

ROYAL HASKONING

HASKONING NEDERLAND BV
COASTAL & RIVERS

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

Documenttitel	MER Grensmaas 2003 Achtergronddocument 2.1 Morfologie - bureaustudie
Verkorte documenttitel	
Status	Definitief
Datum	5 maart 2003
Projectnaam	MER Grensmaas
Projectnummer	9M4711.B0
Auteur(s)	Ir. G.J. Akkerman e.a.
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat De Maaswerken
Referentie	9M4711.B0/R001//Nijm

SAMENVATTING

Voorliggend rapport

van het Plan Grensmaas en een aantal varianten. Deze bureaustudie is uitgevoerd als één van de technische studies in het kader van de milieueffectrapportage van het recente Plan Grensmaas (MER Grensmaas 2003). Naast deze bureaustudie is er ook een morfologisch modelonderzoek uitgevoerd, met het model SOBEK-Gegradeerd. Het rapport van dit modelonderzoek is een tweede achtergronddocument over riviermorfologie. Verder heeft er voorafgaande aan het morfologisch onderzoek een rivierkundig onderzoek plaatsgevonden met het model WAQUA. Dit onderzoek heeft geresulteerd in het achtergronddocument Rivierkunde.

Onderzoekspunten

Het onderzoek heeft zich gericht op twee hoofdaspecten, namelijk de veranderingen in de morfodynamiek van de Grensmaas en de risico's van bodem- en oevererosie tengevolge van plaatselijke toename van de stroomsnelheden na uitvoering van het Plan Grensmaas.

Het eerste aspect is uitgewerkt op basis van veranderingen van arealen met een toe- of afname van morfodynamiek en wel op basis van veranderingen in de transportcapaciteit. Daarnaast zijn van belang mogelijke verschuivingen van de thalweg, veranderingen in de slibdepositie en slibdoorvoer en mogelijke erosie van de zijbeken; ook wordt aandacht gegeven aan morfologische aspecten direct na uitvoering in relatie tot de uitvoeringsvolgorde.

Ten aanzien van het tweede aspect zijn gebieden geïdentificeerd waar het risico van bodem- en oevererosie zal spelen. Voor deze gebieden worden locale bodem- en oeververdedigingen voorgesteld.

Aanpak

Vooropgesteld zij dat de voorliggende morfologische bureaustudie is uitgevoerd zonder zeer uitgebreide morfologische berekeningen. Het hiervoor genoemde morfologische modelonderzoek met SOBEK-Gegradeerd zal vooral inzicht in de lange-termijn morfologische ontwikkelingen geven. Het voorliggende bureauonderzoek gaat veeleer in op de morfologische begincondities na uitvoering van het Plan Grensmaas, op de te verwachten veranderingen in brede zin en op twee-dimensionale verschijnselen (zoals thalwegverlegging), welke met het SOBEK model niet kunnen worden voorspeld omdat dit een één-dimensionaal model is.

Een belangrijke basis voor de kwantitatieve uitkomsten van dit onderzoek vormen de berekeningen met het WAQUA model (Achtergronddocument 1 – Rivierkunde). De resulterende waterbeweging is vertaald in termen van bodemschuifspanning waarna vervolgens, in combinatie met gegevens over het bodemmateriaal, de mogelijke morfologische gevolgen zijn geanalyseerd.

Veel aandacht is gegeven aan het beschrijven van de huidige morfologische toestand, met name tegen de achtergrond van de ontwikkelingen die zich de laatste eeuwen in de Grensmaas hebben voorgedaan. Daarbij is vooral van belang dat de Grensmaas zich in de loop der tijd dieper in het laagwaterbed heeft ingesneden. Met het uitvoeren van het Plan Grensmaas wordt deels teruggedaan naar de oude situatie met een minder geprononceerde overgang tussen de laag- en hoogwaterbedding.

Een typisch kenmerk van de Grensmaas is de afgepleisterde bodem. Hiermee wordt de situatie aangeduid waarbij het fijnere sediment is afgevoerd en het grovere op de bodem is achtergebleven, en de onderliggende fijnere sedimenten als het ware afpleistert en vastlegt. Een dergelijke situatie kan ontstaan omdat de bodem uit sterk gegradeerd sediment bestaat waarin voldoende grof materiaal aanwezig is om een dergelijke afpleistering te bewerkstelligen. Hierdoor is de Grensmaas een rivier waarin vrijwel altijd sprake is van onderbenutting van de transportcapaciteit. Alléén bij extreme hoogwaters en de daarmee gepaard gaande grote stroomsnelheden verliest de afpleisteringslaag zijn stabiliteit, wordt opgebroken en neemt het sedimentaanbod en daarmee het transport vanuit de daar onder liggende lagen sterk toe.

Bij het uitvoeren van de morfologische analyse is veel aandacht besteed aan de morfologische voorspellingen die zijn gedaan in het eerdere milieueffectrapport MER 1998. Nagegaan is op welke punten de huidige varianten afwijken van die in dit eerdere MER. Daarnaast heeft het inmiddels toegenomen inzicht in de morfologie van de Grensmaas bijgedragen aan de huidige analyse ('voortschrijdend inzicht'). In dit verband dient vooral het inzicht te worden genoemd dat de Grensmaas veel dynamischer lijkt te zijn dan eerder werd aangenomen.

Beschouwde plannen

De effecten van de onderzochte varianten zijn vergeleken met het zogenaamde Nulalternatief (NA), zijnde de autonome veranderingen. Hiermee wordt bedoeld de morfologische ontwikkeling bij het niet uitvoeren van het Plan Grensmaas. Deze ontwikkeling leidt tot slechts beperkte veranderingen ten opzichte van de huidige toestand.

In het onderzoek staan de morfologische effecten van het Eindplan (EP) centraal. Grofweg bestaat het Eindplan uit een twaalfstal locaties waar de Grensmaas door weerdverlagingen en zomerbedverbredingen zal worden verruimd. Naast het Eindplan zijn een aantal varianten onderzocht, waarvan allereerst het Eindplan Plus (EPP) en het Eindplan Min (EPM) met respectievelijk kleinere en grotere weerdverlagingen (0,5 m kleiner respectievelijk groter). De effecten van deze varianten zijn beschouwd ten opzichte van de effecten van het Eindplan.

Aansluitend aan bovengenoemde varianten zijn onderzocht het Meest Milieuvriendelijk Alternatief (MMA) met daarin opgenomen de Vlaamse Boertien locaties, die indertijd door de Commissie Boertien zijn geïdentificeerd en het Eindplan (EPVL) met dezelfde Vlaamse Boertienlocaties. Opgemerkt wordt dat in het in het MER 1998 uitgewerkte plan, de Voorkeursaanpak (VKA) de Vlaamse Boertien locaties ook waren opgenomen.

Conclusies

Een belangrijk effect van de plannen ten opzichte van de huidige situatie (en het NA) is dat de stroomsnelheden in de nauwe delen van de Grensmaas (flessenhalzen), veelal sterk, toenemen en ter plaatse van de verruimde delen in het zomerbed afnemen. Er is dus sprake van een grotere afwisseling van stroming in lengterichting van de rivier, waardoor de morfodynamiek per saldo zal toenemen. Bij uitvoering van het EP is deze toename qua areaal ongeveer 1/10 van het totale te vergraven gebied. Overigens zal een deel van deze toename van morfodynamiek teniet worden gedaan door benodigde bodemverdedigingen. Deze zijn bij het EP noodzakelijk bij de flessenhalzen bovenstrooms van Meers, Nattenhoven en Grevenbicht. Oeververdedigingen zijn op meer plaatsen nodig (ook bij Bosscherveld en Aan de Maas). In het huidige onderzoek is een eerste globale inschatting gemaakt van de noodzakelijke maatregelen: een nadere detaille-

ring hiervan is zeker nog nodig. Voor het EP wordt geschat dat ongeveer 200.000 m³ aan steen nodig is voor bodemverdedigingen en 100.000 m³ voor oeververdedigingen. De meest voorkomende benodigde sortering ligt tussen de 40 en 200 kg.

Grote veranderingen in stroombeelden treden op in de locaties Itteren en Koeweide en in mindere mate ook in Meers. Bij de eerste twee locaties is sprake van grootschalige stroomverlegging naar de binnenbocht, waardoor op den duur ook verlegging van het diepste punt van de rivier (thalweg) in die richting kan plaatsvinden. Daarbij is sedimentatie van de laagwaterbedding evenzeer belangrijk of zelfs belangrijker dan erosie van het binnenbochttracé. Bij locatie Meers zal de stroming zich naar de binnenzijde van het grindeiland willen verplaatsen, waardoor de buitenbocht op termijn minder diep zal kunnen worden. Sterke terugschrijdende erosie vanaf het laagwaterbed aan de benedenstroomse zijde van de verruimingslocaties Itteren en Koeweide wordt in eerste instantie niet verwacht en er zal voldoende tijd beschikbaar zijn om maatregelen te nemen, mochten zich in die zin onverwachte ontwikkelingen voordoen.

Bovengenoemde veranderingen houden in dat over een totale lengte van bijna 7 km zich op termijn belangrijke verplaatsingen van de thalweg zullen voordoen.

Ten aanzien van de slibhuishouding wordt geconcludeerd dat de huidige aanslibbing op de weerden zal verminderen en dat de sliblast naar de Zandmaas daardoor iets zal toenemen; dit laatste is echter zeer beperkt, omdat het effect van aanslibbing op de sliblast naar de Zandmaas zeer klein is.

De beken (Geul, Ur) zullen zich als gevolg van verlaging van de erosiebasis aan de uitmonding in de Grensmaas (door de afgravingen komt de rivier dieper te liggen) verdiepen. Dit proces zal beginnen in de monding en zich stroomopwaarts voortplanten. Indien dit tot ongewenste verlagingen van de zijbeken leidt kan een stuwdrempel in de monding deze ontwikkeling voorkomen. Overigens voltrekken deze processen van erosie zich uiterst traag. Het duurt tientallen tot honderden eeuwen voordat de verdieping van de bodem, op ongeveer 6 tot 12 km uit de monding, gelijk is aan de helft van de verdieping ter hoogte van de monding van de beek.

De volgorde van uitvoering van de rivierverruimingen heeft duidelijk invloed op de morfodynamiek. De grootste morfodynamiek wordt opgewekt indien van benedenstrooms naar bovenstrooms wordt gewerkt. Dit vindt zijn oorzaak in de interactie die zal optreden tussen het vrijkomende sediment dat met de stroom mee wordt getransporteerd, en de 'nieuwe' bodem van de tevoren vergraven locaties. Na uitvoering van de verruimingen is de bodem namelijk nog niet afgepleisterd en zijn grote hoeveelheden sediment voor transport beschikbaar. Het sedimenttransport zal tijdelijk verdubbelen of zelfs verdrievoudigen. Overigens zal bij uitvoering van beneden- naar bovenstroomse richting minder doorvoer naar de Zandmaas plaatsvinden door sedimentatie in de benedenstrooms gelegen nieuwe verruimingslocaties.

De sterkste morfologische veranderingen zullen tijdens en kort na aanleg plaatsvinden. Na verloop van tijd zal de bodem meer afpleistering gaan vertonen en is het sedimenttransport (net als thans) weer sterk beperkt door het geringe aanbod. Dit geldt dan voor alle afvoeren lager dan de extremere hoogwaters; alleen bij extremere hoogwaters worden de afpleisteringslagen weer opgebroken.

Overigens zijn er naast morfodynamiek andere factoren aan te wijzen die de uitvoeringsvolgorde (mede) zullen bepalen. Genoemd wordt reductie van flessenhalzen (uitvoering in benedenstroomse richting), en compensatie van lokale waterstandsverhogingen (uitvoering in bovenstroomse richting).

Het EPP en EPM houden relatief kleine veranderingen in ten opzichte van het EP, ook bij beschouwing van de bodemschuifspanningen. Wel zal lokaal, vooral bij Itteren en Koeweide, bij het EPP wat minder verschuiving van de hoofdstroom naar de binnenbocht optreden; bij het EPM is dit andersom. Bij het EPP is dan lokaal ook wat minder morfodynamiek te verwachten (minder beddingvormen en banken in de binnenbochten) dan bij het EP; dit is bij het EPM juist andersom. Bij het EPP is anderzijds meer 'sediment' (toutvenant) aanwezig in het dwarsprofiel ter hoogte van de binnenbocht bij Itteren en Koeweide. In de huidige situatie van de Grensmaas wordt deze hoeveelheid sediment geërodeerd in een periode van ongeveer 25 jaar.

Bij het MMA worden de grootste veranderingen ten opzichte van het EP veroorzaakt door de aanwezigheid van de vergraven Vlaamse Boertien locaties. Daarmee wordt een belangrijke besparing op de bodemverdediging (besparing ongeveer 50.000 m³ steen) en in mindere mate op de oeververdediging (besparing ongeveer 10.000 m³ steen) bereikt ten opzichte van het EP. De bochtafsnijdingen bij Itteren en Koeweide zullen mogelijk wat trager verlopen. De bodemerosie in de zijbeken verandert niet noemenswaardig. De slibsedimentatie op de hoger gelegen weerden zal verder afnemen (mogelijk tot de helft bij het EP). Ten aanzien van de uitvoeringsvolgorde wordt opgemerkt dat een tijdige uitvoering van de Vlaamse locaties, vooral van Kotem, de (zeer) hoge stroomsnelheden in de flessenhalzen (aanwezig in het EP), sterk zullen afnemen.

Het EPVL lijkt, qua morfologische effecten, bovenstrooms van Meers sterk op het MMA. Dit komt door de sterk overheersende invloed van de uitvoering van de Vlaamse Boertien locaties. Benedenstrooms van Meers komt het EPVL vanzelfsprekend (nagenoeg) overeen met het EP. Ten opzichte van het EP betekent dit ook een reductie van bodem- en oeververdedigingen. De grootschalige thalwegverplaatsingen zijn nagenoeg gelijk aan het MMA. Dit geldt ook voor erosiegevaar van de zijrivieren, voor de slibhuishouding en voor de morfodynamiek na uitvoering.

Kennisleemten en monitoring

Op basis van het onderzoek zijn een aantal leemtes in kennis naar voren gekomen en kunnen aanbevelingen voor monitoring worden gedaan.

Het is van belang optredende bodemveranderingen tijdens en direct na uitvoering op te meten (voorafgaande aan vorming van de afpleisteringslagen). Deze fase is namelijk niet beschouwd bij de op de WAQUA berekeningen gebaseerde analyse. Indien de ontwikkelingen daartoe nopen zal een aanvullende analyse voor deze fase moeten worden uitgevoerd.

Verder heeft het onderzoek geleid tot het inzicht dat de globale indicatie van de benodigde oever- en bodemverdedigingen middels een nader onderzoek moet worden verfijnd. Mogelijk leidt dit tot optimalisering en daarmee tot besparing van kosten en vergroting van het morfodynamische areaal. In een dergelijk onderzoek dient ook de uitvoeringsvolgorde te worden beschouwd.

Het is aanbevelenswaardig een langere termijn meetprogramma op te stellen voor de Grensmaas en dit toe te snijden op een aantal markante lokaties. Hierbij komt allereerst het rivierprofiel, en daarmee voorziene geulverleggingen en de thalweg, in beeld nabij Itteren, Meers en Koeweide. Ook dient eventuele terugschrijdende erosie te worden gevolgd.

Verder wordt aanbevolen het erosieverloop van de uitmonding van de beken te volgen, zodat eventuele maatregelen tijdig kunnen worden getroffen (stuwdrempels). Tenslotte is het van belang aanslibbing in stroomluwe delen tijdens de uitvoering van de werken en ook op langere termijn in beeld te brengen om een beter inzicht in de slibhuishouding te krijgen.

Inhoud

1	<i>Inleiding</i>	1
1.1	Algemeen	2
1.2	Probleemschets	3
1.3	Doel 4	
1.4	Het studiegebied	4
1.5	Methodiek	5
1.6	Relaties met andere deelonderzoeken	6
1.7	Leeswijzer	6
2	<i>Methodiek</i>	8
2.1	Afbakening	8
2.2	Stappen van onderzoek	9
2.3	Gebruikte gegevens	10
2.4	Betrouwbaarheid	11
3	<i>Huidige morfologische toestand</i>	13
3.1	Algemeen	13
3.2	Menselijk ingrijpen	13
3.3	Globale morfologische kenmerken	15
3.4	Beddingmateriaal	18
3.5	Sedimenttransport	20
3.6	Beddingstabiliteit	20
3.7	Oeverstabiliteit	22
3.8	Morfologische tijdschaal	23
3.9	Zwevend transport en aanslibbing	26
3.10	Aanbod en doorvoer van sediment	27
4	<i>Autonome morfologische ontwikkeling</i>	28
4.1	Referentiekader	28
4.2	Het NA	28
4.3	Mogelijke autonome ontwikkelingen	28
5	<i>Kader</i>	30
5.1	Algemeen	30
5.2	Vergelijking ingrepen Plan Grensmaas en VKA	30
5.3	Voortschrijdend inzicht t.a.v. morfologie en slibtransport	36
5.4	Consequenties voor de morfologie	42
6	<i>Morfologische effecten EP</i>	47
6.1	Algemeen	47
6.2	Morfologisch actief oppervlak	48
6.3	Thalweg	54
6.4	Slib	60
6.5	Erosie zijbeken	72
6.6	Risicogebieden en mitigerende maatregelen	75
6.7	Morfologie direct na uitvoering	80
7	<i>Morfologische effecten EPP en EPM</i>	86
7.1	Effecten van EPP en EPM ten opzichte van EP	86
8	<i>Morfologische effecten MMA</i>	93
8.1	Algemeen	93

8.2	Korte beschrijving van het MMA.....	93
8.3	Morfologisch actief oppervlak	93
8.4	Ligging thalweg	95
8.5	Overige aspecten	97
8.6	Risicogebieden en mitigerende maatregelen	99
8.7	Morfologie direct na uitvoering en uitvoeringsvolgorde	101
9	<i>Morfologische effecten EPVL.....</i>	<i>102</i>
9.1	Algemeen.....	102
9.2	Korte beschrijving van het EPVL	102
9.3	Morfologisch actief oppervlak	102
9.4	Ligging thalweg.....	104
9.5	Overige aspecten	106
9.6	Risicogebieden en mitigerende maatregelen	107
9.7	Morfologie direct na uitvoering en uitvoeringsvolgorde	108
10	<i>Conclusies.....</i>	<i>110</i>
10.1	Algemeen.....	110
10.2	Eindplan (EP).....	110
10.3	Eindplan+0,5m (EPP) en Eindplan-0,5m (EPM)	115
10.4	Meest milieuvriendelijk Alternatief (MMA).....	116
10.5	Eindplan inclusief Vlaamse Boertien Locaties (EPVL)	117
11	<i>Kennisleemten en monitoring.....</i>	<i>119</i>
11.1	Inleiding	119
11.2	Morfodynamisch areaal	119
11.3	Benodigde bodem- en oevervastleggingen	119
11.4	Thalwegverplaatsingen.....	120
11.5	Erosie zijbeken.....	120
11.6	Aanslibbing Grensmaas en slibblast Zandmaas	121
11.7	Sedimentverplaatsingen na uitvoering	121
11.8	Algemene kennisontwikkeling.....	122

Tabellen

Tabel 1.1	Opbouw Morfologische Bureaustudie	7
Tabel 3.1	Menselijke ingrepen	14
Tabel 3.2	Globale inschatting morfologische tijdsschalen voor Grensmaas	26
Tabel 5.1	Overzicht significante afwijkingen in het stroombeeld tussen EP en VKA	34
Tabel 5.2	Nuancering van de conclusies uit het MER '98.....	43
Tabel 6.1	Overzicht van gebieden waar de morfodynamiek van het EP verandert ten opzichte van het NA.....	53
Tabel 6.2	Overzicht potentiële verandering thalwegligging EP-NA	57
Tabel 6.3	Sediment concentraties en trapping efficiencies	67
Tabel 6.4	Aanpassing bodem zijbeken	75
Tabel 6.5	Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde bodemverdediging in het EP..	77
Tabel 6.6	Benodigde oeververdediging per locatie in m ³	80
Tabel 7.1	Overzicht wijziging morfodynamiek EPP t.o.v. EP	88
Tabel 7.2	Overzicht wijziging morfodynamiek EPM t.o.v. EP.....	90
Tabel 8.1	Overzicht van gebieden waar de morfodynamiek van het MMA verandert t.o.v. het NA 94	
Tabel 8.2	Overzicht potentiële verandering thalwegligging MMA-NA	95
Tabel 8.3	Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde bodemverdediging in het MMA99	
Tabel 8.4	Indicatie van de locatie en benodigde oeververdediging per locatie in m ³ MMA .	100
Tabel 9.1	Overzicht van gebieden waar de morfodynamiek van het EPVL verandert t.o.v. het NA 103	
Tabel 9.2	Overzicht potentiële verandering thalwegligging EPVL-NA.....	104
Tabel 9.3	Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde bodemverdediging in het EPVL107	
Tabel 9.4	Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde oeververdediging in het EPVL108	

Figuren

Figuur 1.1	Overzicht Grensmaasgebied	1
Figuur 1.2	Overzicht Grensmaasgebied	6
Figuur 3.1	Twee delen van kaarten van de Maas nabij Grevenbricht van 1849 (links) en van 1905 (rechts) waarop duidelijk het effect van de normalisatie te zien is [Helmer et al, 1991].....	15
Figuur 3.2	Thalwegligging van de Maas tussen rkm 15 en rkm 150 [Murillo, 1997]	16
Figuur 3.3	Gemiddelde korreldiameter van het bodemmateriaal in het zomerbed van de Maas [Murillo, 1997].....	17
Figuur 3.4	Geologisch langsprofiel van de Maas tussen rkm 0 en rkm 87	18
Figuur 3.5	Neo-tectoniek en de Maas	19
Figuur 5.1	Stroombeeld bij de locatie Itteren in het EP.....	32
Figuur 5.2	Stroombeeld bij de locatie Meers in het EP.	32
Figuur 5.3	Detail van het stroombeeld bij Berg – Nattenhoven.	33
Figuur 5.4	Stromingsbeeld bij de locatie Koeweide in het EP.	33
Figuur 5.5	Verskil in gedrag van een afgepleisterde bedding tijdens hoogwater met een breed gegradeerde onderlaag (A - serie) en fijn sediment (B - serie)[Blom et al, 2003]	39
Figuur 6.1	Overschrijding van de kritische schuifspanning in het EP op de locatie Itteren ...	50
Figuur 6.2	Overschrijding van de kritische schuifspanning in het NA op de locatie Itteren...	50
Figuur 6.3	Verskil in schuifspanningen (EP – NA) waarbij de schuifspanning in het EP groter is dan de kritische schuifspanning en de verschillen tussen EP en NA groter zijn 5 N/m ² voor de locatie Itteren	52
Figuur 6.4	Berekende slibconcentraties te Eijsden in de periode 1911-1998	62
Figuur 6.5	Verdeling van slibbelasting over de verschillende afvoerclassen	63
Figuur 6.6	Snelheidsverdeling volgens WAQUA simulaties in dwarsprofiel in verzuimingslocatie bij Itteren	64
Figuur 6.7	Dwarsprofiel en maximale snelheden volgens WAQUA simulaties in dwarsprofiel in verzuimingslocatie bij Itteren	65
Figuur 6.8	Sediment trapping efficiency als functie van $A/\Delta Q$ en sediment diameter D_i [Chen, 1975]	66
Figuur 6.9	Relatieve aandeel van het linker- en rechter winterbed voor NA en EP.....	70
Figuur 6.10	Relatieve aandeel van het winterbed voor de gevallen NA en EP voor een drietal afvoerniveaus	71
Figuur 6.11	Afname slibconcentratie in Grensmaas voor een drietal afvoeren.....	72
Figuur 6.12	Afname percentage deposities van slib op Grensmaas weerden voor drietal afvoeren	72
Figuur 6.13	Wijziging afvoer-waterstandrelatie op twee plaatsen langs de Grensmaas zoals afgeleid uit de WAQUA simulaties	74
Figuur 6.14	"Zandbanen"over de vaste laag van St. Andries	79
Figuur 7.1	Verskil in actuele schuifspanningen (EP – EPP) voor de locatie Itteren	87
Figuur 7.2	Verskil in actuele schuifspanningen (EP – EPP) voor de locatie Meers.....	87
Figuur 7.3	Verskil in actuele schuifspanningen (EP – EPM) voor de locatie Itteren.....	89
Figuur 7.4	Verskil in actuele schuifspanningen (EP – EPM) voor de locatie Meers	89
Figuur 8.1	Verlaging 1/250 jaar waterstanden bij uitvoering van MMA in vergelijking met EP98	
Figuur 8.2	Vergelijking afname slibgehalte MMA en NA	98

Figuur 9.1	Vergelijking van MMA en EPVL met EP ten aanzien van de verlaging van de waterstanden tijdens de 1:250 jaar afvoer.....	106
------------	--	-----

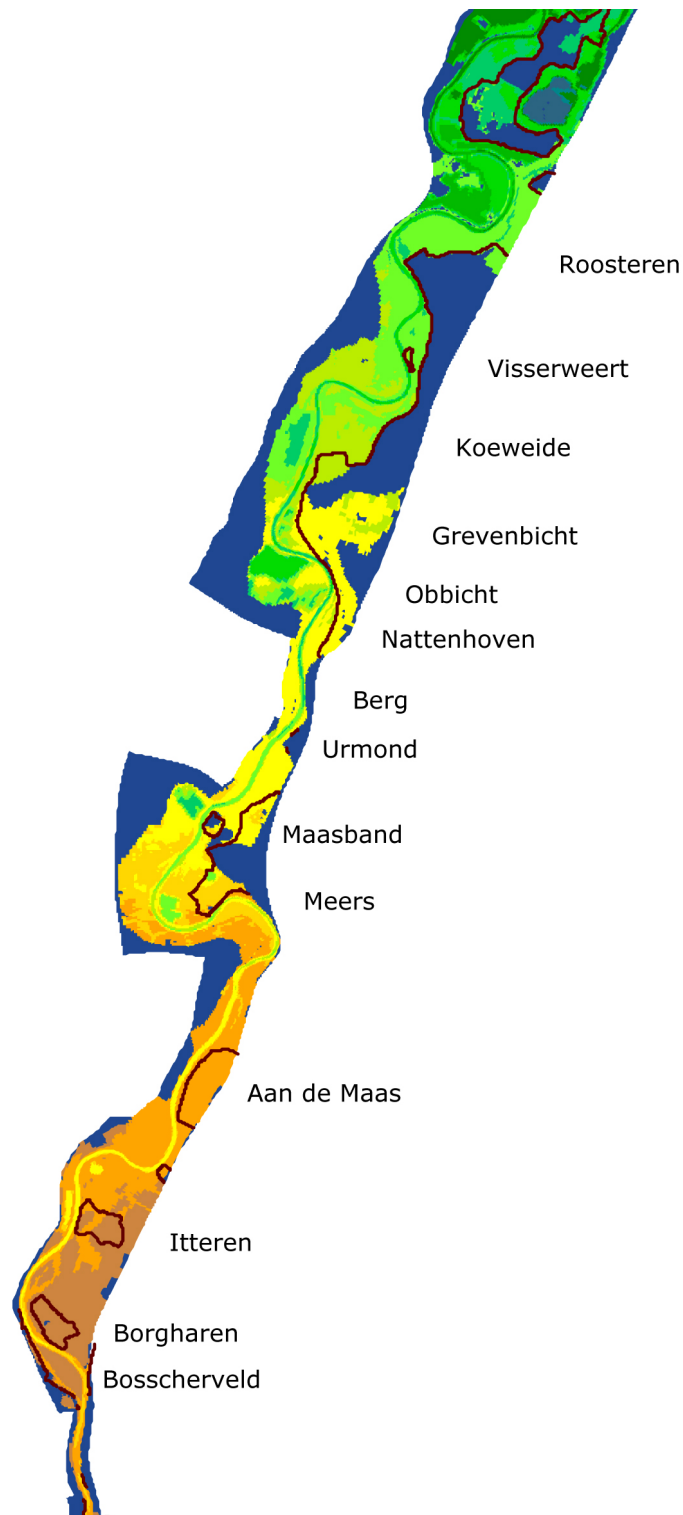
Bijlagen

Bijlage A: verandering schuifspanningen EP ten opzichte van NA (mobiele condities)

Bijlage B: verandering schuifspanningen MMA ten opzichte van NA (mobiele condities)

Bijlage C: verandering schuifspanningen EPVL ten opzichte van NA (mobiele condities)

1 Inleiding



Figuur 1.1 Overzicht Grensmaasgebied

1.1 Algemeen

Voor u ligt het achtergronddocument 2.1 van het hoofdrapport MER Grensmaas 2003. 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 voor de door kades beschermde gebiedsdelen, te bereiken in uiterlijk 2017;
- 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 niet 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 jaar 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 achtergronddocument is een rapportage van het 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.

Het voorliggende achtergronddocument 2.1 betreft een bureaustudie van de morfologische effecten van het Plan Grensmaas en een aantal varianten. De omschrijving van dit onderzoek is opgenomen in de Projectbeschrijving voor het Rivierkundig Onderzoek, d.d. juli 2002, aangevuld met een aantal onderwerpen betreffende de morfologie dat tijdens het Rivierkundig Onderzoek naar voren is gekomen.

Voorafgaande aan de morfologische bureaustudie is een hydraulisch onderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek betrof de veranderingen in de waterbeweging (waterstanden, stroomsnelheden, afvoeren) als gevolg van de verschillende plannen en is uitgevoerd met behulp van het WAQUA

model van de Grensmaas en Zandmaas. Dit hydraulisch onderzoek is gerapporteerd in het 'Achtergronddocument 1 - Rivierkunde'.

Parallel aan de voorliggende morfologische bureaustudie is er een morfologisch modelonderzoek uitgevoerd met het model "SOBEK-graded", een 1-dimensionaal morfologisch model waarin gegradeerd sedimenttransport wordt gereproduceerd. Vanwege een opgelopen vertraging in de uitvoering van dit morfologische modelonderzoek en de noodzaak het MER tijdig op te leveren is besloten de morfologische bureaustudie uit te voeren en op te leveren voordat de resultaten van het SOBEK-graded model beschikbaar zijn. Aldus is het mogelijk om tijdig een beoordeling van de morfologische gevolgen van de voorgenomen plannen te geven. Dit betekent ook dat, in zekere zin, de resultaten van deze bureaustudie als een voorschot kunnen worden beschouwd op het morfologische modelonderzoek met SOBEK-graded.

Dit rapport is geschreven door een projectteam bestaande uit ir. G.J. Akkerman, ir. W.B.G. Bijman, M.A. van Heereveld (MSc Eng) en dr. ir. E.B. Peerbolte (projectleiding) van Royal Haskoning. Als extern deskundige van Royal Haskoning heeft verder ir. G.J. Klaassen bijgedragen aan het onderzoek en de rapportage.

Van de zijde van de opdrachtgever werd de begeleiding verzorgd door ir. H. D. Duizendstra en ir. J.H.A. Wijbenga.

1.2 Probleemschets

De doelstellingen van het Grensmaasplan zijn (Eindplan¹ Grensmaas, opgesteld door de Provincie Limburg, 21 december 2001):

1. Verlaging van het Maatgevende Hoogwater (MHW);

Het door rivierverruiming verlagen van de hoogwaterstanden in de Maas, met als maatstaf dat uiterlijk in 2017 de gebieden die door de op basis van de Deltawet Grote Rivieren aangelegde kaden zijn beschermd, een kans op overstroming hebben van 1:250 jaar.

2. Natuurontwikkeling ;

Het, in de periode tot 2018, tot ontwikkeling brengen van tenminste 1000 ha natuur binnen het Grensmaasgebied. Deze natuurontwikkeling is gekoppeld aan het ecologisch herstel van de rivier, zoals vastgelegd in de intentieverklaring voor de inrichting van het Maasdal in Limburg van 26 november 1992.

3. Grindwinning;

Het winnen van 35 miljoen ton grind voor de nationale behoefte (provinciale taakstelling).

¹ In het vervolg ook aangeduid met EP

Aan deze doelstellingen wordt tegemoetgekomen door het uitvoeren van rivierverruiming op locaties die daarvoor aangewezen zijn in de vorm van stroomgeulverbreding en weerdverlaging.

Bij de morfologische effecten zijn twee hoofdaspecten van belang:

- Te verwachten veranderingen in de morfodynamiek van de Grensmaas. De morfodynamiek (zie begrippenlijst) geeft een belangrijke indicatie voor de ecologische waarde en de natuurwaarde van het Plan Grensmaas. Dit aspect heeft een nauwe relatie met invullen van de tweede doelstelling van het Plan Grensmaas;
- Te verwachten veranderingen in de risico's voor rivierbedding, oevers, kaden en andere infrastructuur door toename van de stroomsnelheden na de uitvoering van het Plan Grensmaas; met nadruk wordt gesteld dat hier alleen de risico's van instabiliteit van de bedding en oevers wordt beschouwd tegen de achtergrond van de instandhouding van de kaden. De instandhouding van overige infrastructuur (leidingen, brugpeilers en dergelijke) wordt weinig of niet beïnvloed door de m.e.r. alternatieven; de standzekerheid van deze werken dient te allen tijde te worden gegarandeerd door een adequate verdediging tegen stroomaanval.

Deze morfologische aspecten moeten worden gezien tegen de achtergrond van de ontwikkelingen die zich de laatste eeuwen in de Grensmaas hebben voorgedaan. Het meest opvallend is daarbij dat de Grensmaas zich in de loop der tijd dieper in het laagwaterbed heeft ingesneden, deels door grindwinning, deels door rivierkundige reguleringswerken en deels door opslibbing van de weerden. Door de uitvoering van de rivierverruimingswerken (wat over het grootste deel van de Grensmaas plaatsvindt) wordt deels teruggegaan naar de oude situatie, waarin er een minder geprononceerde overgang was tussen de laag- en hoogwaterbedding. De stroomsnelheden zullen in de verruimingslocaties aanzienlijk afnemen en er zal daar meer afzetting van sediment plaatsvinden. Dit leidt tot een toename van de morfodynamiek in de Grensmaas. De tussenliggende, nauwere gebieden vormen flessenhalzen en de stroming wordt daar verder versterkt door het toegenomen verhang: op die plaatsen zal de rivier de neiging vertonen zich dieper in te gaan snijden in het laagwaterbed en zal ook de aanval op de oevers toenemen. Op een aantal plaatsen is dit zeer wel mogelijk omdat het (onderliggend) beddingmateriaal uit overwegend fijn tertiair zand bestaat. Deze erosie zou de thans aangelegde hoogwaterkaden en andere infrastructuur kunnen bedreigen

1.3 Doel

In verband met de belangrijke wijzigingen van het Plan Grensmaas ten opzichte van de VKA'98, moet voor de besluitvorming een nieuw MER Grensmaas opgesteld worden. Op basis van het MER kunnen betrokkenen voorjaar 2003 gefundeerd reageren op het Ontwerp-POL (Provinciaal Omgevingsplan Limburg) Grensmaas. Het voorliggende Achtergronddocument 2.1 – Morfologie - bureaustudie heeft tot doel inzicht te geven in een aantal morfologische effecten van het Plan Grensmaas ten behoeve van het MER.

1.4 Het studiegebied

Het plangebied van de Grensmaas loopt overeenkomstig de karakterisering van de Provincie Limburg (21 december 2001) van rkm 15 (nabij de stuw Borgharen) tot rkm 55 (Roosteren). Binnen dit gebied bevinden zich de 12 verruimingslocaties. Boven- en benedenstrooms van dit

plangebied zijn echter ook effecten te verwachten. Bovenstrooms kunnen hydraulische effecten optreden in de vorm van verandering van waterstanden, benedenstrooms in de vorm van wijzigingen van het afvoerverloop, van doorvoer van grind, zand en slib en van verandering van bodemligging. In dit onderzoek wordt alleen aangegeven wat de mogelijke effecten zijn op de grenzen van het plangebied.

Het onderhavige onderzoek richt zich op de volgende verkenningen van het Plan Grensmaas:

- Nul-Alternatief (NA)
- Eindplan (EP)
- Eindplan + 0,5m (afgekort EPP)
- Eindplan – 0,5m (afgekort EPM)
- Meest Milieuvriendelijke Alternatief (afgekort MMA)
- EP inclusief Vlaamse Boertien Locaties (afgekort EPVL)

De studie is in eerste instantie gericht geweest op het EP, welke met het NA wordt vergeleken. De varianten op het EP, het EPP en het EPM zijn alleen t.o.v. het EP vergeleken, omdat de afwijkingen en daarmee de morfologische effecten t.o.v. het EP niet groot zijn.

Bij het EP, het EPP en het EPM wordt géén rekening gehouden met de uitvoering van Vlaamse ingrepen, zoals de drie Boertien-locaties Hochter Bampd, Herbricht en Kotem.

Bij het MMA zijn deze drie Vlaamse locaties wél uitgevoerd, evenals bij het EPVL. Deze inrichtingsalternatieven wijken sterker af van het EP en worden met het NA vergeleken. Voor meer informatie over de uitvoering van de verruimingslocaties in de verschillende alternatieven en varianten wordt verwezen naar het hoofdrapport van het MER [De Maaswerken, 2003].

Het NA is dus een belangrijke referentie voor het in kaart brengen van de morfologische effecten van de plannen. Het NA is gedefinieerd als het geval waarbij het Plan Grensmaas niet wordt uitgevoerd en wordt beschreven in termen van de huidige morfologische karakteristiek van de Grensmaas en de te verwachten morfologische ontwikkelingen - als het Plan Grensmaas niet wordt uitgevoerd.

1.5 Methodiek

Het voorliggende onderzoek is voor een groot deel gebaseerd op de berekende waterbeweging, inclusief de belangrijkste beken en onttrekkingen (Julianakanaal, Zuid-Willemsvaart) en lozingspunten (DSM). Deze resultaten zijn gerapporteerd in [Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek, 2003a]. Daarnaast diende het vorige MER (MER Grensmaas1 1998) als belangrijke referentie voor het onderzoek.

De voorliggende morfologische bureaustudie moet in samenhang worden gezien met het hiervoor genoemde morfologische modelonderzoek. Terwijl in het onderhavige onderzoek de nadruk ligt op initiële veranderingen die zijn te verwachten na de uitvoering van het Plan Grensmaas, richt het modelonderzoek met SOBEK-graded zich meer op het (lange termijn) tijdsverloop van morfologische veranderingen. De studies moeten dan ook vooral gezien worden als een wederzijdse aanvulling. In het volgende hoofdstuk wordt hier verder op ingegaan.

Figuur 1.2 Overzicht Grensmaasgebied

1.6 Relaties met andere deelonderzoeken

Het morfologisch onderzoek vormt een belangrijk deel van de m.e.r. Grensmaas. Het dient inzicht te verschaffen in de risico's die voortvloeien uit mogelijk sterke morfologische veranderingen, zowel op korte als lange termijn. Verder zijn de resultaten van het morfologisch onderzoek van belang voor een aantal andere deelonderzoeken, namelijk onderzoek naar de invloed op het grondwater, de waterkwaliteit en het ecologische systeem.

In het rivierkundige onderzoek staat het onderzoek naar de invloed (van de plannen) op de waterbeweging (waterstanden, stroomsnelheden, stroombeelden) centraal. Immers de waterbeweging is de aandrijvende kracht voor morfologische veranderingen. Dit onderzoek is afzonderlijk gerapporteerd en vormt een belangrijk basiselement van de voorliggende morfologische studie. Omgekeerd zal de morfologische ontwikkeling op de lange termijn ook weer weerslag hebben op de waterbeweging. en geeft de morfologische ontwikkeling een belangrijk indicatie voor de effecten op Landschap en Ecologie.

1.7 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

In het volgende hoofdstuk wordt de gevolgde methodiek aangegeven. Vervolgens wordt de huidige morfologische toestand en de autonome ontwikkeling, dus de ontwikkeling wanneer het Plan Grensmaas niet wordt uitgevoerd, beschreven in respectievelijk de hoofdstukken 3 en 4. Deze beschrijvingen in feite zijn een invulling van het Nulalternatief (NA).

In Hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de vraag in hoeverre de resultaten van het morfologisch onderzoek in het kader van het MER '98 bruikbaar zijn. Hiertoe wordt een vergelijking gemaakt tussen het Eindplan (EP) en de eerder bestudeerde Voorkeursaanpak (VKA). Bovendien wordt in Hoofdstuk 5 ingegaan op nieuwe kennis en inzichten sinds 1998.

In de hoofdstukken 6 t/m 9 worden de morfologische effecten behandeld van de onderscheiden alternatieven, respectievelijk het Eindplan (EP) in Hoofdstuk 6, het EP+0,5m (EPP) en het EP-0,5m (EPM) in Hoofdstuk 7, en het MMA en EPVL in de hoofdstukken 8 en 9. Hierbij worden de effecten van het EP in kaart gebracht t.o.v. het NA. Het EEP en EPM, zijnde beperkte modificaties van het EP, worden vergeleken met het EP. Het MMA en het EPVL, tenslotte, worden vergeleken met het NA.

De conclusies van het onderhavige onderzoek worden samengevat in Hoofdstuk 10. Daarna wordt in Hoofdstuk 11, ingegaan op deesignaleerde leemtes in kennis en wordt in globale termen een suggestie gedaan voor een monitoring programma.

