 20 cm sedimentatie en een dikke 20% groter dan 20 cm erosie). In minder dan 10% van het traject heerst een grotere onzekerheid dan 50 cm. Deze grote maten van onzekerheid zijn enkel aanwezig op locaties waar erosie plaatsvindt.

De mate van onzekerheid is het grootst ter plaatse van de verruimingslocaties. Bij de ingrepen bij Itteren, de Koeweide en Roosteren ligt de onzekerheid rond de één meter. Tussen de verruimingslocaties in is de onzekerheid t.g.v de afvoervariatie vrij klein. In het benedenstroomse gedeelte van het traject is de onzekerheid groter dan in het bovenstroomse gedeelte. Bovenstrooms van rkm 43 is de absolute onzekerheid t.g.v de afvoervariatie gemiddeld 13 cm. Benedenstrooms van rkm 43 is de absolute onzekerheid gemiddeld 26 cm.

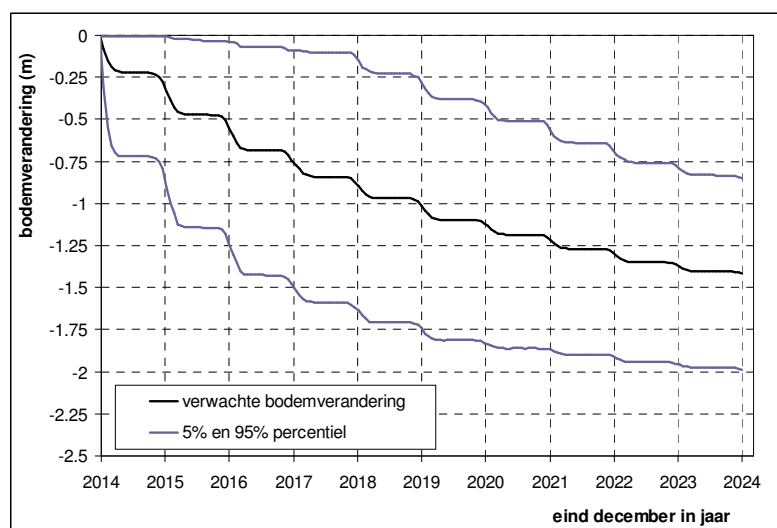
Samengevat wordt er geconcludeerd dat volgens het model de verwachte gemiddelde bodemverandering over het traject zo'n 5 cm is na uitvoering van het VKA. Met 90% zekerheid (enkel onzekerheid t.g.v. afvoervariatie verondersteld) kan gesteld worden dat de gemiddelde bodemverandering over het traject tussen de 1 en 10 cm zal liggen na 10 jaar. Hiermee is de verwachte bodemdaling kleiner dan de verwachte bodemdaling in de autonome situatie. Echter ter plaatse van de verruimingslocaties en vanaf rkm 50 is de verwachte bodemverandering groter. Volgens het model kan er bovenstrooms van

de verruimingen lokaal 1 tot 1,5 m erosie optreden na 10 jaar. Aan het begin van de verruimingen kan lokaal 0,5 m aanzanding optreden na 10 jaar.

De absolute onzekerheid in de voorspelde bodemverandering na 10 jaar ten gevolge van de afvoervariatie is gemiddeld 16,4 cm. Ter plaatse van de verruimingslocaties en vanaf rkm 43 loopt deze onzekerheid echter plaatselijk op tot ongeveer 1 meter.

### 8.1.3 Voorspelling bodemverandering gedurende de 10 jaar

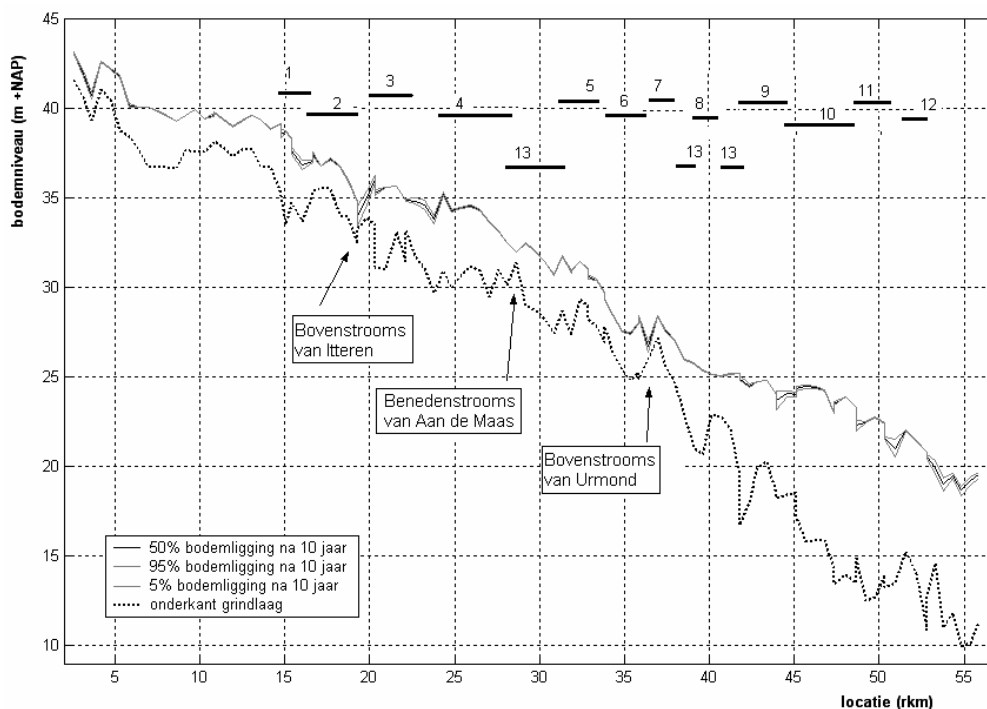
In 8.1.2 is de voorspelde bodemverandering met bijbehorende onzekerheid na een periode van 10 jaar beschouwd. In deze sectie wordt bepaald hoe de bodemverandering zich ontwikkelt gedurende deze 10 jaar. Om dit te beschouwen moet het modelresultaat van elke tijdstap per rekenpunt worden beschouwd. Uit de 300 simulaties zijn de bodemveranderingen per tijdstap voor het punt rkm 19,3 bepaald. Dit punt ligt bovenstrooms van de geplande verruiming bij Itteren. De verwachting is dat hier een erosiekuil zal ontstaan, hierdoor is goed de verandering in de tijd waarneembaar. Uit de 300 simulaties is van de bodemveranderingen in de tijd een normale verdeling per tijdstap opgesteld. Hieruit is de 95%, 50% en 5% betrouwbaarheidswaarde bepaald. Grafiek 8-5 toont dat de grootste bodemverandering tijdens het winterseizoen plaats vindt. In het zomerseizoen vindt nauwelijks tot geen verandering van de bodem plaats. Daarnaast is af te lezen dat de verandering in de tijd afneemt op deze locatie. In de winter van 2015/2016 is een grotere bodemverandering waarneembaar dan in de winter van 2023/2024. Op dit fenomeen wordt in §8.3 verder ingegaan.



Grafiek 8-5: De verwachtingswaarde en het bijbehorende 90% betrouwbaarheidsinterval van de bodemontwikkeling als functie van de tijd bovenstrooms van de verruiming bij Itteren (rkm 19,3).

### 8.1.4 Aansnijden fijne zandlaag

In paragraaf 3.1.2 is ingegaan op de bodemsamenstelling van de Grensmaas. Onder de toplaag bevindt zich een zand/grind mengsel. De dikte van deze grindlaag verschilt langs het traject. Onder deze laag ligt een laag van fijn tertiair sediment. Als door (locale) erosie de grindlaag is weggesleten wordt het fijne zand aangesneden. Door de lagere kritische schuifspanning van dit fijnere zand zal tijdens lagere stroomcondities al transport plaats vinden. Dit kan tot grote erosiedieptes en ongewenste situaties leiden.



Grafiek 8-6: Ligging onderkant grindlaag t.o.v. gemodelleerde bodemverandering

Grafiek 8-6 toont het boderniveau van de onderkant van de grindlaag en de gemodelleerde 5%, 50% en 95% verwachtingswaarde van het boderniveau 10 jaar na uitvoering van het VKA. Uit de grafiek kan geconcludeerd worden dat op het grootste gedeelte van het traject na 10 jaar de onderkant van de grindlaag nog vele meters onder het voorspelde boderniveau ligt. Gemiddeld genomen is het verschil zo'n 4 meter. Op nagenoeg alle locaties is het verschil groter dan 1 meter. Er is echter een verschil waarneembaar tussen het deel boven- en benedenstrooms van rkm 40 (Nattenhoven). Bovenstrooms van rkm 40 is het verschil gemiddeld 2,6 m na 10 jaar. Van rkm 40 tot 56 is dit gemiddeld 7.2 m na 10 jaar.

Er zijn echter 3 locaties waar het verschil tussen de onderkant van de grindlaag en het gemodelleerde boderniveau na 10 jaar kleiner is dan 1 meter. Deze locaties en verschillen staan in tabel 8-3.

	Bovenstrooms van Itteren (rkm 19.3)	Benedenstrooms van Aan de Maas (rkm 28.7)	Bovenstrooms van Urmond (rkm 36.4)
verschil met 5% percentiel	1.27 m	0.58 m	0.99 m
verschil met 50% percentiel	0.7 m	0.56 m	0.69 m
verschil met 95% percentiel	0.13 m	0.54 m	0.4 m

Tabel 8-3: Verschil tussen de gemodelleerde bodemligging na 10 jaar en de onderkant van de grindlaag ter plaatse van de 3 locaties waar dit verschil het kleinst is

Het wordt aanbevolen om deze 3 locaties goed te blijven monitoren. Op grond van het modelresultaat wordt op deze 3 locaties het eerst aansnijding van de fijne zandlaag verwacht. Of dit na 20, 30 of al na 15 jaar is, is helaas op grond van de huidige modelresultaten niet aan te geven. Op grond van het huidige modelresultaat is wel te concluderen dat op het grootste gedeelte van het traject het gevaar op aansnijden van de fijne zandlaag binnen 10 jaar minimaal is.



## 8.2 Vergelijking stochastische benadering en scenariobenadering

In het morfologisch onderzoek van het MER 2003 is de onzekerheid ten gevolge van de afvoer meegenomen door middel van een scenariobenadering. Er zijn 4 scenario's opgesteld die de onzekerheid t.g.v de afvoer moeten vaststellen (bijlage 5.3). De vraag is of deze scenariobenadering een goede weerspiegeling is van de werkelijke verwachting. En of de betrouwbaarheidsband die door het natte en droge scenario wordt ingesloten vergelijkbaar is met die van het 90% betrouwbaarheidsinterval. Een andere vraag is of de bodemverandering volgens het gemiddelde scenario vergelijkbaar is met de verwachtingswaarde van de Monte Carlo simulaties. Deze paragraaf geeft een antwoord op deze vragen.

Grafiek B.9 in bijlage 8 toont voor elk van de 4 scenario's de bodemverandering 10 jaar na uitvoering van het VKA. Getoond wordt dat het natte scenario een ondergrens vormt en het droge scenario een bovengrens. De voorspelde bodemverandering volgens het gemiddelde scenario ligt tussen deze twee in. De bodemverandering voorspeld door het historische scenario geeft een opvallend resultaat. De voorspelde bodemverandering ligt onder de voorspelde bodemverandering van het natte scenario. Dit komt waarschijnlijk doordat in de historische reeks van 1915 tot 1925 de afvoer 54 dagen boven de 1200 m<sup>3</sup>/s uitkomt, terwijl dit in de natte reeks slechts voor 33 dagen het geval is. De pieken in het natte scenario zijn weliswaar hoger, maar de duur van de pieken is korter.

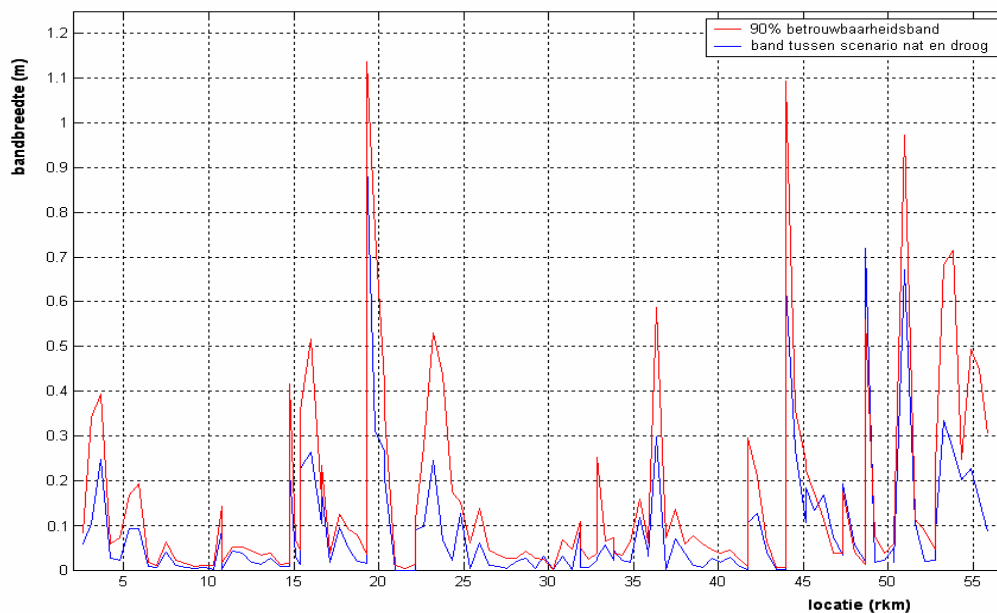
Verwachtings- waarde	gemiddelde bodem- verandering rkm 2-56 na 10 jaar	gemiddelde bodem- verandering rkm 2-56 per jaar	Gemiddelde erosie na 10 jaar	Gemiddelde sedimentatie na 10 jaar
	[m]	[mm]	[m]	[m]
droge afvoerscenario	-0.027	2.7	-0.16 (26 km)	0.1 (27 km)
gemiddelde afvoerscenario	0.052	5.2	-0.24 (25 km)	0.13 (28 km)
natte afvoerscenario	0.079	7.9	-0.26 (28 km)	0.13 (25 km)
grote betrouwbaarheidsband (relatief)			5.2 cm	
grote betrouwbaarheidsband (absoluut)			9.3 cm	

*Tabel 8-4: Modelresultaten gemiddelde bodemverandering in de Grensmaas (rkm 2-56) 10 jaar na uitvoering van het VKA volgens de 3 scenario's uit het MER 2003.*

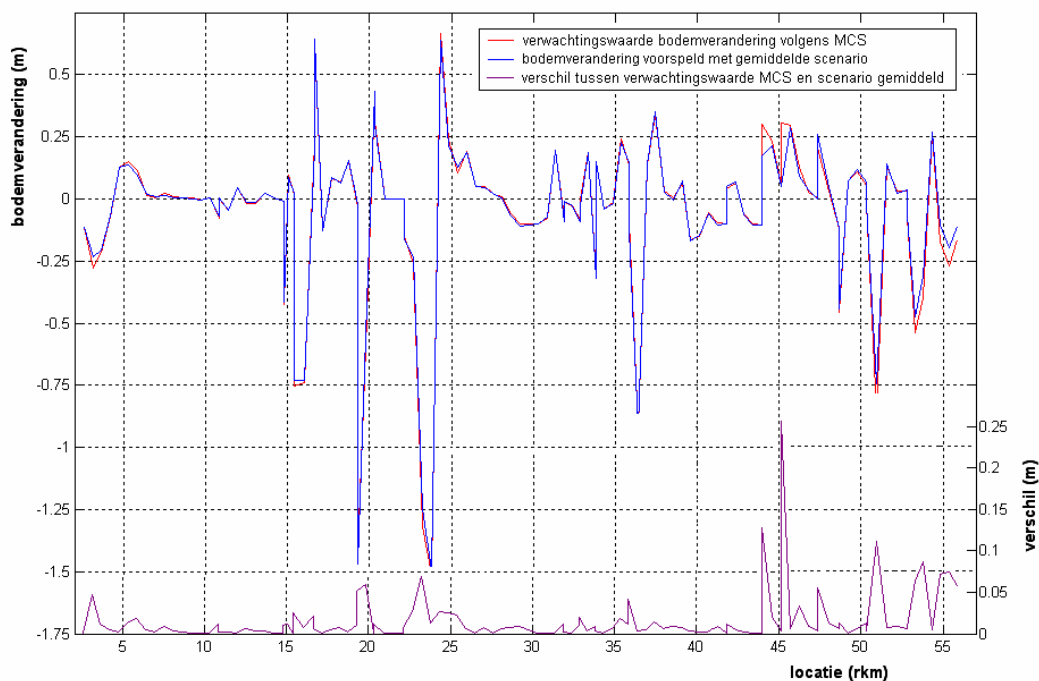
De gemiddelde bodemveranderingen berekend met het natte, droge en gemiddelde scenario zijn weergegeven in tabel 8-4. Als deze waarden worden vergeleken met die van tabel 8-3 dan valt op dat het 50% percentiel en het gemiddelde scenario nagenoeg gelijk zijn. Het gemiddelde verschil na 10 jaar tussen het natte scenario en het 95% percentiel is 2 cm en tussen het 5% percentiel en het droge scenario is dat 1,6 cm. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de gemiddelde voorspelde 90% betrouwbaarheidsband gemiddeld 3,6 cm groter is na 10 jaar dan de band die werd verondersteld op basis van de scenariobenadering.

Grafiek 8-7 toont de absolute betrouwbaarheidsband van de scenariobenadering en van de stochastische benadering. De betrouwbaarheidsband van de scenariobenadering is de ruimte die ingesloten ligt tussen de bodemverandering bij het natte scenario en die bij het droge scenario. Uit de grafiek kan worden geconcludeerd dat de bandbreedte van de stochastische benadering groter is dan de bandbreedte van de scenariobenadering. De absolute bandbreedte van de scenariobenadering is 9,3 cm en die van de

stochastische benadering is 16,4 cm. Vooral op de verruimingslocaties en vanaf rkm 50 geeft de stochastische benadering aan dat er een grotere onzekerheid (oplopend tot zo'n 30 á 50 cm) heerst ten gevolge van de afvoervariatie dan wordt aangegeven door de scenariobenadering. Het grootste verschil tussen beide zit in de onzekerheid ter plaatse van de erosielocaties. Op 20% van het traject wordt er door de stochastische benadering een onzekerheid aangegeven welke groter is dan 15 cm in vergelijking met de scenariobenadering.



Grafiek 8-7: De grootte van de absolute betrouwbaarheidsband voor zowel de scenariobenadering als de stochastische benadering.



Grafiek 8-8: Vergelijking tussen de bodemverandering voorspeld met het gemiddelde afvoerscenario en de 50% verwachtingswaarde van de MCS 10 jaar na uitvoering van het VKA.

De bodemverandering die berekend is met het gemiddelde afvoerscenario kan opgevat worden als de verwachte bodemverandering door de scenariobenadering. In grafiek 8-8 worden de verwachtingswaardes van deze twee benaderingen met elkaar vergeleken. Op de rechter y-as is het verschil tussen de twee verwachte bodemveranderingen weergegeven.

De grafiek toont dat er weinig verschil bestaat tussen de verwachte bodemverandering op grond van de Monte Carlo simulaties en de bodemverandering op basis van het gemiddelde afvoerscenario. Op 85% van het traject is het verschil tussen beide kleiner dan 5 cm. Op 10% van het traject verwacht de stochastische benadering meer erosie (verschil groter dan 5 cm) dan de scenariobenadering. Op 5% van het traject verwacht de stochastische benadering een grotere sedimentatie (verschil groter dan 5 cm).

Op basis van deze getoonde resultaten kan worden geconcludeerd dat:

1. De 90% betrouwbaarheidsband van de stochastische benadering is voor het gehele traject groter dan die van de scenariobenadering. Door de stochastische analyse is gebleken dat er een iets grotere onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie bestaat in de voorspelde bodemverandering dan op grond van de scenariobenadering werd verwacht.
2. De stochastische benadering en de scenariobenadering laten nagenoeg hetzelfde beeld zien van de verwachte bodemverandering na 10 jaar. Door de stochastische analyse is gebleken dat de voorspelling met het gemiddelde afvoerscenario vrij representatief is.

De eerste verwachting was dat het interval veroorzaakt door het natte en droge scenario breder zou zijn dan dat van de stochastische benadering. Echter uit bovenstaande conclusies blijkt juist dat de 90% betrouwbaarheidsband van de stochastische benadering breder is. De natte en droge afvoerreeks blijken dus minder extreem te zijn dan eerst werd verwacht. Hierbij moet echter wel de kanttekening gemaakt worden dat slechts een periode van 10 jaar is beschouwd. Het extreme van de afvoerscenario's schuilt namelijk in het feit dat 10 maal een zeer natte of droge historische afvoerperiode achter elkaar is geplakt. In §8.3 wordt dan ook onderzocht of op basis van de beschouwde bodemontwikkeling na 10 jaar iets gezegd kan worden over de bodemontwikkeling na een periode langer dan deze 10 jaar.

