

DLB ANW AK Morfologie

Di: 815360



Nader Onderzoek SOBEM morfologie

Grensmaasproject

Opdrachtgever: De Maaswerken

Eindrapport

18 juli 2003

LB-7231 / LB-7231a / 9M4711.A0 / 10064.3



Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
De Maaswerken



ROYAL HASKONING

thinking in
all dimensions



HASKONING NEDERLAND BV
COASTAL & RIVERS

Barbarossastraat 35
Postbus 151
6500 AD Nijmegen
+31 24 328 42 84 Telefoon
+31 24 360 54 83 Fax
info@nijmegen.royalhaskoning.com E-mail
www.royalhaskoning.com Internet
Arnhem 09122561 KvK

Documenttitel Nader Onderzoek SOBEEK Morfologie
Grensmaasproject
Status Eindrapport
Datum 18 juli 2003
Projectnummer LB-7231 / 9M4711.A0 / 10064.3
Auteurs ir. D.G. Meijer
dr. S.E. Vos
Opdrachtgever Rijkswaterstaat De Maaswerken
Referentie 9M4711.A0/R//Nijm

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Probleemschets	1
1.3	Doel van het Nader Onderzoek SOBEK Morfologie.....	2
1.4	Afbakening van het Nader Onderzoek SOBEK Morfologie	4
1.5	Beschrijving alternatieven/ontwerpen	5
1.6	Relaties met andere deelonderzoeken.....	6
1.7	Leeswijzer	6
2	Methodiek en gegevensbronnen	7
2.1	Algemeen	7
2.2	Hulpmiddelen en gegevens	8
2.2.1	Modelsysteem SOBEK-gegradeerd	8
2.2.2	Toegeleverde gegevens	8
2.3	Morfologische modelberekeningen.....	9
2.3.1	Modelschematisaties	9
2.3.2	Modelsimulaties.....	10
2.4	Nauwkeurigheid voorspellingen.....	11
3	Toetsingskader	13
3.1	Inleiding.....	13
3.2	Toetsingscriteria.....	13
4	Huidige morfologie van de Grensmaas	15
4.1	Inleiding.....	15
4.2	Bodemligging en -ontwikkeling	16
4.3	Bodemsamenstelling	17
4.4	Sedimenttransport.....	19
5	Bouw, kalibratie en verificatie morfologisch model.....	23
5.1	Inleiding.....	23
5.2	Modelschematisatie Nulalternatief (NA).....	23
5.3	Bouw van het kalibratie- en verificatiemodel.....	24
5.3.1	Bouw SOBEK-modelvarianten	24
5.3.2	Bouw digitaal ondergrondmodel voor SOBEK-gegradeerd	27
5.3.3	Geo-elektrische metingen	28
5.4	Randvoorwaarden.....	28
5.4.1	Afvoeren en waterstanden.....	28
5.4.2	Sedimenttransport en bodemligging	29
5.5	Morfologische modelkalibratie (1987-1995)	29
5.5.1	Periode	29
5.5.2	Initiële bodemligging	29
5.5.3	Initiële bodemsamenstelling	30
5.5.4	Resultaten van de morfologische kalibratieberekening	31
5.6	Morfologische modelverificatie (1978-1995)	33
5.6.1	Periode	33

5.6.2	Initiële bodemligging.....	33
5.6.3	Resultaten van de verificatie	33
5.7	Sedimenttransporten van de langjarige simulaties.....	35
5.8	Tweede verificatieberekening (hoogwater 1998)	37
5.9	Conclusies.....	39
6	Autonome Ontwikkeling bodemligging Grensmaas	41
6.1	Inleiding	41
6.2	Bodemligging bij de Autonome Ontwikkeling	41
6.3	Sedimenttransport en –samenstelling.....	44
6.4	Effect van de bodemontwikkeling op de waterstanden.....	46
6.5	Onzekerheden in de voorspellingen	47
7	Morfologische effecten MER-verkenningen	49
7.1	Inleiding	49
7.2	Modelschematisatie Eindplan (Voorkeursalternatief 2003)	50
7.3	Bodemontwikkeling Voorkeursalternatief 2003.....	51
7.3.1	Algemeen	51
7.3.2	Geulverbredingen	53
7.3.3	Bodembeschermingen	53
7.3.4	Nevengeulen.....	54
7.3.5	Benedenstrooms morfologisch effect van het Grensmaasproject	54
7.4	Sedimenttransport en samenstelling van de transportlaag	55
7.5	Effect van de bodemveranderingen op de waterstanden	56
7.6	Ontwerpvarianten van het Voorkeursalternatief 2003	57
7.7	Grevenbicht en de Koeweide	58
7.8	Onzekerheden in de voorspellingen	62
8	Gevoeligheidsanalyse.....	63
8.1	Inleiding	63
8.2	Variatie initiële afpleisteringslaag (1978-1995)	64
8.3	Variatie samenstelling grindlaag (1978-1995).....	64
8.4	Sedimenttransport te Eijsden (1978-1995).....	64
8.5	Dikte van de grindlaag (AO: 2015-2115 natte afvoerreeks)	65
9	Conclusies en aanbevelingen	67
9.1	Conclusies.....	67
9.2	Aanbevelingen	69
10	Referenties	71

Bijlagenlijst

Bijlage 1	Overzicht van relevante modelschematisaties
Bijlage 2	Modelschematisaties NA1978 en NA1987
Bijlage 3	Modelschematisatie Nulalternatief (Autonome Ontwikkeling)
Bijlage 4	Modelschematisatie Eindplan (Voorkeursalternatief 2003)
Bijlage 5	Modelschematisatie EPP en EPM (ontwerpvarianten Voorkeursalternatief 2003)
Bijlage 6	Hydraulische randvoorwaarden
Bijlage 7	Resultaten Autonome Ontwikkeling
Bijlage 8	Resultaten Voorkeursalternatief 2003
Bijlage 9	Resultaten ontwerpvarianten Voorkeursalternatief 2003
Bijlage 10	Resultaten gevoeligheidsanalyse

Tabellenlijst

Tabel 1-1	Vragen van morfologische aard	4
Tabel 2-1	Overzicht van relevante SOBEEK-modellen	9
Tabel 2-2	Overzicht van uitgevoerde modelsimulaties (modelkalibratie- en verificatie, onderzoek Autonome Ontwikkeling)	10
Tabel 2-3	Overzicht van uitgevoerde modelsimulaties (Voorkeursalternatief 2003 en varianten)	11
Tabel 2-4	Overzicht van uitgevoerde modelsimulaties (gevoeligheidsanalyse)	11
Tabel 4-1	Recente bodemontwikkeling in de Grensmaas (Wilbers, 1996; GIS-analyse)	16
Tabel 5-1	Samenstelling modelvarianten NA1978 en NA1987 (samenvatting).....	24
Tabel 5-2	Toegepaste samenstelling afpleisteringslaag en grindpakket in het SOBEEK-model (mm)	31
Tabel 5-3	Vermenigvuldigingsfactoren transportformule Wu, Wang en Jia.....	32
Tabel 5-4	Samenvatting resultaten (gemiddelde erosie).....	35
Tabel 6-1	Afvoerscenario's voor 100-jarige morfologische simulaties.....	42
Tabel 6-2	Overzicht van erosiesnelheid in m/j (Autonome Ontwikkeling - diverse afvoerscenario's).....	43
Tabel 7-1	Chézy-waarden in de zijtakken.....	50
Tabel 7-2	Overzicht van de erosiesnelheid (m/j) en de totale erosie (m) in de Grensmaas (Voorkeursalternatief 2003 - diverse afvoerscenario's).....	52
Tabel 7-3	Overzicht van erosiesnelheid in m/j (Voorkeursalternatief 2003 – historische afvoerreeks).....	61
Tabel 8-1	Bodemdaling 1978-1995 (variaties op verificatieberekening)	63
Tabel 8-2	Overzicht van erosiesnelheid in m/j (Autonome Ontwikkeling - nat afvoerscenario)	65

Figurenlijst

Figuur 1-1	Overzicht Grensmaasgebied met ingrepen Voorkeursalternatief 2003	3
Figuur 4-1	Thalwegligging van de Maas tussen rkm 15 en rkm 150 (Murillo, 1998)	16
Figuur 4-2	Gemiddelde korreldiameter van het bodemmateriaal van de Maas (Murillo, 1998)	17
Figuur 4-3	Samenstelling toplaag rivierbedding (NITG, 2002: gemiddeld voor de Grensmaas; Thijssen, 1995: 26 boringen op het traject rkm 20-24)	18
Figuur 4-4	Geologisch langsprofiel van de Maas (Akkerman, 2003)	18
Figuur 4-5	Sedimenttransport in de Grensmaas op basis van bodempeilingen (Wilbers, 1996)	20
Figuur 4-6	Afvoer-transportrelaties te Maaseik (Duizendstra, 1999)	21
Figuur 4-7	Bovengrens en ondergrens voor sedimenttransport uit afvoer-transportrelaties te Maaseik en meetgegevens uit diverse jaren	21
Figuur 5-1	Nieuwe takken: Bosscherveld en Stevensweert	23
Figuur 5-2	Dekking van aangeleverde bodemgegevens ten opzichte van het modelbereik Grensmaas	25
Figuur 5-3	SOBEK-profiel (relatie hoogte-breedte) bij Aan de Maas (vak 52, km 25): model NA en variant NA1978	26
Figuur 5-4	Beschrijving bodemschematisatie (principeschets)	27
Figuur 5-5	Conversie bodemschematisatie	28
Figuur 5-6	Afvoerreeks 1978-1995 (dagwaarden Eijsden)	29
Figuur 5-7	Locaties en diktes van de afpleisteringslaag en het grindpakket	30
Figuur 5-8	Toegepaste samenstelling afpleisteringslaag en grindpakket in het SOBEK-model	31
Figuur 5-9	Gesimuleerde bodemontwikkeling (kalibratieberekening 1987-1995)	32
Figuur 5-10	Verschilplot bodemontwikkeling (kalibratieberekening 1987-1995)	32
Figuur 5-11	Verschilplot bodemontwikkeling (verificatieberekening 1978-1995)	34
Figuur 5-12	Verschilplot bodemontwikkeling 1978-1987	34
Figuur 5-13	Verschilplot bodemontwikkeling 1987-1995	35
Figuur 5-14	Berekende transporten bij Maaseik: periode 1987-1995 (uit kalibratieberekening) en periode 1978-1995 (uit verificatieberekening)	36
Figuur 5-15	Berekende en gemeten transporten bij Eijsden en Maaseik 1990-1995 (simulatie 1978-1995)	36
Figuur 5-16	Sedimenttransporten over de gehele Grensmaas volgens Wilbers (1996) en SOBEK	37
Figuur 5-17	Gemeten en berekende sedimenttransporten bij Maaseik (hoogwater 1998)	37
Figuur 5-18	Gemeten en berekende debieten bij Maaseik (hoogwater 1998)	38
Figuur 5-19	Gemeten en berekende debieten en sedimenttransporten bij Maaseik (HW1998)	38
Figuur 6-1	Modellsimulatie van Autonome Ontwikkeling (historische reeks 2015-2095)	42
Figuur 6-2	Bodemligging na 75 jaar (2090) bij verschillende afvoerscenario's (Autonome Ontwikkeling)	44
Figuur 6-3	Jaarlijkse sedimenttransporten Grensmaas (Autonome Ontwikkeling)	45
Figuur 6-4	Samenstelling toplaag Grensmaas (Autonome Ontwikkeling)	45
Figuur 6-5	Verschil in karakteristieke waterstanden tussen 2090 en 2015 (Autonome Ontwikkeling) voor verschillende hoogwatergolven (herhalingstijden: 50, 250 en 1250 jaar)	46
Figuur 7-1	Bodemontwikkeling Voorkeursalternatief 2003 met historische afvoerreeks	51

Figuur 7-2	Verschilplot bodemontwikkeling Grensmaas bij Voorkeursalternatief 2003 met historische afvoerreeks	52
Figuur 7-3	Geulverbredingen bij Borgharen en Itteren.....	53
Figuur 7-4	Jaarlijkse sedimenttransporten AO (links) en VKA (rechts) bij historische tijdreeks	55
Figuur 7-5	Ontwikkeling van de toplaag (VKA bij historische tijdreeks)	55
Figuur 7-6	Verschil in karakteristieke waterstanden tussen 2090 en 2015 (VKA) voor verschillende hoogwatergolven (herhalingstijden: 50, 250 en 1250 jaar).....	56
Figuur 7-7	Verschil in ontwerpwaterstanden tussen 2090 en 2015 (AO en VKA: 1/250 jaar).....	57
Figuur 7-8	Bodemontwikkeling Grensmaas bij VKA-varianten met 0,50 m verhoogd en verlaagd insteekniveau (historische tijdreeks: 2015-2093) - referentie: VKA (2015).....	58
Figuur 7-9	Bodemontwikkeling Voorkeursalternatief 2003 met historische afvoerreeks (originele bodembescherming bij Obbicht)	58
Figuur 7-10	Bodemontwikkeling nevengeulen Voorkeursalternatief 2003 met historische afvoerreeks (originele bodembescherming bij Obbicht)	59
Figuur 7-11	Verruiming in de Koeweide en de bovenstrooms gelegen nevengeul bij Grevenbicht.....	60

Fotolijst

Foto 1-1	Zomerbed van de Grensmaas, ingesneden in het landschap	2
----------	--	---

Lijst met afkortingen en begrippen

AO	Autonome Ontwikkeling, situatie in 2017 ¹ van de Grensmaas inclusief het Zandmaasproject volgens het Tracébesluit van 2002 (De Maaswerken, 2002)
DGR	Deltaplan Grote Rivieren, een noodplan in gang gezet na het hoogwater van 1995 om de veiligheid langs de Nederlandse rivieren te verhogen
DGR-kaden	Kaden aangelegd na het hoogwater van 1995 in het kader van het Deltaplan Grote Rivieren
EP	Eindplan, de modelschematisatie behorend bij het VKA
EPM	Eindplan-min, de modelschematisatie behorend bij het VKA_M
EPP	Eindplan-plus, de modelschematisatie behorend bij het VKA_P
MER	Milieu-Effect-Rapport, een rapport waarin de milieueffecten van maatregelen beschreven staan
m.e.r.	milieu-effectrapportage, de procedure van het opstellen van een MER
MHW	Maatgevend Hoogwater, voor de Maas een 1/1250 hoogwatergolf
MMA	Meest Milieuvriendelijk Alternatief
NA	Nulalternatief, de modelschematisatie behorend bij de AO
ontgravingsdiepte	Niveau tot waarop een ingreep (zomerbedverbreding, weerdverlaging) wordt afgegraven
RIZA	Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, een specialistische dienst van Rijkswaterstaat
rkm	Rivierkilometer, lengtemaat over de as van de rivier; voor de Maas begint de rivierkilometrering op 2,5 km bij Eijsden (aan de grens)
VKA	Voorkeursalternatief 2003 Grensmaas
VKA_M	Voorkeursalternatief 2003 Grensmaas met verlaging ontgravingsdiepte
VKA_P	Voorkeursalternatief 2003 Grensmaas met verhoging ontgravingsdiepte
waakhoogte	Veiligheidshoogte bovenop de berekende waterstand om rekening te houden met factoren als golfploop, windeffecten en modelonzekerheden
Wbr	Wet Beheer Rijkswaterstaatwerken, een wet waarin onder andere de voorwaarden staan waaraan ingrepen in het zomer- en winterbed van een rivier moeten worden getoetst
winterbed	Hoger gelegen delen langs de rivier die enkel bij hoge afvoeren onder water staan, ook wel 'hoogwaterbed' of 'uiterwaarden' genoemd
zomerbed	Deel van de rivier waarin bijna altijd water staat, ook wel 'laagwaterbed' genoemd

¹ De realisatie van het Grensmaasproject is tot 2017 voorzien. In dit onderzoek geldt 2015 als startpunt voor de morfologische effectbeschrijving, omdat in dit jaar het grootste deel van het project reeds gerealiseerd zal zijn.

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Voor u ligt het Nader Onderzoek SOBEEK Morfologie Grensmaasproject. Het betreft een aanvulling op het Morfologisch Onderzoek dat in het kader van het MER Grensmaas 2003 is uitgevoerd (Akkerman, 2003). Het Nader Onderzoek heeft zich gericht op simulaties met SOBEEK-gegradeerd voor de voorspelling van de morfologische ontwikkelingen op de lange termijn.

Het MER Grensmaas is een onderliggend document van het POL Grensmaas. Het POL Grensmaas is een aanvulling op het Provinciaal Omgevingsplan Limburg uit 2001. De vaststelling van het POL Grensmaas is een eerste stap in de planvoorbereiding om uitvoering van het Grensmaasproject mogelijk te maken.

De doelstellingen van het Grensmaasproject zijn:

- 1) beperking van de wateroverlast, gericht op het bereiken van een beschermingsniveau van 1/250 (ontwerphoogwatersituatie uitgedrukt in overschrijdingsfrequentie per jaar) voor de door kaden beschermde gebiedsdelen, te bereiken in uiterlijk 2017²;
- 2) grootschalige natuurontwikkeling en ecologisch herstel van de rivier, waarbij een nieuw, riviergebonden natuurgebied van minimaal 1000 ha ontstaat;
- 3) de winning van grind zoals vastgelegd in bestuursovereenkomsten (1990 en 1997) tussen Rijk en provincie (Limburg levert voor de nationale behoefte nog de hoeveelheid grind die vrijkomt bij uitvoering van de projecten Grensmaas en Zandmaas/Maasroute en daarna niets meer).

De drie doelstellingen dienen in onderlinge samenhang gerealiseerd te worden. Alle maatregelen die nodig zijn voor het bereiken van het beschermingsniveau van 1/250 dienen voor eind 2017 afgerond te zijn. De eindoplevering van het gehele project is voorzien in 2022.

De doelstellingen worden gerealiseerd door rivierverruiming. De daarbij vrijkomende dekgrond wordt geborgen in dekgrondbergingen.

In het hoofdrapport van het MER Grensmaas wordt voor alle relevante aspecten op hoofdlijnen aangegeven wat de milieueffecten van het Grensmaasproject zijn. Het betreft telkens samenvattingen van onderzoek dat uitgevoerd is in het kader van het MER Grensmaas. Dit document is een rapportage van het Nader Onderzoek dat heeft plaatsgevonden voor het aspect Morfologie.

Voor het onderzoek is telkens gebruik gemaakt van alle relevante beschikbare gegevens, en zijn telkens de meest geschikte onderzoeksmethoden volgens de laatste stand der techniek toegepast.

1.2 Probleemschets

Tot voor 200 jaar was de Grensmaas een enigszins vrij meanderende rivier met meerdere ondiepe geulen en diverse eilanden in het laagwaterbed. De huidige Grensmaas is een rivier

² Zie voetnoot op pagina vi.

met een laagwaterbedding met een enkele geul die diep ingesneden ligt in het hoogwaterbed en weinig natuurvriendelijke oevers, zie Foto 1.1. In de loop van ongeveer twee eeuwen is dit rivierenlandschap ontstaan als gevolg van normalisatiewerken.

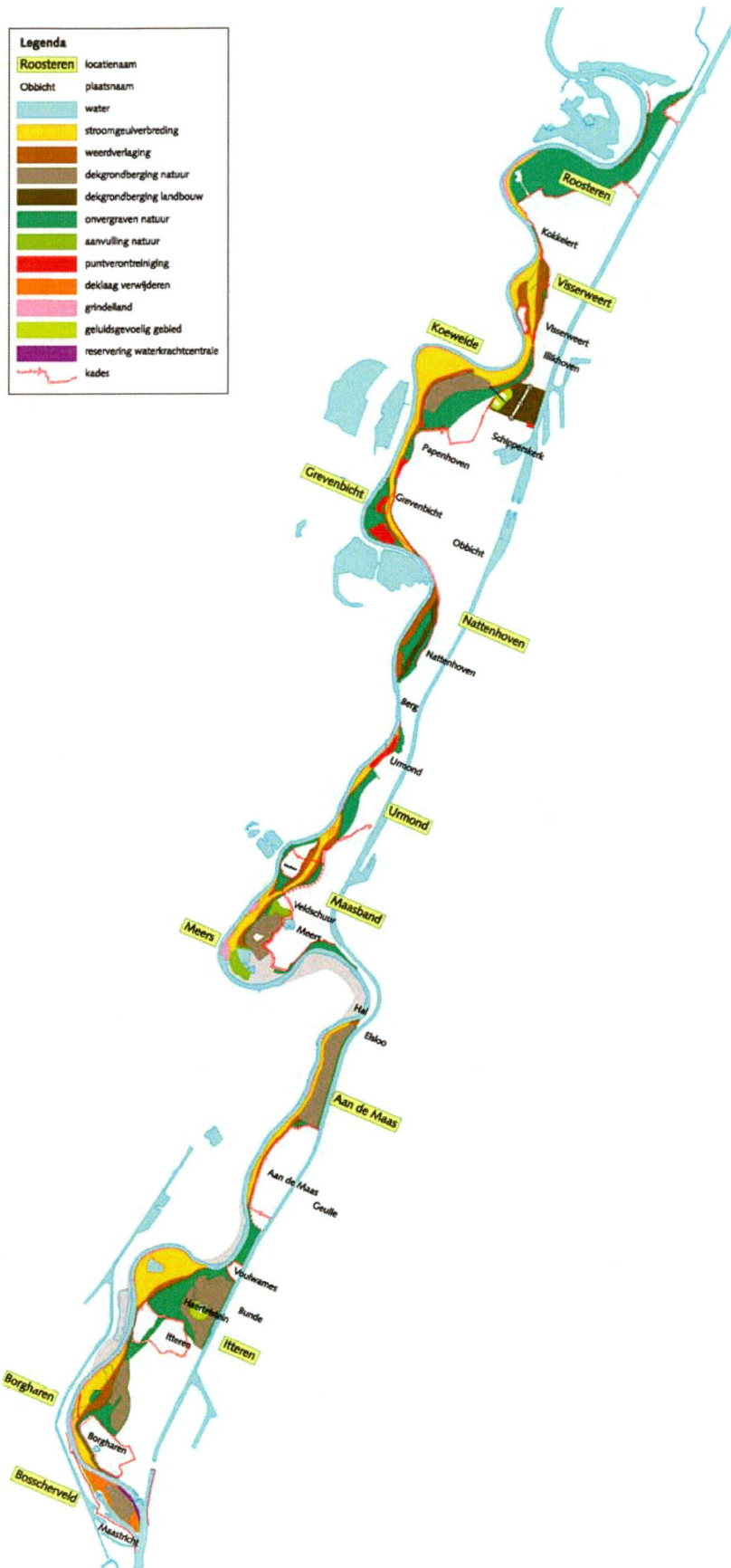


Foto 1-1 Zomerbed van de Grensmaas, ingesneden in het landschap

De ondergrond van het laagwaterbed van de Grensmaas bestaat uit afwisselend grind, Boomse klei (ter hoogte van Aan de Maas) en fijn zand met kleilenzen. In het meest zuidelijke deel komt mergel voor. Diepe ontgrinding heeft in de laagwaterbedding van de Grensmaas nauwelijks plaatsgevonden en op veel plaatsen is dat, bij gebrek aan voldoende grind, ook niet meer mogelijk. Het meeste winbare grind zit onder de hoogwaterbedding. Afgraving daarvan kan zodanig plaatsvinden dat na afloop van de graafwerkzaamheden een verbreed laagwaterbed en een verlaagd hoogwaterbed resteert. Hierop kan zich een natuurlijk rivierenlandschap ontwikkelen. De vraag is hoe dat er precies uit zal gaan zien en hoe de rivier zich zal gaan gedragen met betrekking tot de waterstanden, de stroomsnelheden en het sedimenttransport en welke consequenties dat zal hebben voor de wateroverlast door overstromingen, de stabiliteit van oevers en beddingen, de ligging van de thalweg en het karakteristieke beeld van de rivier bij de lagere afvoeren. Deze onderzoeksvragen zijn hierna verder uitgewerkt, met name gericht op de morfologische ontwikkeling op langere termijn.

1.3 Doel van het Nader Onderzoek SOBEK Morfologie

Het doel van het onderzoek is antwoord te geven op een aantal concrete vragen met betrekking tot de morfologische ontwikkelingen, de stabiliteit op lange termijn van ingrepen en de effecten op de veiligheid. Deze vragen zijn in Tabel 1-1 aangegeven.



Figuur 1-1 Overzicht Grensmaasgebied met ingrepen Voorkeursalternatief 2003

Tabel 1-1 Vragen van morfologische aard

Vraag	Omschrijving
1	Wat zijn de verwachte morfologische effecten over 25, 50, 75 en 100 jaar voor de Autonome Ontwikkeling?
2	Wat zijn de verwachte morfologische effecten over 25, 50, 75 en 100 jaar voor de verschillende MER-alternatieven en -ontwerpen?
3	Hoe groot is de kans op doorgaande aanzanding/erosie van de nevengeulen in de Grensmaas?
4	Hoe groot is de kans op ontoelaatbare doorgaande erosie in de Grensmaas, met name ter plaatse van de flessenhalzen? En wat is het effect van eventuele bodembeschermingen op deze locaties?
5	Hoe verandert de veiligheid tegen overstromen door de morfologische ontwikkeling in het VKA na lange tijd?
6	Wat is de gevoeligheid van de onderzoeksresultaten voor de gebruikte randvoorwaarden, de gebruikte gegevens en de gedane aannamen voor invoerparameters die niet in detail bekend zijn.

1.4 Afbakening van het Nader Onderzoek SOBEEK Morfologie

Het Nader Onderzoek richt zich in het bijzonder op de tijdsafhankelijke morfologische effecten van ingrepen in het Grensmaasgebied, zie Figuur 1-1. In het eerder uitgevoerde Morfologisch Onderzoek (Akkerman, 2003) zijn de initiële veranderingen (direct na uitvoering van de ingrepen) onderzocht aan de hand van gewijzigde 2-dimensionale stromingspatronen. Het voorliggende Nader Onderzoek biedt in aanvulling daarop de mogelijkheid een doorkijk te maken naar de morfologische ontwikkelingen op langere termijn. De modellering met SOBEEK-gegradeerd is gebaseerd op een 1-dimensionale berekeningsmethodiek, waardoor uitkomsten van de berekeningen alleen grootschalig en in lengterichting van de Grensmaas geïnterpreteerd dienen te worden. Voor de analyse van effecten op detailniveau met een veelal sterk 2-dimensionaal stromingspatroon kan worden teruggerepen op het Morfologisch Onderzoek van het MER Grensmaas (Akkerman, 2003).