Een schematische weergave van de opbouw van dit rapport is weergegeven in onderstaande tabel:

Tabel 1.1 Opbouw Morfologische Bureaustudie

Onderdeel Studie:	Inhoud:	Wordt beschreven in hoofdstuk:
Inleidend gedeelte	Doel van de studie, probleemanalyse, onderzoekspunten en plan van aanpak	1: Inleiding 2: Methodiek en gegevensbronnen
In kaart brengen van referentiekader / vertrekpunt studie	Beschrijving huidige situatie Grensmaas, autonome ontwikkeling en uitleg over verschillende morfologische processen	3: Huidige morfologische toestand van de Grensmaas 4: Autonome morfologische ontwikkeling van het Riviersysteem (NA)
Nuancering conclusies MER 1998 voor accentbepaling onderzoek	Onderzoek bruikbaarheid MER '98 door vergelijking van EP en VKA, analyse van voortschrijdend morfologisch inzicht. Beide geven eenrichting aan voor vervolganalysen.	5: Accentbepaling morfologisch onderzoek
Beoordeling van de morfologische effecten	Beoordeling van de morfologische effecten voor de verschillende alternatieven en varianten	6: Inschatting Morfologische effecten EP 7: Inschatting Morfologische effecten EPP en EPM 8: Inschatting Morfologische effecten MMA 9: Inschatting Morfologische effecten EPVL
Conclusies		10: Conclusies
Kennisleemtes en monitoring	Samenvatting van gesignaleerde ontbrekende kennis en gegevens en ideeën voor monitoring	11: Kennisleemtes en monitoring

2 Methodiek

2.1 Afbakening

Om een duurzaam beheer te kunnen ontwikkelen voor de Grensmaas is het van belang de langetermijneffecten van de voorgestelde ingrepen te analyseren. Hiervoor is kennis van het morfologische systeem onontbeerlijk. Morfologische ontwikkelingen worden zichtbaar door veranderingen in de geometrie van de rivier en in de materiaalsamenstelling van bedding, oevers en weerden. Deze veranderingen treden op door erosie- en sedimentatieprocessen en de vorming of het verdwijnen van zand- en grindbanken. De loop van het laagwaterbed kan zich hierdoor wijzigen en oevers kunnen inscharen of uitbouwen. Hierdoor kan ook de thalweg, de verbindinglijn tussen de diepste punten in de rivier, zich wijzigen, met name bij de vorming van een nieuwe hoofdgeul. Dit is van belang omdat de thalweg de grens vormt tussen Limburg en België (Vlaanderen).

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 "afpleisteringslaag" ontstaat doordat het fijnere materiaal door de stroom is getransporteerd. De grotere stenen of keien blijven liggen en pleisteren als het ware de onderliggende bodem af. Deze afpleisteringslagen werken vertragend op morfologische veranderingen.

Met name tijdens hoogwaters met hoge afvoeren en stroomsnelheden treden toch morfologische veranderingen op. Omdat de bedding van de Grensmaas is afgepleisterd met een grove laag is er dan sprake van een overcapaciteit aan sedimenttransport: de rivier zou veel meer sediment kunnen transporteren dan direct op de bodem beschikbaar. Het gevolg is dat er bij voldoende grote stroomsnelheden relatief fijn materiaal van onder de afpleisteringslaag wordt opgenomen.

Na een hoogwater zal een deel van dit sediment zich nog in de Grensmaas bevinden en op de bodem worden afgezet. Dit relatief fijne sediment zal zich ook na het hoogwater bij lagere afvoeren (denk aan afvoeren tussen de 300 en 1000 m³/s) door de rivier verplaatsen, namelijk in die trajecten waar er dan nog voldoende transportcapaciteit aanwezig is. Hierdoor treden veranderingen op in het zomerbed, over bepaalde trajecten van de Grensmaas, namelijk daar waar sprake is van voldoende transportcapaciteit en veranderingen in transportcapaciteit ("transportgradiënten"). Bij afvoeren onder de 300 m³/s vindt er hoegenaamd geen sedimenttransport meer plaats.

De Grensmaas plannen zijn zodanig ontworpen dat deze "laagwater dynamiek" zoveel mogelijk wordt bevorderd om een natuurlijk en levendig rivierbeeld te bewerkstelligen. Lokaal kan bij lage afvoer bijvoorbeeld een zeer dynamisch beeld ontstaan wanneer sterk veranderende beddingvormen en banken superkritische stroming veroorzaken. Deze verschijnselen zijn kleinschaliger van aard dan de hierboven genoemde veranderingen gedurende hoogwaters.

De voorliggende morfologische bureaustudie richt zich met name op de eerstgenoemde groot-schalige verschijnselen bij hoogwater, de daaruit voortvloeiende risico's en de maatregelen die bij sterke bodem- en oevererosie genomen moeten worden. Daarbij wordt uitsluitend de initiële situatie na gereedkomen van de werken in beschouwing genomen; de effecten van de lang-

termijn ontwikkelingen (bodem- en oeverligging, sedimenttransporten) worden in deze bureau-studie niet meegenomen.

Ten aanzien van risico's van bodem- en oevererosie gaat het hier uitsluitend om de instandhouding van de kaden en dijken. De instandhouding van overige infrastructuur (leidingen, brugpeilers en dergelijke) wordt weinig of niet beïnvloed door de m.e.r. alternatieven; de standzekerheid van deze werken dient te allen tijde te worden gegarandeerd door een adequate verdediging tegen stroomaanval.

2.2 Stappen van onderzoek

Het onderzoek heeft zich gericht op de volgende aspecten:

- veranderingen in de morfodynamiek;
- veranderingen van de thalweg;
- slibhuishouding (aanslibbing, doorvoer);
- veranderingen in zijbeken;
- risico's tengevolge van bodem- en oevererosie en maatregelen;
- morfologische effecten direct na uitvoering en de invloed van de volgorde van uitvoering van de plannen.

Het onderzoek is een bureaustudie op basis van de eerder uitgevoerde m.e.r. van de Voorkeursaanpak (VKA) en de hydraulische berekeningen in het kader van de huidige m.e.r. Het onderzoek heeft zowel kwantitatieve als kwalitatieve uitkomsten. Waterbeweging en de daaruit voortvloeiende schuifspanningen kunnen in kwantitatieve termen worden beschreven. De vertaalslag naar transporten, transportgradiënten en morfologische effecten is sterk kwalitatief van aard. De gevolgde aanpak is als volgt:

1. Analyse huidige toestand en relevante morfologische processen:

Eerste stap in het onderzoek is het in kaart brengen van de huidige morfologie van de Grensmaas, dat wil zeggen de huidige situatie en de verwachte ontwikkelingen indien het Plan Grensmaas niet wordt uitgevoerd ("Nulalternatief" of NA). Dit dient als vertrekpunt en referentie voor het in kaart brengen van de morfologische effecten van de verschillende plannen.

2. Bruikbaarheid resultaten MER 1998

Belangrijk voor dit onderzoek is in hoeverre, gezien de verschillen tussen de plannen van toen en nu, de resultaten van het rivierkundig onderzoek in het kader van de m.e.r. 1998 bruikbaar zijn. Daar bij komt dat er sinds 1998 sprake is van voortschrijdend inzicht en dat eerdere inzichten en bevindingen tot op zekere hoogte genuanceerd moeten worden. Dit is een belangrijk onderdeel van de studie en vindt ten eerste plaats op basis van een uitgebreide vergelijking het Eindplan (EP) en het Voorkeursalternatief van 1998. Daarnaast wordt het voortschrijdend morfologisch onderzoek in kaart gebracht. Op basis hiervan wordt vastgesteld welke accenten moeten worden gelegd bij het verdere onderzoek.

3. Morfologische effecten

De WAQUA berekeningsuitkomsten, gerapporteerd in het Achtergronddocument 1 – Rivierkunde [Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek, 2003a], vormen de basis voor de analyse

van de morfologische effecten van de plannen. Door middel van GIS-bewerkingen worden deze uitkosten omgewerkt naar voor de morfologische analyse bruikbare kaarten. Ter illustratie zijn voor een aantal kenmerkende locaties gedeeltes van deze kaarten weergegeven in de lopende tekst. Het basismateriaal voor de beoordeling van de morfologische effecten bestaat uit kaarten van de overschrijding van de kritische schuifspanning voor de onderzochte alternatieven ten opzichte van het NA of EP. Deze kaarten zijn weergegeven in de bijlagen B, C en D.

Het EP, MMA en EPVL zijn vergeleken met het Nulalternatief (NA). Voor het Eindplan+0,5 m (EPP) en het Eindplan-0,5 m (EPM) is het EP als referentie gebruikt. De afwijkingen van deze varianten met het EP blijken qua waterbeweging te beperkt om zinvol te kunnen vergelijken met het NA.

Opgemerkt wordt dat in het WAQUA-model extra ruwheid is aangebracht ter hoogte van verschillende flessenhalzen om mogelijk aanwezige bodemverdedigingen (bovenstrooms van Itteren, van Aan de Maas, van Meers, van Nattenhoven en van Grevenbicht) te simuleren. Voor het doel van het onderhavig onderzoek is dit een acceptabele werkwijze.. Het zal overigens blijken dat, afhankelijk van de onderzochte alternatieven, er over andere lengtes en soms op andere plaatsen bodemverdediging benodigd is. De totale lengte is daarbij aanzienlijk kleiner dan toegepast in het WAQUA model. In feite zou, in een meer gedetailleerd ontwerpproces, terugkoppeling moeten plaatsvinden op de ruwheid van het WAQUA-model en zouden nieuwe berekeningen met het model moeten worden gemaakt. In het huidige onderzoek is een dergelijke terugkoppeling niet nodig vanwege het indicatieve karakter van de bepaling van de benodigde verdedigingen.

Omdat de ruwheid van de bodemverdedigingen in het WAQUA-model groter is dan die van de onverdedigde laagwaterbedding, en bovendien de lengte van de toegepaste bodemverdedigingen aan de ruime kant lijkt, zijn de (in het WAQUA-model) resulterende stroomsnelheden in de flessenhalzen onderschat. Dat betekent dat de in dit onderzoek geschatte bodemverdediging ook wordt onderschat en dus aan de onveilige kant is (voor de waterstanden geldt het omgekeerde: vanwege de in het model aangenomen bodemverdedigingen zijn deze aan de veilige (hoge) kant). Dit punt dient bij een verder detailontwerp van de bodemverdediging te worden meegenomen.

Een andere vereenvoudiging van de werkelijkheid is dat bij de bepaling van de morfodynamiek, thalwegverplaatsing en benodigde verdediging is uitgegaan van de huidige bodem (zoals in WAQUA geschematiseerd), waarbij verder is verondersteld dat de afpleisteringslaag (weer) aanwezig is. Dit laatste zal direct na uitvoering van de werken niet het geval zijn (er is dan onafgedekt toutvenant aanwezig), waardoor lokaal sterke sedimentatie en erosie kan optreden totdat de bodem weer is afgepleisterd. Dit laatste is feitelijk de in dit onderzoek geanalyseerde situatie, mits de bodemveranderingen beperkt zijn gebleven. Of dit ook daadwerkelijk het geval is dient door regelmatige metingen "monitoring" te worden vastgesteld.

2.3 Gebruikte gegevens

De gebruikte gegevens kunnen worden onderscheiden in de documenten bij de offerteaanvraag, de beschikbare resultaten van dit rivierkundig onderzoek, het MER 1998 [De Maaswerken, 1998] en overige referenties.

Offerteaanvraag en verdere projectgerelateerde informatie

Basis voor dit MER is de offerteaanvraag, waarbij een uitgebreide projectbeschrijving was gevoegd ten aanzien van het benodigde Rivierkundig onderzoek, het Projectplan [De Maaswerken, 2002].

Basisinformatie over de inrichting van het Eindplan Grensmaas is vermeld in een beschrijving van de locaties door De Maaswerken en Provincie Limburg [2001]. Ten aanzien van het beoordelen van vereiste maatregelen tegen bodem- en oevererosie is gebruik gemaakt van de eerder voor de Maaswerken ontwikkelde methodiek [Royal Haskoning, 2001].

Thans beschikbare resultaten van het voorliggende MER

In hoofdzaak gaat het hierbij om de WAQUA-resultaten [Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek, 2003a] zoals die in het kader van het hydraulisch onderzoek voor de huidige m.e.r. zijn verkregen. Bij deze studie is ook de analyse van de bodemopbouw door TNO-NITG gebruikt [TNO, 2002].

MER 1998

Bij het huidige onderzoek is ook het deelrapport Rivierkunde van het eerdere MER Grensmaas van 1998 betrokken [De Maaswerken, 1998]. Dit geldt ook voor de achterliggende technische rapporten TR1-2 (Sedimentologie van de Grensmaas), TR 1-3 (Sediment transport in de Grensmaas) en TR 1-4 (Morfologische en hydraulische beschouwingen). Ook de technische rapporten met betrekking tot de slibmodellering met DELWAQ (TR 5-1 en TR 5-2) zijn geanalyseerd.

Aan de Grensmaas zijn vele studies gewijd en van de huidige morfologische toestand is vrij veel bekend. De kennis van voor 1998 is geconsolideerd in bovengenoemde m.e.r.-studie. Aan de andere kant is de morfodynamiek van de Grensmaas complex en wordt de kennis hierover geleidelijk aan verrijkt met nieuwe inzichten. Echter morfologische voorspellingen voor de lange termijn op het niveau van de locaties van de ingrepen in de Grensmaas blijven vooralsnog kwalitatief van aard.

Overige Referenties

De overige referenties van dit onderzoek zijn weergegeven in de referentielijst.

2.4 Betrouwbaarheid

De morfologische analyse van dit onderzoek is, zoals eerder aangegeven, gebaseerd op WAQUA-berekeningen van de plannen, gecombineerd met de resultaten van het eerdere m.e.r. onderzoek en het huidige begrip van het fysische systeem. Bij het toepassen van de uitkomsten van de WAQUA-berekeningen ten behoeve van voorspelling van morfodynamiek, thalwegligging en risicogebieden wordt een vertaalslag gemaakt aan de hand van 'bovenkritische' schuifspanningen. Ten aanzien van de WAQUA-berekeningen gelden enkele beperkingen, zoals in paragraaf 2.2 aangegeven; dit heeft ook invloed op de betrouwbaarheid van de uitkomsten: mede hierdoor zijn de geschatte bodem- en oeververdedigingen indicatief.

Het systeem Grensmaas is complex vanwege:

- Grote variabiliteit in het bodemmateriaal, zowel ruimtelijk als in de tijd alsook qua gradatie;

- Veranderingen in het natuurlijke systeem als gevolg van regulering en grindwinning die nog steeds in het systeem doorwerken; sterke ongelijke vergraving bij het Grensmaasplan, waardoor de variatie in stroomsnelheden langs de rivier verder toeneemt: afwisseling van flessenhalzen en stroomluwe gebieden;
- De moeilijk voorspelbare ontwikkeling van vegetatie en de invloed daarvan op hydraulica en morfologie;
- Het onzekere toekomstige afvoerverloop van de rivier met mogelijke trendbreuk als gevolg van klimaatverandering.

De uitkomst van een dergelijke morfologische analyse is allereerst kwalitatief en indicatief van aard. Dit heeft vooral betrekking op de aard van de morfodynamiek langs de rivier, het ontstaan van banken en geulen en de slibhuishouding.

Daarnaast zijn er ook meer kwantitatieve uitkomsten afgeleid die van belang zijn voor het verdere vervolg van het project. Gebiedsarealen met toegenomen morfodynamiek, een indicatie van trajecten waar erosiemaatregelen moeten worden genomen met een schatting van de vereiste steengewichten zijn zeker kwantitatieve uitkomsten die redelijk betrouwbaar zijn.

Zoals hiervoor is aangegeven wordt de grootschalige morfologie gesimuleerd met een 1D morfologisch model (SOBEK-graded). Beide studies hebben hun eigen waarde en beperkingen:

- De voorliggende morfologische bureaustudie gaat uit van de huidige kennis en beschouwt de initiële veranderingen aan de hand van gewijzigde stroompatronen;
- Het SOBEK-graded model biedt wel de mogelijkheid een 'doorkijk' te maken naar de morfologische ontwikkelingen op langere termijn. De modellering met SOBEK-graded is echter gebaseerd op een 1-dimensionale berekeningsmethodiek hetgeen een sterk vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid is. Het schematiseren van de bodem in meerdere lagen en het reproduceren van selectief materiaaltransport zoals dat in SOBEK-graded gebeurt is complex en tot op zekere hoogte hypothetisch vanwege ontbrekende gegevens en de hoeveelheid aannames die moeten worden gedaan.

De uitkomsten van SOBEK kunnen op grote schaal een verdere kwantitatieve invulling geven van de morfologische voorspellingen in de tijd. Op detail niveau (op het niveau van de locaties) met een veelal sterk 2-dimensionaal patroon biedt een dergelijke aanpak echter geen perspectief als het gaat om verdere kwantitatieve invulling. Voorbeeld is het in SOBEK-graded "opleggen" van een extra tak ter plaatse van een rivierbedverruiming terwijl idealiter het ontstaan van een dergelijke tak de uitkomst zou moeten zijn van het morfologische model.

De morfologische voorspellingen die resulteren uit dit onderzoek dienen in de toekomst te worden gestaafd en eventueel bijgesteld door middel van een adequate monitoring van de ontwikkelingen. Het hiermee te bereiken voortschrijdende inzicht, ook op detailniveau, is van belang voor de verdere uitvoering van de werken en voor het beheer van de Grensmaas. Dit geldt ook voor monitoring van de proefprojecten (Roosteren en Meers) en de uitvoering van de eerste grootschalige verruimingslocaties. Wat betreft het beheer is vooral het vegetatiebeheer van belang (bijhouden houtopslag, klinkhout, al dan niet kort houden van vegetaties); dit dient te worden afgestemd op de morfologische ontwikkelingen en de daarmee verband houdende toelaatbare ruwheden.

3 Huidige morfologische toestand

3.1 Algemeen

Voor het verkrijgen van een beeld van de morfologische effecten van geselecteerde varianten van het plan Grensmaas is een goede beschrijving van de huidige morfologie toestand en de autonome ontwikkeling van groot belang (nulalternatief – NA). Immers het NA dient als referentiekader voor deze effecten. De autonome ontwikkeling wordt deels in beeld gebracht in het onderhavige morfologische bureauonderzoek, waarin vooral de korte termijn effecten worden beoordeeld en deels met het modelonderzoek met SOBEK-graded, dat vooral een kwantitatieve voorspelling beoogt te geven van de grootschalige lange termijn ontwikkeling.

In paragraaf 2.1 zijn een aantal belangrijke aspecten genoemd van de morfologie van de Grensmaas:

- geometrie, erosie en sedimentatie;
- de afpleisteringslaag en het beddingmateriaal;
- de ligging van de thalweg
- de algehele morfodynamiek (mate van beweeglijkheid van bedding en oevers);

Het Plan Grensmaas is van invloed op deze aspecten. Zoals hierboven aangegeven zullen dus de effecten van het Plan Grensmaas worden afgezet tegen de morfologische ontwikkelingen die bij het NA worden verwacht.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op enkele globale kenmerken van de Grensmaas, het beddingmateriaal, het sedimenttransport, de morfologische tijdschaal, en transport van slib. Dit wordt vooraf gegaan door een korte beschouwing over menselijk ingrijpen in de Maas en haar stroomgebied

3.2 Menselijk ingrijpen

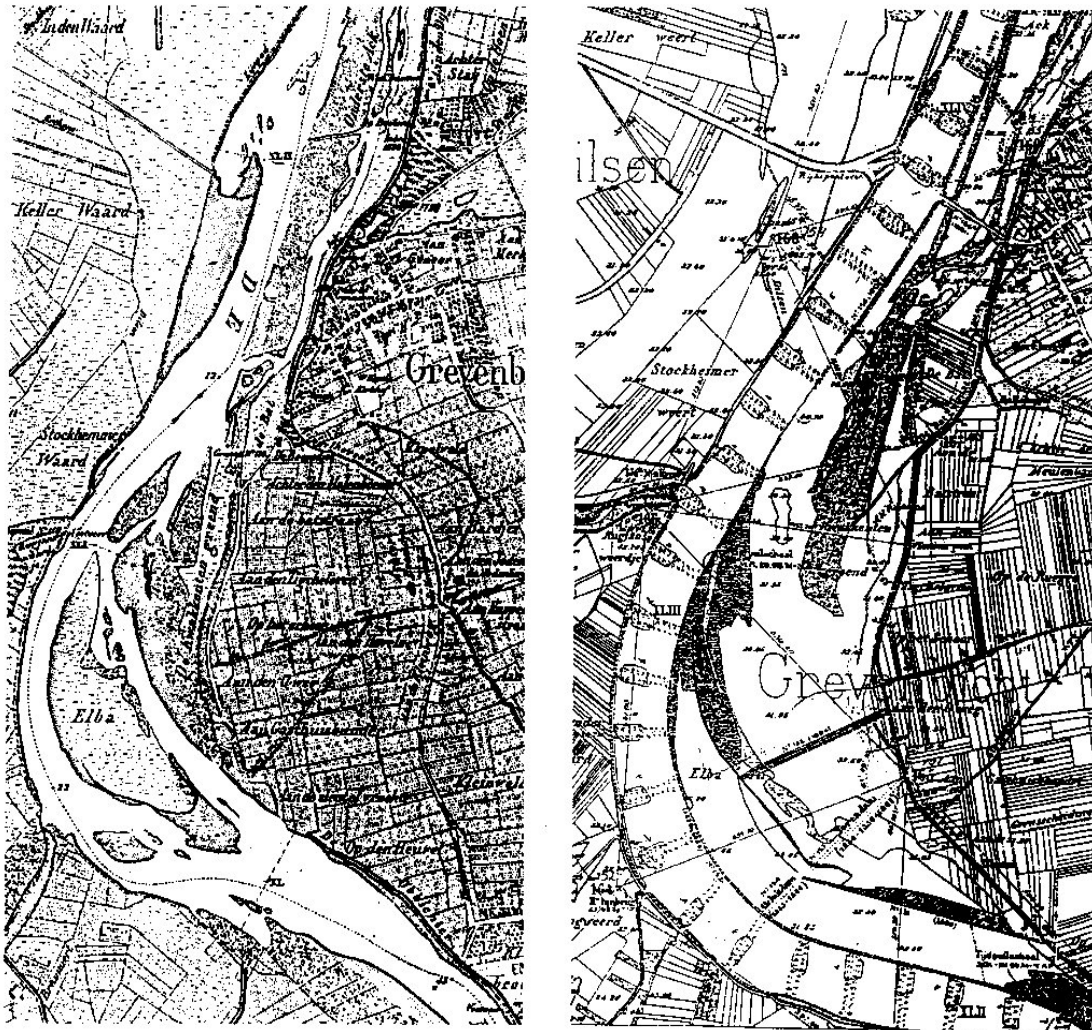
De Maas is op velerlei manieren en al heel lang beïnvloed door menselijk handelen. De effecten van dit menselijk handelen zijn zich nog steeds aan het ontwikkelen, omdat de Maas morfologisch gezien een zeer langzame rivier is. In paragraaf 3.10 wordt daar nog meer in detail op ingegaan, maar de morfologische tijdsschaal van de Maas is veel groter dan van de Rijn, die overigens al reeds als een langzaam reagerende rivier wordt beschouwd [de Vries, 1975].

Een kort overzicht van ontwikkelingen die in het verleden hebben plaatsgehad en die vanwege de grote morfologische tijdschaal nog steeds en nog lang van invloed zullen zijn op de Maas, is gegeven in Tabel 3.1. Voor dit overzicht is gebruik gemaakt van Breukel et al (1992), Micha & Borlee (1998) en andere bronnen.

Tabel 3.1 Menselijke ingrepen

Menselijke activiteit	Specifieke maatregelen
Landbouw	• Wijzigingen in landgebruik en kappen van bossen (sinds 11de eeuw) • Verwijdering van weerdbossen en overgang naar grasland • Land aanwinning in de rivier door kleinschalige rivierwerken (vanaf 15^{de} eeuw)
Huisvesting	• Ontwikkeling van steden en dorpen in de weerden met afname van hoogwaterberging (sinds 13^{de} eeuw) • Toenemende urbanisatie en betere drainage (19^{de} en 20^{ste} eeuw)
Watervoorziening en energieproductie	• Bouw van 9 reservoirs in België (zie Ministry of Public Works, 1985) • Laag-verval waterkrachtcentrales in België en Nederland (20^{ste} eeuw) • Water afleidingen (voor Antwerpen, Brussel, Rotterdam enz.) (20^{ste} eeuw)
Scheepvaart	• Bouw van stuwen in Frankrijk, België en Nederland (19^{de} en 20^{ste} eeuw) • Versmalling zomerbed (2^{de} helft 19^{de} eeuw) • Bouw van parallelkanalen (20^{ste} eeuw) • Verdiepen Maas bovenstrooms van Namen
Hoogwaterbescherming	• Dijken langs benedenstrooms deel van Maas (vanaf 13^{de} eeuw) • Nieuwe monding van de Maas (1904) • Bochtafsnijdingen in de Maas benedenstrooms van Grave • Afsluiting van groene rivier (Beerse overlaat) (na 1926) • Kaden rond aantal dorpen en stadjes (20^{ste} eeuw)
Levering bouwmaterialen	• Zand- en grindwinning vanuit het zomerbed (20^{ste} eeuw) • Zand- en grindwinning vanuit diepe putten in de weerd (20^{ste} eeuw) • Ontkleiing voor steenproductie • Diepe kolenwinning, hetgeen geleid heeft tot mijnzakkingen
Overig gebruik	• Koelwater • Lozen afvalwater • Recreatie

De meest belangrijke activiteiten van belang in het kader van de m.e.r. Grensmaas zijn de normalisatie van de rivier in de 2^{de} helft van de 19^{de} eeuw (zie Figuur 3.1), de bouw van stuwen en parallelkanalen met de bijbehorende wateronttrekkingen, en de winning van grind in het zomerbed van de Grensmaas en de mijnzakkingen nabij Meers. De betekenis voor de Grensmaas schuilt in de significante wijzigingen in de waterbeweging en het vastleggen van oevers.

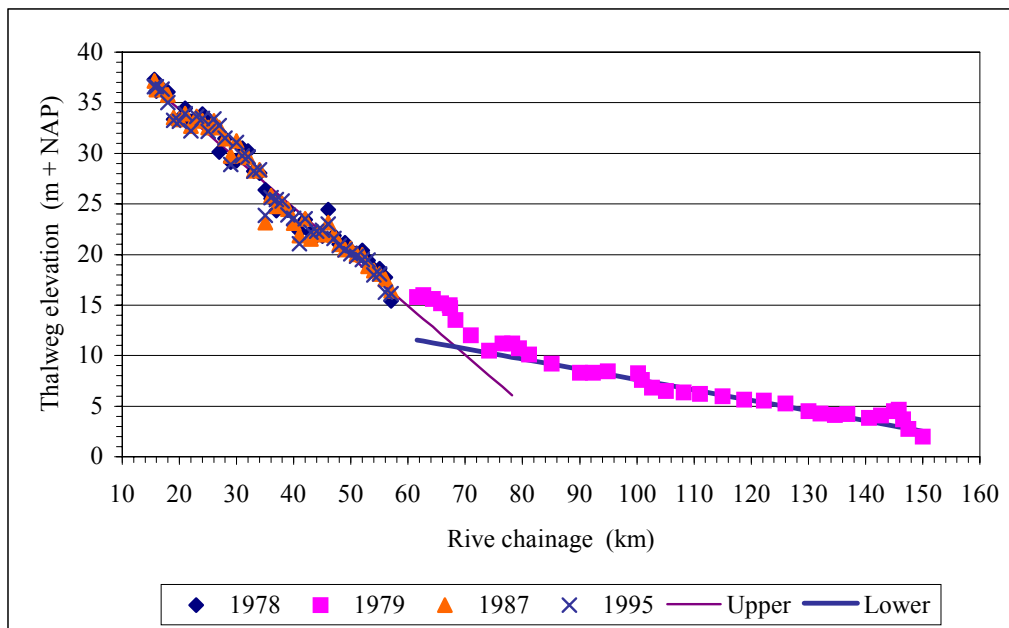


Figuur 3.1 Twee delen van kaarten van de Maas nabij Grevenbricht van 1849 (links) en van 1905 (rechts) waarop duidelijk het effect van de normalisatie te zien is [Helmer et al, 1991]

Het gevolg van de verschillende activiteiten is dat de Grensmaas nu een diep ingesneden rivier is die slechts bij hoge hoogwaters haar weerden overstroomt. De aanvoer van zand en grind van bovenstrooms lijkt vrijwel tot stilstand gekomen. Tegelijkertijd is de aanvoer van slib aanzienlijk toegenomen [Micha & Brolee, 1989].

3.3 Globale morfologische kenmerken

Het Grensmaasgebied begint bij de stuw Borgharen (circa rkm 15) en eindigt bij Roosteren (circa rkm 55). Het bodemverhang (i) is in dit gedeelte van de Grensmaas van 40 km ongeveer $5 \cdot 10^{-4}$. 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 3.2 is de hoogte van de thalweg weergegeven tussen rkm 15 en rkm 150. Duidelijk is te zien dat de Grensmaas beduidend steiler is dan de meer benedenstroomse Zandmaas.



Figuur 3.2 Thalwegligging van de Maas tussen rkm 15 en rkm 150 [Murillo, 1997]

Het winterbed (de 'weerden') 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 woonwijken op de lager gelegen delen van het winterbed. Ook liggen er een aantal boerderijen buitendijks. Na het hoogwater van 1995 zijn kades aangebracht rond deze dorpen, de zogenaamde DGR-kaden. De aan Belgische zijde gelegen dorpen zijn al veel langer omdijkt. 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 Plan Grensmaas zal deze frequentie worden teruggebracht tot 1/250 per jaar.

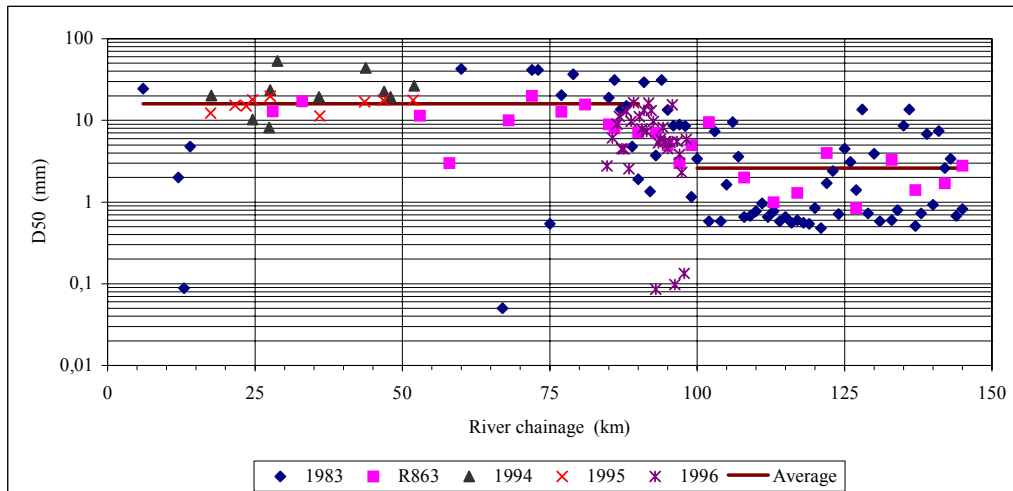
De rechter begrenzing van het winterbed wordt gevormd door de dijken van het Julianakanaal. De linker begrenzing van het winterbed wordt voornamelijk gevormd door winterdijken die de aan de Belgische zijde gelegen laagliggende gebieden voor overstroming moeten behoeden.

Tot ongeveer 200 jaar geleden was de Grensmaas een enigszins vrij meanderende rivier met meerdere ondiepe geulen en diverse eilanden in het laagwaterbed. De huidige Grensmaas is gekenmerkt door één enkele laagwaterbedding, thans diep ingesneden in het hoogwaterbed. Daarbij is het verschil tussen de geul en de weerden op veel plaatsen 5 tot 10 m! De rivier heeft zich in de loop van de afgelopen 2 eeuwen vooral zo ontwikkeld vanwege normalisatiewerken (bouw van kribben, kaden en oeververdedigingen) en ontgrindingen. Daarnaast heeft slibafzetting tijdens hoogwaters bijgedragen tot ongeveer 2,5 m verhoging van de weerden.

Door genoemde normalisatie is het meanderen van de Grensmaas in de loop der tijd vermindert. Toch is de lengte langs het laagwaterbed nog circa 40 % groter dan de lengte langs het

hoogwaterbed. De meanders veranderen nauwelijks: ze zijn ten dele vastgelegd en de morfologische processen verlopen zeer traag.

De Grensmaas is een grindrivier, de enige die Nederland herbergt. Figuur 3-3 toont de gemiddelde korreldiameter van het bodemmateriaal van de Maas tussen rkm 0 (bij Eijsden) tot rkm 150.



Figuur 3.3 Gemiddelde korreldiameter van het bodemmateriaal in het zomerbed van de Maas [Murillo, 1997]

De bodem van het zomerbed heeft een complexe opbouw van sediment: veelal wordt een laag grof sediment aangetroffen (afpleisteringslaag) bovenop een sterk gegradeerd zand/grind mengsel (toutvenant). Daaronder kunnen zich erosiebestendige lagen bevinden (mergel of stroomresistente klei), maar onder de toutvenant bevinden zich over een groot deel van de Grensmaas ook fijne tertiaire zanden.

Bovengeschetste karakteristiek van een afgepleisterde bodem en beperkte morfologische dynamiek duidt er op dat de huidige thalweg waarschijnlijk behoorlijk stabiel is. Dit kan echter niet worden onderbouwd met hierop gerichte metingen en onderzoeken.

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 deze 3000 m³/s of meer bedragen (hoogwater 1993: 3039 m³/s; hoogwater 1995: 2746 m³/s; hoogwater 2003: 2740 m³/s). De extreme hoogwaters bepalen in sterke mate de verplaatsing van materiaal, en daarmee de erosie- en sedimentatieprocessen. De gemiddelde afvoer ligt op circa 235 m³/s (langjarig gemiddelde over de periode 1911 – 1995). De laagwaterafvoer in de zomer kan zeer klein zijn (kleiner dan 10 m³/s).

Bij 1250 m³/s wordt de stuw bij Borgharen gestreken en begin de Grensmaas ook de weerden te overstromen.

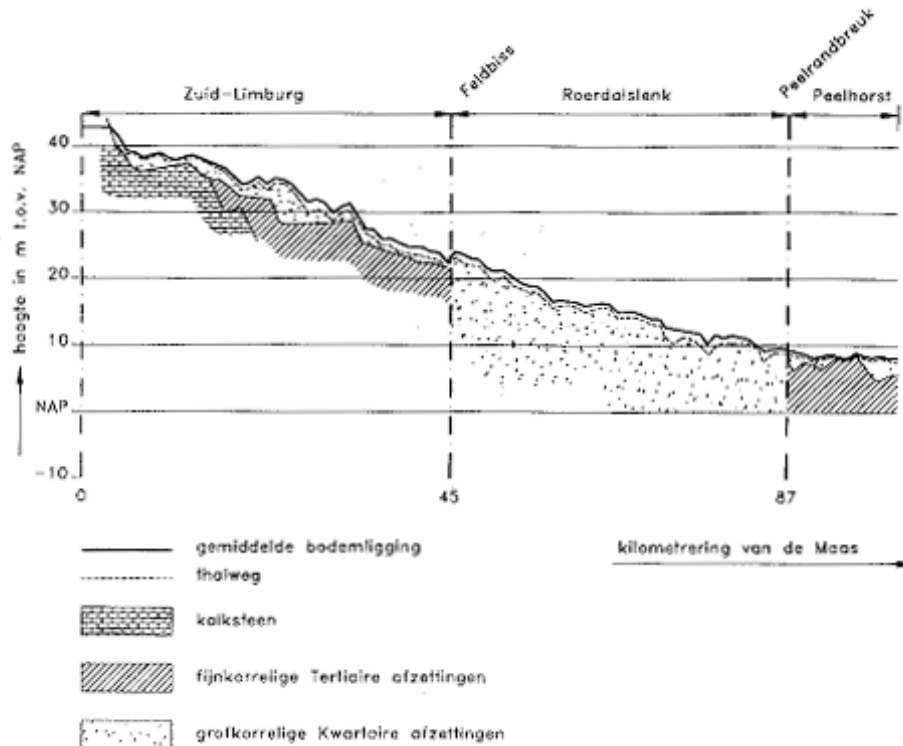
Significant bodemtransport, waarbij de grove bodemlaag (afpleisteringslaag) in beweging komt en fijner materiaal van onder deze laag kan worden meegevoerd, vindt alleen plaats bij afvoer

ren boven de 1200 m³/s. Bij lagere afvoeren is er de beschermende werking van de afpleisteringslaag.

In periodes met veel lagere afvoeren, in de range van 300 tot ongeveer 1000 m³/s, volgende op een hoogwaterperiode, transporteert het tijdens het voorgaande hoogwater vrijgekomen fijnere bodemmateriaal. Deze bodemtransporten zijn veel geringer dan de transporten tijdens hoogwater (een factor van orde 10 kleiner) meer tegelijkertijd veel frequenter. Daardoor is er tijdens periodes van lage afvoeren duidelijk ook sprake van een zekere morfodynamiek. Verder draagt de afwisseling van traag stromende poelen en kleine stroomversnellingen bij aan deze dynamiek bij lage afvoeren. Er ontstaan kleinschalige banken en geulen, hetgeen belangrijke effecten zijn voor de ecologie. Deze verschijnselen blijven in dit onderzoek buiten beschouwing.

3.4 Beddingmateriaal

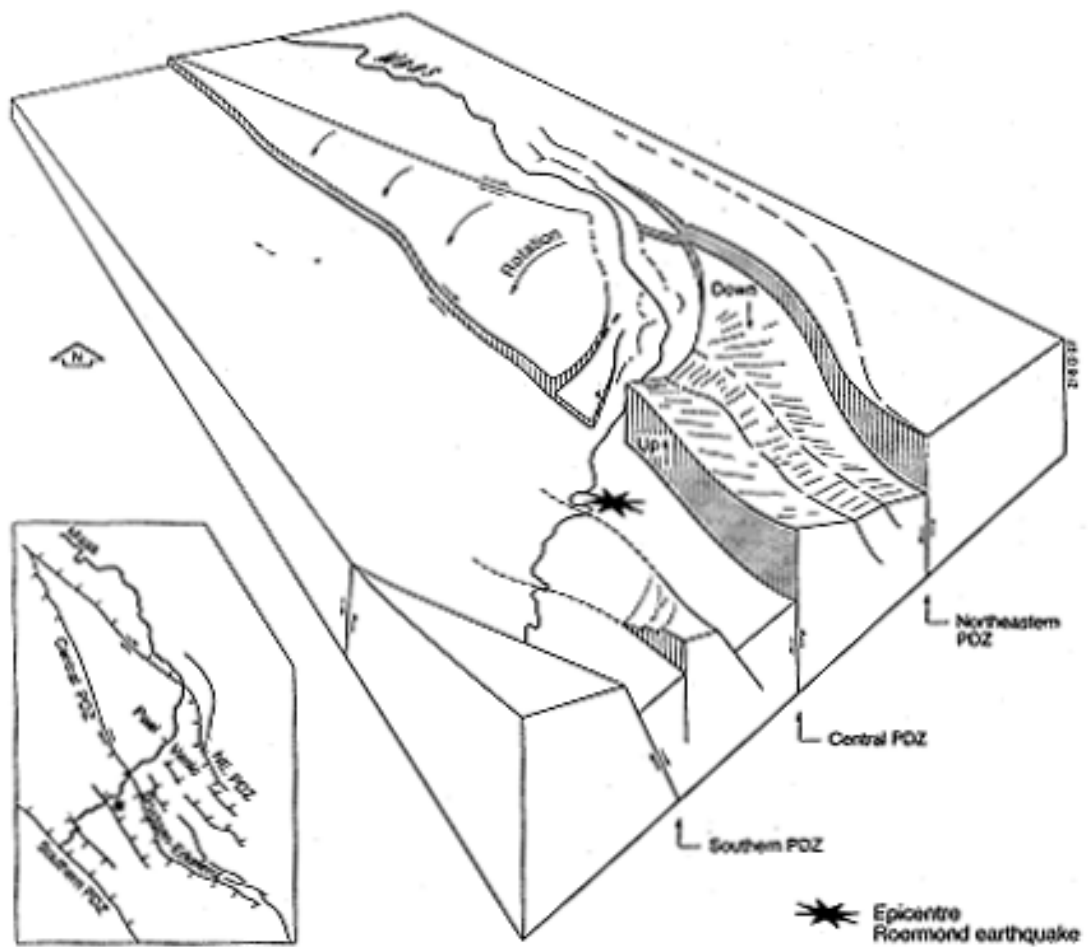
De ondergrond van de Grensmaas bestaat uit afwisselend grind, zware klei en fijn zand met



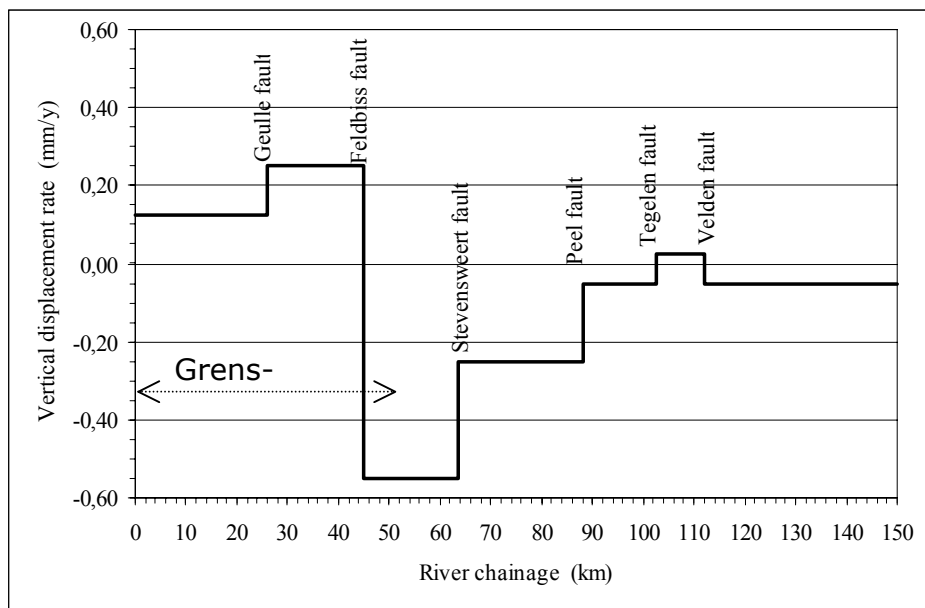
kleilenzen. In het meest zuidelijke deel komt mergel voor. Figuur 3-4 toont een globaal geologisch langsprofiel van de Maas.