### **8.3 Voorspelling bodemontwikkeling na periode langer dan 10 jaar**

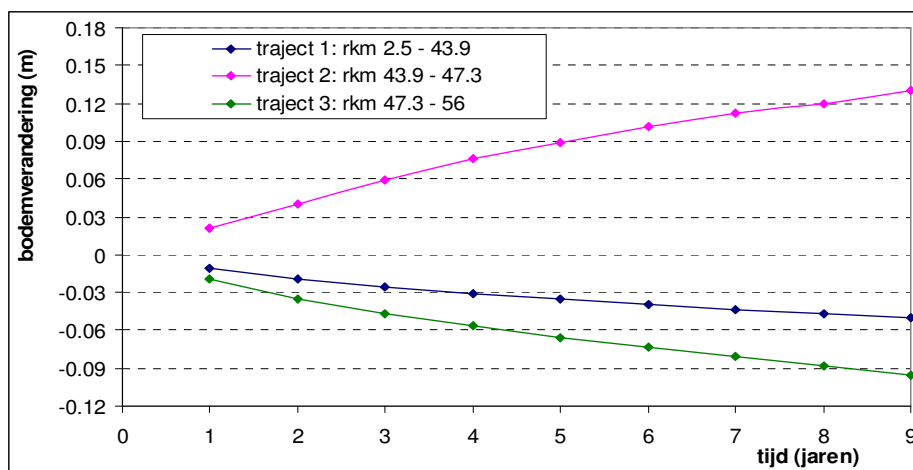
In het MER 2003 is een lange termijn voorspelling gedaan voor een periode van 100 jaar. In dit onderzoek is het morfologisch effect na een periode van 10 jaar onderzocht. Het onderzoeken van een langere periode bleek helaas niet haalbaar vanwege de lange rekentijden in SOBEK. Echter door de bodemontwikkeling in de beschouwde 10 jaar te beschouwen kan mogelijk een beeld gegeven worden van de bodemontwikkeling na een periode langer dan 10 jaar. Deze paragraaf heeft ten doel:

1. Voorspellen van de verwachte bodemverandering na een periode langer dan 10 jaar
2. Voorspellen van de ontwikkeling van het betrouwbaarheidsinterval na een periode langer dan 10 jaar

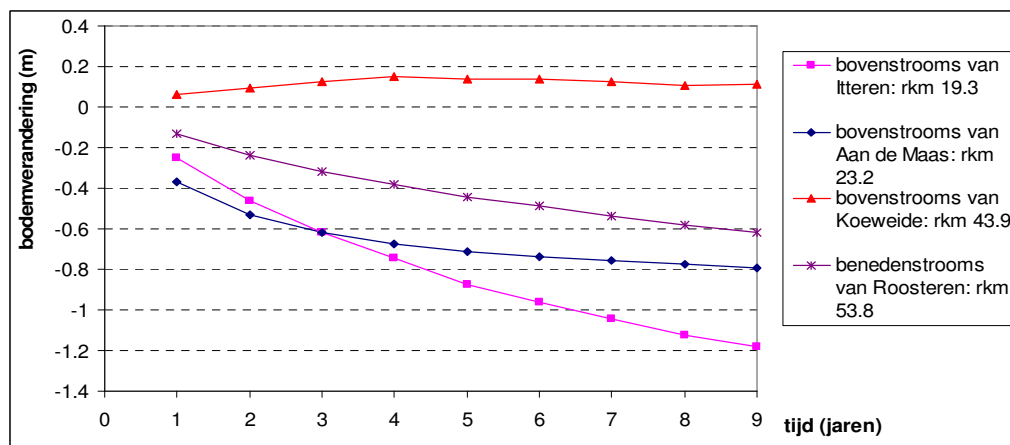
Om aan deze twee doelen te voldoen is eerst in 8.3.1 en 8.3.2 de bodemontwikkeling en onzekerheidsontwikkeling in de beschouwde 10 jaren onderzocht. In 8.3.3 wordt gekeken hoe deze trend door zou kunnen lopen na een periode langer dan 10 jaar.

### 8.3.1 Voorspelling verwachte bodemverandering

In deze sectie wordt de bodemontwikkeling na ieder jaar beschouwd. Dit is gedaan door de 10 beschouwde jaren (van jan. tot dec.) op te delen in 9 hydrologische jaren (van aug. tot juli). Hierdoor wordt rekening gehouden met het feit dat de hoge afvoeren in het winterseizoen voorkomen. Voor alle 300 simulaties is van elk van de 9 hydrologische jaren de bodemontwikkeling t.o.v. van de beginsituatie berekend. Voor elk van de 9 jaren is van deze 300 berekende bodemontwikkelingen de normale verdeling opgesteld. Uit deze verdeling is de verwachtingswaarde en het 90% betrouwbaarheidsinterval bepaald. De hierin aanwezige ruimtelijke variatie maakt het echter complex om voor het gehele traject een mogelijke eenduidige trend in de bodemontwikkeling te ontdekken. Om toch iets te kunnen zeggen over deze mogelijke trend is het traject (rkm 2-56) opgesplitst in 3 trajecten; traject 1 van rkm 2 tot 44, traject 2 van rkm 44 tot 47 en traject 3 van 47 tot 56. Deze onderverdeling is gebaseerd op het sedimenttransport. In traject 1 neemt het transport gemiddeld per rkm langzaam toe, in traject 2 neemt het transport gemiddeld per rkm af en in traject 3 neemt het transport per rkm gemiddeld snel toe. Daarnaast zijn er 4 verruimingslocaties beschouwd. Voor de 3 trajecten en de 4 locaties is bepaald hoe de verwachte bodemverandering zich na elk hydrologisch jaar ontwikkelt. Deze ontwikkeling is weergegeven in grafiek 8-9 en 8-10.



Grafiek 8-9: De ontwikkeling van de bodemverandering voor 3 trajecten in de Grensmaas.



Grafiek 8-10: De bodemverandering per jaar voor 4 locaties die vlakbij een rivierverruiming liggen.

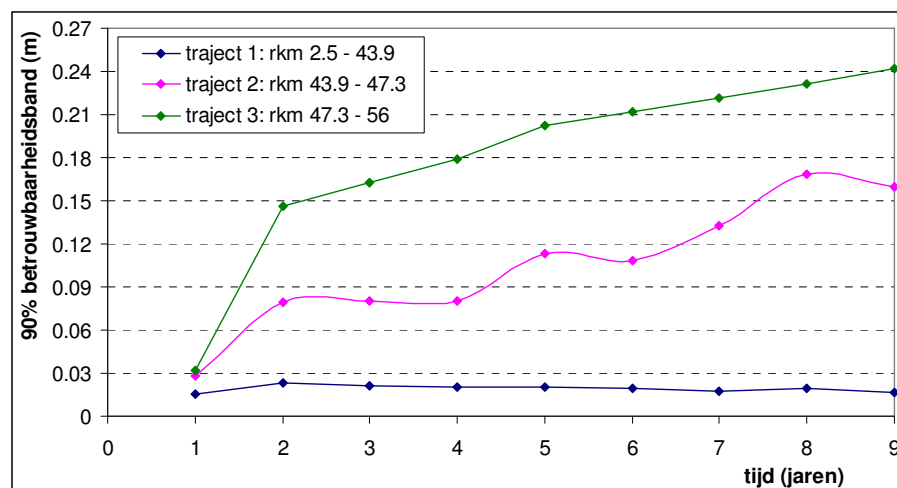
Uit grafiek 8-9 en 8-10 kan het volgende worden geconcludeerd:

1. Op traject 1 en 3 en bij de locaties Ifteren, Aan de Maas en Roosteren neemt de snelheid waarmee de gemiddelde bodemdaling plaatsvindt ieder jaar af.
2. Op traject 2 en bij de Koeweide neemt de snelheid waarmee de gemiddelde aanzanding plaatsvindt ieder jaar af.

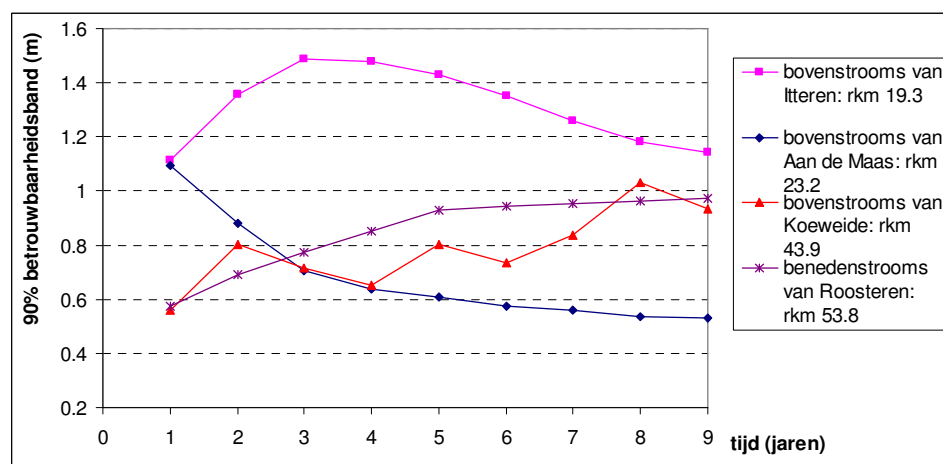
In de beschouwde 9 jaren is een afnemende trend van de bodemverandering zichtbaar. Deze trend is min of meer exponentieel, hetgeen in lijn is met wat morfologisch verwacht kon worden na de aanpassingen.

### 8.3.2 Voorspelling ontwikkeling betrouwbaarheidsinterval

Uit de normale verdelingen die m.b.v. de 300 simulaties zijn opgesteld is naast de verwachtingswaarde ook het 90% betrouwbaarheidsinterval per hydrologisch jaar bepaald. Voor dezelfde 3 trajecten en 4 locaties als in §8.3.1 is hiermee bepaald hoe de onzekerheid in de voorspelde bodemverandering zich na elk hydrologisch jaar ontwikkelt. Deze ontwikkeling is weergegeven in grafiek 8-11 en 8-12.



Grafiek 8-11: De Grensmaas is onderverdeeld in 3 trajecten waarvan de ontwikkeling van de 90% betrouwbaarheidsband per hydrologisch jaar is weergegeven.



Grafiek 8-12: De ontwikkeling van de 90% betrouwbaarheidsband per hydrologisch jaar voor 4 locaties die vlakbij een rivierverruiming liggen.

Uit de waargenomen trends in grafiek 8-11 en 8-12 is het volgende geconcludeerd:

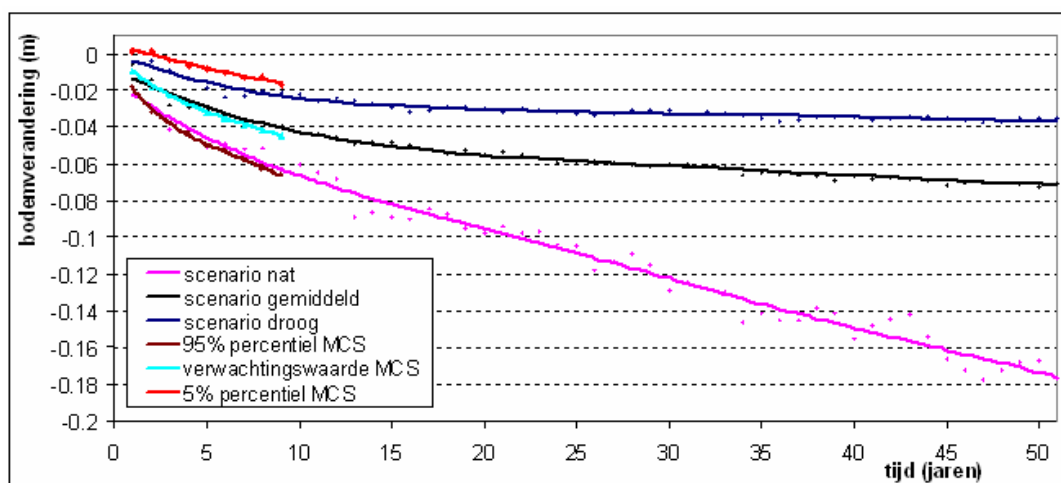
1. De mate van onzekerheid in de voorspelde bodemverandering blijft over het traject tot rkm 40 nagenoeg constant in de tijd. Ter plaatse van Ifteren en Aan de Maas neemt de mate van onzekerheid zelfs af in de loop van de tijd.
2. Op het deel van de Grensmaas na rkm 47 neemt de onzekerheid weliswaar toe, echter de snelheid waarmee dit gebeurt, neemt elk jaar af.
3. Over de trend in de onzekerheid voor traject 2 is door de modelinstabiliteit weinig te zeggen.

### 8.3.3 Vergelijking met scenariobenadering

In §8.3.1 is geconcludeerd dat in de 9 beschouwde jaren de snelheid waarmee de bodemverandering plaatsvindt afneemt. In §8.3.2 is geconcludeerd dat in deze jaren de onzekerheid in de voorspelde bodemverandering in de eerste 40 km nagenoeg constant blijft. Voor het traject vanaf rkm 47 neemt de onzekerheid langzaam toe per jaar. In deze paragraaf wordt onderzocht of het mogelijk is om aan de hand van deze trends een voorspelling van de bodemontwikkeling te geven voor een periode langer dan 10 jaar.

In het MER 2003 is een lange termijn berekening voor 100 jaar gemaakt. Grafiek 8-13 toont voor 3 scenario's de gemiddelde bodemverandering over de gehele Grensmaas (rkm 2-56) gedurende 50 jaar. Volgens het model stopt de gemiddelde verandering van de bodem volgens het droge scenario na 20 jaar. Na 50 jaar is de bodemdaling dan zo'n 4 cm. Met het gemiddelde scenario stopt de bodemverandering niet, maar neemt de snelheid van de bodemverandering wel na elk jaar af. De voorspelde gemiddelde bodemdaling is zo'n 7 cm na 50 jaar. Met het natte scenario gaat de gemiddelde bodemdaling elk jaar met een constante snelheid door. Na 50 jaar is de gemiddelde bodemdaling dan zo'n 18 cm.

In grafiek 8-13 is ook de gemiddelde bodemverandering (5%, 50% en 95% percentiel ) over de gehele Grensmaas weergegeven zoals deze met de stochastische benadering is vastgesteld. De bodemverandering door deze benadering kan slechts voor de eerste 10 jaar worden gegeven. De grafiek toont dat de trend van de stochastische benadering overeen komt met de trend van de scenariobenadering in de eerste 10 jaar.



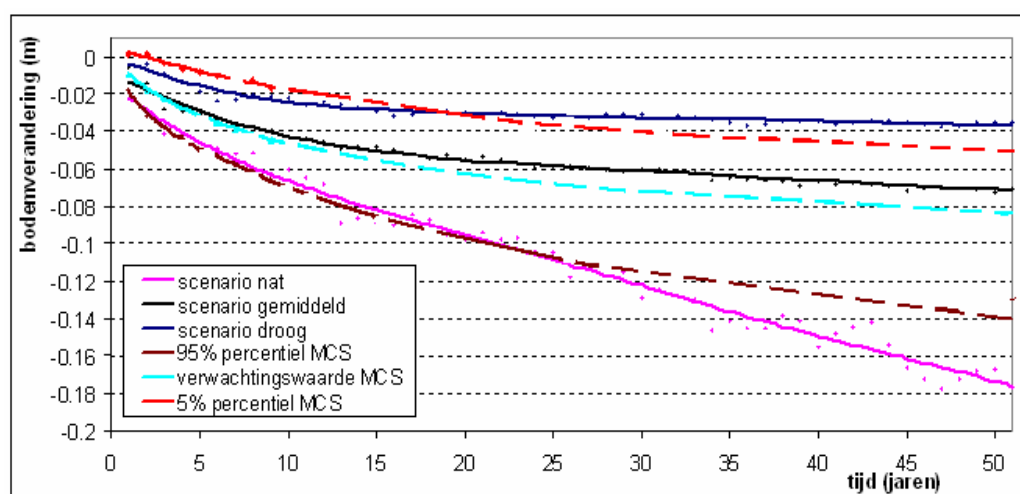
Grafiek 8-13: Vergelijking tussen de gemiddelde bodemverandering voorspelt met de scenario benadering (50 jaar) en met de stochastische benadering (10 jaar)

Door grafiek 8-13 komt de vraag op hoe de trend van de stochastische benadering doorloopt na de berekende 10 jaar. Dit kan helaas moeilijk worden voorspeld. Het simpelweg veronderstellen dat de trend op dezelfde wijze doorloopt is waarschijnlijk niet correct. Dit komt door de volgende 2 zaken:

1. De bodem van de Grensmaas bestaat uit verschillend gegradeerde lagen die ook nog eens ruimtelijk gevarieerd zijn. Door wegslijten van grovere lagen kan op een gegeven moment een fijnere laag blootgesteld worden aan de stroming. Dit veroorzaakt een toename in het sedimenttransport en de bodemverandering. Dit betekent dat een ingezette trend plotseling kan veranderen.
2. Het extreme van de afvoerscenario's schuilt in het feit dat 10 maal een zeer natte of droge historische afvoerperiode van 10 jaar achter elkaar is geplakt. Het blijft de vraag in hoeverre het 95% en 5% percentiel vergelijkbaar zijn met de scenario's na bijvoorbeeld 25 of 50 jaar.

Om de trend in de bodemontwikkeling van de eerste 10 jaar door te trekken over een langere periode is aanvullend onderzoek nodig. Er zal dan een stochastische analyse gedaan moeten worden voor een periode van bijvoorbeeld 25 tot 50 jaar. Dit zal op een slimme manier moeten gebeuren om zodoende lange rekentijden te voorkomen.

Op basis van een hypothese is getracht om toch een voorspelling van de verandering van de bodem na 50 jaar te geven. Als het inderdaad waar is dat de 3 afvoerscenario's te extreem zijn doordat 10 extreme reeksen van 10 jaar achter elkaar zijn geplakt, dan zou de situatie na 50 jaar er volgens de stochastische benadering er zo uit kunnen zien als in grafiek 8-14. De hypothese is dat de 5% en 95% verwachtingswaarde van de bodemverandering na 50 jaar respectievelijk lager en hoger zal uitvallen dan de scenariobenadering voorspelt. Deze hypothese is echter niet gebaseerd op data. De lijnen in grafiek 8-14 zijn na eigen interpretatie doorgetrokken. Er is dan ook geen vergelijking of 'trend-editor' gebruikt. De hypothese is gebaseerd op het feit dat de 50-jarige Nearest Neighbour afvoerreeksen die het 95% en 5% interval het best benaderen, waarschijnlijk minder extreem zijn dan de natte en droge afvoerreeks. De kans dat er namelijk in 50 jaar geen afvoerenpiek voorkomen of juist bijna elk jaar is klein. De Nearest Neighbour methode zal dus waarschijnlijk nauwelijks zulke reeksen genereren.

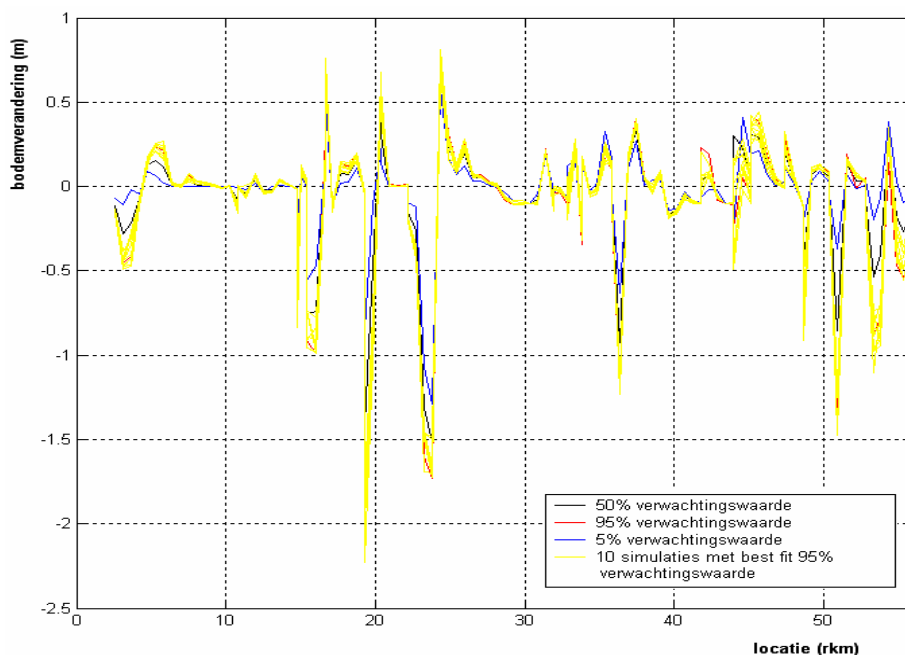


Grafiek 8-14: hypothese over de mogelijke gemiddelde bodemontwikkeling (5%, 50% en 95% percentiel) in de Grensmaas in 50 jaar tijd in vergelijking met de scenariobenadering.

## 8.4 Bepalende karakteristieken afvoerreeks

Deze paragraaf heeft ten doel nog eens verder in te zoomen op de 300 gegenereerde 10-jarige afvoerreeksen. Door nader in te zoomen kan mogelijk bepaald worden welke (statistische) kenmerken een afvoerreeks moet hebben om de verwachtingswaarde of de grenzen van het 90% betrouwbaarheidsinterval te benaderen. Als deze kenmerken bekend zijn kan namelijk veel makkelijker het betrouwbaarheidsinterval worden gegenereerd. Er kan dan mogelijk met een veel kleiner aantal simulaties worden volstaan. Dit levert tijdwinst op waardoor het mogelijk is om ook voor lange termijnen, bijvoorbeeld 100 jaar, een 90% betrouwbaarheidsinterval op te stellen.