De morfologische effecten zullen niet alleen in het dit gebied zelf worden aangegeven maar ook boven- en benedenstrooms van de Grensmaas. In rivierkundige termen start het Grensmaasgebied bij het bovenstroomse punt van Bosscherveld (rkm 14,6) en eindigt het gebied bij Roosteren (rkm 56). De beken in het gebied maken deel uit van de modellen, tezamen met onttrekkingen als het Julianakanaal, de Zuid-Willemsvaart en de lozing DSM. Met het eventuele effect van terugstuwning van Maaswater en/of blokkering van de afvoer van zijbeken tijdens hoogwater wordt geen rekening gehouden.

Voor een goede effectbeschrijving is degelijk basismateriaal nodig. Gelet op de beschikbare gegevens en modellen is gekozen voor de situatie van 1995 als referentiesituatie voor de bouw van de modelschematisaties van de Autonome Ontwikkeling en het Voorkeursalternatief 2003. Er zijn verschillende redenen om juist voor 1995 als uitgangssituatie te kiezen en niet voor bijvoorbeeld 1998 of 2000:

- In 1995 zijn metingen uitgevoerd aan de bodemhoogte in het zomer- en winterbed en deze gegevens zijn gebruikt om de modellen te vullen;
- De kaden en overlaten (inclusief de DGR-kaden, de kaden aangelegd na het hoogwater van 1995 in het kader van het Deltaplan Grote Rivieren) zijn in 1995 en 1996 nauwkeurig ingemeten;

- De situatie van 1995 is nog steeds een redelijke weergave van de huidige situatie behoudens enkele nieuwe afgravingen.
- In de situaties van 1998 en 2000 zit al een deel van proefproject Meers dat niet tot de Autonome Ontwikkeling wordt gerekend.

De modelschematisaties van de inrichtingsvarianten (AO, VKA, VKA_M en VKA_P) zijn dan ook gebouwd op basis van het hoogtemodel van 1995 waarop de ontwerpen van de rivierkundige ingrepen geprojecteerd zijn. Voor het kalibratiemodel '1987' en het verificatiemodel '1978' is het hoogtemodel (voorzover dit het zomerbed bestrijkt) echter vervangen door hoogtemodellen, gebaseerd op peilingen in 1987 respectievelijk 1978. Deze modellen zijn gebouwd voor de morfologische kalibratie en verificatie van de bodemontwikkeling in de perioden 1987-1995 respectievelijk 1978-1987.

De randvoorwaarden die in het hydraulisch onderzoek worden gebruikt worden eens in de vijf jaar door RIZA vastgesteld op basis van de toepassing van de Wet op de Waterkering. De laatste aanpassing van deze wet heeft plaatsgevonden in 2001 (Rijkswaterstaat, 2001) waarin voor de ontwerphoogwatergolven de hoogwaters tot en met 1999 zijn verwerkt. Dit betekent dat de hoogwaters van 2000, 2001 en het laatste hoogwater van januari 2003 niet meegenomen zijn bij de vaststelling van de ontwerphoogwatergolven. Voor de morfologische simulaties worden tijdreeksen bij Eijsden gebruikt (periode 1911-1998). Deze reeks is bewerkt voor enkele toekomstige scenario's (historische, gemiddelde, droge en natte 100-jarige reeks: zie Bijlage 6).

1.5 Beschrijving alternatieven/ontwerpen

De studie bestaat uit twee hoofdonderdelen: een analyse van morfologische ontwikkelingen van de Grensmaas in het verleden, en een verkenning van mogelijke morfologische ontwikkelingen in de toekomst volgens enkele scenario's. Hierbij is gebruikt gemaakt van rekenmodellen, die zijn afgeregeld (gekalibreerd en gevalideerd) op basis van historische ontwikkelingen en zijn ingezet voor toekomstige voorspellingen. Voor de morfologische kalibratie en verificatie zijn de volgende situaties geanalyseerd:

- situatie in 1987 (bodem van 1987 en winterbed zonder kaden) voor de kalibratieberekening in de periode 1987-1995;
- situatie in 1978 (bodem van 1978 en winterbed zonder kaden) voor de verificatieberekening in de periode 1978-1995;
- situatie in 1998 (bodem van 1995 en winterbed met kaden) voor de verificatieberekening tijdens het hoogwater 1998. Hierbij worden modelresultaten met transportmetingen in Maaseik vergeleken.

Voor de planstudie worden de volgende alternatieven beschouwd:

- Autonome Ontwikkeling (afgekort: AO; het bijbehorende model heet Nulalternatief: NA);
- Voorkeursalternatief 2003 (afgekort: VKA; het bijbehorende model heet Eindplan: EP);
- Voorkeursalternatief 2003 met een verhoogd insteekniveau (+ 0,50 m) voor de weerdverlagingen en geulverbredingen (afgekort: VKA_P; het bijbehorende model heet Eindplan-Plus: EPP), maximale benutting bandbreedte bovengrens;
- Voorkeursalternatief 2003 met een verlaagd insteekniveau (- 0,50 m) voor de weerdverlagingen en geulverbredingen (afgekort: VKA_M; het bijbehorende model heet Eindplan-Min: EPM), maximale benutting bandbreedte ondergrens.

De 'bandbreedte' is hier gedefinieerd als de ruimte die beschikbaar is om, binnen de vastgestelde grenzen, een optimalisatie van het ontwerp te kunnen maken. Om een indruk te krijgen van het effect van een hogere of lagere ontgravingsdiepte zijn twee ontwerpen gemaakt waarbij zowel de boven- als de ondergrens in de bandbreedte gebruikt zijn als ontgravingsdiepte van de nevengeulen, de hoofdgeulverbredingen en de aansluiting van de weerdverlagingen met het zomerbed.

1.6 Relaties met andere deelonderzoeken

Het onderhavig Nader Onderzoek vormt, zoals voorgaand aangegeven, een aanvulling op het Morfologisch Onderzoek dat in het kader van het MER Grensmaas is uitgevoerd (Akkerman, 2003). Ook heeft het een nauwe relatie met de Rivierkundig Onderzoek (Agtersloot, 2003) van het MER Grensmaas. Zo zijn resultaten (waterstanden, stroomsnelheden etc.) uit het Rivierkundig Onderzoek gebruikt om de verschillende SOBEK-modellen te kalibreren.

1.7 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport is als volgt. In Hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de gevolgde methode waarmee de morfologische effecten van de verschillende MER-alternatieven en ontwerpen zijn onderzocht. In Hoofdstuk 3 wordt kort ingegaan op het toetsingskader en de criteria waarop de MER-alternatieven onderling zijn vergeleken. Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de huidige morfologie van de Grensmaas, vooral gericht op de ontwikkelingen in de tijd. Hoofdstuk 5 beschrijft de bouw, de kalibratie en de verificatie van het morfologisch model, waarna in Hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de berekende morfologische veranderingen in de Autonome Ontwikkeling. Vervolgens zijn de verschillende MER-alternatieven en ontwerpen en de morfologische effecten beschreven in Hoofdstuk 7. Hoofdstuk 8 geeft de bevindingen van een beperkte gevoeligheidsanalyse weer. In Hoofdstuk 9 zijn tenslotte conclusies getrokken en enkele aanbevelingen gedaan.

2 Methodiek en gegevensbronnen

2.1 Algemeen

Het beantwoorden van de vragen zoals gesteld in Tabel 1-1 vereist een combinatie van hydraulisch en morfologisch onderzoek. In overleg met de opdrachtgever werd besloten om te kiezen voor een aanpak in drie fasen.

De eerste fase betrof het uitvoeren van hydraulische berekeningen. Deze berekeningen zijn niet alleen gebruikt voor het bepalen van de effecten van de ingrepen, maar zijn ook gebruikt voor het vaststellen van het bereikte beschermingsniveau, de mate van noodzakelijke kade-aanpassingen en de boven- en benedenstroomse effecten. De resultaten van het hydraulische onderzoek zijn beschreven in het Achtergronddocument 1 bij het MER Grensmaas (Agtersloot, 2003).

De tweede fase is een morfologische studie waarin, op basis van de resultaten van de hydraulische berekeningen, een analyse wordt gemaakt van de te verwachten initiële morfologische effecten. Er werd onder andere onderzoek verricht naar de gebieden die gevoelig zijn voor erosie of voor sedimentatie, het risico van erosie van de monding van beken en de risico's op verplaatsing van de thalweg. De hydraulische resultaten, waarvan in genoemde studie gebruik is gemaakt, betreffen die bij een constante afvoer van 2710 m³/s bij Borgharen (overschrijdingsfrequentie 1/50 per jaar). Dit onderzoek staat beschreven in het Achtergronddocument 2 (Akkerman, 2003).

De derde fase betreft de in dit verslag beschreven werkzaamheden, waarbij morfologische modelsimulaties met SOBEK-gegradeerd uitgevoerd zijn. Deze berekeningen zijn aanvullend aan de resultaten die zijn bepaald in het Achtergronddocument 2 (Akkerman, 2003). Het modelsysteem SOBEK-gegradeerd bevat een door RIZA en WL | Delft Hydraulics ontwikkelde uitbreiding van de morfologische module van het SOBEK-modelsysteem voor het uitvoeren van studies naar het morfologisch gedrag van rivieren met gegradeerd en gelaagd bodemmateriaal (Duizendstra en Flokstra, 1998). De resultaten van deze studie moeten een beter inzicht geven in bijvoorbeeld de risico's van sedimentatie of erosie in de nevengeulen en in de geulverbredingen en op de weerdverlagingen, en van ongewenste erosie, met name in de flessenhalzen (lokale vernauwingen met relatief hoge stroomsnelheden). Zoals de riviermorfologie door stroming wordt aangedreven, zo is ook het morfologisch model afhankelijk van de hydraulische modelresultaten. De hydraulische afregeling van de morfologische modellen is gebaseerd op WAQUA-resultaten. Tenslotte zijn de resultaten van de morfologische ontwikkeling in het Voorkeursalternatief 2003 gebruikt om een WAQUA-model te maken waarmee de hydraulische consequenties van de morfologische ontwikkelingen inzichtelijk zijn gemaakt. Het streven om 100 jaar morfologische ontwikkeling te simuleren is niet voor alle scenario's gerealiseerd. Voor enkele simulaties moest noodgedwongen met een tijdvenster van 50 respectievelijk 75 jaar worden volstaan.

De volgende paragrafen van dit hoofdstuk beschrijven het in de derde fase uitgevoerde Nader Morfologisch Onderzoek. Paragraaf 2.2 gaat in op het gebruikte rekenmodel en de toegeleverde gegevens. Paragraaf 2.3 geeft een overzicht van alle berekeningen die in het kader van het Nader Morfologisch Onderzoek zijn uitgevoerd. Een uitspraak over de nauwkeurigheid van de berekeningsresultaten wordt gedaan in Paragraaf 2.4.

2.2 Hulpmiddelen en gegevens

2.2.1 Modelsysteem SOBEK-gegradeerd

Voor het Nader Morfologisch Onderzoek is gebruik gemaakt van het 1-dimensionale hydraulische en morfologische simulatieprogramma SOBEK (versie 2.52). De morfologische module bevat sinds 2002 de optie 'gegradeerd sediment'. De belangrijkste onderscheidende eigenschappen van deze optie zijn:

- Per rekenpunt kan een verticale differentiatie van bodemmateriaal worden aangebracht door middel van gelaagdheid. De bodemlagen hebben een vaste dikte (in dit project: 0,25 m).
- Per bodemlaag kan een gegradeerde samenstelling van het bodemmateriaal worden opgegeven. Hiertoe wordt het aanwezige sediment verdeeld in een aantal fracties (in dit project: 9 fracties).
- Het sedimenttransport wordt per fractie berekend. Het sedimenttransport in de simulatie is afhankelijk van hydraulische variabelen (stroomsnelheid, waterdiepte), de sedimentvoerende breedte, en de samenstelling van het bodemmateriaal tot een door de gebruiker vast te stellen diepte onder de bodemoppervlakte (de zogenaamde transportlaagdikte).

Door transportprocessen, en diensgevolge erosie- en sedimentatieprocessen kunnen in de loop van de simulatie de bodemligging, de samenstelling en gradering van sedimentlagen in het model veranderen. Effecten als afpleistering, het aansnijden van fijne zandlagen, hier opvolgende erosie- en sedimentatieprocessen en het opnieuw afpleisteren van de bodem kunnen op deze wijze worden gesimuleerd. Voor een gedetailleerde beschrijving van het concept van SOBEK-gegradeerd wordt verwezen naar een werkdocument van RIZA en WL | Delft Hydraulics (Duizendstra en Flokstra, 1998).

De morfologische module bevat een afbreekcriterium, dat de simulatie stopt zodra ergens in de berekening het Froude-getal groter dan 1 wordt. Dit afbreekcriterium bleek de voortgang van de simulaties te belemmeren omdat het Froude-getal als gevolg van morfologische activiteit soms lokaal en tijdelijk groter dan 1 kan zijn. Dit verschijnsel kan optreden wanneer zich op een aanzandingslocatie na een hoogwatersituatie een laagwatersituatie instelt. Dit in de simulaties waargenomen verschijnsel kan ook in werkelijkheid optreden. Voor dit onderzoek is een aangepaste versie van de rekenkern gebruikt, waarbij de morfologische simulatie niet direct afbreekt zodra het Froude-getal groter dan 1 is. Hoewel de transportformule voor deze situaties niet geldig is, wordt de grootschalige morfologische ontwikkeling hierdoor niet beïnvloed, immers schietend water treedt niet meer dan zeer lokaal en tijdelijk op.

2.2.2 Toegeleverde gegevens

Ten behoeve van de bouw van de modelschematisaties en de modelsimulaties zijn de volgende toegeleverde gegevens gebruikt:

- een geografische vastlegging van de inrichtingsvarianten Autonome Ontwikkeling (AO), Voorkeursalternatief 2003 (VKA) en twee varianten hierop (VKA_P en VKA_M), deze laatste twee met verhoogd resp. verlaagd ontgravingsdiepte) volgens het BASELINE-protocol ten behoeve van de bouw van de SOBEK-modellen NA, EP, EPP resp. EPP volgens het BASELINE-protocol (Van der Meulen, 1998);

- de aan modelschematisatie SOBEK 2000.2 (met hoogtemodel 1995 vóór aanleg van de DGR-kaden, zie Bijlage 1) ten grondslag liggende BASELINE-basisgegevens (Rijkswaterstaat RIZA, 2001);
- hoogtemodellen van het zomerbed van de Grensmaas in 1978, 1987 en 1995;
- rapporten met gegevens over bodemontwikkelingen in de periode 1978-1995 (Wilbers, 1996);
- rapporten met gegevens over sedimenttransportmetingen bij Maaseik en de brug bij Elsloo (Duizendstra, 1999);
- gegevens over de samenstelling (gelaagdheid, zeefkrommen) van de bodem van de Grensmaas (TNO, 2002). Deze gegevens zijn gebaseerd op de database van NITG en dekken ook de ingreeplocaties (riviervbreidingen, nevengeulen e.d.). De gegevens zijn aangeleverd en ingedeeld met inachtneming van de SOBEK-vakindeling (waarop de dwarsprofielen en rekenpunten gebaseerd zijn) en gewenste laagdikte van het SOBEK-model;
- afvoerreeksen van Eijsden en enkele zijrivieren alsmede enkele laterale lozingen en onttrekkingen;
- een afvoer-waterstandsrelatie te Heel-boven (QH-relatie).

2.3 Morfologische modelberekeningen

2.3.1 Modelschematisaties

Bijlage 1 bevat een uitgebreid overzicht van modelschematisaties, waarbij de verwantschap tussen SOBEK-modellen, WAQUA-modellen en BASELINE-basisgegevens is aangegeven. In Tabel 2-1 staan de voor dit project gebruikte SOBEK-modelschematisaties en varianten vermeld. Hierbij zijn de basisschematisaties in de linkerkolom links uitgelijnd. De hierop gebaseerde varianten zijn rechts uitgelijnd. De getoonde modelschematisaties en varianten zijn in het kader van dit project door de opdrachtnemer gebouwd en voor morfologische modelsimulaties geschikt gemaakt.

Tabel 2-1 *Overzicht van relevante SOBEK-modellen*

naam / variant	Beschrijving
NA (AO)	Nulalternatief (Autonome Ontwikkeling): gebaseerd op bodem 1995 met DGR-kaden en Autonome Ontwikkelingen (Stevol, Julianakanaal-West) t.b.v. morfologieberekeningen met SOBEK-gegradeerd t.b.v. MER Grensmaas 2003, modelbereik: km 2,6-68, geheel opnieuw opgebouwd met nieuwe vakindeling, gehele schematisatie BASELINE-gebaseerd
<i>NA1987</i>	idem op basis van DTM1987 (profielen uit BASELINE) t.b.v. morfologische modelkalibratie (bodemontwikkeling 1987-1995)
<i>NA1978</i>	idem op basis van DTM1978 (profielen uit BASELINE) t.b.v. morfologische modelverificatie (bodemontwikkeling 1978-1995)
EP (VKA)	Voorkeursalternatief 2003, gebaseerd op AO met ingrepen Eindplan (schematisatie BASELINE-gebaseerd)
<i>EPP (VKA_P)</i>	Voorkeursalternatief 2003 met verhoogde ontgravingsdiepte (+0,50 m) weerdverlagingen, nevengeulen en hoofdgeulverbredingen (schematisatie BASELINE-gebaseerd)
<i>EPM (VKA_M)</i>	Voorkeursalternatief 2003 met verlaagde ontgravingsdiepte (-0,50 m) weerdverlagingen, nevengeulen en hoofdgeulverbredingen (schematisatie BASELINE-gebaseerd)

De SOBEK-modelschematisaties ten behoeve de morfologische kalibratie en verificatie zijn gebaseerd op het NA-model, teneinde consistentie met de modelschematisaties NA en EP te waarborgen. Alle in dit onderzoek gebruikte SOBEK-modellen hebben dezelfde structuur ten aanzien van locaties van knooppunten en rekenpunten. Deze keuze is gemaakt in het belang

van de consistentie van de simulaties en de verwerking van invoer- en uitvoergegevens, en dientengevolge de kwaliteit van de resultaten. De bouw van de modelschematisaties wordt in de Paragrafen 5.2, 5.3, 7.2 respectievelijk 7.6 meer gedetailleerd beschreven. Onderstaand worden de modelschematisaties kort toegelicht.

Het SOBEK-model NA (AO) is een weergave van de autonome situatie in 2015, dus zonder uitvoering van het Voorkeursalternatief 2003. Het model bevat echter wel de ingrepen die in de Zandmaas zullen plaatsvinden in het kader van het genomen Tracébesluit (De Maaswerken, 2002). Voor zover het de Grensmaas betreft, betreffen de verschillen ten opzichte van de situatie in 1995 onder andere grindwinning (bijvoorbeeld het Stevol-project aan Nederlandse zijde of de ingrepen in de Bichterweert aan Vlaamse zijde) en natuurontwikkeling (het WML-project bij Roosteren). Opgemerkt wordt dat Proefproject Meers **geen** deel uitmaakt van de AO, omdat dit reeds als deel van het VKA beschouwd wordt. Een meer volledige beschrijving van de AO en de berekeningsresultaten staat in Hoofdstuk 6.

De modellen EP, EPP en EPM (alternatieven VKA, VKA_P en VKA_M) beschrijven de situatie in 2015, waarbij de ingrepen uit het Voorkeursalternatief 2003 wel zijn uitgevoerd. Hierbij vormen VKA_P en VKA_M inrichtingsvarianten met een gewijzigd insteekniveau van de verdiepings- en verbredingslocaties (zie Paragraaf 7.6). De modellen bevatten de veranderingen zoals die ook in de AO zaten, proefproject Meers en de twaalf ingrepen van het Voorkeursalternatief 2003. De voltooiing van het Grensmaasproject is uiterlijk in 2017 voorzien. Echter, in deze studie is 1 januari 2015 als startdatum gekozen voor alle morfologische modelsimulaties die betrekking hebben op de planstudie na realisatie van de ingrepen, omdat het project dan reeds grotendeels gerealiseerd zal zijn.

2.3.2 Modelsimulaties

Ten behoeve van het Nader Morfologisch Onderzoek zijn de volgende simulaties uitgevoerd:

Tabel 2-2 Overzicht van uitgevoerde modelsimulaties (modelkalibratie- en verificatie, onderzoek Autonome Ontwikkeling)

model	simulaties	s/d ¹⁾	h/m ²⁾	toelichting
NA (AO)	permanenties (4 debieten)	s	h	hydraulische toets aan WAQUA NA (AO: waterstanden, afvoeren en stroomsnelheden bij debieten 100, 975, 2710 en 3800 m ³ /s)
NA1987	1987-1995	d	m	morfologische kalibratieberekening: bodemontwikkeling 1987-1995 en transporten ($\Delta t = 12$ h)
NA1978	1978-1995	d	m	morfologische verificatieberekening: bodemontwikkeling 1978-1987 en 1978-1995, en transporten ($\Delta t = 12$ h)
NA (AO)	HW1998	d	m	morfologische verificatieberekening: bodemtransporten Maaseik tijdens hoogwater 1998 ($\Delta t = 1$ h)
NA (AO)	2015-2115 natte afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar nat (10 maal afvoerreeks 1980-1990)
	2015-2115 droge afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar droog (10 maal afvoerreeks 1970-1980)
	2015-2115 gem. afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar gemiddeld (10 maal afvoerreeks 1950-1960)
	2015-2115 hist. afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar (op basis van historische afvoerreeks 1911-1998)
	HW50-250-1250 j (start)	s	h	HW-berekening 1/50, 1/250 en 1/1250 j (na 0 jaar)
	HW50-250-1250 j (eind)	s	h	HW-berekening 1/50 j, 1/250 en 1/1250 j (na 75 jaar) t.b.v. bepaling effect morfologische ontwikkeling op waterstanden

Tabel 2-3 Overzicht van uitgevoerde modelsimulaties (Voorkeursalternatief 2003 en varianten)

model	simulaties	s/d ¹⁾	h/m ²⁾	toelichting
EP (VKA)	permanenties (4 debieten)	s	h	hydraulische toets aan WAQUA VKA (waterstanden, afvoeren en stroomsnelheden bij debieten 100, 975, 2710 en 3800 m ³ /s)
	2015-2115 natte afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar nat (10 maal afvoerreeks 1980-1990)
	2015-2115 droge afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar droog (10 maal afvoerreeks 1970-1980)
	2015-2115 gem. afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar gemiddeld (10 maal afvoerreeks 1950-1960)
	2015-2115 hist. afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar (op basis van historische afvoerreeks 1911-1998)
	HW50-250-1250 j (start)	s	h	HW-berekening 1/50, 1/250 en 1/1250 j (na 0 jaar)
	HW50-250-1250 j (eind)	s	h	HW-berekening 1/50 j, 1/250 en 1/1250 j (na 75 jaar) t.b.v. bepaling effect morfologische ontwikkeling op waterstanden
	WAQUA VKA2090 1/250 j (eind)	d	h	HW-berekening 1/250 j (na 75 jaar) met WAQUA
	2015-2115 Koeweide hist. afvoerreeks	d	m	variatie van het ontwerp bij de Koeweide (op basis van historische afvoerreeks 1911-1998)
EPP (VKA_P)	permanenties (4 debieten)	s	h	hydraulische toets aan WAQUA VKA_P (waterstanden, afvoeren en stroomsnelheden bij debieten 100, 975, 2710 en 3800 m ³ /s)
	2015-2115 hist. afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar (op basis van historische afvoerreeks 1911-1998)
EPM (VKA_M)	permanenties (4 debieten)	s	h	hydraulische toets aan WAQUA VKA_M (waterstanden, afvoeren en stroomsnelheden bij debieten 100, 975, 2710 en 3800 m ³ /s)
	2015-2115 hist. afvoerreeks	d	m	morfologische berekening 100 jaar (op basis van historische afvoerreeks 1911-1998)

¹⁾ s=stationair, d=dynamisch

²⁾ h=hydraulisch, m=morfologisch

Tabel 2-4 Overzicht van uitgevoerde modelsimulaties (gevoeligheidsanalyse)

model	simulaties	s/d ¹⁾	h/m ²⁾	toelichting
NA1978	1978-1995	d	m	variatie van de initiële samenstelling van de toplaag van de bedding (uit kalibratie)
	1978-1995	d	m	variatie van de initiële samenstelling van de grindlaag (secundair materiaal) van de bedding (uit kalibratie)
	1978-1995	d	m	variatie van het sedimentaanbod aan de bovenrand
NA (AO)	2015-2115 natte afvoerreeks	d	m	variatie van de gebruikte laagdikte van de grindlaag

¹⁾ s=stationair, d=dynamisch

²⁾ h=hydraulisch, m=morfologisch

2.4 Nauwkeurigheid voorspellingen

Ten aanzien van de nauwkeurigheid van de voorspelling kan een oordeel dienaangaande slechts gebaseerd zijn op verifieerbare modelresultaten. Hiertoe is een modelkalibratie en -verificatie uitgevoerd (zie Hoofdstuk 5). Samenvattend kan gesteld worden dat aan het voorspellen van sedimenttransporten en bodemontwikkelingen op detailniveau geen hoge eisen gesteld blijken te kunnen worden. Dit hangt samen met de resolutie van het rekenmodel (afstand tussen rekenpunten circa 500 m) en de mate van detail van de gebruikte gegevens ten aanzien van het bodemmateriaal. Met name ten aanzien van het bodemmateriaal zijn er veel onzekerheden omtrent ruimtelijke variatie (zowel in langs- als dwarsrichting), en de diepte en samenstelling van het toutvenant. De huidige rivierbedding is een historische afdruk van vele jaren morfologische activiteit, die slechts beperkt in kaart is gebracht. De geologische ondergrond is beter gedocumenteerd, maar daarentegen slechts relevant voor de locaties van de ingrepen. Vanzelfsprekend vertonen ook het concept van het rekenmodel, de gebruikte transportformule(s), de numerieke beschrijving van transportprocessen en bodemaanpassingen in gediscretiseerde stappen in tijd en ruimte afwijkingen met de fysische processen in de realiteit.