Figuur 3.4 Geologisch langsprofiel van de Maas tussen rkm 0 en rkm 87

In het geologisch langsprofiel zijn duidelijk horsten en slenken waar te nemen. Volgens Murillo (1997) heeft neo-tectoniek in het verleden een belangrijke rol gespeeld bij de vorming van de huidige Maas en is het waarschijnlijk verantwoordelijk voor de overgang van de steile Grensmaas naar de vlakkere Zandmaas. Figuur 3-5 geeft daarover aanvullende informatie. Duidelijk is te zien hoe de Maas een aantal breukvlakken (in de figuur aangegeven met PDZ) doorsnijdt.



a) Neo-tectonische bewegingen van belang voor de vorming van de Maasvallei



(b) Verticale neo-tectonische beweging van de aardkorst langs de Maas over het riviertraject tussen rkm 0 en rkm 150

Figuur 3.5 Neo-tectoniek en de Maas

De bedding van de Grensmaas bevat breed gegradeerd materiaal, het tout-venant, waarvan de gemiddelde diameter (D_{50}) tussen de 10 en 20 mm ligt. De korrels van dit materiaal variëren van zand tot grof grind en stenen van orde 1 decimeter. Op veel plaatsen is dit toutvenant afgedekt door een nog grovere afpleisteringslaag, die tot relatief hoge afvoeren (ongeveer 1000 tot 1200 m³/s) nog aanwezig is als hechte en aaneengesloten afdeklaag. Bij hogere afvoeren (vanaf 1000 – 1200 m³/s wordt de afpleisteringslaag 'opgebroken' waarna het onderliggende gegradeerd materiaal vrij komt voor bodemtransport [zie ook Klaassen, 1986]. Vanaf 1700 m³/s is er sprake van een forse toename van het transport en is de afpleisteringslaag over ruime gebieden doorbroken. In het algemeen treedt bij in alluviale rivieren laterale sortering in bochten op: grove fracties in de buitenbochten en fijne fracties in de binnenbochten. Hoewel dit echter nauwelijks voor de huidige Grensmaas geldt, kan dit effect zich bij grootschalige verruimingswerken duidelijker manifesteren vanwege de grote hoeveelheden sediment die na uitvoering voor transport beschikbaar komen.

Naast de gecompliceerde opbouw van het natuurlijke beddingmateriaal, is sprake van resten van 'natuurvreemde' elementen: resten van grinddammetjes en teruggestort 'restmateriaal' (grote keien en fijn sediment), kribben, veerstoeppen, kaden en oeversverdedigingen.

3.5 Sedimenttransport

De 'aanjager' van morfologische veranderingen is het sedimenttransport. Daarbij is er een groot verschil tussen de Grensmaas als grindrivier en een zandrivier. In een zandrivier wordt het transport volledig bepaald door de transportcapaciteit (er is aanbod genoeg), terwijl bij de Grensmaas het aanbod vaak orden lager is dan de transportcapaciteit. Dit laatste heeft te maken met de aanwezigheid van de in paragraaf 2.1 genoemde afpleisteringslaag, een grove afdeklaag, die het onderliggend sterk gegradeerde zand-grind mengsel, het toutvenant, afdekt. Pas bij extreme hoogwaters wordt de afpleisteringslaag opgebroken en komt het onderliggende materiaal vrij om te worden getransporteerd. Wanneer na een extreem hoogwater nog 'residu' toutvenant aanwezig is boven op de pleisterlaag, dan zal dit materiaal ook bij lagere afvoeren kunnen worden getransporteerd: dus ook de geschiedenis van eerdere hoogwaters speelt hierin mee [Duizendstra, 1999]. Uit de door Duizendstra uitgevoerde sedimenttransportmetingen blijkt overigens dat de Grensmaas grotere hoeveelheden materiaal transporteert dan tot dusverre is aangenomen (zoals in het MER GRENSMAAS 1998). Dit duidt op een hogere mate van morfodynamiek dan was verondersteld. Voor meer details wordt verwezen naar paragraaf 5.3 bij het onderwerp 'voortschrijdend inzicht'.

3.6 Beddingstabiliteit

3.6.1 Afpleisteringslaag

Zoals eerder gesteld is het breed gegradeerde grove sediment van de Grensmaas en de daaraan gerelateerde afpleisteringsverschijnselen er de oorzaak van dat belangrijke sedimentbewegingen pas optreden bij hogere afvoeren. Afpleistering is het verschijnsel waarbij alleen de fijnere fractie uit de bovenste laag van de bedding door de stroming afgevoerd wordt. Hierdoor blijven de grovere fracties van het toutvenant achter. Dit vindt plaats tijdens de val na een hoogwater en gedurende periodes van minder hoge afvoer. Deze afpleisteringslaag kan bij een volgend extreem hoogwater weer worden opgebroken, als de stroomsnelheden voldoende hoog worden.

In verslag R863 van het Waterloopkundig Laboratorium [Klaassen, 1981] zijn op basis van hetgeen toen bekend was over het onderliggende bodemmateriaal van de Grensmaas [vanuit Klaassen, 1971] schattingen gemaakt over de kritische schuifspanning van het onderliggende mengsel. Aanvankelijk kan een breed gegradeerd mengsel een toenemende schuifspanning opnemen door vergroving van de bovenlaag. Dit is alleen mogelijk totdat een verdere vergroving niet meer optreedt. De dan bereikte kritische schuifspanning varieert afhankelijk van de gebruikte methode of plaats tussen 21 en 33 N/m² [Klaassen, 1981].

Midden tachtiger jaren zijn eveneens bij het Waterloopkundig Laboratorium proeven uitgevoerd in de zandgoot om het gedrag van een afgepleisterde bedding tijdens hoogwater te simuleren. De afpleisteringslaag wordt bij de kritische schuifspanning instabiel, waardoor fijner sediment uit de onderliggende laag wordt gezogen. Dit fijn sediment komt boven op de instabiele afpleisteringslaag en wordt daar in de vorm van kleine beddingvormen getransporteerd. Deze beddingvormen veroorzaken extra turbulentie waardoor een zich zelf opslingerend proces in gang wordt gezet. Bij afnemende schuifspanning wordt de afpleisteringslaag weer stabiel, maar de samenstelling blijkt fijner te zijn dan voor het hoogwater. In de daarop volgende periodes van lagere afvoeren en minder hoge hoogwaters wordt de afpleisteringslaag weer grover. Voor meer details zie WL-verslag M 2061 [Klaassen, 1986].

In de Grensmaas zelf, waar 2D verschijnselen een belangrijke rol spelen, is het moment van opbreken plaatselijk verschillend. Behalve gebieden met afpleistering ontstaan er ook gebieden met meer uniform fijn materiaal ('point bars') en grof materiaal (met name in de buitenbochten). Deze gebieden zijn voorts deels aan variatie onderhevig. Het is daardoor mogelijk dat op dezelfde plaats in de bedding boven en naast elkaar verschillen in sedimentsamenstelling voorkomen en bij erosie van dergelijke gebieden speelt dat een belangrijke rol. Dit complexe beeld is geheel verschillend van het morfologische gedrag van meer uniform beddingmateriaal.

3.6.2 Erosie en sedimentatie van de bedding

Zoals eerder aangegeven is de Grensmaas een insnijdende rivier. Op dit moment is de gemiddelde diepte van het zomerbed plaatselijk wel circa 10m, en deze degradatie gaat door. Al voor de publicatie MER GRENSMAAS 1998 waren de resultaten bekend van de studie van Wilbers [1996], die een onderzoek uitvoerde naar de morfologische veranderingen van de bedding van de Grensmaas op basis van acht series van peilingen uitgevoerd in de periode van 1978 tot 1995. In die periode is circa 920000 m³ geërodeerd, hetgeen overeen komt met circa 0.25 m of wel 0.015 m/jaar. Voorts blijkt dat het riviergedeelte waar de grootste erosie optreedt zich in stroomafwaartse richting beweegt. In totaal zijn circa 6 zogenaamde flessenhalzen te onderscheiden met een veel kleiner dwarsprofiel. In de meeste flessenhalzen vindt erosie plaats. De bedding in sommige flessenhalzen is echter redelijk stabiel en vertoont geen tekenen van doorgaande erosie. Hoewel er geen voldoende nauwkeurige gegevens beschikbaar zijn om dit verschil tussen de flessenhalzen te verklaren, lijkt het logisch te veronderstellen dat de stroomsnelheden te laag zijn om bodemerosie te initiëren en (dus) het bodemmateriaal te grof om opgenomen en getransporteerd te worden.. Met name bij eroderende flessenhalzen vindt er benedenstrooms vaak sedimentatie plaats.

3.7 Oeverstabiliteit

Oevererosie *langs de laagwaterbedding* van de Grensmaas is tot op heden met maatregelen tegengegaan en de oevers zijn dan ook op plaatsen met zware stroomaanval grotendeels verdedigd. Dit geldt met name voor de Belgische oevers; op een aantal plaatsen kunnen de oevers desondanks worden overspoeld hetgeen tot schade of bezwijken van deze 'oeverdammen' kan leiden (zoals tegenover Obbicht in 1993). Meestal treedt echter erosie op van onverdedigde oevergedeelten aan Nederlandse zijde, namelijk aan de binnenbochten van de meanders van het laagwaterbed. Dit doet zich voor bij extremere hoogwaters en de insnijding in de achterliggende weerden bedraagt dan hooguit enige meters. Dergelijke oeververplaatsingen worden op bepaalde trajecten vrij gelaten; bochtafsnijdingen worden echter niet toegestaan en worden voorkomen door het tijdig aanbrengen van een oeververdediging. Dit laatste geldt ook bij kaden, wegen, constructies, waarbij de nabije oever intact moet blijven.

De sterkte van de verdedigde oevers is over het algemeen niet goed bekend. De oevers aan Vlaamse zijde zijn over grote lengten verdedigd met onder meer betonbekleding of zware stortsteen en zijn naar verwachting doorgaans stabiel. De verdedigde oevers aan Nederlandse zijde zijn vermoedelijk doorgaans minder robuust en behoeven af en toe onderhoud. Door De Maaswerken is aangegeven dat de sterkte equivalent zou kunnen zijn met een verdedigde oever bekleed met breuksteen 40-200 kg, maar zekerheid bestaat daaromtrent niet. In de onverdedigde oevers komen soms steilranden voor.



Foto 3.1 Steilranden langs de Grensmaas

Behalve directe instabiliteit van de oevers als gevolg van te hoge stroomsnelheden bij hoogwater, uittredende kwel ('piping') en grondmechanisch afschuiven, kan ook instabiliteit ontstaan

wanneer de teen van de oever geërodeerd wordt als gevolg van sterke bedding-erosie. Dit fenomeen is met name mede van belang in de flessenhalzen.

Recent onderzoek heeft meer inzicht opgeleverd over de stabiliteit en erosie van oevers in de Grensmaas, voor details zie verder paragraaf 5.3.

3.8 Morfologische tijdschaal

Morfologische processen als degradatie van het rivierbed, veranderingen in thalwegligging, oevererosie en aanslibbing van weerden zijn tijdsafhankelijke processen. De gevolgen van ingrepen in de rivier worden pas in de loop van de tijd merkbaar. Inzicht in de snelheid van morfologische processen is belangrijk om na te kunnen gaan (i) of en hoe ontwikkelingen in het verleden het huidige gedrag van de rivier nog zullen beïnvloeden, en (ii) om na te gaan hoe snel nieuwe ingrepen in de rivier (zoals het Eindplan Grensmaas) zullen leiden tot veranderingen in de rivier.

In een rivier als de Grensmaas zijn vele morfologische processen te onderscheiden, die elk een eigen morfologische tijdsschaal hebben. In het kader van de huidige onderzoek is het van belang om inzicht te krijgen in de morfologische tijdsschaal van de volgende processen:

- grootschalige (verticale) degradatie van het zomerbed als gevolg van ontwikkelingen in het stroomgebied en in de Grensmaas zelf;
- horizontale verplaatsingen van de rivier als gevolg van oevererosie;
- wijzigingen in de thalwegligging
- sedimentatie van slib op de weerden;
- morfologische veranderingen als gevolg van het uitvoeren van het Eindplan Grensmaas of alternatieven ervan.

Van deze processen is de morfologische tijdsschaal deels bekend. Indien dit niet het geval is kan hier veelal door middel van een eenvoudige analyse enig inzicht in worden verkregen. In deze paragraaf komen de belangrijkste tijdsschalen aan de orde en wordt de relevantie voor het huidige rivierkundige onderzoek aangegeven. In het algemeen geldt dat de beschikbare tijdsschalen zijn ontwikkeld voor meer zandige rivieren, waar het sediment onder alle afvoerstandigheden in beweging is. Het vertalen van dergelijke tijdschalen naar de situatie van de Grensmaas, waar alleen gedurende hoge afvoeren significante veranderingen in het zomerbed kunnen plaatsvinden, dient daarom met omzichtigheid te gebeuren.

3.8.1 Tijdsschaal grootschalige (verticale) degradatie

Voor verticale degradatie (bijvoorbeeld het effect van verminderd sediment aanvoer van bovenstrooms, van baggeren en van bochtafsnijdingen benedenstrooms) heeft de Vries [1975] een morfologische tijdsschaal geïntroduceerd. Hij beschouwde daarbij een rivier waarvan de erosiebasis met een zekere maat Δz_w daalde. De morfologische tijdsschaal (voor verticale degradatie) T_m is gedefinieerd als de tijd (in jaar) die nodig om op een bepaalde afstand L_m (in m) een degradatie van 50% van de daling Δz_m (in m) te bereiken. Uit een analytische beschouwing vindt de Vries (1975) de volgende uitdrukking voor L_m en T_m :

$$L_m = 3d / i \quad (Vgl. 3-1)$$

$$T_m = L_m^2 / Y \quad (\text{Vgl. 3-2})$$

waarbij de parameter Y is gedefinieerd via:

$$Y = \frac{1}{3} \frac{n}{B \cdot i} \int_{1jr} S(t) d(t) \quad (\text{Vgl. 3-3})$$

Hierbij is d de gemiddelde waterdiepte, i = verhang, n = macht van simpele sediment transport vergelijking $s = m u^n$, B = breedte van rivier, en de integraal vertegenwoordigt het jaarlijkse sediment transport. Redelijke waarden voor de verschillende parameters in de Grensmaas zijn $n = 5$, $B = 100 \text{ m}$, $i = 0.5 \text{ m/km}$ en het jaartransport is $50 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. Dit levert voor $L_m = 200 \text{ km}$, een waarde voor T_m van circa 25000 jaar. Dit geeft aan dat grootschalige morfologische processen in de Maas als gevolg van allerlei menselijke handelingen zeer langzaam verlopen (zoals ook al gesteld in paragraaf 3.2). In feite is de Maas door de geringe sediment transporten een van de (morfologisch) langzamere rivieren, waarover gegevens beschikbaar zijn (de Vries, 1975). Ter vergelijking: de Vries (1975) geeft voor deze tijdsschaal voor de Rijn in Nederland een waarde van 1000 jaar en voor de Donau in Hongarije waarden tussen 60 en 2000 jaar.

3.8.2 Tijdsschaal horizontale veranderingen als gevolg van oevererosie

Een tijdsschaal voor de horizontale veranderingen van een riviersysteem kan gevonden worden door de breedte van de meanderstrook te relateren aan de snelheid van oevererosie. Onderzoek naar de snelheid van oevererosie in de Grensmaas is gedaan door onder andere de Kramer (1997). Op plaatsen waar oevererosie mogelijk is kan deze gemiddeld genomen enkele meters per jaar bedragen. De breedte van de meanderstrook van de Grensmaas is circa 2 km. Bij aanname van een gemiddelde (vrije) oevererosie van 2 m/jaar en aannemende dat een tijdsschaal overeenkomt met de situatie dat de meandergeul heen en weer heeft gemeandert tussen de twee uitersten van de meanderstrook, zou een tijdsschaal van $4 \cdot 10^3 / 2 = \text{circa } 2000$ jaar worden gevonden.

Ter aanvulling worden nog enige overwegingen ten aanzien van het effect van ingrepen op de snelheid van oevererosie en dus op de tijdsschaal van oevererosie gegeven. Hickin & Nanson (1984) hebben onderzoek gedaan de snelheid van meanderen van rivieren. M is de snelheid van oevererosie. $M_{2.5}$ is de maximale oevererosie (in m/jaar) die optreedt als R/B (verhouding kromtestraal R en breedte B) circa 2.5 bedraagt. Deze oevererosie is door Hickin & Nanson (1984) gerelateerd aan de zogenaamde streampower Ω , die gedefinieerd is via:

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q_5 \cdot i \quad (\text{Vgl. 3-4})$$

waarbij Ω = stream power ($\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^3$), ρ = dichtheid van water (1000) (kg / m^3), g = versnelling van de zwaartekracht (m / s^2), $Q_5 = 1: 5$ jaar afvoer (m^3 / s), en i = verhang (-). De relatie tussen $M_{2.5}$ en Ω is:

$$M_{2.5} = \frac{\Omega}{H_b Y_b} \quad (\text{Vgl. 3-5})$$

waarbij H_b de oeverhoogte (m) en Y_b een materiaalconstante is die afhankelijk is van de samenstelling van het bodemmateriaal (en impliciet bij een alluviale rivier dus van de samenstelling van de oever omdat deze door de rivier zelf is afgezet).

In het kader van het EP zullen in de flessenhalzen riviergedeelten ontstaan waar het verhang i lokaal aanzienlijk groter wordt. In principe zal daar dus ook de snelheid van oevererosie toenemen. Bij enkele flessenhalzen (Meers, Obbicht) is sprake van een relatief sterke kromming, waar dit in principe het geval zal zijn. Andere flessenhalzen kennen een minder gekromde loop; eventuele oevererosie kan hier vooral optreden in de binnenbocht van de rivier. Voor dit proces is de tijdsschaal voor 'uitbochten' minder relevant. In de Grensmaas zal men overigens de zwaar aangevallen oevers van de flessenhalzen verdedigen, zodat ook bij sterk gekromde flessenhalzen als bij Meers en Obbicht geen vrije oevererosie zal optreden.

3.8.3 Tijdsschaal voor thalwegverandering

Verandering van de thalwegligging is in feite een 2D morfologisch verschijnsel gerelateerd aan de dwarshelling van de rivier in bochten. Voor dit verschijnsel is voor zandige rivieren een tijdsschaal afgeleid. Deze tijdsschaal is weergegeven in vergelijking (3.5).

$$T = \frac{0,85B^2\sqrt{\theta}}{\pi^2s} \quad (\text{Vgl. 3-6})$$

waarin θ = Shields parameter gedefinieerd via $\theta = h_i/(\Delta D)$ en s = sediment transport per eenheid van breedte. Voor de Grensmaas wordt bij een afvoer van circa 2000 m³/s een tijdsschaal van circa 1 jaar gevonden. Deze waarde moet met zorg worden geïnterpreteerd. Tijdens lage afvoeren is de rivier niet morfologisch actief. Alleen bij afvoeren groter dan circa 1200 m³/s [Duizendstra, 1999] of wellicht nog hoger [Klaassen, 1981] zullen morfologische veranderingen van betekenis optreden. Deze afvoeren treden gemiddeld genomen slechts enkele dagen per jaar op. Daar staat tegenover dat door uitvoering van Eindplan Grensmaas lokaal het sedimenttransport aanzienlijk kan toenemen. Rekening houdend met deze verschijnselen zou de tijdsschaal van de verandering van thalweg enkele decennia kunnen bedragen.

3.8.4 Tijdsschaal voor de sedimentatie van weerden

De sedimentatie van weerden neemt bij vastgelegd zomerbed in de loop van de tijd af. Dit wordt veroorzaakt doordat (1) door de toename van de hoogteligging van de weerden de frequentie van overstromen afneemt en (2) de zogenaamde "trapping efficiency" van de weerden groot is bij lagere inundatiedieptes. Een tijdsschaal voor de huidige weerd sedimentatie kan worden verkregen door de diepte boven de weerden te delen door de huidige snelheid van aanslibbing. Uitgaande van een overstromingsdiepte van circa 2 m en een aanslibbingssnelheid van 5 tot 10 mm/s, wordt een tijdsschaal van 100 tot 200 jaar gevonden. Bij weerdverlaging zal het sedimentatie proces versneld worden; bij verlaging van de hoogwaterwaterstanden zal het sedimentatieproces langzamer worden.

3.8.5 Tijdsschaal voor verticale degradatie als gevolg van EP

Op basis van de analyse van de Vries (1975) is het ook mogelijk om een tijdsschaal af te schatten voor de morfologische veranderingen die worden veroorzaakt door de implementatie van

het Eindplan Grensmaas of een variant daar op. Hier is vooral de verticale degradatie in een toekomstige flessenhals en de aanzanding benedenstrooms van belang. In principe kan gebruik worden gemaakt van vergelijking (3.1), maar de specifieke karakteristieken van de plannen moeten daarbij in beschouwing worden genomen. De lengte van een typisch riviergedeelte met flessenhals en benedenstroomse stroomgeulverbreding is circa 10 km. Door de flessenhals werking zal het lokale transport vergroot worden. Veronderstellend dat het lokale transport een factor 5 groter zal worden dan het huidige sediment transport in de Grensmaas, wordt dan met behulp van vergelijking (3.1) een tijdsschaal gevonden van circa 10 jaar. Dit houdt in verticale degradatie in een toekomstige flessenhals en de aanzanding benedenstrooms relatief snel zullen optreden. De tijdsschaal zou qua orde van grootte bevestigd kunnen worden door berekeningen met het model SOBEK-Graded. De verschillende tijdsschalen zijn samengevat in Tabel 3.1.

Tabel 3.2 Globale inschatting morfologische tijdsschalen voor Grensmaas

Verschijsel	Grootte-orde van morfologische tijdsschaal
Grootschalige verticale degradatie door menselijke activiteiten	Duizenden jaren
Oevererosie en meandermigratie	Honderden jaren
Thalwegligging	Tientallen tot honderden jaren
Weerdsedimentatie	Honderden jaren
Flessenhalzen EP	Tientallen jaren

In vergelijking met andere rivieren (met name de Rijn in Nederland) kan gesteld worden dat met name grootschalige verticale degradatie en veranderingen in de thalwegligging bij de Grensmaas langzaam verlopen. Zowel qua oevererosie als weerdsedimentatie heeft de Maas een tijdsschaal die redelijk overeen zal komen met de Rijn in Nederland voor de vastlegging van het zomerbed in de 19^{de} eeuw.

3.9 Zwevend transport en aanslibbing

Behalve grover bodemmateriaal wordt in de Grensmaas ook zeer fijn materiaal getransporteerd. Gegevens over het transport van dit fijne materiaal (het zogenaamde spoeltransport) in de Grensmaas zijn samengevat in rapport TR 1-3 van het MER GRENSMAAS 1998. In dit rapport worden ook een aantal relaties gepresenteerd tussen de concentratie aan fijn sediment en de afvoer. In rapport TR 5-1 zijn resultaten van DELWAQ berekeningen gepresenteerd, die een beeld geven van de afname van het spoeltransport in de Grensmaas in langsrichting. Dit blijkt vooral bij hoogwater op te treden en komt overeen met de sedimentatie van slib op de weerden. Pas na het uitbrengen van het MER GRENSMAAS 1998 zijn resultaten gepubliceerd van geanalyseerde metingen naar de sedimentatie van slib op de weerden van de Grensmaas (zie paragraaf 5.3).

3.10 Aanbod en doorvoer van sediment

3.10.1 Aanbod

De sedimenttoevoer naar de Grensmaas wordt beperkt door de stuw te Borgharen welke het waterpeil in het Julianakanaal regelt. Vanaf een afvoer van 1250 m³/s wordt deze gestreken en is er in principe doorvoer van bodemtransport mogelijk. Op jaarbasis is de sedimenttoevoer naar de Grensmaas echter uiterst gering, wat wordt afgeleid uit de zeer beperkte hoeveelheid

sediment dat de Nederlandse grens passeert [o.a. Burgdorffer, 1993]. Dit is mede een oorzaak van de beperkte morfologische activiteit van de Grensmaas.

3.10.2 Sedimentdoorvoer naar de Zandmaas

Het sediment dat de Grensmaas verlaat zou in principe doorgevoerd worden naar de Zandmaas. De hoeveelheid sediment die uit de Grensmaas komt is niet aangegeven in het MER GRENSMAAS 1998 rapport TR 1-3, maar eerder onderzoek [zie Gerretsen (1968) en WL-verslag R863 [Klaassen, 1981] wijst op een jaarlijks transport van circa 35,000 m³. In het onderzoek van Wilbers [1996] komt naar voren dat in de periode 1978-1995 het jaarlijks transport in het benedenstroomse deel van de Grensmaas circa 50,000 m³ moet zijn geweest (ter hoogte van Maaseik). In de 60-er jaren van de vorige eeuw is echter een zandvang aangelegd net stroomopwaarts van de uitmonding van het Julianakanaal te Maasbracht. Deze zandvang wordt regelmatig geleegd middels baggeren hetgeen betekent dat er slechts een beperkte hoeveelheid sediment naar de Zandmaas worden doorgevoerd. Wellicht is het wenselijk deze zandvang te verruimen over de gehele breedte van het laagwaterbed voor zover dit niet het geval is.

In Figuur 3.3 is te zien dat de samenstelling van het sediment globaal niet verandert tot ongeveer km 90. Verder benedenstrooms is de korreldiameter duidelijk kleiner. Uit Figuur 3.2 blijkt dat er een uitgesproken knik in het bodemverhang aanwezig is tussen km 60 en km 70, dus in het bovenstroomse gedeelte van de Zandmaas. Het flauwere bodemverhang impliceert een afname van de transportcapaciteit en de grove fracties van het bodemtransport blijven achter op de bodem. Het relatief grove materiaal in de bovenloop van de Zandmaas is dus waarschijnlijk afkomstig uit de Grensmaas en heeft zich kennelijk afgezet tot ongeveer km 90. Verder benedenstrooms bestaat de bodem uit fijner zand.

4 Autonome morfologische ontwikkeling

4.1 Referentiekader

Voor het beschrijven van te verwachten morfologische ontwikkelingen is een vergelijkingskader nodig, de referentiesituatie. Hiertoe wordt uitgegaan van de situatie in 1995 na aanleg van de DGR-kaden. Echter, indien het Grensmaasplan niet zou worden uitgevoerd zouden er ook morfologische ontwikkelingen plaatsvinden, welke worden aangeduid met autonome ontwikkelingen. In principe dienen de effecten van de Grensmaasplannen hiermede te worden vergeleken. De autonome ontwikkelingen vanaf de situatie in 1995, na aanleg van de DGR-kaden en tot 2017 worden aangeduid met het Nul-Alternatief (NA). Het Nulalternatief vormt het vergelijkingskader bij het beoordelen van de effecten van de plannen. In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op mogelijke autonome ontwikkelingen.

4.2 Het NA

Het NA wordt mede bepaald door de volgende projecten:

- Het zogenaamde STEVOL-project direct benedenstrooms van de Grensmaas;
- Verleggingen kanaaldijk langs Grensmaas i.v.m. verbreding van het Julianakanaal;
- Vlaamse Maasdijkenplan (dijkversterkingen en –verleggingen)

De hiermee gepaard gaande ingrepen zijn de volgende:

- verbreding van het Julianakanaal in westelijke richting, waardoor het rechter hoogwaterbed van de Grensmaas iets versmald is, rkm 15 – 65;
- bebouwing verwijderd bij Herbricht, rkm 23;
- bebouwing verwijderd bij Kotem, rkm 28;
- verlegging Vlaamse kade en rivierverruiming op het traject rkm 34 – 38;
- erosiegeul in de Kerkeweerd, rkm 40;
- verkleining plas Bichterweerd, rkm 44 - 45;
- dijkverhoging Heppeneert, rkm 50 - 51;
- gedeeltelijke natuurontwikkeling bij Roosteren (WML), rkm 53 - 55;
- ontgraving Stevol (tussen Ohé en Laak en Julianakanaal), rkm 59 - 60;
- uitvoering van het Tracébesluit in de Zandmaas [Scope 2001: Meijer, 2002], rkm 68 - 180.

Voor de WML-natuurontwikkeling bij Roosteren geldt dat deze zich **niet** ongestoord mag ontwikkelen om te grote verruwing en stromingsweerstand in deze verruimingslocatie te voorkomen. Er wordt slechts een beperkte mate van verruwing in de vorm van lage begroeiing toegelaten en in het model aangebracht. Het NA impliceert hier dan ook dat er een vrij intensief beheersprogramma moet komen om de verruwing ook inderdaad te beperken.

4.3 Mogelijke autonome ontwikkelingen

De autonome ontwikkeling wordt allereerst gekenmerkt door de trend in de grootschalige daling van het laagwaterbed. Deze daling wordt thans niet meer veroorzaakt door grindwinning, maar door een negatieve balans in het sedimenttransport: benedenstrooms (brug Roosteren) is er sprake van doorgaand sedimenttransport, dat voor een groot deel in de zandvang bij Maas-

bracht wordt afgezet, terwijl er bij Borgharen nagenoeg geen sediment de Grensmaas in komt. Duizendstra en Wilbers [1996] concluderen dat deze daling op jaarbasis ongeveer 1,5 cm bedraagt (gemiddeld over de lengte van de Grensmaas en de breedte van het laagwaterbed). Tot 2017 betekent dit een autonome daling van het laagwaterbed van gemiddeld circa 0,2 m (de snelheid van bodemdaling neemt normaliter af, maar met toenemende afvoeren kan de bodemdaling toenemen: hier is aangenomen dat de bodemdaling constant blijft).

Wilbers [1996] bevestigt op basis van gemeten bodemhoogten over 1978-1995 dat de Grensmaas een erosieve rivier is; opmerkelijk is dat daarbij van een benedenstroomse verplaatsing van de erosie gebieden sprake is. Verder moet onderscheid worden gemaakt tussen de flessenhalzen, waar doorgaans erosie optreedt en de aansluitende wijdere benedenstroomse gebieden waar vaak sedimentatie optreedt. De benedenstroomse zijde van deze wijdere riviergedeelten zijn gevoelig voor erosie, hetgeen recent nog in januari 2003 bij Meers bleek, toen er na het hoogwater leidingen bloot waren komen te liggen.

Bovengenoemde gemiddelde bodemdaling zal doorgaan zodat naar verwachting de gemiddelde bodemligging in 2017 ook ongeveer (of zelfs ruim) 0,2 m lager ligt dan de uitgangssituatie van 1995.

Voor wat betreft de effecten van de ingrepen die bij het NA horen wordt op grond van de beperkte veranderingen in de riviergeometrie verwacht dat de morfodynamiek van de Grensmaas niet wezenlijk zal worden beïnvloed. Deze conclusie werd ook voor het (t.o.v. het huidige NA) iets afwijkende NA in het MER van 1998 getrokken. Daarbij werd aangegeven dat de morfologische activiteit heel gering is en nauwelijks verschilt met de huidige situatie, welke conclusie mede was gebaseerd op berekeningen met het SOBEK-graded model.

Inmiddels kunnen bij het laatste punt kanttekeningen worden geplaatst (zie ook §5.3). Uit de morfologische ontwikkelingen na de hoogwaters van 1993 en 1995 blijkt dat er duidelijk sprake is van morfodynamiek in het zomerbed [Duizendstra, 1998], waarschijnlijk door het transport van fijner materiaal dat gedurende extreme hoogwaters is vrijgekomen door beweging en opbreken van afpleisteringslagen en bij lagere hoogwaters mobiel is. Het afvoerproces blijft dus (uiteraard) van doorslaggevende betekenis voor de morfologische ontwikkelingen.

Een ander effect is de aanslibbing op de weerden die gemiddeld op jaarbasis circa 5 mm zou bedragen zoals blijkt uit de DELWAQ berekeningen voor het MER Grensmaas van 1998. Deze orde van grootte wordt door Van den Berg en Wijngaarden [RIZA, 2000] bevestigd door metingen in de waarden ten noorden van Itteren (4 tot 12 mm aanslibbing). Het NA heeft om bovengenoemde redenen hier waarschijnlijk weinig effect op [MER GRENSMAAS 1998], zodat moet worden verwacht dat deze orde van aanslibbing van de weerden ook zal optreden bij het huidige NA.

Uit de berekeningen blijkt dat de stroomsnelheden bij het NA nauwelijks of niet veranderen ten opzichte van de huidige situatie (1995 met DGR-kaden). Dit is ook een indicatie van het feit dat de morfodynamiek op zich niet noemenswaardig zal veranderen.

5 Kader

5.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beoogt een kader te geven van de te verwachten morfologische effecten van de voorliggende m.e.r.-verkenningen van het huidige Plan Grensmaas door middel van evaluatie van het MER GRENSMAAS 1998. Dit eerdere MER heeft zich vooral gericht op de VKA (Voorkeursaanpak). Bij dat MER is uitgebreid morfologisch onderzoek gedaan in een schaalmodel en zijn berekeningen uitgevoerd met SOBEK-Graded. Opgemerkt moet worden dat ook voor de voorliggende verkenningen SOBEK-Graded berekeningen worden uitgevoerd; deze komen echter niet tijdig beschikbaar om bij de voorliggende bureaustudie te kunnen worden gebruikt. Bij de verdere vergelijking van het Plan Grensmaas met de VKA wordt het EP genomen.

Eerst wordt door vergelijking van de afwijking in ingrepen tussen het EP en de VKA nagegaan op welke locaties het EP (sterk) afwijkt van de VKA. Dit wordt gedaan door vergelijking van het globale stroombeeld en de achterliggende afwijkingen in de rivierverruiming. De resultaten hiervan zijn in beknopte vorm gepresenteerd in tabel 5-1.

Vervolgens wordt het voortschrijdend inzicht in de morfologie van de Grensmaas na uitkomen van het MER GRENSMAAS 1998 kort behandeld (paragraaf 5.3).

De consequenties voor het kader voor de morfologische interpretatie t.o.v. het MER GRENSMAAS 1998 worden in paragraaf 5.4 vermeld, waarin de (hoofd)conclusies van het MER GRENSMAAS 1998 worden bijgesteld ten behoeve van de te verwachten effecten van het EP; ook wordt daarbij aangegeven waar nadere analyse nodig is: deze analyse is vervolgens in de hoofdstukken 6 en 7 uitgevoerd op basis van de berekende stroompatronen met WAQUA [Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek, 2003a]. In hoofdstuk 8 en 9 gebeurt dit voor het MMA en het EPVL.

5.2 Vergelijking ingrepen Plan Grensmaas en VKA

5.2.1 Globale afwijkingen tussen de plannen

Diepe ontgrinding is in de laagwaterbedding van de Grensmaas nauwelijks of 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 ('zomerbedverbreding') en een verlaagd hoogwaterbed ('weerdverlaging') resteert. Dit is de basis van de verkenningen in het Plan Grensmaas.

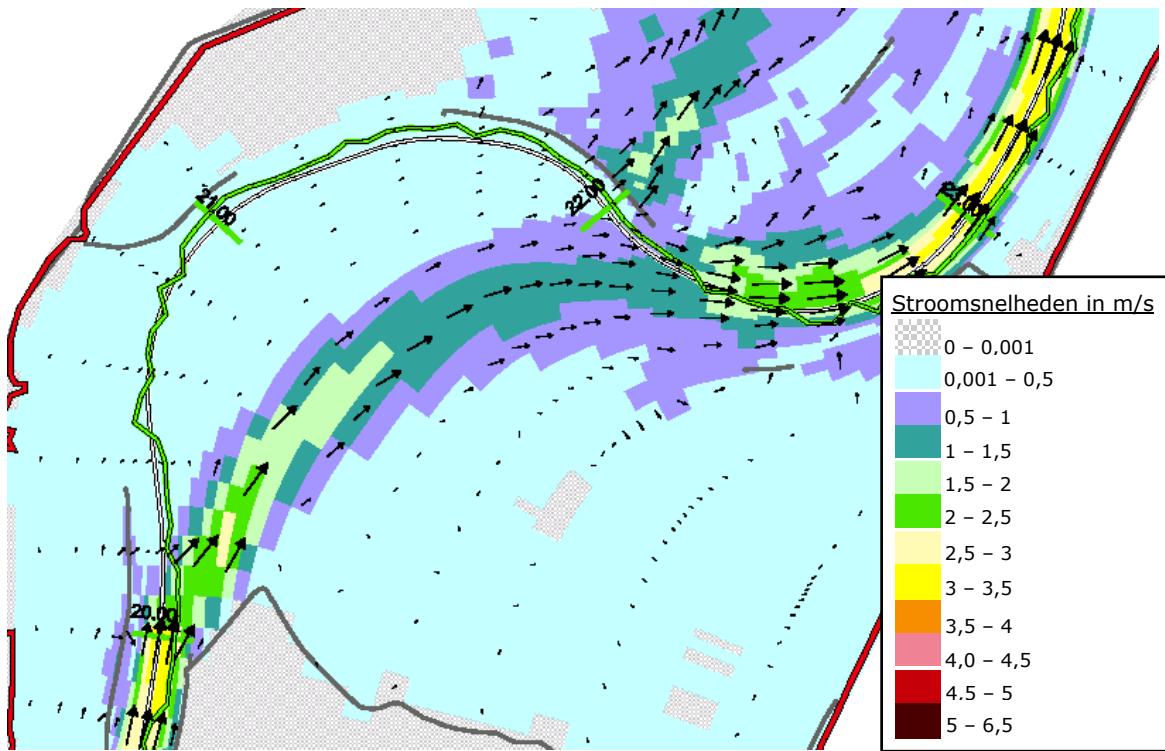
Het Plan Grensmaas en de VKA wijken, globaal bezien, maar weinig af. Dit geldt voor de hoeveelheid te winnen grind: circa 52 miljoen ton grind tegenover circa 50 miljoen ton bij de VKA; daarbij is bij het EP wel sprake van meer vrijkomende (niet vermarktbaar) dekgrond, welke in grotere dekgrondbergingen moet worden geborgen. Verder vindt volgens het Plan Grensmaas over het algemeen wat minder verruiming plaats, doordat een stuk 'overruimte' in het beschermingsniveau is verdwenen: het Plan Grensmaas zit dichterbij de oorspronkelijke hoogwaterdoelstelling van 1/250 jaar. Ook zijn er bij het Plan Grensmaas kleine aanpassingen ge-

pleegd van begrenzingen van vergravingen naar aanleiding van nieuwe informatie over onder meer bodemopbouw en archeologie.

Bij het hier beschouwde EP is sprake van het niet verruimen van de Vlaamse Boertien- locaties (Hochter Bampd, Herbricht en Kotem); die waren bij de VKA wél uitgevoerd. De grootste afwijkingen tussen EP en VKA kunnen nabij deze locaties worden verwacht.

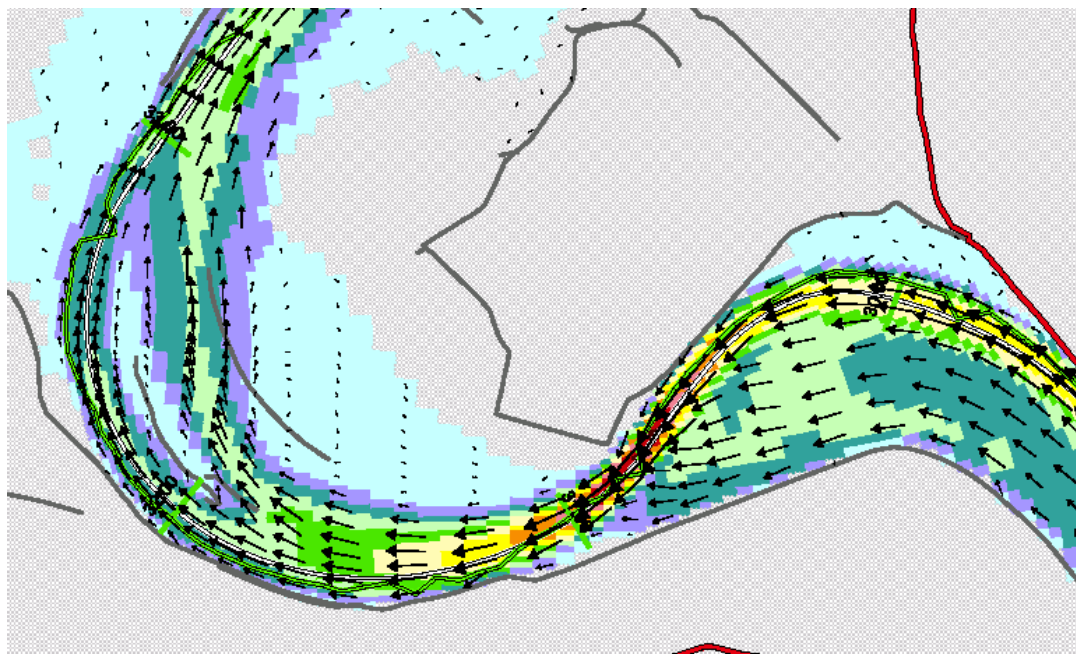
5.2.2 Effect op het stroombeeld

De meest directe vergelijking die bij deze bureaustudie gemaakt kan worden is door vergelijking van het (globale) stroombeeld bij het EP en de VKA, door vergelijking van de snelheidsplots (bovenaanziichten van de verticaalgemiddelde stroomsnelheden) langs het tracé van de Grensmaas voor beide plannen. Bij een grote afwijking wordt vervolgens gekeken naar de oorzaak. Ter illustratie zijn voor een aantal kenmerkende locaties (Itteren, Meers, Berg en Koeweide) de snelheidsplots afgebeeld voor het EP (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden., Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.,** Figuur 5.3 en Figuur 5.4). De significante verschillen tussen het VKA en het EP worden besproken in Tabel 5.1.