In §8.1 zijn de 5%, 50% en 95% verwachtingswaarden van de bodemverandering na 10 jaar bepaald. Met deze 3 bodemveranderingen is teruggegaan naar de dataset van de 300 bodemveranderingen. Uit deze dataset zijn met behulp van de kleinste kwadraten methode de 10 simulaties bepaald die het beste de 50% verwachtingswaarde benaderen. Dit wil zeggen dat deze 10 simulaties gemiddeld over het traject (rkm 2-56) het kleinste verschil aangeven tussen de voorspelde bodemverandering en de 50% verwachtingswaarde. Dit zelfde is ook herhaald voor de 5% en 95% verwachtingswaarde. Op deze manier zijn er 3 sets van 10 simulaties geselecteerd. Elke simulatie kenmerkt zich door een andere afvoerreeks, oftewel er zijn 3 sets van 10 afvoerreeksen geselecteerd welke respectievelijk gemiddeld het beste de 50%, 5% en 95% verwachtingswaarde benaderen. Grafiek 8-15 toont de 10 berekende bodemveranderingen welke het best de 95% verwachtingswaarde benaderen. In bijlage 15 zijn van elke set van 10 afvoerreeksen enkele afvoerreeksen getoond. Van deze 3 sets van 10 afvoerreeksen zijn de statistische kenmerken onderzocht.



Grafiek 8-15: De modelresultaten van de 10 simulaties welke het beste de 95% verwachtingswaarde van de bodemverandering benaderen.

Ten eerste is gekeken naar het gemiddelde en de standaardafwijking van deze 3 sets van 10 afvoerreeksen. De resultaten zijn weergegeven in tabel 8-5. Hierin valt de



gemiddelde afvoer (255 m<sup>3</sup>/s) en de standaardafwijking (262 m<sup>3</sup>/s) van de 10 reeksen die het best de 50% verwachtingswaarde benadert op. Deze komt nagenoeg overeen met die van de historische reeks van 1911-2003 (gemiddelde van 252 m<sup>3</sup>/s en standaardafwijking van 267 m<sup>3</sup>/s). Logischerwijs is de waarde van de gemiddelde afvoer en de standaardafwijking voor de 95% verwachtingswaarde hoger dan de 5% verwachtingswaarde. Echter binnen de set van 10 afvoerreeksen bestaat een grote variatie in de waarde van de gemiddelde afvoer en de standaardafwijking. Een afvoerreeks met een hoog gemiddelde en een hoge standaardafwijking leidt dus niet noodzakelijk tot een benadering van de 95% verwachtingswaarde.

	gemiddelde	standaard afwijking
5% percentiel	224	207
<i>variatie in 5% percentiel</i>	<i>195-254</i>	<i>170-239</i>
verwachtingswaarde	255	262
<i>variatie in 50% percentiel</i>	<i>231-280</i>	<i>239-278</i>
95% percentiel	272	293
<i>variatie in 95% percentiel</i>	<i>239-312</i>	<i>255-328</i>

*Tabel 8-5: Waarden gemiddelde afvoer en standaardafwijking in m<sup>3</sup>/s van de 10 afvoerreeksen welke het beste de 3 betrouwbaarheidsgrenzen benaderen.*

Ten tweede is er gekeken naar de dichtheid van de afvoer binnen de 3 sets. In tabel 8-6 is het aantal dagen (absoluut en als percentage van de tijd) binnen de 10-jarige reeks weergegeven dat de afvoer binnen een bepaalde afvoerrange valt. Er valt op dat het aantal dagen dat de afvoer boven de 1200 m<sup>3</sup>/s uitkomt sterk verschilt voor de afvoerreeksen die het best het 5%, 50% of 95% verwachtingswaarde benaderen. De 10 afvoerreeksen die gemiddeld het dichtst bij de 50% verwachtingswaarde liggen tellen gemiddeld 48 dagafvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s in 10 jaar tijd. Voor het 95% percentiel is dit gemiddeld 76 dagen en voor het 5% percentiel slechts 15 dagen. Ook de variatie binnen de sets van 10 afvoerreeksen geven onderscheid tussen de 3 grenzen aan. Echter de bandbreedte van de variatie is vrij breed. Een reeks waarvan in 1.7% van de dagen een afvoer boven de 1200 m<sup>3</sup>/s voorkomt benadert niet noodzakelijk de 95% verwachtingswaarde maar kan ook de gemiddelde verwachtingswaarde benaderen.

	aantal dagen afvoer 300 - 1200 m <sup>3</sup> /s		aantal dagen afvoer 1200- 2100 m <sup>3</sup> /s		aantal dagen afvoer > 2100 m <sup>3</sup> /s		aantal afvoergolven
	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]	
5% percentiel	830	22.7	15	0.4	0	0.0	4.5
<i>variatie in 5% percentiel</i>	<i>633-1022</i>	<i>17.3-27.9</i>	<i>8-24</i>	<i>0.22-0.66</i>	<i>0-2</i>	<i>0-0.05</i>	<i>3-8</i>
verwachtingswaarde	960	26.2	48	1.3	0	0.0	15.3
<i>variatie in 50% percentiel</i>	<i>783-1163</i>	<i>21.4-31.8</i>	<i>37-65</i>	<i>1.0-1.77</i>	<i>0-2</i>	<i>0-0.05</i>	<i>11-18</i>
95% percentiel	981	26.8	72	2.0	4	0.1	19.3
<i>variatie in 95% percentiel</i>	<i>716-1150</i>	<i>19.6-31.4</i>	<i>45-98</i>	<i>1.23-2.68</i>	<i>1-6</i>	<i>0.03-0.16</i>	<i>9-24</i>

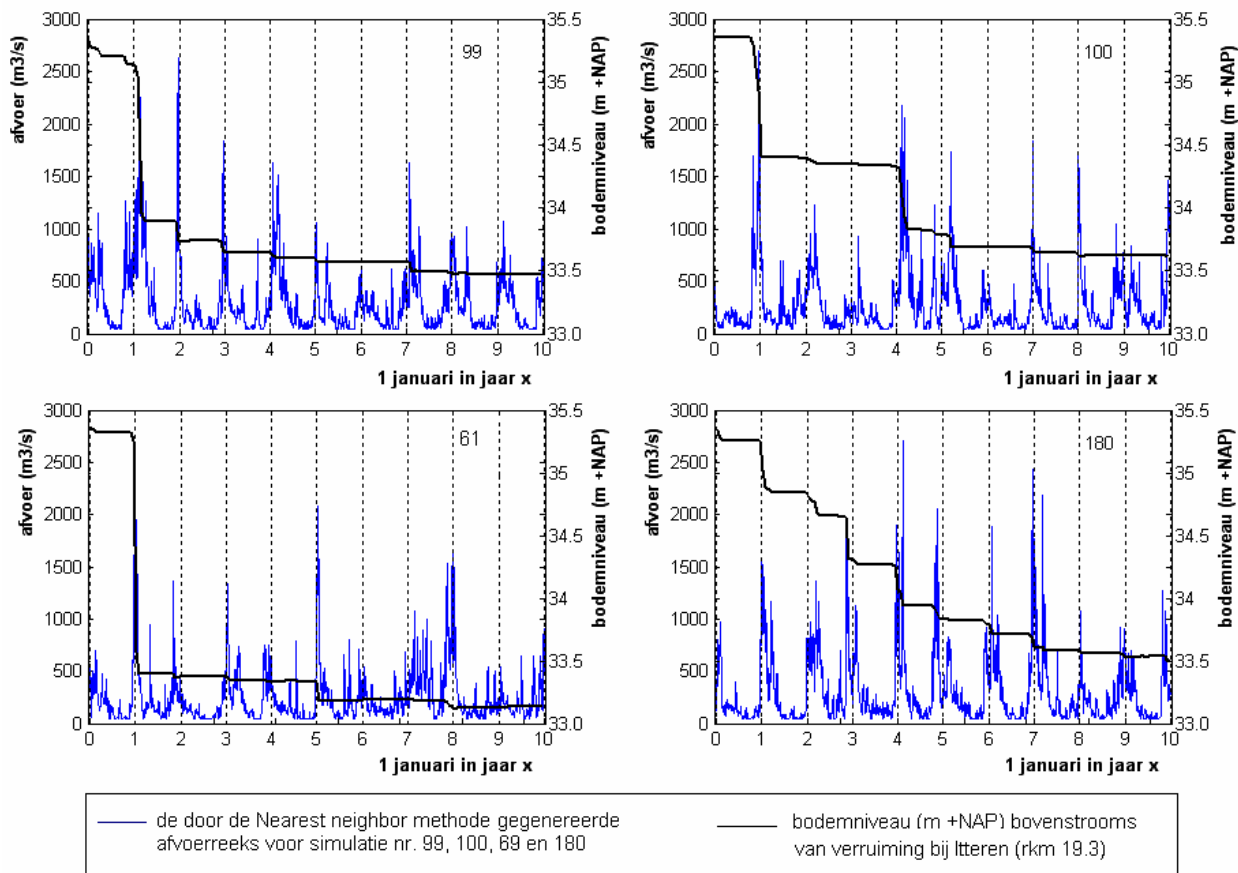
*Tabel 8-6: Aantal dagen (abs. en perc.) dat afvoer binnen een bepaalde afvoerrange valt gedurende 10 jaar. Het aantal afvoergolven gedurende de 10 jaar. De waarden zijn afkomstig van de 3 sets van 10 reeksen welke het beste de grenzen benaderen*

Ten derde is er gekeken naar de duur van de afvoergolven. De resultaten hiervan zijn ook weergegeven in tabel 8-6. De 10 afvoerreeksen die gemiddeld het best de 95% verwachtingswaarde benaderen hebben vanzelfsprekend een groter aantal afvoergolven dan de reeksen die de 5% verwachtingswaarde het best benaderen.

Echter de gemiddelde duur van de pieken is nagenoeg gelijk. Deze ligt rond de 3 á 4 dagen.

Uit de onderzochte kenmerken blijkt dat er verschil bestaat tussen de gemiddelde karakteristieken van de 3 sets afvoerreeksen. Er bestaat gemiddeld genomen verschil tussen de gemiddelde afvoer, de standaardafwijking, het aantal afvoeren boven en onder de 1200 m<sup>3</sup>/s en de duur van de afvoergolf. Echter binnen één set van afvoerreeksen hebben de waarden van deze kenmerken een grote variatie. Door deze variatie is het complex te voorspellen welke afvoerreeks het best een bepaalde verwachtingswaarde benadert. Als de variatie in de waarden van deze kenmerken minder ruim was geweest, dan zouden de kenmerken kunnen worden gebruikt om nieuwe langdurige afvoerreeksen te genereren. Met deze nieuwe langdurige afvoerreeksen kunnen nieuwe langdurige simulaties in het Grensmaasmodel worden gemaakt. De resultaten uit dit model zijn dan zeer waarschijnlijk gelijk goede benaderingen voor de 5%, 50% en 95% verwachtingswaarde van de bodemverandering na deze lange termijn zijn.

Grafiek 8-16 toont het modelresultaat op rkm 19,3 van 4 van de 10 simulaties welke het beste de 95% betrouwbaarheidsgrans benaderen. De grafiek toont hoe het bodemniveau verandert onder invloed van de afvoer.



Grafiek 8-16: 4 modelresultaten uit SOBEK van 4 van de 10 simulaties welke het 95% percentiel benaderen. De grafiek toont de bodemverandering bovenstrooms van Ifteren (rkm 19,3) gedurende de beschouwde 10 jaren (2015-2025) en toont daarnaast de bij de simulatie horende afvoerreeks.

De variatie binnen de beschouwde kenmerken (tabel 8-5 en 8-6) en grafiek 8-16 tonen aan dat er meer kenmerken een rol spelen. Zo toont grafiek 8-16 dat ook de voorgeschiedenis, de vorm van de afvoergolf, de tijdsduur tussen opeenvolgende piekafvoeren binnen één seizoen, de bodemligging op dat moment en de volgorde van piekafvoeren binnen een bepaalde tijdsduur een grote rol spelen in de gemodelleerde bodemverandering in de Grensmaas. Zo is bijvoorbeeld op dit moment nog niet duidelijk of een korte hoge afvoergolf tot dezelfde bodemverandering leidt als een langere lagere afvoergolf met hetzelfde volume. Dit hangt namelijk ook weer af van de voorgeschiedenis van het afvoerverloop.

Op grond van de analyse in deze paragraaf kunnen nog geen karakteristieke kenmerken worden gegeven waaraan afvoerreeksen moeten voldoen willen ze het beste de 5%, 50% of 95% verwachtingswaarde benaderen. Hiervoor is verder onderzoek nodig. Dit verdere onderzoek naar de bepalende karakteristieken zou er uiteindelijk toe moeten leiden dat er met veel minder sommen een 90% betrouwbaarheidsinterval opgesteld kan worden.

## 8.5 Conclusies

In §8.1 is geconcludeerd dat door de uitvoering van het VKA de gemiddelde verwachte bodemverandering in de Grensmaas volgens SOBEK zo'n 5 cm is na 10 jaar. Met 90% zekerheid (enkel onzekerheid t.g.v. afvoervariatie verondersteld) kan gesteld worden dat de gemiddelde bodemverandering over het traject tussen de 1 en 10 cm zal liggen na 10 jaar. Hiermee is de verwachte bodemdaling kleiner dan de verwachte bodemdaling in de autonome situatie. Echter ter plaatse van de verruimingslocaties en vanaf rkm 50 is de verwachte bodemverandering groter. Volgens het model kan er benedenstrooms van de verruiming lokaal 1 tot 1,5 m erosie optreden na 10 jaar. Aan het begin van de verruiming kan lokaal 0,5 m aanzanding optreden na 10 jaar.

De absolute onzekerheid in de voorspelde bodemverandering na 10 jaar ten gevolge van de afvoervariatie is gemiddeld 16,4 cm. Ter plaatse van de verruimingslocaties en vanaf rkm 43 loopt deze onzekerheid echter plaatselijk op tot ongeveer 1 meter.

Op basis van het modelresultaat is geconcludeerd dat op het grootste gedeelte van het traject geen aansnijding van de fijne zandlaag wordt verwacht binnen 10 jaar. Op het grootste gedeelte van het traject heeft de grindlaag nog een dikte van meer dan 1 meter na 10 jaar. Echter ter plaatse Ifteren, Aan de Maas en Urmond is de dikte van de grindlaag nog slechts enkele tientallen centimeters na 10 jaar volgens het model.

In §8.2 is geconcludeerd dat de stochastische benadering en de scenariobenadering nagenoeg hetzelfde beeld laten zien van de verwachte bodemverandering na 10 jaar. Door de stochastische analyse is gebleken dat de voorspelling met het gemiddelde afvoerscenario vrij representatief is. Daarnaast is geconcludeerd dat de 90% betrouwbaarheidsband van de stochastische benadering voor het gehele traject groter is dan die van de scenariobenadering. Door de stochastische analyse is gebleken dat er een iets grotere onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie bestaat in de gemodelleerde bodemverandering dan op grond van de scenariobenadering werd verwacht. Vooral ter plaatse van de verruimingslocaties en benedenstrooms van rkm 50 bestaat een grotere onzekerheid in de gemodelleerde bodemverandering dan op grond van de scenariobenadering werd verwacht.

In §8.3 is geconcludeerd dat de voor de gehele Grensmaas geldt dat de snelheid waarmee de verwachte bodemverandering plaatsvindt elk jaar afneemt. Hierdoor neemt

ook de groei van de onzekerheid in de voorspelling af. Het blijkt dat de gemodelleerde trend in de bodemontwikkeling van de stochastische benadering overeen komt met de trend van de scenariobenadering in de eerste 10 jaar. Over de trend van de bodemontwikkeling over een periode van 50 jaar is een hypothese gegeven. De hypothese is gebaseerd op het feit dat verwacht wordt dat de 50-jarige Nearest Neighbour afvoerreeksen, welke het beste de 95% en 5% verwachtingswaarde van de bodemverandering benaderen, minder extreem zijn dan de natte en droge afvoerreeks van de scenariobenadering. Hierdoor zal de verwachte gemodelleerde trend in de bodemverandering na 50 jaar ook minder extreem zijn dan de scenariobenadering aangeeft. De hypothese is echter niet gebaseerd op data. Om de hypothese te toetsen is verder onderzoek nodig.

In §8.4 is onderzocht welke verschillen er bestaan tussen de karakteristieken van de afvoerreeksen die het best de 5%, 50% of 95% verwachtingswaarde van de bodemverandering benaderen. Gemiddeld genomen blijkt er verschil te bestaan in de frequentie van de piekafvoeren, de duur van de afvoergolven, de gemiddelde afvoer en de standaardafwijking. Echter de variatie binnen de reeksen geeft aan dat het moeilijk te voorspellen is welke waarde bepaalde karakteristieken moeten hebben willen ze een bepaalde verwachtingswaarde benaderen. Zo zijn ook de voorgeschiedenis, de vorm van de afvoergolf, de tijdsduur tussen opeenvolgende piekafvoeren binnen één seizoen, de bodemligging op dat moment en de volgorde van piekafvoeren binnen een bepaalde tijdsduur van belang voor de gemodelleerde bodemverandering in de Grensmaas. Verder onderzoek naar de bepalende karakteristieken van de afvoer op de verandering van de bodem in de Grensmaas zou er uiteindelijk toe kunnen leiden dat er met veel minder sommen een 90% betrouwbaarheidsinterval opgesteld kan worden.

## 9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 9.1 Conclusies

In dit onderzoeksrapport is verslag gedaan van het onderzoek naar de onzekerheid in de door SOBEK-graded gemodelleerde bodemverandering van de Grensmaas. De doelstelling van het onderzoek luidde:

*‘Het inventariseren van de onzekerheden in de morfologische berekeningen van de Grensmaas en het stochastisch bepalen en evalueren van de invloed van de grootste onzekerheden op de lange termijn voorspelling van de bodemverandering in de Grensmaas met behulp van een 1D morfologisch model’*

Het onderzoek kent de volgende inperkingen:

1. Er wordt enkel ingegaan op de onzekerheid in het modelresultaat ten gevolge van de onzekerheden in de modelinputs en modelparameters. Onzekerheid in het modelresultaat ten gevolge van onzekerheden in de modelcontext, de modelstructuur en modeltechnische onzekerheden worden buiten beschouwing gelaten.
2. Er wordt niet gesleuteld aan het Grensmaasmodel. Gemaakte keuzes over technische instellingen worden niet veranderd tijdens dit onderzoek.
3. De conclusies worden getrokken op basis van de modelresultaten van het 1D model SOBEK-graded. Onzekerheden voortvloeiend uit 2D/3D stromingsverschijnselen en sorteringsverschijnselen van gegradeerd sediment zijn buiten beschouwing gelaten.

In dit hoofdstuk komen de belangrijkste resultaten en conclusies uit dit onderzoek naar voren. Dit wordt gedaan aan de hand van de 5 onderzoeksvragen.

*Vraag 1: Welke onzekerheden spelen er in de modelinputs en modelparameters van het Grensmaasmodel?*

Met behulp van de indelingsmatrix van Walker (2003) zijn de onzekerheden binnen de modelinputs en modelparameters van het Grensmaasmodel geïnterpreteerd. In een stochastische onzekerheidsanalyse kunnen enkel de onzekerheidsbronnen worden meegenomen welke in statistische termen kunnen worden beschreven. Er blijken 9 onzekerheidsbronnen in het Grensmaasmodel te zijn die in statistische termen kunnen worden beschreven. Dit zijn de riviergeometrie, de afvoer, de korrelgrootte, de laagdikte van de toplaag, de zomer- en winterbedruwheid, de kritische Shieldswaarde, de hiding & exposure factor en de calibratiefactor.

Naast de onzekerheden in de modelinput en modelparameters spelen er ook onzekerheden binnen de modelcontext en modelstructuur. Deze onzekerheden zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Het is echter wel van belang voor de context van het onderzoek om bewust te blijven van het bestaan van deze onzekerheden.

*Vraag 2: Welke onzekerheidsbronnen hebben de grootste invloed op de verandering van de bodem in de Grensmaas? En wat zijn de bepalende karakteristieken in deze onzekerheidsbron voor de bodemverandering?*

Door middel van de gevoeligheidsanalyse is bepaald dat de onzekerheid in de afvoer en de korrelgrootte de grootste bijdrage leveren aan de onzekerheid in het modelresultaat van SOBEK-graded. Vanwege de tijd en de beschikbare dataset is gekozen om in dit onderzoek enkel de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie te beschouwen.

Om de onzekerheid in de afvoervariatie op een goede wijze te kunnen beschrijven is het van belang om de bepalende karakteristieken van deze afvoer op de gemodelleerde bodemverandering te bepalen. Uit de modelresultaten blijkt dat de frequentie van piekafvoeren (afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s) een grote impact heeft op de hoeveelheid sedimenttransport in de Grensmaas. Een toe- of afname van de frequentie van de piekafvoeren kan volgens SOBEK vele procenten verschil in de hoeveelheid jaarlijkse transport betekenen. Daarnaast blijkt de volgorde van de piekafvoeren en de duur van de piekafvoeren impact te hebben op de gemodelleerde bodemverandering in SOBEK. Uit het veranderen van de volgorde van de piekafvoeren (een verandering van het afvoerverloop) blijkt dat dit een rol speelt in de gemodelleerde bodemontwikkeling.