Belangrijk is dat de trend juist weergegeven wordt, en dat de orde van grootte van de trend benaderd wordt. In dit onderzoek betekent dit dat het integrale sedimenttransport van de Grensmaas binnen een nauwkeurigheidsmarge van ca 15 % beschreven wordt, evenals de Grensmaas-gemiddelde bodemontwikkeling in termen van erosie of aanzanding. Lokaal komen echter verschillen tussen gemeten en berekende resultaten tot circa 1 m voor. In de werkelijkheid blijken er ook pieken en dalen in de bodem van deze orde van grootte zich door het systeem te verplaatsen. De standaarddeviatie (op basis van de verificatieberekening 1978-1995, zie Hoofdstuk 5) bedraagt 0,48 m. Het model is goed in staat morfologische ontwikkelingen op middellange tijdschalen te simuleren. De simulatieresultaten illustreren het karakter van de Grensmaas alsmede de aard van de ingrepen op inzichtelijke wijze.

3 Toetsingskader

3.1 Inleiding

Het Grensmaasproject is erop gericht om, naast grindwinning en waterstandsdeling, meer natuurontwikkeling en dynamiek in het gebied te realiseren: een rijkere flora en fauna, meer variatie in het landschap, zand- en grindbanken in de rivier, nevengeulen, afwisselende bossages etc. De toetsen voor de morfologische effecten moeten hierop betrekking hebben.

De beoordeling van de morfologische effecten is hierna geconcretiseerd volgens de volgende rubrieken:

- stabiliteit van het zomerbed op langere termijn;
- veranderingen in veiligheidsniveau als gevolg van morfologische ontwikkelingen;
- verandering van sedimentvrachten in de Grensmaas;
- stabiliteit van ingrepen op langere termijn;
- verlegging thalweg;
- morfodynamiek (erosie- en sedimentatieoppervlakten).

Deze punten zijn ook in het Morfologisch Onderzoek (Akkerman, 2003) aan de orde gekomen. Het onderhavige onderzoek beschouwt deze aspecten, voorzover het instrumentarium het toelaat, in het kader van de langjarige ontwikkelingen. Het modelonderzoek levert voor de eerste drie aspecten bruikbare resultaten. Voor de laatste drie punten is een voorbehoud noodzakelijk ten aanzien van de interpretatie van de resultaten.

3.2 Toetsingscriteria

Stabiliteit van het zomerbed

De ingrepen van het Voorkeursalternatief 2003 zorgen op enkele locaties (met name in de zogenaamde 'flessenhalzen') voor een toename van de stroomsnelheden. Dit kan op termijn leiden tot een ongewenste en oncontroleerbare erosie met grote stabiliteitsrisico's voor kaden en/of bruggen. Een relevante toetsing is dan ook:

- identificatie van locaties waar in het zomerbed (ongewenste) erosie optreedt met risico's voor kaden en/of bruggen;
- een toetsing van het ontwerp (locatie en lengte) van de bodemverdedigingen.

Veranderingen in veiligheidsniveau door morfologische ontwikkelingen

De ingrepen van het Voorkeursalternatief 2003 zorgen (samen met kadeverhogingen) voor een verhoging van het veiligheidsniveau van 1/50 naar 1/250 jaar (direct na uitvoering van de ingrepen). De vraag is of door morfologische ontwikkelingen van de bodem van de Grensmaas dit veiligheidsniveau zal veranderen, bijvoorbeeld tengevolge van sedimentatie in de ingreepgebieden. Een belangrijke toets is dan ook:

- hoe is de bodemligging na 75 jaar morfologische ontwikkelingen en veroorzaakt deze een verandering in het veiligheidsniveau bij hoogwater?

Verandering van sedimentvrachten in de Grensmaas

De Grensmaas kenmerkt zich als een zich insnijdende rivier, waarbij de jaarlijkse sedimenttransporten door het systeem heen binnen zekere nauwkeurigheidsmarges bekend zijn. Het onderzoek dient antwoord te geven op de vraag in hoeverre de transportkarakteristieken in grote lijnen door de rivierkundige ingrepen zullen veranderen.

Stabiliteit van ingrepen

Relevante toetsingen betreffen de stabiliteit van de ingrepen na langdurige morfologische ontwikkelingen, in het bijzonder het risico van dichtslibbing van nevengeulen. Voor de stabiliteit van de ingrepen zijn vanuit morfologisch oogmerk relevante toetsingen:

- de morfologische ontwikkelingen en afmetingen van de verschillende nevengeulen in het gebied;
- de morfologische ontwikkelingen en afmetingen van de verschillende grootschalige verbredingen in het gebied (met name bij Itteren en de Koeweide).

Ten aanzien van het morfologisch gedrag van de nevengeulen wordt opgemerkt dat de mogelijkheid tot toetsing ervan met een 1-dimensionaal model beperkt is. Met name de sedimentverdeling op de splitsingspunten is een onbekende maar belangrijke factor, waarvoor niet te onderbouwen aannamen gedaan moeten worden. Dit vormt een onzekere factor ten aanzien van de uitkomsten.

Verlegging thalweg

De thalweg vormt in de Grensmaas de grens tussen Nederland en België. De definitie van de thalweg is de lijn die de diepste punten van het zomerbed met elkaar verbindt. De ingrepen kunnen leiden tot een wijziging van de ligging van het diepste punt in een dwarsprofiel en kunnen dus tot een nieuwe grensligging leiden. Hoewel het met een SOBEK-model niet mogelijk is om verplaatsingen van het diepste punt loodrecht op de rivieras te simuleren kan wel worden gekeken of het diepste punt zich na verloop van tijd zou kunnen verplaatsen van het zomerbed naar de toegevoegde takken. Daaruit kan dan worden afgeleid of een thalweg-verplaatsing mogelijk is. Relevante toetsingen zijn dus:

- identificatie van locaties waar de thalweg verandert ten opzichte van de referentiesituatie door na te gaan of het diepste punt zich verplaatst van het zomerbed naar de toegevoegde takken;
- in het geval van ongewenste verplaatsingen (bijvoorbeeld van de Elba-nevengeul bij Grevenbicht) aangeven wat een mogelijke oplossing kan zijn.

Morfodynamiek (erosie- en sedimentatieoppervlakten)

Door lokale erosie- en sedimentatieprocessen te analyseren, kan een inschatting worden gemaakt naar de morfologische dynamiek van de Grensmaas in de toekomst. Ook hiervoor geldt het voorbehoud dat het gebruikte model geen resultaten voortbrengt, die op detailniveau geïnterpreteerd kunnen worden. In dit onderzoek wordt ten aanzien van de morfodynamiek beoordeeld hoe ingrepen elkaar globaal onderling beïnvloeden, en hoe de bodemligging en samenstelling en de loop van de tijd bij benadering kunnen variëren.

4 Huidige morfologie van de Grensmaas

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat in op het huidige morfologische systeem van de Grensmaas. Teneinde lange-termijneffecten van ingrepen te kunnen analyseren is het van groot belang de huidige riviermorfologie van de Grensmaas te begrijpen. Het Morfologisch Onderzoek (Akkerman, 2003) is hierop reeds ingegaan. Het voorliggende onderzoek gaat echter dieper in op de sediment-samenstelling en bodemopbouw, en het sedimenttransport wordt nader geanalyseerd.

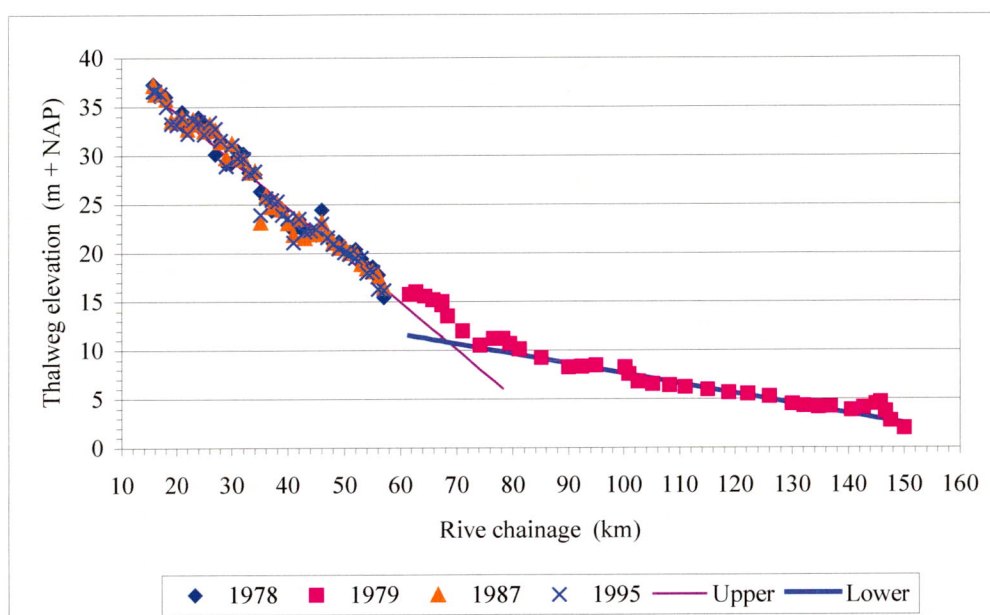
Tot voor 200 jaar was de Grensmaas een enigszins vrij meanderende rivier met meerdere ondiepe geulen en diverse eilanden in het laagwaterbed. De huidige Grensmaas is een rivier met een laagwaterbedding met één enkele geul die thans diep ingesneden ligt in het hoogwaterbed. Daarbij is het verschil tussen de geul en de weerden op veel plaatsen 5 tot 10 m. De rivier is in de loop van circa 2 eeuwen vooral zo geworden als gevolg van regulering die anderhalve eeuw geleden begon (oevers zijn over grote trajecten vastgelegd), ontgrindingen en ontzandingen. Ook slibafzetting in de weerden tijdens hoogwaters is hier debet aan. De Maas is op velerlei manieren en al heel lang beïnvloed door menselijk handelen. De effecten van dit menselijk handelen zijn zich nog steeds aan het ontwikkelen, omdat de Maas morfologisch gezien een zeer langzame rivier is. De belangrijkste activiteiten zijn geweest: de normalisatie van de rivier in de 2^e helft van de 19^e eeuw, de bouw van stuwen en parallelkanalen (Julianakanaal, Lateraalkanaal) met de bijbehorende wateronttrekkingen, de winning van grind in het zomerbed van de Grensmaas, de mijnzakkingen nabij Meers en de aanleg van kaden rondom dorpen in 1995 na de hoogwaters van 1993 en 1995, de zogenaamde DGR-kaden met hoogwaterbescherming als doel. De aan Vlaamse zijde gelegen dorpen zijn al veel langer omkaad. Voor aanleg van de DGR-kaden in 1995 trad bij hoogwatergolven met een kans van voorkomen van 1/10 per jaar overstromingsschade op in het winterbed. Na aanleg van de DGR-kaden gebeurt dit pas bij hoogwatergolven met een kans van voorkomen van 1/50 per jaar. Door uitvoering van het Voorkeursalternatief 2003 zal deze frequentie teruglopen naar 1/250 per jaar.

Het gevolg van de verschillende activiteiten is, dat de Grensmaas nu een diep ingesneden rivier is die slechts bij relatief grote hoogwaters haar uiterwaarden overstroomt. De aanvoer van zand en grind van bovenstrooms lijkt vrijwel tot stilstand gekomen, mede door grindwinning in Wallonië.

De Grensmaas is een typische regenrivier met kortstondige hoogwaters die zich zeer kort na het begin van sterke regenval in het stroomgebied voordoen: normaliter binnen 3 dagen. De hoogwaters treden vooral in de late herfst en winter op. In extreme gevallen kan de piekafvoer hiervan 3000 m³/s of meer bedragen (hoogwater 1993: 3039 m³/s en hoogwater 1995: 2746 m³/s te Borgharen). De extreme hoogwaters bepalen in sterke mate de verplaatsing van materiaal, en daarmee de erosie- en sedimentatieprocessen. De gemiddelde afvoer bij Borgharen ligt op circa 235 m³/s. De laagwaterafvoer kan zeer klein zijn in de zomer. Significant bodemtransport vindt alleen plaats bij afvoeren boven de 1200 m³/s door de beschermende werking van de grove afpleisteringslaag. Bij 1250 m³/s wordt de stuw bij Borgharen gestreken en beginnen in de Grensmaas ook de weerden te overstromen.

4.2 Bodemligging en -ontwikkeling

Het Grensmaasgebied begint bij de stuw Borgharen (circa rkm 15) en eindigt bij Roosteren (circa rkm 56). Het bodemverhang (i) is in dit gedeelte van de Grensmaas van 40 km circa $5 \cdot 10^{-4}$. De hoogte van de thalweg (gedefinieerd als de verbindingslijn tussen de diepste punten van de dwarsprofielen) verloopt van NAP+35 m bij rkm 15 tot NAP+17 m bij rkm 55. Het verhang van het winterbed toont eenzelfde verloop (van NAP+45 m tot NAP+27 m). In Figuur 4-1 is de thalweghoogte weergegeven tussen rkm 15 en rkm 150. Duidelijk is te zien dat de Grensmaas beduidend steiler is dan de meer benedenstroomse Zandmaas (verhang ca $1 \cdot 10^{-4}$).



Figuur 4-1 Thalwegligging van de Maas tussen rkm 15 en rkm 150 (Murillo, 1998)

Het winterbed (de 'weerden') van de Grensmaas is over het algemeen een gebied met akkers en weilanden en met slechts beperkte boombegroeiing. Een tiental dorpen ligt op Nederlands grondgebied in het winterbed. Behalve de oude dorpskernen (die veelal wat hoger liggen) zijn er vaak ook wijken op de lager gelegen delen van het winterbed. Na het hoogwater van 1995 zijn kaden aangebracht rond deze dorpen, de zogenaamde DGR-kaden.

Tabel 4-1 Recente bodemontwikkeling in de Grensmaas (Wilbers, 1996; GIS-analyse)

traject	rkm	locatie	1978-1987		1987-1995		1978-1995	
			(m)	(m/j)	(m)	(m/j)	(m)	(m/j)
Grensmaas	15-56	gemiddeld ¹⁾	-0,068	-0,007	-0,172	-0,023	-0,244	-0,015
		rivieras ²⁾	-0,128	-0,014	-0,130	-0,016	-0,259	-0,015

¹⁾ Wilbers, 1996

²⁾ GIS-analyse onderhavig onderzoek

In de Grensmaas is sprake van een voortdurende gestage erosie. Het zomerbed snijdt zich in de loop van de tijd steeds dieper in het landschap in. Op basis van toegeleverde bronnen (Wilbers, 1996) en GIS-analyses van het zomerbed is dit beeld bevestigd (Tabel 4-1).

Ten aanzien van de nauwkeurigheid van de hoogtemodellen en de bovenstaande analyse zijn wel kanttekeningen te maken: in de gebruikte hoogtemodellen bevinden zich hiaten, die volgens omliggende trends zijn opgevuld. Ook is de resolutie van de bodemhoogten in de GIS-analyse beperkt (in cm). Niettemin bevestigt de tabel het beeld van doorgaande erosie, en laat de tabel tevens zien dat deze kwantitatief in de tijd kan variëren. De periode 1978-1987 wordt beschouwd als relatief droge tijd. Hierin is de gemiddelde erosie gering. De periode 1987-1995 daarentegen wordt als natte periode beschouwd (met de hoogwaters van 1988, 1993 en 1995). De bodemdaling in deze periode is dan ook sterker. Het verschil tussen breedtegemiddelde erosie en de erosie in de as kan erop duiden, dat het rivierprofiel in droge tijden meer ingesneden raakt, en in natte tijden rechthoekiger van vorm wordt.

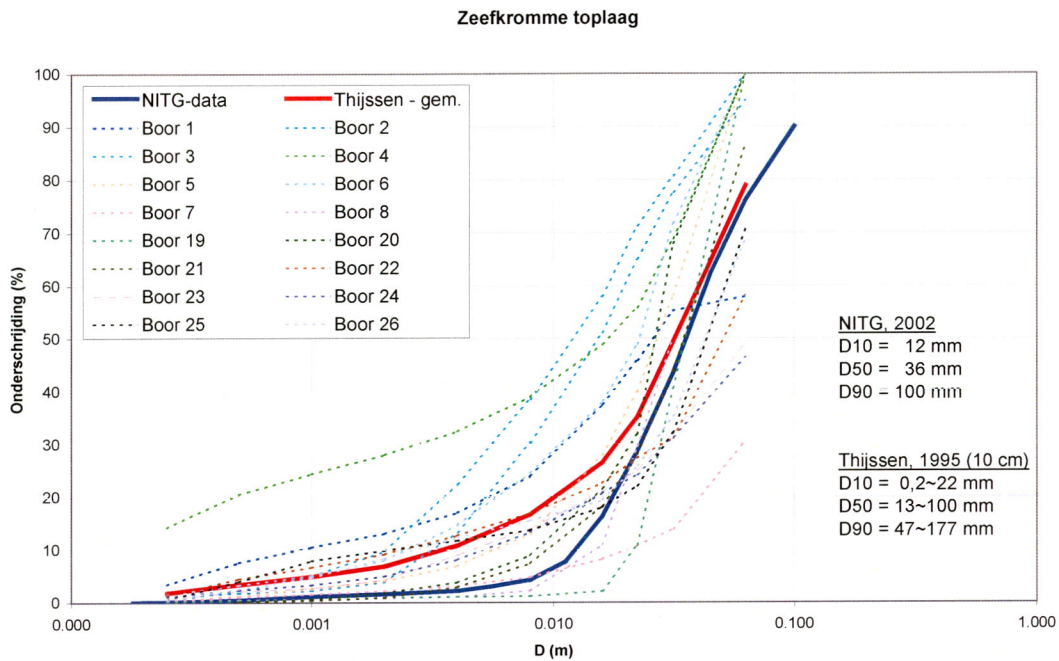
4.3 Bodemsamenstelling

Kenmerkend voor de Grensmaas is het voorkomen van grof materiaal in de bodemlagen. Op de bodem bevindt zich een laag met alleen grof materiaal van grindkeien en stenen. Deze zogenaamde afpleisteringslaag ontstaat doordat het fijnere materiaal door de stroming is getransporteerd. De grotere keien en stenen blijven liggen en schermen de onderliggende bodem af. Deze afpleisteringslagen werken vertragend op morfologische veranderingen. De Grensmaas is een grindrivier, de enige in Nederland. Figuur 4-2 toont de gemiddelde korreldiameter van het beddingmateriaal van de Maas tussen rkm 0 (bij Eijsden) tot rkm 150.



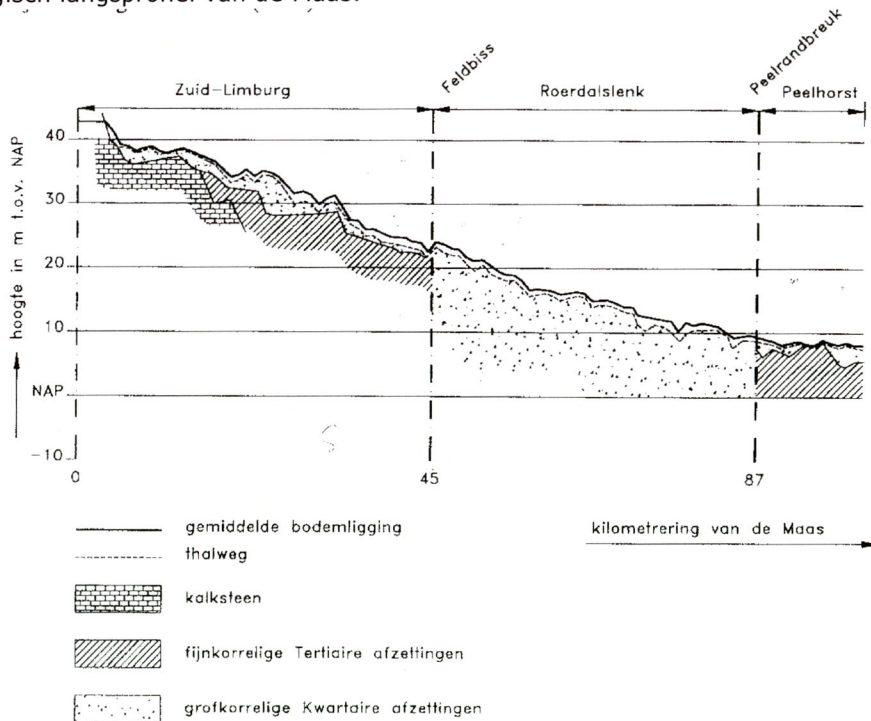
Figuur 4-2 Gemiddelde korreldiameter van het bodemmateriaal van de Maas (Murillo, 1998)

Het bovenste deel van de bedding van de Grensmaas bevat breed gegradeerd materiaal, het toutvenant, waarvan de gemiddelde diameter (D_{50}) over de Grensmaas tussen de 10 en 20 mm ligt. De korrels van dit materiaal variëren van zand tot aan grof grind en stenen van orde 1 decimeter. Op veel plaatsen is dit toutvenant afgedekt door een grovere afpleisteringslaag, die tot relatief hoge afvoeren nog aanwezig (1200-1700 m³/s) kan zijn. Figuur 4-2 laat zien dat er aanzienlijke verschillen tussen de individuele waarnemingen zijn. In deze studie wordt dit als spreiding beschouwd, niet als ruimtelijke variatie. Dit beeld lijkt te worden bevestigd door nabewerking van enkele boringen op een relatief klein traject (Figuur 4-3). De figuur laat een grote spreiding in zeefkrommen zien van in 1995 uitgevoerde boringen op het traject km 20-24 (Thijssen, 1995).



Figuur 4-3 Samenstelling toplaag rivierbedding (NITG, 2002: gemiddeld voor de Grensmaas; Thijssen, 1995: 26 boringen op het traject rkm 20-24)

De ondergrond van de Grensmaas bestaat uit afwisselend grind, zware klei en fijn zand met kleilenzen. In het meest zuidelijke deel komt mergel voor. Figuur 4-4 toont een globaal geologisch langsprofiel van de Maas.



Figuur 4-4 Geologisch langsprofiel van de Maas (Akkerman, 2003)

Belangrijk is het traject tussen Borgharen en Grevenbicht (km 15-45) waar onder de rivierbedding fijne zandlagen aanwezig zijn (formaties van Tongeren, Rupel en Breda). Dergelijke fijne zandlagen zijn verder benedenstrooms ook weer plaatselijk onder de Zandmaas te vinden. De afstand tussen de rivierbodem en deze zandlaag varieert sterk. Mogelijk is de zandlaag in het verleden meermalen door de rivier aangesneden waarna erosiekuilen zijn ontstaan die zich weer gevuld hebben met het grovere toutvenant.

Mede ten behoeve van de onderhavige studie is door TNO-NITG een geologisch ondergrondmodel aangeleverd, gebaseerd op boringen in het hoogwaterbed van de Maas (TNO, 2002). Deze gegevens zijn van grote waarde voor de beschrijving van de onaangeroerde onderlagen die onder de rivierbedding doorlopen. Ook doet NITG een uitspraak over de afpleisteringslaag, en neemt aan dat deze constant in samenstelling is voor de gehele Grensmaas (zie Figuur 4-3). Voor de beschrijving van de actieve rivierbedding (afpleisteringslaag en sublaag) is echter gekozen gebruik te maken van andere onderzoeken (Sorber en De Vaan, 1995; Van Manen en Onneweer, 1994; Murillo, 1998; Thijssen, 1995), omdat de gegevens van NITG geen uitsluitel geven over de ruimtelijke variatie en de samenstelling van de afpleisteringslaag en de hieronder liggende grindlaag.

Samenvattend gaat deze studie uit van de volgende opbouw van de ondergrond van de Grensmaas:

- een relatief dunne afpleisteringslaag,
- een sublaag bestaande uit toutvenant, sterk variërend in dikte (soms gelijk aan nul),
- onaangeroerde geologische onderlagen, variërend van fijn zand tot kalksteen (vaste laag).

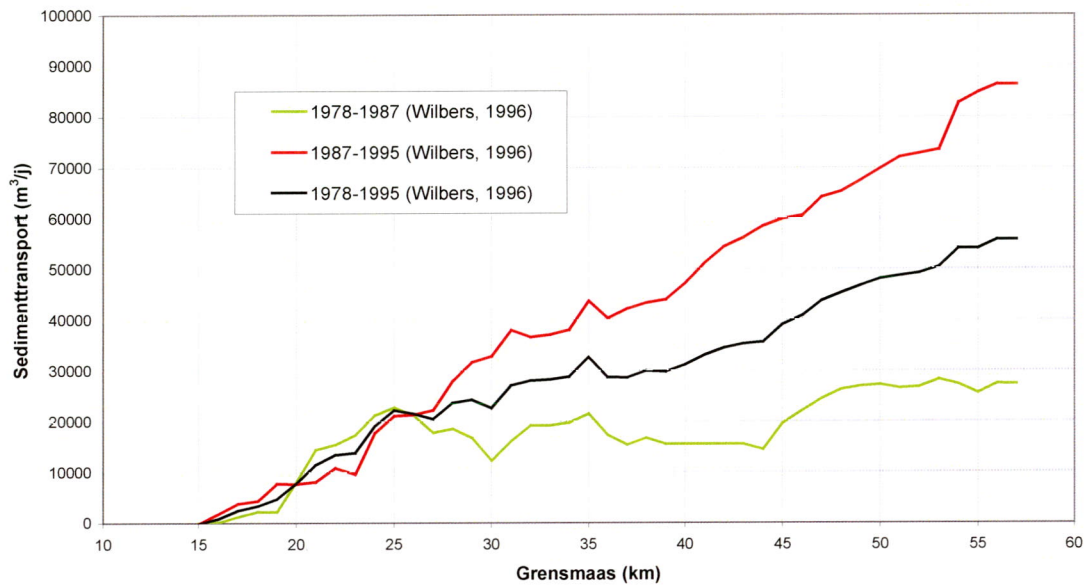
Naast de gecompliceerde opbouw van het natuurlijke beddingmateriaal, is sprake van resten van 'natuurvreemde' elementen: resten van grinddammetjes en teruggestort 'restmateriaal' (grindwinning), kribben, veerstoepen, kaden en oeververdedigingen.