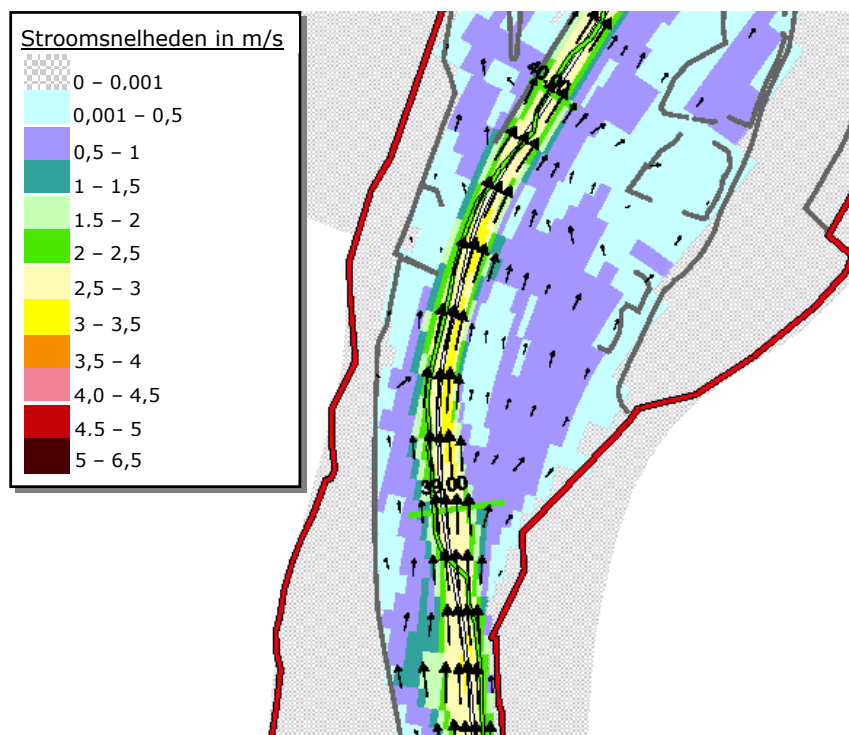
Figuur 5.1 Stroombeeld bij de locatie Itteren in het EP.

In het EP is t.o.v. de VKA sprake van een toename van de stroomsnelheid als gevolg van het niet uitvoeren van de verruiming van Hochter Bampd.



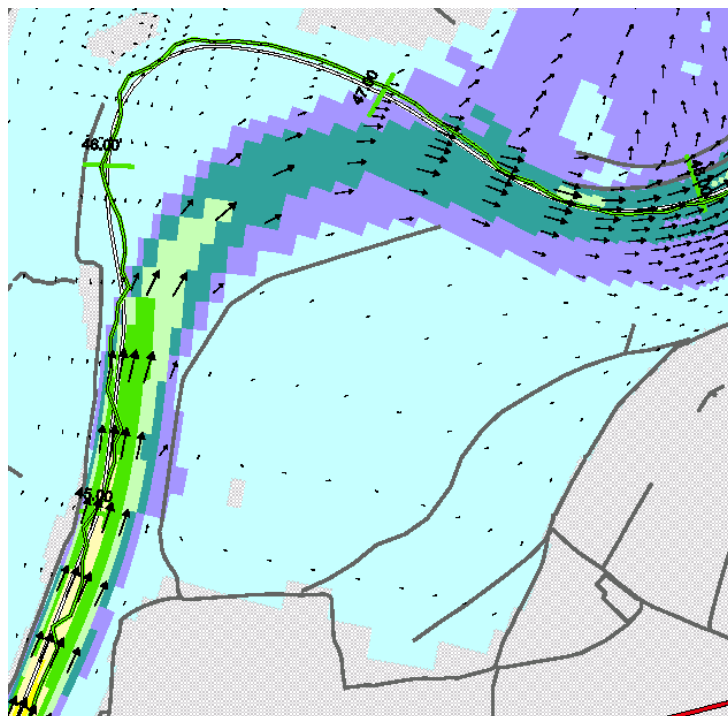
Figuur 5.2 Stroombeeld bij de locatie Meers in het EP.

In het EP is t.o.v. de VKA sprake van een toename van de stroomsnelheid als gevolg van het niet uitvoeren van de verruiming van Kotem en een effectievere rivierverruiming bij Meers.



Figuur 5.3 Detail van het stroombeeld bij Berg - Nattenhoven.

In het EP is de flessenhalswerking bij Berg sterk afgenomen door een beperktere rivierverruiming van Nattenhoven.



Figuur 5.4 Stromingsbeeld bij de locatie Koeweide in het EP.

In het EP nemen de stroomsnelheden bij de instroom naar de Koeweide ('De poort van Koeweide') t.o.v. de VKA af door de verlegging van de kade bij Papenhoven

Tabel 5.1 Overzicht significante afwijkingen in het stroombeeld tussen EP en VKA

locatie	significante afwijking stroomsnelheden tussen EP en VKA				oorzaak
	toename		afname		
	locatie rkm	m/s	locatie rkm	m/s	
Bosscherveld	In het Bosscherveld nabij rkm 15,5	Van 0,5 à 0,75 naar 1,5 à 2			Afname van de ruwheid in de natuurontwikkeling bij Bosscherveld
			Zomerbed ter hoogte van rkm 16 (nabij de bovenstroomse kant van Borgharen Dorp)	Van 4 à 5 m/s naar 2,5 à 3 m/s	- Afname flessenhalswerking door ontbreken van de rivierverruiming Hochter Bampd - Afname van de ruwheid in de natuurontwikkeling bij Bosscherveld, daardoor meer stroming door Bosscherveld en minder door het zomerbed.
Borgharen					
Itteren	Ter hoogte van Itteren – Dorp Rond rkm 19,4	Van 1,5 à 1,75 m/s naar 3 à 3,5 m/s			Versmalling doorstroomprofiel doordat Hochter Bampd niet is verruimd in het EP
	In de binnenbocht van de meanderbocht bij Itteren rond rkm 21,3	Van 0,75 à 1 m/s naar 1 à 1,5 m/s			Stroming meer geconcentreerd richting de binnenbocht doordat Hochter Bampd niet is verruimd in het EP
Aan de Maas	Bovenstroomse gedeelte bocht bij Herbricht rondom rkm 23	Van 1,5 à 1,75 m/s naar 3 à 3,5 m/s			Versmalling doorstroomprofiel doordat Herbricht niet is verruimd in het EP
	Westelijke zijde van Herbricht rondom rkm 23	Van < 0,25 m/s naar 1 m/s			
			Ter hoogte van Aan de Maas – Dorp van rkm 24,5	Van 3,5 à 4 m/s naar 2,5 à 3 m/s	- Afname flessenhalswerking door ontbreken van de rivierverruiming Kotem - In de VKA lijkt de rivier iets te nauw geschematiseerd
			Beneden- strooms van Aan de Maas (rkm 26,8)	Van 3,5 à 4 m/s naar 2,5 à 3 m/s	- Knelpunt opgeheven door afgraven grindeiland - Afname flessenhalswerking door ontbreken van de rivierverruiming bij Kotem

Meers	In de bocht van Kotem rondom rkm 29	Van 2,5 à 3 m/s naar 3 à 3,5 m/s			Versmalling doorstroomprofiel doordat Kotem niet is verruimd in het EP
	Bij Meers – Dorp, rondom rkm 30,8	Van 3,5 à 4 m/s naar 5 à 6,5 m/s			Toename flessenhalswerking door rivierverruiming bij Meers doordat Kotem in EP niet wordt uitgevoerd, terwijl dat bij de VKA wel het geval is
			Buitenbocht Meers, rkm 32	Van 2,25 à 2,5 m/s naar 1,5 à 2 m/s	Stroming is meer over de hele breedte van de bocht verdeeld, daardoor neemt snelheid in de binnenbocht toe en in de buitenbocht af.
	Binnenbocht Meers, rkm 32	Van 0,5 m/s naar 1,5 à 2 m/s			Zie bovenstaande uitleg
Maasband			Bij bovenstroomse aantakking nevengeul, rkm 34	Van 2,5 à 3,0 m/s naar 2 tot 2,5 m/s	In de VKA waarschijnlijk minder nauwkeurige WAQUA-schematisatie van de nevengeul en laagwaterbedding; nevengeul ingang heeft in EP verhoogde drempel
			In nevengeul rkm. 34,7	Van 1,5 à 1,75 m/s naar 0,5 à 1 m/s	Nevengeul trekt minder stroom door ophogen ingang naar nevengeul Maasband.
Urmond	rkm 35,7 – 36,3	Van 2 à 2,5 m/s naar 3 à 3,5 m/s			Versmalde doorgang van het stroomprofiel in het EP
			Bij Berg rkm 38 – 39	Van 6 m/s naar 3,5 m/s	Afname flessenhalswerking door mindere rivierverruiming op de locatie Nattenhoven.
Nattenhoven	Nabij rkm 39, 5 – 40	Van 2,5 à 3 m/s naar 3 à 3,5 m/s			Kleiner doorstroomprofiel in het EP als gevolg van mindere rivierverruiming bij Nattenhoven
			Nabij Obbicht rkm 41,5	Van 5 à 6 m/s naar 4 à 4,5 m/s	Afname flessenhalswerking door mindere rivierverruiming op de locatie Grevenbicht.
Grevenbicht	In het zomerbed rkm 42 – 44,5	Van 1,75 à 2 m/s naar 3 à 3,5 m/s			De nevengeul bij Grevenbicht is in het EP minder effectief dan de afgegraven binnenbocht in de VKA. Daardoor is de stroming meer geconcentreerd in het zomerbed

	Binnen bocht Grevenbicht	Van < 0,25 m/s naar 1,5 à 2 m/s			Bij de VKA trok de stroom over het eiland Elba, in het EP is deze meer tegen de kade gelegen aan de binnenbocht.
Koeweide			Rondom rkm 44,8	Van 3 à 3,5 m/s naar 2,5 à 3 m/s	Door het verleggen van de kade bij Papenhoven wordt lokaal het doorstroomprofiel vergroot
Visserweert			Nabij rkm 49 ter hoogte van Visserweert	Van 3 à 3,5 m/s naar 2 à 2,5 m/s	Door de verdiepte aanleg van de nevengeul trekt deze iets meer stroming, waardoor de snelheid in het zomerbed iets af neemt.
Roosteren			Nabij rkm 51 ter hoogte van Kokkelert	Van 3,5 à 4 m/s naar 2,5 à 3 m/s	Afname flessenhalswerking door mindere rivierverruiming op de locatie Roosteren

Hieruit kan worden opgemaakt dat de grootste afwijkingen bij het EP optreden daar waar de Vlaamse locaties in het EP niet zijn uitgevoerd en net bovenstrooms ervan in de aansluitende flessenhalsen. Verder is er in het algemeen minder sprake van 'flessenhalswerking' doordat de verruiming van de Nederlandse locaties wat kleiner van omvang zijn dan in de VKA. Dit heeft tot gevolg dat:

- de flessenhalswerking bij Bosscherveld, Aan de Maas afneemt en bij Urmond en Nattenhoven sterk afneemt; dit is van groot belang omdat beide laatste flessenhalsen eerst zeer hoge stroomsnelheden kenden (tot 6 m/s), welke nu significant omlaag gaan (tot 3,5 m/s respectievelijk 4,5 m/s);
- de flessenhalswerking bij Meers toeneemt (a.g.v. niet verruimen van Kotem); dit betekent dat alléén Meers overblijft als locatie waar zeer hoge stroomsnelheden optreden (boven 5 m/s);
- de stroomsnelheden op een aantal verruimingslocaties plaatselijk relatief toenemen als gevolg van minder vergraving en/of minder ruwheid (locaties Bosscherveld, Itteren, Meers en Urmond);
- op twee verruimingslocaties nemen de stroomsnelheden plaatselijk relatief toe als gevolg van het niet uitvoeren van de Vlaamse locaties: Itteren (niet uitvoeren Hochter Bampd), Aan de Maas (niet uitvoeren Herbricht).

5.3 Voortschrijdend inzicht t.a.v. morfologie en slibtransport

5.3.1 Overzicht

Het eerste MER Grensmaas is verschenen in 1998, en was gebaseerd op de beste inzichten en gegevens die op dat moment voorhanden waren. Sindsdien zijn er op een aantal fronten ontwikkelingen geweest die het mogelijk maken om nu tot betere voorspellingen te komen dan in 1998. Dit is niet verwonderlijk, omdat de morfologische verschijnselen van breed gegradeerd bodemmateriaal en het transport van slib in de Grensmaas complex is, en er nog voortdurend onderzoek wordt gedaan dat helpt de verschijnselen beter te doorgronden. Dit betekent dat de

morfologische conclusies uit het MER GRENSMAAS 1998, nog afgezien van de afwijkingen in de rivierverruiming tussen het Plan Grensmaas en de VKA, een nadere nuancering behoeven (zie paragraaf 5.4).

Verbeteringen zijn bereikt op de volgende fronten:

(a) Voortschrijding van de "wetenschap"

- Inzicht in zand-grind mengsels (Kleinhans, 2002]
- Verticale sortering [Blom, 2003]
- Transportformules: Wu [2000]
- Afpleisteringslaag op fijn zand [Blom et al, 2003]
- Slib en aanslibbing uiterwaarden [Narinesingh et al ,1999], Asselman [1997] en Middelkoop [1997]

(b) specifieke gegevens over de Grensmaas

- boringen in opdracht van Maaswerken
- Wilbers [1996]; analyse bodemligging Grensmaas met implicaties voor de schatting van het sedimenttransport in Grensmaas
- Duizendstra [1999]: sedimenttransportmetingen Grensmaas
- Van den Berg en van Wijngaarden [2000]: aanslibbing weerden Grensmaas
- Geo-electrische metingen in zomerbed (Maaswerken)
- Oevererosie [de Kramer, 1997]

(c) modelleren:

- SOBEK Graded (ervaring met Zandmaas)
- Slib in SOBEK [Klaassen, 1996; Asselman, 1997a en 1997b]
- SOBEK Graded (ervaringen van Duizendstra & Flokstra met verschillende mengsels; Sloff met Zandmaas)
- Slib in SOBEK [Klaassen, 1996; Asselman, 1997a en 1997b]

Dit wordt hierna kort beschreven en vervolgens in meer detail besproken in de rest van deze paragraaf.

Ten aanzien van het verbeteren van inzicht door voortschrijding van wetenschappelijk onderzoek betreft het onderzoek elders waarvan de resultaten ook voor de Grensmaas toepasbaar zijn. Om te beginnen zijn er twee Ph.D. studies uitgevoerd die beter inzicht hebben opgeleverd enerzijds ten aanzien van het gedrag van zand-grind mengsels inclusief het optreden van beddingvormen en hun rol bij het doorberekenen van afpleisteringslagen [Kleinhans, 2002] en anderzijds een beter inzicht in de rol van verticale gradering in breed gegradeerde mengsels [Blom, 2003]. Dit onderzoek is ondersteund door experimenteel onderzoek in de zandgoot van WL en prototype metingen in de Rijn. De transportformule van Wu et al [2000] lijkt een betere voorspelling van het sedimenttransport in breed gegradeerde mengsels op te leveren. In de zandgoot van het WL heeft experimenteel onderzoek plaatsgevonden naar de morfologische verschijnselen wanneer er fijn materiaal aanwezig is onder een afpleisteringslaag die instabiel wordt. Ten aanzien van het begrip van slibtransport en depositie en de aanslibbing na het uitvoeren van natuurontwikkelingsprojecten is in de afgelopen periode ook een aanzienlijke voor-

uitgang geboekt door een M.Sc studie [Narinesingh, 1995] en twee Ph.D. studies (Middelkoop, 1997; Asselman, 1997).

Ten aanzien van de opbouw van de bodem is een recent onderzoek door NITG van belang, uitgevoerd in het kader van de huidige m.e.r. Analyses van peilingen van de Grensmaas en recente sedimenttransportmetingen bij Maaseik hebben sinds het eerdere MER geleid tot nieuwe inzichten in de grootte van het sedimenttransport in de Maas [Duizendstra en Lee, 1998; Duizendstra, 1999]. Metingen van de bodemopbouw (geo-electrische metingen) hebben het inzicht vergroot in de natuurlijke erosieprocessen die in het verleden in het laagwaterbed zijn opgetreden. Analyse van de oeverligging na hoogwaters heeft meer inzicht opgeleverd in de processen van oever-erosie.

Ten aanzien van modelleren van morfologische processen geldt dat ten tijde van het MER Grensmaas 1998 SOBEK-graded nog een uitgesproken experimentele status had; inmiddels is nader onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van dit model door Duizendstra & Flokstra (1998) en is bij onderzoek in het kader van de Zandmaas [Sloff, 2002 a en 2002b] gebleken dat voor een zandige rivier met toch een duidelijke gradering met dit rekenmodel betrouwbaarder uitkomsten worden verkregen. Tenslotte is het 1d model SOBEK uitgerust met een module voor het bepalen van de sedimentatie van slib in uiterwaarden [Klaassen, 1996; Asselman, 1999a en 1999b].

Hierna worden de verschillende ontwikkelingen wat nader beschreven, waarbij de nadruk ligt op het belang van deze nieuwe ontwikkelingen voor het huidige MER Grensmaas.

5.3.2 Zand-grind mengsels en verticale sortering

Zowel Kleinhans [2002] als Blom [2003] hebben uitgebreid onderzoek gedaan naar het gedrag van breed gegradeerde mengsels. Kleinhans [2002] houdt zich bezig met transportvoorspellers (zie hierna) en het optreden van beddingvormen en hun effect op verticale sortering (het ontstaan en gedrag van afpleisteringslagen). Het werk van Kleinhans naar verticale sortering is vooral beschrijvend, terwijl Blom [2002] meer kwantitatief te werk gaat. Op basis van veldmetingen in de Rijn, waarbij in de ondergrond van de rivier grove lagen werden teruggevonden die herleid konden worden tot de hoogwaters van 1995 en 1998, kan geconcludeerd worden dat in het zomerbed van de Bovenrijn (die enigszins op de Grensmaas lijkt) het sedimenttransport sterk wordt bepaald door verticale sorteringsverschijnselen tijdens hoogwater. Het belang van dit type onderzoek voor de m.e.r. Grensmaas is vooral de betere onderbouwing van de opzet van SOBEK-Graded en de hulp bij de keuze van de verschillende parameters in dit model voor situaties met zowel grind als zand en een brede gradering.

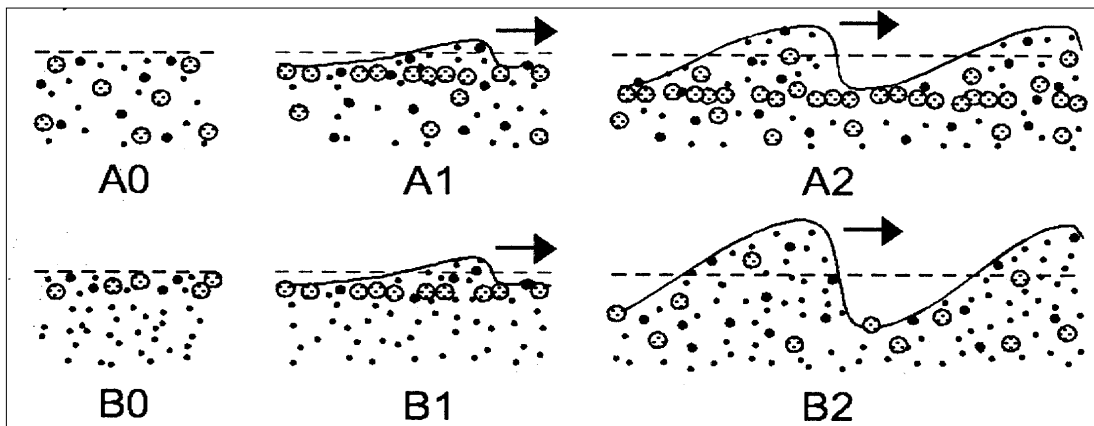
5.3.3 Transportvoorspellers

Sinds het MER GRENSMAAS 1998 zijn enkele nieuwe sediment transport voorspellers ontwikkeld voor rivieren met een breed gegradeerd bodemmateriaal. Kleinhans [2002], die een stochastische transport voorspeller ontwikkelde, heeft deze getoetst aan metingen in de Rijn. De belangrijkste conclusie is dat een sterke hysteresis werd geconstateerd. Dit is ook gevonden bij de gootproeven van Klaassen [1996, 1997], maar wordt niet gesimuleerd met behulp van de huidige en nieuw voorgestelde transportvoorspellers. Bij het gebruik van SOBEK Graded voor de m.e.r. Grensmaas 1998 is vooral gebruik gemaakt van de transport voorspeller van Meyer-Peter&Mueller met een zogenaamde Egiazoroff correctie. Recentelijk is door Wu et al [2000] een

nieuwe transportvoorspeller afgeleid. Scheer et al [2002] hebben deze voorspeller getoetst aan zowel goot- als veldmetingen en vergeleken met andere voorspellers; hun conclusie is dat de formule van Wu et al [2000] beter is dan eerder voorgestelde voorspellers. Het ligt dus voor de hand om deze voorspeller bij de SOBEK simulaties voor de m.e.r. Grensmaas te gebruiken.

5.3.4 Afpleisteringslaag op fijn zand

Een apart onderdeel van het onderzoek van Blom [Blom et al, 2003] was onderzoek naar het gedrag van fijn sediment afgedekt met een laag grof sediment. De resultaten zijn vergeleken met eerdere proeven met een breed gegradeerd mengsel afgedekt door een soortgelijke afpleisteringslaag. Wanneer de afvoer zodanig hoog wordt dat de afpleisteringslaag instabiel is, treedt er een duidelijk verschil op. Indien alleen fijn sediment aanwezig is, zijn de grove korrels niet meer in staat om een grove laag op een lager niveau te vormen, hetgeen wel gebeurt indien een breed gegradeerd mengsel onder de afpleisteringslaag aanwezig is. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 5.5 waar de A-serie hoort bij een sterk gegradeerde onderlaag en de B-serie bij een onderlaag alleen bestaand uit fijn zand.



Figuur 5.5 Verschil in gedrag van een afgepleisterde bedding tijdens hoogwater met een breed gegradeerde onderlaag (A - serie) en fijn sediment (B - serie)[Blom et al, 2003]

Indien alleen fijn materiaal aanwezig is, zal er geen grove laag overblijven die op een lager niveau de transportverschijnselen 'controleert'. Dan is er dus geen afpleisteringslaag.

5.3.5 Transport van slib in rivieren met uiterwaarden

In het MER GRENSMAAS 1998 zijn DELWAQ berekeningen (als nabewerking op met WAQUA berekende stroombeelden) gebruikt om de veranderingen in het transport van slib in de Grensmaas te simuleren. Door Narinesingh [1995] is een simpeler aanpak voorgesteld, die er van uitgaat dat bij het transport van slib vanuit het zomerbed het winterbed in, convectie overheerst ten opzichte van diffusie [zie ook Narinesingh et al, 1999]. De verschillende delen van de weerden zijn geschematiseerd als sedimentatiebekkens. De toepasbaarheid van deze methode is gedemonstreerd via een ijking aan slibtransportgegevens van de IJssel. In een later stadium is deze methode verfijnd door Asselman [1999a en 1999b], Middelkoop [1997] en ook Asselman [1997a] hebben veel onderzoek naar de aanslibbing in de uiterwaarden van de Rijn gedaan, en hun gegevens zijn later gebruikt door Asselman [1997b en 1997b] voor de uitbreiding van SOBEK.

5.3.6 NITG database van het bodemmateriaal van de Grensmaas

TNO-NITG [Gruijters et.al, 2002] heeft in het kader van het voorliggende MER Grensmaas een geologisch ondergrondmodel Grensmaas gemaakt, waarbij een veelheid van gegevens zijn geanalyseerd. Hiermee is een betrouwbaar beeld van de ondergrond van de Grensmaas verkregen. Enkele conclusies zijn:

- Het grootste deel van het grindpakket onder de Grensmaas (tot aan Koeweide) kent een aanzienlijke variatie in korrelgrootte-verdeling, ondanks dat het tot één formatie (formatie van Beegden) behoort;
- Er bestaan grote verschillen in diepteligging over het dwarsprofiel van de huidige bedding van de Grensmaas, waardoor de dikte van het grindpakket onder de bedding tot aan het substraat ook sterk varieert.

Ten behoeve van het schatten van benodigde beschermingsmaatregelen in enkele flessenhalzen, zijn de NITG-data gebruikt om riviergedeelten op te sporen waar tenminste 2 m grind (over een lengte van minimaal 500 m) aanwezig is, zie paragraaf 6.6.

5.3.7 Sedimenttransporten en beddingerosie in de Grensmaas

Door Duizendstra zijn in de 90-er jaren sedimenttransportmetingen uitgevoerd; in 1999 is door hem [Duizendstra, 1999] een vergelijking gemaakt tussen transportvoorspellingen in de Grensmaas volgens een aantal methoden: 1) op basis van Q-S relaties (afgeleid uit zijn transportmetingen), 2) uit bewerkte bodemveranderingen (bodemplodingen over een langere periode). 3) bepaald uit het schaalmodel (meting van transporten in het schaalmodel) en 4) berekend met SOBEK-graded. Deze studie heeft veel interessante conclusies opgeleverd:

- De transporten zijn in werkelijkheid veel hoger dan op basis van SOBEK-graded berekend: SOBEK-graded was in die tijd nog volop in ontwikkeling en nog niet in staat transportprocessen van gegradieerd materiaal voldoende nauwkeurig te reproduceren;
- De gemeten transporten en uit de bodemligging bepaalde transporten komen goed overeen;
- De transporten in het schaalmodel zijn eveneens niet representatief (een omgekeerd patroon van sedimenttransport tussen de was en val dan bij de metingen): waarschijnlijk is het model onvoldoende afgepleisterd geweest;
- Transporten tijdens de val van het hoogwater zijn groter dan tijdens de was: dit kan worden verklaard uit het naijlen van het opbreekproces van de pleisterlaag, waardoor een vertraagde aanbodtoename van het sediment optreedt;
- In bochten wordt een sterke uitzeving van materiaal geconstateerd: buitenbocht transport van grof en in binnenbocht van fijn materiaal;
- In de periode van 1978-1995 wordt, globaal gezien, over de gehele Grensmaas erosie geconstateerd: het transport neemt daarbij vrij gelijkmatig toe van 0 bij Borgharen tot circa 50.000 m³/s per jaar (inclusief poriën) bij Maaseik.
- Wanneer geen 'residu' sediment in het systeem aanwezig is, zoals enige jaren na een sterk hoogwater, treedt transport pas op bij een afvoer van rond 1200 m³/s en meer. Wanneer er wel residu sediment aanwezig is, is sprake van transport bij afvoeren vanaf circa 300 m³/s.

De gemeten transporten geven een gemiddelde daling van de laagwaterbedding die globaal $50.000 / 80 \cdot 45000 = 0,015$ m per jaar bedraagt. In anderhalve eeuw is dat rond de 2 m. Bij Borgharen is in anderhalve eeuw een verlaging van circa 6 m geconstateerd: dit moet dus grotendeels worden toegeschreven aan menselijke activiteiten (zand en grindwinning, versmalling van het zomerbed en vermindering van het sediment aanbod van bovenstrooms); anderzijds is ook de autonome daling, welke dus circa 0,015 m per jaar zou kunnen bedragen, zeker niet als verwaarloosbaar te bestempelen.

5.3.8 Aanslibbing in weerden Grensmaas

Van den Berg et al [2000] hebben onderzoek uitgevoerd naar slibsedimentatie in de Grensmaas. Dit betreft de sedimentatiesnelheid in de weerden als ook de verontreinigingen van het sediment. Metingen in de weerd ten noorden van Itteren (met radionucliden) indiceren een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 0,4 tot 1,2 cm per jaar. Een dergelijke sedimentatiesnelheid wordt karakteristiek geacht voor de huidige weerden in de Grensmaas. Overigens wordt door Middelkoop [1997] een snelheid van enige mm's per jaar aangegeven. Na herinrichting wordt verwacht dat deze aanslibbing versterkt zal optreden in de verruimingslocaties, waarbij door Van den Berg et al [2000] wordt aangegeven dat deze dan gemiddeld enkele centimeters per jaar zou kunnen zijn, een waarde die thans in de lager gelegen delen van de weerden wordt geconstateerd.

Bij de was van hoogwaters is sprake van veel slib; tijdens de piek en vooral tijdens de val is er relatief weinig slib in het water. Uit de metingen blijkt dat de verontreinigingen afnemen bij een hoger afvoerniveau, omdat dan veel relatief schoon geërodeerd fijn materiaal wordt meegevoerd. Door variatie van de sedimentatiesnelheden op de weerden kan de dikte van de afzettingen sterk variëren. Overigens zal het vers afgezette slib veelal later weer worden afgevoerd in gebieden met voldoende stroomsnelheden. Dit geldt met name in het zomerbed, waar geen blijvende aanslibbing optreedt.;

5.3.9 Geo-electrische metingen in zomerbed van de Grensmaas

Dank zij aanvullende metingen van de bodemopbouw, vooral door de uitgevoerde 'geo-electrische' metingen, is er thans meer inzicht in de erosieverschijnselen die zich in het verleden hebben voorgedaan. Kenmerkend zijn de zogenaamde 'grind-pockets' die de vorming van locale erosiekuilen tot een diepte van orde 10 m laten zien; deze kuilen zijn na het ontstaan weer opgevuld met toutvenant, zodat een grind-pocket resteert. Deze erosieverschijnselen hebben zich vooral in het bovenstroomse deel van de Grensmaas voorgedaan (ongeveer tot voorbij Nattenhoven), waar de laag toutvenant dun en soms nagenoeg afwezig is (vooral als gevolg van grindwinning) en er tijdens hoogwater hevige erosie in het fijne tertiaire zand is opgetreden.

5.3.10 Oevererosie langs de Grensmaas

Oevererosie wordt in het MER GRENSMAAS 1998 nauwelijks in beschouwing genomen. Toch hebben meerdere onderzoekers zich hiermee bezig gehouden. Daarbij zijn niet alleen historische gegevens gebruikt, maar zijn is ook de integriteit van de oevers bij de hoogwaters van 1993 en 1995 nagegaan. Een goede overzicht biedt De Kramer [1997]. Na analyse van luchtfoto's, kaarten en veldwaarnemingen over de periode 1964-1986 en 1986-1994 concludeert hij dat er geen noemenswaardige erosie optreedt over 70 % van de linker en rechter Grens-

maasoevers tezamen; aan Vlaamse zijde is deze nog kleiner dan aan Nederlandse zijde. Slechts bij enkele procenten van de totale lengte is er sprake van een erosie groter dan 1,5 m per jaar. Dergelijke erosie treedt overigens vooral bij sterke hoogwaters op. Daarbij gaat het steeds om de onverdedigde of deels verdedigde binnenbochten; er zijn daarvoor meerdere redenen:

- de buitenbochten zijn doorgaans vastgelegd met een oeeververdediging;
- als gevolg van vastleggingen is de rivier relatief te recht (dit bevordert de binnenbochten-erosie);
- in de binnenbochten kan de stroom vaak 'binnendoor' steken over de weerden ter plaatse vanaf een 'bank-full' afvoer van circa 1200 m³/s (de weerden ontbreken vaak aan de buitenbochtzijde); hierdoor kunnen de hoogste stroomsnelheden langs de binnenbocht oevers optreden.

Buitenbochten zullen alleen eroderen wanneer de verdediging heeft gefaald; door regulier onderhoud is hier tot dusverre (nog) geen sprake van geweest.

5.3.11 Schaalmodel

Het schaalmodel heeft waarschijnlijk te weinig afpleistering vertoond. Dit betekent onder meer dat de tijdschaal van de processen in het model niet representatief is geweest.

5.3.12 Modellering van slib transport in langere riviergedeelten

Op basis van de aanpak van Narinesingh [1995] is een uitbreiding van het SOBEK model gemaakt [Klaassen, 1998; Asselman, 1999a en 1999b]. Deze module is inmiddels ingezet voor het RvR project [Anonymus, 2000]. Op basis van de opgedane ervaring zou deze SOBEK uitbreiding ook voor de modellering van slibtransport en aanslibbing van de weerden in de Grensmaas kunnen worden ingezet. In het kader van de huidige bureaustudie morfologie wordt dit echter niet gedaan, maar het blijft zeker een optie bij nader onderzoek naar de aanslibbing van de weerden langs de Grensmaas.

5.4 Consequenties voor de morfologie

5.4.1 Mate van overeenkomst EP en VKA

In grote lijnen komt het EP redelijk goed overeen met het VKA, zeker voor wat betreft groot-schalige morfologische verschijnselen. De flessenhalswerking is bij het EP minder groot (Urmond en Nattenhoven), met uitzondering van de flessenhals bij Meers waar de stroomsnelheid bij het EP groter is dan bij het VKA door het niet meenemen van de verruiming van Kotem. In het EP is afwisseling van flessenhalzen (stroomversnelling) en sterke verruiming (stroomvertraging) dan ook minder sterk. Het beeld is echter complex omdat de Vlaamse Boertien-locaties wel in het VKA zijn meegenomen en niet in het EP. Dit heeft bij Meers, zoals hiervoor aangegeven, weer tot gevolg dat de flessenhalswerking juist wordt versterkt. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de nuanceringsen die kunnen worden gemaakt ten aanzien van het MER 1998 op basis van bovengenoemde verschillen.

5.4.2 Conclusies voortschrijdend inzicht

Het voortschrijdend inzicht geeft meer zicht in de mate van morfodynamiek van de Grensmaas: deze is groter dan destijds was aangenomen. Bij aanwezigheid van residu-sediment kan ook bij

lagere afvoeren reeds transport optreden. Bovendien is bij hoogwaters, wanneer de afpleisteringslaag is opgebroken en tijdens de val van het hoogwater het bodemtransport zeker niet verwaarloosbaar. Door de globale toename van het transport in benedenstroomse richting is over het geheel gezien sprake van algehele erosie van het laagwaterbed (orde 1 à 2 cm per jaar).

Uit de aanwezigheid van grindzakken in de bedding blijken in het verleden sterke erosieprocessen te zijn voorgekomen; verwacht wordt dat dit zich ook in de toekomst zal blijven voordoen.

Uit nadere gegevens en studies naar oevererosie blijkt dat na hoogwaters soms erosie wordt geconstateerd: deze is echter vooral geconcentreerd aan de (onverdedigde) binnenbochten van de Grensmaas aan Nederlandse zijde en blijft doorgaans beperkt tot enige meters.

5.4.3 Nuancering conclusies VKA

In onderstaande tabel is een nuancering gegeven van de morfologische conclusies zoals die in het MER GRENSMAAS 1998 zijn vermeld.

Tabel 5.2 Nuancering van de conclusies uit het MER '98

onderwerp	conclusies MER GRENSMAAS 1998	nuancering conclusies t.a.v. het Eindplan Grensmaas
Veranderingen erosie langs de oevers en in het lengteprofiel	beschermingen worden aangebracht op die plaatsen die ongewenste erosie vertonen	geen verandering in deze strategie: de omvang van de beschermingen veranderen wél als gevolg van het gewijzigde plan
Veranderingen thalweg	sterkste effecten in de brede delen en vooral door sedimentatie	door grotere sedimenttransporten zijn thalwegverplaatsingen ook als gevolg van erosie mogelijk
	thalwegverplaatsing is traag	door grotere sedimenttransporten zijn de verplaatsingen mogelijk sneller
	Itteren: zeer langzame verplaatsing mogelijk van thalweg naar de binnenbocht	door het niet uitvoeren van Herbricht in het EP is bij Itteren sprake van een sterkere tendens tot thalwegverandering richting rechteroever
	Koeweide: relatief snellere thalwegverplaatsing mogelijk naar de binnenbocht	door verruiming bij Papenhoven minder dynamiek te verwachten
	Grevenbicht: thalwegverplaatsing waarschijnlijk door geulvorming en door de binnenbocht gaan van de stroming bij hoge afvoeren	thalwegverplaatsing niet waarschijnlijk door kleinere vergraving van de locatie door instandhouding Elba, dit ondanks de aanleg van de nevengeul (deze trekt minder stroom dan de laagwaterbedding)
Sedimenttransport	het sedimenttransport van grof	Het huidige transport van toutve-

	materiaal in de Huidige Situatie (HS) is uiterst gering	nant is aanzienlijk groter dan destijds was aangenomen.
	het sedimenttransport is in VKA waarschijnlijk minder dan in HS	Door uitvoering van het EP zal in de nauwe delen een stroomsnelheidstoename ontstaan, waardoor daar de transportcapaciteit toeneemt. Het materiaal zal overigens grotendeels in de verwijde delen neerslaan zodat per saldo het netto transport dat de Grensmaas op jaarbasis verlaat kan afnemen.
	slib wordt evengoed doorgespoeld in VKA als in HS	Mogelijk treedt er aanslibbing op in het zomerbed t.p.v. sterke verruiming. Nagegaan moet worden of dat bij het volgende hoogwater weer wordt geërodeerd.
	neerslag van slib op hogere gronden is minder door daling van waterstanden in VKA	daling waterstanden nu minder (overruimte eruit gehaald) dus meer kans op slibafzetting dan bij VKA (wel minder afzetting dan in NA)
verandering algehele morfodynamiek	in HS diep ingesneden geul met lage dynamiek; in VKA vooral in Koeweide opspitsen in meerdere geulen en toename dynamiek	door niet uitvoeren Hochter Bampd ook bij Itteren een meergeulen systeem mogelijk met tendens van stroming door binnenbocht en een grotere morfodynamiek
	uitzeving van materiaal in sterk verwijde delen met grover materiaal bovenstrooms en fijner benedenstrooms; het grove materiaal komt het systeem niet meer uit	geldt globaal ook voor EP: wel nuancering t.a.v. grof sediment dat bij extreem hoogwater wellicht benedenstrooms toch uit het Grensmaas-systeem kan worden getransporteerd.
optimaal riviersysteem uit oogpunt van dynamiek?	VKA is optimaal	afwisseling vernauwingen en verwijdingen is in EP minder geprononceerd dan VKA, waardoor de morfodynamiek zich meer gematigd en meer ruimtelijk verspreid ontwikkelt
is het plan handhaafbaar?	systeem is handhaafbaar met de genomen beschermingsmaatregelen	dit zal zeker voor het EP gelden (zie voorgaande punt)
gevolgen van uitvoering VKA	invloed in lengterichting is beperkt; er wordt geen duidelijke uitvoeringsvolgorde aangegeven	belangrijk is inzicht te hebben in hoofdprincipes (eerst grote verwijding(en) benedenstrooms

Uit dit overzicht komt een aantal punten naar voren waarin het EP zich onderscheidt van het VKA. Dit is van belang voor de verdere beoordeling van het EP en daarom zijn deze punten nader geanalyseerd. Het betreft de volgende onderwerpen:

- Het nader uitwerken van gebieden met risico's ten gevolge van bodem- en oevererosie, waarbij de aandacht uitgaat naar de standzekerheid van de kaden. Verder is het van belang nader aan te geven welke beschermingsmaatregelen nodig zijn. Deze analyse wordt uitgevoerd aan de hand van de stroombeelden bij het EP bij een afvoer van 1/250 jaar. Opgemerkt wordt dat geen aandacht wordt gegeven aan de risico's van constructies (leidingen, brugpeilers): deze dienen van een zware verdedigingen te worden voorzien (1/1250 jaar afvoer), welke niet of nauwelijks worden beïnvloed door de onderscheiden alternatieven. Dekgrondbergingen worden eveneens niet in beschouwing genomen: deze dienen zo nodig eveneens van een bescherming te worden voorzien, maar de risico's blijven in dit geval beperkt, zodat monitoring kan worden overwogen met het treffen van maatregelen achteraf. Dit onderwerp wordt verder behandeld in §6.6.
- Het nader uitwerken van mogelijke verplaatsingen van de thalweg. Deze analyse wordt uitgevoerd op basis van asymmetrie van de verandering van schuifspanningen in het morfologisch actieve gebied waarbij het EP wordt vergeleken met het NA. De analyse wordt uitgevoerd voor de 1/50-jaars afvoer. Dit onderwerp wordt verder behandeld in § 6.3.
- Sedimenttransport- en morfologische berekeningen worden uitgevoerd met het rekenprogramma SOBEK-graded. De modellering en berekeningsresultaten worden als apart onderdeel van dit rivierkundig onderzoek gerapporteerd.
- Slibtransport en mogelijke aanslibbing in gebieden met stroomverlamming worden geschat op basis van bestaand empirisch en analytisch onderzoek, en eerder onderzoek in het kader van de MER 1998. Qua aanpak wordt aangesloten op de methode van Narinesingh (1995); qua invoer wordt gebruik gemaakt van de resultaten van de recente WAQUA berekeningen. Dit geldt zowel voor hoogwater (analyse aanslibbing weerden en doorvoer naar benedenstrooms) als voor de hele range van afvoeren van laagwater tot hoogwater (voor de analyse van de eventuele aanslibbing in de verbredingen) Dit onderwerp wordt behandeld in § 6.4.
- Mogelijke veranderingen van het algehele morfodynamische beeld worden geanalyseerd op basis van veranderingen van het morfologisch active oppervlak van het EP ten opzichte van het NA. Ook deze analyse wordt uitgevoerd voor een 1/50-jaars afvoer. Dit onderwerp wordt behandeld in § 6.2.
- De invloed van mogelijke veranderingen van de erosiebasis (de gemiddelde waterstand in de Grensmaas ter plaatse van de locaties waar zijbeken uitmonden) op zijbeken wordt geëvalueerd op basis van de snelheid van voortplanting van bodemverstoringen in bovenstroomse richting. Dit onderwerp wordt behandeld in § 6.5.
- Op basis van de morfologische invloed van uitgevoerde locaties op het benedenstroomse gebied wordt nagegaan of er op grond van de riviermorfologie een voorkeur bestaat voor een bepaalde uitvoeringsvolgorde van de beoogde plannen. Andere factoren die mogelijk van invloed zijn op de uitvoeringsvolgorde, zoals bedrijfseconomische of bestuurlijke overwegingen) worden hier niet behandeld. Dit onderwerp wordt behandeld in § 6.7.
- Uitvoeringsvolgorde

Getracht wordt aan de hand van hydraulische en morfologische overwegingen te komen tot een voorkeur voor de uitvoeringsvolgorde op basis van rivierkundige principes, zonder rekening te houden met eventuele beperkingen t.a.v. de mogelijke uitvoering (zoals: economie, vergunningen en aanbesteding).