*Vraag 3: Hoe kan de afvoer op representatieve wijze statistisch worden beschreven zodat een stochastische onzekerheidsanalyse uitgevoerd kan worden?*

De stochastische onzekerheidsanalyse is uitgevoerd door middel van de Crude Monte Carlo methode. Deze methode kan goed omgaan met het complexe karakter van morfologische modellen. Het maken van 300 simulaties, met elk een andere afvoerreeks als randvoorwaarde, blijkt voldoende te zijn om met voldoende nauwkeurigheid een 90% betrouwbaarheidsinterval op te stellen van de bodemverandering na 10 jaar.

De Maasafvoer is door middel van de Nearest Neighbour methode statistisch beschreven. Met deze methode zijn 200 verschillende reeksen van 92 jaar gegenereerd. Op deze manier konden de nieuwe reeksen worden vergeleken met de historische reeks van 1911-2003. De belangrijke kenmerken zoals de duur van de afvoergolf, de seizoensvariatie en de frequentie van piekafvoeren worden door de Nearest Neighbour methode op een representatieve wijze beschreven. De gemiddelde waarden van deze kenmerken in de gegenereerde reeksen komen goed overeen met de waarden van deze kenmerken in de historische afvoerreeks. Uiteindelijk zijn uit de 200 reeksen van 92 jaar ten behoeve van de 300 Monte Carlo simulaties 300 10-jarige reeksen gehaald.

*Vraag 4: Hoe groot is de invloed ten gevolge van de afvoervariatie op de gemodelleerde bodemverandering in de Grensmaas? En hoe verhoudt de stochastische benadering zich tot de scenariobenadering van het MER 2003?*

Met de stochastische analyse is geconcludeerd dat door de uitvoering van het VKA de gemiddelde verwachte bodemverandering in de Grensmaas volgens SOBEK zo'n 5 cm is na 10 jaar. Met 90% zekerheid (let wel enkel de onzekerheid t.g.v. afvoervariatie is verondersteld) kan gesteld worden dat de gemiddelde bodemverandering over het traject tussen de 1 en 10 cm zal liggen na 10 jaar. Hiermee is de verwachte bodemdaling kleiner dan de verwachte bodemdaling in de autonome situatie. Echter ter plaatse van de verruimingslocaties en vanaf rkm 50 is de verwachte bodemverandering groter. Volgens het modelresultaat kan er benedenstrooms van de verruimingen lokaal 1 tot 1,5 m erosie optreden na 10 jaar. Aan het begin van de verruimingen kan lokaal 0,5 m aanzanding optreden na 10 jaar.

Ter plaatse van Itteren, Aan de Maas en Urmond zijn volgens het model 3 locaties waar de dikte van de grindlaag serieuze slijtage vertoont na 10 jaar. De dikte van de resterende grindlaag is hier nog slechts enkele tientallen centimeters. Op het grootste gedeelte van het traject is echter volgens het model nog een dikte van meer dan 1 meter te verwachten (gemiddeld zelfs 4 meter).

De absolute onzekerheid in de gemodelleerde bodemverandering na 10 jaar ten gevolge van de afvoervariatie is gemiddeld 16,4 cm. Ter plaatse van de verruimingen en benedenstrooms van rkm 43 loopt deze onzekerheid echter plaatselijk op tot ongeveer 1

meter. Op ongeveer 75% van het traject (rkm 2-56) is de onzekerheid kleiner dan 20 cm (Op 5% van het traject is de onzekerheid groter dan 20 cm sedimentatie en op 20% is dat groter dan 20 cm erosie). Op minder dan 10% van het traject heerst een grotere onzekerheid dan 50 cm. Deze onzekerheid komt enkel voor op locaties met erosie.

In het onderzoek is geconcludeerd dat de stochastische benadering en de scenariobenadering nagenoeg hetzelfde beeld laten zien van de verwachte bodemverandering na 10 jaar. Op 85% van het traject is het verschil tussen beide kleiner dan 5 cm. Door de stochastische analyse is gebleken dat de voorspelling met het gemiddelde afvoerscenario vrij representatief is.

Daarnaast is geconcludeerd dat de 90% betrouwbaarheidsband van de stochastische benadering voor het gehele traject groter is dan de betrouwbaarheidsband die werd opgespannen tussen het natte en droge scenario. Door de stochastische analyse is gebleken dat er een iets grotere onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie bestaat in de gemodelleerde bodemverandering dan op grond van de scenariobenadering werd verwacht. De absolute bandbreedte van de scenariobenadering is 9,3 cm en die van de stochastische analyse is 16,4 cm. Vooral op de verruimingslocaties en benedenstrooms van rkm 50 geeft de stochastische benadering aan dat er een grotere onzekerheid (oplopend tot zo'n 30 á 50 cm) heerst ten gevolge van de afvoervariatie dan werd aangegeven door de scenariobenadering. Het grootste verschil tussen beide zit in de onzekerheid ter plaatse van de erosielocaties. Op 20% van het traject wordt er door de stochastische benadering een grotere onzekerheid (verschil van 15 cm erosie of meer) aangegeven dan door de scenariobenadering.

*Vraag 5: Wat zijn de conclusies en aanbevelingen over de bodemverandering in de Grensmaas voor de rivierbeheerder?*

Het is een geruststelling voor de beheerder dat de onzekerheid in de bodemverandering van de Grensmaas ten gevolge van de afvoervariatie al vrij goed is weergegeven door de scenariobenadering van het MER 2003. De modelresultaten van SOBEK laten nagenoeg dezelfde 50% verwachtingswaarde van de bodemverandering na 10 jaar zien dan werd aangegeven door de berekening met het gemiddelde afvoerscenario. De beheerder moet zich er echter wel van bewust zijn dat de onzekerheid t.g.v. de afvoer groter is dan met de scenariobenadering werd verondersteld. Vooral ter plaatse van de verruimingslocaties en benedenstrooms van rkm 50 is een grotere onzekerheid te verwachten.

De beheerder zal vooral ter plaatse van Itteren, Aan de Maas en Urmond het bodemniveau goed moeten monitoren. Op deze locaties vertoont de grindlaag volgens het modelresultaat serieuze slijtage. Ook is het belangrijk om vooral ter plaatse van de verruimingslocaties (direct bovenstrooms en aan het begin van de splitsing) en benedenstrooms van Roosteren (rkm 50) de bodemligging te monitoren. Volgens het modelresultaat bestaat op deze locaties de grootste onzekerheid.

## 9.2 Aanbevelingen

### 9.2.1 Grensmaasmodel

1. Aanbevolen wordt om de randvoorwaarde van het sedimenttransport op de splitsingspunten te wijzigen. De evenredige verdeling moet gewijzigd worden in een exponentiele verdeling. Mogelijk wordt hiermee het modelresultaat ter plaatse van Grevenbicht en de Koeweide betrouwbaarder.

## 9.2.2 Onzekerheidsanalyse

2. In dit onderzoek zijn enkel de onzekerheden in de modelinputs en modelparameters beschouwd. Voor een compleet overzicht moeten ook de onzekerheden in de modelcontext en modelstructuur worden meegenomen. Het gegenereerde 90% betrouwbaarheidsinterval is uiteindelijk enkel een betrouwbaarheidsinterval waarin de onzekerheid ten gevolge van de afvoervariatie is beschouwd. Aanbevolen wordt om de onzekerheidsanalyse uit te breiden met de onzekerheid ten gevolge van de korrelgrootte en de zomerbedruwheid en de onderlinge correlaties. De vraag is in welke mate de 90% betrouwbaarheidsband dan toeneemt.
3. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de Crude Monte Carlo methode. Er wordt aanbevolen om te onderzoeken of de Quasi Monte Carlo methode ook een goed toepasbare methode is. Mogelijk kan door middel van deze methode met minder simulaties een stochastische onzekerheidsanalyse worden gemaakt.
4. Grafiek B.3 tot B.6 in Bijlage 2 tonen dat er mogelijk een trend bestaat in de historische afvoerreeks. Vanaf de jaren '70 is er een toenemende trend te ontdekken in zowel de maximale afvoeren, het aantal dagen per jaar dat de afvoer boven de 1200 m<sup>3</sup>/s uitkomt en de standaardafwijking van de afvoer per jaar. De analyse van deze trend in de afvoer is in dit onderzoek echter zeer beperkt gedaan. De grafieken geven echter wel aan dat er dus mogelijk een trend van toename te ontdekken is in de afvoer van de Maas. Bij het genereren van nieuwe afvoerreeksen zou een mogelijke trend in de afvoerreeks eigenlijk meegenomen moeten worden. Onderzocht moet worden of er daadwerkelijk een trend bestaat in de historische Maasafvoer. En zo ja, hoe de Nearest Neighbour methode deze trend dan kan meenemen in het genereren van nieuwe afvoerreeksen. Mogelijk kan dit gedaan worden door een hoger gewicht toe te kennen aan recentere jaren.
5. De nieuw gegenereerde afvoerreeksen zijn enkel gebaseerd op de historische afvoerreeks. Hierdoor worden enkel dagafvoeren die in de historische datareeks voorkomen gebruikt in de nieuwe afvoerreeksen. Voor dagafvoeren tot 600 m<sup>3</sup>/s is dit geen probleem aangezien de dichtheid van de afvoeren in dit domein groot is. Echter voor dagafvoeren boven 1200 m<sup>3</sup>/s is de dichtheid veel kleiner. In dit domein zullen bepaalde dagafvoeren niet voorkomen en is de nieuw gegenereerde afvoerreeks dus gebonden aan de dagafvoeren die in de historische reeks voorkomen. Op deze manier is het maximum in de historische datareeks ook de hoogst mogelijke dagafvoer in de nieuw gegenereerde reeksen. Het wordt aanbevolen om de Nearest Neighbour methode te voorzien van een 'hoge afvoer voorspeller'. Deze voorspeller moet het mogelijk maken dat er ook waarden van dagafvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s kunnen voorkomen in de nieuwe reeksen, terwijl deze waarden niet in de historische reeks voorkomen.
6. In dit onderzoek is in de Nearest Neighbour methode de grootte van het window op 31 dagen gesteld. Voor de waarde van het aantal Nearest Neighbours is minimaal 20 genomen. In dit onderzoek is geen studie gedaan naar de optimale instellingen van deze waarden. Mogelijk bestaat er een optimalere waarde voor deze twee parameters zodat de Maasafvoer nog representatiever wordt beschreven.



### 9.2.3 Modelresultaat

7. De onzekerheid ten gevolge van de afvoer is met name op de verruimingslocaties relatief groot. Daarbij komt nog dat juist op deze locaties 2D stromingsverschijnselen een belangrijke rol spelen. Deze processen zijn in dit onderzoek niet beschouwd, hetgeen de werkelijke heersende onzekerheid groter zal maken. De rivierbeheerder zal dan ook vooral ter plaatse van de verruimingslocaties goed moeten monitoren. Aangezien de grootste veranderingen worden voorspeld na een afvoergolf, moet dit monitoren gebeuren in het winterseizoen rond een afvoergolf.
8. Het blijkt dat de trend in de bodemontwikkeling van de stochastische benadering overeen komt met de trend van de scenariobenadering in de eerste 10 jaar. Over de trend van de bodemontwikkeling over een langere periode dan 50 jaar kan slechts met grote onzekerheid een hypothese worden gegeven. Hierdoor is het niet mogelijk te concluderen of de scenariobenadering een representatief beeld geeft van de bodemverandering na 50 jaar. Om de hypothese te toetsen is verder onderzoek nodig. Dit onderzoek kan bestaan uit nogmaals 300 simulaties, maar dan met een simulatieduur van 50 jaar. Hierin moet echter rekening gehouden worden met zeer lange rekentijden. Punt 10 geeft aan dat dit mogelijk ook met een kleiner aantal simulaties mogelijk is.
9. Het wordt aanbevolen om de karakteristieken van de afvoerreksen welke het beste het 5%, 50% en 95% betrouwbaarheidsinterval benaderen verder te onderzoeken. Als deze karakteristieken en de samenhang tussen de karakteristieken beter bekend zijn, dan kunnen mogelijk nieuwe langdurige afvoerreksen met dezelfde karakteristieken worden gegenereerd. Met deze nieuwe slim gegenereerde afvoerreksen kunnen dan nieuwe simulaties worden gemaakt. Hierdoor kan met een kleiner aantal sommen toch een betrouwbaarheidsinterval worden gegenereerd. In dit onderzoek is gebleken dat voornamelijk de lange simulatieduur een nadeel is van de Monte Carlo methode. Door het kleiner aantal sommen wordt het mogelijk om toch een lange termijn berekening uit te voeren. Op deze manier wordt dus weer min of meer terug gegaan naar een scenariobenadering. Het verschil is echter dat niet zomaar 'dom' een reeks wordt gebouwd van hoge afvoeren, maar dat dit gebeurt op basis van bekende statistieken van afvoeren die het best een bepaalde verwachtingswaarde benaderen.



## 10 LITERATUUR

### 10.1 Literatuur

Voor dit onderzoek zijn de volgende boeken, artikelen, memo's en rapporten gebruikt:

- Asselt, M.B.A. van (2000). Perspectives on uncertainty and risk; the PRIMA approach to decision support, Ph.D.dissertation, univ. v. Maastricht
- Berkhout, W.A. (2003). Modelling of large scale morphological processes in sand-gravel rivers, analytical and numerical analysis of graded morphological processes in the river Meuse, M.sc thesis, University of Twente
- Blom, A. (2003). A vertical sorting model for rivers with non-uniform sediment and dunes, Ph.D.dissertation, University of Twente.
- Buishand, T.A & Beersma, J.J. (1993). Jackknife tests for differences in autocorrelation between climate time series, Journal of Climate, Vol 6, no 12.
- Akkerman, G.J. e.a. (2003). *MER Grensmaas 2003, Hoofdrapport*, Royal Haskoning i.o.v RWS De Maaswerken en Provincie Limburg.
- Agtersloot, R.C. (2003). *MER Grensmaas 2003, achtergronddoc. Rivierkunde*, Royal Haskoning & Meander i.o.v. RWS De Maaswerken
- Akkerman, G.J. e.a. (2003). *MER Grensmaas 2003, achtergronddoc. Morfologie*, Royal Haskoning & Meander i.o.v. RWS De Maaswerken
- Duizendstra, H.D. (1999). *Sedimenttransport in de Grensmaas, transportcapaciteit en aanbod van sediment*. working document 99.158x, RIZA, RWS
- Duizendstra, H.D. & Flokstra, C. (1997). *Graded sediment in Sobek*. Joint research Riza and delft Hydraulics, working document 96.193x, research report Q2128
- Duizendstra, H.D. & Flokstra, C. (1998b). *Graded sediment in Sobek*. Joint research Riza and delft Hydraulics, working document 98.150x, research report Q2347
- Janssen, P.H.M. W. Slob & J. Rotmans (1990). *Gevoeligheidsanalyse en onzekerheidsanalyse; een inventarisatie van ideeën, methoden en technieken*. RIVM, Bilthoven, rapportnr. 958805001
- Klis, H. van der. (2003). Uncertainty analysis applied to numerical models of river bed morphology, Ph.D.dissertation, TU Delft
- Klis, H. van der & Jagers H.R.A. (2005). Quasi Monte Carlo method applied to a river morphological case study, ISSH-stochastic hydraulics 2005.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms & processes, a new perspective*, London: Arnold publishers

- Kolkman, M.J. (2000). *Dictaat IMOD-A: Inleiding modelleren, syllabus+ bijlagen*, vakcode 221231, dictaatnummer 875, Universiteit Twente
- Kroekenstoel, D.F en E.H. van Velzen (2003). *Morfologisch rekenen met sedimentregels, toekomstmuziek of reëel alternatief?*, werkdocument 2003.139x, RIZA.
- Kuipers, J. (2002), *Transport formules in SOBEK gegradeerd* (memo, 2e versie).
- Lall, U. & Sharma, A. (1996). A Nearest Neighbour bootstrap for resampling hydrologic time series, water resources research, vol 32. no 3. p 679-693.
- Leander, R. & Buishand, T.A. (2004). Rainfall generator for the Meause basin, development of a multi-site extension for the entire drainage area, KNMI 196-III.
- Ledden, M. van. (2003). *Sedimenttransport Grensmaas*, RWS Limburg (memo).
- Meijer, D. e.a. (2003). *Nader onderzoek SOBEK morfologie, Grensmaasproject*. Eindrapport, LB-7231, Royal Haskoning en Meander i.o.v RWS De Maaswerken
- Morgan, M. Granger, M. & Henrion (1990). *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in qualitative risk and policy analysis*, Cambridge university press.
- Oosting, D.H. (2001). Een zekere Onzekerheid, M.sc. thesis, Universiteit Twente
- Noordam, D. et al. (2005). Uncertainties concerning roughness modelling in flume experiments. ISSH-stochastic hydraulics 2005.
- Rajagopalan, B. & Lall, U. (1999). A k-nearest Neighbour simulator for daily precipitation and other weather variables, water res. research, Vol 55. no 10, p3089-3101.
- Scheer, P. van der et al. (2002). Transport formulas for graded sediment: behaviour of transport formulas and verification with data, M.sc. thesis, University of Twente
- Sloff, C.J. (2000). *Graded sediment in SOBEK 2.5.1*. ASCII input file (memo)
- Verschuren, P. & H. Doorewaard. (1995). *Het ontwerpen van onderzoek*, Utrecht
- Vose, D. (2000). *Risk analyses, a quantitative guide*, John Wiley&Sons Ltd England
- Vuren, B.G. van. et al (2002), Large-scale floodplain lowering along the River Waal: a stochastic prediction of morphological impacts. River Flow 2002 - Volume 2 pp. 903-912
- Vuren, B.G. van (2005), Stochastic modelling of lowland river morphology. PhD thesis. Delft University of Technology. (In preparation).

- Vuren, B.G. van et al (2004) Stochastic modeling of the impact of flood protection measures along the river Waal in the Netherlands. Natural Hazards. (uncorrected proof).
- Walker, W.E. et al. (2003). Defining Uncertainty, a conceptual basis for Uncertainty Management in model-based decision support, Integrated assessment, vol4. no1 p5-17.

## 10.2 Websites

De volgende websites zijn tijdens het onderzoek geraadpleegd:

[www.demaaswerken.nl](http://www.demaaswerken.nl)

De website van Rijkswaterstaat De maaswerken. Op deze site is alle informatie en zijn al uitgebrachte rapporten over het Grensmaasproject te vinden

[www.waterstat.nl](http://www.waterstat.nl)

Op deze website presenteert rijkswaterstaat haar meetgegevens. Vanaf deze website is de historische afvoerreeks bij Eijsden tussen 1911-2003 gedownload.

[www.sobek.nl](http://www.sobek.nl)

De website van WL|delft Hydraulics over het softwarepakket SOBEK.

## 10.3 Contact

Tijdens het onderzoek is er met de volgende personen persoonlijk, telefonisch of per e-mail contact geweest:

- Adri Buishand, KNMI.  
Contact gehad over de toepasbaarheid van de Nearest Neighbour methode
- Hanneke van der Klis, WL Delft  
Contact gehad over raakvlakken van haar promotieonderzoek en dit onderzoek.
- Saskia van Vuren, aio civiele techniek TU Delft  
Contact gehad over raakvlakken van haar promotieonderzoek en dit onderzoek.
- Douwe Meijer, Meander advies en onderzoek  
Contact gehad over het MER Grensmaas 2003 en de onzekerheden hierin.
- Kees Sloff, WL Delft  
Contact gehad over onzekerheden in modellen en uitvoering gevoeligheidsanalyse
- Flip Dirksen, RIZA, SOBEK helpdesk  
Meerdere malen contact gehad over het werken met SOBEK-graded en het aanmaken van een batch-file om meerdere simulaties achtereen te maken.