4.4 Sedimenttransport

Morfologische veranderingen in de rivier worden door sedimenttransporten geïnitieerd. Daarbij is er een groot verschil tussen de Grensmaas als grindrivier en een 'gewone' zandrivier. In een zandrivier wordt het transport volledig bepaald door de transportcapaciteit (er is aanbod genoeg), terwijl bij de Grensmaas het aanbod vaak ordes van grootte lager is dan de transportcapaciteit. Dit laatste heeft te maken met de aanwezigheid van een grove afdeklaag, de afpleisteringslaag, die het onderliggend sterk gegradeerde zand-grindmengsel (het toutvenant) afdekt. Pas bij sterke hoogwaters wordt de afpleisteringslaag opgebroken en komt het onderliggende materiaal vrij om te worden getransporteerd. Wanneer na een sterk hoogwater nog 'residu' toutvenant aanwezig is boven op de afpleisterlaag, dan zal dit materiaal ook bij lagere afvoeren (tussen 300 en 1000 m³/s) kunnen worden getransporteerd, en treedt er opnieuw een proces van afpleistering op.

Dit betekent dat niet alleen de momentane rivierafvoer maar ook de recente geschiedenis van eerdere hoogwaters bepalend is voor het sedimenttransport in de Grensmaas (Duizendstra, 1999).

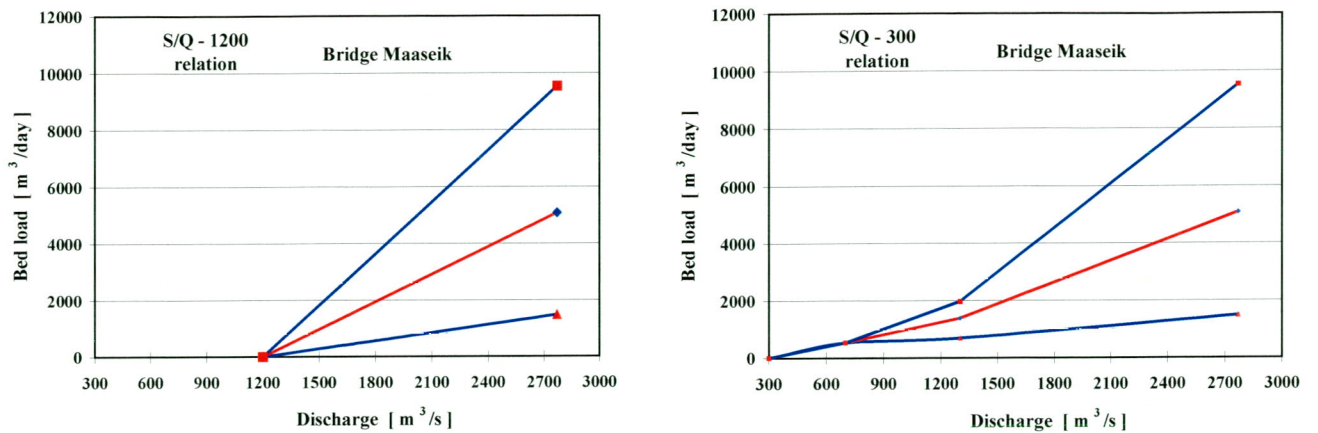
Op basis van bodempeilingen is een kwantitatieve schatting gemaakt van jaarlijkse transporten in de Grensmaas (Figuur 4-5). De transporten zijn gebaseerd op de eerste twee in Tabel 4-1 genoemde tijdvakken (Wilbers, 1996).



Figuur 4-5 Sedimenttransport in de Grensmaas op basis van bodempeilingen (Wilbers, 1996)

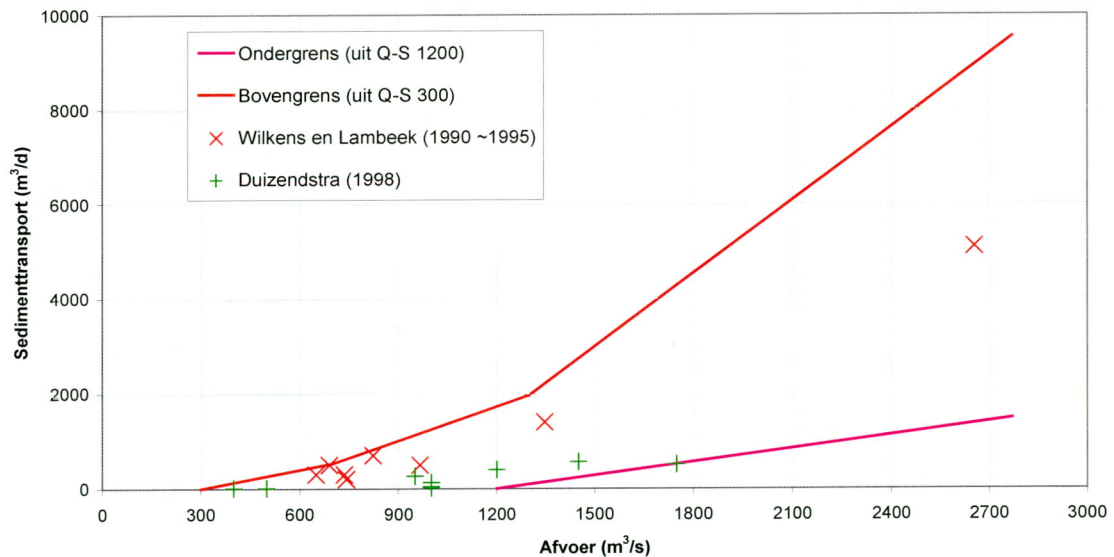
Gewezen wordt op de samenhang tussen het transport en de bodemdaling. De min of meer constante transportgradiënt is gebaseerd op een waargenomen rechtstandige bodemdaling van de Grensmaas. Deze benadering geeft een ondergrens van het sedimenttransport, op basis van de aanname dat het sedimenttransport bij Borgharen (en Eijsden) verwaarloosbaar is. De hoeveelheid gesuspendeerd materiaal dat Eijsden feitelijk passeert, blijft in suspensie en verlaat de Grensmaas weer. Deze onbekende hoeveelheid mag over de gehele lengte bij het transport opgeteld worden.

Tevens zijn enkele malen transportmetingen bij Maaseik en Elsloo uitgevoerd in de jaren 1990, 1991, 1994, 1995 en tijdens een hoogwatersituatie in 1998 (Wilkens en Lambeek, 1997; Duizendstra, 1999). Op basis hiervan zijn afvoer-transportrelaties opgesteld afhankelijk van de toestand van de rivierbodem van het moment (Duizendstra, 1999). In Figuur 4-6 laat de linker grafiek een transportrelatie zien bij een volledig afgepleisterde bodem. De ondergrens en de bovengrens geven een spreiding in metingen weer. Het transport begint pas bij debieten vanaf ca 1200 m³/s (Q-S 1200). De rechter grafiek toont een relatie bij beschikbaarheid van sediment. Transporten treden op vanaf debieten van ca 300 m³/s (Q-S 300). Een dergelijke situatie doet zich voor bij het openbreken van de afpleisteringslaag, of bij transport over de afpleisteringslaag heen. Ook hier is sprake van grote spreiding onder de meetresultaten, weergegeven door een bovengrens en een ondergrens. De figuur heeft betrekking op Maaseik, maar is in het algemeen representatief voor het sedimenttransportproces in een afgepleisterde rivier.



Figuur 4-6 Afvoer-transportrelaties te Maaseik (Duizendstra, 1999)

Door nu de ondergrens van de linker grafiek en de bovengrens van de rechter grafiek te combineren, ontstaat een beeld van het gebied waarbinnen het sedimenttransport zich te allen tijde zou moeten bevinden (Figuur 4-7). In de figuur zijn de metingen geplot, waarop Duizendstra o.a. de lijnen baseerde. De metingen van de jaren 1990-1995 (Wilbers en Lambeek, 1997) vonden plaats onder omstandigheden met beschikbaar sediment op de bodem. De metingen tijdens het hoogwater van 1998 daarentegen vonden plaats bij een volledig afgepleisterde bodem, waardoor de transporten lager waren (Duizendstra, 1999).



Figuur 4-7 Bovengrens en ondergrens voor sedimenttransport uit afvoer-transportrelaties te Maaseik en meetgegevens uit diverse jaren



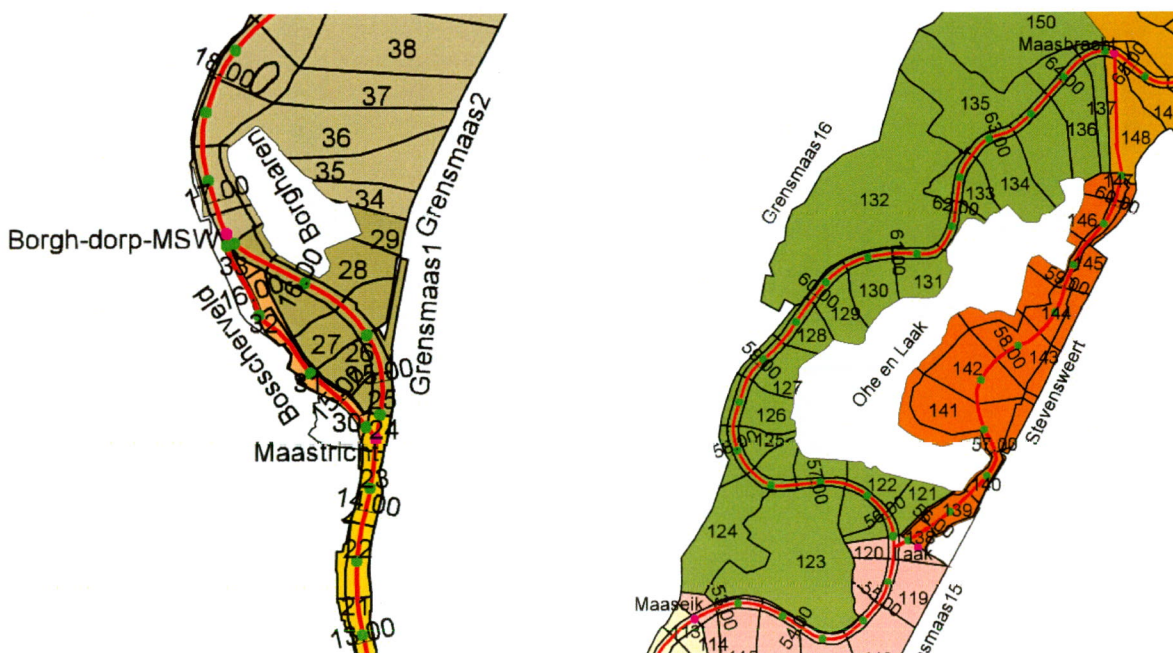
5 Bouw, kalibratie en verificatie morfologisch model

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de stappen die zijn gezet om te komen tot een morfologisch SOBEK-model dat gekalibreerd en gevalideerd is en waarvan de resultaten met voldoende zekerheid gebruikt kunnen worden om een uitspraak te doen over de te verwachten morfologische effecten van de Grensmaasingrepen. Paragraaf 5.2 beschrijft het NA-model dat aan het kalibratiemodel ten grondslag ligt. In Paragraaf 5.3 wordt de bouw van het kalibratie- en verificatiemodel beschreven, waarna in Paragraaf 5.4 een beschrijving volgt van de randvoorwaarden voor de verschillende simulaties. De eigenlijke kalibratie van het model staat beschreven in Paragraaf 5.5, waarna de verificatieberekeningen zijn beschreven in Paragrafen 5.6, 5.7 en 5.8. De conclusies van de kalibratie en verificatie staan beschreven in Paragraaf 5.9.

5.2 Modelschematisatie Nulalternatief (NA)

De SOBEK-modelschematisatie Nulalternatief (NA) beschrijft de Autonome Ontwikkeling (AO) en is gebaseerd op toegeleverde BASELINE-basisbestanden, die ook voor de bouw van het gelijknamige WAQUA-model gebruikt zijn (zie Bijlage 1). Hieraan zijn nieuwe basisbestanden toegevoegd, die specifiek betrekking hebben op de SOBEK-modelschematisatie. Het gaat hierbij om secties, SOBEK-takken, vakgrenzen voor het zomerbed en voor het winterbed, de stroomvoeringsbegrenzing en kadesegmenten in het winterbed. Bij deze laatste drie gegevenscategorieën is gebruik gemaakt van de WAQUA-modelresultaten. Het model bestaat uit 22 takken. Op de locaties waar in het EP (VKA) zijtakken aansluiten (nevengeulen, bochtafsnijdingen) zijn in het NA (AO) reeds knooppunten gelegd. Dit is gedaan om de knooppunten en de rekenpunten in de Grensmaas op exact dezelfde locaties te hebben als in het SOBEK-model EP (VKA). In tegenstelling tot de eerder gebouwde Maasmodellen zijn in het SOBEK-model NA (AO) ook het kanaal bij Bosscherveld en de doorstroombare ontgrindingsput bij Stevensweert (het Stevol-project) als afzonderlijke takken geschematiseerd (Figuur 5-1).



Figuur 5-1 Nieuwe takken: Bosscherveld en Stevensweert

De reden hiervoor is het feit dat deze reeds bestaande en stroomvoerende takken op gelijkwaardige basis geschematiseerd dienen te zijn als de nieuwe nevengeulen en bochtafsnijdingen in het Voorkeursalternatief 2003. Het kanaal bij Bosscherveld is stroomvoerend zodra de stuw bij Borgharen getrokken is. Bovendien kan de weerdverlaging van Bosscherveld in het Voorkeursalternatief 2003 mogelijk de afvoerdeling over deze vertakking beïnvloeden. Ten aanzien van de geul bij Stevensweert wordt opgemerkt dat zich hier een stroomvoerende oude Maasarm bevindt, die benedenstrooms van Stevensweert weer uitmondt. De uitgevoerde ontgrondingswerkzaamheden hebben een zodanig profielverruimend effect, dat dit mogelijk relevant kan zijn voor de afvoerdeling op dit splitsingspunt. Bovendien wordt het Stevolproject expliciet als onderdeel van de Autonome Ontwikkeling beschouwd. Tevens kan op deze wijze mogelijk getoetst worden of de grindput een neiging tot aanzanding zal vertonen. Beide takken bevatten een drempel. De drempel in Bosscherveld stelt de overlaat parallel aan de stuw Borgharen voor. Bij Ohé en Laak stroomt bij hoogwater het water over het winterbed naar een oude Maasarm, waarna het in de ontgrondingsput uitkomt. Hierna staat het aan benedenstroomse zijde in open verbinding met de Grensmaas. Het aan bovenstroomse zijde hoger gelegen winterbed is als drempel geschematiseerd.

Tenslotte zijn de SOBEK-profielen gegenereerd, en zijn per rekenpunt winterbedruwheden (Nikuradse-waarden) vastgesteld op basis van de ecotopen binnen de stroomvoeringsbegrenzing. Met behulp van deze gegevens is een SOBEK-model gebouwd waarvan de hydraulische ruwheden van het zomerbed voor vier stationaire afvoeren zijn afgeregeld op basis van WAQUA-modelresultaten. Daarbij is bij overeenkomstige debieten gekeken naar waterstanden en stroomsnelheden. Het resultaat hiervan is in Bijlage 3 te zien. Het SOBEK-model NA vormt de basis voor de morfologische kalibratiewerkzaamheden.

5.3 Bouw van het kalibratie- en verificatiemodel

5.3.1 Bouw SOBEK-modelvarianten

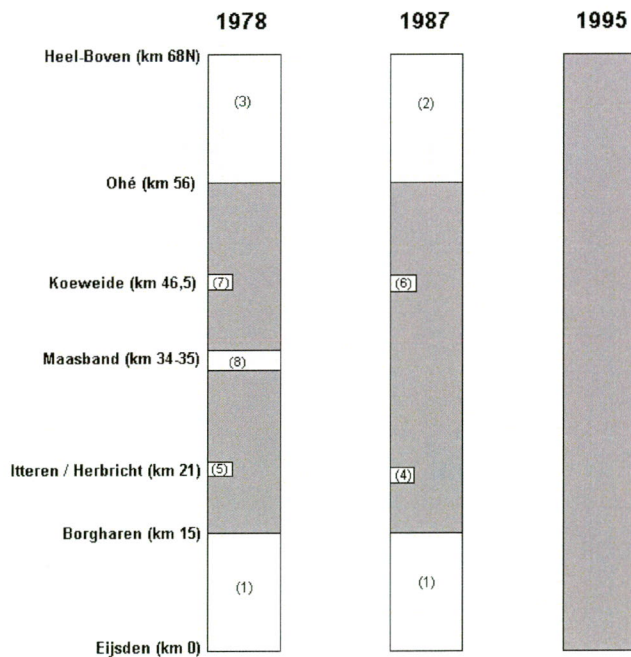
Voor de morfologische modelkalibratie en -verificatie is een tweetal SOBEK-modelvarianten gebouwd: NA1978 en NA1987. Deze varianten zijn tot stand gebracht door de in Tabel 5-1 weergegeven basisgegevens met elkaar te combineren. Vervolgens wordt elke gegevenscategorie kort toegelicht. Bijlage 2 geeft een meer uitgebreide beschrijving.

Tabel 5-1 Samenstelling modelvarianten NA1978 en NA1987 (samenvatting)

invoer	NA (AO)	NA1978	NA1987
hoogtemodel zomerbed	1995	1978 (met gevulde hiaten)	1987 (met gevulde hiaten)
hoogtemodel winterbed	1995	1995	1995
DGR-kaden (sectie 0)	aan	uit	uit
zomerbedruwheden	in SOBEK gekalibreerd aan WAQUA-resultaten	als NA	als NA
winterbedruwheden	in BASELINE bepaald op basis van ecotopen	opnieuw in BASELINE bepaald op basis van ecotopen en bebouwing (na uitschakeling DGR-kaden)	als NA1978
gegradeerd sediment	- als NA1987 - nieuwe zb-waarden bepalen	- als NA1987 - nieuwe zb-waarden bepalen	- afpleisteringslaag NITG - grindlaagdikte uit geoelektrische data, samenstelling te kalibreren - onderlagen uit NITG

Hoogtemodel zomerbed

Door de opdrachtgever zijn hoogtemodellen van 1978 en 1987 opgeleverd, die niet geheel gebiedsdekkend zijn (zie Figuur 5-2). In tegenstelling tot het hoogtemodel van 1995 (waarop het NA-model gebaseerd is) dekken de hoogtemodellen van 1978 en 1987 slechts de Grensmaas (km 15-56). Voorts zijn er nog enkele hiaten geconstateerd. Voor het traject Eijsden-Borgharen zijn de bodemgegevens van 1995 rechtstreeks overgenomen (zowel voor 1978 als 1987). De mergelbodem wordt hier vast verondersteld (1). Voor het traject Ohé-Heel is de gemiddelde bodemontwikkeling van 1987 tot 1995 op basis van de gemiddelde erosie in de Grensmaas op 0,17 m gesteld. De bodem van 1995 is op dit traject met 0,17 m verhoogd en in het hoogtemodel van 1987 gevoegd (2). Overeenkomstig deze methodiek is een bodemdaling van 0,24 m in de periode 1978-1995 (ofwel 0,07 m bodemdaling van 1978-1987) geconstateerd. De bodem van 1995 is op dit traject met 0,24 m verhoogd en in het hoogtemodel van 1978 gevoegd (3). Tussen Itteren en Herbricht ligt een 'gat' (linkerhelft zomerbed) in de data van 1987. De gemiddelde erosie in de kilometervakken 20-22 van 1987 tot 1995 bedraagt 0,12 m. De bodem van 1995 is op dit stukje met 0,12 m verhoogd en in het hoogtemodel van 1987 gevoegd (4). Ook in de data van 1978 ligt dit gat. De gemiddelde erosie in de kilometervakken 20-22 van 1987 tot 1995 bedraagt 0,75 m. De bodem van 1995 is op dit stukje met 0,75 m verhoogd en in het hoogtemodel van 1987 gevoegd (5). In de rivierbocht tegenover Koeweide (km 46,5) ontbreken eveneens bodemgegevens (linkerhelft zomerbed). De erosie in de directe omgeving (km 46-47) bedraagt gemiddeld 0,23 m (1987-1995). De bodem van 1995 is op dit stukje met



deze waarde verhoogd en in het hoogtemodel van 1987 gevoegd (6). Ook in het hoogtemodel van 1978 ontbreken hier bodemgegevens. De erosie in de directe omgeving (km 46-47) bedraagt gemiddeld 0,63 m (1978-1995). De bodem van 1995 is op dit stukje met deze waarde verhoogd en in het hoogtemodel van 1978 gevoegd (7). Bij Maasband ontbreken in het hoogtemodel van 1978 bodemhoogten over de lengte van een kilometer. Dit deel is aangevuld met behulp van bodemhoogten van 1987, vermeerderd met de gemiddelde erosie die tussen 1978 en 1987 plaatsvond (0,13 m) over de kilometers 33-34 en 35-36 (8).

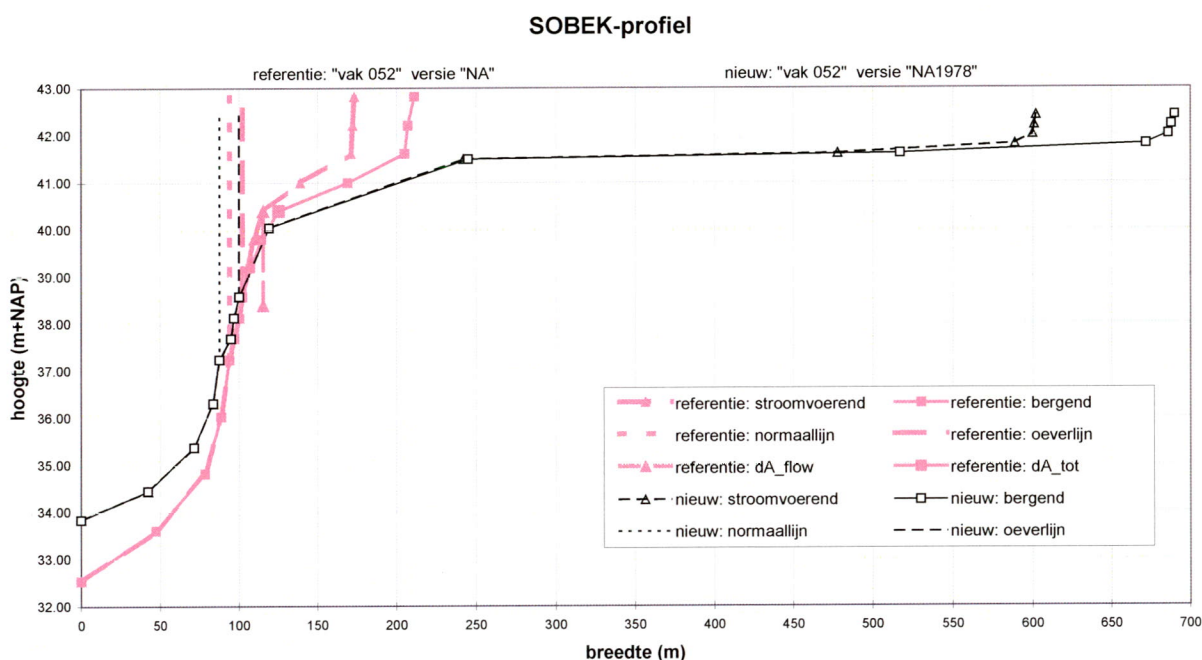
Figuur 5-2 Dekking van aangeleverde bodemgegevens ten opzichte van het modelbereik Grensmaas

Hoogtemodel winterbed

Er zijn geen afzonderlijke hoogtemodellen van het winterbed van 1978 en 1987 beschikbaar. Er is echter geen reden aan te nemen dat dit veel zal afwijken van het winterbed in 1995, met uitzondering van de DGR-kaden, die pas in 1995 aangelegd zijn.

DGR-kaden

De in 1995 aangelegde DGR-kaden zijn onderdeel van het SOBEK-model NA, en zijn ingevoerd als uitsneden die in het model niet meedoen (de zogenaamde 'kadesecties 0': de witte vlakken in Figuur 5-1). Bij de varianten NA1978 en NA1987 is dit niet het geval. De kaden waren destijds niet aanwezig en de dorpen waren bij hoogwater instroombaar. In de BASELINE-basisgegevens zijn deze kadesecties (met code 0) verwijderd, waardoor het onderliggende hoogtemodel weer geactiveerd is. De profielen zijn op deze locaties dan ook aanzienlijk breder dan in het SOBEK-model NA. Een duidelijk voorbeeld is Aan de Maas (Figuur 5-3) waar na aanleg van de DGR-kade een nauwe flessenhals is ontstaan (zie ook Bijlage 4-2). De figuur toont tevens de aanzienlijk hogere bodemligging in 1978.



Figuur 5-3 SOBEK-profiel (relatie hoogte-breedte) bij Aan de Maas (vak 52, km 25): model NA en variant NA1978

De in 1995 aangelegde DGR-kaden zijn vaak verhogingen van oude reeds bestaande kaden. Voor de achterliggende gebieden zijn voor de relevante locaties in BASELINE opnieuw kadesegmenten vastgesteld ten behoeve van de zomerkade-optie in SOBEK. Deze kadesegmenten zijn vergeleken met de basisgegevens van SOBEK 2000.2 (zie Bijlage 1).

Zomerbedruwheden

De zomerbedruwheden van de varianten NA1978 en NA1987 zijn ongewijzigd overgenomen uit het hydraulisch gekalibreerde basismodel NA.

Winterbedruwheden

De hydraulische ruwheden van het winterbed zijn in BASELINE bepaald op basis van landgebruikcodes. Doordat de dorpen bij NA1978 en NA1987 instroombaar zijn, is het winterbed groter en zijn de hydraulische ruwheden afwijkend van die van het NA. Onderling zijn de ruwheden van NA1978 en NA1987 gelijk.