6 Morfologische effecten EP

6.1 Algemeen

6.1.1 Bodemtransport in de Grensmaas

De morfologische processen in de Grensmaas worden bepaald door het sedimenttransport, en dan met name door de variatie daarin in tijd en ruimte. Het specifieke karakter van de Grensmaas als grindrivier met een sterk gevarieerde beddingopbouw maakt dit sedimenttransport erg complex: naast de variatie in transport, varieert ook de bodemsamenstelling sterk. Door selectief transport van het sterk gegradeerde bodemmateriaal, waarbij de kleinere korrels eerder en in grotere mate bijdragen aan het transport dan de grovere korrels, vindt uitzeving van de bovenste bodemlaag plaats waardoor een afpleisteringslaag wordt gevormd. Deze laag van grof grind beschermt de onderliggende bodem. Boven een bepaalde afvoer komt deze afpleisteringslaag echter ook in beweging en wordt hier en daar als het ware opgebroken. Hierdoor wordt het onderliggende fijnere sediment opgenomen en getransporteerd.

De laag onder de afpleisteringslaag bestaat doorgaans uit toutvenant (sterk gegradeerd zand/grind mengsel); hieronder kunnen resistente bodemlagen (zoals mergel en Boomse klei) aanwezig zijn maar kan ook fijn tertiair zand.

Bij een afvoer boven 300 m³/s kan bodemtransport optreden van "residu" sediment dat tijdens eerdere hoogwaters is geërodeerd en achtergebleven op de afpleisteringslaag in de Grensmaas [Duizendstra, 1999]. De afpleisteringslaag zelf blijft bij deze afvoeren boven 300 m³/s en tot ongeveer 1200 m³/s in tact. Boven ongeveer 1200 m³/s breekt de pleisterlaag op en neemt het transport sterk toe.

6.1.2 Referentie voor morfodynamiek

De morfologische activiteit onder het bestaande hydrologische regiem wordt dus sterk bepaald door de afpleisteringslaag. Bij de inschatting van de verandering van het morfologisch actieve bodemoppervlak wordt uitgegaan van de kritische schuifspanningen van deze afpleisteringslaag. In de volgende paragraaf (6.2.1) wordt aangegeven hoe deze schuifspanningen bij benadering kunnen worden afgeleid uit de kritische schuifspanningen voor het tout-venant (voor deze laatste bestaat een standaard nabewerkingsprogramma dat door De Maaswerken is toegeleverd). De kritische schuifspanningen zijn nauwer gerelateerd aan de morfodynamiek dan de verticaalgemiddelde stroomsnelheden. Bij zomerbedverbreding en het afgraven van weerden zal het tout-venant veelal aan de oppervlakte komen en worden blootgesteld aan de stroming in de Grensmaas. Na enig transport zal zich ook hier weer een afpleisteringslaag vormen (met een toenemende diameter bij toenemende stroombelasting, tot het moment dat de afpleisteringslaag wordt opgebroken). De hier gevolgde bepaling van de morfologische activiteit, gericht op een aanwezige afpleisteringslaag geeft dus vooral een beeld van de dynamiek nadat zich weer een zekere evenwichtssituatie heeft ontwikkeld; direct na gereedkomen van de rivierverruiming zal het morfologisch actieve areaal aanzienlijk groter zijn.

Lokaal, in bochten, zullen grind- en zandbanken kunnen ontstaan als gevolg van uitzeving van beddingmateriaal (fijnere fracties worden naar de binnenbocht getransporteerd en grovere frac-

ties naar de buitenbocht); in de binnenbochten zal daarom ook sprake kunnen zijn van meer morfodynamiek dan met de voornoemde methode kan worden voorspeld.

In deze bureaustudie is een praktische keuze gemaakt voor het representatieve afvoerniveau waarbij de mobiliteit wordt geanalyseerd. In overleg met De Maaswerken is gekozen voor de afvoer met een frequentie van 1/50 jaar (stationair), overeenkomende met een afvoer van 2710 m³/s bij Borgharen. Bij deze keuze speelde de tijdige beschikbaarheid van de uitwerkingen van het hydrodynamische (WAQUA) model een rol. Hoewel deze afvoer in feite te hoog om als representatief te kunnen worden gezien voor morfologische ontwikkelingen, is deze keuze toch verantwoord omdat de stroomsnelheden in de Grensmaas bij lagere hoogwaters niet sterk afnemen.

Kenmerkend voor het Eindplan Grensmaas is de ten opzichte van de huidige situatie sterkere afwisseling van flessenhalzen en vergravingslocaties. Door de verhangverkleining in een vergravingslocatie treedt in aansluitende bovenstroomse flessenhals een verhangversterking op, met bijgevolg grotere stroomsnelheden en een sterkere eroderende tendens. In sommige gevallen zal dit ertoe leiden dat deze flessenhalzen moeten worden verdedigd. In de vergravingslocaties nemen de stroomsnelheden ten opzichte van de huidige situatie af en is sprake van een sterkere tendens tot sedimentatie. Daarbij kan ingeval van zeer grote vergravingen sprake zijn van een tendens tot bochtafsnijding door de hoofdstroom. Als dit optreedt, kan thalwegverlegging plaatsvinden. Een ander fenomeen is dat benedenstrooms van de vergraving de stroming in de verwijding zich weer bij de stroming uit de laagwaterbedding voegt, waardoor extra erosiecapaciteit aanwezig is door de toenemende stroomsnelheden in benedenstroomse richting en het relatief sedimentarme water. Bij dit laatste moet worden aangetekend dat de stroomsnelheden over de verruimingslocaties dusdanig laag kunnen zijn (en dat wordt in de onderhavige studie ook bevestigd) dat er geen transport plaatsvindt. Er kan dan terugschrijdende erosie vanuit de samenvloeiing optreden; deze zal echter maar langzaam kunnen insnijden in de verruimingslocatie (zo dit al gebeurt) omdat de stroomsnelheden daar relatief laag zijn.

6.2 Morfologisch actief oppervlak

6.2.1 Achtergrond

Stabiliteit van het toutvenant

Met behulp van het standaard-nabewerkingsprogramma voor de WAQUA rekenresultaten [Royal Haskoning & Meander Advies en Onderzoek, 2003a] zijn overschrijdingen van kritieke schuifspanningen bepaald. De kritische schuifspanningsparameter ('Shields-parameter ψ ') is daarbij op 0,055 gesteld. Bij dit belastingsniveau is sprake van beginnend sedimenttransport. Voor het tout-venant is een karakteristieke diameter aangehouden van 0,0148 m, ongeveer overeenkomend met de D_{50} . Deze waarde was ingesteld in de GIS nabewerkingsroutine (AML) om de boven-kritische bodemschuifspanningen in kaart te brengen. De kritische schuifspanning τ_c is daarmee 13,12 N/m² volgens de formule:

$$\tau_c = \Psi \Delta \rho g D \quad (\text{Vgl. 6-1})$$

waarin,

τ_c = kritische schuifspanning [N/m²]

ψ = Shields-parameter = 0,055 voor het begin van transport bij grof materiaal [-]

- Δ = specifieke dichtheid bodemmateriaal [-]
 ρ = dichtheid water = 1000 [kg/m³]
 g = zwaartekrachtsversnelling [m/s²]
 D = karakteristieke diameter bodemmateriaal [m], bijvoorbeeld D_{50} (= de korreldiameter die door 50 (volume)% van de korrels wordt onderschreden)

De actuele schuifspanning wordt door het nabewerkingsprogramma bepaald als:

$$\tau = \rho g \left(\frac{u}{C_{90}} \right)^2 \quad (\text{Vgl. 6-2})$$

met

- τ = actuele schuifspanning [N/m²]
 u = locale verticaalgemiddelde stroomsnelheid [m/s]
 C_{90} = Chezy-ruwheidscoëfficiënt, gerelateerd aan de D_{90} [m^{0.5}/s]

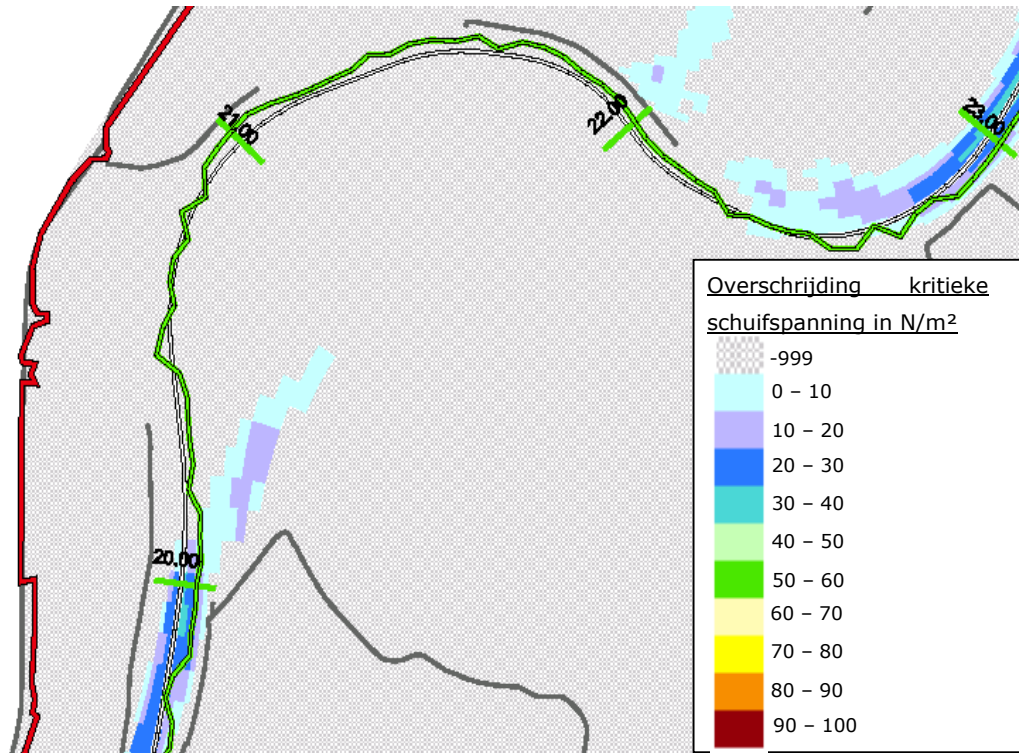
C_{90} is gedefinieerd als:

$$C_{90} = 18 \log \frac{12 h}{3 D_{90}} \quad (\text{Vgl. 6-3})$$

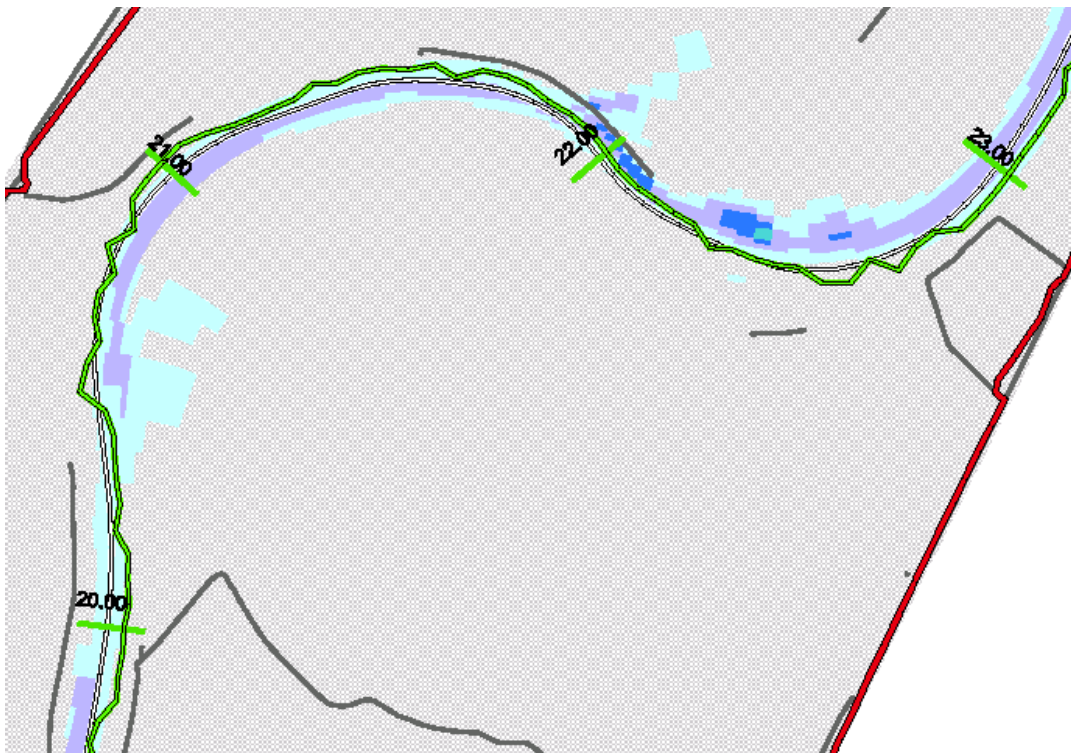
met

- h = lokale waterdiepte
 D_{90} = korreldiameter die door 90 (volume)% van de korrels wordt onderschreden [m]
 Opmerking: voor de Grensmaas is in de programmatuur voor D_{90} een waarde van 0,0627 m aangehouden.

Met deze formule wordt de effectieve bodemschuifspanning op het toutvenant bodemmateriaal berekend (bijvoorbeeld van belang voor het materiaaltransport) en wordt de beddingruwheid als gevolg van de aanwezigheid van grindduinen e.d. buiten beschouwing gelaten.



Figuur 6.1 Overschrijding van de kritische schuifspanning in het EP op de locatie Itteren



Figuur 6.2 Overschrijding van de kritische schuifspanning in het NA op de locatie Itteren

De kritische verticaalgemiddelde stroomsnelheid voor het toutvenant is vervolgens hieruit af te leiden door de relatie:

$$u_c = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \frac{C_{90}}{\sqrt{g}} \quad (\text{Vgl. 6-4})$$

met,

u_c = kritieke (verticaalgemiddelde) stroomsnelheid [m/s]

C_{90} = Chezy-ruwheidscoëfficiënt [$\text{m}^{0.5}/\text{s}$]

De C-waarde is afhankelijk van de bodemruwheid en van de waterdiepte. Bij hoogwater zal C hiermee in het laagwaterbed liggen in de buurt van $50 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Dit betekent dat de kritieke stroomsnelheid voor het begin van transport van het toutvenant rond de 2 m/s zal liggen. Ook lijkt de aangehouden diameter aan de kleine kant: zo bleek uit metingen bij Maaseik [Duizendstra, 1999] dat de gemiddelde D_{50} circa 20 mm was en deze varieerde nauwelijks tijdens het passeren van een hoogwater. Praktisch gesproken kan daarmee worden aangehouden dat pas vanaf een stroomsnelheid van circa 2 m/s enig transport van betekenis kan optreden in het niet afgepleisterde toutvenant.

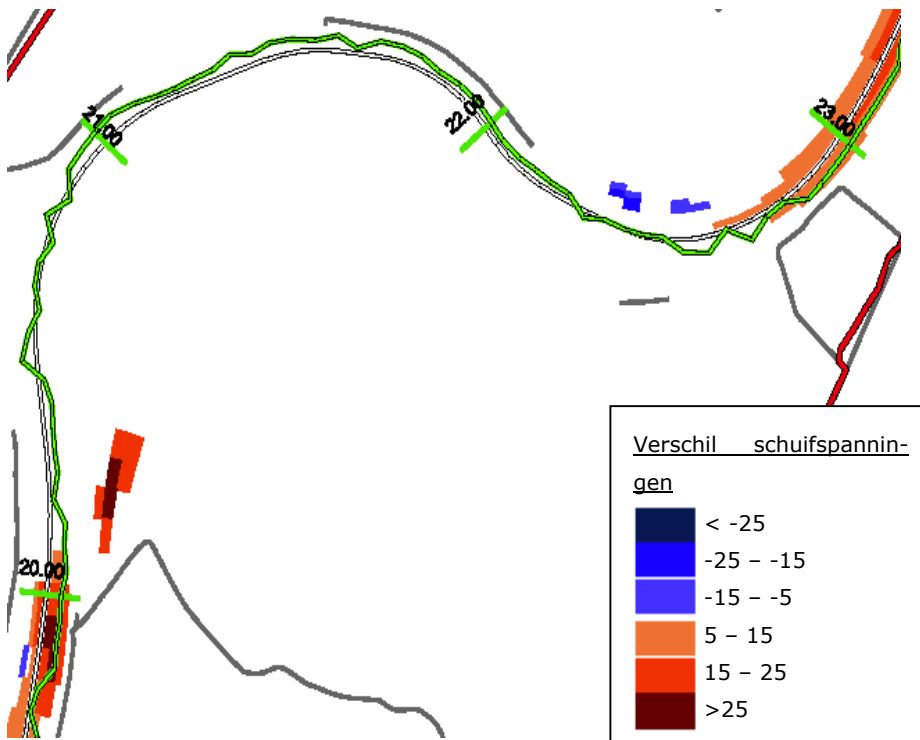
Stabiliteit van de afpleisteringslaag

In de praktijk zal de kritische stroomsnelheid overigens hoger zijn, omdat er vergroving van de toutvenant zal optreden, waardoor deze stroomresistenter wordt naarmate zich een grovere afdeklaag (afpleisteringslaag) zal hebben gevormd. Uit eerder onderzoek [Klaassen, 1981] is bekend dat de kritische schuifspanning kan oplopen tot circa 21 tot 33 N/m^2 , alvorens het materiaal zal transporteren (na opbreken van de pleisterlaag). Voor een gemiddelde kritieke schuifspanning van 27 N/m^2 correspondeert dit bijvoorbeeld bij benadering met een kritieke stroomsnelheid van ruim 2,5 m/s.

Niet in alle gevallen is er sprake van een ideale afpleistering, bijvoorbeeld voor het in de Grensmaas aanwezige 'residu-sediment' na een hoogwater (zie paragraaf 5.3), in bochten (als gevolg van uitzeving) en na vergraving (als er nog geen vergroving heeft plaatsgevonden). In die gevallen zal er ook door lagere schuifspanningen dan de hierboven genoemde transport kunnen plaatsvinden. Dit is in het navolgende verder buiten beschouwing gelaten.

Om met de aanwezigheid van een afpleisteringslaag rekening te houden is de volgende werkwijze aangehouden. Bij de ruimtelijke uitwerking van de overschrijding van de schuifspanningen (met Arc-Info -kaarten) zijn klassen van 10 N/m^2 gespecificeerd (boven de $\tau_c=13 \text{ N}/\text{m}^2$ voor het tout-venant). Dit is gebeurd voor alle locaties zowel voor het NA als voor het EP. Als voorbeeld is dit te zien in Figuur 6.1 en Figuur 6.2 waarin de overschrijding van de kritische schuifspanning op de locatie Itteren afgebeeld is voor het EP en het NA.

Teneinde de afpleisteringslaag te simuleren wordt de eerste klasse niet meegenomen voor de bepaling van de mobiliteit. Boven 10 N/m^2 , dit is dus bij een schuifspanning vanaf circa 23 N/m^2 , wordt verondersteld dat instabiliteit van de afpleisteringslaag kan optreden bij de afvoersituatie van 1/50 jaar. Bovendien wordt een marge van 5 N/m^2 aangehouden bij de verschilbeschouwingen (zie hierna), zodat voor het EP op deze wijze de stabiliteit van de afpleisteringslaag wordt geschat.



Figuur 6.3 Verschil in schuifspanningen (EP – NA) waarbij de schuifspanning in het EP groter is dan de kritische schuifspanning en de verschillen tussen EP en NA groter zijn 5 N/m² voor de locatie Itteren

Mobiliteit bij schuifspanningsverschillen boven deze marge van 5 N/m² boven een schuifspanning van 23 N/m² betekent dat transport kan optreden als gevolg van opbreken van de afpleisteringslaag bij bodemschuifspanningen groter dan 28 N/m².

6.2.2 Analyse

Hierna zijn de gebieden waar sprake is van een verandering van significante schuifspanning tussen het EP en het NA weergegeven. De verandering wordt als significant beschouwd als deze meer bedraagt dan 5 N/m²; een voorbeeld van deze veranderingen is te zien in Figuur 6.3. Verder wordt onderscheid gemaakt tussen een toename en afname. Bij een afname van meer dan 5 N/m² is het oordeel 'afname'. Tussen +5 en -5 N/m² wordt de verandering als marginaal beschouwd.

Het voorgaande is alleen interessant wanneer er sprake is van gebieden waar de actuele schuifspanning (bij 1/50 jr afvoer) de kritische schuifspanning bij het EP overschrijdt. Hierop wordt dus óók getest. Gebieden in het EP die onder de kritische schuifspanning liggen worden derhalve niet meegenomen: deze zijn morfologisch inactief (voor wat betreft het transport van de afpleisteringslaag) en het is dan niet interessant of de schuifspanning toe- of afneemt. Bij de bepaling van de gebieden bóven de kritische schuifspanning wordt de extra marge van 10 N/m² meegenomen, zoals hierboven uiteengezet.

De veranderingen worden door middel van Arc-Info –bewerkingen naar arealen vertaald waar de morfodynamiek (significant) verandert. Dit is vervolgens in GIS-kaarten vastgelegd; deze zijn opgenomen aan het einde van de tekst in dit rapport.

Vervolgens is aangegeven over welke lengte van de rivier de belangrijkste veranderingen zich voordoen op basis van de hiervoor vermelde figuren.

Op deze wijze zijn voor alle locaties bodemschuifspanningen en de veranderingen daarin geanalyseerd voor zover deze schuifspanningen voor het EP boven-kritisch zijn ($\tau > \tau_c$). De resultaten zijn vastgelegd in onderstaande Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Overzicht van gebieden waar de morfodynamiek van het EP verandert ten opzichte van het NA

MORFODYNAMIEK EP-NA						
locatie	toename morfodynamiek		afname morfodynamiek		verandering morfodynamiek	
	areaal (ha)	rkm	areaal (ha)	rkm	areaal (ha)	rkm
Bossherveld	5.45	14.7-15.3	0.19	*	+5.26	+0.6
Borgharen	5.95	17.1-17.6	1.14	*	+4.81	+0.5
		19.3-19.5				+0.2
Itteren	4.60	19.5-20.3	0.48	*	+4.12	+0.8
Aan de Maas	16.94	22.8-25.2	8.55	25.2-26.2	+8.39	+1.4
Meers	18.23	29.6-31.3	7.05	28.2-29.4	+11.18	+0.2
				31.3-31.6		
Maasband	0		0.29	*	-0.29	0
Urmond	3.35	35.2-35.7	0.45	*	+2.90	+0.5
Berg Nattenhoven	6.66	39.1-39.7	0.36	*	+6.30	+2.0
		40.1-41.5				
Grevenbicht	17.14	41.5-41.8	1.52	*	+15.62	+1.3
		43.0-44.0				
Koeweide	1.53	44.0-45.4	0	*	+1.53	+1.4
Visserweert			0.8	49.1- 49,3	-0.8	-0.3
Roosteren	1.19	*	7.18	51.4-51.9	-5.99	-1.2
				52.3-53.0		
Totaal	81.04	11.4	28.81	4,0	+52.23	+7.4
Toelichting: - toename morfodynamiek: toename τ EP-NA én $\tau > \tau_c$ in EP - afname morfodynamiek: afname τ EP-NA én $\tau > \tau_c$ in EP - verandering morfodynamiek: + is toename; - is afname - de * geeft aan dat er in het beschouwde gebied niet een aaneengesloten traject aan te geven is in het laagwaterbed waar de morfodynamiek toeneemt of afneemt						

Opgemerkt wordt dat er door geulverruiming en weerddverlaging veelal sprake is van een toename van de schuifspanning nabij de binnenbocht van de verruiming en een afname in de buitenbocht die het verst van de verruiming af ligt. Er is, in één dwarsdoorsnede dus sprake van zowel een toename als een afname van de morfodynamiek. Netto is er op de meeste locaties sprake van een toename van de morfodynamiek ten opzichte van het NA, omdat er door de verruiming een toename is van het oppervlak dat (fors) wordt aangestroomd én omdat er meer variatie in de verhanglijn ontstaat. Hierdoor ontstaat er een toename van de schuifspanningen in de flessenhalzen. De hieruit voortvloeiende grotere morfodynamiek zal daar waar het tot kri-

tische erosie leidt weer ongedaan worden gemaakt door de toepassing bodem- en oeeververdedigingen. Netto zal de toename van de morfodynamiek kleiner zijn.

Uit de in voorgaande tabel gepresenteerde resultaten kan het volgende worden opgemaakt.

- De toename van het morfodynamisch areaal (wanneer geen rekening wordt gehouden met te treffen verdedigingsmaatregelen) is circa 81 ha op een totaal oppervlak aan rivierbedverruiming en weerddverlaging in het EP van orde 500 ha; over circa 29 ha neemt de morfodynamiek af, zodat netto in totaal over circa 52 ha de dynamiek wordt vergroot, ofwel ongeveer 10 % van het areaal dat verruimd is;
- De toename van de dynamiek doet zich voor over circa 11.4 km van de 45 km rivier en de afname over circa 4.0 km van de rivier, zodat over circa 7.4 km van de rivier de dynamiek toeneemt;
- Opmerkelijk is dat op de locaties met de sterkste verruiming en daarmee de sterkste vergroting van de laagwatergeul (Itteren en Koeweide) de morfodynamiek weinig verandert; dit wordt veroorzaakt doordat op die locaties de schuifspanning bij de 1/50 jaar afvoer over het grootste deel van de locaties onder de kritische waarde van de afpleisteringslaag ligt; dit geldt met name voor het benedenstroomse deel van de locaties, zodat terugschrijdende erosie daar afwezig dan wel beperkt zal zijn;
- De grootste toename van de morfodynamiek treedt op nabij Aan de Maas, Meers en Grevenbicht en kan nagenoeg geheel worden toegeschreven aan de versterkte flessenhalswerking net bovenstrooms van de genoemde vergravingslocaties;

Een algemene conclusie is dat de veranderingen in de morfodynamiek vrij beperkt zijn, zeker wanneer ook in ogenschouw wordt genomen dat in flessenhalzen bij toegenomen dynamiek aanvullende verdedigingswerken nodig zijn.

6.3 Thalweg

6.3.1 Achtergrond

De thalweg is de lijn die de diepste punten in de dwarsprofielen verbindt. Deze vormt formeel de landsgrens tussen België (Vlaanderen) en Nederland. De ligging van de thalweg wordt bepaald door de interactie tussen de stroming en bedding van de rivier, c.q. de samenstelling van de afpleisteringslaag en de onderlagen. De thalweg heeft veelal een enigszins slingerend verloop om de rivieras (midden van de rivier, vaak niet het diepste punt), bepaald door de opeenvolging van bochten en rechte gedeelten. Een uitgebreide analyse van de variatie van de thalwegligging in de Grensmaas is beschikbaar in Klaassen [1992]. Daaruit komt naar voren dat onder de huidige omstandigheden de Grensmaas qua positie redelijk stabiel is met weinig of geen neiging tot meanderen. Men spreekt van een gedempt systeem. De dwarsprofielen in bochten zijn vrijwel allemaal redelijk axiaal-symmetrisch. Het EP behelst de verbreding van vele riviergedeelten waardoor het systeem minder stabiel zal worden. Op enkele plaatsen is zelfs de mogelijkheid aanwezig dat het systeem een tweede geul gaat vormen. Dat geldt met name in de locaties waar stroomgeulverbreding zal plaatsvinden.

6.3.2 Methodiek

De verandering van de thalweg kan bij uitvoering van het Plan Grensmaas hooguit in zeer indicatieve zin worden aangegeven. Hierbij gelden de volgende kwalificaties:

- de thalweg is stabiel of (mogelijk) instabiel;
- indien instabiel is er een tendens voor verplaatsing naar de linker- dan wel naar de rechteroever.

De analyse van de thalwegligging is vooral gericht op de verandering van de schuifspanningen ten opzichte van de huidige thalweg en, daarnaast, op de mate van instabiliteit van de thalweg.

De thalweg is stabiel wanneer de absolute schuifspanning onder de kritieke schuifspanning ligt. De thalweg is (mogelijk) instabiel, wanneer de schuifspanning boven de kritieke schuifspanning ligt én er sprake is van een significant *scheve schuifspanningverandering* (asymmetrie in het dwarsprofiel gezien ten opzichte van de snijding met de thalweg). Bij dit laatste wordt opzettelijk de schuifspanningverandering in beschouwing genomen en niet de absolute schuifspanning. Dit kan worden beargumenteerd door te bedenken dat bij de huidige thalweg, met name in bochten, de schuifspanning sterk asymmetrisch kan zijn als gevolg van het bochteffect; ook kan variatie van bodemmateriaal in dwarsrichting (uitzeving) aanleiding zijn tot een stabiele thalweg-ligging waarbij van een scheve absolute schuifspanningverdeling sprake kan zijn. Eenvoudigheidshalve veronderstellen we daarom in het NA een stabiele thalweg en kijken we naar de asymmetrie van de schuifspanningverandering in dwarsrichting. Verder wordt aangenomen dat de huidige thalweg overeenkomt met de thalweg in het NA.

Bij een scheve verdeling van de schuifspanningverandering ten opzichte van de thalweg zal sprake zijn van een eroderende tendens in de richting van de *schuifspanningtoename*: de thalweg wordt als het ware naar de schuifspanningtoename toe getrokken. Hierbij wordt alleen gekeken naar de directe omgeving van de thalweg (zoals die in het NA wordt verondersteld te liggen, overeenkomstig de huidige thalweg). Daarbij wordt ook ingeschat of daadwerkelijk een thalwegverschuiving mogelijk is: ligt de toename van de schuifspanning bijvoorbeeld boven een hoger deel van de weerden dan is dit niet waarschijnlijk; ook bij geïsoleerde plaatsen waar een schuifspanningtoename plaatsvindt is verschuiving niet waarschijnlijk. Een verschuiving is wel mogelijk als in de laagwaterbedding over een zekere aaneengesloten lengte verhoging van schuifspanningen ten opzichte van het NA optreedt, welke (sterk) scheef ligt ten opzichte van de huidige thalweg.

Verder is ook van belang dat een eventuele absolute schuifspanningtoename in het EP dan wel een schuifspanningafname in het EP in die gebieden waar het voorgaande optreedt; bij een schuifspanningtoename zal er erosie (kunnen) optreden en zal de thalweg vrij zeker die richting op verschuiven, terwijl bij een –afname er sedimentatie kan optreden met bijgevolg een meer onzekere thalwegverplaatsing;

Naast verandering in de schuifspanning kan worden gekeken naar verandering in de mate van stabiliteit van de thalweg. Bij een instabiele thalweg kunnen meerdere geulen worden gevormd. Een maat hiervoor is de interactieparameter IP. Deze komt voort uit een onderzoek naar de interactie tussen water en bodem, zoals onderzocht door Struiksma et al [1985]. Hieruit blijkt dat de interactieparameter IP het gedrag van de 2D bodemligging in hoge mate 'stuurt'. Deze

parameter is de verhouding tussen de aanpassingslengte van de stroming en die van het sediment, en is gegeven door:

$$IP = \frac{\lambda_s}{\lambda_w} = 2 \frac{g}{C^2} \left(\frac{B}{h} \right)^2 \left(\frac{D}{h} \right)^{0,3} \sqrt{\Theta} \quad (\text{Vgl. 6-5})$$

Voor een bespreking van het belang van IP voor een analyse van het morfologisch gedrag van de bodem van de Grensmaas wordt verwezen naar Bijlage 2 van rapport TR 1.4 van het MER 1998. De waarde van IP wordt in vooral bepaald door de verhouding tussen de breedte en diepte van het zomerbed. Bij een kleine verhouding van B/h is er sprake van een sterk gedempt systeem, en is de ligging van de thalweg goed gedefinieerd.

Klaassen (1992) heeft indertijd voor de huidige situatie een verband is afgeleid tussen de ligging van de thalweg en de kromming van de rivier (over 250 m in bovenstroomse richting gewogen). Een dergelijk verband zal in ieder geval bij een sterk gedempt systeem als de huidige Grensmaas (met IP circa 0.1) redelijk goed aangeven aan welke zijde van de rivieras de thalweg zal liggen. Overigens wordt de exacte locatie aan de buitenoever mede bepaald door de onderwaterhelling van een eventuele oeververdediging hetgeen onvoldoende is meegenomen in genoemd onderzoek van Klaassen.

In het kader van het EP zal op een aantal plaatsen de breedte van de rivier toenemen als gevolg van stroomgeulverbreding. Bij toename van de waarde van B/h en dus van IP vindt in toenemende mate naijling plaats, en wordt de ligging van de thalweg meer onzeker. Dat geldt met name aan de benedenstroomse zijde van bochten. Daar kan bij grotere IP waarden zelfs een alternerend bankenpatroon ontstaan. Een en ander betekent dat de morfologische analyse vooral de toekomstige grootte van IP dient te beschouwen in relatie tot de kromming van de rivier.

Als de waarde van IP nog groter wordt en een zekere grenswaarde overschrijdt, dan kan er in principe nog verdere instabiliteit optreden die zich zal uiten door de vorming van een tweede geul. Voor de grenswaarde is hier een waarde van 1 aangehouden.

Of dergelijke morfologische veranderingen daadwerkelijk zullen optreden wordt mede bepaald door de grootte van de schuifspanningen in relatie tot de kritieke schuifspanning van de afpleisteringslaag. In ieder geval lijkt de tijdsschaal van de morfologische veranderingen relatief groot te zijn omdat de kritieke schuifspanning maar af en toe wordt overschreden.

6.3.3 Analyse

Het bovenstaande in ogenschouw nemend kunnen nu de eerdere met Arc-Info gemaakte kaarten worden geanalyseerd: deze kaarten geven immers de verandering van de schuifspanning tussen het EP en het NA bij een mobiele bedding van toutvenant (conditie: $\tau > \tau_c$, met alléén de schuifspanningen die tenminste 10 N/m² hoger zijn dan 13,12 N/m²).

De visuele analyse bestaat uit de volgende stappen:

- Aangeven over welke rivierlengten (rkm) er sprake is van een significant scheve schuifspanningverdeling bij de schuifspanningveranderingen tussen EP en NA; daarbij moet ten-

minste sprake zijn van méér dan 5 N/m² verschil, zoals gedefinieerd bij de GIS kaarten, om zeer locale effecten en toevalligheden uit te sluiten; hierbij wordt ook ingeschat of de thalweg zich daadwerkelijk kan verplaatsen als gevolg van erosie (zie hiervoor).

- Aangeven over welke rivierlengten waar het voorgaande het geval is, er sprake is van een absolute schuifspanningtoename of -afname bij het EP in benedenstroomse richting;
- In beschouwing nemen van de grootte van de interactieparameter IP verhouding h/B_s . Op grond hiervan wordt tot een oordeel over de ligging en de stabiliteit van de thalweg gekomen.

Daarnaast wordt ook nagegaan of een bochtafsnijding mogelijk is wanneer geen erosieve tendens wordt geconstateerd ($\tau < \tau_c$); hiervan kan sprake zijn wanneer de stroming bij hogere afvoeren de laagwatergeul afsnijdt (over de vergravingslocatie), zodat door sedimentatie van de laagwaterbedding het op de lange duur theoretisch mogelijk is dat de thalweg alsnog buiten de huidige laagwaterbedding komt te liggen.

Een tussenvorm van het voorgaande treedt bijvoorbeeld op bij Itteren en Koeweide (zie hier-na), waar er in beide gevallen een eroderende 'aanzet' is, maar deze stopt al na korte tijd; via sedimentatie van de huidige laagwaterbedding kan algehele thalwegverplaatsing dan alsnog plaatsvinden.

In de navolgende tabel is het resultaat van deze analyse weergegeven. Een R betekent daarbij een tendens tot verschuiving naar de rechteroever (de schuifspanningen zijn rechts van de thalweg hoger), bij een L is het omgekeerde het geval.

Daarnaast is informatie opgenomen over de grootte van IP, waarbij is aangegeven of $IP < 1$ is (relatief stabielere ligging thalweg) of > 1 is (relatief onstabielere ligging thalweg).

Tabel 6.2 Overzicht potentiële verandering thalwegligging EP-NA

THALWEGLIKKING EP-NA					
locatie	rkm potentiële verandering thalweglig- ging	waarvan rkm met <i>initiële</i> eroderende tendens	waarvan rkm met <i>initiële</i> se- dimerende tendens	IP	oordeel
Boscherveld					
Borgharen	16,4-17,7	16,4-17,2	17,2-17,7	<1	R

Itteren	20,0-22,3	20,0 -20,2	20,2-22,3	>1	R+, rivier heeft neiging om het begin van een bocht afsnijding te maken waarbij de thalweg over circa 500 m wordt verlegd; depositie van materiaal aan de bovenstroomse zijde; geulverlegging zal vooral door sedimentatie oude laagwaterbedding moeten gebeuren.
Aan de Maas	24,2 – 25,6	24,2 – 24,8	24,8 – 25,6	<1	R, t.o.v. NA sterke toename van de dwarsgradiënten over een grote lengte
Meers	28,2 – 29,0	28,2 – 28,4	28,4 – 29,0	<1	L+, neiging tot verplaatsing binnen de nauwe insnoering van de weerden
	31,2 – 33,2		31,2 – 33,2	<1	R+, sterke toename van de dwarsgradiënt, neiging tot bocht afsnijding voor het grindeiland langs, met een geulverlegging van circa 200 m; vrij sterke eroderende capaciteit, dus afsnijding zal relatief snel verlopen.
Maasband					
Urmond					
Nattenhoven					
Grevenbicht	41,5 – 41,9	41,5 – 41,6	41,6 – 41,9	<1	R, lichte verplaatsing richting nevengeul, huidige ligging in laagwaterbed gehandhaafd
	43,1 – 43,6	43,1 – 43,6		<1	R, toename van de dwargradient, neiging tot lichte verplaatsing

Koeweide	45,3 – 47,6		45,3 – 47,6	<1	R+ misschien mogelijk bij extreem hoogwater, in eerste instantie geen neiging tot vlechten, maar na enige depositie van toutvenant mogelijke wél; de geulverlegging zal circa 500 m kunnen bedragen, waarbij de geulverlegging vooral door sedimentatie van de oude laagwaterbedding zal plaatsvinden
Roosteren	51,5 – 51,7	51,5 – 51,7		<1	R, toename van de dwarsgradiënt, lichte neiging tot verplaatsing
totaal km's	11,2	2,6	8,6		
toelichting bij oordeel: R = enige verplaatsing naar rechteroever mogelijk (binnen huidige laagwaterbed) R+ = sterke verplaatsing naar rechteroever mogelijk (buiten huidige laagwaterbed) L = enige verplaatsing naar linkeroever mogelijk (binnen huidige laagwaterbed) L+ = sterke verplaatsing naar linkeroever mogelijk (buiten huidige laagwaterbed) geen aanduiding: thalweg stabiel					

Resultaten grote thalwegverplaatsingen (tot buiten het laagwaterbed)

De voorgaande tabel geeft aan dat door de uitvoering van het EP op verschillende plaatsen de thalweg zal kunnen verschuiven. Gezien de schaal van de ingrepen worden deze verschuivingen dus veroorzaakt door aanpassingen in de riviergeometrie over lengtes van orde 1000 m. De belangrijkste grote verschuivingen zullen kunnen plaatsvinden bij locatie Itteren, bij Meers en bij Koeweide, respectievelijk circa 500m, 200m en 500m. Daarbij is de situatie zo dat bij lagere afvoeren de stroom vooral de oude laagwaterbedding zal volgen; bij hogere afvoeren (zoals de hier onderzochte 1/50 jaar afvoer) is sprake van stroming 'door de binnenbocht', waarbij onder extreme omstandigheden geulvorming kan optreden. Dit, tezamen met sedimentatie van de oude laagwaterbedding, kan resulteren in een grote thalwegverschuiving. Dit proces zal echter zeer langzaam gaan en is sterk afhankelijk van de mate van optreden van extremere hoogwaters.

Bij Meers zal de stroming bij het EP onder veel omstandigheden zowel langs de binnenkant van het grindeiland als door de oude bedding gaan; wanneer naar de schuifspanningen wordt gekeken is er sprake van een eroderende capaciteit van de binnenbochtstroming bij bijvoorbeeld de 1/50 jaar afvoer: dit zal het proces van thalwegverschuiving naar de binnenbocht versterken, zodat het bij Meers reëel is dat thalwegverschuiving vóór het grindeiland langs zich op afzienbare termijn zal hebben voltrokken.

Bij Itteren en bij Koeweide zal bij hogere afvoeren de stroming wel door de binnenbocht trekken, maar is de eroderende capaciteit van de stroming dusdanig beperkt dat thalwegverplaat-

sing hier nagenoeg volledig moet worden gerealiseerd door sedimentatie van de oude bedding. Dit zal overigens een langdurig proces zijn; een onzekere factor daarin is de sequentie van opeenvolgende hoogwaters in de toekomst. Door afzetting van grind in het begin van de verwijding, waardoor de stroming zich kan verleggen, zal dit proces overigens worden versneld: ook dit proces is niet goed te voorspellen en kan uitsluitend via een adequate monitoring worden gevolgd.