## Bijlagen

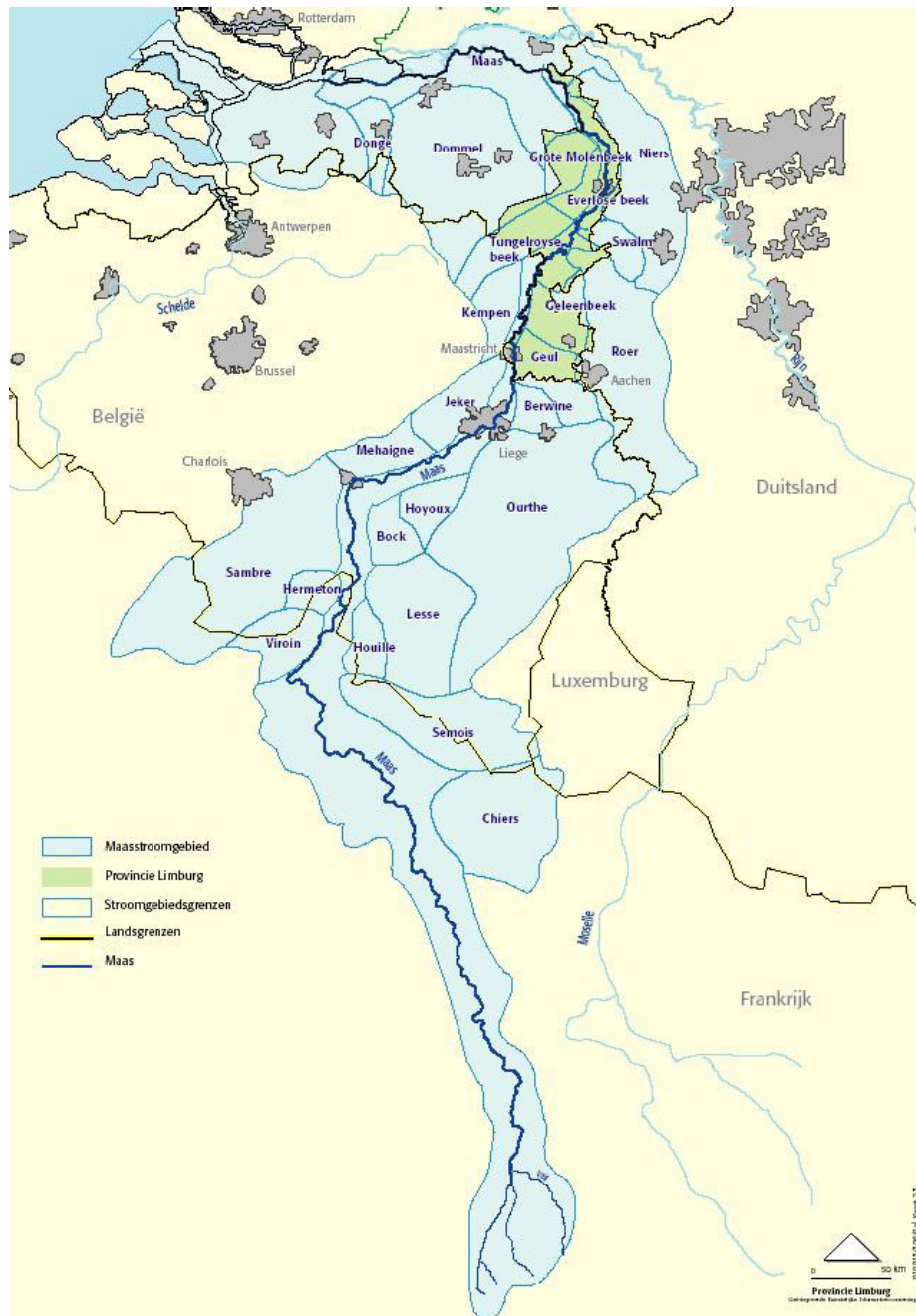
Bijlage 1:	Stroomgebied Grensmaas
Bijlage 2:	Statistieken Afvoer Maas
Bijlage 3:	Schematisatie van fracties in onderlagen
Bijlage 4:	Voorkeursalternatief Grensmaasproject
Bijlage 5:	Instellingen simulaties in SOBEK-graded
Bijlage 6:	Instellingen simulaties gevoeligheidsanalyse
Bijlage 7:	Instellingen simulaties onzekerheidsanalyse
Bijlage 8:	Resultaten Grensmaasmodel MER 2003
Bijlage 9:	Afvoer-transport relatie Duizendstra
Bijlage 10:	De Nearest Neighbour methode
Bijlage 11:	Representativiteit Nearest Neighbour methode
Bijlage 12:	Berekening verwachte aantal simulaties
Bijlage 13:	Onzekerheid bodemligging Grensmaas
Bijlage 14:	Ontwikkeling bodemsamenstelling na 10 jaar
Bijlage 15:	Bepalende afvoerreeksen





## Bijlage 1: Stroomgebied Maas

Deze bijlage toont het totale stroomgebied van de Maas.

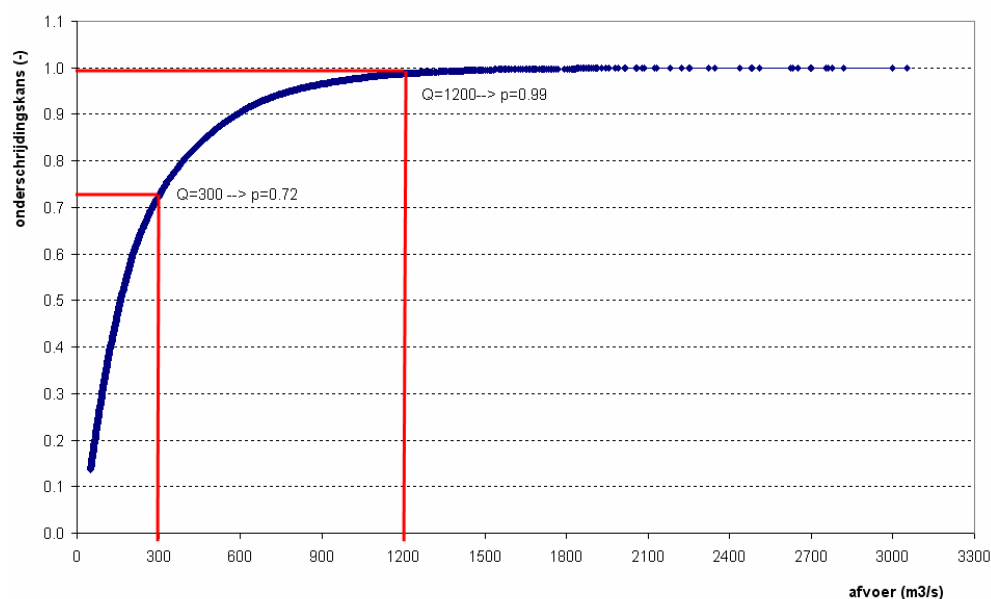


Figuur B.1: Stroomgebied van de Maas

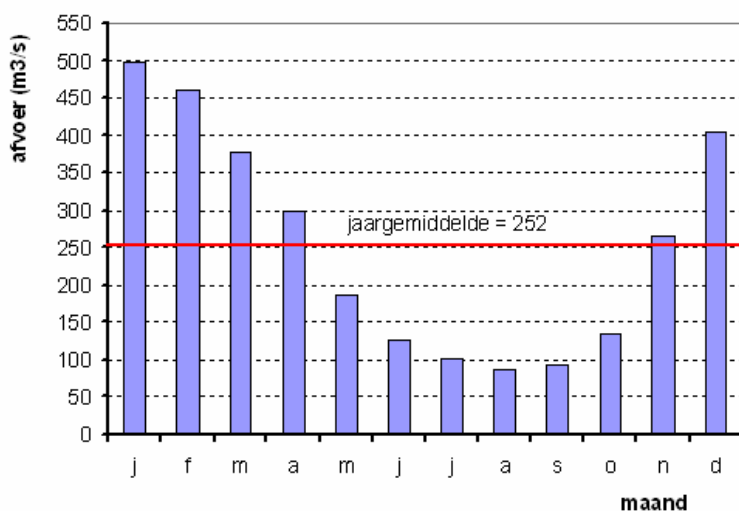


## Bijlage 2: Statistieken Afvoer Maas

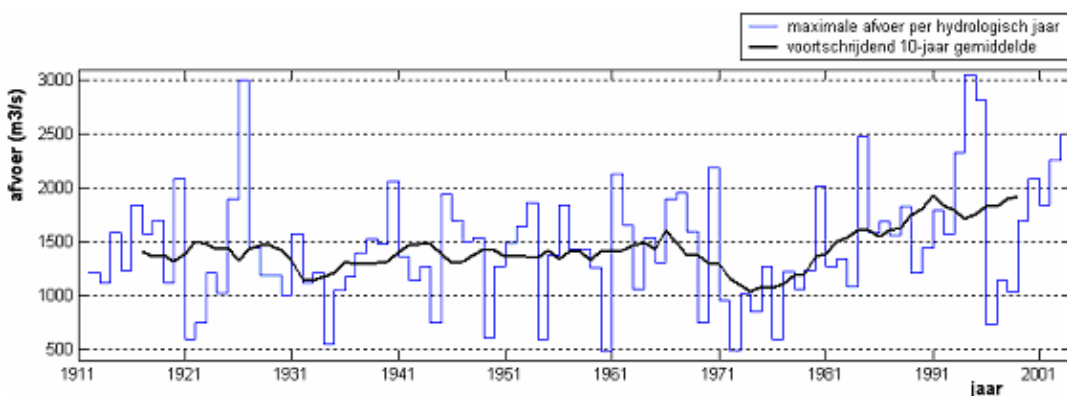
Deze bijlage geeft inzicht in enkele statistieken van het afvoerverloop in de Grensmaas. De statistieken zijn bepaald op basis van de beschikbare afvoergegevens van de Maas bij Eijsden tussen 1/1/1911 en 31/12/2003. De gegevens zijn afkomstig van de website [www.waterstat.nl](http://www.waterstat.nl). Op deze website presenteert Rijkswaterstaat haar meetgegevens van onder andere de afvoer.



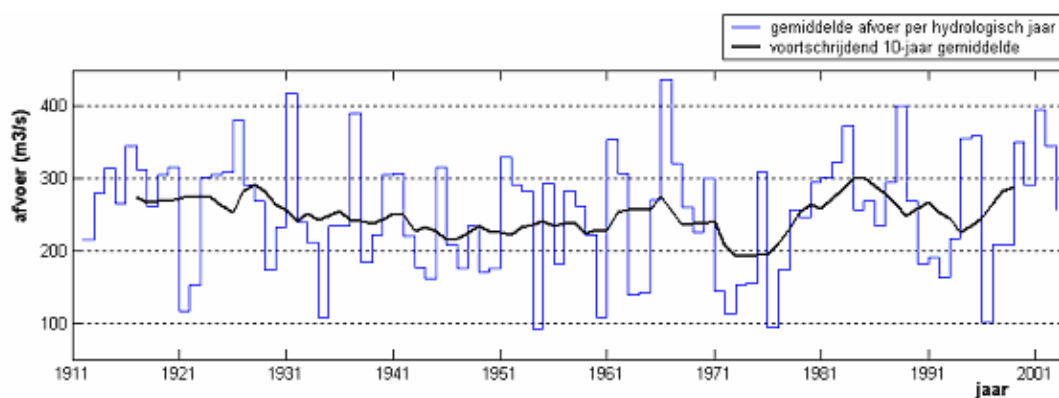
Grafiek B.1: Cumulatieve verdelingscurve maasafvoer bij Eijsden (1911-2003)



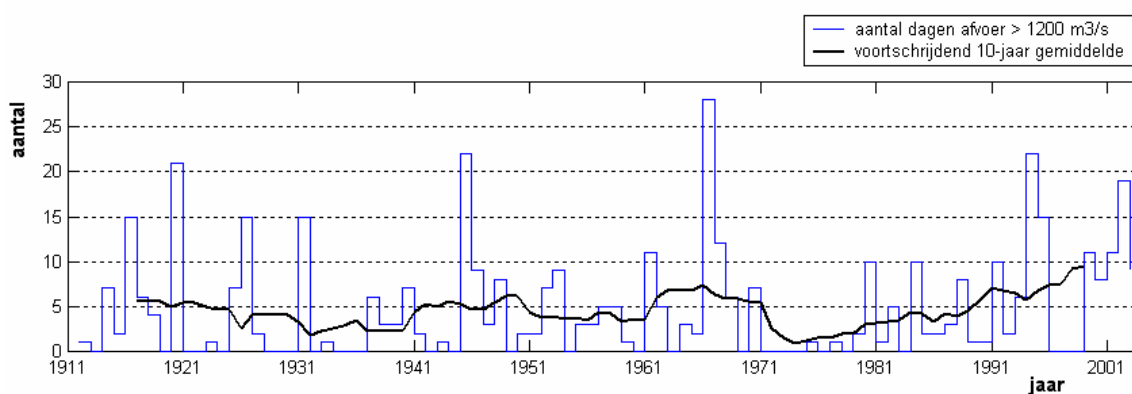
Grafiek B.2: Gemiddelde maandafvoer de Maas bij Eijsden (1911-2003)



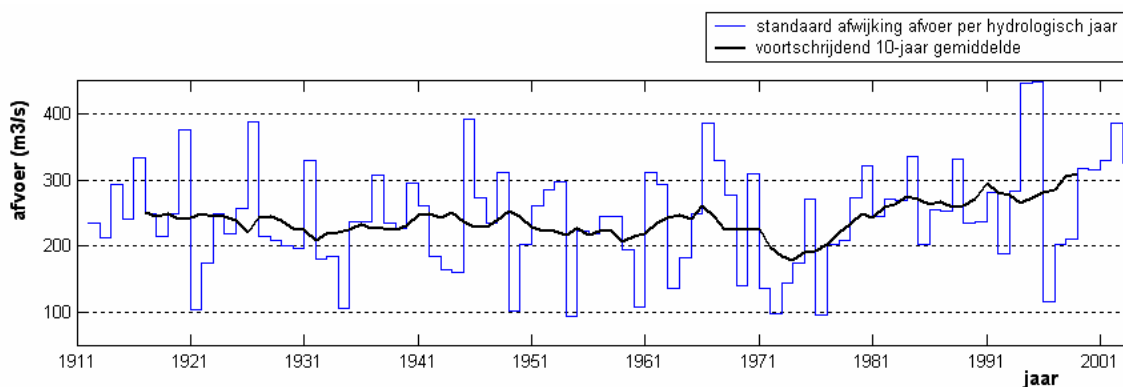
Grafiek B.3 Maximale dagafvoer per jaar met daarin de trend



Grafiek B.4 Gemiddelde dagafvoer per jaar met daarin de trend



Grafiek B.5 Aantal dagen dat afvoer boven 1200 m<sup>3</sup>/s uitkomt per jaar met daarin de trend



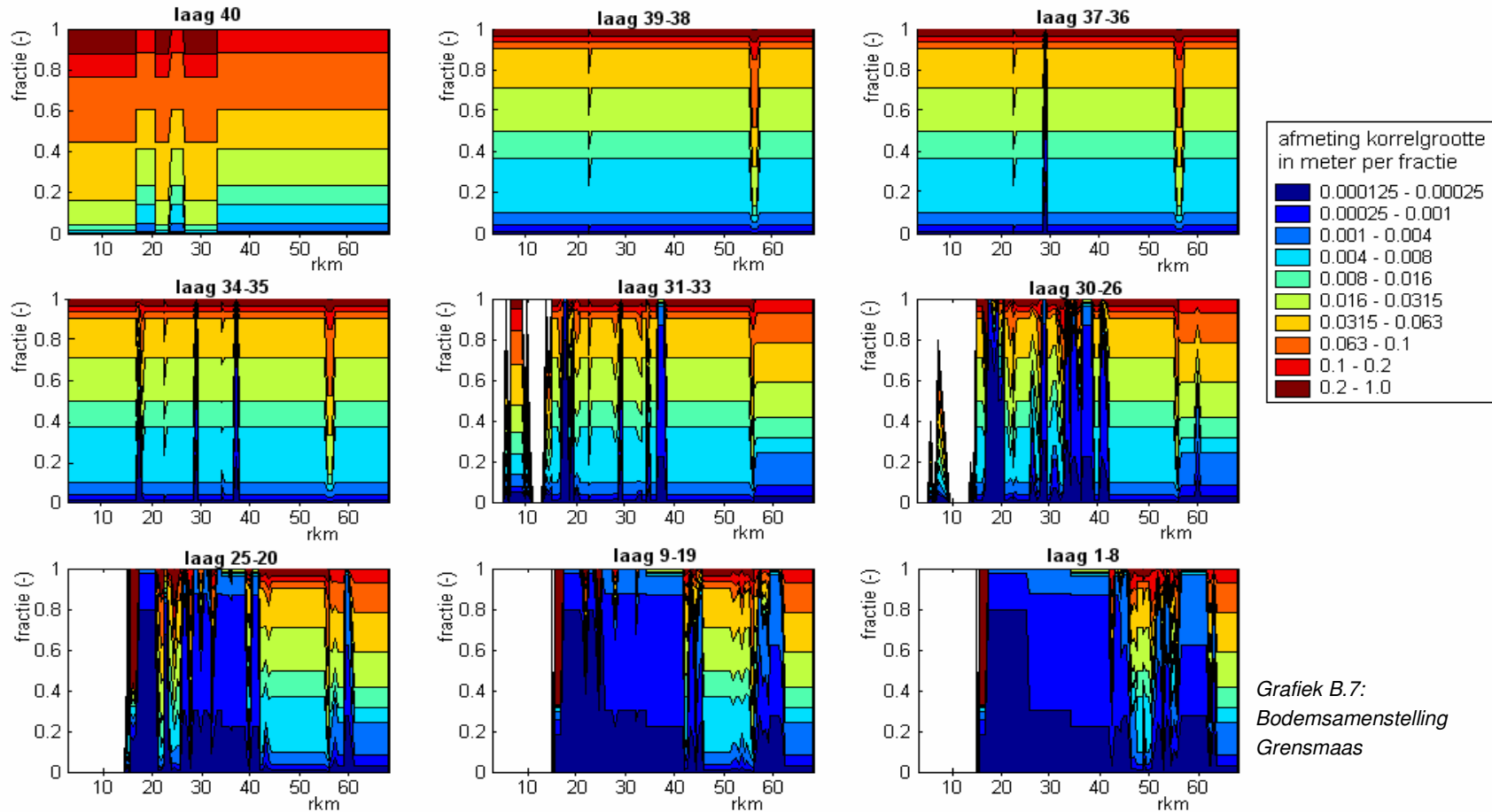
Grafiek B.6: Standaardafwijking van de afvoer per jaar met daarin de trend

Grafieken B.3 tot en met B.6 tonen dat er mogelijk een trend bestaat in de afvoer. Vanaf de jaren '70 is er een toename te ontdekken in de trend van zowel de maximale afvoeren, het aantal dagen per jaar dat de afvoer boven de 1200 m<sup>3</sup>/s uitkomt en de standaardafwijking van de afvoer per jaar. De trends zijn geplot aan de hand van het voortschrijdende gemiddelde per 10 jaar. Op grond van deze grafieken kan echter geen definitieve uitspraken worden gedaan. Hiervoor is de analyse te beperkt. Om definitieve uitspraken te kunnen doen is uitvoeriger onderzoek nodig met verschillende statistische methodes. Daarnaast moeten ook op zaken zoals hydrologie, verandering landgebruik en klimaatverandering worden meegenomen. Deze zaken gaan te ver om binnen dit onderzoek mee te nemen. De grafieken geven echter wel aan dat er dus mogelijk een toename in de trend te ontdekken is in de afvoer van de Maas.



### Bijlage 3: Schematisatie van fracties in onderlagen

In SOBEK-graded is de bodemsamenstelling van het zomerbed van de Grensmaas geschematiseerd in 40 lagen. Laag 40 is de toplaag met een dikte van 12 cm. Lagen 39 tot 1 hebben een dikte van 25 cm. Per rekenpunt wordt de samenstelling van elke laag gesplitst in 11 fracties. In deze figuur is per laag het aandeel van elke fractie (-) uitgezet tegen de locatie (in rkm). Lagen waarvan de samenstelling nauwelijks verschilt zijn samengenomen, zoals bij laag 9 tot 19.



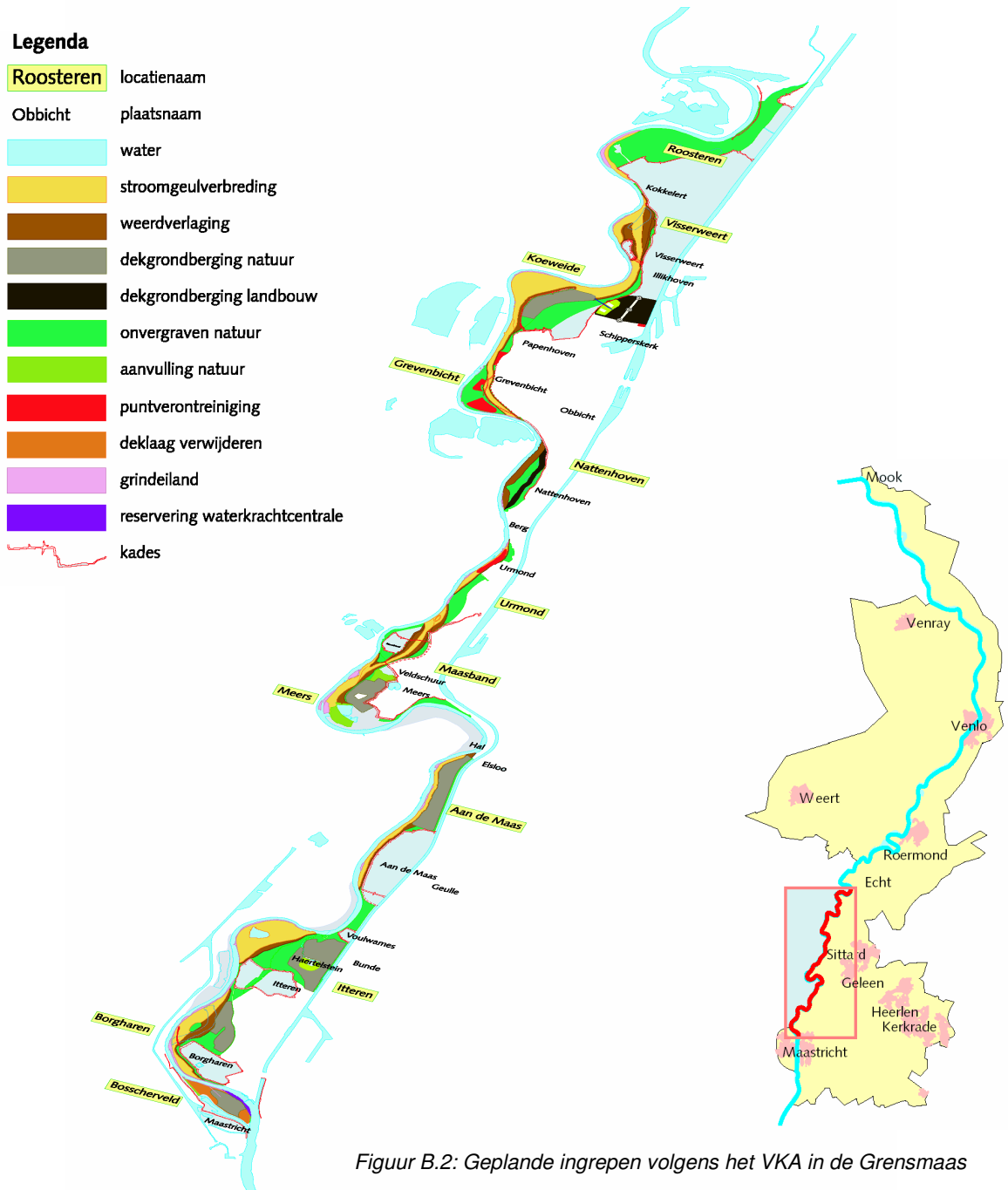
Grafiek B.7:  
Bodemsamenstelling  
Grensmaas





## Bijlage 4: Voorkeursalternatief Grensmaasproject

In deze bijlage is het Grensmaasgebied weergegeven met de geplande ingrepen volgens het Voorkeursalternatief 2003. De figuur is afkomstig uit de folder Eindplan Grensmaas, december 2001. Deze folder is te downloaden vanaf [www.demaaswerken.nl](http://www.demaaswerken.nl) (14-6-2005)



Figuur B.2: Geplande ingrepen volgens het VKA in de Grensmaas



## Bijlage 5: Instellingen simulaties in SOBEK-graded

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de algemene instellingen in SOBEK-graded zoals deze tijdens het MER 2003 in het Grensmaasmodel zijn gezet. Daarnaast wordt ingegaan op de complexiteit van het modelleren van gegradeerd sedimenttransport.