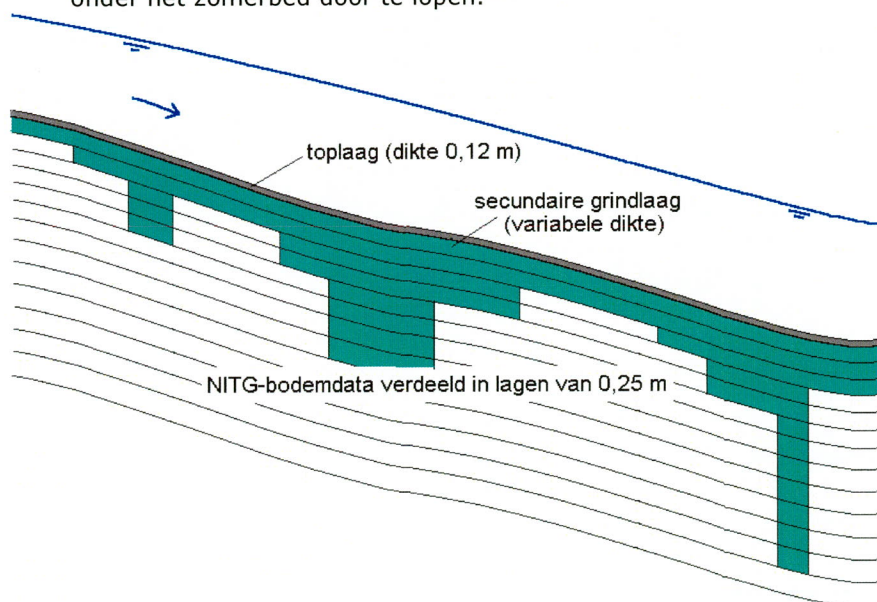
Gegradeerd sediment

Voor de beschrijving van het sedimenttransport is gebruik gemaakt van de formule van Wu, Wang en Jia (Scheer e.a., 2002), zoals vastgesteld in het startoverleg van het onderzoek. Paragraaf 5.3.2 gaat nader in op de bouw van het ondergrondmodel voor de SOBEK-model-schematisaties.

5.3.2 Bouw digitaal ondergrondmodel voor SOBEK-gegradeerd

Bij het maken van de bodemschematisatie (zie Figuur 5-4) voor het SOBEK-model zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

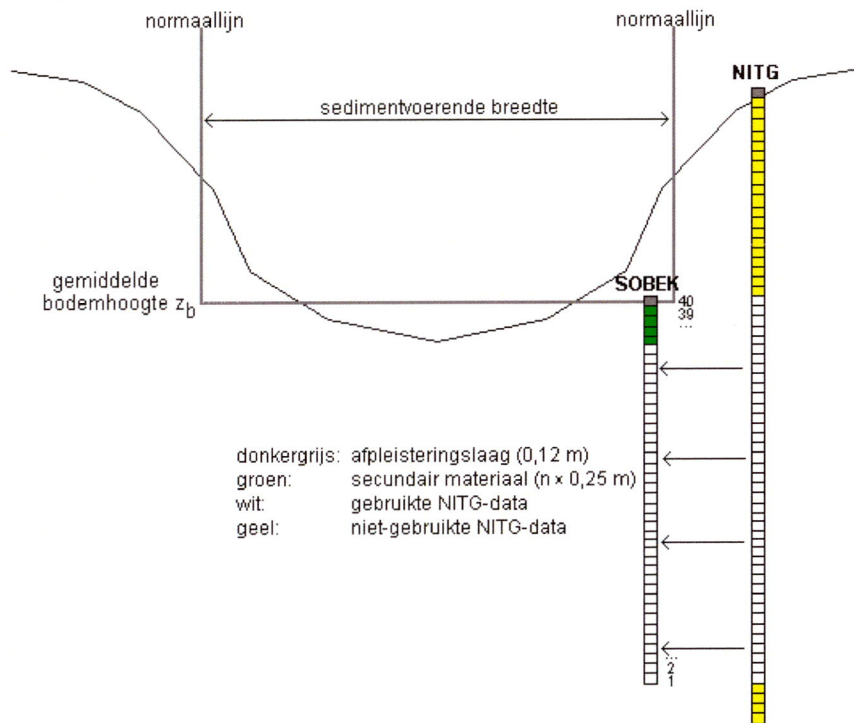
- De afpleisteringslaag (of toplaag) en transportlaag is 0,12 m dik gekozen (ca $1,5 D_{90}$). De samenstelling is initieel gebaseerd op de door NITG opgegeven afpleisteringslaag (TNO, 2002), maar tijdens de kalibratiewerkzaamheden als vrijheidsgraad gehanteerd omdat het bekend is dat de samenstelling ruimtelijk varieert. De door NITG opgegeven afpleisteringslaag bestaat uit een gemiddelde samenstelling van in de literatuur gevonden waarden. In de NITG-tabellen is het steeds de bovenste laag (de hoogte ervan heeft feitelijk geen fysische betekenis, zie Figuur 5-5). De hoogteligging ervan in de SOBEK-bodemschematisatie wordt bepaald door de gemiddelde hoogte van het zomerbed in de SOBEK-profielen (z_b).
- Er is onder de afpleisteringslaag een grindlaag ingevoerd, bestaande uit secundair door de rivier getransporteerd materiaal (zie Paragraaf 4.3). De diepte ervan is variabel (veelvoud van 0,25 m) en gebaseerd op geo-elektrische metingen (TNO, 2002).
- Hieronder worden de in het winterbed waargenomen lagen (TNO, 2002) geacht ook onder het zomerbed door te lopen.



Figuur 5-4 Beschrijving bodemschematisatie (principeschets)

Behoudens de gemiddelde samenstelling van de afpleisteringslaag, bevatten de tabellen van NITG hier geen gegevens van, omdat de boringen in het winterbed genomen zijn. In de kalibratieberekening is de vrijheid genomen de samenstelling van de afpleisteringslaag en de grindlaag ruimtelijk te variëren, teneinde het kalibratieresultaat positief te beïnvloeden. Reden hiervoor is het feit dat de samenstelling van beide lagen ruimtelijk gevarieerd is. De ruimtelijke variatie is daarbij niet exact bekend. Het kalibratieresultaat van de samenstelling beide lagen bleek zich echter wel binnen het bereik van in de literatuur gevonden waarden te bevinden.

De samenstelling van de afpleisteringslaag is in het SOBEK-invoerbestand in laag 40 ingevoerd en de samenstelling van de grindlaag is in de lagen daaronder ingevoerd. De dikte van de grindlaag is per rekenpunt afgerond op een veelvoud van 0,25 m. De onderzijde van laag 1 ligt 9,87 m onder de gemiddelde bodemhoogte (z_b) zodat de onderzijde van de afpleisteringslaag juist 0,12 m onder de gemiddelde bodemhoogte uitkomt. Het SOBEK-programma wijst de samenstelling van de bodemgegevens die boven de gemiddelde bodemhoogte uitkomen (de resterende 0,13 m van laag 40) aan de initiële transportlaag toe. Deze komt op deze wijze in dikte en samenstelling overeen met de initiële afpleisteringslaag. Het bovenstaande wordt schematisch weergegeven in Figuur 5-5. Paragraaf 5.5.3 gaat nader in op de samenstelling van deze lagen.



Figuur 5-5 Conversie bodemschematisatie

5.3.3 Geo-elektrische metingen

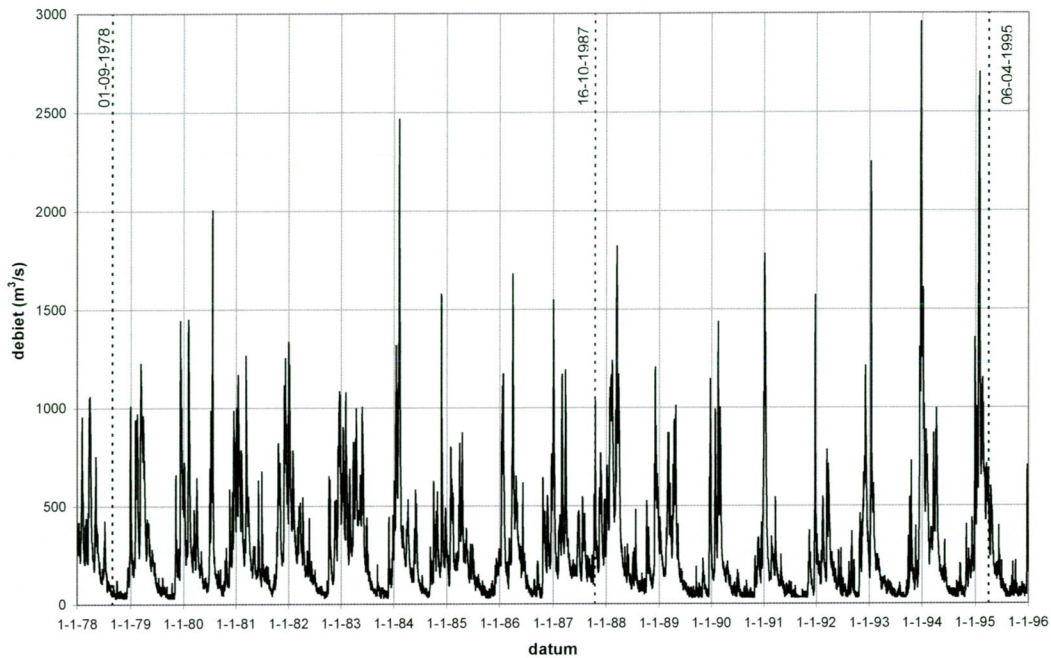
De dikte van de laag met secundair materiaal is bepaald op basis van geo-elektrische metingen (TNO, 2002). De metingen zijn in principe met een resolutie van 100 meter over de gehele Grensmaas (rkm 2.65 tot rkm 69) bepaald, maar de datareeks bevat meerdere hiaten. Een analyse van de beschikbare metingen laat echter zien dat er wel voor elk SOBEK-vak tenminste een meting beschikbaar is. De dikte van de grindlaag is daarom bepaald door alle beschikbare waarnemingen binnen een SOBEK-vak te middelen.

5.4 Randvoorwaarden

5.4.1 Afvoeren en waterstanden

Bij de in dit hoofdstuk beschreven modelsimulaties zijn gemeten tijdseries (dagwaarden) bij Eijsden als bovenstroomse randvoorwaarde gebruikt (Figuur 5-6). Er is een minimumafvoer van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ingesteld om redenen van modelstabiliteit. In combinatie met enkele onttrekkingen (Zuid-Willemsvaart en Julianakanaal) blijft er zodoende te allen tijde een debiet van minimaal ca $20 \text{ m}^3/\text{s}$ in de Grensmaas stromen. De benedenstroomse randvoorwaarde is een door RIZA

aangeleverde Qh-relatie bij Heel-boven (Bijlage 6). Op een achttal locaties zijn laterale toevoegingen of onttrekkingen ingevoerd (Sluis Ternaaien, Jeker, Zuid-Willemsvaart, Julianakanaal, Geul, Langbroekbeek, Witbeek en de Thornerbeek).



Figuur 5-6 Afvoerreeks 1978-1995 (dagwaarden Eijsden)

5.4.2 Sedimenttransport en bodemligging

De randvoorwaarde voor het sedimenttransport bij Eijsden is een nultransport. Dat impliceert de aanname is dat er geen sediment vanuit België in de Grensmaas terecht komt. In de gevoeligheidsanalyse is het effect van een andere bovenstroomse randvoorwaarde onderzocht. Voor de randvoorwaarde bij Heel geldt dat de bodemverandering daar onbekend is. Daarom is besloten om bij Heel de bodem vrij te laten. Op deze locaties zijn geen metingen voorhanden.

5.5 Morfologische modelkalibratie (1987-1995)

5.5.1 Periode

De modelkalibratie loopt van 16 oktober 1987 tot 6 april 1995. Deze tijdstippen zijn ingegeven door het moment van afronden van de bodempeilingen, waarmee de berekeningsresultaten vergeleken worden. Er is een tijdstap van 3 uur ingesteld. Uit diverse proefsimulaties bleek het resultaat bij grotere tijdstappen af te wijken, en bij kleinere tijdstappen niet meer.

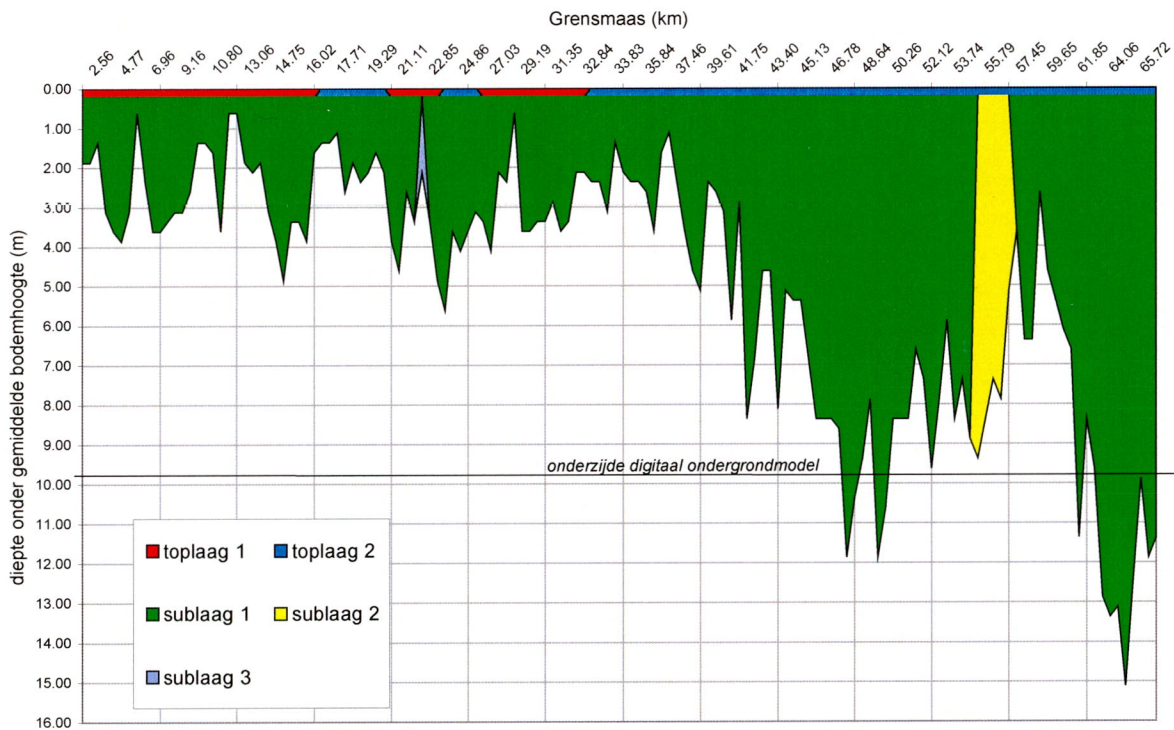
5.5.2 Initiële bodemligging

Op de in Paragraaf 5.3.1. beschreven wijze is met behulp van de rivierendatabase BASELINE de initiële bodemligging van het kalibratiemodel aangepast. De resulterende SOBEK-profielen liggen gemiddeld hoger dan die van 1995. Met behulp van deze profielen is de morfologische kalibratieberekening uitgevoerd.

5.5.3 Initiële bodemsamenstelling

Zoals in Paragraaf 4.3 vermeld is er veel ruimtelijke spreiding in de samenstelling van de afpleisteringslaag. De verschillende bronnen lijken consistent ten aanzien van de gemiddelde samenstelling van de afpleisteringslaag. Het is uit proefberekeningen echter gebleken dat toepassen van de gemiddelde samenstelling niet overal een representatief resultaat in de modelsimulatie geeft: het transport komt te laat op gang en is te gering.

Een waarschijnlijke verklaring hiervoor ligt in het feit dat het toepassen van de gemiddelde afpleisteringslaag in het gehele model de grens van begin van transport te hoog legt. In het meer benedenstroomse deel van de Grensmaas is daarom een fijnere toplaag toegepast (zie Figuur 5-7 en Tabel 5-2). De samenstelling van de afpleisteringslaag geldt in het kalibratieproces als vrijheidsgraad, omdat de NITG-data niet in een ruimtelijke variatie voorzien. De constatering dat een verfijning in benedenstroomse richting het resultaat verbetert, is dan ook niet onrealistisch (Murillo, 1998).



Figuur 5-7 Locaties en diktes van de afpleisteringslaag en het grindpakket

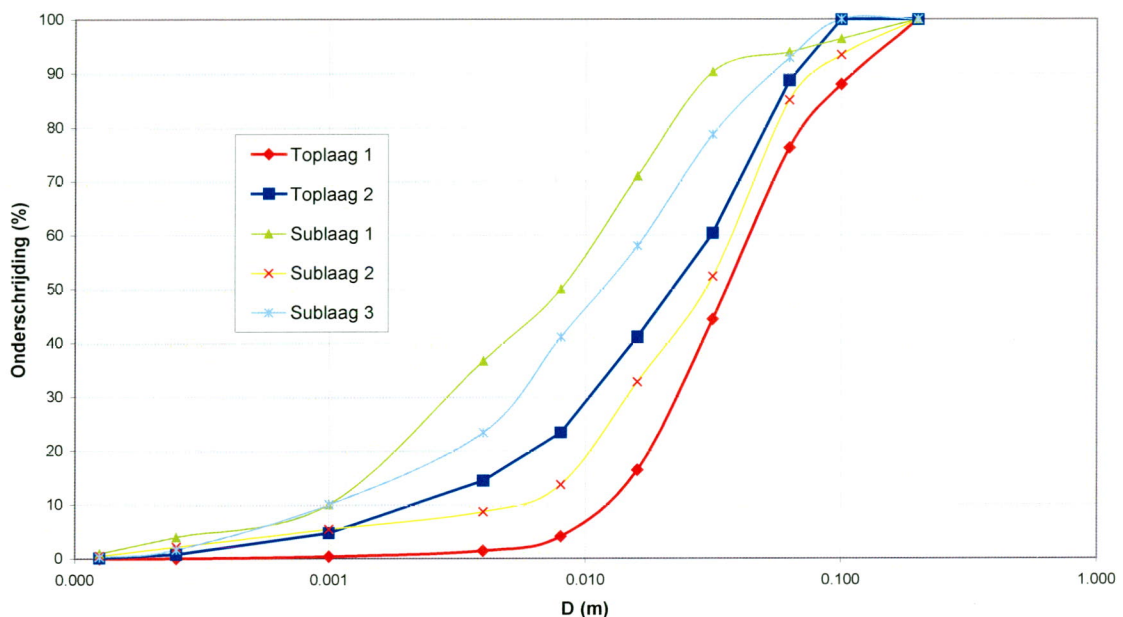
De dikte van het grindpakket is in het bodembestand ingevoerd. De samenstelling ervan is in het kalibratieproces als vrijheidsgraad beschouwd, omdat de NITG-data hiervan geen zeef-fracties bevatten en de overige bronnen een grote variatie laten zien. Het resultaat is tijdens het kalibratieproces geoptimaliseerd (sublaag 1). Op twee locaties bleek een grovere samenstelling noodzakelijk om extreme erosie te voorkomen (sublaag 2 en 3). De in SOBEK toegepaste samenstelling van de afpleisteringslaag en het grindpakket is in Tabel 5-2 en Figuur 5-8 weergegeven.

De grove grindlaag bij Aasterberg (km 55,0-56,6) is nodig gebleken vanwege relatief hoge stroomsnelheden die hier optreden. Dit blijkt ook uit de WAQUA-resultaten (zie Bijlage 3).

Tabel 5-2 Toegepaste samenstelling afpleisteringslaag en grindpakket in het SOBEK-model (mm)

bodemlaag	D10	D50	D90
afpleisteringslaag (0,12 m)			
toplaag 1 ¹⁾	12	36	100
toplaag 2	3	22	66
grindpakket			
sublaag 1	1	8	30
sublaag 2	7	30	70
sublaag 3	2	12	50
onderlagen	volgens NITG		

¹⁾ overeenkomstig opgave NITG (TNO, 2002)



Figuur 5-8 Toegepaste samenstelling afpleisteringslaag en grindpakket in het SOBEK-model

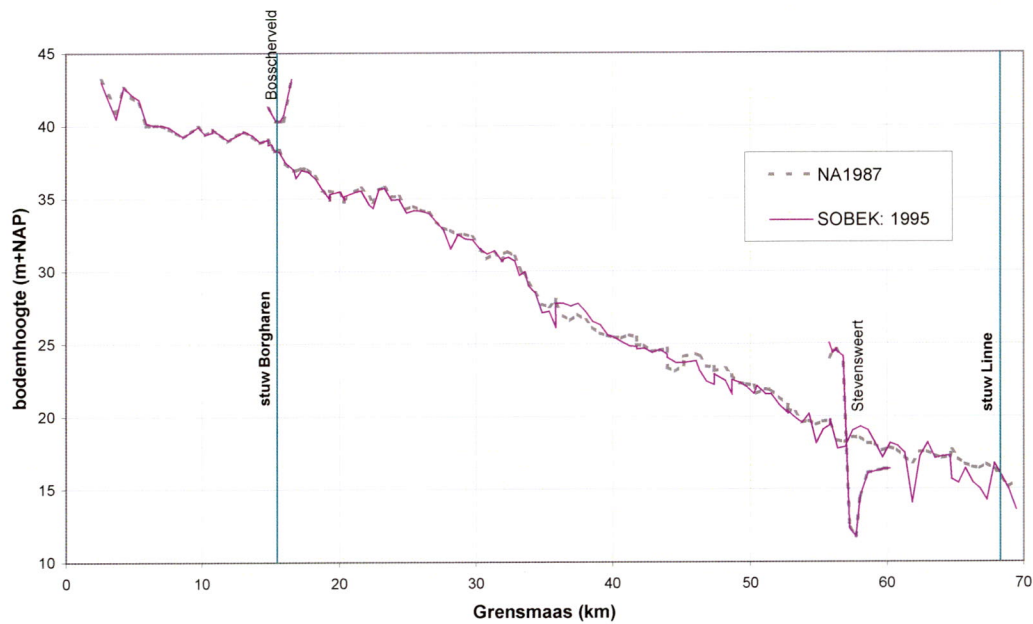
5.5.4 Resultaten van de morfologische kalibratieberekening

Met de op deze wijze ingevoerde gegevens is een modelsimulatie uitgevoerd, waarbij de formule van Wu, Wang en Jia (Scheer e.a., 2002; Wu e.a., 2000) is toegepast met de in Tabel 5-2 weergegeven vermenigvuldigingsfactoren. Figuur 5-9 toont de gesimuleerde bodemontwikkeling. Het verschil tussen de eind- en beginsituatie is in Figuur 5-10 weergegeven (zwart), tezamen met de verschillen volgens de hoogtemodellen (rood). De resulterende gemiddelde erosie uit de simulaties bedraagt 0,116 m, een getal dat kleiner is dan de in Paragraaf 5.5.2 vermelde waarde van 0,172 m. Het gemiddelde resultaat is in overeenstemming met de trend van de Grensmaas. Lokaal echter zijn er aanzienlijke verschillen en onzekerheden. Het meest in het oog springen twee erosiekuilen (bij km 28 en 36), en een aanzanding tussen km 36 en 40, en bodemerosie tussen km 46 en 49. Van het traject juist benedenstrooms van de Grensmaas (Roosteren-Heel-boven: rkm 56-68N) zijn geen bodemgegevens bekend, deze resultaten zijn van de analyse uitgesloten. De rode stippellijn in Figuur 5-10 op dit traject geeft het kunstmatig aangebrachte verschil tussen de hoogtemodellen weer.

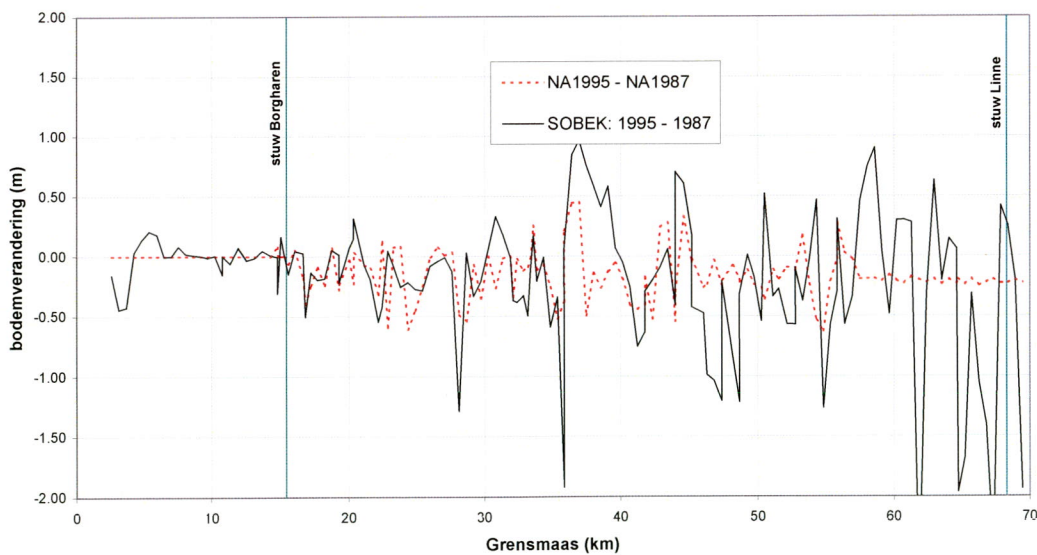
Tabel 5-3 Vermenigvuldigingsfactoren transportformule Wu, Wang en Jia

SOBEK-takken	van km	tot km	factor
Kalkmaas 1-2	2,56	14,75	1,4
Grensmaas 1	14,75	16,64	1,4
Grensmaas 2-3	16,46	22,14	1,6
Hochterbampd	16,46	22,14	1,6
Grensmaas 4-5	22,14	32,84	1,4
Grensmaas 6-7	32,84	35,84	3,0
Grensmaas 8-9	35,84	43,94	1,6

SOBEK-takken	van km	tot km	factor
Grensmaas 10	43,94	45,12	2,0
Grensmaas 11	45,12	47,68	1,6
Grensmaas 12	47,68	48,62	1,4
Grensmaas 13	48,62	50,48	2,0
Grensmaas 14-15	50,48	55,79	2,6
Grensmaas 16-17	55,79	64,33	1,6
zijtakken (nevengeulen en afsnijdingen)			1,6



Figuur 5-9 Gesimuleerde bodemontwikkeling (kalibratieberekening 1987-1995)



Figuur 5-10 Verschilplot bodemontwikkeling (kalibratieberekening 1987-1995)

In Tabel 5-4 zijn de resultaten weergegeven. De berekende bodemdaling is gemiddeld 0,06 m te weinig, in hoge mate ingegeven door afwijkingen in het gebied tussen rkm 35 en 40. Wat betreft de overige locaties wordt geconstateerd dat met de mate van detaillering van de model-schematisatie en gebruikte gegevens lokale afwijkingen tot ca 1 m voorkomen (Figuur 5-10). De standaarddeviatie bedraagt 0,45 m.