Indien de thalwegverandering zich bij alle drie locaties heeft voltrokken, betekent dit een totale verschuiving buiten de huidige laagwaterbedding over een kleine 7 km; dit is vergelijkbaar met de totale verschuiving zoals die bij het MER Grensmaas 1998 (daarin aangeduid met categorie c) werd voorspeld.

Resultaten beperkte thalwegverplaatsingen (binnen het laagwaterbed)

Thalwegverplaatsingen binnen de oude bedding kunnen optreden over beperkte lengte bij Borgeharen, Aan de Maas, de linkerbocht bij Kotem (bovenstrooms Meers), boven- en benedenstrooms van Grevenbicht en bij de rechterbocht bovenstrooms van Roosteren. Het gaat daarbij om verplaatsingen in zones die morfologisch actief zijn bij een afvoer van 1/50 jaar. Dit betekent dat thalwegverplaatsing hier door erosie kan plaatsvinden en dit kan dan ook relatief snel gaan, zeker in vergelijking met de bochtafsnijdingen bij Itteren en Koeweide.

6.4 Slib

6.4.1 Verschijnselen

In de Grensmaas wordt behalve zand en grind ook fijn slib getransporteerd. Dit slibtransport treedt voornamelijk op vlak na hoogwaters. In de daarop volgende perioden van laagwater is het slibtransport nauwelijks van belang [MER 1998]. Bovendien treedt er dan geen aanslibbing op (van het zomerbed) vanwege de voldoende hoge snelheden: het slib blijft door de stroomsnelheden in suspensie.

Bij *laagwater* wordt op banken een dun laagje slib aangetroffen, dat daar waarschijnlijk is afgezet kort voor het moment van droogvallen. Tijdens *hoogwater* gaat een (met de waterstand toenemend) deel van de afvoer door de weerden. Dit water voert slib mee dat deels in de weerden wordt afgezet. Daardoor neemt de slibconcentratie af in benedenstroomse richting en dus vermindert ook de slibbelasting van de Zandmaas bij hoogwater.

Bij rivierverruiming zoals bij het EP, zijn er verschillende effecten, die hierna kort worden aangeduid en vervolgens nader zullen worden geanalyseerd:

- In de oorspronkelijke laagwaterbeddingen, die geen onderdeel uitmaken van een verruimingslocatie, zal er niet veel veranderen. Het slib zal niet neerslaan en in benedenstroomse richting worden afgevoerd.
- In riviergedeelten die onderdeel uitmaken van een verruimingslocatie, kan enige opslibbing in het zomerbed optreden als gevolg van een thalwegverschuiving (bochtafsnijding). Onderzocht dient te worden of voor het gehele afvoerregime aanslibbing zal optreden of dat onder bepaalde omstandigheden het slib toch weer in suspensie wordt gebracht.
- Op de niet afgegraven weerden zal door verlaging van de hoogwaterstanden de overstroomingsfrequentie afnemen, waardoor minder aanslibbing kan worden verwacht.

6.4.2 MER Grensmaas 1998 en nieuwe inzichten

Tijdens de studie die ten grondslag ligt aan het MER Grensmaas 1998 is onderzoek gedaan naar de slibbalans van de Grensmaas en hoe deze zou veranderen bij uitvoering van de verschillende alternatieven. Daarbij is gebruik gemaakt van de module DELWAQ, die werkt op basis van stroombeelden die met WAQUA zijn verkregen. In het MER Grensmaas 1998 is qua mogelijke varianten alleen het VKA onderzocht. Ten aanzien van de andere alternatieven is gesteld dat geen aparte DELWAQ simulaties nodig waren omdat de nauwkeurigheid van de gegevens over slib in de Maas dit niet rechtvaardigde. Op zich is dit nog altijd geldig. Alleen is er meer inzicht gekomen in de aanslibbing op de weerden en de verontreiniging ervan via het onderzoek van Van den Berg en van Wijngaarden [2000]. Daarbij is gebleken dat in de geselecteerde weerd bij Itteren een aanzienlijke aanslibbingssnelheid van 5 tot 12 mm/jaar is opgetreden. Desondanks lijkt het niet nodig om zulk zwaar geschut als DELWAQ in stelling te brengen.

Om toch een schatting te maken van het effect van de voorgestelde maatregelen op de aanslibbing in de weerden is een wat simpeler aanpak gevolgd, die gebruik maakt van een recent ontwikkelde methode om de slibbalans van een lang riviergedeelte te bepalen. Het betreft hier de methode voorgesteld door Narinesingh [1995], zie ook Narinesingh et al [1999]. Wat verderop wordt in meer detail op deze methode ingegaan. Daarnaast is ook enig nader onderzoek gedaan naar de toekomstige omstandigheden in het zomerbed van de rivier, vooral voor die delen waar een aanzienlijke stroomgeulverbreding zal ontstaan.

6.4.3 Analyse huidige situatie

Van te voren is het echter nodig om stil te staan bij slibprocessen in de Grensmaas in de huidige situatie en in de toekomst. In de huidige situatie is het riviersysteem in feite vrij simpel. Het betreft een snel stromend zomerbed en weerden waar in- en uitstroming plaatsvindt tijdens hoogwater. De aanpak van Narinesingh [1995] die uitgaat van convectie van slib naar het winterbed waar het bezinkt, is hier goed toepasbaar voor de situatie dat de weerden ook Stroom voeren.

Enige aanvullende analyses zijn uitgevoerd om het slibtransport in de Grensmaas nader te onderzoeken. Voor het verband tussen de slibconcentratie en het debiet zijn verschillende vergelijkingen voorgesteld. Rapport TR 1-3 van de MER 1998 geeft een overzicht van deze relaties. In het navolgende zijn twee relaties gebruikt, namelijk die van van Mierlo & Wijbenga (1989) en die van Fioole (1992). De beide relaties zijn hieronder weergegeven.

$$c = 9,960116 \cdot e^{0,002916 \cdot Q} \quad (\text{Vgl. 6-6})$$

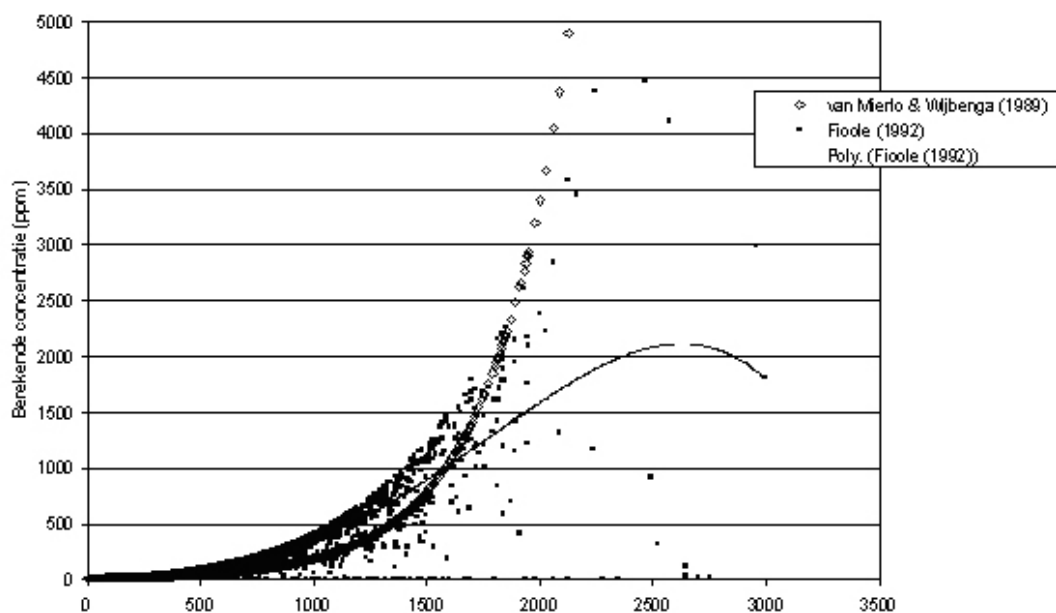
$$c = e^{0,15536 \cdot \sqrt{Q} - 0,00160214 \cdot Q_{21} + 1,1326} \quad (\text{Vgl. 6-7})$$

waarbij c = slibconcentratie (mg/l of g/m³), Q = afvoer te Eijsden (m³/s) en Q_{21} = gemiddelde van de afvoer te Eijsden in de voorgaande 21 dagen (m³/s).

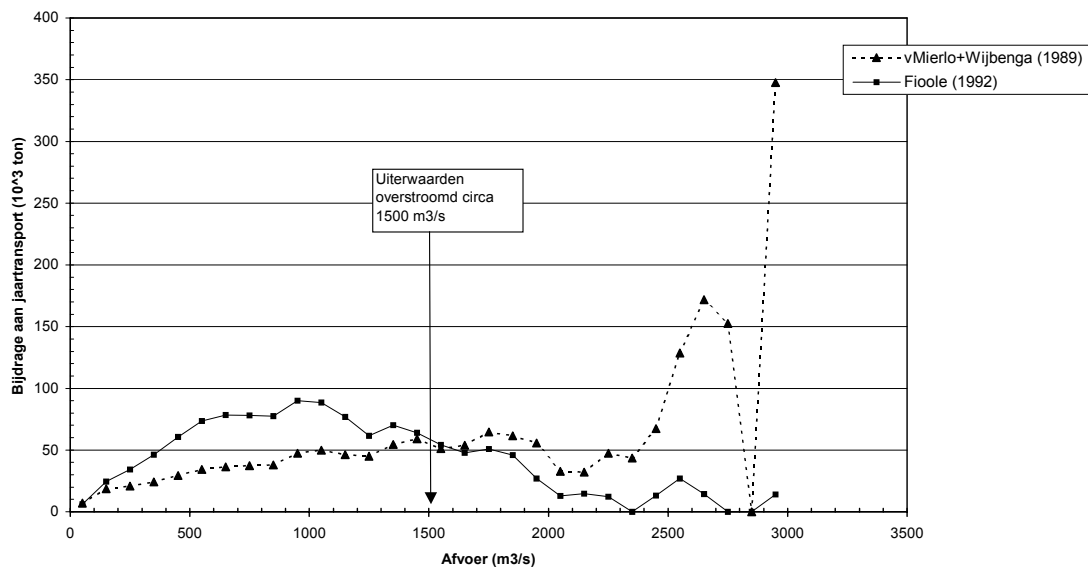
Voor de gehele periode 1911 – 1998 waarover afvoergegevens beschikbaar zijn, zijn de dagelijkse slibgehalten volgens beide formules berekend. Het resultaat is weergegeven in Figuur 6.1, waar de berekende slibconcentraties zijn uitgezet als functie van de afvoer.

Zoals kan worden geconcludeerd uit een inspectie van deze figuur leidt de formule van van Mierlo & Wijbenga (1989) tot onwaarschijnlijk hoge slibconcentraties voor hoge afvoeren. De relatie van Fioole (1992) leidt tot realistischere waarden en is dan ook verder als basis genomen. De afvoeren zijn vervolgens ingedeeld in klassen van 100 m³/s en voor elk van die klassen is de bijdrage aan de totale slibbelasting van de Maas uitgerekend. Het resultaat is weergegeven in Figuur 6.2, voor zowel van Mierlo & Wijbenga (1989) en Fioole (1992).

Er van uitgaande dat in de huidige situatie de weerden bij circa 1500 m³/s beginnen bij te dragen aan de rivierafvoer, blijkt dat circa 70% van de totale hoeveelheid slib wordt afgevoerd tijdens perioden met afvoeren lager dan "bankfull".



Figuur 6.4 Berekende slibconcentraties te Eijsden in de periode 1911-1998



Figuur 6.5 Verdeling van slibbelasting over de verschillende afvoerclassen

In de huidige situatie vindt bij hoogwater aanslibbing van het winterbed plaats. Met behulp van de methode van Narinesingh (1995) is verderop in deze paragraaf een inschatting gemaakt van het percentage van de slibbelasting van de afvoeren boven bankfull dat in de weerden zal sedimenteren. In de huidige omstandigheden blijkt dat circa 15% zal sedimenteren in het 40 km lange traject van de Grensmaas. Op basis van een soortelijke dichtheid van 1500 kg/m³, een redelijke waarde na consolidatie van het bezonken slib met aanvankelijk een geringere soortelijke dichtheid, en een schatting van de grootte van het totaal aan weerd areaal dat overstroomd kan worden van circa 20 km², leidt dit tot een gemiddelde aanslibbing in de weerden van de Grensmaas van circa 2 mm/jaar. Dit is lager dan de waarde die door van den Berg & van Wijngaarden (2000) worden genoemd (5 tot 12 mm/jaar).

Hiervoor zijn verschillende verklaringen mogelijk:

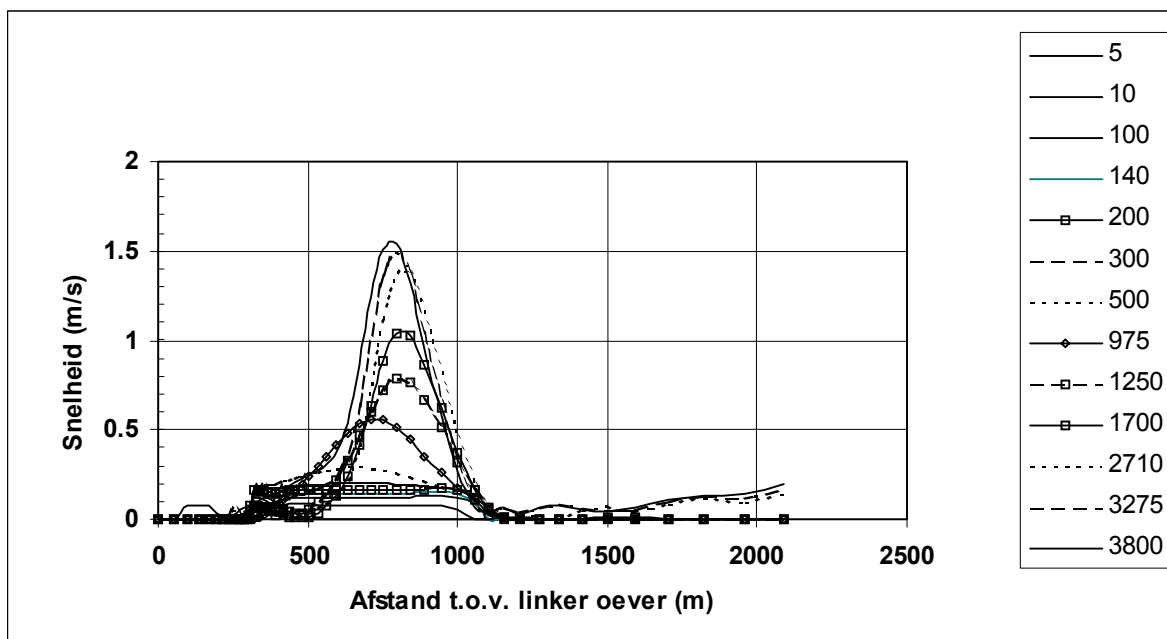
- de metingen van van den Berg & van Wijngaarden zijn niet representatief voor het gehele areaal weerd dat potentieel kan worden overstroomd (delen die slecht uiterst zelden zullen worden overstroomd, zullen immers minder aanslibbing ervaren)
- de trapping efficiency van de Grensmaas weerden is onderschat.

Dat de methode van Fioole (1992) eventueel een onderschatting van de sedimentlast bij hogere afvoeren oplevert kan ook niet geheel uitgesloten worden. Nader onderzoek moet uitsluitsel geven.

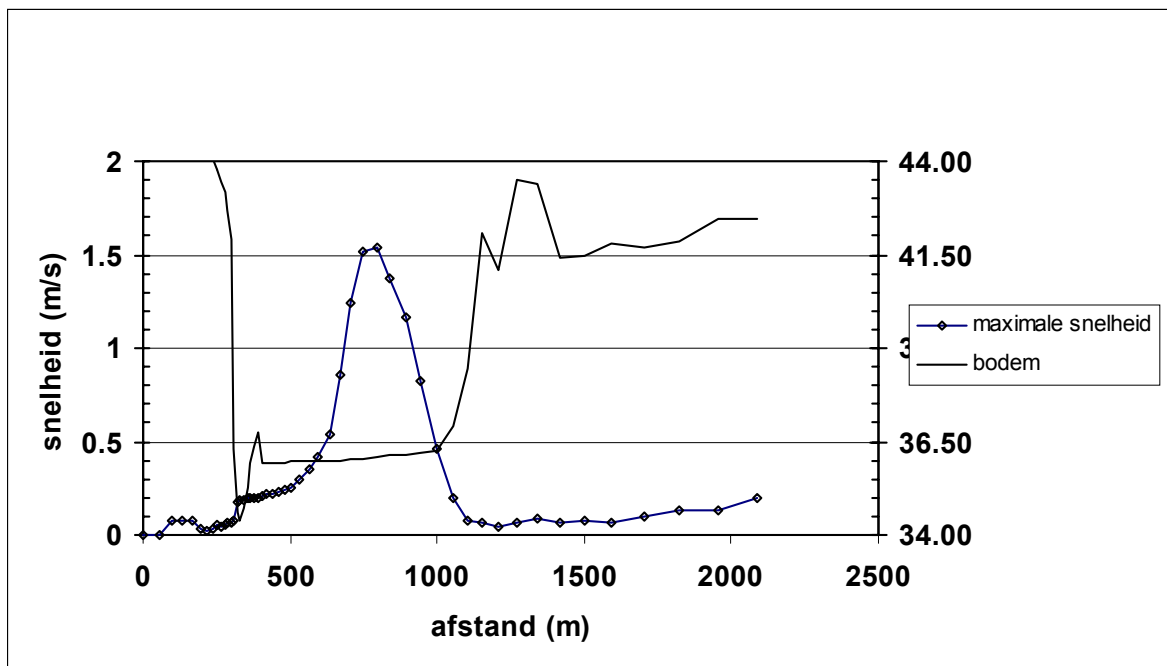
6.4.4 Analyse toekomstige situatie in het zomerbed

In de toekomst wordt het riviersysteem ingewikkelder. Met name op die plaatsen waar een aanzienlijke stroomgeulverbreding in de binnenbocht (onder anderen bij Itteren, Meers en Koeweide) plaatsvindt, zullen bij iets hogere afvoeren delen van het zomerbed nauwelijks bijdragen

aan de afvoer van water en zullen stagnante situaties optreden. Dit is onderzocht op basis van de resultaten van de WAQUA simulaties voor EP. Enkele resultaten daarvan zijn weergegeven in de Figuren 6.3 en 6.4. Figuur 6.3 geeft voor een dwarsraai te Itteren de met WAQUA berekende dieptegemiddelde snelheden, waarbij de afvoer tijdens de simulaties is gevarieerd tussen 5 en 3800 m³/s. Het oude zomerbed bevindt zich aan de linkerzijde van het profiel. Duidelijk is te zien dat bij hogere afvoeren de maximale snelheden optreden boven de verbreding van de stroomgeul. In Figuur 6.4 zijn de maximale snelheden die op elke plaats in het dwarsprofiel kunnen optreden weergegeven samen met het dwarsprofiel van de verwijde lokatie. De stroomsnelheden in het vroegere zomerbed zijn onder geen enkele afvoeromstandigheid groter dan 0.2 m/s.



Figuur 6.6 Snelheidsverdeling volgens WAQUA simulaties in dwarsprofiel in verruimingslocatie bij Itteren



Figuur 6.7 Dwarsprofiel en maximale snelheden volgens WAQUA simulaties in dwarsprofiel in verruimingslocatie bij Itteren

Om deze snelheidsverdelingen te interpreteren is het nodig inzicht te krijgen onder welke omstandigheden aanslibbing kan optreden en onder welke omstandigheden slib weer geërodeerd wordt. In TR 5-2 van de MER 1998 wordt relevante informatie over de slibkarakteristieken van de Grensmaas vermeld. De volgende waarden zijn van belang:

- gemiddelde valsnelheid 0.11 m/s
- kritische schuifspanning voor sedimentatie 0.2 N/m²
- kritische schuifspanning voor erosie 0.25 N/m²

Bij aanname van $C = 40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ komt dit overeen met een kritische (dieptegemiddelde) snelheid voor sedimentatie van 0.18 m/s en voor erosie van 0.20 m/s.

Bij afvoeren hoger dan circa 500 m³/s neemt de gemiddelde snelheid in het oude zomerbed aanzienlijk af tot minder dan 0.1 m/s. Hetzelfde geldt voor afvoeren lager dan 100 m³/s. Verwacht wordt dat onder die afvoeromstandigheden diffusie van sediment in dwarsrichting zal optreden en enige sedimentatie van slib in de semi-stagnante delen in het oude zomerbed zal optreden. Door Narinesingh [1995] is echter aangetoond dat diffusie in dwarsrichting maar een beperkte rol speelt, dus de afzettingen zullen beperkt blijven. Bij afvoeren tussen 100 en 500 m³/s, die ieder jaar gedurende geruime tijd voorkomen, zal het afgezette slib naar verwachting weer gemobiliseerd worden. De snelheden zijn dan circa 0.2 m/s, en daarenboven kan gerekend worden op het voorkomen van grootschalige wervels die eveneens zullen bijdragen aan de erosie van het afgezette slib. Het slib zal dus hoogstens zo lang blijven liggen als de lengte van de perioden dat de afvoer in de rivier de grenswaarde van circa 100 m³/s onderschrijdt of 500 m³/s overschrijdt. Een en ander leidt tot een wijziging van de relatie tussen slibconcentratie en

afvoer benedenstrooms van de Grensmaas, maar de totale hoeveelheid slib die wordt getransporteerd bij lager dan 'bankfull' afvoeren zal zich nauwelijks wijzigen.

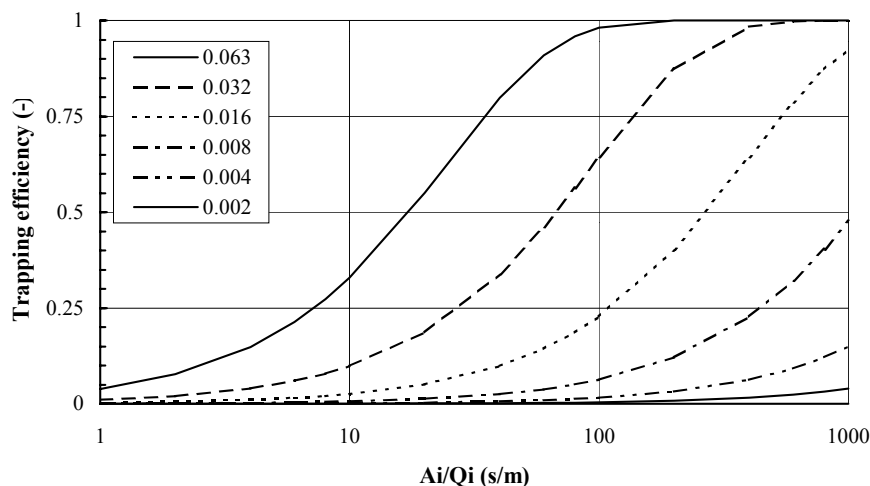
6.4.5 Analyse aanslibbing in weerden

Bij de weerden ligt dit tijdens hoogwaters anders. Door de verruimende maatregelen zullen de waterstanden dalen, waardoor de rivier minder vaak over zijn weerden zal stromen. Daardoor zal de afvoer door de weerd ook afnemen bij gelijkblijvende totale afvoer. Het gevolg is dat minder slib door convectie naar de weerden zal worden afgevoerd. Daardoor vindt er ook minder sedimentatie van slib plaats en deze sedimentatie is alleen afkomstig van perioden met hogere afvoeren. Als gevolg daarvan zal tijdens hoogwater meer slib naar de Zandmaas worden afgevoerd. Tijdens het huidige onderzoek is dit effect onderzocht met een methode van Narinesingh [1995], die daarvoor nog enigszins vereenvoudigd is.

De methode van Narinesingh [1995] beschouwt de rivier bij hoogwater als een doorgaande geul waaraan in benedenstroomse richting delen weerden aan zijn gekoppeld waar water in- en uitstroomt. Elk van de weerdelen wordt beschouwd als een sedimentatiebekken. In elk van de bassins vindt verlies van slib plaats. Narinesingh [1995] gebruikt de methode van Chen [1975] om de sedimentatie te bepalen. Volgens Chen [1975] kan de mate van sediment vangen worden uitgedrukt in een sediment trapping efficiency E , die kan worden gevonden uit de vergelijking:

$$E_i = 1 - e^{-\frac{w_s A_i}{\Delta Q_i}} \quad (\text{Vgl. 6-8})$$

waarbij E_i = sediment trapping efficiency van de i -de weerd (-), w_s = de valsnelheid van het slib (m/s), A_i = oppervlak van de i -de weerd, en ΔQ_i = de afvoer die de i -de weerd in- en uitstroomt. Figuur 6.1 is een grafische weergave van bovenstaande vergelijking.



Figuur 6.8 Sediment trapping efficiency als functie van $A/\Delta Q$ en sediment diameter D_i [Chen, 1975]

Uitgaande van een concentratie c_0 aan het begin van het beschouwde riviergedeelte kan worden afgeleid dat (bij instantane menging in het zomerbed) de concentratie na i (gelijke) weerden is gedaald tot:

$$\frac{c_{x=iL}}{c_0} = \left(1 - E \frac{\Delta Q}{Q}\right)^i \quad (\text{Vgl. 6-9})$$

waarbij L = onderlinge afstand tussen de delen overstroomde weerd (m), en Q = totale afvoer in de rivier (m³/s).

In werkelijkheid zijn de stukken overstroomde weerd natuurlijk allemaal verschillend, dus modellering van een echt riviergedeelte wordt al gauw vrij ingewikkeld. Dat is ook de reden dat een aparte module is ontwikkeld binnen SOBEK waarmee een analyse als deze kan worden uitgevoerd. Voor de Grensmaas is hier een versimpelde analyse uitgevoerd, gebaseerd op de volgende veronderstellingen:

- de sediment trapping efficiency is gelijk voor alle afzonderlijke delen weerd (dat voorkomt dat voor ieder weerd gedeelte ook het oppervlak moet worden bepaald, hoewel dit niet principieel moeilijk is);
- de sediment trapping efficiency kan worden afgeleid uit de DELWAQ berekeningen die voor het MER 1998 zijn uitgevoerd;
- de sediment trapping efficiency wordt minder bij hogere afvoeren (conform vergelijking Chen);
- er is een (onbekende) representatieve korreldiameter (en meer belangrijk) een representatieve valsnelheid, die overigens niet bekend hoeft te zijn, omdat die impliciet in de geijkte efficiency waarden zit;
- de trapping efficiency voor EP kan worden afgeleid uit de trapping efficiency voor de huidige situatie, maar rekening houdend met de verlaging van de waterstand.

De analyse is in eerste instantie uitgevoerd voor twee gevallen namelijk voor NA (voor vergelijking en voor de ijking van E) en voor EP (om de invloed van de implementatie van het EP te onderzoeken). Voor de verschillende analyses zijn de in Tabel 6.3 vermelde waarden voor de sediment concentraties aan het begin en aan het eind van het beschouwde riviergedeelte en de geijkte (voor NA) en veronderstelde E waarde (voor EP). De lage waarden voor E wijzen op zeer fijn sediment (zie ook Figuur 6.8).

Tabel 6.3 Sediment concentraties en trapping efficiencies

Afvoer (m ³ /s)	MER	Concentratie (kg/m ³)		Sediment trapping efficiency (-)	
		rkm 15	rkm 55 (uit DELWAQ)	Geijkt op basis van DELWAQ 1998	Aangenomen op basis van geijkte waarden en reductie waterstanden
1400	1998	185	180	0.04	
3060	1998	400	335	0.03	
3380	1998	425	365	0.025	
2000	2003	275			0.045
2750	2003	370			0.035
3750	2003	480			0.03

Een belangrijk aspect is de uitwisseling tussen zomer- en winterbed. Deze uitwisseling is de basis voor de bepaling van de afname van de sediment concentratie (zie tweede vergelijking van Chen). Zowel voor NA als voor EP is de uitwisseling afgeleid uit de WAQUA berekeningen die recent zijn uitgevoerd. Voor de 1:1250 hoogwatergolf voor NA en EP is de verdeling van de af-

voer over de linker weerd, het zomerbed en de rechter weerd bekend voor alle beschouwde rivierkilometers en voor alle tijdstappen. Uit deze tabellarisch beschikbare resultaten is de afvoerverdeling afgeleid voor een drietal afvoeren, namelijk 2000, 2750 en 3750 m³/s. De relatieve bijdrage van het linker en rechter deel van de weerd (relatief omdat het gedeeld is door de totale afvoer) is voor deze drie afvoerniveaus weergegeven in figuur 6.9 voor zowel NA als EP.

Uit Figuur 6.9 kan het volgende worden afgeleid:

- De verschillende weerden kunnen goed geschematiseerd worden als afzonderlijke sedimentatie basins.
- Bij NA gaat het om circa 18 afzonderlijke "sedimentatie basins", terwijl voor EP het aantal is gedaald naar 16.
- Bij toenemende afvoer neemt de relatieve bijdrage van het winterbed toe.
- Bij NA is gemiddeld genomen de relatieve bijdrage van het winterbed groter dan bij EP. Dit wordt veroorzaakt door de lagere waterstanden die bij EP optreden. Bij NA zijn de maximale waarden van de relatieve bijdrage circa 0.6, terwijl voor EP als maximum 0.4 optreedt.

In Figuur 6.3 is een iets andere doorsnede van hetzelfde basis-materiaal gepresenteerd door per afvoerniveau de relatieve bijdrage van het linker- en rechter winterbed gedeelte te presenteren.

Gebruik makend van de methode die ten grondslag ligt aan de tweede vergelijking van Chen en met als uitgangspunten (1) de uitwisseling zoals weergegeven in de Figuur 6.9 en Figuur 6.10 en (2) de sediment trapping efficiencies uit Tabel 6.3, kan vervolgens het verloop van de sediment concentratie in lengte richting van de Grensmaas worden uitgerekend. Het resultaat is vermeld in Figuur 6.11 voor zowel NA als EP. De volgende waarnemingen kunnen worden gemaakt:

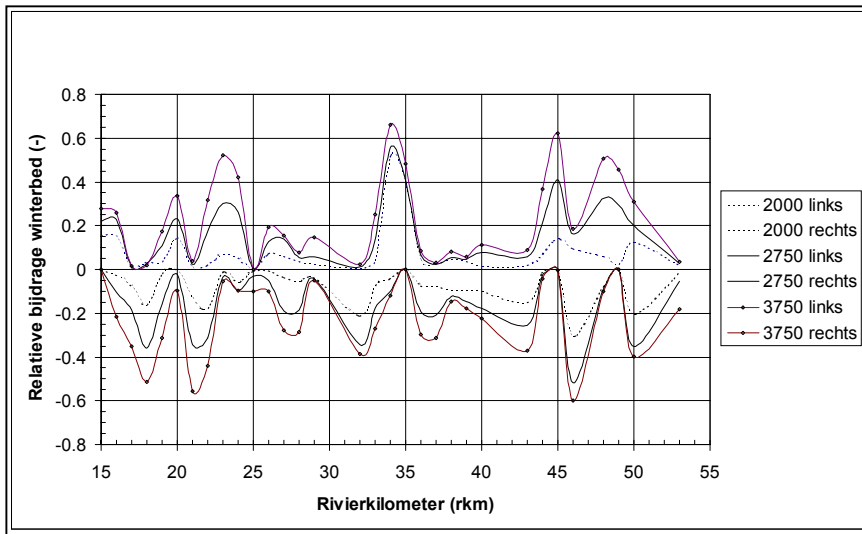
- Zelfs bij hoge afvoeren is voor beide gevallen de afname van de slibconcentratie niet groot. Zie Figuur 6.12 waar deze afname in % is weergegeven. De geringe afname wordt veroorzaakt door de lage trapping efficiencies aan de ene kant en door het relatieve korte traject (slechts 40 km) aan de ander kant. In de huidige situatie slaat bij hoge afvoeren 10 a 15% van het slib neer in de Grensmaas weerden, en voor EP daalt dit percentage tot 5 a 10%.
- De toename van de slibbelasting van de Zandmaas zal afhankelijk van de afvoer variëren tussen 0 (voor afvoeren lager dan de bankfull afvoer) tot circa 5% (voor de hoogste afvoeren). Daar de hogere afvoeren slechts een relatief geringe tijd optreden, zal de toename van de totale slibbelasting slechts enkele procenten bedragen.

Geconcludeerd kan worden dat de *sedimentatie op de weerden* van de Grensmaas tot circa de helft zal afnemen en dat de toename van de belasting met zwevend slib van de Zandmaas slechts gering zal zijn. Dit betekent bij een gemiddelde jaarlijkse aanslibbing van 2 mm/jaar (op basis van de huidige gegevens als het meest representatief geacht) op de weerden, dat deze tot circa 1 mm/jaar zal teruggaan als gevolg van de verlaging van de overstromingsfrequentie.

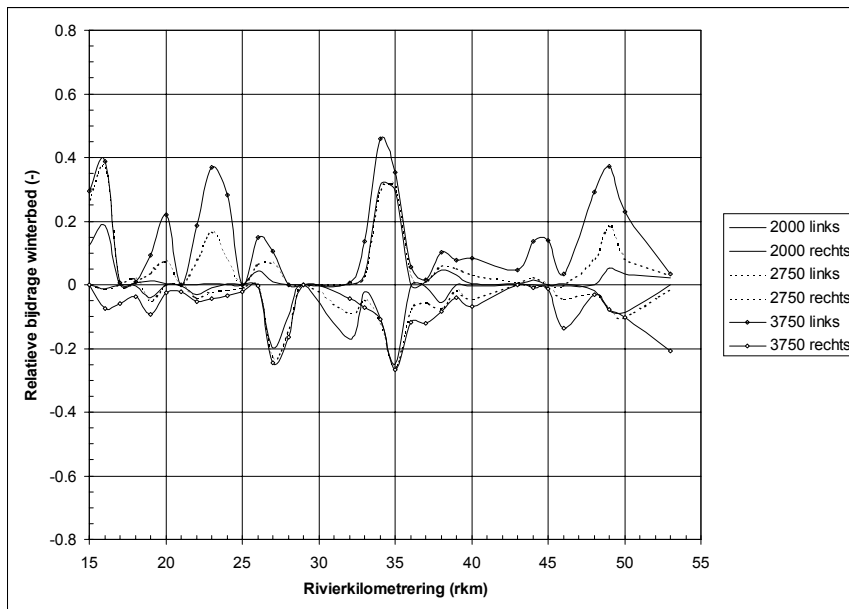
Een onzeker punt vormt de mogelijke aanslibbing in de stroomluwe delen van de rivierverruimingen. Bij hogere afvoeren zal de stroming bij de grote vergravingslocaties (Itteren, Meers,

Koeweide) door de binnenbocht trekken en eerdere slibsedimentatie kunnen opruimen; dit is te zien uit de stroombeelden bij bijvoorbeeld 1/50 jaar afvoer. De (oude) laagwaterbedding heeft juist meer stroomaanval bij de lagere afvoeren: het slib kan daar dan worden opgenomen. De vraag is daarom of er veel stroomluwte overblijft bij de verwijdingslocaties wanneer het gehele scala aan afvoeren in beschouwing wordt genomen. Hier verschilt onze visie dan ook met die uit andere referenties [Van den Berg en Van Wijngaarden, 2000], waar een toename tot meerdere centimeters per jaar wordt voorzien.

In de loop van de tijd zal de vegetatie overigens een rol gaan spelen: door vegetatie wordt het slib vastgehouden en in de toekomst is permanente, vooral lokale aanslibbing zeker mogelijk. Of dit meer zal zijn dan in de huidige situatie is echter de vraag: vooralsnog gaan wij hier niet van uit.

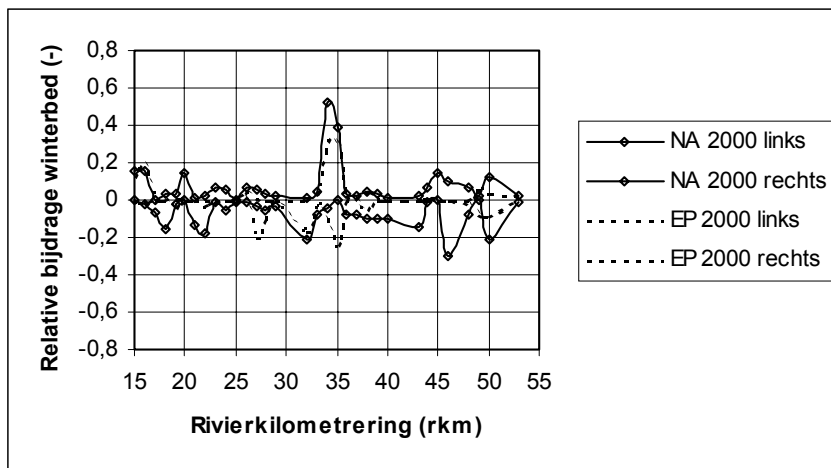


(a) NA

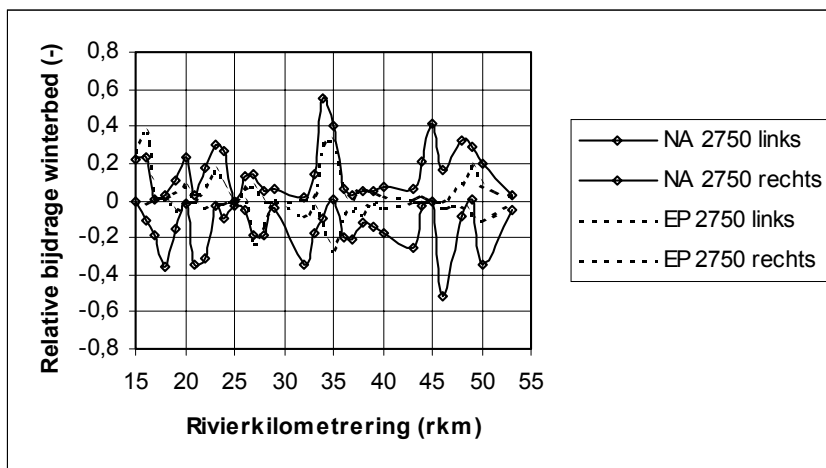


(b) EP

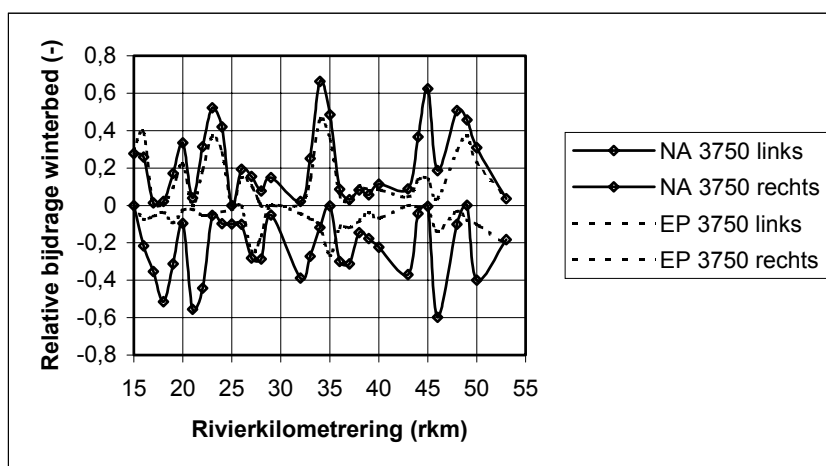
Figuur 6.9 Relatieve aandeel van het linker- en rechter winterbed voor NA en EP



(a) 2000 m³/s

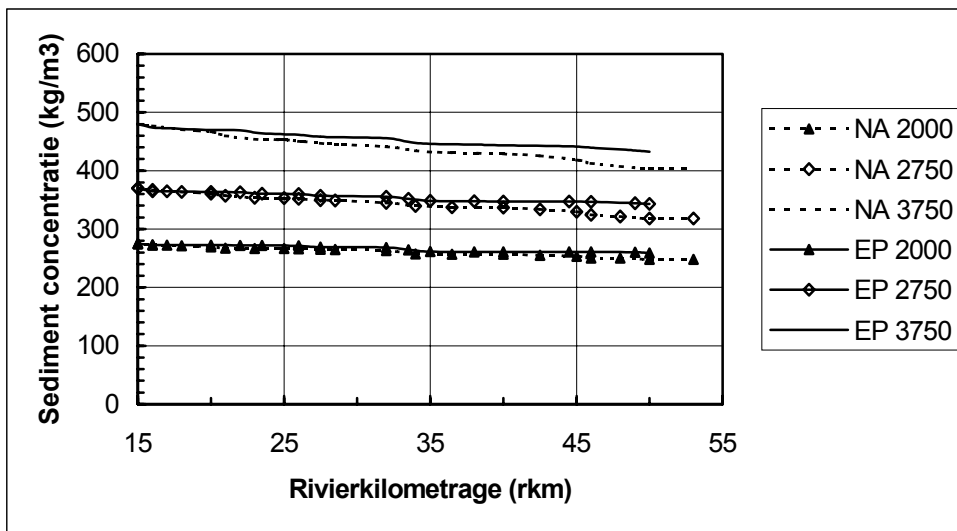


(b) 2750 m³/s

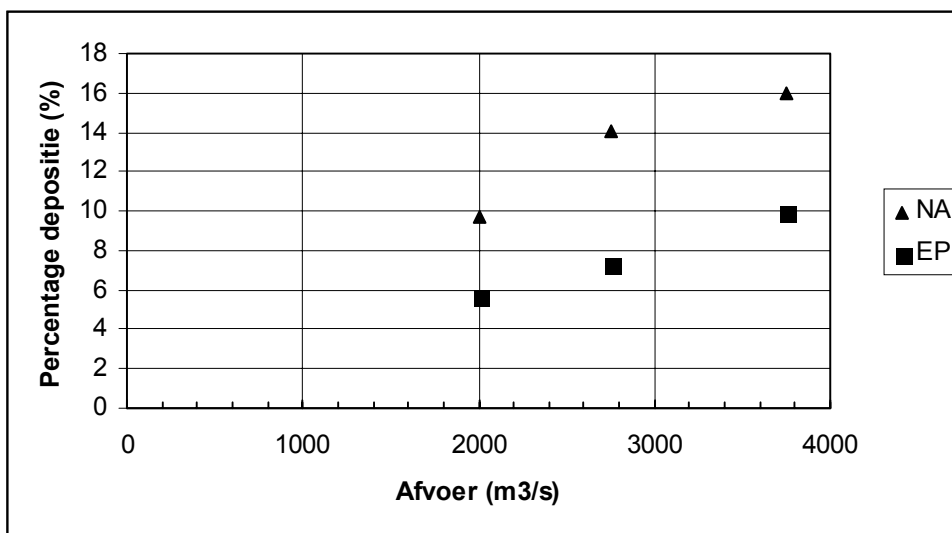


(c) 3750 m³/s

Figuur 6.10 Relatieve aandeel van het winterbed voor de gevallen NA en EP voor een drietal afvoerniveaus



Figuur 6.11 Afname slibconcentratie in Grensmaas voor een drietal afvoeren



Figuur 6.12 Afname percentage deposities van slib op Grensmaas weerden voor drietal afvoeren

6.5 Erosie zijbeken

Door de voorgestelde maatregelen onder EP zullen de waterstanden in de Grensmaas dalen. De waterstand in de Grensmaas is echter tegelijkertijd de erosiebasis voor de verschillende zijriviertjes en beken die in de Grensmaas uitmonden. Een verlaging van de erosiebasis leidt op termijn door terugschrijdende erosie tot verlaging van de zijbeken zelf, er van uitgaand dat dit erosieproces niet wordt beperkt door niet-alluviale riviergedeelten (die niet of slechts zeer langzaam erodeerbaar zijn). Op zich is deze verticale erosie niet gewenst, omdat deze zal leiden tot een verlaging van grondwaterstanden en andere mogelijke problemen. Als mitigerende maatregel moet dan aan een stuwdrempel worden gedacht.