### 5.1 Algemeen geldende invoergegevens

De algemene invoergegevens geven aan hoe de Grensmaas binnen SOBEK-graded is geschematiseerd. De onderstaande gegevens gelden voor alle gebruikte simulaties.

1. Het hoogtemodel van het zomerbed is bepaald op basis van hoogtemodellen uit 1978, 1987 en 1995. De hoogtemodellen uit 1978 en 1987 dekken enkel de Grensmaas tussen rkm 15 tot rkm 56. Het hoogtemodel van het winterbed is gebaseerd op data uit 1995.
2. De hydraulische randvoorwaarde wordt benedenstrooms gevormd door de QH-relatie bij Heel-boven. Benedenstrooms geldt de afvoerreeks bij Eijsden met de waarde van de afvoer per dag in m<sup>3</sup>/s. Er is een minimale afvoer gesteld van 50 m<sup>3</sup>/s. Zodoende stroomt er altijd een minimale afvoer van 20 m<sup>3</sup>/s door de Grensmaas. Zo wordt voorkomen dat de Grensmaas droog valt en het model instabiel wordt. In het MER 2003 is gebruik gemaakt van 4 afvoerscenario's, deze zijn weergegeven in bijlage 5.3 en grafiek 3-2.
3. De morfologische randvoorwaarde is bovenstrooms gesteld op nul. Aangenomen is dat er geen sediment vanuit België de Grensmaas instroomt. Benedenstrooms is de randvoorwaarde vrij gelaten, SOBEK berekent zelf het uitstromende transport.
4. Op de splitsingspunten is aangenomen dat het sedimenttransport zich evenredig met de afvoer zal verdelen over de twee takken. Meer hierover staat in bijlage 5.5.
5. Bij de bouw van het ondergrondmodel is de dikte van de afpleisteringslaag bepaald op 0,12 m en de dikte van de onderlagen op 0,25 m. Deze waarden zijn gebaseerd op metingen door TNO-NITG. Deze metingen zijn voornamelijk in het winterbed genomen. Verondersteld wordt dat de gemeten waarden ook bruikbaar zijn voor het zomerbed.
6. Op 8 locaties zijn zijdelingse toevoegingen of onttrekkingen ingevoerd. Het gaat hier om toevoegingen door zijbeken (Jeker, Geul, Langbroekbeek, Witbeek en de Thornerbeek) en onttrekkingen door de Zuid-Willemsvaart en het Julianakanaal en een lozing door de Sluis bij Ternaaien.
7. De zomerbedruwheden zijn overgenomen uit het WAQUA model. De winterbedruwheden zijn bepaald uit BASELINE-ecotopen.
8. Het sedimenttransport wordt voorspeld door de formule van Wu et al (2000).
9. De tijdstap is ingesteld op 3 uur en het aantal iteraties op 100. Het maximaal toelaatbare Froude-getal is gesteld op 5.

### 5.2 Calibratie en verificatie Grensmaasmodel

De modelkalibratie loopt van 16-10-1978 tot 6-4-1995. In de calibratie is de samenstelling van de afpleisteringslaag en de hoeveelheid transport als vrijheidsgraad genomen. In het benedenstroomse deel van de Grensmaas is een fijnere afpleisteringslaag toegepast, omdat het transport te laat op gang kwam in het model. Op 2 locaties (rkm 22 en rkm 55-57) is een grovere samenstelling van de bodem nodig

geweest om extreme erosie te voorkomen. De hoeveelheid transport is gecalibreerd door middel van een vermenigvuldigingsfactor per tak.

De modelverificatie loopt van 1-9-1978 tot 6-4-1995. In de verificatie is het benedenstroomse gedeelte vanaf Roosteren tot Heel-boven (rkm 56-68) buiten beschouwing gelaten. Over dit gedeelte zijn enkele bodemhoogtes uit 1995 bekend. Uit de verificatie blijkt dat de modelsimulaties een voldoende mate van nauwkeurigheid bieden voor het traject tussen rkm 2 en 56.

### 5.3 Scenario's afvoerreeksen

In het MER 2003 zijn voor de schematisatie van het voorkeursalternatief en de autonome situatie 4 afvoerscenario's als invoer gebruikt voor de 100-jarige simulaties. Deze afvoerscenario's zijn als volgt:

1. Historische afvoerreeks op basis van afvoerdata 1911-1998
2. Gemiddelde afvoerreeks op basis van 10 maal de afvoerreeks 1950-1960
3. Natte afvoerreeks op basis van 10 maal de afvoerreeks 1980-1990
4. Droge afvoerreeks op basis van 10 maal de afvoerreeks 1970-1980

### 5.4 Model autonome situatie

De modelschematisatie autonome situatie of 'nulalternatief' schematiseert de situatie als het Grensmaasproject niet wordt uitgevoerd. Ook is aangenomen dat het proefproject bij Meers niet wordt uitgevoerd. De rivier is opgedeeld in 22 taken, waarvan 2 nevengeulen (Bosscherveld en Stevensweert). In totaal bestaat het model uit 162 rekenpunten. Als startdatum voor de autonome simulatie is het jaar 2015 genomen. De bodemhoogte van het winter- en zomerbed is echter gebaseerd op metingen uit 1995. Hierdoor wordt feitelijk de morfologische ontwikkeling tussen 1995 en 2015 verwaarloosd. Dit is echter consistent met alle onderzoeken die voor de Maaswerken worden uitgevoerd.

### 5.5 Model Voorkeursalternatief

De modelschematisatie 'Voorkeursalternatief' schematiseert de situatie als het Grensmaasproject wel wordt uitgevoerd. Als begindatum van de simulaties is het jaar 2015 genomen, aangezien dit de verwachte realisatiedatum van het Grensmaasproject is. In de modelschematisatie zijn de 12 geplande ingrepen verwerkt:

1. Weerdverlaging bij Bosscherveld (rkm 14,8-16,6)
2. Stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Borgharen (rkm 16,4-19,3)
3. Stroomgeulverbreding/bochtafsnijding en weerdverlaging bij Ifteren (rkm 20-22,4)
4. Stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Aan de Maas (rkm 24-28,2)
5. Nevengeul en weerdverlaging bij Meers (rkm 31-34)
6. Nevengeul en weerdverlaging bij Maasband (rkm 34-36,2)
7. Stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Urmond (rkm 36,5-38)
8. Weerdverlaging bij Nattenhoven (rkm 39-40,6)
9. Nevengeul bij Grevenbicht (rkm 41,7-44,5)
10. Stroomgeulverbreding en weerdverlaging in de Koeweide (rkm 44,5-48,4)
11. Stroomgeulverbreding, nevengeul en weerdverlaging bij Vissersweert (rkm 48-51)
12. Stroomgeulverbreding en natuurontwikkeling bij Roosteren (rkm 51,2-52,9)

Voor de modelsimulaties van het VKA bleek het nodig te zijn om op een drietal locaties bodembescherming toe te voegen wegens de hoge stroomsnelheden die op deze locaties voor grote erosie zouden zorgen. Deze locaties zijn bij Kotem, bij Berg en bij

Obbicht. De bodembescherming is geschematiseerd door het vastzetten van de 2<sup>de</sup> laag (laag 39), de top laag (laag 40) is wel vrijgelaten.

De rivier is opgedeeld in 28 taken, waarvan 8 nevengeulen. In totaal bestaat het model uit 193 rekenpunten.

Uit de modelresultaten van het VKA blijkt dat het model initieel zeer extreme erosie en aanzanding voorspelt ter plaatse van Grevenbicht en de Koeweide. Er is geprobeerd dit probleem op te lossen door de bodembescherming bij Obbicht 2 kilometer verder door te trekken. Deze actie had echter het effect dat de extreme aanzanding veranderde in extreme erosie en vice versa. Waarschijnlijk komt de voorspelde extreme verandering van de bodem op deze locaties voort uit de veronderstelde randvoorwaarde voor de verdeling van het sedimenttransport op de splitsingspunten. Er is verondersteld dat het transport zich evenredig met de afvoer verdeelt op het splitsingspunt, of wel:

$$\frac{S_{tak1}}{S_{tak2}} = \frac{Q_{tak1}}{Q_{tak2}}$$

In werkelijkheid is dit niet evenredig doordat drie dimensionale stromingseffecten een rol spelen. Mogelijk is het beter om een exponentiele relatie te veronderstellen tussen de verdeling van de afvoer en het sedimenttransport bij een splitsingspunt, zodat geldt:

$$\left( \frac{S_{tak1}}{S_{tak2}} \right) = \left( \frac{Q_{tak1}}{Q_{tak2}} \right)^k$$

Op grond van de gebruikte transportvoorspeller van Wu et al (2000) zou de exponent (k) dan een waarde van 1,5 moeten hebben:

$$\left( \frac{S_{tak1}}{S_{tak2}} \right) = \left( \frac{Q_{tak1}}{Q_{tak2}} \right)^{1.5}$$

Deze waarde 1,5 is verondersteld op basis van de knooppuntsrelatie  $k=n/3$  (Fokkink, 1995). De transportvoorspeller van Wu et al kan versimpeld worden tot  $S = m \cdot u^n$  met een waarde van n van 4,4. De waarde van k is dan  $4,4/3 \approx 1,5$ .

Het veranderen van deze randvoorwaarde in SOBEK is helaas niet gelukt. Deze randvoorwaarde moet voor elke sediment fractie en elk splitsingspunt opgelegd worden in de file grainp.txt.

## 5.6 Complexiteit modelleren gegradeerd sedimenttransport

Het modelleren en voorspellen van het sedimenttransport voor gegradeerd sediment is zeer complex, dit komt o.a door de complexe processen en praktische problemen die spelen in een rivier met gegradeerde bedding. Hieronder zijn enkele van deze problemen die de modelleur tegen komt weergegeven.

### 1. Verschil in mobiliteit

Om een korrel in beweging te brengen is er een kritische schuifspanning ( $\tau_{b, cr}$ ) nodig. Aangezien de kritische schuifspanning afhankelijk is van de korreldiameter zou simpelweg gezegd kunnen worden dat startpunt van beweging afhankelijk is van korrelgrootte en dat dus kleinere korrels eerder gaan bewegen dan grotere. Echter de harde grens voor wel of geen beweging is in werkelijkheid minder hard. Turbulentieverschijnselen aan de bodem zorgen dat er druk- en

schuifspanningfluctuaties aan de bodem ontstaan. Ook de sortering en pakking van de bodem en de korrelvorm heeft effect. Dit alles zorgt ervoor dat een korrel eerder of later in beweging komt dan op basis van de kritische waarde wordt verondersteld (Kroekenstoel, 2003). Ook de vorming van bodemvormen heeft effect op de mobiliteit. De factor die de ruwheid ten gevolge van de bodemvormen in rekening brengt is de ribbelfactor ( $\mu$ ).

## 2. Hiding & exposure

In een sedimentmengsel heeft ook het onderlinge effect van korrels invloed op de kritieke schuifspanning. In een sedimentmengsel schermen de grote korrels, de kleine korrels af en liggen de grote korrels meer blootgesteld aan de stroming dan de kleine. Dit proces wordt hiding&exposure genoemd. Om dit effect mee te nemen in berekeningen wordt de hiding&exposure factor ( $\xi$ ) gebruikt. Deze factor corrigeert de kritische schuifspanning dusdanig dat de mobiliteit van grote korrels toeneemt en die van kleine korrels afneemt.

## 3. Sortering van de bodem

Door het verschil in mobiliteit tussen korrelfracties treedt er sortering op van de bodem. Deze sortering vindt plaats in zowel verticale, zijdelingse als longitudinale richting. In verticale richting kan gegradeerde rivierbeddingen een afpleisteringslaag ontstaan. Het openbreken of vormen van een afpleisteringslaag is een lastig te modelleren proces (Duizendstra, 1997). De Grensmaas is een rivier met vele bochten. In deze bochten vindt door secundaire stromingseffecten zijdelingse sortering en verlegging van de thalweg plaats. De secundaire stromingseffecten zijn echter niet te modelleren als gebruik gemaakt wordt van een 1-dimensionaal model.

## 4. Invullen onderlaagboekhouding

Een praktisch probleem bij het invullen van de onderlaagboekhouding in SOBEK-graded is de keuze voor het aantal fracties, de grenzen van de fracties, het aantal lagen en de laagdikte. Het aantal benodigde fracties kan geschat worden met een vuistregel van Khin Ni Thein (1989):  $N=5+6 \cdot \log(\sigma_g)$ .

De dikte van de toplaag kan worden gebaseerd op de  $D_{90}$  of  $D_m$ . Voor het invullen van de onderlaagboekhouding is veel data over de samenstelling van de bodem nodig. Deze data is echter niet altijd in het juiste formaat en de juiste hoeveelheid aanwezig.

## 4. Keuze transportvoorspeller

Er is een groot aantal transportvoorspellers beschikbaar met elk zijn eigen toepassingsdomein. Voor het Grensmaasproject is gekozen om gebruik te maken van de transportvoorspeller van Wu et al (2000). Uit onderzoek van Van der Scheer (2002) en Berkhout (2003) blijkt dat de voorspeller van Wu de meest realistische waarden geeft voor het transport in de Grensmaas. De transportformule van Wu, Wang en Jia is gekalibreerd voor een grote range lab- en velddata en bestaat uit zowel een formule voor bodemtransport als een voor suspensietransport. De transportvoorspeller voor het bodemtransport luidt als volgt:

$$s_{b,i} = p_i \sqrt{\Delta g D_i^3} \cdot 0,0053 \cdot \left[ \mu \cdot \frac{\tau_b}{\tau_{c,i}} - 1 \right]^{2.2}$$

De term  $\frac{\tau_b}{\tau_{c,i}}$  kan worden omgeschreven tot:  $\frac{hi}{\Delta D_i \theta_c \xi_i} = \frac{u^2}{C^2 \Delta D_i \theta_c \xi_i} = \frac{q^2}{h^2 C^2 \Delta D_i \theta_c \xi_i}$

De ribbelfactor wordt gegeven door:  $\mu = \left(\frac{n'}{n}\right)^{3/2} = \left[ \frac{\left(\frac{\sqrt[6]{D_{50}}}{20}\right)^{3/2}}{\left(\frac{h^{2/3} i^{1/2}}{u}\right)} \right]$

De kritische Shieldswaarde  $\theta_c$  heeft een waarde van 0,03.

De hiding & exposure factor,  $\xi_i$ , wordt gegeven door:

$$\xi_i = \left(\frac{P_{e,i}}{P_{h,i}}\right)^{-0.6} \quad P_{e,i} = \sum_{j=1}^N P_j \frac{d_i}{d_i + d_j} \quad P_{h,i} = \sum_{j=1}^N P_j \frac{d_j}{d_i + d_j}$$





## Bijlage 6: Instellingen simulaties gevoeligheidsanalyse

De IPV methode is uitgevoerd met de schematisatie van de autonome situatie. De simulaties lopen van 1/9/1978 tot 6/4/1995 met een tijdsstap van 3 uur. Hiermee zijn de instellingen gelijk aan die van de verificatieberekening. Totaal zijn er 16 simulaties gemaakt; 8 waarin steeds 1 van de 8 instelwaardes is verhoogd met 10% en 8 waarin steeds 1 van de 8 instelwaarde is verlaagd met 10%.

De instellingen van de 8 parameters zijn als volgt gespecificeerd in het Grensmaasmodel:

1. De historische dagafvoeren ( $m^3/s$ ) bij Eijsden van 1/9/1978 tot 6/4/1995 vormen de instelwaarde van de afvoer. De afvoerhoogtes zijn per dag gevarieerd met 10%.
2. In het model is voor elk rekenpunt de bodemsamenstelling opgedeeld in 11 fracties en 40 lagen. De 12 grenzen van de fracties (bijlage 3) zijn gevarieerd. Op deze manier worden de korrelgroottes in het totale ondergrondmodel 10% grover of 10% fijner.
3. In het model heeft de laagdikte van de toplaag een waarde van 0.12 m over het gehele traject. De waarde is voor het gehele traject gevarieerd tot 0,132 en 0,108.
4. De relatie tussen de afvoer en de zomerbedruwheid is per rekenpunt in SOBEK aangegeven. Voor elk van de gespecificeerde afvoeren is de bijbehorende ruwheid (uitgedrukt in de Chezy-coëfficiënt) met 10% verhoogd of verlaagd.
5. Voor elk rekenpunt is de winterbedruwheid gespecificeerd. Deze ruwheid (uitgedrukt in de Nikuradsewaarde) is afvoeronafhankelijk en is met 10% gevarieerd.
6. De kritische Shieldswaarde heeft in het model een waarde van 0,03 over het gehele traject. Deze waarde is gevarieerd met 10% tot 0,033 en 0,027.
7. De hiding&exposure factor heeft in het model een waarde van 0.6 over het gehele traject. Deze waarde is gevarieerd met 10% tot 0,66 en 0,54.
8. De calibratiefactor heeft in het model per tak een andere waarde. De waarde ligt voor elke tak boven de 1. De waarden zijn voor elke tak gevarieerd met 10%.



## Bijlage 7: Instellingen simulaties onzekerheidsanalyse

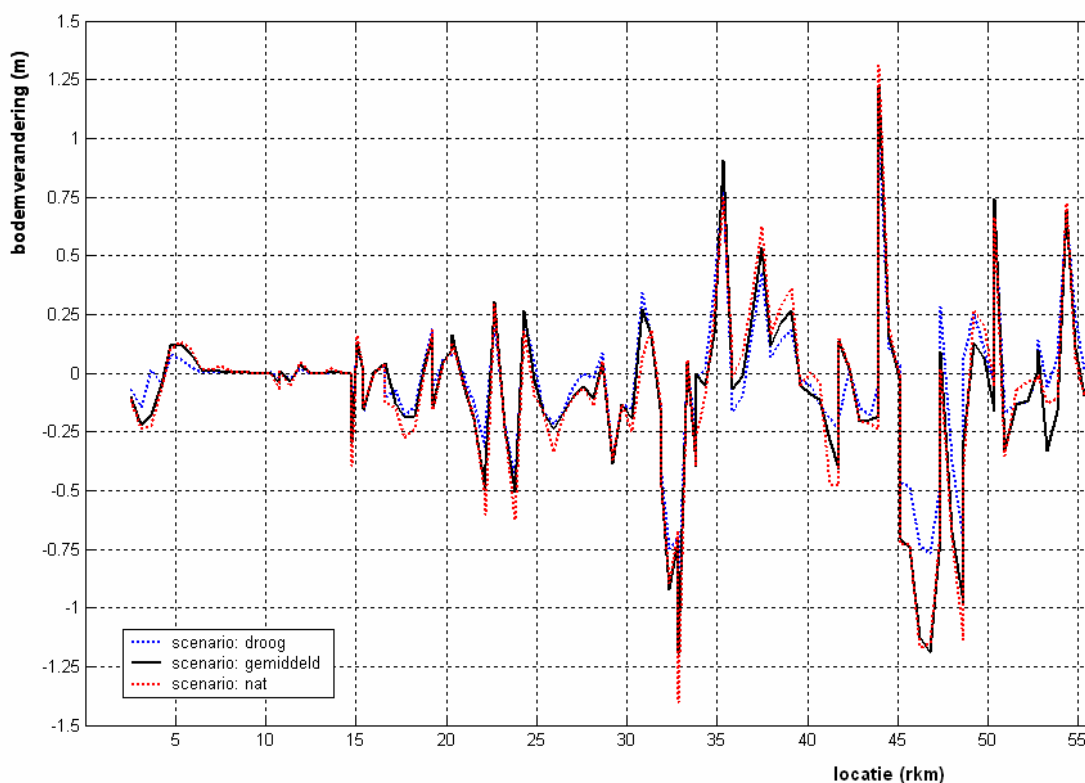
De Monte Carlo simulaties zijn uitgevoerd met de schematisatie van het VKA. Enkel de onderstaande instellingen zijn gewijzigd, de rest van de instellingen is gebleven zoals genoemd in bijlage 5.1 en 5.4. Het volgende is gewijzigd:

1. De tijdstap is voor de meeste simulaties op 3 uur gehouden. Echter door instabiliteit van de nevengeulen is het voor zo'n 30 á 40 simulaties nodig geweest deze tijdstap te veranderen naar een tijdstap van 1 uur.
2. De simulatieduur is gesteld op 10 jaar. De rekentijd bedraagt dan 40 tot 70 minuten afhankelijk van de tijdstap. Idealitair is een simulatieduur van 100 jaar gewenst aangezien deze duur in het MER 2003 is gebruikt. Echter de simulatieduur van zo'n 300 100-jarige simulaties is grofweg zo'n 2 maanden. Een eerder gekozen simulatieduur van 25 jaar bleek in zo'n 30 á 40% van de gevallen vast te lopen door instabiliteit van de nevengeulen. Deze instabiliteit kan deels verholpen worden door de tijdstap te reduceren van 3 uur naar 1 uur. Echter de rekentijden worden dan 2 tot 3 maal zo lang, wat zou neerkomen op een simulatieduur van een maand.
3. Elke simulatie heeft een andere 10-jarige afvoerreeks als input. De 10-jarige afvoerreeksen zijn gegenereerd met behulp van de Nearest Neighbour methode.