5.6 Morfologische modelverificatie (1978-1995)

5.6.1 Periode

Teneinde het ondergrondmodel te valideren is een verificatieberekening uitgevoerd van de periode van 1 september 1978 tot 6 april 1995. Deze periode dekt dus tevens de periode van de kalibratieberekening. Een tussenanalyse op 16 oktober 1987 laat zien of de modelinstellingen ook voor deze drogere periode goede modelresultaten geeft. Een vergelijking van de tweede periode met de kalibratieberekening zegt iets over mogelijke inspeleffecten van de kalibratieberekening, die in dit deel van de verificatieberekening niet meer in dezelfde mate spelen.

5.6.2 Initiële bodemligging

Op de in Paragraaf 5.3.1 beschreven wijze is het hoogtemodel van 1978 gebruikt voor het genereren van nieuwe SOBEK-profielen met behulp van BASELINE teneinde de initiële bodemligging in het model tot stand te brengen.

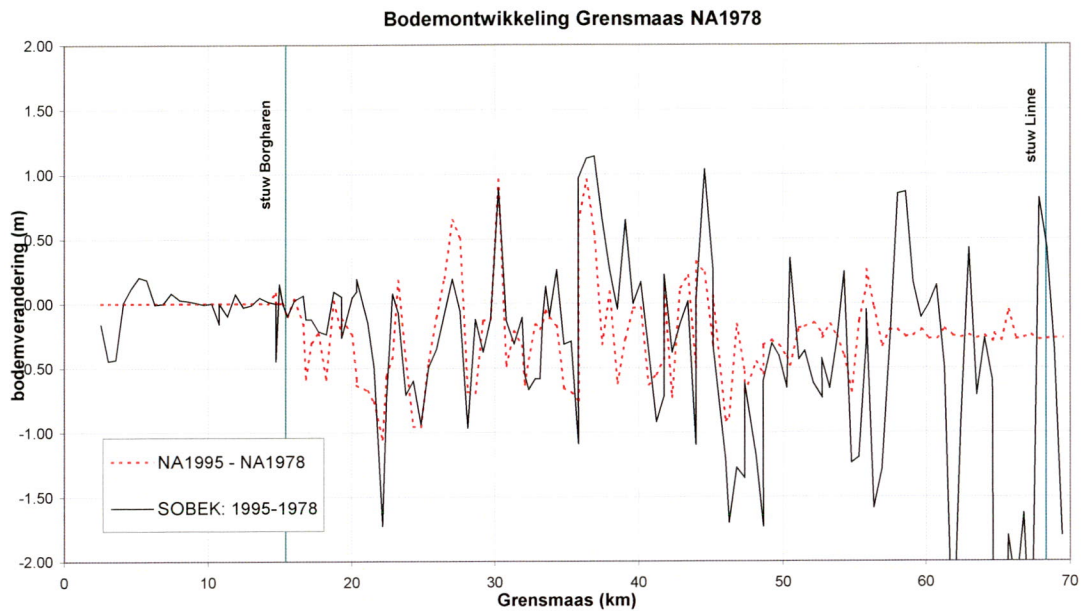
5.6.3 Resultaten van de verificatie

Periode 1978-1995

Een analyse over de gehele periode laat een gemiddelde erosie van 0,267 m zien (zie Tabel 5-4). Volgens Wilbers (1996) verschillen de bodems gemiddeld 0,242 m ten opzichte van elkaar. Hieruit kan geconcludeerd worden dat (de gradiënt van) het totale sedimenttransport in de Grensmaas over de betreffende periode goed gesimuleerd is. De verdeling ervan in de ruimte volgt de vorm van de op de hoogtemodellen gebaseerde profielen redelijk tot goed, zie Figuur 5-11.

Lokale afwijkingen tot 0,50 m worden geconstateerd, met uitzondering van het beneden-stroomse gebied van Roosteren tot Heel-boven (rkm 56-68N), waar geen peilingen beschikbaar zijn. De rode stippellijn geeft het kunstmatig aangebrachte verschil van 0,24 m weer. Dit deel is van de analyse uitgesloten.

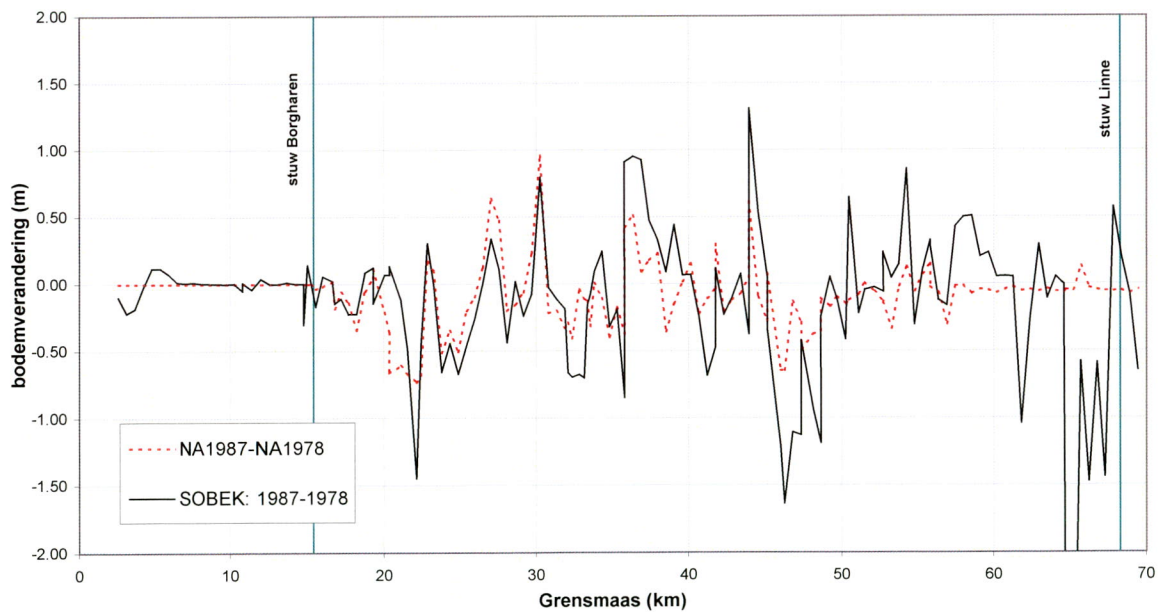
Gemiddeld is de berekende bodemdaling ca 10% te veel (0,025 m). De standaarddeviatie in het Grensmaasgebied (rkm 15-56) is 0,48 m.



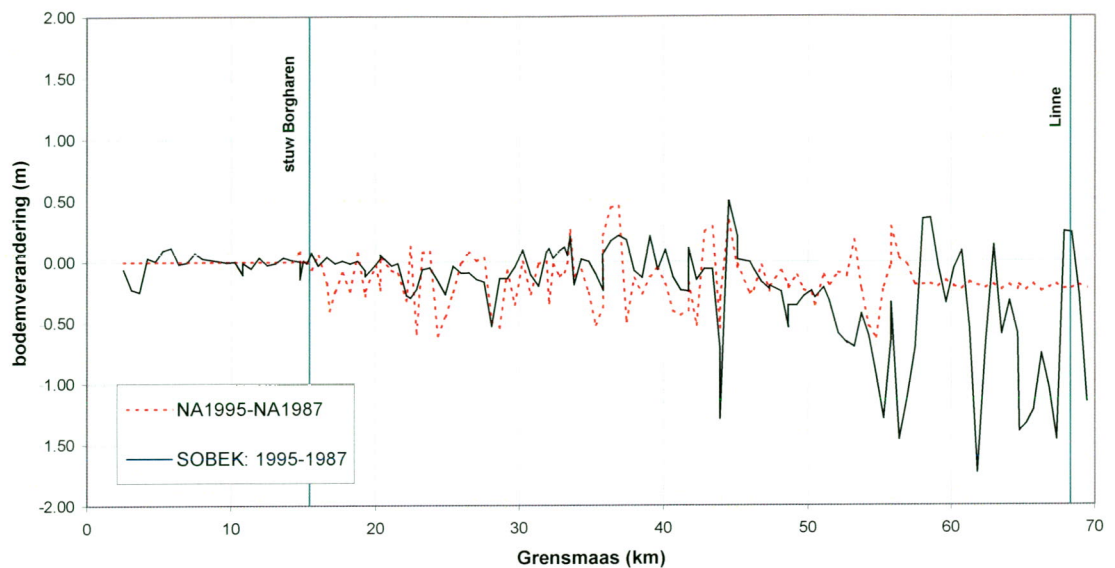
Figuur 5-11 Verschilplot bodemontwikkeling (verificatieberekening 1978-1995)

Periode 1978-1987

De verificatieberekening laat over het eerste deel (de relatief droge periode) een gemiddelde bodemdaling van 0,098 m zien, waar volgens Wilbers (1996) een erosie van slechts 0,068 m verwacht wordt (zie Figuur 5-12). De vorm stemt in het Grensmaasgebied echter redelijk overeen. Ook hier is de erosie in het benedenstroomse (in 1978 onbemeten) gebied opvallend, maar in deze analyse niet relevant.



Figuur 5-12 Verschilplot bodemontwikkeling 1978-1987



Figuur 5-13 Verschilplot bodemontwikkeling 1987-1995

Periode 1987-1995

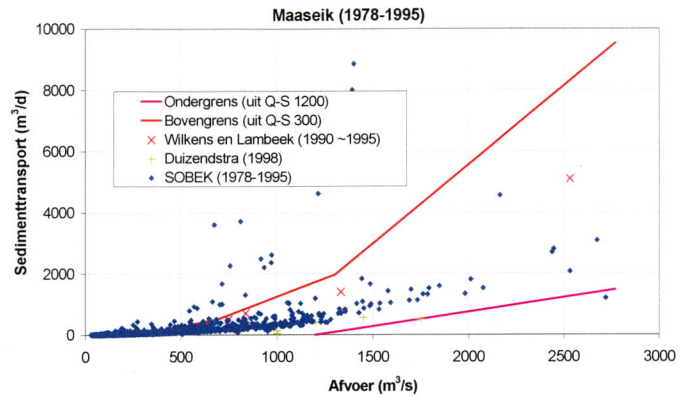
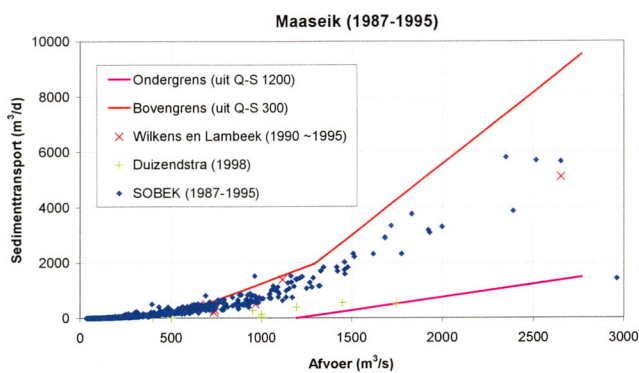
De tweede helft van de verificatieberekening laat een gemiddelde bodemdaling van 0,169 m zien, waar volgens Wilbers een erosie van 0,174 m verwacht wordt (zie Figuur 5-13). De bodemdaling vertoont minder extreme waarden dan in de kalibratieberekening (vergelijk Figuur 5-10). Het resultaat is gemiddeld echter vrijwel gelijk. Tabel 5-4 vat de resultaten van de simulaties samen. Geconcludeerd mag worden dat de gemiddelde bodemdaling over de periode 1978-1995 goed gesimuleerd wordt. Het onderscheid tussen de droge en de natte periode komt echter in de modelsimulaties nauwelijks tot uiting. Ook kan hieruit geconcludeerd worden dat extreme bodemveranderingen het gevolg zijn van inspeeleffecten.

Tabel 5-4 Samenvatting resultaten (gemiddelde erosie)

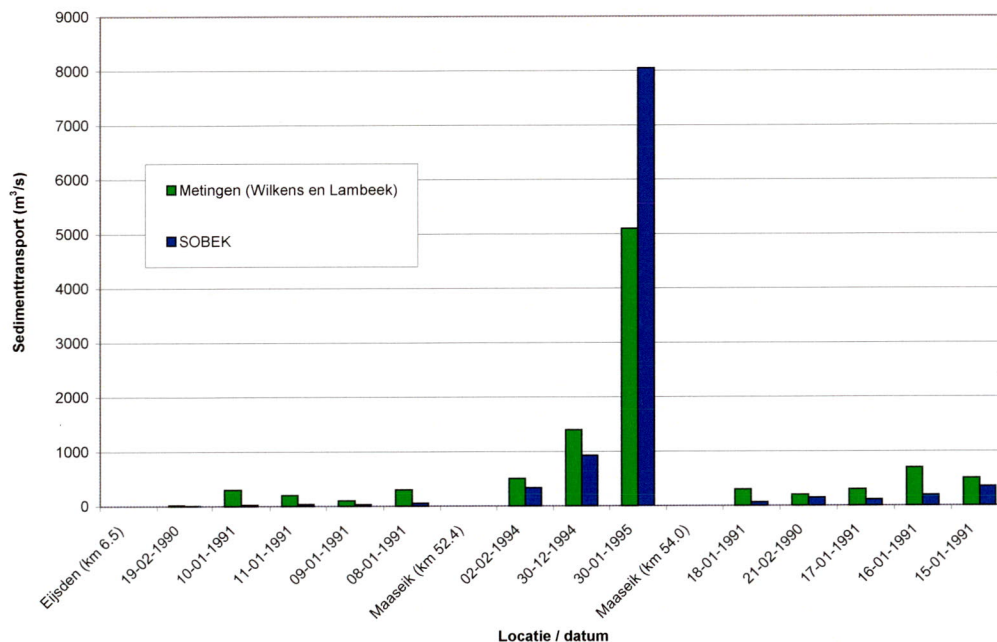
traject	rkm	bron	1978-1987		1987-1995		1978-1995	
			(m)	(m/j)	(m)	(m/j)	(m)	(m/j)
Grensmaas	15-56	Wilbers, 1996	-0,068	-0,007	-0,174	-0,023	-0,242	-0,015
		kalibratie	-	-	-0,116	-0,015	-	-
		verificatie	-0,098	-0,010	-0,169	-0,022	-0,267	-0,016

5.7 Sedimenttransporten van de langjarige simulaties

In alle simulaties is op diverse locaties (o.a. ter plaatse van de brug bij Maaseik) een uitvoerlocatie voor het sedimenttransport ingevoerd. De transporten zijn uitgezet tegen de tegelijkertijd optredende debieten en vergeleken met een QS-relatie uit de literatuur (Duizendstra, 1999). De relatie geeft een boven- en ondergrens (Figuur 5-14). In de figuur worden de sedimenttransporten bij de hogere afvoeren ingesloten door de boven- en ondergrens. Echter de hysteresis door het opbreken van de afpleisteringslaag blijkt door het model niet in dezelfde sterke mate gesimuleerd te worden. Het totale transport in de perioden 1987-1995 (links) en 1978-1995 (rechts) wordt in orde van grootte wel goed weergegeven. De verificatieberekening laat sterkere inspeleffecten zien (hoge transporten bij lage debieten).

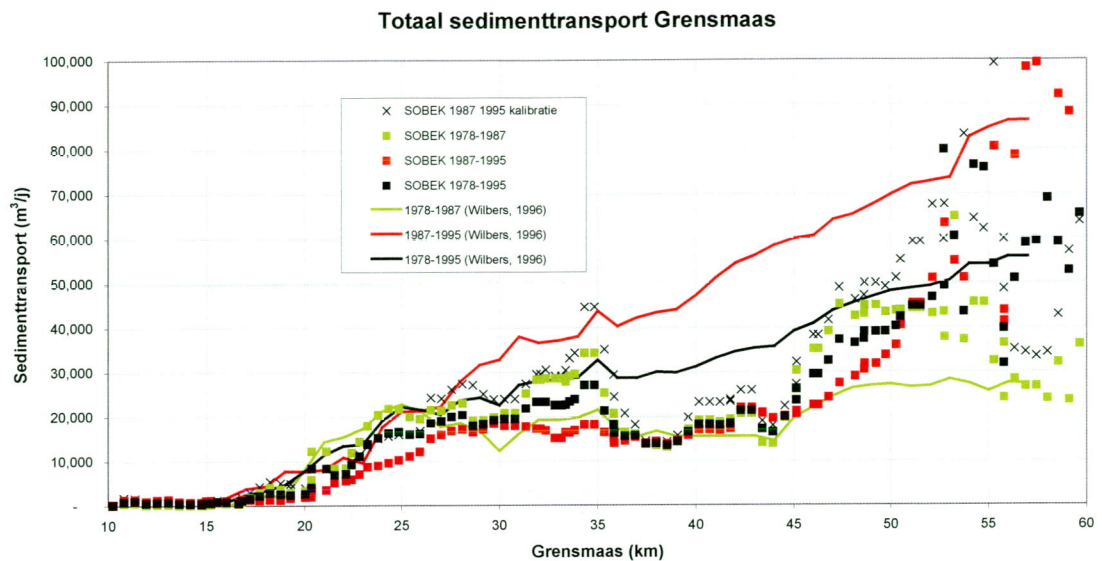


Figuur 5-14 Berekende transporten bij Maaseik: periode 1987-1995 (uit kalibratieberekening) en periode 1978-1995 (uit verificatieberekening)



Figuur 5-15 Berekende en gemeten transporten bij Eijsden en Maaseik 1990-1995 (simulatie 1978-1995)

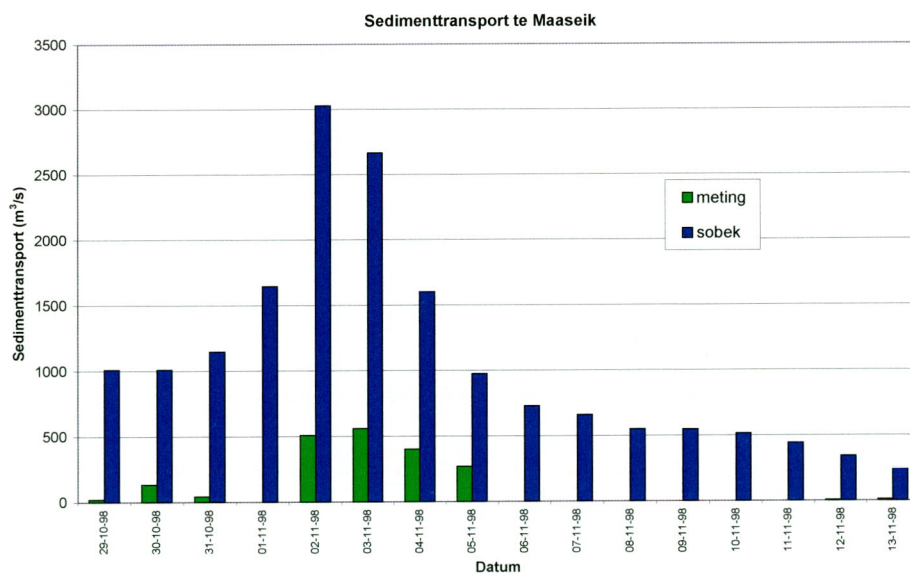
Tevens zijn de berekende sedimenttransporten vergeleken met enkele metingen bij Eijsden en Maaseik verspreid over de periode van 1990 t/m 1994 (Figuur 5-15). Ook is een vergelijking gemaakt met de transporten zoals vastgesteld door Wilbers (1996), die op basis van de bodemontwikkeling de sedimenttransporten voor de twee genoemde perioden heeft geschat. Hiertoe zijn op alle in het model ingevoerde uitvoerlocaties de transporten in de tijd geïntegreerd en met de gegevens van Wilbers geplot (Figuur 5-16). De transporten benaderen de orde van grootte wel degelijk. Echter het onderscheid tussen beide perioden is in de simulaties niet zo sterk. Tevens vertoont de ruimtelijke verdeling afwijkingen: het gebied van km 35-52 toont te lage transporten. Dit hangt vermoedelijk samen met te lage stroomsnelheden in dit gebied (zie Bijlage 4: Figuur B3-5).



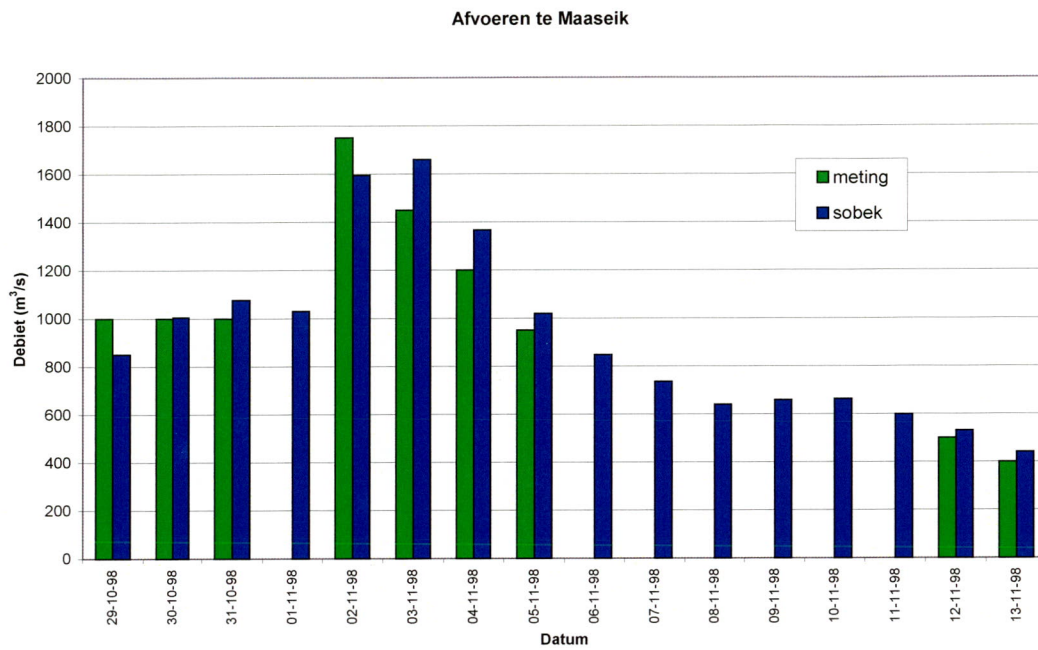
Figuur 5-16 Sedimenttransporten over de gehele Grensmaas volgens Wilbers (1996) en SOBEK

5.8 Tweede verificatieberekening (hoogwater 1998)

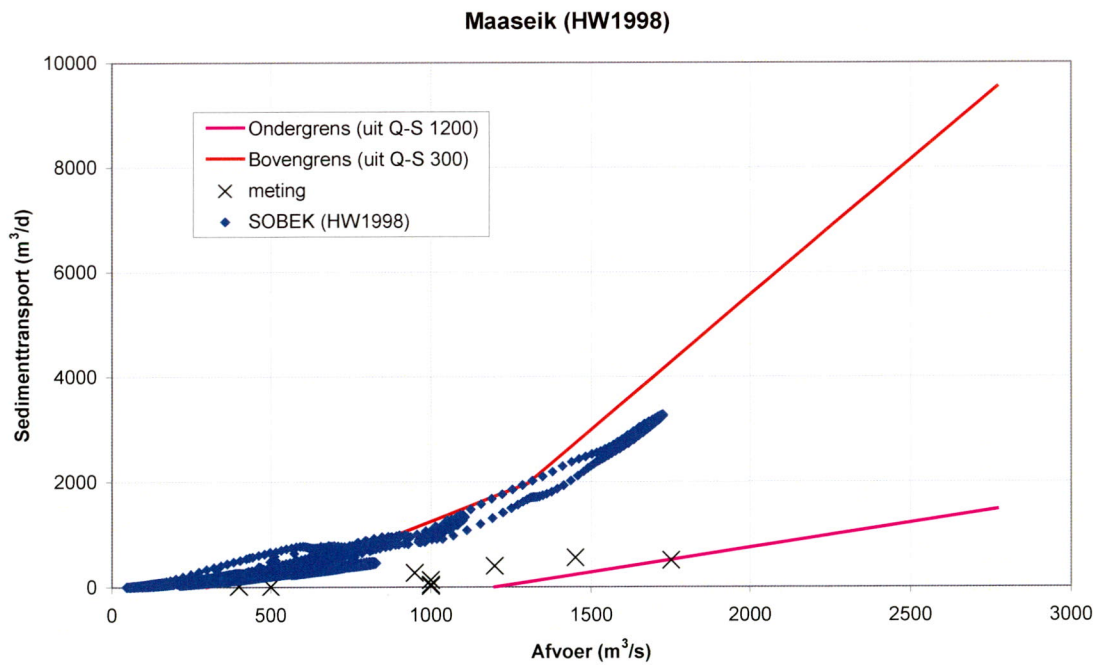
Een tweede verificatieberekening bestrijkt de periode van 4 september tot 31 december 1998, waarin een (relatief klein) hoogwater plaatsvond. Vanwege de aanwezigheid van de DGR-kaden, en het gebruikte hoogtemodel van 1995 is het NA-model ingezet. De tijdstap in deze simulatie bedraagt een uur. Gekeken is naar de optredende sedimenttransporten bij Maaseik. De berekende waarden zijn vergeleken met metingen die vanaf de brug hebben plaatsgevonden (Duizendstra en Van Hal, 1999). In Figuur 5-18 is ter verificatie tevens de berekende tegen de gemeten afvoer uitgezet.