Volgens het MER uit 1998 zijn de belangrijkste beken die in de Grensmaas afstromen de Geul en de Geleenbeek. De Geleenbeek stroomt via de Oude Maas uit in de Maas net bovenstrooms

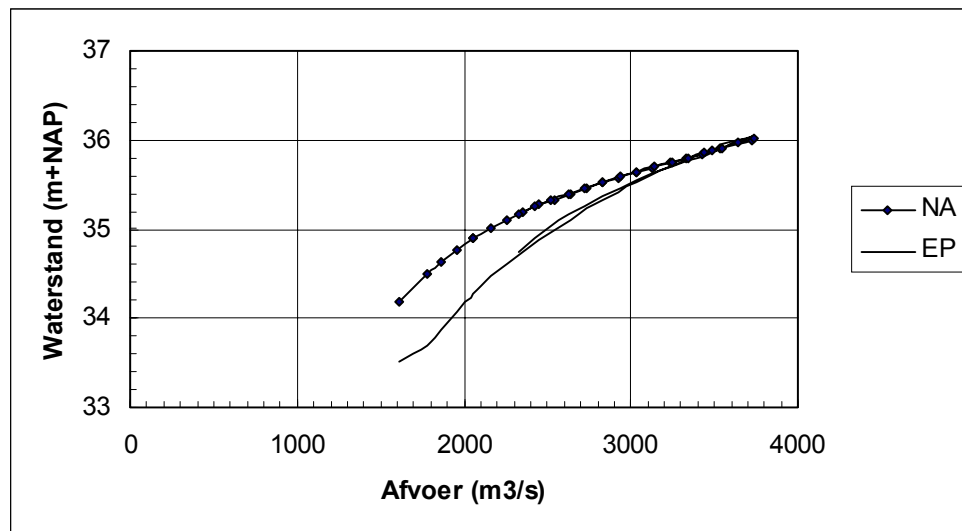
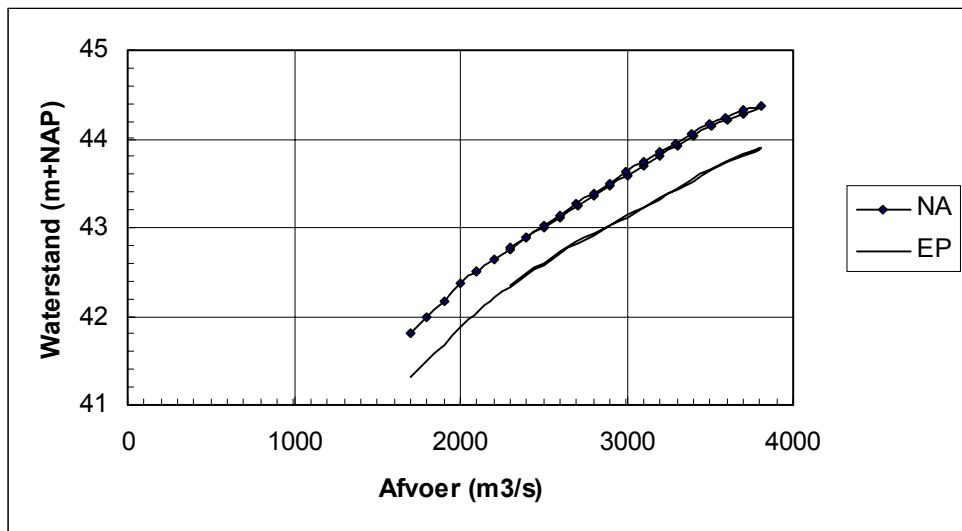
van Maasbracht, dus in feite benedenstrooms van de Grensmaas. Omdat daar de waterstanden niet noemenswaardig beïnvloed worden door de het EP, is het niet nodig de Geleenbeek verder te onderzoeken. Dat betekent dat aan Nederlandse zijde alleen de Geul nader beschouwd dient te worden. Overigens zijn de resultaten van de hier gepresenteerde analyse ook toepasbaar op bijvoorbeeld de Langbeek. Voorshands is geen analyse uitgevoerd voor de beken uitmondend vanuit de Belgische oever.

In de voorliggende studie zijn twee locaties beschouwd waar beken in de Grensmaas uitmonden, namelijk:

- Rkm 23, waar de Geul in de Grensmaas uitstroomt
- Rkm 39 waar de Ur in de Grensmaas uitstroomt

De tweede locatie is niet beschouwd omdat de Ur erg belangrijk zou zijn, maar om te tonen dat de omstandigheden bij de Geul niet representatief zijn voor de gehele Grensmaas en dat met name bij de flessenhalzen de situatie anders is.

Op basis van de WAQUA berekeningen kan de verlaging van de erosiebasis worden afgeleid. De resultaten zijn weergegeven in figuur 6.13. Zoals kan worden geconstateerd, nemen bij rkm 23 de waterstanden af met circa 0.5 m. Bij rkm 39 nemen bij lagere afvoeren de waterstanden af met circa 0.5 m terwijl bij de hoogste afvoeren de verlaging van de waterstanden marginaal blijkt. Dit wordt veroorzaakt door de nabijheid van een flessenhals. Overigens zijn voor de terugschrijdende erosie in de zijrivieren vooral de waterstanden bij gemiddelde afvoeren in de Grensmaas belangrijk. Daarbij komt dat door erosie van de flessenhalzen in de Grensmaas ook bij hoge afvoeren de waterstanden zullen gaan dalen, maar dit zal pas als SOBEK resultaten ter beschikking zijn, kwantitatief onderbouwd kunnen worden. Voorshands is er van uitgegaan dat voor beide zijrivieren de erosiebasis met 0.5 m verlaagd zal worden.



Figuur 6.13 Wijziging afvoer-waterstandrelatie op twee plaatsen langs de Grensmaas zoals afgeleid uit de WAQUA simulaties

Toepassing van de vergelijkingen in Hoofdstuk 3 (verg. 3.1 –3.3) geven benaderingen voor de aanpassingslengte L_m en de tijdschaal T_m bij 50% aanpassing van de bodem aan de verlaging van de erosiebasis. In de onderstaande tabel zijn enkele waarden weergegeven, waar bij is uitgegaan van $n=5$ als macht van de snelheid in de sedimenttransportformule, een gemiddeld beekverhang i van 10^{-3} en een breedte B van 10 m.:

Tabel 6.4 Aanpassing bodem zijbeken

Transport [m ³ /j]	Geschatte ge- middelde diepte [m]	Aanpassings- lengte [km]	Tijdschaal T _m [eeuw]
10-100	2	6	200-20
10-100	3	9	500-50
10-100	4	12	900-90

De aanpassing van de beekbodems geschiedt dus uiterst traag en duurt tientallen tot honderden eeuwen. Binnen de aanpassingslengte kan de in Hoofdstuk 3 gepresenteerde analytische formulering niet worden toegepast. De meest conservatieve aanname (in werkelijkheid langzamer) is dat de tijdschaal lineair toeneemt van 0 aan de monding (beekbodem past zich hier momentaan aan de bodem van de Grensmaas aan) tot de hierboven gevonden waarden van de tijdschaal op een afstand van de aanpassingslengte uit de monding.

De conclusie betreffende de aanpassing van de beekbodems die in het MER van 1998 zijn getrokken, namelijk dat aanpassing vele eeuwen vergt, is hiermee bevestigd. Zoals hierboven aangegeven is deze evenwichtsligging ongeveer 0,5 m lager dan de VKA.

6.6 Risicogebieden en mitigerende maatregelen

6.6.1 Aanpak

Voor het bepalen van de risicogebieden was het bij de opdrachtverlening de bedoeling een nabewerkingprogramma te gebruiken (AML), waarmee plaatsen in de laagwaterbedding van de Grensmaas kunnen worden opgespoord waar eventuele onbeheersbare erosie zou kunnen plaatsvinden. Het bleek echter niet mogelijk deze AML in een bruikbare vorm toegeleverd te krijgen, zodat een andere wijze van vaststelling van risicovolle gebieden moest worden aangehouden. Daarom is een andere methode gevolgd (zie verder).

Eerst wordt ingegaan op stabiliteitsrelaties voor het bepalen van bodem- en oeververdedigingen. Vervolgens worden de te beschermen delen van de laagwaterbedding en van de oevers vastgesteld, inclusief de aard en omvang van de beschermingsmaatregelen.

6.6.2 Stabiliteit van breuksteen op oevers en bedding

Als kritische stroomsnelheid voor een mogelijk risico wordt een praktische waarde van 3,5 m/s aangehouden, zoals bij de Maaswerken gebruikelijk is. Alhoewel bij deze snelheid kan nog wel erosie optreden, zal deze beperkt van omvang blijven. Verder kan de kritieke stroomsnelheid bij de oevers worden geschat met stabiliteitsformules, zoals die van Pilarczyk [Coastal Protection, 1990] of gebaseerd op Shields [Royal Haskoning, 2001]. Beide methoden komen ongeveer op hetzelfde neer (de Pilarczyk formule is ook op Shields gebaseerd), mits de lokale maximale stroomsnelheid nabij de oever als maatgevend wordt aangehouden. Bij toepassing van de Shields-formule wordt voor deze oevers een kritieke stroomsnelheid van ruim 4 m/s berekend. Veiligheidshalve wordt ook voor de oevers uitgegaan van een kritieke stroomsnelheid van 3,5 m/s. Omgekeerd kan bij een stroomsnelheid langs de oevers die groter is dan 3,5 m/s (dit is

alleen relevant in de nabijheid van kaden e.d.) de benodigde oeververdediging worden berekend; hierbij wordt uitgegaan van een taludhelling van 1:2,5.

De dimensioneringsformule is als volgt:

$$\Delta D = \frac{u_c^2}{C^2 \Psi} k_{\text{helling}} k_{\text{marge}} \quad (\text{Vgl. 6-10})$$

hierin is:

- u_c = kritische stroomsnelheid [m/s]
- C = ruwheidscoëfficiënt van Chézy [$\text{m}^{0.5}/\text{s}$]
- Ψ = Shields-parameter = 0,030 voor het begin van stabiliteitsverlies bij grof materiaal [-]
- Δ = specifieke dichtheid bodemmateriaal [-]
- D = karakteristieke steendiameter bodemmateriaal [m] = D_n , met
- D_n = nominale steendiameter [m]
- k_{helling} = coëfficiënt die de helling van het talud in aanmerking neemt (met een interne hoek van wrijving van 40°) [-]
- k_{marge} = toeslagcoëfficiënt om een veiligheidsmarge in rekening te brengen [-]; hier wordt een toeslag van 20 % aangehouden, hetgeen inhoudt dat $k_{\text{marge}} = 1,2$.

De nominale steendiameter D_n is de steendiameter die wordt bepaald uit de gemiddelde massa van de steensortering. De C-waarde heeft met een verhouding van h/k_s van circa 10 (waterdiepte gedeeld door de equivalente bodemruwheid) een waarde van $37.4 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$.

Verder heeft k_{helling} een waarde van 1.14 voor een talud van 1:2.5 en heeft k_{marge} een waarde van 1.20. Bij een waarde van de specifieke dichtheid van 1.65 wordt de benodigde steendiameter dus:

$$D = 0.0196 u_c^2 \quad (\text{Vgl. 6-11})$$

Indien een bodemverdediging berekend wordt, is de hellingscoëfficiënt 1,0 in plaats van 1,15 en kan de vereiste steendiameter bepaald worden uit:

$$D = 0.01704 u_c^2 \quad (\text{Vgl. 6-12})$$

6.6.3 Erosie bedding en beschermingsmaatregelen

Voor het vaststellen van de mogelijke erosie en benodigde beschermingsmaatregelen voor de bedding is van de volgende werkwijze uitgegaan.

- De maatgevende stroomsnelheid is bepaald uit de 1/250 jaar afvoer (stationair), overeenkomend met $3275 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Borgerharen. Door het dynamische effect van een afvoergolf kunnen de maximale stroomsnelheden die bij de stationaire afvoer overschrijden (circa 5 % bij de hogere afvoeren). Dit effect wordt in het voorliggende kader als marginaal beschouwd, maar moet later bij het feitelijke detailontwerp van de bodemverdediging en oeververdediging wél worden meegenomen.
- In eerste instantie is vastgesteld wáár stroomsnelheden 3,5 m/s overschrijden; in deze gebieden is de laagwaterbedding in principe als sterk erosiegevoelig te beschouwen;
- Daarnaast is nagegaan, aan de hand van de NITG-gegevens waar een toutvenant-dikte van meer dan 2 m aanwezig is; op die plaatsen waar dit het geval is, wordt een stroomsnelheid van maximaal 4,0 m/s toegelaten; dit is te beargumenteren doordat bij een waterdiepte van

8 m en enige erosie de stroomsnelheid onder 3,5 m/s komt te liggen terwijl er nog een zekere laagdikte toutvenant aanwezig is.

- Boven 4 m/s dient in alle gevallen een laagwaterbescherming te worden aangebracht over de gehele breedte van het laagwaterbed. Het aanbrengen van een verdediging over de volle breedte van het laagwaterbed is overeenkomstig de aanpak in het MER Grensmaas 1998; dit is vermoedelijk een vrij conservatieve benadering. Een minder conservatieve benadering, waarbij een zware teenverdediging langs de oevers wordt aangebracht zoals in [Royal Haskoning, 2001], kan bij verdere detaillering worden aangehouden (een studiegroep is thans doende om hierover consensus te verkrijgen).

Uit nadere analyse van de gegevens uit de recente NITG-database blijkt dat er toutvenant in een dikte van minimaal 2 m onder het *laagste niveau* van de laagwaterbedding aanwezig is op de volgende trajecten (over een traject van minimaal 500 m):

- locatie Itteren: rkm 20.0 tot 22.7
- locatie Aan de Maas: rkm 23.4 tot 25.8
- locatie Aan de Maas: rkm 27.4 tot 28.0
- locatie Meers: rkm 29.5 tot 30.1
- locatie Meers: rkm 30.5 tot 31.5
- locatie Meers: rkm 32.0 tot 33.0
- locatie Nattenhoven: rkm 39.5 tot 40.0
- locaties Gevenbicht, Koeweide, Visserweert en Roosteren: rkm 41.5 tot einde projectgebied

In tabel 6-3 staat aangegeven wáár globaal bodemverdediging nodig is en hoe zwaar de toplaag ervan moet zijn: de toepassing van bijvoorbeeld geotextielen of alternatieve verdedigingssystemen is hierbij buiten beschouwing gelaten.

Veiligheidshalve wordt hierbij aangenomen dat er geen stroomresistente lagen aanwezig zijn onder de toutvenant, enerzijds omdat 3,5 m/s een stroomsnelheid is waarbij ook bijvoorbeeld klei kan eroderen en anderzijds omdat de aanwezigheid van aaneengesloten stroomresistente lagen niet met voldoende zekerheid kan worden aangetoond.

Opgemerkt wordt nog dat bij locatie Roosteren, benedenstrooms van de rivierverruiming er vrij hoge stroomsnelheden optreden over een grote lengte van de rechter- en aansluitende linkerbocht (rond 4 m/s). Ten opzichte van het NA treedt geen noemenswaardige verhoging van de stroomsnelheden op en is er in dit opzicht dus geen noemenswaardig effect van het Grensmaasplan ten opzichte van het Nulalternatief. Daarom kunnen de sowieso benodigde verdedigingsmaatregelen niet worden toegeschreven aan het Grensmaasplan en zijn dan ook verder buiten beschouwing gebleven. Hier kan nog bij worden opgemerkt dat ook in het MER Grensmaas 1998 Roosteren buiten beschouwing is gebleven.

Tabel 6.5 Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde bodemverdediging in het EP

	traject	breedte	lengte	snelheid	Dn	dikte	volume	sortering
		(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m ³)	(kg)
Aan de Maas	24.00 - 24.20	100	200	3.5 - 4.0	*	*	*	*
Meers	28.90 - 29.20	100	300	3.5 - 4.0	0.344	0.688	20640	40 - 200
	30.40 - 30.65	100	250	3.5 - 4.0	0.344	0.688	17200	40 - 200
	30.65 - 31.10	100	450	4.0 - >5.0**	0.630	1.260	56700	300 - 1.000

	31.10 - 31.20	100	100	3.5 - 4.0	*	*	*	*
Nattenhoven	39.10 - 39.30	100	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	13760	40 - 200
Grevenbicht	40.90 - 41.20	100	300	3.5 - 4.0	0.344	0.688	20640	40 - 200
	41.20 - 41.80	100	600	4.0 - 4.5	0.630	1.260	75600	60 - 300
	43.70 - 44.40	100	700	3.5 - 4.0	*	*	*	*
totaal							204540	

N.B.:

- bodemverdediging aangebracht indien toutvenant-laag < 2,0 m en stroomsnelheid > 3,5 m/s;
- bij * geen bodemverdediging aangebracht want toutvenant-laag > 2,0 m
- ** 5,5 m/s als maatgevende snelheid aangehouden.

Ondanks de meer gelijkmatige stroomverdeling in het EP ten opzichte van de VKA, blijven er wel enkele sterke flessenhalzen over waar de bodem vastgelegd zou kunnen worden: bij Meers (op twee plaatsen), bij Nattenhoven en bij Grevenbicht (bocht Obbicht). hiervoor is circa 200.000 m³ breuksteen benodigd wat qua orde van grootte overeenkomt met de bodemvastleggingen uit de VKA. Dat dit nagenoeg gelijk blijft komt door twee tegenovergestelde tendensen: er is een afname te verwachten doordat de flessenhalzen minder geprononceerd zijn, echter met uitzondering die bij Meers; in het laatste geval is er juist een toename van de flessenhalswerking omdat Kotem niet wordt uitgevoerd in het EP en wél in de VKA.

Opgemerkt wordt nog dat, zoals eerder aangegeven, de grens van 3,5 m/s, waarboven in principe een bescherming nodig wordt geacht (bij afwezigheid van een dikke laag toutvenant) een enigermate arbitraire grens is. De huidige oeververdedigingen nabij kaden rond woonkernen zijn overigens (naar verwachting) tot een stroomsnelheid van 3,5 m/s wel voldoende stabiel. Bij detailontwerp dient vooral aandacht te worden besteed aan het mogelijk eroderen van de laagwaterbedding: dit kan in principe ook optreden bij stroomsnelheden lager dan 3,5 m/s, met name wanneer fijn onderliggend materiaal wordt aangesneden. Oevers dienen hierop aangepast te zijn middels een zware teenverdediging; zou zeer diepe erosie langs de oever worden verwacht, dan kan worden gedacht aan een 'vallende' teenverdediging of aan beddingvastlegging.

Bij het toepassen van een bodemverdediging over de volle breedte van het laagwaterbed moet worden bedacht dat het sedimenttransport zich in een bocht sterk kan concentreren in de binnenbocht van de vastgelegde bedding. Dit geeft een zeer ongelijk sedimentaanbod aan het einde van de verdediging.

Dit wordt geïllustreerd in Figuur 6.14 (bodemvastlegging bij St. Andries), waar duidelijk is te zien hoe zandbanen over de bestorte bodem schuiven. Er is een alternatief voor een volledige vastlegging denkbaar, waarbij bijvoorbeeld alleen de randen van de oevers zijn vastgelegd; in dat geval zal een dergelijk effect niet of in veel mindere mate optreden.



Figuur 6.14 "Zandbanen" over de vaste laag van St. Andries

Verklaring:

- kleine bodemvariatie ($\sigma = 0,1 - 0,2\text{m}$): bestorting met veel zand er over heen (holten tussen bestorting opgevuld door er over bewegend zand)
- grote bodemvariatie ($\sigma = 0,4 - 0,8\text{m}$): alleen bestorting; zand is door spiraalstroom naar de binnenbocht getransporteerd

6.6.4 Erosie oevers en beschermende maatregelen

De oevers langs de kaden zijn verdedigd. De hoedanigheid en de sterkte van de oevers kan vaak niet goed worden achterhaald, maar aangenomen wordt (opgave dienstkring) dat de oevers minimaal een sterkte hebben overeenkomend met een breuksteenverdediging van 40-200 kg. Wederom is de maatgevende stroomsnelheid bepaald uit de 1/250 jaar afvoer (stationair), zoals ook voor de laagwaterbedding.

De op deze wijze bepaalde oeververdedigingen zijn in Tabel 6.6 aangegeven. Het betreft hier de toplaag van de verdediging: de toepassing van bijvoorbeeld geotextielen of alternatieve verdedigingssystemen is buiten beschouwing gelaten. Bij de bepaling van het volume is een toeslag van 30 % toegepast in verband met de teenconstructie: dit is overigens alléén gedaan op die trajecten waar geen laagwaterbescherming wordt toegepast. Verder is de stroomaanval per oever in beschouwing genomen. Als oeverhoogte is een constante waarde van 8 m aangehouden.

Tabel 6.6 Benodigde oeververdediging per locatie in m³

	oever	traject	lengte	snelheid	Dn	dikte	volume		sortering
			(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m ³)		(kg)
Boscherveld	L	15.4 - 15.48	75	3.5 - 4.0	0.344	0.688	1445	t	40 - 200
Aan de Maas	L + R	23.95 - 24.25	300	3.5 - 4.0	0.344	0.688	11559	t	40 - 200
Meers	R	28.90 - 29.20	300	3.5 - 4.0	0.344	0.688	4446	b	40 - 200
	L	30.40 - 30.65	250	3.5 - 4.0	0.344	0.688	3705	b	40 - 200
	L + R	30.65 - 31.10	450	4.0 - >5.0	0.630	1.260	24426	b	300 - 1.000
	L + R	31.10 - 31.30	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	7706	t	40 - 200
Nattenhoven	R	39.10 - 39.30	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	2964	b	40 - 200
Grevenbicht	L + R	40.90 - 41.30	400	3.5 - 4.0	0.344	0.688	11856	b	40 - 200
	R	41.30 - 41.80	500	4.0 - 4.5	0.630	1.260	13570	b	60 - 300
	L	43.65 - 44.40	750	3.5 - 4.0	0.344	0.688	14449	t	40 - 200
totaal							96126		

N.B.: De letter 't' geeft aan dat er een teenverdediging is meegenomen in de hoeveelheden bepaling, te weten 30% van de op de oever aan te brengen breuksteen. Een teenverdediging is niet meegenomen waar sprake is van een bodemverdediging, 'b'.

De op deze wijze bepaalde beschermingsmaatregelen zijn een indicatie. Gedetailleerd ontwerp vereist meer nauwkeurige stroomsnelheidsinformatie (dit geldt vooral voor de oevers), lokale bodem- en oeversamenstelling, lokale erodeerbaarheid, hoedanigheid huidige oeververdediging, etcetera.

Bij vergelijking met de VKA uit het MER Grensmaas 1998 blijkt met name de omvang van de benodigde oeververdedigingen aanzienlijk kleiner te zijn: bijna 100.000 m³ breuksteen voor het EP ten opzichte van circa 340.000 m³ bij de VKA. Als belangrijkste reden hiervoor geldt dat de stroming over de lengte van de Grensmaas voor het EP over de grootste lengte van de Grensmaas (behalve bij de flessenhals bij Meers) gelijkmatiger is dan voor de VKA. De versterkte flessenhalswerking bij Meers in het EP 'tikt minder door' dan bij de bodemverdediging, omdat over grotere lengte langs de Grensmaas de oeververdediging aangebracht dient te worden.

6.7 Morfologie direct na uitvoering

6.7.1 Morfologie

Na het verbreden van de stroomgeulen en het afgraven van de weerden volgens het Plan Grensmaas is op veel plaatsen de bodem niet meer afgepleisterd en is er veel sediment beschikbaar voor transport. Dit betekent dat de morfologie ter plekke en benedenstrooms hierdoor beïnvloed zal worden, en dus dat de volgorde van stroomgeulverbredingen en weerdverlagingen invloed heeft op de morfologie. Dit impliceert dat vanuit morfologische overwegingen (bijvoorbeeld het stimuleren van morfodynamiek) het wellicht mogelijk is om een voorkeur aan te geven voor de volgorde van uitvoering van de verschillende locaties.

Overigens wordt verwacht dat de uitvoeringsvolgorde uiteindelijk vooral bepaald zal worden door andere factoren dan riviermorphologische. Zo zijn er eisen t.a.v. de waterstanden in het kader van WBR (geen waterstandsverhoging tijdens de uitvoering) en stroomsnelheden (vermijden tijdelijke flessenhalzen met het risico van sterke bodem- en oevererosie). Met name die laatste factor is waarschijnlijk erg belangrijk. Daarnaast hebben economische en bedrijfsmatige overwegingen en het verkrijgen van benodigde vergunningen invloed op de volgorde van uitvoering. Het vaststellen van een optimale volgorde zal dan ook in een nader en integraal onderzoek verder aan de orde dienen te komen.

De uitvoeringsvolgorde is van belang voor twee morfologische aspecten, namelijk:

- de morfodynamiek
- de doorvoer van sediment naar de Zandmaas

Morfodynamiek is belangrijk voor de ecologische ontwikkeling. Hier zal morfodynamiek vooral besproken worden als het optreden van beddingvormen en banken. Deze beddingvormen en banken zullen in de tijd variëren en door het systeem migreren. De doorvoer van sediment naar de Zandmaas is belangrijk in verband met mogelijke ongewenste aanzanding.

In principe zijn er mogelijkheden om de morfodynamiek en de doorvoer van sediment naar de Zandmaas te beïnvloeden. Al in het oorspronkelijke plan van het Bureau Strooming [Helmer et al, 1990] is er op gewezen dat de morfodynamiek in de Grensmaas kan worden verhoogd door in het bovenstroomse deel van de Grensmaas sediment toe te voegen. Een voorbeeld hiervan is het toevoegen van sediment benedenstrooms van de stuw bij Iffezheim in Duitsland om ongewenste bodemdegradatie tegen te gaan. Toevoegen van sediment aan de Grensmaas bij Borgharen heeft twee voordelen:

- de degradatie benedenstrooms van de stuw Borgharen wordt verminderd, waardoor aanpassingen van de woelbak minder ingrijpend kunnen zijn, of mogelijk zelfs achterwege kunnen blijven;
- de morfodynamiek in de Grensmaas wordt verhoogd omdat er meer sediment in het riviersysteem getransporteerd zal worden.

Het gaat daarbij dan om het gemiddelde jaarlijks getransporteerde sediment in de Grensmaas (volgens [Duizendstra, 1999] zou dit orde 50.000 m³ kunnen bedragen). Een kunstmatige zanddosering bij Borgharen zou wel een grote investering vergen. Omdat het toevoegen van sediment aan de Grensmaas geen onderdeel is van het Eindplan zal dit in dit kader niet verder worden beschouwd.

De doorvoer van sediment naar de Zandmaas kan worden beïnvloed middels een zandvang aan de benedenstroomse rand van de Grensmaas. In de Maas bij Maasbracht net bovenstrooms van het Julianakanaal is een dergelijke zandvang aanwezig [Klaassen, 1981], die is aangelegd om te voorkomen dat te veel aanzanding in de riviervervijding ter plaatse van de monding van het Julianakanaal zou optreden. Tegenwoordig wordt de zandvang om de paar jaar (afhankelijk van hoogwaters) geleegd om knelpunten voor de scheepvaart ter plaatse van de zandvang zelf te voorkomen. Deze zandvang zou echter ook gebruikt kunnen worden om het sediment dat de Grensmaas verlaat op te vangen. Daartoe zou deze na de uitvoering van het EP vaker dan in de huidige situatie moeten worden uitgebaggerd. Ook kan worden overwogen de zandvang te ver-

breiden (op dit moment is de zandvang alleen in het rechter riviergedeelte aanwezig) en eventueel te verdiepen.

Bij het bepalen van de invloed van de uitvoeringsvolgorde dienen een aantal morfologische kenmerken te worden beschouwd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de resultaten van principeonderzoek in een rechte goot, en van onderzoek in het schaalmodel van de Grensmaas in het kader van de m.e.r. 1998. Het volgende kan worden opgemerkt ten aanzien van de ontwikkeling na uitvoering van het EP:

- In de huidige situatie zal bij hoogwater zal de afpleisteringslaag in het diepste deel in de buitenbocht het eerste instabiel worden en daaronder zal fijner sediment worden weggezogen, dat zich over de afpleisteringslaag zal gaan bewegen [Klaassen, 1987]. In de Grensmaas wordt in de huidige situatie veel sediment in de binnenbochten aangetroffen.
- Na stroomgeulverbreding en (mogelijk in mindere mate) na weerdverlaging zal een bedding achterblijven die niet is afgepleisterd. Bij volgende hoogwaters zal alsnog afpleistering plaatsvinden door selectief transport. Klaassen [1981] schat dat voor de vorming van een afpleisteringslaag een degradatie van minimaal enkele centimeters nodig is. Waarschijnlijk zal echter een degradatie in de orde van 5 a 10 cm optreden. Dit komt voor de gehele Grensmaas overeen met circa 1 Mm³ sediment, dat in 10 tot 20 jaar (de tijd van uitvoering van het plan) zal vrijkomen in de Grensmaas. Dit komt overeen met 50,000 a 100,000 m³/jaar, of wel een verdubbeling of verdrievoudiging van het huidige sedimenttransport (zie hoofdstuk 3).
- Op een aantal plaatsen zal bij uitvoering van het voorgestelde plan een zeer brede bedding ontstaan. Het aangevoerde sediment en het sediment dat ter plekke door erosie vrijkomt zal door de spiraalstroom naar de binnenbochten worden verplaatst.
- Het grovere deel van het vrijkomende sediment zal in deze verwijdingen neerslaan waarbij er duidelijk verschil is tussen de verschijnselen in de buiten- en binnenbochten. Het fijnere gedeelte zal echter verder in benedenstroomse richting worden getransporteerd.
- Bij de proeven van Klaassen [1987] bleek dat er een wisselwerking optreedt tussen enerzijds de beddingvormen van het sediment dat vanuit de bodemlaag onder de afpleisteringslaag erodeert en anderzijds de afpleisteringslaag zelf. De afpleisteringslaag wordt instabieler door deze beddingvormen die over de afpleisteringslaag voortplanten. In de *buitenbochten* van de Grensmaas zal deze wisselwerking echter slechts in beperkte mate optreden, omdat het sediment meer naar de binnenbocht transporteert.
- In *binnenbochten* die niet worden beïnvloed door stroomgeulverwijding zal bij hoogwater weliswaar de snelheid kleiner zijn, maar zal wel het meeste sediment transport optreden vanwege het effect van spiraalstroming. Er is hier een analogie met de Waalbochten met bestorting in de buitenbocht waar, anders bij meer zandige rivieren zonder grove laag in de buitenbocht, ook het meeste sediment door de binnenbocht wordt getransporteerd. In de binnenbochten zullen dus banken optreden bestaande uit zand en grind, die zich voortbewegen over een grovere laag. Dus daar zal de grootste invloed van beddingvormen op de afpleisteringslaag optreden. Nader onderzoek naar de hoogte, lengte en onderlinge afstand van de geïsoleerde beddingvormen lijkt gewenst om na te gaan of deze beddingvormen veel invloed hebben op de situatie in de binnenbochten.
- Daar waar wel sprake is van stroomgeulverbreding zullen volgens de WAQUA berekeningen de grootste snelheden in de binnenbochten optreden. Hier zullen de hiervoor beschreven verschijnselen zich in nog sterkere mate voordoen.

- Een belangrijke vraag is of het over de afpleisteringslaag getransporteerde sediment tot interactie met de onderliggende afpleisteringslaag zal komen. Indien dit het geval is zal het fijne sediment na enige tijd worden afgepleisterd met het onderliggende grovere materiaal en zal pas langzaam worden afgevoerd.
- Indien er weinig of geen interactie plaats vindt tussen de afpleisteringslaag en het er over transporterende sediment, dan plant dit sediment zich in benedenstroomse richting voort als een zandgolf. Deze zandgolf zal zich in benedenstroomse richting afvlakken.
- Op een aantal plekken zal het rivierprofiel aanzienlijke verwijding worden door stroomgeulverbreding en weerddverlaging. Helmer et al [1990] voorspelde dat bij grote hoogwaters in de binnenbochten geul- en bankvorming optreedt, hetgeen door proeven in het schaalmodel werd ondersteund. De banken zullen begroeid raken en in toenemende mate sediment vasthouden waardoor tweede geulen meer geprononceerd zullen worden.

Resumerend zal het vrijkomen van sediment bovenstrooms een vergroting van de morfodynamiek in benedenstroomse richting veroorzaken, met name ter plaatse van stroomgeulverbredingen. Door sedimentatie van het bovenstrooms vrijkomende materiaal en bankvorming in benedenstroomse richting zal er meer sediment voor transport ter beschikking komen. Tegelijkertijd zal op termijn daardoor een grotere degradatie van de rivierbedding optreden. Een deel van de effecten zullen tijdelijk zijn omdat opnieuw afpleistering zal gaan optreden; ook kan er bijvoorbeeld een sterke sedimentatie in stroomluwe gebieden plaatsvinden met een meer permanent karakter.

6.7.2 Uitvoeringsvolgorde

Tengevolge van de hierboven beschreven invloed in benedenstroomse richting zijn de morfologische effecten bij een uitvoeringsvolgorde van boven- naar benedenstrooms anders dan bij een omgekeerde volgorde. Hierbij is het belangrijk onderscheid te maken tussen wel en geen interactie van getransporteerd sediment met de daaronder liggende bestaande afpleisteringslaag.

- *Geen interactie:* in dit geval wordt de Grensmaas beschouwd als een rivier met een vaste laag over de gehele lengte. Bij hoogwater komt ter plaatse van stroomgeulverbredingen sediment vrij als gevolg van selectief transport. Hier ontstaat een nieuwe afpleisteringslaag en banken die zich in benedenstroomse richting voortplanten over de bestaande afpleisteringslaag en afvlakken.
- *Wel interactie:* In dit geval is er eveneens ter plaatse van de stroomgeulverbredingen sprake van de vorming van een afpleisteringslaag. Het vrijkomende sediment zal echter benedenstrooms met bestaande afpleisteringslagen uitwisselen. In het extreme geval zou kunnen worden verondersteld dat afpleistering onmiddellijk optreedt na de uitvoering van de stroomgeulverbredingen.

Het is op de voorhand niet vast te stellen in welke mate bovengenoemde interactie optreedt. Daarvoor is nader onderzoek nodig waarbij met name gebruik zal moeten worden gemaakt van veldwaarnemingen en metingen. In het navolgende worden de mogelijke morfologische effecten van de twee genoemde extreme uitvoeringsvolgordes (van bovenstrooms naar benedenstrooms en omgekeerd) kort besproken, rekening houdend met de mate van interactie tussen de sedimenttransportlaag en de afpleisteringslaag.

Uitvoering in benedenstroomse richting

Het sediment, dat ter plaatse van de stroomgeulverbredingen en weerdverlagingen vrijkomt zal in benedenstroomse richting in de bestaande (niet-aangepaste) Grensmaas worden getransporteerd. Indien er weinig interactie met de bestaande afpleisteringslaag is zal dit transport over een min of meer vaste laag betreffen met naar verwachting aanzanding in gebieden met lage stroomsnelheden, met name tijdens kleine afvoeren. De morfodynamiek zal niet significant worden beïnvloed.

Ingeval van sterke interactie tussen de transportlaag en de afpleisteringslaag zal het sedimenttransport in benedenstroomse richting nauwelijks toenemen vanwege de snelle vorming van een afpleisteringslaag. De rivierdynamiek zal nog minder worden beïnvloed dan bij weinig of geen interactie.

Uitvoering in bovenstroomse richting

In dit geval zal sediment dat beschikbaar komt na uitvoering van stroomgeulverbredingen en weerdverlagingen transporteren naar al eerder gereedgekomen benedenstroomse locaties. Dit leidt tot een versterking van de morfodynamiek in deze gedeelten (aanzanding in de nieuwe verruimingsslocaties) en een grotere kans op instabiliteit van de hier relatief jonge afpleisteringslagen.

Hier zal dan fijner sediment vrijkomen uit de lagen onder deze instabiele afpleisteringslagen. Dit geldt vooral voor de fase direct na uitvoering van de verruimingen. Het effect van uitvoering in bovenstroomse richting is dus dat er grotere sedimenttransporten optreden in de benedenstroomse riviergedeelten hetgeen een verdere daling van de nieuw gevormde afpleisteringslagen bewerkstelligt. Bovengenoemde effecten treden op bij interactie van de transportlaag met de afpleisteringslaag en, zoals genoemd, vooral in de periode direct na uitvoering van de werken.

Indien er geen of minder interactie optreedt, zal het sediment dat vrijkomt ter plaatse van de stroomgeulverbredingen en weerdverlagingen verder benedenstrooms transporteren en niet worden vastgelegd door nieuwe afpleisteringslagen. De kans op aanzanding en bankvorming in de benedenstroomse locaties neemt dan toe, vooral ter plaatse van de rivierverruimingen. Dit zal dan leiden tot minder doorvoer naar de Zandmaas. Nader onderzoek met een morfologisch model zou hier mogelijk meer kwantitatieve onderbouwing aan kunnen geven.

Voorkeursvolgorde

Indien een, vooral in de fase direct na aanleg, grotere morfodynamiek de voorkeur verdient, dan bestaat er vanuit morfologisch oogpunt gezien een *uitgesproken voorkeur* voor een uitvoering van beneden naar boven. Weliswaar zal dan mogelijk meer sediment in de richting van de Zandmaas wordt getransporteerd, vooral bij sterke interactie met de bodems in de "net" gereedgekomen locaties, maar dit sediment kan in de zandvang bij Maasbracht worden opgevangen en worden verwijderd. Bovendien zullen de successievelijke verruimingslocaties met als eerste die bij Koeweide een aanzienlijk gedeelte van het aangevoerde sediment kunnen opvangen.

Zoals eerder aangegeven zijn hier de morfodynamische implicaties van de uitvoeringsvolgorde besproken. Andere aspecten spelen een minstens even belangrijke rol bij de keuze van de uit-

voering. Zo is er vanuit het oogpunt van de hydraulica een argument om te werken in benedenstroomse richting omdat er dan sprake is van geringere flessenhalswerking in de nauwere riviergedeelten. Echter, lokale verhogingen van waterstanden, bijvoorbeeld door deklaagbergingen, dienen in het kader van de WBR vanaf benedenstrooms richting bovenstrooms te worden gecompenseerd. Een vaste regel bij verruimingsmaatregelen is namelijk dat deze in bovenstroomse richting moeten worden uitgevoerd juist om ongewenste waterstandsverhogingen te voorkomen. Het vaststellen van een optimale volgorde zal dan ook in een nader en integraal onderzoek verder moeten worden onderzocht.

Voor de kansen op zoveel mogelijk morfodynamiek is het van belang dat, waar mogelijk, de benodigde bodem- en oevervastleggingen worden geminimaliseerd. Dit kan als aparte doelstelling worden gezien, naast het streven naar zoveel mogelijk vanaf benedenstrooms gerealiseerde plannen. Nader uitgezocht dient te worden in hoeverre deze doelstellingen verenigbaar zijn. Indien de uitvoering van Vlaamse locaties wordt overwogen (niet in het EP overigens), dan kan worden gesteld dat deze van groot belang zijn, omdat ze veelal een 'sleutelrol' vervullen bij het verminderen van de flessenhalswerking. Ter hoogte van de flessenhalzen dienen deze plannen vervroegd te worden uitgevoerd, waarna verder van beneden- naar bovenstrooms gewerkt zou kunnen worden.