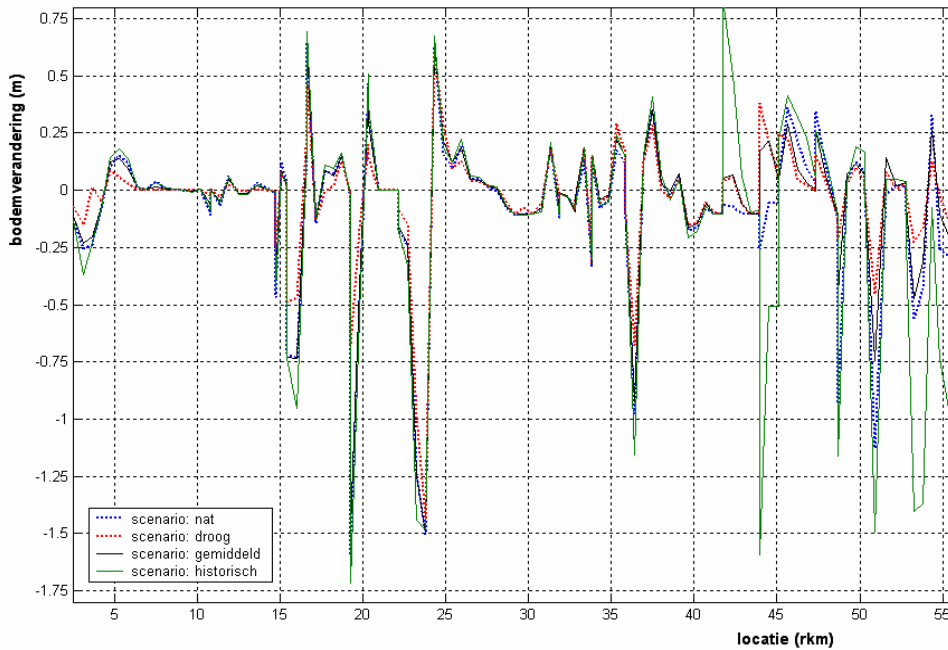
## Bijlage 8: Resultaten Grensmaasmodel MER 2003

In deze bijlage zijn de resultaten uit het morfologisch onderzoek voor het MER 2003 grafisch weergegeven. De grafieken tonen de grafische weergave van de conclusies die in paragraaf 3.3.2 al zijn besproken. Deze bijlage is dan ook slechts een grafische ondersteuning van deze paragraaf. Er is gekozen om de bodemverandering voor beide situaties (AO en VKA) na een periode van 10 jaar weer te geven. De grafieken tonen de bodemveranderingen na 10 jaar voor de 4 verschillende afvoerscenario's. Door de periode van 10 jaar zijn de grafieken vergelijkbaar met de resultaten van de Monte Carlo simulaties, welke ook een periode van 10 jaar beslaan.



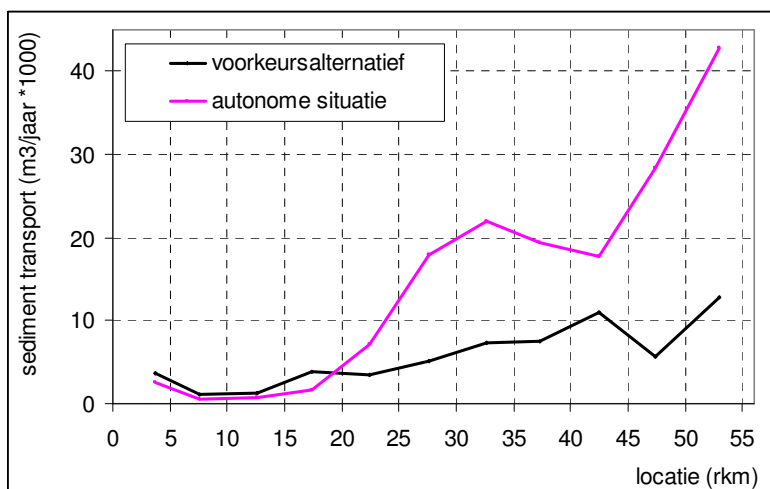
Grafiek B.8: De bodemverandering na 10 jaar volgens de autonome situatie. In de grafiek is de bodemverandering volgens 3 afvoerscenario's weergegeven.

Grafieken B.8 en B.9 tonen de bodemverandering in de Grensmaas (rkm 2-56) na 10 jaar. In de eerste 15 km komt er nauwelijks bodemverandering voor door de aanwezigheid van een zeer grove toplaag. Vanaf rkm 40 á 45 is de bodemverandering het grootst in beide situaties. Een vergelijking tussen het gemiddelde scenario in de figuren toont dat de bodemverandering in de autonome situatie groter is dan in het voorkeursalternatief.



Grafiek B.9: De bodemverandering na 10 jaar na uitvoering van het voorkeursalternatief. In de grafiek is de bodemverandering volgens de 4 afvoerscenario's weergegeven.

In grafiek B.10 is het sedimenttransport over de lengte van de Grensmaas weergegeven voor zowel de autonome situatie als voor het voorkeursalternatief. De figuur geeft het gemiddelde jaarlijkse sedimenttransport in  $m^3$  weer voor de periode van 1978 tot 1995. Het transport is berekend per 5 km rivierlengte, hierdoor is de gepiektheid verdwenen. In het eerste gedeelte van het traject is het transport laag, in het laatste gedeelte neemt het transport toe. Daarnaast blijkt duidelijk dat door uitvoering van het voorkeursalternatief het gemiddelde jaarlijkse sedimenttransport afneemt t.o.v de autonome situatie. Hierdoor vindt er inderdaad minder bodemverandering plaats in het voorkeursalternatief.



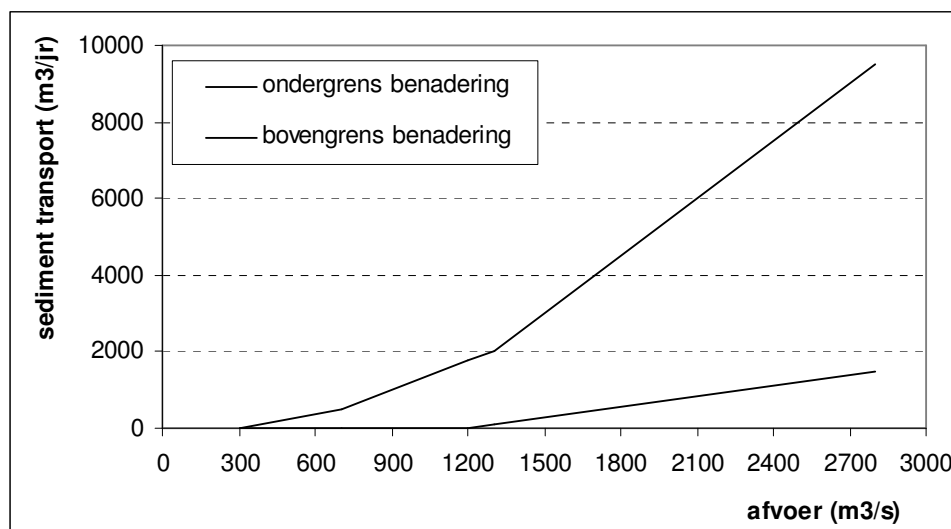
Grafiek B.10: Het gemiddelde jaarlijkse sedimenttransport (op basis van transport tussen 1978-1995) in de autonome situatie en in het voorkeursalternatief.

## Bijlage 9: Afvoer-transport relatie Duizendstra

Op basis van transportmetingen bij Maaseik (rkm 50) heeft Duizendstra (1999) een afvoer-transport relatie van de Grensmaas opgesteld. De afvoer-transport relatie gaat uit van twee uitersten, een boven en een ondergrens van het transport. In tabel B-1 staan de afvoer-transport relaties voor deze onder- en bovengrensbenadering gegeven.

	Afvoer in m <sup>3</sup> /s	Sediment transport in m <sup>3</sup> /s
Bovengrens benadering	Q < 300	S = 0
	300 < Q < 700	S = 1.25 * (Q - 300)
	700 < Q < 1300	S = 500 + 2.5 * (Q - 700)
	Q > 1300	S = 2000 + 5 * (Q - 1300)
Ondergrens benadering	Q < 1200	S = 0
	Q > 1200	S = 0.9375 * (Q - 1200)

Tabel B.1: Relaties onder- en bovengrensbenadering Duizendstra (1999)



Grafiek B.11: Relaties onder- en bovengrensbenadering Duizendstra (1999)





## Bijlage 10: De Nearest Neighbour methode

In §7.2.3 is kort de Nearest Neighbour methode toegelicht. Vanwege de complexiteit van de methode wordt in deze bijlage uitvoeriger ingegaan op de werking van de methode. Daarnaast wordt aangegeven hoe in dit onderzoek met behulp van deze methode nieuwe afvoerreeksen zijn gegenereerd.

De Nearest Neighbour methode is een techniek waarin d.m.v. een algoritme een nieuwe afvoerreeks wordt gegenereerd. Dit algoritme bestaat uit een reeks van 6 opdrachten die steeds wordt herhaald. Door de 6 opdrachten wordt een nieuwe dagafvoer gevonden voor de nieuwe afvoerreeks. Als de 6 opdrachten dus 100 maal herhaald worden ontstaat uiteindelijk een reeks van 100 nieuwe dagafvoeren. De reeks van 6 opdrachten is als volgt:

1. Kies een startdatum (dag T1) voor je nieuwe afvoerreeks
2. Selecteer random een dagafvoer voor T1 uit het gecentreerde window (w) rond T1.
3. Zoek de k dagafvoeren uit dit window (w) van wie de dagafvoer het dichtst bij (de k Nearest Neighbours) de dagafvoer van dag T1 ligt .
4. Selecteer willekeurig of via een gewicht één van de k waarden (de geselecteerde).
5. De historische opvolger van deze geselecteerde dag vormt de 2e waarde (T2) voor de nieuwe reeks (de successor).
6. Herhaal de stappen 3-5 voor deze nieuwe waarde tot de tijdreeks gevuld is

In dit onderzoek is dit als volgt toegepast op de Maasafvoer:

1. Als startdatum van een nieuwe afvoerreeks is 1 augustus gekozen. Over het algemeen is er in augustus een lage afvoer, waardoor de invloed van het willekeurig gekozen beginpunt klein is.
2. De grote van het moving window wordt bepaald op 31 dagen (w=31).  
Uit een gesprek met Buishand (KNMI) bleek dat bij het KNMI vaak trekkingen worden gedaan uit een window van zo'n 2000 data. De historische dataset van de Maasafvoer bestaat uit 92 jaar. Hierdoor bestaat een window in dit onderzoek totaal uit 2852 data (92 jaar maal 31 dagen). Het window wordt elke keer gecentreerd rond de dag waarvoor een nieuwe dagafvoer wordt gegenereerd. Als dit voor 16 augustus is, ligt het window dus van 1 tot 31 augustus. Voor 17 augustus ligt het window van 2 augustus tot 1 september.
3. Voor k is een waarde van 20 genomen. Als k te groot wordt genomen verdwijnt de autocorrelatie. Maar als k te klein wordt genomen dan is de kans aanwezig dat duplicatie van data in de nieuwe afvoerreeks voorkomt. Er wordt dus gezocht naar de 20 dagen binnen het window van 2852 dagafvoeren die het kleinste verschil in afvoer hebben met de afvoer van de geselecteerde dag, de 20 Nearest Neighbours. Mochten er nu 30 dagen zijn binnen het window met hetzelfde verschil, dan wordt voor k een waarde van 30 genomen. Een waarde voor k van 20 is dus het minimale aantal Nearest Neighbours.
4. Aan de k Nearest Neighbours wordt een gewicht (p) gekoppeld. De waarschijnlijkheid dat de  $j^{\text{de}}$  dag uit de k Nearest Neighbours wordt gekozen, wordt gegeven door:

$$p_j = \frac{1/j}{\sum_{i=1}^k 1/i}$$

Hierin is j het nummer van de Nearest Neighbour. De waarde van i loopt tot k, het totaal aantal geselecteerde Nearest Neighbours. Nummer 1 van de k data heeft dus de grootste kans om geselecteerd te worden.

De k aantal dagen met hetzelfde verschil in afvoer worden willekeurig door elkaar gezet. Op deze manier wordt voorkomen dat de eerste jaren (vanaf 1911) uit de historische dataset altijd het hoogste gewicht krijgen. Met behulp van een random generator wordt aan de hand van het gewicht een datum met bijbehorende afvoer gekozen, dit wordt de geselecteerde genoemd.

- De historische opvolger (de successor) van de in stap 4 geselecteerde cel vormt de nieuwe invoer in de nieuwe afvoerreeks. Met deze afvoer wordt terug gegaan naar stap 3.

Met onderstaand voorbeeld wordt deze complexe reeks van opdrachten verduidelijkt. Hierin wordt uitgelegd hoe m.b.v. de methode een nieuwe afvoerreeks voor 3 dagen kan worden gemaakt. Uitgangspunt is de historische dataset van de Maasafvoer van 16/7/1911 tot 15/8/2003.

- De begindatum van de nieuwe reeks is 1 augustus.
- Het window beslaat de dagen tussen 17 juli tot 16 augustus. Uit dit window (van 31 dagen maal 92 jaar) wordt willekeurig een dag gekozen. Dit blijkt bijvoorbeeld 24-7-1967 te zijn, de afvoer op deze dag was bijvoorbeeld 440 m<sup>3</sup>/s. De afvoer op 1 augustus in de nieuwe reeks is hiermee gesteld op 440 m<sup>3</sup>/s.
- Uit hetzelfde window worden minimaal 20 data geselecteerd welke het kleinste verschil in dagafvoer hebben t.o.v. 440 m<sup>3</sup>/s (de dagafvoer op 24-7-1967). Er worden dus minimaal 20 Nearest Neighbours geselecteerd. Dit levert bijv. de volgende geselecteerden op:

dag	maand	jaar	afvoer	verschil	gewicht
24	7	13	443	3	0.278
4	8	87	432	8	0.417
20	7	48	431	9	0.510
23	7	87	451	11	0.579
22	7	30	425	15	0.635
6	8	30	455	15	0.681
5	8	87	457	17	0.721
20	7	42	461	21	0.755
19	7	48	416	24	0.786
29	7	100	411	29	0.814
9	8	65	472	32	0.839
25	7	88	479	39	0.863
30	7	100	397	43	0.884
27	7	80	484	44	0.904
21	7	30	485	45	0.922
21	7	87	485	45	0.940
28	7	80	385	55	0.956
10	8	65	384	56	0.971
24	7	88	384	56	0.986
26	7	30	382	58	1.000

*Kolom 1, 2 en 3 geven de datum.*

*Kolom 4 geeft de afvoer op die datum*

*Kolom 5 geeft het verschil tussen de Nearest*

*Neighbour en de dagafvoer op de voorliggende dag*

*Kolom 6 geeft het gewicht:*

*Rij 1 heeft een gewicht van 0 tot 0.278, terwijl rij 20 slechts een gewicht heeft van 0.986 tot 1. De kans dat rij 1 gekozen wordt is dus groter.*

*Tabel B.2: De 20 Nearest Neighbours met gewicht*

- Aan de 20 geselecteerde Nearest Neighbours worden gewichten toegekend. Met behulp van een random generator wordt een waarde tussen 0 en 1 bepaald. Stel deze waarde is 0.32. Met een gewicht van 0.32 zal rij 2 gekozen worden als geselecteerde. Dit houdt in dat de geselecteerde datum 4-8-1987 is met een afvoer van 432 m<sup>3</sup>/s

5.1) De successor is dan 5-8-1987 welke bijvoorbeeld een afvoer heeft van 381 m<sup>3</sup>/s  
De afvoer op 2 augustus in de nieuwe reeks is hiermee gesteld op 381 m<sup>3</sup>/s.

Het proces gaat met deze waarde als ingang weer terug naar stap 3.

3.2) Het window is één dag opgeschoven en loopt nu van 18 juli tot 17 augustus. Uit dit window worden weer minimaal 20 data geselecteerd welke het kleinste verschil hebben met de afvoer van 381 m<sup>3</sup>/s.

4.2) Met behulp van de random generator en gewichten wordt 11-8-1925 met een afvoer van 379 m<sup>3</sup>/s geselecteerd.

5.2) De successor is dan 12-8-1925 met bijvoorbeeld een afvoer van 300 m<sup>3</sup>/s. De afvoer op 2 augustus in de nieuwe reeks is hiermee gesteld op 300 m<sup>3</sup>/s.

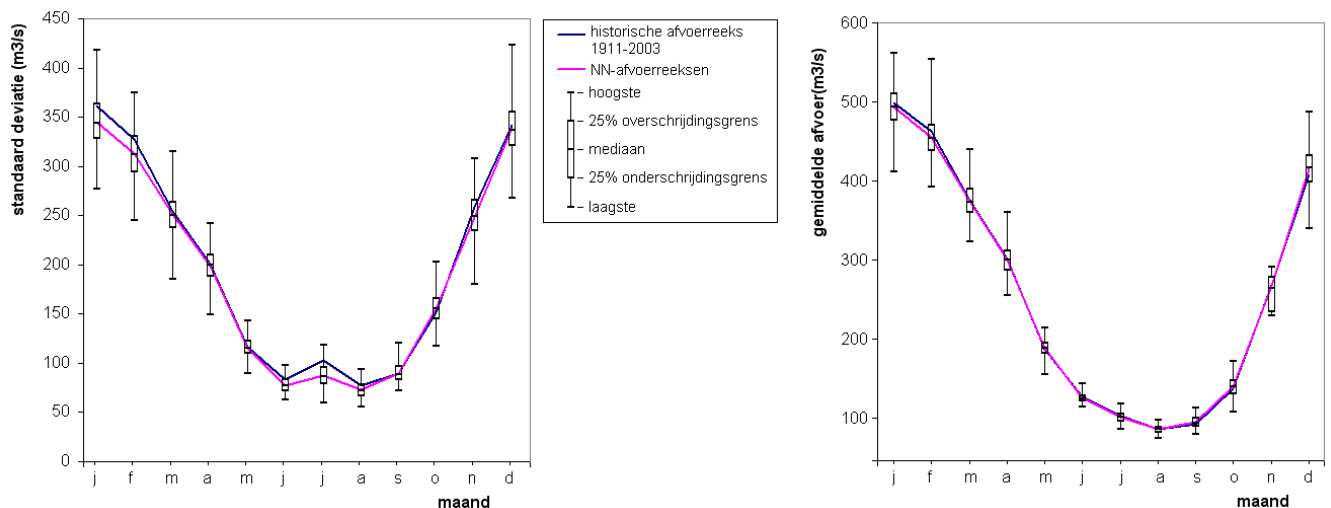
De nieuwe afvoerreeks van 1 tot 3 augustus heeft nu achtereenvolgens een dagafvoer van 440, 381 en 300 m<sup>3</sup>/s. Door dit proces vele malen te herhalen kan uiteindelijk een nieuwe afvoerreeks van bijv. 92 jaar worden gemaakt.



## Bijlage 11: Representativiteit Nearest Neighbour methode

In deze bijlage wordt de grafische weergave van de representativiteit van de standaardafwijking, het maandgemiddelde en de autocorrelatie weergegeven.

### Gemiddelde en standaard deviatie



Grafiek B.12: Representativiteit van de standaardafwijking en de maandgemiddelde afvoer

De standaard deviatie wordt gegeven door:  $s = \sqrt{\left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]}$ .