Figuur 5-17 Gemeten en berekende sedimenttransporten bij Maaseik (hoogwater 1998)



Figuur 5-18 Gemeten en berekende debieten bij Maaseik (hoogwater 1998)



Figuur 5-19 Gemeten en berekende debieten en sedimenttransporten bij Maaseik (HW1998)

Ten aanzien van het grote verschil tussen de berekende en gemeten sedimenttransporten (Figuur 5-17) wordt de verklaring in de gemeten transporten gezocht. Deze zijn relatief laag en bevinden zich in de buurt van de ondergrens van de QS-relatie (Figuur 5-19). Een mogelijke oorzaak hiervan is het feit dat de bodem juist voor het hoogwater van 1998 geheel afgepleisterd was, en dat er weinig restmateriaal op de afpleisteringslaag aanwezig was doordat er lang geen hoge debieten opgetreden waren. De berekende waarden bevinden zich daarentegen in het bovengebied van de getoonde QS-relatie. Een tweetal beperkingen van het morfologisch modelleren komen hierbij aan het licht. Ten eerste is het onmogelijk vanuit oogpunt van beschikbare gegevens bij een simulatie de recente voorgeschiedenis van de bodem mede te beschouwen. Deze simulatie is met dezelfde startbodem uitgevoerd als de overige in dit hoofdstuk gepresenteerde simulaties, ofschoon aangenomen kan worden dat de startcondities in werkelijkheid niet gelijk waren. Ten tweede is het met het gehanteerde modelconcept voor gegradeerd sediment met een constante actieve laagdikte niet mogelijk onderscheid te maken tussen de condities waarin de bodem zich kan bevinden, en blijkt het berekende sedimenttransport vooral afvoerafhankelijk.

5.9 Conclusies

De morfologische modelkalibratie en -verificatie leiden tot de conclusie dat de modelsimulaties een mate van nauwkeurigheid bieden, die redelijk is in het perspectief van de in Paragraaf 2.4 gemaakte opmerkingen. Wel blijkt echter dat het model slechts beperkt in staat is de afhankelijkheid van het sedimenttransport van andere factoren dan het debiet goed te simuleren, zoals het opbreken van de afpleisteringslaag en de eventuele beschikbaarheid van sediment op de afpleisteringslaag. De formule van Wu lijkt in vergelijking met de metingen van Wilkens en Lambeek (1990-1995) representatieve transporten te berekenen. In vergelijking met de metingen van Duizendstra (1988) genereert het SOBEM-model teveel transport. Oorzaak hiervan is de spreiding in gemeten transporten, die erg afhankelijk zijn van factoren die in het model niet goed te simuleren zijn (beschikbaarheid sediment, voorgeschiedenis van al dan niet opbreken van de afpleisteringslaag). Het gemiddelde sedimenttransport bij Maaseik is ongeveer correct. Het gemiddelde transport over de gehele Grensmaas is ook ongeveer correct, de verdeling ervan in ruimte en tijd laat echter wel afwijkingen zien.



6 Autonome Ontwikkeling bodemligging Grensmaas

6.1 Inleiding

De verwachte Autonome Ontwikkeling (AO) is gebaseerd op de situatie van de Grensmaas in het jaar 2015³ als het Nederlandse Grensmaasplan (inclusief proefproject Meers) **niet** wordt uitgevoerd, en vormt de referentiesituatie voor het Voorkeursalternatief 2003 (VKA). Dit betekent:

- situatie 1995 met DGR-kaden en compenserende maatregelen;
- wijzigingen in de rivier, die tussen 1995 en 2015 uitgevoerd zijn of zullen worden, of natuurlijk ontstaan zijn en rivierkundig relevant zijn. Dit zijn:
 - de verbreding van het Julianakanaal in westelijke richting, waardoor het winterbed van de rechter oever iets smaller is geworden (km 15 – 65),
 - bebouwing verwijderd bij Herbricht (km 23),
 - bebouwing verwijderd bij Kotem (km 28),
 - enkele dijkverleggingen aan Vlaamse zijde (km 34 – 38),
 - erosiegeul in de Kerkeweerd (km 40),
 - verkleining van de plas bij Bichterweerd (km 44 – 45),
 - dijkverhoging bij Heppeneert (km 50 - 51),
 - gedeeltelijke natuurontwikkeling bij Roosteren (km 53 – 55),
 - ontgraving van de grindput bij Stevensweert (Stevol: km 59 – 60),
 - uitvoering van het Tracébesluit in de Zandmaas (De Maaswerken, 2002: km 68 – 180).

De bouw van de modelschematisatie 'Nulalternatief' is reeds in Paragraaf 5.2 beschreven. Het uit de morfologische modelkalibratie resulterende ondergrondmodel is voor deze modelschematisatie ingezet. Hiermee zijn impliciet de volgende aannamen gedaan:

- Het toepassen van de dikte van de grindlaag (secundair materiaal) uit de geo-elektrische metingen voor het jaar 2015 (start van de langjarige simulaties) impliceert feitelijk dat deze grindlaag niet is ingesleten in de periode 1995-2015. Hierbij wordt opgemerkt dat de nauwkeurigheid van deze geschatte dikte lager is dan de te verwachten bodemerosie in deze periode.
- Bij het toepassen van de in 1995 ingemeten bodemligging voor simulaties die in 2015 starten wordt feitelijk de morfologische ontwikkeling in de periode 1995-2015 verwaarloosd. Dit geldt niet alleen voor het Nulalternatief, maar ook voor het Eindplan (Voorkeursalternatief 2003), waarbij de voorgenomen ingrepen op het hoogtemodel van 1995 gesuperponeerd worden. Deze keuze is echter consistent met bovenstaand punt, en geldt bovendien voor alle onderzoeken die voor het projectbureau De Maaswerken zijn en worden uitgevoerd (zowel Grensmaas als Zandmaas).

6.2 Bodemligging bij de Autonome Ontwikkeling

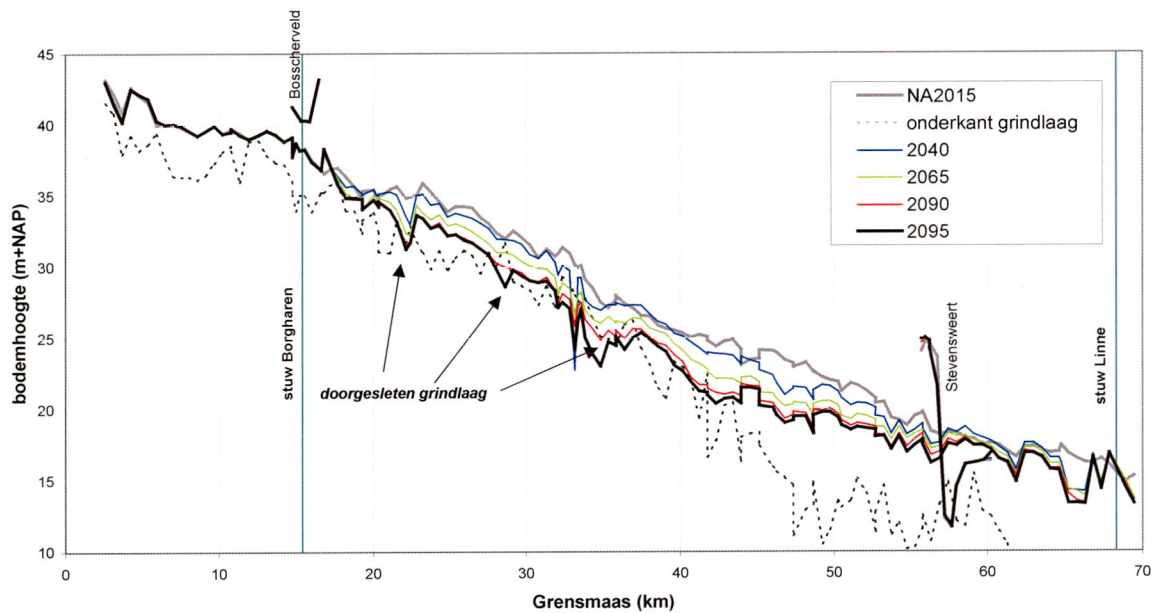
Om de autonome bodemontwikkeling zonder uitvoering van het Voorkeursalternatief 2003 te simuleren is gebruik gemaakt van vier afvoerscenario's (zie Tabel 6-1). De jaartallen gelden van januari tot januari. Meestal is niet 1 januari genomen, maar is een datum (december of januari) gekozen waarop de afvoer niet teveel afwijkt met die van de aansluitende reeks (10 jaar eerder, met uitzondering van de historische reeks), teneinde grote discontinuïteiten in de afvoerreeksen

³ De realisatie van het Grensmaasproject is tot 2017 voorzien. In dit onderzoek geldt 2015 als startpunt voor de modelsimulaties, omdat in dit jaar het grootste deel van het project reeds gerealiseerd zal zijn.

te vermijden. Figuur 6-1 laat het resultaat van de eerste simulatie zien, gebaseerd op de historische reeks. De takken Bosscherveld en Stevensweert zijn parallel aan de Grensmaas weergegeven op de locaties waar zij zich bevinden.

Tabel 6-1 Afvoerscenario's voor 100-jarige morfologische simulaties

afvoerscenario	gebaseerd op tijdreeks	zie Bijlage 6	samenstelling reeks 2015-2115
historisch	1911-1999	Figuur B6-1	1915-1999. 1911-1926
nat	1980-1990	Figuur B6-2	1985-1990, 9 maal 1980-1990, 1980-1985
gemiddeld	1950-1960	Figuur B6-3	1955-1960, 9 maal 1950-1960, 1950-1955
droog	1970-1980	Figuur B6-4	1975-1980, 9 maal 1970-1980, 1970-1975



Figuur 6-1 Modelsimulatie van Autonome Ontwikkeling (historische reeks 2015-2095)

De resultaten van alle simulaties zijn in Bijlage 7 ondergebracht. Hierbij is, evenals in Figuur 6-1, steeds in blokken van 25 jaar de tussenbalans opgemaakt voor het traject km 15-57. De gemiddelde bodemdaling is in Tabel 6-2 weergegeven. De tabel laat zien dat niet alle simulaties het einde gehaald hebben. De simulaties op basis van de historische en de natte reeks zijn om redenen van modelinstabiliteit in 2095 resp. 2090 gestopt. Er is een duidelijke samenhang tussen deze instabiliteiten en het aansnijden van de fijne zandlagen waargenomen.

De modelsimulatie met de historische afvoerreeks bestrijkt de periode 2015-2095. De tabel laat op basis van de historische afvoerreeks in de eerste 25 jaren een bodemdaling van 26 mm/j zien. Een vergelijking van dit getal met de kalibratie en verificatieberekeningen (Tabel 5-4) laat zien dat deze bodemdaling in de orde van grootte ligt van de periode 1987-1995 (22 mm/j), die als relatief natte jaren gelden. Een vergelijking met de gehele periode 1978-1995, die als representatief geldt (gemiddelde erosie 16 mm/j) laat dus een toename zien, die overigens niet extreem is. Een mogelijke verklaring hiervoor kan gevonden worden in het feit dat in 1995 kaden aangelegd zijn, die bij hoogwatersituaties het aandeel van de afvoer in het zomerbed (en daardoor ook de stroomsnelheden) verhogen. De bodemdaling blijft zich met ongeveer dezelfde snelheid voortzetten tot ca 2090. In dit jaar raakt op enkele locaties de grindlaag doorgesleten, waarna de fijne zandlagen aan de oppervlakte komen. Vanaf dit moment neemt de erosie-

snelheid tot het twee- tot drievoudige toe. De berekening stopt in 2095 wegens een niet-convergerende morfologische bodemaanpassing. In de takken Bosscherveld en Stevensweert is vrijwel geen morfologische activiteit te bespeuren.

Tabel 6-2 Overzicht van erosiesnelheid in m/j (Autonome Ontwikkeling - diverse afvoerscenario's)

scenario	simulatie	2015-2040	2040-2065	2065-2090	2090-2115	totaal (m)	opmerkingen
historisch	2015-2095	0,026	0,032	0,025	0,064 (jan. 2095 ⁴)	2,39 (80 j)	aansnijden fijne zandlaag in 2090
nat	2015 2090	0,032	0,046	0,063	0,400 (juli 2090)	3,72 (75 j)	aansnijden fijne zandlaag in 2065
gemiddeld	2015-2115	0,006	0,018	0,022	0,019	1,54 (100 j)	fijne zandlaag niet aangesneden
droog	2015-2115	0,004	0,008	0,008	0,007	0,67 (100 j)	fijne zandlaag niet aangesneden

De invloed van afwijkende afvoerreeksen blijkt erg sterk (Tabel 6-2, Figuur 6-2). In het geval van lage afvoeren blijft de totale bodemdaling in 100 jaar beperkt tot 0,67 m, waarbij de erosiesnelheid ongeveer constant is. De bodemdaling heeft in 2115 de onderzijde van de grindlaag dan ook nog niet bereikt.

In het geval van gemiddelde afvoeren is de bodemdaling in 100 jaar 1,54 m. Dit is in de orde van grootte van de trend vóór 1995 (ca 16 mm/j). Ook nu is de grindlaag nog niet geheel doorgesleten, maar wel aanzienlijk aangetast (zie Bijlage 7). Het feit dat de bodemdaling bij gemiddelde afvoeren geringer is dan bij historische afvoeren hangt samen met het feit dat het sedimenttransport sterk niet-lineair afhankelijk van de stroomsnelheden is. De gemiddelde afvoerreeks bevat geen extreme hoogwaters, die juist zo bepalend zijn voor de riviermorfologie van de Maas.

Een natte afvoerreeks daarentegen laat initieel een ca 25% hogere erosiesnelheid zien ten opzichte van de historische reeks. In de verder gelegen tijdblokken neemt dit verschil toe. Rond 2065 is de grindlaag nabij Maasband (km 35) weggespoeld waarna de erosie zich met een hogere snelheid voortzet tot 63 mm/j (vergelijk met erosiesnelheid van de historische reeks na 2090). Uiteindelijk wordt de uitspoeling van fijn materiaal zo extreem, dat de modelsimulatie stopt wegens een niet-convergerende bodemaanpassing (juli 2090).

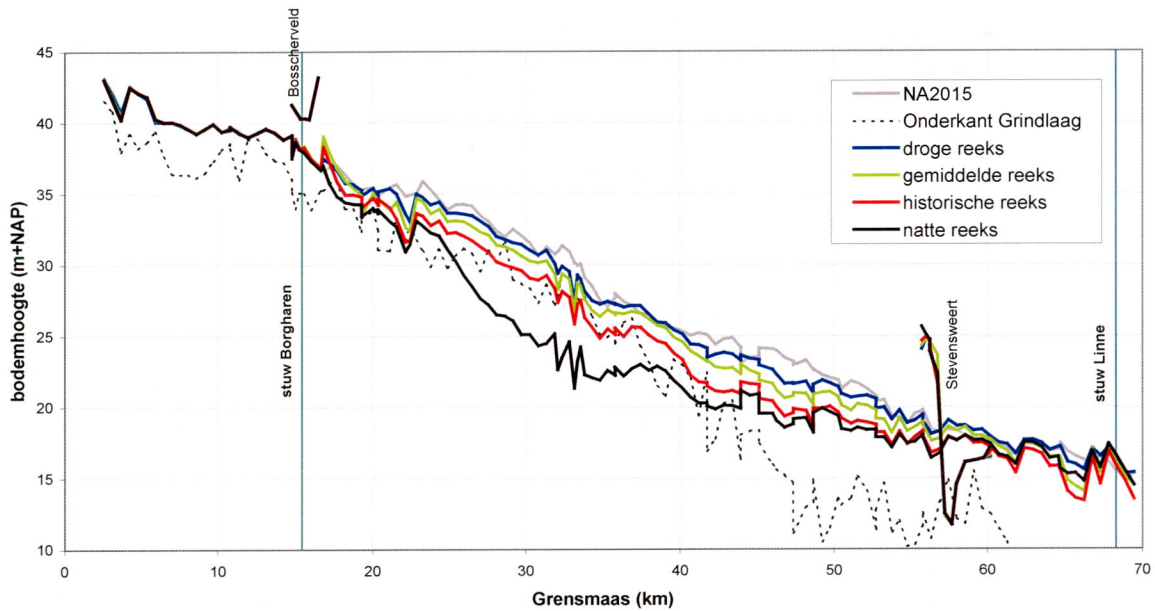
In alle gevallen kan het resultaat kwalitatief als volgt worden beschreven (Figuur 6-2):

- een initieel gestage bodemdaling die gedurende langere tijd ongeveer constant blijft;
- het doorslijten van de grindlaag op een of meerdere locaties, waarna de fijne zandlaag aan de oppervlakte komt en de bodemdaling aanzienlijk sneller verloopt (dit moment wordt bij de gemiddelde en de droge reeks niet voor 2115 bereikt).

Dit resultaat is ook feitelijk onvermijdelijk in een situatie waarbij een gestage bodemdaling, een grindlaag van beperkte dikte, de aanwezigheid van fijne zandlagen en de afwezigheid van inkomend sediment aan de orde zijn. Echter de snelheid van de initiële bodemdaling en het moment dat het beschreven fenomeen optreedt blijken erg gevoelig voor de optredende afvoeren (of: de te verwachten hoogwaterkarakteristieken) op de middellange termijn.

⁴ In de historische tijdreeks bevindt zich hier het hoogwater van 1995 (100 jaar verschoven)

Het SOBEK-model blijkt niet goed in staat stabiel te blijven nadat de fijne zandlagen aan de oppervlakte komen. Hierbij wordt ook opgemerkt, dat ten aanzien van de nauwkeurigheid van de simulaties in dit stadium ook vrijwel geen eisen gesteld kunnen worden omdat een dergelijk extreme insnijding van het zomerbed in werkelijkheid gepaard zal gaan met oevererosie, met als gevolgen: nieuw materiaal in het zomerbed, een rem op verdere bodemdaling, afnemende stroomsnelheden en daardoor een afnemende trend ten aanzien van erosiesnelheid. In het SOBEK-model is erosie buiten de grenzen van het zomerbed niet mogelijk.



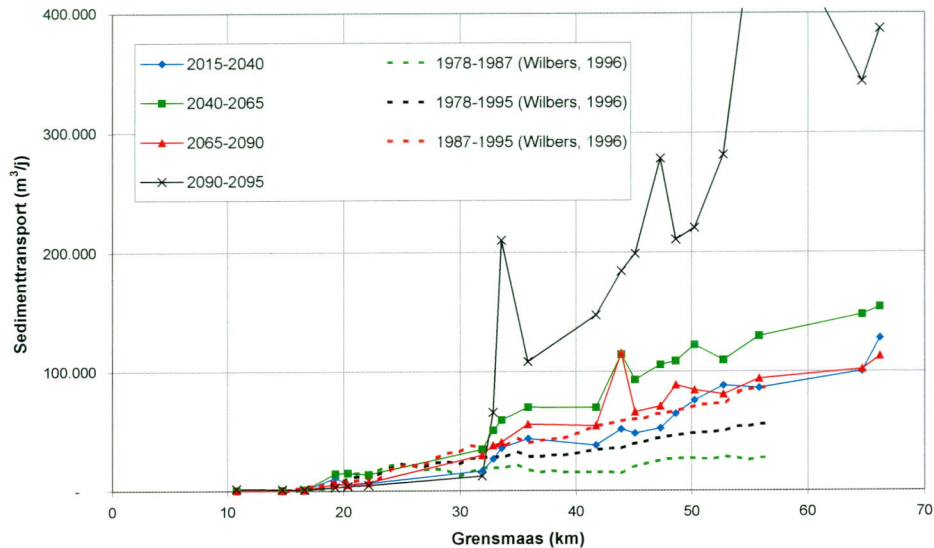
Figuur 6-2 Bodemligging na 75 jaar (2090) bij verschillende afvoerscenario's (Autonome Ontwikkeling)

Ondanks bovenstaande wordt opgemerkt dat de resultaten het karakter van de Grensmaas en de gevoeligheden van de bodemorfologie voor de optredende afvoeren zeer inzichtelijk maken. Ten aanzien van de prognose van de te verwachten autonome bodemontwikkeling lijkt de simulatie met de historische reeks kwantitatief niet onrealistisch, gezien de orde van grootte van de initiële bodemdaling in vergelijking met de recente bodemontwikkeling sinds 1978. In het geval van afvoerwijzigingen door klimaatveranderingen en gewijzigd landgebruik kan de realiteit zelfs tussen de historische en de natte simulatie liggen. Zie hiervoor ook de opmerkingen in Paragraaf 6.5. In alle gevallen moet men rekening houden met het vroeger of later aansnijden van de fijne zandlagen bij ongewijzigd beheer van de Grensmaas. Gezien de jaarlijkse bodemdalingen lijkt de historische afvoerreeks de meest realistische.

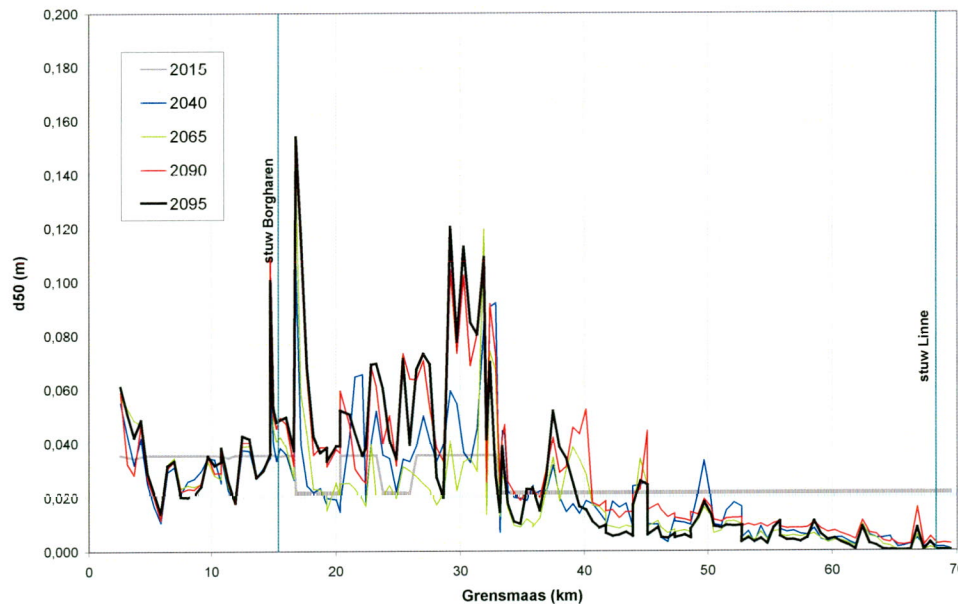
6.3 Sedimenttransport en –samenstelling

Het sedimenttransport is in dezelfde tijdblokken geanalyseerd in Figuur 6-3 uitgezet. Hierbij zijn ook de transporten van het recente verleden toegevoegd (Wilbers, 1996). Volgens de simulatie (historische afvoerreeks) zal het jaarlijkse transport op de Grensmaas tot 2090 in de orde van grootte liggen van de (relatief natte) periode van 1987 tot 1995. Het feit dat het gemiddelde transport ten opzichte van de periode 1978-1995 zal toenemen kan worden gezocht in het feit dat in 1995 de DGR-kaden zijn aangelegd, die het doorstroomprofiel bij hoogwater vernauwen (Bijlage 4: witte vlakken in Figuren B4-1 t/m B4-5).

Het doorbreken van de afpleisteringslaag op grote schaal doet het transport exploderen tot grote hoeveelheden (Figuur 6-3). Dit verschijnsel in de simulatie is realistisch, de hoeveelheid mogelijk niet.



Figuur 6-3 Jaarlijkse sedimenttransporten Grensmaas (Autonome Ontwikkeling)



Figuur 6-4 Samenstelling toplaag Grensmaas (Autonome Ontwikkeling)

De samenstelling van de afpleisteringslaag blijkt zich in de tijd sterk te ontwikkelen. Benedenstrooms van Nattenhoven (km 40) verfijnt de samenstelling van de afpleisteringslaag zich in sterke mate. Deze afname kan worden beschouwd als een correctie op de opgelegde beginvoorwaarde, waarin deze verfijning in benedenstroomse richting waarschijnlijk niet voldoende geprononceerd is aangebracht. Het model blijkt dit op eigen kracht te kunnen te bewerkstelligen. Bovenstrooms hiervan blijkt de afpleisteringslaag in de loop van de tijd niet veel van de initiële samenstelling te gaan afwijken. De tijdopnamen laten zowel hogere als

Nader Onderzoek SOBEK Morfologie juli 2003

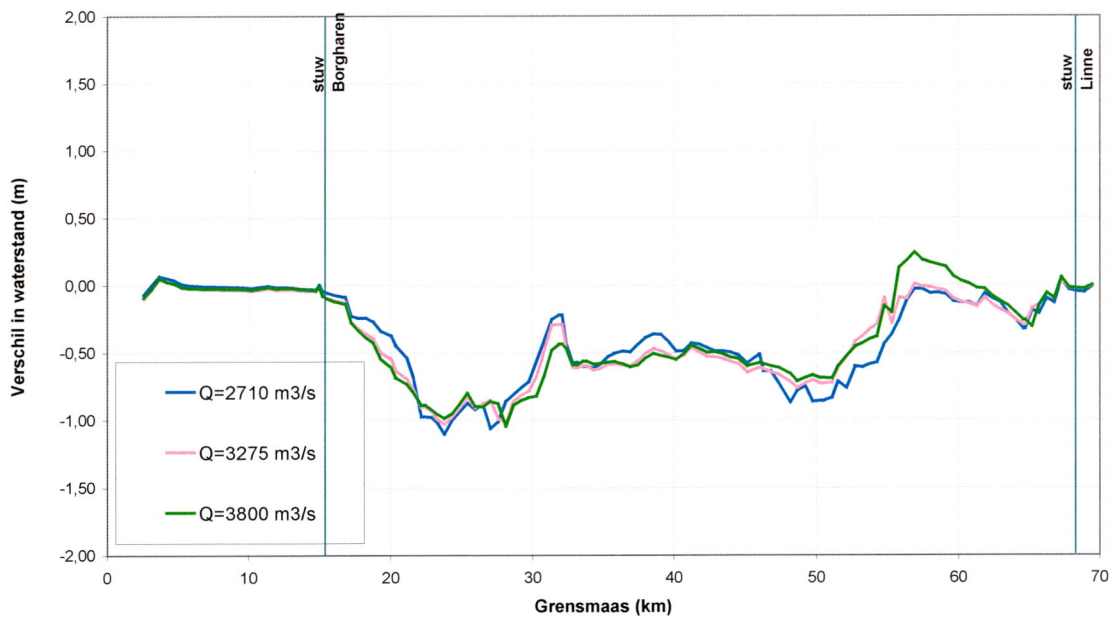
Grensmaasproject

lagere D50-waarden zien, zonder chronologische samenhang. Dit toont aan dat de afpleisteringslaag zich ook in het model kan herstellen, zolang de secundaire grindlaag nog beschikbaar is. Enkele karakteristieke locaties zijn Borgharen (km 16), Kotem (km 40) en Berg (km 39), waar de afpleisteringslaag significant grover wordt. Dit zijn bekende flessenhalzen.