### Autocorrelatie

De autocorrelatie wordt bepaald volgens:

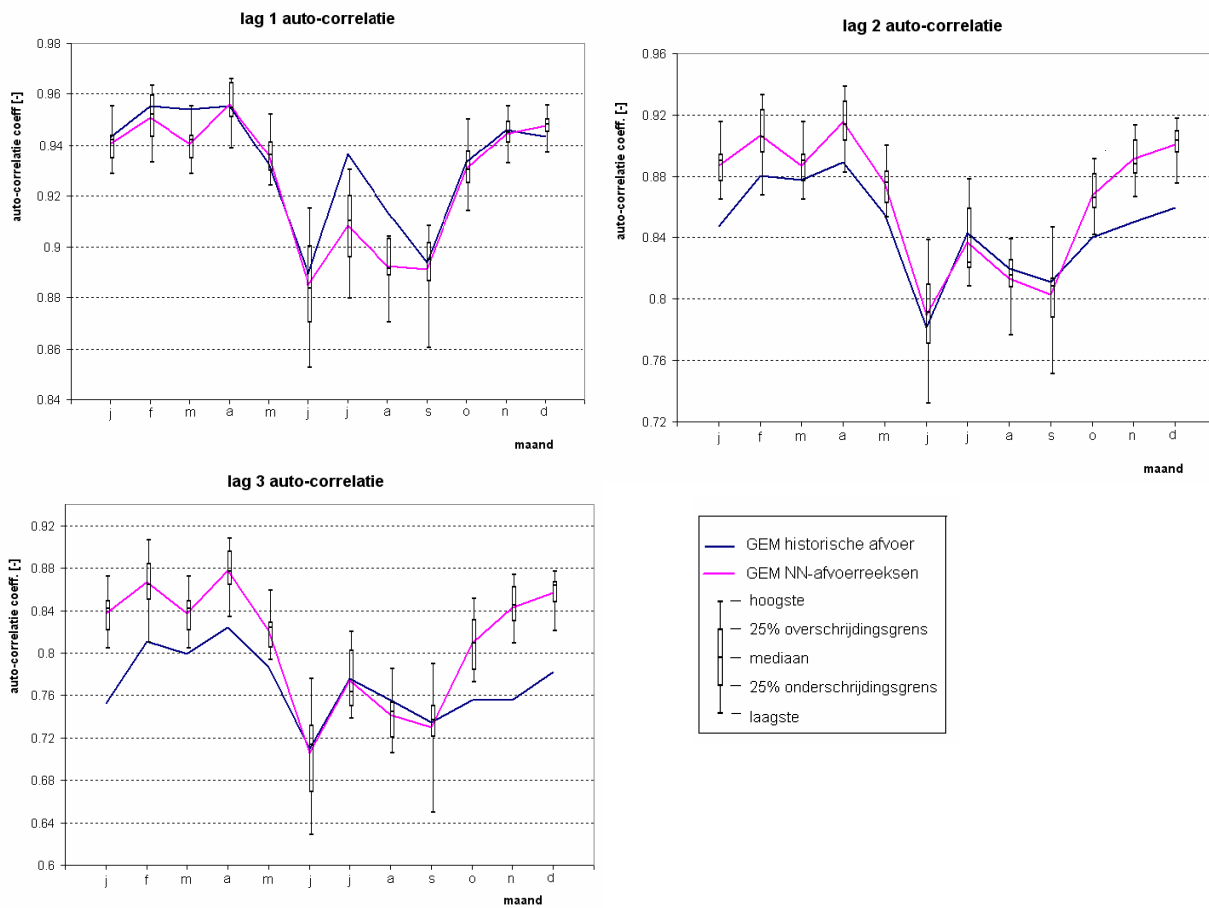
auto - correlatie coëff :  $r_k = c_k / c_0$  voor  $k = 0, 1, 2, \dots$

$$c_k = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n-k} (x_{i,j} - \bar{x})(x_{i+k,j} - \bar{x})$$

met :

$$N_k = (n - k) \cdot J$$

$$\bar{x} = \frac{1}{nJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n x_{i,j}$$



Grafiek B.13: Representativiteit van de lag 1,2 en 3 autocorrelatie per maand

De volgende formules zijn gebruikt om de waarden in tabel 7-1 te berekenen:

$$\Delta\mu = \frac{(\bar{\mu}_{nn} - \mu_{hist})}{\mu_{hist}} \cdot 100 \quad \text{met } \bar{\mu}_{nn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{nn,i}$$

$\Delta\mu$  = relatieve verschil gemiddelde

$\mu_{nn,i}$  = gemiddelde NN - afvoerreeks i

$\bar{\mu}_{nn}$  = gemiddelde van 15 NN - afvoerreeksen

$\mu_{hist}$  = gemiddelde historische afvoerreeks

$$\Delta s = \frac{(\bar{s}_{nn} - s_{hist})}{s_{hist}} \cdot 100 \quad \text{met } \bar{s}_{nn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{nn,i}$$

$\Delta s$  = relatieve verschil standaard deviatie

$$\Delta r_k = \frac{(\bar{r}_{nn} - r_{hist})}{r_{hist}} \cdot 100 \quad \text{met } \bar{r}_{nn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{nn,i}$$

$\Delta r_k$  = lag k autocorrelatie voor k = 1, 2 en 3

## Bijlage 12: Berekening verwachte aantal simulaties.

In §7.5 is een eerste indicatie gegeven van het verwachte aantal benodigde Monte Carlo simulaties. Een schatting van het aantal te maken simulaties is te maken met behulp van de volgende 4 stappen (Morgan&Henrion, p198-204 & Van der Klis (2003), p73):

1. Bepaal een betrouwbaarheidsband  $p$  tussen 2 percentielen en bepaal het gewenste betrouwbaarheidsinterval  $\alpha$  van een bepaald percentiel.
2. Bepaal het gemiddelde ( $\mu$ ) en de standaard deviatie ( $\sigma$ ) van de bodemverandering op een maatgevende locatie op basis van een klein aantal simulaties.
3. Stel m.b.v.  $\mu$  en  $\sigma$  een waarschijnlijkheidsverdeling op van de bodemverandering. Bepaal op basis van de verdeling de waarde van het  $p^{\text{th}}$  percentiel en de waarde van  $\Delta p$ .

$$\Delta p = \frac{P_2 - P_1}{2}$$

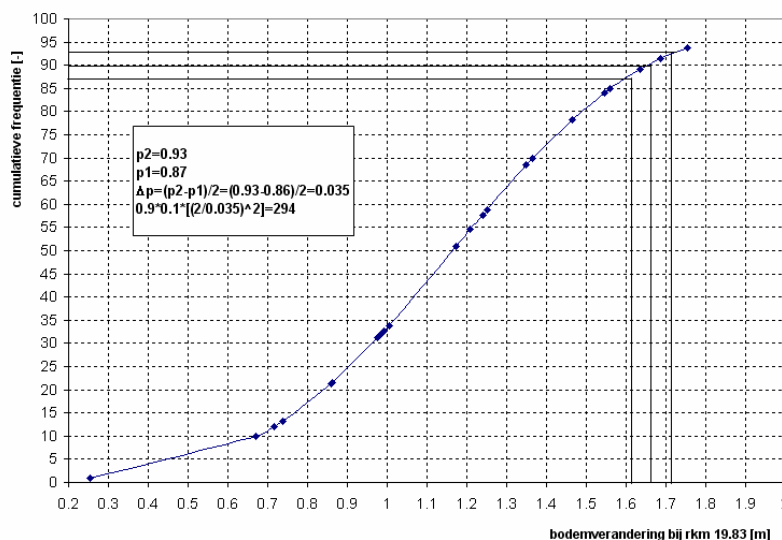
4. Op basis van de volgende vergelijking kan het aantal simulaties worden geschat

$$m = p(1-p) \left( \frac{c_\alpha}{\Delta p} \right)^2 \text{ waarin } (P(-c_\alpha < \Phi < c_\alpha) = \alpha)$$

$C$  is het interval van de standaard normale verdeling met betrouwbaarheidsinterval  $\alpha$

In dit onderzoek is ten doel gesteld om het 90% betrouwbaarheidsinterval ( $p=0.9$ ) van de bodemverandering op te stellen met daarbij de eis dat we 95% zeker ( $\alpha=0.95$ ) willen zijn dat de 10% overschrijdingswaarde een nauwkeurigheid heeft van 10 cm.

Op basis van de resultaten van de eerste 25 simulaties is bepaald dat het punt rkm 19,3 waarschijnlijk maatgevend is voor het aantal simulaties. Op deze locatie is het verschil in voorspelde bodemveranderingen het grootst. In grafiek B.14 is van deze locatie de inverse waarschijnlijkheidsverdeling van de bodemverandering weergegeven. Hieruit is bepaald dat  $\Delta p$  een waarde van 0.035 heeft. Op basis van de vergelijking in stap 4 wordt het aantal simulaties geschat op bijna 300.



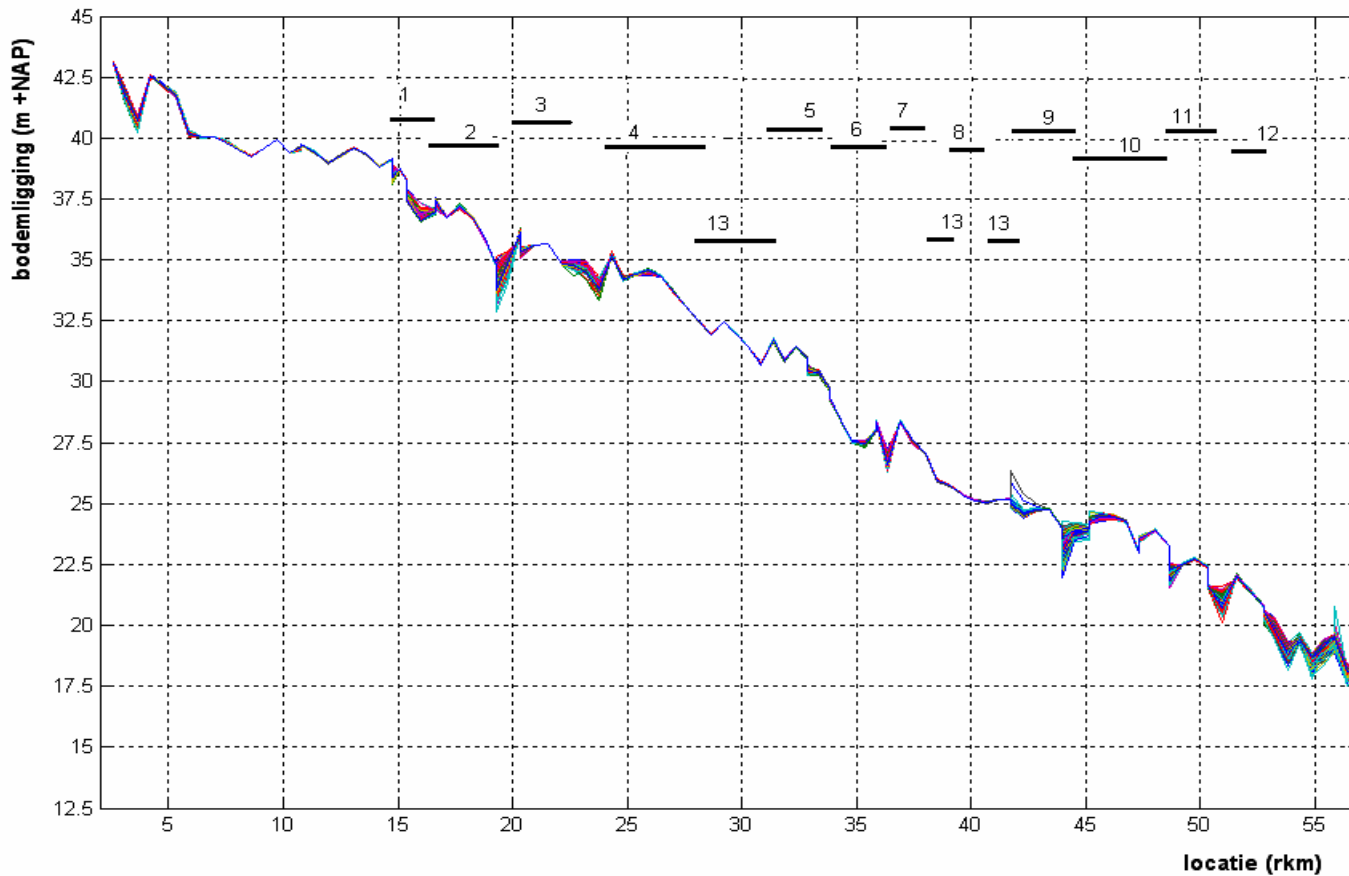
Grafiek B.14: Inverse waarschijnlijkheidsverdeling van 25 gemodelleerde bodemveranderingen op rkm 19,3





### Bijlage 13: Onzekerheid bodemligging Grensmaas

De berekende bodemligging van de Grensmaas (rkm 2-56) na 10 jaar. Elk lijntje representeert een voorspelde bodemligging door één van de 300 simulaties. De nummers verwijzen naar de ingrepen (zie tabel 8-1 in paragraaf 8.1.2)

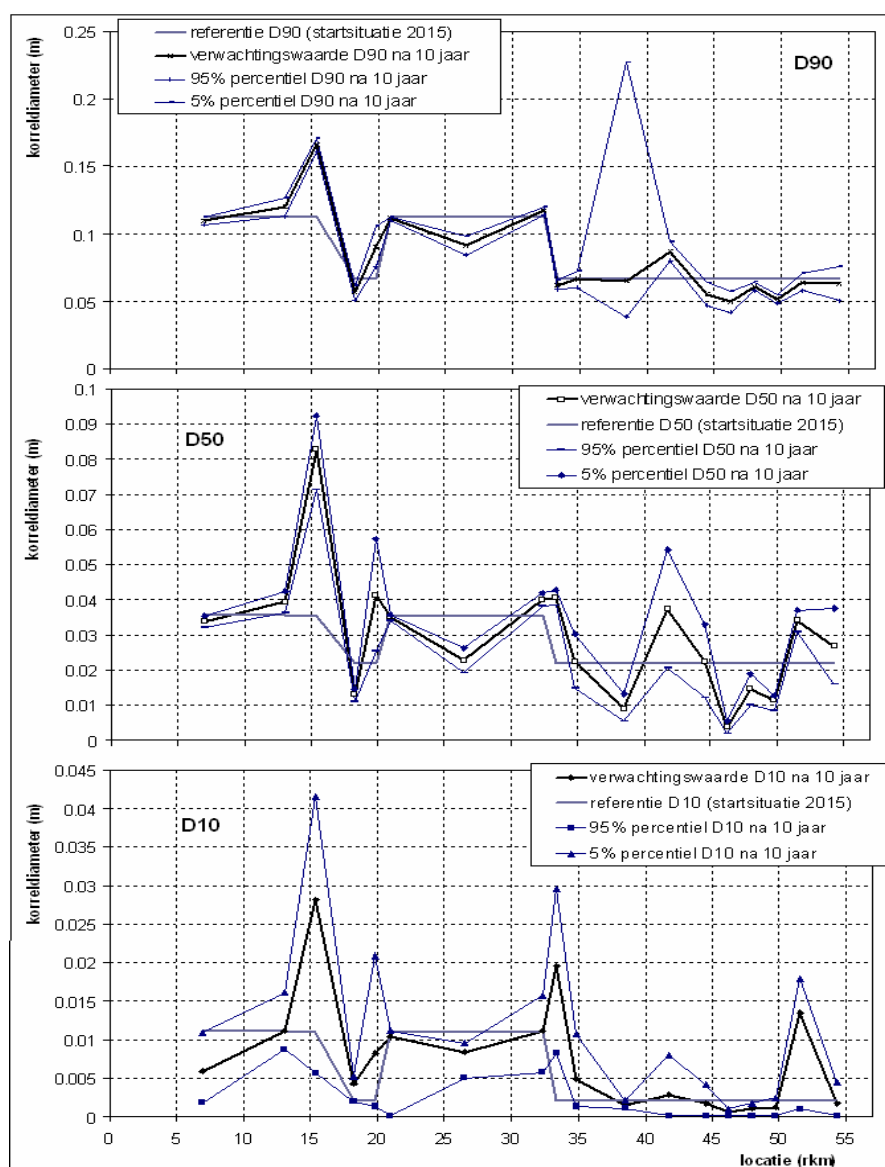


Grafiek B.15: Berekende bodemligging in de Grensmaas na 10 jaar door elk van de 300 simulaties



## Bijlage 14: Ontwikkeling bodemsamenstelling na 10 jaar

Grafiek B.16 toont het modelresultaat van de bodemsamenstelling in de beginsituatie en 10 jaar na uitvoering van het VKA. Naast de volgens het model verwachte bodemsamenstelling na 10 jaar wordt ook het 5% en 95% percentiel getoond.

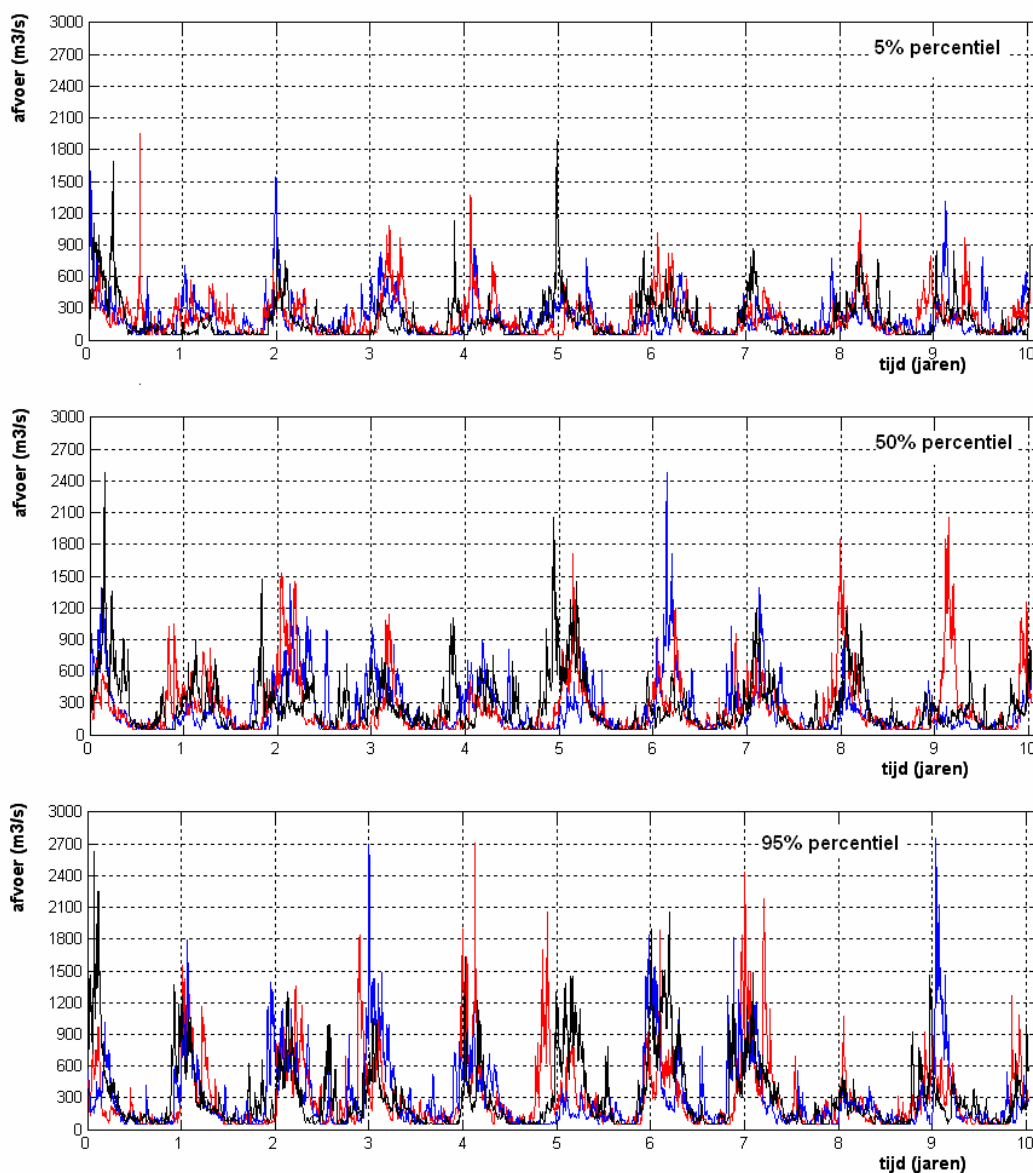


Grafiek B.16: Ontwikkeling van de bodemsamenstelling in het Grensmaatraject volgens SOBEK. De grafiek toont zowel de verwachte samenstelling als het 5% en 95% percentiel.



## Bijlage 15: Bepalende afvoerreeksen

Grafiek B.17 toont drie maal drie afvoerreeksen welke de 5%, 50% of 95% verwachtingwaarde van het modelresultaat van de bodemverandering benaderen.



Grafiek B.17: Van boven naar beneden worden respectievelijk 3 afvoerreeksen weergegeven welke het beste de 5%, 50% en 95% verwachtingswaarde van de bodemverandering volgens SOBEK benaderen.