6.4 Effect van de bodemontwikkeling op de waterstanden

Door de autonome bodemdaling zullen ook karakteristieke waterstanden in de loop van de tijd dalen. De waterstanden behorende bij de afvoeren met statistische herhalingstijden van 50, 250 en 1250 jaar (MHW) zijn berekend voor het jaar 2090 (75 jaar na 2015). Hiertoe is de berekende bodemligging van 2090 opnieuw in het rekenmodel ingevoerd om een hydraulische stationaire modelberekening te kunnen maken. De bodemontwikkeling volgens het historische afvoerscenario is hiervoor het meest representatief geacht. De gemiddelde bodemdaling bedraagt in 2090 tussen kilometer 15 en 55 ruim 2 m. De maximale bodemdaling bedraagt 4 m.

Figuur 6-5 laat de resultaten zien van de simulaties voor 2710, 3275 respectievelijk 3800 m³/s. In dit gebied treedt een waterstandsval op van maximaal ongeveer 1 m op voor alle drie de afvoeren.



Figuur 6-5 Verschil in karakteristieke waterstanden tussen 2090 en 2015 (Autonome Ontwikkeling) voor verschillende hoogwatergolven (herhalingstijden: 50, 250 en 1250 jaar)

6.5 Onzekerheden in de voorspellingen

Ten aanzien van de nauwkeurigheid van de voorspellingen wordt naar Paragraaf 2.4 verwezen. Hieraan kunnen echter de volgende onzekerheden en onnauwkeurigheden worden toegevoegd:

- De bodem van 1995 wordt als uitgangspunt voor 2015 genomen, hiermee wordt feitelijk 20 jaar bodemontwikkeling overgeslagen. Dit is een consequentie van de keuze om de ingrepen van het VKA op het hoogtemodel van 1995 te projecteren. Deze keuze is overigens in alle projecten van De Maaswerken consequent toegepast (zie ook opmerking Paragraaf 6.1). Opgemerkt wordt, dat hierdoor de beschreven verschijnselen mogelijk reeds 20 jaar eerder kunnen optreden.
- De aannames van een totale afwezigheid van inkomend sediment bij Eijsden is een conservatieve benadering. Zeker is echter dat de transporten hier gering zijn. Deze randvoorwaarde wordt in de gevoeligheidsanalyse nader getoetst (Paragraaf 8.4).
- Voor de kalibratie- en verificatieberekeningen zijn aannames gedaan ten aanzien van de afpleisteringslaag en de grindlaag, bestaande uit secundair bodemmateriaal. De dikte en de samenstelling van deze lagen zijn niet in detail bekend, ruimtelijk sterk gevarieerd, maar van grote invloed op de tijdschaal van morfologische ontwikkelingen. Deze factor is bij de kalibratie- en verificatieberekeningen (met een looptijd van maximaal 17 jaar) minder doorslaggevend dan bij langjarige toekomstvoorspellingen, waarbij de bodemerosie in de loop van de tijd (100 jaar) meer gaat bedragen dan de dikte van de aanwezige grove lagen.
- Het feit dat SOBEK niet stabiel blijft bij het aansnijden van de fijne zandlagen duidt op een beperking van het actieve-laagconcept dat voor gegradeerd sediment wordt gehanteerd. Met name bij het aansnijden van de fijne lagen is dit concept onvoldoende valide (Ribberink, 1987; Scheer e.a., 2002).
- Extreme erosieprocessen na het bereiken van de fijne zandlagen worden mogelijk niet realistisch gesimuleerd. De extreem hoge transporten zijn niet onrealistisch, maar kunnen moeilijk getoetst worden omdat hiervoor geen kalibratiemateriaal beschikbaar is. Bovendien zal, zodra de bodemdaling enkele meters gaat bedragen, oevererosie optreden waardoor het profiel ruimer wordt, de bodem weer zal stijgen en weer nieuw (grover) materiaal in het zomerbed terecht komt. Deze remmende factor op de bodemdaling kan het SOBEK-model niet simuleren, omdat erosie buiten het zomerbed in het model niet mogelijk is.
- Er wordt geen rekening gehouden met een verandering van het afvoerregime door klimaatveranderingen. Het toepassen van verschillende afvoerreeksen is echter bedoeld om de gevoeligheid van de resultaten voor deze factor te onderzoeken.
- Deze analyse gaat voorbij aan mogelijke ontwikkelingen die de bovenstroomse randvoorwaarde (vorm van hoogwatergolven) kunnen beïnvloeden. Gedacht kan worden aan retentiemaatregelen in Wallonië of Frankrijk.



7 Morfologische effecten MER-verkenningen

7.1 Inleiding

Het Voorkeursalternatief 2003 Grensmaas (VKA) is het alternatief dat door de Provincie Limburg begin 2002 is vastgesteld en dat naar verwachting uitgevoerd zal worden (zie Figuur 1-1). De ingrepen in de rivier moeten, naast grindwinning en natuurontwikkeling, leiden tot een verhoging van het beschermingsniveau tegen hoogwater. Waar de ingrepen niet tot voldoende beschermingsniveau leiden zullen kaden verhoogd worden zodat het beoogde beschermingsniveau alsnog wordt bereikt.

Het Voorkeursalternatief 2003 van het MER Grensmaas bestaat uit de volgende ingrepen (De Maaswerken, 2003):

- weerdverlaging bij Bosscherveld (rkm 14,8 - 16,6)
- stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Borgharen (rkm 16,4 - 19,3)
- stroomgeulverbreding / bochtafsnijding en weerdverlaging bij Itteren (rkm 20,0 - 22,4)
- stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Aan de Maas (rkm 24,0 - 28,2)
- nevengeul⁵ en weerdverlaging bij Meers (rkm 31,0 - 34,0)
- nevengeul en weerdverlaging bij Maasband (rkm 34,0 - 36,2)
- stroomgeulverbreding en weerdverlaging bij Urmond (rkm 36,5 - 38,0)
- weerdverlaging bij Nattenhoven (rkm 39,0 - 40,6)
- nevengeul bij Grevenbicht (rkm 41,7 - 44,5)
- stroomgeulverbreding / bochtafsnijding en weerdverlaging in de Koeweide (rkm 44,5 - 48,4)
- stroomgeulverbreding, nevengeul en weerdverlaging bij Visserweert (rkm 48,4 - 50,8)
- stroomgeulverbreding en natuurontwikkeling bij Roosteren (rkm 51,2 - 52,9)
- bodembescherming in de flessenhalzen bij Kotem (rkm 28,0 - 31,5), Berg (rkm 38,0 - 39,0) en Obbicht (rkm 40,9 - 42,0)

De bodembeschermingen zijn op basis van het voorwerk MER Grensmaas (Van den Braak e.a., 2002) aan het ontwerp van het Voorkeursalternatief 2003 toegevoegd. Het zijn bestaande flessenhalzen waar de stroomsnelheden na uitvoering van het Grensmaasproject verder zullen toenemen. De ontwerpen zijn gebaseerd op WAQUA-simulaties. De hierbij gehanteerde criteria zijn:

- de stroomsnelheid is hoger dan 3,50 m/s bij 3275 m³/s (1/250 per jaar), en
- de stroomsnelheid is hoger dan bij het NA (AO) bij 3275 m³/s (1/250 per jaar).

Paragraaf 7.2 geeft een beschrijving van het SOBEK-model van het Voorkeursalternatief 2003. Paragraaf 7.3 gaat in op het effect van de ingrepen op de gehele Grensmaas. Het sedimenttransport en de samenstelling ervan worden beschreven in Paragraaf 7.4. Paragraaf 7.5 gaat in op de effecten die de bodemontwikkeling op de lange termijn op de waterstanden zal hebben. De ontwerpvarianten worden in Paragraaf 7.6 beschreven. In Paragraaf 7.7 komt het ontwerp van de Koeweide aan de orde. Over de waarde van de berekeningsresultaten en de onzekerheden hierin geeft Paragraaf 7.8 tenslotte een beschouwing.

⁵ Feitelijk is hier geen sprake van een nevengeul maar van een hoofdgeulverbreding met behoud van enkele eilanden, die een afzonderlijke stroombaan in de binnenbocht doet ontstaan. Hierdoor ontstaat het karakter van een nevengeul. In het vervolg van dit verslag wordt de term nevengeul gebezigd.

7.2 Modelschematisatie Eindplan (Voorkeursalternatief 2003)

Teneinde van het Voorkeursalternatief 2003 de langjarige effecten te kunnen vaststellen is een modelschematisatie gebouwd op basis van toegeleverde BASELINE-basisbestanden, die ook voor de bouw van het WAQUA-model gebruikt zijn. Hieraan zijn nieuwe basisbestanden toegevoegd die specifiek betrekking hebben op de SOBEK-modelschematisatie. Het gaat hierbij om secties (zomerbed, oeversectie, winterbed), SOBEK-takken, vakgrenzen voor het zomerbed en voor het winterbed, de stroomvoeringsbegrenzing en kadeselementen in het winterbed. Ook hierbij is gebruik gemaakt van de WAQUA-modelresultaten van het VKA. Het model bestaat uit 28 takken: de zes extra takken ten opzichte van het NA-model (AO) zijn nodig om ingrepen te kunnen schematiseren: Itteren, Meers, Maasband, Grevenbicht, Koeweide en Visserweert. Deze takken sluiten aan op knopen die al in het NA-model (AO) gelegd zijn. In Bijlage 4 staat de modelschematisatie uitgebreid beschreven. De figuren B4-1 t/m B4-5 geven een overzicht van het modelbereik en tonen de rivieras, de oeverlijn, de knooppunten en de SOBEK-takken met bijbehorende namen, de BASELINE-vakken met nummers die ten grondslag liggen aan het genereren van SOBEK-profielen en het samenstellen van de bodemdata van NITG, de rekenpunten, de rivierkilometers en de omkade dorpen, die in het model geen deel meer van het winterbed uitmaken.

Tenslotte zijn de SOBEK-profielen gegenereerd waarna per rekenpunt winterbedruwheden (Nikuradse-waarden) zijn vastgesteld op basis van de ecotopen binnen de stroomvoeringsbegrenzing. Met behulp van deze gegevens is een SOBEK-model gebouwd waarvan de hydraulische ruwheden van het zomerbed voor vier stationaire afvoeren (100, 975, 2710 en 3800 m³/s) zijn geverifieerd aan WAQUA-modelresultaten. Hierbij is uitgegaan van de ongewijzigde zomerbedruwheden van het NA-model (AO) en zijn voor de nieuwe takken de hydraulische ruwheden afgeregeld op basis van waterstanden en stroomsnelheden. De volgende ruwheden zijn toegepast:

Tabel 7-1 Chézy-waarden in de zijtakken

zijtak	Chézy-coëfficiënt (m ^{0,5} /s)
Boscherveld	20 ~ 40
Itteren	50
Meers	10
Maasband	20
Grevenbicht	20
Koeweide	50
Visserweert	20
Stevensweert	20 ~ 40

Bijlage 4 laat het resultaat van deze hydraulische afregeling zien (Figuren B4-6 t/m B4-17). Bijzondere aandacht is besteed aan de afvoerverdeling over de geulen (Tabellen B4-2 en B4-3). Opgemerkt wordt dat de grote geulverbredingen Itteren en de Koeweide relatief lage ruwheden (hoge Chézy-waarden) vereisten om met de WAQUA-resultaten in overeenstemming te komen. Daarentegen bleek de geul bij Meers, evenals in het WAQUA-model, een hoge hydraulische ruwheid te vereisen. Dit hangt samen met de keuze van de ecotopen in het ontwerp (zoals in BASELINE ingevoerd). Ten opzichte van het NA-model is de afregeling van de waterstanden minder nauwkeurig geworden, maar de stroomsnelheden zijn in goede overeenstemming met de WAQUA-resultaten, evenals de afvoerverdeling. Aangezien de stroomsnelheden belangrijk voor de riviermorfologie wordt het mindere resultaat ten aanzien van de waterstanden geaccepteerd.

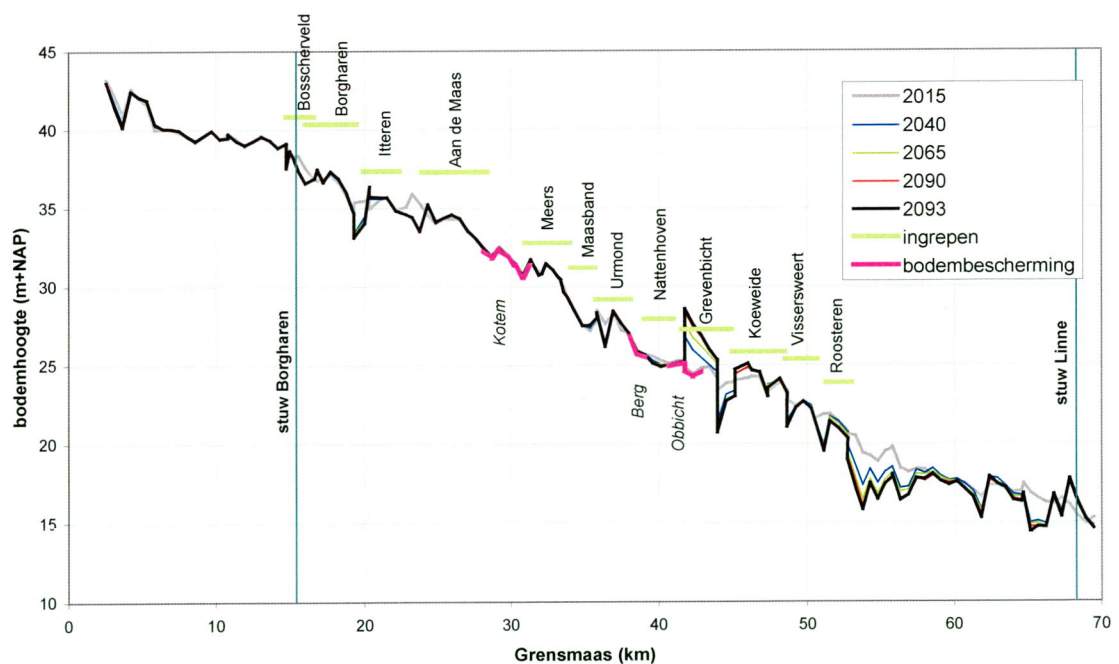
Vervolgens is een digitaal ondergrondmodel opgebouwd op dezelfde wijze als voor het NA-model (AO: zie Paragraaf 5.2). Aangezien er nu 6 nieuwe takken zijn, zijn ook de rekenpunten op de ingreeplocaties in het nieuwe bodembestand betrokken. De nieuwe takken zijn niet van een afpleisteringslaag voorzien, omdat deze als vers vergraven worden beschouwd. Dit geldt niet voor de stroomgeulverbredingen omdat het 1-D model geen differentiatie van de bodemsamenstelling in dwarsrichting toestaat (zie ook opmerking Paragraaf 7.8). De hele structuur van het model is in Tabel B4-1 van Bijlage 4 samengevat. In de splitsingspunten geldt de voorwaarde, dat de sedimentverdeling evenredig is aan de afvoerdeling. De sedimentverdeling in splitsingspunten is onbekend, maar wel van invloed op de morfologie van beide takken. De toegepaste voorwaarde geldt als standaardvoorwaarde. Enige afwijking van deze standaardvoorwaarde is dan ook niet te onderbouwen.

7.3 Bodemontwikkeling Voorkeursalternatief 2003

7.3.1 Algemeen

Bij het uitvoeren van de modelsimulaties is gebleken dat een aanpassing van de bodemschematisatie noodzakelijk is om de modelsimulaties te kunnen uitvoeren. Onderstaande resultaten zijn gebaseerd op een ontwerp waarbij de bodembescherming bij Obbicht is verlengd tot de Koeweide (rkm 43,94). Paragraaf 7.7 gaat nader in op de achtergronden hiervan.

De resultaten van de vier simulaties die voor het Voorkeursalternatief 2003 zijn gemaakt, staan samengevat in Tabel 7-2 en Bijlage 8. Tabel 7-2 geeft een overzicht van de totale erosie voor de hele Grensmaas en de erosiesnelheid voor 4 tijdvakken vanaf 2015. In Bijlage 8 staan de bodemveranderingen tussen 2015-2115 voor verschillende afvoerregimes voor zowel de Grensmaas als de nieuwe nevengeulen in grafieken weergegeven (Figuren B8-1 t/m B8-16).



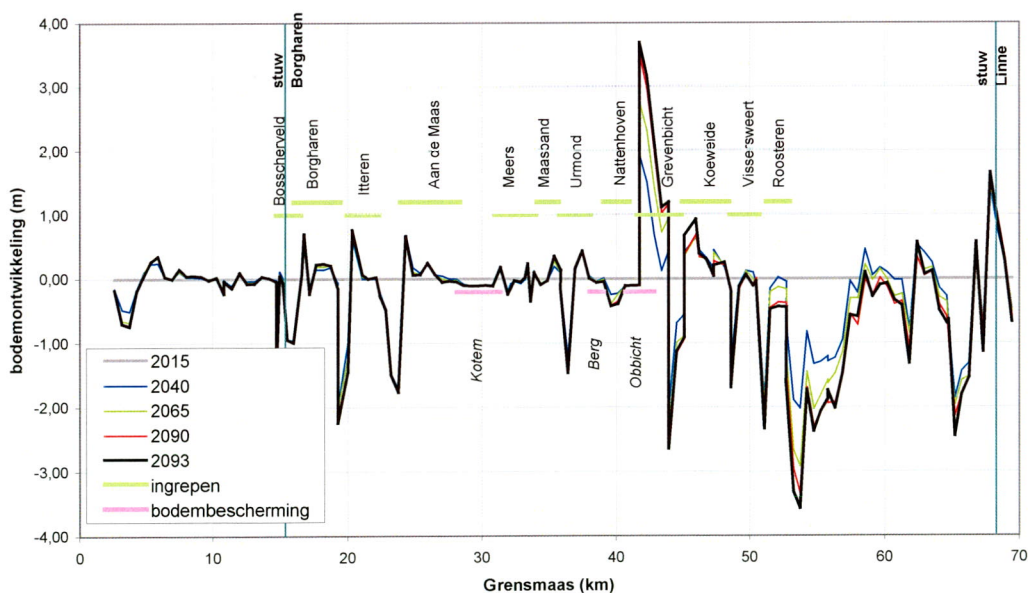
Figuur 7-1 Bodemontwikkeling Voorkeursalternatief 2003 met historische afvoerreeks

Analyse van de resultaten laat zien dat de verschillen ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling erg groot zijn. De geringe gemiddelde erosie in het Voorkeursalternatief 2003 (Figuur 7-1) is opvallend. De ingrepen van het Eindplan veranderen de hydrodynamica ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling zodanig dat het sediment door de diverse verruimingslocaties in het systeem blijft. Het zich insnijdende karakter van de rivier verdwijnt zodoende, en de totale bodemdaling neemt hierdoor sterk af.

Tabel 7-2 Overzicht van de erosiesnelheid (m/j) en de totale erosie (m) in de Grensmaas (Voorkeursalternatief 2003 - diverse afvoerscenario's)

scenario	simulatie	2015-2040	2040-2065	2065-2090	2090-2115	totaal (m)	figuren
historisch	2015-2093	0,013	0,017	0,018	0,117 (2090-2093)	1,67 (78 j)	B8-1 t/m B8-4
nat	2015-2064	0,003	0,003 (2040-2064)	-	-	0,14 (49 j)	B8-5 t/m B8-8
gemiddeld	2015-2115	0,001	0,001	0,001	0,002	0,11 (100 j)	B8-9 t/m B8-12
droog	2015-2115	0,0004	0,0002	0,0002	0,0002	0,003 (100 j)	B8-13 t/m B8-16

In Tabel 7-2 valt op dat de erosiesnelheid bij de natte afvoerreeks niet de hoogste is. Hierbij wordt opgemerkt dat de erosiesnelheid bij de historische reeks een vertekend beeld geeft, omdat het getal voor 73% wordt bepaald door de bodemdaling in de nevengeul van Grevenbicht (ca 20 m, zie Bijlage 8: Figuur B8-3). Indien deze geul buiten de beschouwing blijft ligt de bodemdaling bij de historische afvoerreeks in de buurt van die van de natte reeks. Een dergelijke bodemdaling in de nevengeul is onacceptabel. Het resultaat is overigens niet erg realistisch. Maar ook een erosie van enkele meters is niet acceptabel in verband met de nabijheid van kaden. Paragraaf 7.3.4 gaat nader in op dit waargenomen resultaat.



Figuur 7-2 Verschilplot bodemontwikkeling Grensmaas bij Voorkeursalternatief 2003 met historische afvoerreeks

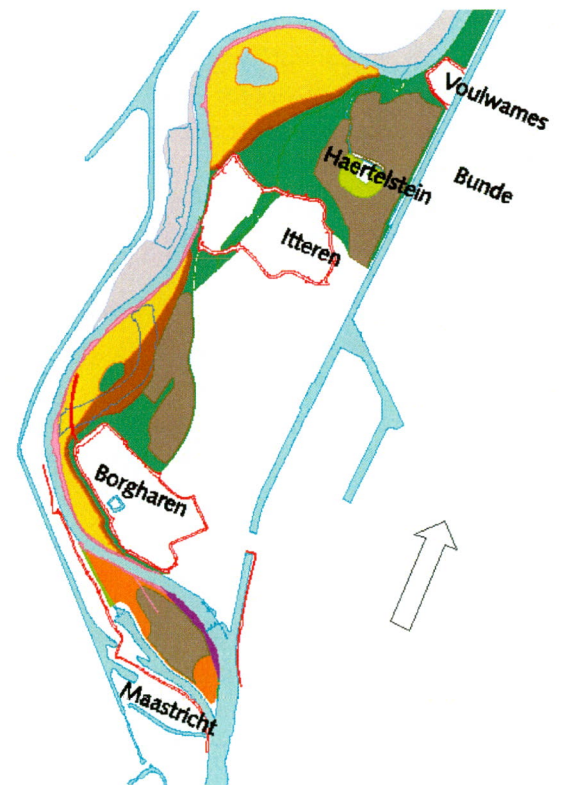
Zoals Tabel 7-2 laat zien zijn niet alle simulaties in 2115 geëindigd. Vooral de simulaties met hogere afvoeren (historisch en nat) eindigen al na 75 tot 80 jaar. Veelal zorgt een locatie met extreme erosie of aanzanding voor een morfologische modelinstabiliteit. Lokale erosiekuilen en sedimentatiepieken komen duidelijk in beeld in een verschilplot (Figuur 7-2).

7.3.2 Geulverbredingen

De figuren in Bijlage 8 laten zowel overeenkomsten als verschillen tussen de afvoerscenario's zien. In alle gevallen is er een neiging tot bodemdaling bovenstrooms van verruimingslocaties. Dit is eenvoudig te verklaren uit het feit dat waterstands daling door rivierverruiming bovenstrooms van de ingreep tot hogere stroomsnelheden leidt. Ter plaatse van verruimingslocaties, vooral aan het begin, zal dit bodemmateriaal weer neerslaan. Ook dit is eenvoudig te verklaren uit het feit dat de stroomsnelheden afnemen ter plaatse van een stroomverwijding. Benedenstrooms van een verruimingslocatie zal er door versnelling van de stroming weer een neiging tot bodemerosie zijn. In de resultaten is echter moeilijk onderscheid te maken tussen erosie benedenstrooms van een ingreep en bovenstrooms van de volgende ingreep, omdat de locaties dicht bij elkaar liggen. Het beschreven effect is consequent terug te vinden bij Borgharen, Itteren (Figuur 7-3), Aan de Maas, Urmond en de Koeweide. De omvang van het effect varieert al naargelang het gekozen afvoerscenario (zie Figuren B8-1 t/m B8-16). Het effect speelt in mindere mate bij Roosteren, waar geen aanzanding waarneembaar is. Hier blijft de snelheid in de hoofdgeul op peil door toegenomen ruwheid op het winterbed (Agtersloot, 2003). Bij de extreme verbredingen Itteren en de Koeweide blijkt de bodemstijging zowel in de oude buitenbocht als de nieuwe binnenbocht (die in het model als verschillende takken geschematiseerd zijn) plaats te vinden. Opgemerkt wordt echter dat hier zich een potentiële modelonnauwkeurigheid bevindt. Het model rekent met profielgemiddelde stroomsnelheden, maar juist op deze twee locaties zal er in de binnenbocht een sterke stroomsnelheidsgradiënt dwars op de rivier zijn. Hier kunnen 2-dimensionale morfologische effecten optreden die met een 1-dimensionaal model niet goed te beschrijven zijn.

7.3.3 Bodembeschermingen

De bodembeschermingen bij Kotem, Berg en Obbicht lijken er effectief voor te zorgen dat bovenstrooms van Meers, Nattenhoven en Grevenbicht geen erosie optreedt. Om deze reden is de aanzanding op de benedenstrooms hieraan gelegen verruimingslocaties steeds beperkt. In de hier beschreven simulaties is de bescherming bij Obbicht zelfs ca 2 km verlengd tot de Koeweide. De achtergrond hiervan is in Paragraaf 7.7 beschreven.



Figuur 7-3 Geulverbredingen bij Borgharen en Itteren