7 Morfologische effecten EPP en EPM

7.1 Effecten van EPP en EPM ten opzichte van EP

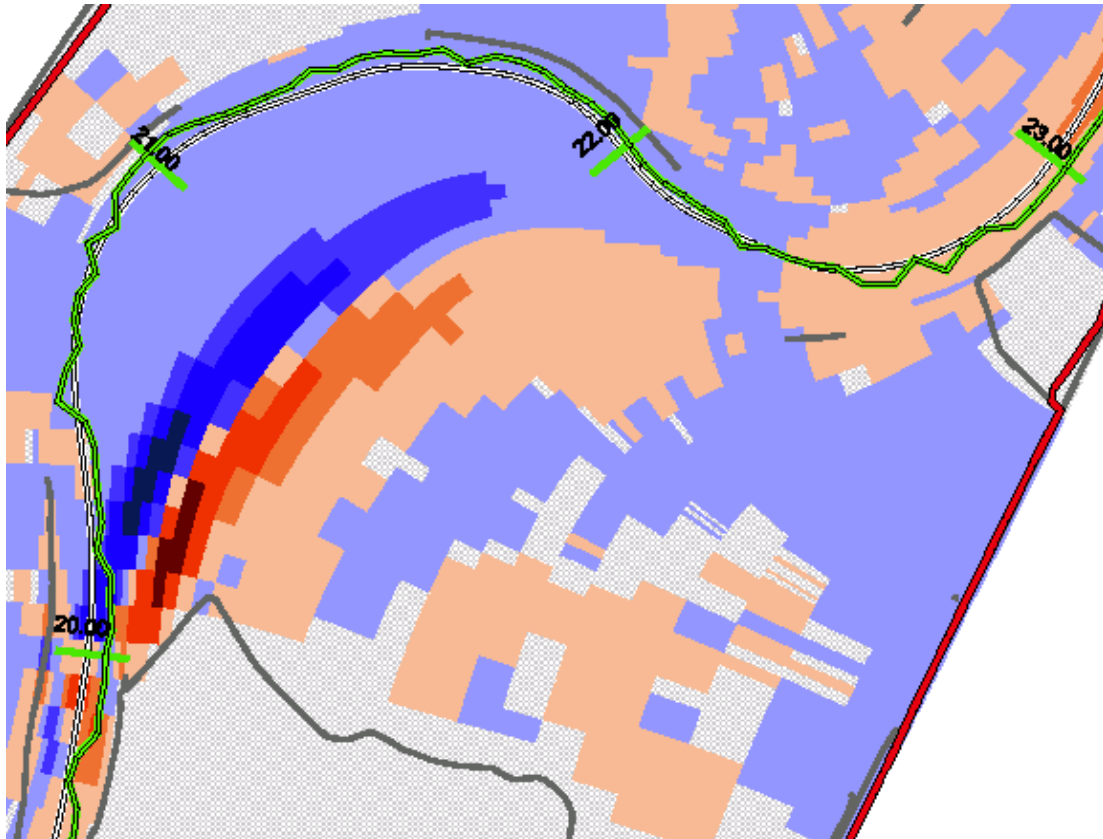
De varianten EPP (0,5 m hoger insteekniveau dan EP) en EPM (0,5 m lager insteekniveau dan EP) zijn alleen vergeleken met het EP, dus niet met het NA. De reden daarvan is dat de afwijkingen klein zijn ten opzichte van het EP; verder zou een vergelijking met het NA wel veel herhaling geven, met weinig nieuwe gezichtspunten.

De vergelijking is op twee manieren gedaan:

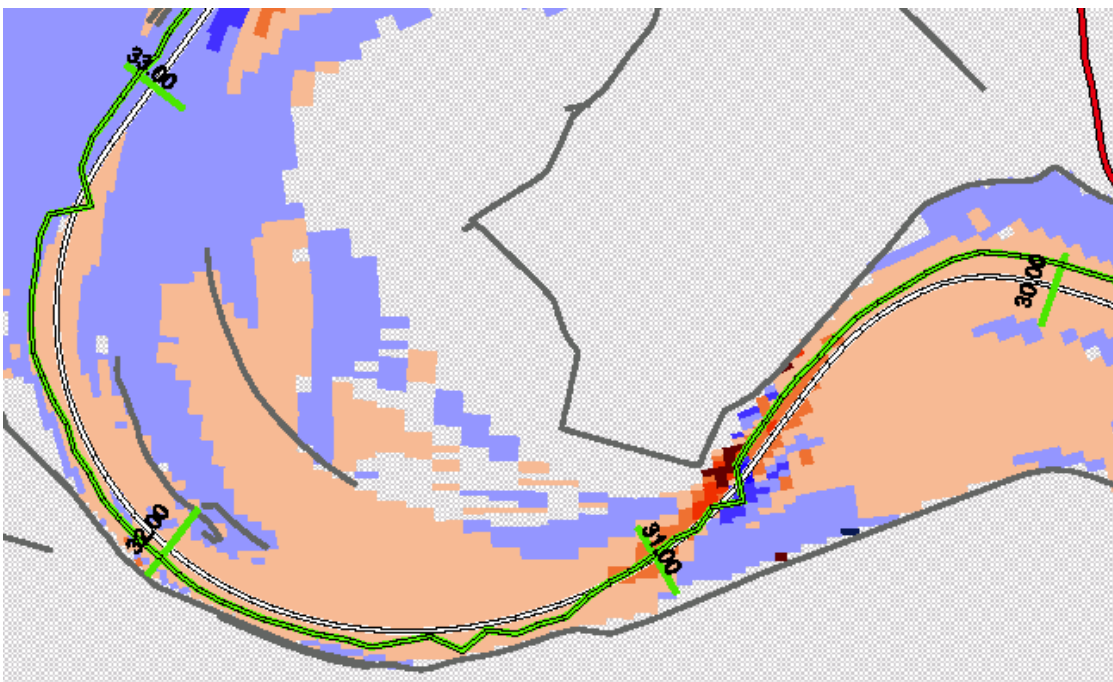
- 1) door nagaan waar en in hoeverre de morfodynamiek verandert;
- 2) door aan te geven welke verschijnselen hierdoor kunnen worden beïnvloed.

7.1.1 Gebieden waar de morfodynamiek verandert

De verschillen tussen respectievelijk EPP en EPM enerzijds en EP anderzijds zijn op (met GIS bewerkte) kaarten van de actuele schuifspanningveranderingen weergegeven. Ter illustratie van de gevolgde aanpak is in Figuur 7.1 en Figuur 7.2 de actuele schuifspanningverandering in het EPP weergegeven voor twee kenmerkende locaties, nl. Itteren en Meers. Zoals eerder aangegeven worden schuifspanningveranderingen tussen -5 en 5 N/m^2 als niet significant beschouwd en weggefilterd. Hierdoor wordt de 'ruis' op de berekende verschillen geëlimineerd. De kritische schuifspanning wordt hierdoor mede iets verhoogd, en wel tot circa 28 N/m^2). Het gaat bij deze analyse dus uitsluitend om de verschillen in de optredende bodemschuifspanningen tussen het EP en het EPP, en tussen het EP en het EPM. Hierbij geldt het EP als referentie.



Figuur 7.1 Verschil in actuele schuifspanningen (EP – EPP) voor de locatie Itteren



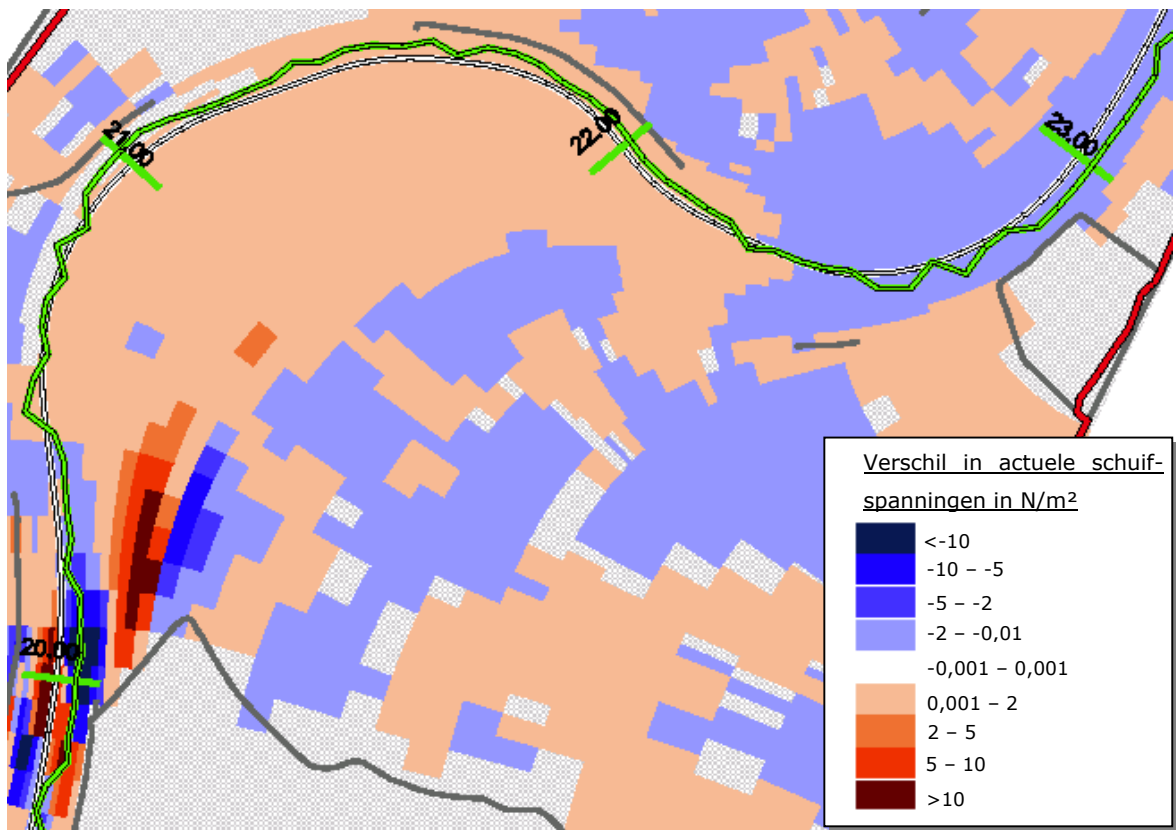
Figuur 7.2 Verschil in actuele schuifspanningen (EP – EPP) voor de locatie Meers

In de onderstaande tabellen zijn achtereenvolgens de verschillen tussen EPP en EP, alsmede EPM en EP weergegeven.

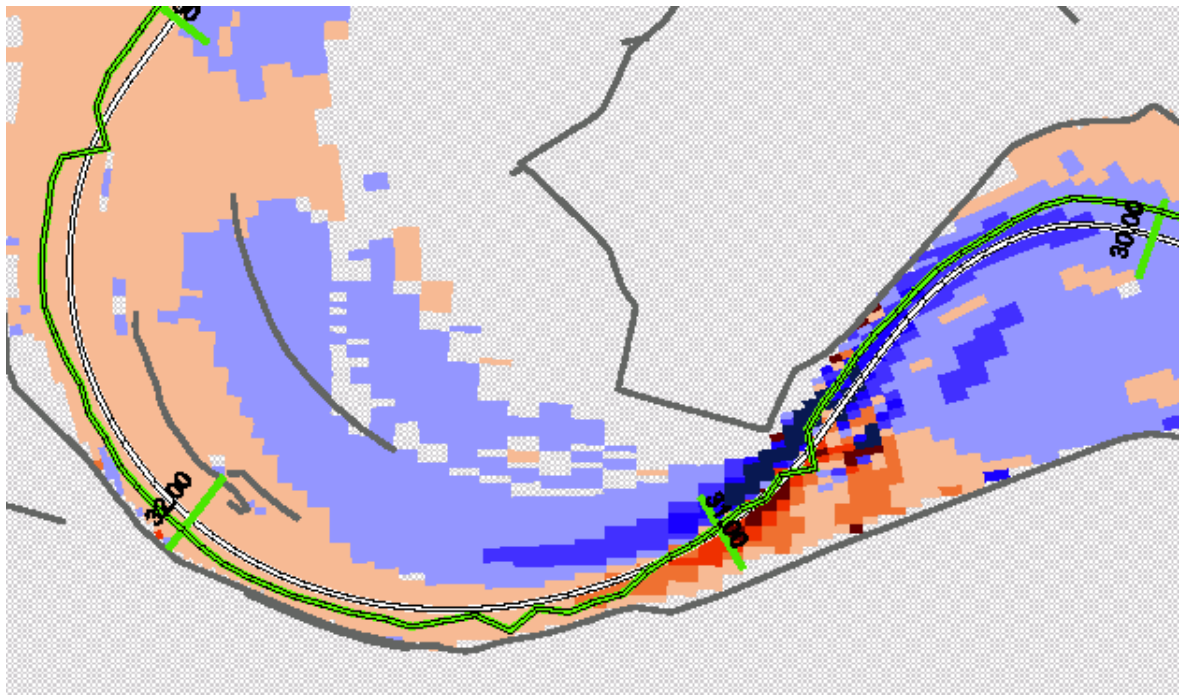
Tabel 7.1 Overzicht wijziging morfodynamiek EPP t.o.v. EP

Verandering Morfodynamiek EPP t.o.v. EP			
locatie	rkm verandering* τ	omschrijving	oordeel potentiële thalwegverplaatsing
Bossherveld			
Borgharen	16,4 – 16,6	Afname $\tau^{1)}$ binnenkant binnenbocht, toename $\tau^{1)}$ buitenkant binnenbocht	R, minder sterke verplaatsing richting rechteroever, verplaatsing thalweg zal nog steeds optreden
Itteren	20,0 – 20,3	Aan de bovenstroomse zijde van de bochtverruiming, afname $\tau^{1)}$ binnenkant binnenbocht, toename $\tau^{1)}$ buitenkant buitenbocht	R+, insnijding richting binnenbocht EPP zal minder richting rechteroever plaatsvinden
Aan de Maas			
Meers	30,8 – 30,9	Rechteroever afname $\tau^{2)}$	R, aansnijden van bocht minder uitgesproken dan in het EP; thalwegverlegging (bochtafsnijding voor het grindeiland langs) hetzelfde als het EP
Maasband			
Urmond			
Nattenhoven			
Grevenbicht	41 – 41,6	Kleinere flessenhalswerking, dus afname $\tau^{1)}$ als gevolg van minder afgraving benedenstrooms in de nevengeul	
	43,7 – 43,8	Toename $\tau^{1)}$ als gevolg van kleinere vergraving	L (in EP geen thalwegverplaatsing); toename over klein stuk, dus hooguit locale thalwegverplaatsing
Koeweide		Veranderingen zichtbaar, deze zijn niet significant want morfologisch inactief	
Visserweert	49,1 – 49,3	Toename $\tau^{1)}$ buitenkant buitenbocht en afname $\tau^{1)}$ binnenkant buitenbocht	
Roosteren			
* = veranderingen in $\tau > 5 \text{ N/m}^2$ en $\tau > \tau_c$ in EP R = enige verplaatsing naar rechteroever mogelijk R+ = sterke verplaatsing naar rechteroever gelijk L = enige verplaatsing naar linkeroever mogelijk L+ = sterke verplaatsing naar linkeroever mogelijk geen aanduiding: thalweg stabiel ¹⁾ = toename τ tussen +5 en +10 N/m^2 of afname τ tussen -5 en -10 N/m^2 ²⁾ = toename $\tau > +10 \text{ N/m}^2$ of afname $\tau < -10 \text{ N/m}^2$			

Ter illustratie van de gevolgde aanpak is in Figuur 7.3 en Figuur 7.4 de actuele schuifspanningsverandering in het EPM weergegeven voor twee kenmerkende locaties (Itteren en Meers).



Figuur 7.3 Vershil in actuele schuifspanningen (EP - EPM) voor de locatie Itteren



Figuur 7.4 Vershil in actuele schuifspanningen (EP - EPM) voor de locatie Meers

Tabel 7.2 Overzicht wijziging morfodynamiek EPM t.o.v. EP

Verandering Morfodynamiek EPM t.o.v. EP			
locatie	rkm verandering* τ	omschrijving	oordeel potentiële thalwegverplaatsing
Boscherveld			
Borgharen			
Itteren	19,7 – 19,9	toename $\tau^{1)}$ linkeroever en afname $\tau^{1)}$ rechteroever	beperkte thalwegverplaatsing bij Itteren tussen de kaden richting linkeroever t.o.v. EP
	19,9 – 20	toename $\tau^{1)}$ op rkm 20 als gevolg van grotere stroming door verruiming. Hierdoor versterking van de flessenhals bij Itteren (toename ongeveer 0,5 m/s)	
	20 – 20,3	aan de bovenstroomse zijde van de bochtverruiming toename $\tau^{1)}$ binnenkant binnenbocht, afname $\tau^{1)}$ richting buitenkant binnenbocht	R+, insnijding richting binnenbocht, thalwegverplaatsing bij het EPM zal meer richting de rechteroever plaatsvinden (orde 50 m)
Aan de Maas			
Meers	30,5 – 31,1	toename flessenhalswerking als gevolg van grotere afgraving bij locatie Meers. Over 200 m stroomsnelheid van 5 à 6,5 m/s (in plaats van maximaal 5 m/s). rechteroever toename $\tau^{2)}$ en in de as van de rivier afname $\tau^{2)}$	R, aansnijden van bocht sterker dan in het EP, dus de bochtafsnijding voor het grindeiland zal eerder dan in het EP plaatsvinden.
Maasband			
Urmond			
Nattenhoven			
Grevenbicht	41,2 – 41,6	toename $\tau^{1)}$ als gevolg van diepere nevengeul bij Grevenbicht. Daardoor bovenstrooms hogere schuifspanningen	
Koeweide		veranderingen zichtbaar, maar niet morfologische actief	
Visserweert	48,5 – 48,7	toename $\tau^{2)}$ buitenbocht en afname $\tau^{2)}$ binnenbocht als gevolg van diepere nevengeul.	R, (geen thalwegverplaatsing in EP) lichte neiging thalweg te verplaatsen in de richting van de nevengeul. Bochtafsnijding zal niet plaatsvinden
Roosteren			

* = veranderingen in $\tau > 5 \text{ N/m}^2$ en $\tau > \tau_c$ in EP
 R = enige verplaatsing naar rechteroever mogelijk
 R+ = sterke verplaatsing naar rechteroever mogelijk
 L = enige verplaatsing naar linkeroever mogelijk
 L+ = sterke verplaatsing naar linkeroever mogelijk
 geen aanduiding: thalweg stabiel
 1) = toename τ tussen +5 en +10 N/m^2 of afname τ tussen -5 en -10 N/m^2
 2) = toename $\tau > +10 \text{ N/m}^2$ of afname $\tau < -10 \text{ N/m}^2$

Gesteld kan worden dat het EPP leidt tot gemiddeld genomen lagere schuifspanningen in de flessenhalzen dan in het EP, omdat de waterstanden benedenstrooms van de flessenhalzen minder zullen dalen doordat er minder wordt vergraven. Omgekeerd zal EPM ten opzichte van het EP leiden tot een daling van de waterstanden benedenstrooms van de flessenhalzen en vervolgens tot enigszins hogere schuifspanningen in de flessenhalzen zelf, met name bij Itteren, Meers en Koeweide (Obbicht). Ook bij Grevenbicht nemen de schuifspanningen toe. Verder leidt het EPM er toe dat de stroming meer naar de binnenbocht trekt, en dus is er aan het begin van de bocht een grotere kromming van de stroomlijnen. Een en ander zal resulteren in enige versterking van de spiraalstroom, waardoor het sediment meer in de richting van de binnenbocht wordt gestuurd. Bij EPP is dat juist omgekeerd.

7.1.2 Beïnvloeding van morfologische verschijnselen

Op voorhand moet gesteld worden dat de verschillen tussen EP, EPP en EPM betrekkelijk klein zijn: de schuifspanningen van EPP en EPM ten opzichte van EP zijn maximaal circa 5 a 10% kleiner respectievelijk groter.

Er bestaat een sterk niet-lineair verband tussen de bodemschuifspanning en het sedimenttransport: bij toenemende schuifspanning neemt het sedimenttransport relatief meer toe. Voor omstandigheden dat de afpleisteringslaag instabiel wordt (en dat zal aanvankelijk redelijk snel gebeuren in de flessenhalzen), neemt daardoor ook het sedimenttransport sterk toe. Het in de flessenhalzen gegenereerd sediment zal in de benedenstroomse verwijding terecht komen. De benedenstroomse verwijdingen zijn alle sterk gekromd. De daardoor optredende gekromde stroomlijnen zullen veel sediment naar de binnenbocht transporteren. Dit sediment zal getransporteerd worden over de zich afpleisterende riviergedeelten in de binnenbochten met verwijdingen. Door de interactie tussen het er over getransporteerd sediment en de afpleisteringslaag zelf zal extra veel sediment van onder de afpleisteringslaag worden gezogen. Hierdoor zal de afpleisteringslaag zakken en zal een eventuele bochtafsnijding zich sneller ontwikkelen dan het geval zou zijn zonder de invloed van het bovenstrooms gegenereerde sediment. Daarnaast zullen bij een toename van het sedimenttransport de banken op de afpleisteringslaag in de binnenbocht groter worden en de bedekking door banken van de afpleisteringslaag eveneens, waardoor de morfodynamiek in de rivier zal toenemen.

De toename van de schuifspanningen van EPM ten opzichte van EP leidt dus tot twee morfologische ontwikkelingen:

1. enige toename van de ontwikkeling van de bochtafsnijding in de bochten waar de stroomgeul is verbreed; en
2. een iets hogere morfodynamiek.

EPP leidt om dezelfde redenen tot een (nog) minder snel optredende bochtafsnijding en thalwegverlegging en levert ook minder morfodynamiek in de zin van het optreden van banken en beddingvormen.

De te verdedigen lengte van de rivier zal bij het EPP iets minder groot zijn dan bij het EP en bij het EPM iets groter dan bij het EP. De verschillen zullen echter beperkt zijn doordat de stroomsnelheden en daarmee de schuifspanningen in absolute zin maar weinig veranderen. Bij een meer gedetailleerd ontwerp van de bodem- en oeeververdedigingen zullen de verschillen wél in ogenschouw moeten worden genomen.

Opgemerkt wordt dat de inschatting die hierboven is gemaakt is gebeurd op basis van een conceptuele en noodzakelijkerwijs kwalitatieve benadering. Indien een keuze tussen EP, EPP en EPM een belangrijke kwestie wordt, kan overwogen worden om een 2D morfologisch model voor gegradeerd sediment in te zetten om meer zekerheid over de verschillen tussen EP en EPP en EPM te verkrijgen.

8 Morfologische effecten MMA

8.1 Algemeen

Het MMA (voor een korte beschrijving, zie 8.2) wordt, omdat het een volwaardig alternatief betreft, vergeleken met het NA, overeenkomstig het EP. Dit geldt voor de analyse van de morfodynamiek, de thalwegligging en de vaststelling van de risicogebieden en mitigerende maatregelen. Voor wat betreft de effecten voor het slib, erosie zijbeken en de morfologie direct na uitvoering en uitvoeringsvolgorde is een verkorte methodiek toegepast, waarbij gekeken wordt naar significante veranderingen ten opzichte van het EP.

8.2 Korte beschrijving van het MMA

Het MMA is gebaseerd op de VKA uit het MER Grensmaas 1998. Dit betekent ten opzichte van het EP dat bijvoorbeeld de Vlaamse locaties Hocht Bampd, Herbricht en Kotem wel zijn uitgevoerd in het MMA, de nevengeul bij Grevenbicht is vervallen en vervangen door zomerbedverbreding/weerdverlaging uit de VKA, waarbij Elba is gesaneerd. Ook de weerdverlaging bij Koeweide is groter dan in het EP. Bij Aan de Maas en Nattenhoven is er bij het MMA sprake van een verdere rivierverruiming ten opzichte van het EP.

Een afwijking met de VKA is dat het insteekniveau bij het voorliggende MMA doorgaans hoger ligt, omdat dit bepaald is overeenkomstig het EP (afvoerniveau 125 m³/s bij Borgharen) en niet zoals destijds bij de VKA gebaseerd op de hoogte waarop de laagwaterbedding 60 m breed is.

Een gedetailleerde beschrijving van de ingrepen die onderdeel vormen van het MMA staat in het hoofdrapport van het MER [De Maaswerken, 2003]. Samenvattend kan gesteld worden dat het MMA ten opzichte van het EP vooral afwijkt door de drie Vlaamse locaties en ter plaatse van Grevenbicht en Koeweide.

8.3 Morfologisch actief oppervlak

De analyse voor de vaststelling van de verandering van het morfologisch actief oppervlak, in termen van mobiliteit van het toutvenant bij hoogwaterafvoeren (hier wordt 1/50 jaar aangehouden), verloopt op de wijze zoals bij het EP aangegeven (zie paragraaf 6.2). Aan de hand van de bodemschuifspannings-kaarten, zijnde de verschilkaarten MMA-NA voor een dynamische bodem (waarbij naar waarden van τ boven 28 N/m² wordt gekeken), zijn de volgende effecten afgeleid (zie Tabel 8.1).

Tabel 8.1 Overzicht van gebieden waar de morfodynamiek van het MMA verandert t.o.v. het NA

MORFODYNAMIEK MMA-NA						
locatie	toename morfodynamiek		afname morfodynamiek		verandering morfodynamiek	
	areaal (ha)	rkm	areaal (ha)	rkm	areaal (ha)	rkm
Boscherveld	9.52	14.7-15.3	0.04	*	+9.48	+0.6
		15.7-16.6				+0.9
Borgharen	10.82	16.4-17.8	1.72	16.7-17.1	+9.10	+1.0
Itteren	2.35	19.8-20.0	0.37	19.4-19.7	+1.98	-0.1
Aan de Maas	27.32	22.5-28.2	11.92	24.4-26.5	+15.40	+3.6
				27.3-28.1		-0.8
Meers	5.93	28.2-28.5	8.11	28.2-28.5	-2.18	0.0
		29.9-31.6		29-29.5		+1.2
				30.2-31.3		-1.1
Maasband	0		0.53	*	-0.53	0
Urmond	5.17	36.0-36.9	0.40	*	+4.77	+0.9
Berg Nattenhoven	7.39	38.7-39.6	0.46	*	+6.93	+0.9
		40.9-41.5				+0.6
Grevenbicht	14.67	41.5-42.0	1.56	42.0-42.5	+13.11	+0.0
		43.7-44.0				+0.3
Koeweide	0.20	44.0-45.1	0,20	*	0	+1.1
Visserweert			0.71	49.1-49,3	-0.71	-0.2
Roosteren	0.96	51.4-51.6	6.41	51.3-51.9	-5.45	-0.4
				52.3-53.0		-0.7
Totaal	84.32	15.3	32.42	7.5	+51.90	+7.8
Toelichting: - toename morfodynamiek: toename τ MMA-NA én $\tau > \tau_c$ in MMA - afname morfodynamiek: afname τ MMA-NA én $\tau > \tau_c$ in MMA - verandering morfodynamiek: + is toename; - is afname - de * geeft aan dat er in het beschouwde gebied niet een aaneengesloten traject aan te geven is in het laagwaterbed waar de morfodynamiek toeneemt of afneemt						

Uit voorgaande wordt duidelijk dat de toename van de totale morfodynamiek (totale areaal waarbij het toutvenant potentieel erodeerbaar is) qua orde van grootte een *vergelijkbare toename* te zien geeft als bij het EP (ruim 50 ha), wanneer de effecten worden beschouwd ten opzichte van het NA.

Er is sprake van een iets groter totaal areaal waar de morfodynamiek toeneemt dan bij het EP (circa 84 ha ten opzichte van circa 81 ha, over een rivierlengte van ruim 15 km respectievelijk ruim 11 km). Dit geldt ook voor het areaal waar de morfodynamiek afneemt (ruim 32 ha ten opzichte van bijna 29 ha, over een rivierlengte van ruim 7 km respectievelijk 4 km).

Wanneer meer in detail wordt gekeken, valt op dat er per locatie behoorlijk grote verschillen zijn met het EP. Zo nemen het areaal met een toenemende dynamiek ten opzichte van het EP

sterk toe in Bosscherveld, Borgharen, Aan de Maas en Urmond; bij Berg/Nattenhoven is sprake van een lichte toename. Bij Itteren, Meers (in sterke mate), Grevenbicht, Koeweide en Roosteren is een afname te constateren van het morfodynamisch areaal ten opzichte van het EP.

Tegenover de toename op deze locaties staat bijna altijd ook een zekere afname in dezelfde vergravingslocatie als gevolg van verschuiving van de stroming. Dit areaal met een afnemende dynamiek is voor Urmond, Berg/Nattenhoven, Grevenbicht en Visserweert nagenoeg hetzelfde als bij het EP; bij Borgharen, Aan de Maas, Meers, Maastband en Koeweide is het groter en bij Bosscherveld, Itteren en Roosteren kleiner dan bij het EP. Bij deze veranderingen blijkt dat de uitvoering van de Vlaamse locaties (bovenstroms van Meers) de grootste invloed te hebben.

8.4 Ligging thalweg

In Tabel 8.2 is het resultaat van de analyse van de thalwegligging van het MMA weergegeven.

Tabel 8.2 Overzicht potentiële verandering thalwegligging MMA-NA

THALWEGLIKKING MMA-NA					
locatie	rkm potentiële verandering thalweglig- ging	waarvan ..rkm met <i>initiële</i> ero- derende tendens	waarvan ..rkm met <i>initiële</i> se- dimerende tendens	IP	oordeel
Boscherveld					
Borgharen	16,3-17,9	16,3-17,4	17,4-17,9	<1	R, lichte verplaatsing (erosief)
Itteren	20,0-22,3		20,0-22,3	>1	R+, stroming gaat door de binnenbocht, waarbij meer gespreid dan bij EP, geen erosieve ten- dens, dus verplaatsing alleen via sedimentatie huidige laagwaterbed- ding
Herbricht	22,5-22,8	22,5-22,8		<1	L, neiging tot verplaat- sing naar linkeroever bij ingaan van bocht Her- bricht
Aan de Maas	24,2 – 26,7	24,2 – 25,2	25,2 – 26,7	<1	R, t.o.v. NA sterke toe- name van de dwarsgra- diënt (erosief), waarbij ook toename ten opzich- te van EP; wel relatief kleine verplaatsing

	27,2-28,0	27,2-27,9	27,9-28,0	<1	R, toename tot lichte verplaatsing (erosief); deze was in EP niet aanwezig
Meers	28,1 – 28,3	28,1 – 28,3		<1	L, neiging tot insnijding in verlaagde weerd van Kotem,
	30,9 – 33,2	30,9-31,4	31,4 – 33,2	<1	R+, sterke toename van de dwarsgradiënt, evidente bocht- afsnijding voor het grindeiland langs
Maasband					
Urmond					
Nattenhoven					
Grevenbicht					
Koeweide	45,3 – 47,6		45,3 – 47,6	<1	R+, geen erosieve tendens (zoals bij EP), stroming bij hogere afvoeren wél over de locatie, bochtafsnijding mogelijk na sedimentatie huidige laagwaterbedding
Roosteren	51,5 – 51,7	51,5 – 51,7		<1	R, toename van de dwargradient, lichte neiging tot verplaatsing
totaal km's	12,5	4,0	8,5		
toelichting bij oordeel: R = enige verplaatsing naar rechteroever mogelijk (binnen huidige laagwaterbed) R+ = sterke verplaatsing naar rechteroever mogelijk (buiten huidige laagwaterbed) L = enige verplaatsing naar linkeroever mogelijk (binnen huidige laagwaterbed) L+ = sterke verplaatsing naar linkeroever mogelijk ((buiten huidige laagwaterbed) geen aanduiding: thalweg stabiel					

Resultaten grote thalwegverplaatsingen (tot buiten het huidige laagwaterbed)

Ten opzichte van het EP treden de grootste veranderingen op bovenstrooms van Meers als gevolg van het uitvoeren van de Vlaamse locaties. De wijzigingen ten opzichte van het EP beïnvloeden echter niet de potentiële thalwegverplaatsingen buiten het laagwaterbed: dergelijke verplaatsingen kunnen alleen optreden bij Itteren, Meers en Koeweide. Dit zijn de dezelfde locaties die bij het EP potentiële verplaatsing te zien geven. Daarmee is ook de totale lengte van grote thalwegverplaatsingen niet wezenlijk anders dan bij het EP. Een verschil is wel dat bij het MMA bij Itteren en Koeweide geen eroderende tendens voor bochtafsnijding aanwezig is bij het ingaan van de bocht (zoals bij het EP); dit betekent dat thalwegverplaatsingen aldaar naar verwachting zich zeer langzaam zullen manifesteren, omdat deze geheel afhankelijk zijn van sedimentatie in de huidige laagwaterbeddingen. Aandacht dient te worden besteed aan de stroming

over de verlaagde weerden bij Kotem, waar lokaal hoge stroomsnelheden optreden. De kans op een bochtafsnijding wordt hier echter gering geacht.

Resultaten beperkte thalwegverplaatsingen (binnen het huidige laagwaterbed)

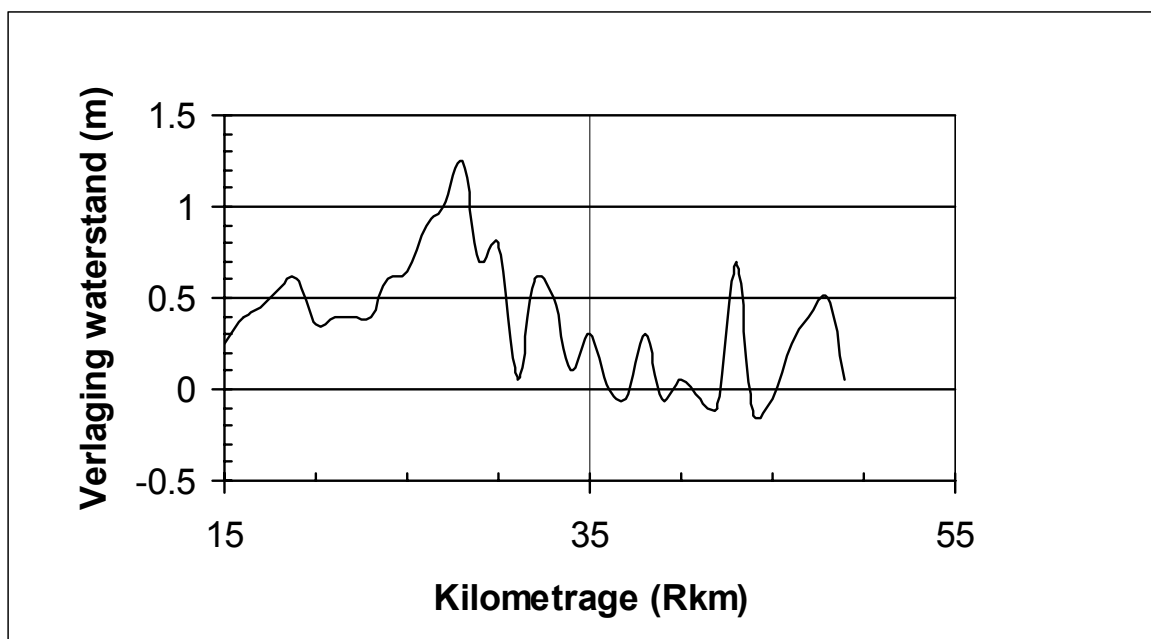
Ten aanzien van thalwegverplaatsingen binnen het huidige laagwaterbed treedt er t.o.v. het EP de grootste toename op bij Herbricht (de locatie die bij het MMA is vergraven) en bij Aan de Maas, in verband met de versterkte flessenhalswerking aldaar. Bij Kotem heeft de stroming als gevolg van de vergraving (weerdverlaging) de neiging meer de binnenbocht te nemen; de stroomsnelheden zijn daarbij dermate afgenomen dat de erosieve tendens voor beperkte thalwegverplaatsing over een kleiner gebied optreedt. In tegenstelling tot bij het EP is van beperkte verplaatsingen in de bocht bij Obbicht geen sprake meer bij het MMA. Bij Roosteren is er geen wijziging t.o.v. het EP.

Al met al neemt het totaal aantal kilometers met potentiële thalwegverplaatsing iets toe t.o.v. het EP: 12,5 km t.o.v. 11,2 km, waarvan 4,0 km t.o.v. 2,6 km met initiële eroderende tendens en 8,5 km t.o.v. 8,6 km met initiële tendens tot sedimentatie.

8.5 Overige aspecten

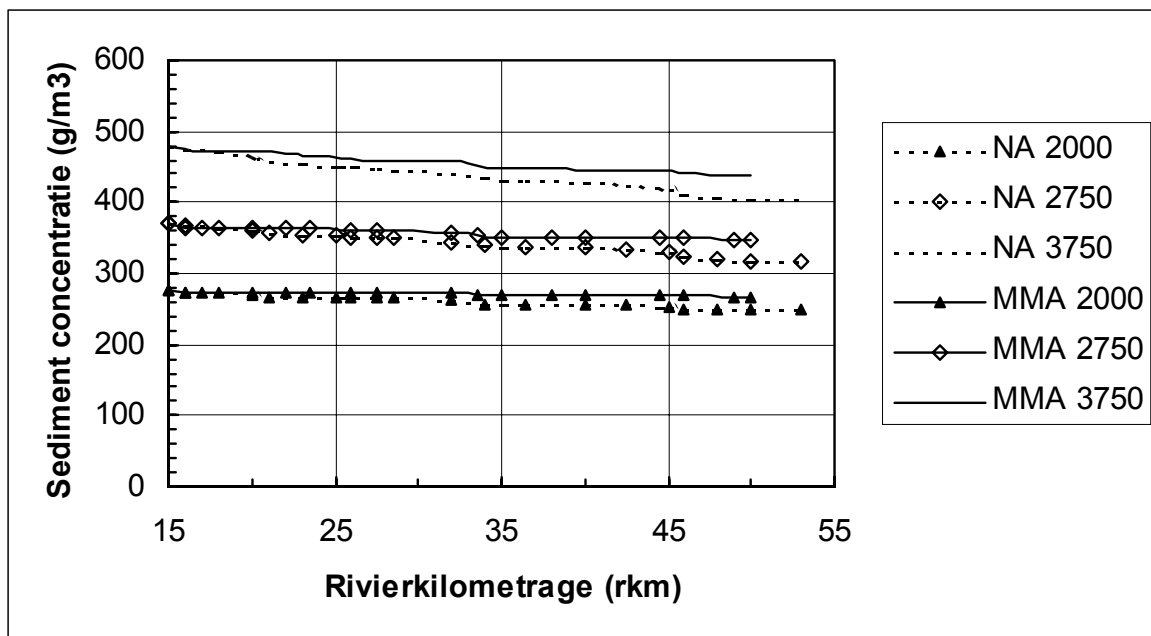
8.5.1 Slibhuishouding

Bij uitvoering van het MMA zal ook de slibhuishouding enigszins afwijken van het EP. Naar verwachting zullen er slechts geringe afwijkingen zijn bij afvoeren lager dan bankfull, dus lager dan circa 1500 m³/s. De uitvoering van het MMA zal tot daling van waterstanden tijdens hoge afvoeren leiden ten opzichte van het EP. In Figuur 8.1 is deze verlaging aangegeven voor de 1:250 jaar afvoer. De waterstandsverlaging varieert tussen de 0 en 0.5 m, met uitzondering van het riviergedeelte tussen km 23 en 30, waar de verlaging tot circa 1 m oploopt. Deze verlaging heeft invloed op de frequentie en diepte van overstromen van de weerden. Gemiddeld genomen zal daardoor de afvoer waarbij de weerden gaan overstromen met circa 200 m³/s toenemen. Waar voor EP deze afvoer van 1500 m³/s nog circa 1.5 dag/jaar wordt overschreden, zal in het grootste deel van de Grensmaas de nieuwe bankfull afvoer ongeveer 1700 m³/s zijn en die treedt slechts circa 0.8 dag/jaar op. Overigens zal de efficiency van "sediment trapping" enigszins toenemen maar dit levert niet voldoende compensatie op. Wijzigingen in vegetatie bij uitvoering van MMA zullen slechts een marginaal verschil opleveren voor de slibhuishouding in vergelijking met het EP.



Figuur 8.1 Verlaging 1/250 jaar waterstanden bij uitvoering van MMA in vergelijking met EP

Een globale analyse geeft aan dat de hoeveelheid slib die op de weerden van de Maas zal achterblijven met nog eens circa de helft zal afnemen ten opzichte van het EP, dit is dus nog maar een kwart van de huidige situatie. De slibbelasting van de Zandmaas neemt daardoor in vergelijking met het EP nog verder toe, en wel met circa 10 % voor afvoeren tussen 1500 en 1700 m³/s en nog eens 5% bij afvoeren groter dan 1700 m³/s (zie Figuur 8.2, en Figuur 6.2 voor EP). Afzettingen ter plaatse van verruimingen van het zomerbed, zullen evenals bij het EP, bij andere afvoeren weer worden geërodeerd en in suspensie worden afgevoerd.



Figuur 8.2 Vergelijking afname slibgehalte MMA en NA

8.5.2 Erosie zijbeken

De uitvoering van MMA zal leiden tot een extra verlaging van de waterstanden in de Grensmaas ten opzichte van het EP, vooral bovenstrooms van locatie Meers (tot circa 2m meer bovenstrooms van de bocht Kotem). Benedenstrooms van Meers is sprake van een meer beperkte daling ten opzichte van het EP (gemiddeld circa 0,1 m). Ter hoogte van de erosiebasis van de zijrivieren Geul (rkm 23) en Ur (rkm 39) is sprake van een verlaging van de erosiebasis met 0,6 m respectievelijk 0,2 m ten opzichte van het EP. Dit betekent een aanzienlijke versterking van de tendens van terugschrijdende erosie in deze zijrivieren. De te verwachten verschijnselen zullen niet veel afwijken van hetgeen in paragraaf 6.5 is voorspeld voor het EP. De tijdschaal voor erosie in beide zijrivieren verandert niet; wel zal de intensiteit van terugschrijdende erosie sterker zijn. Voor beide zijrivieren wordt een harde drempel in de monding aanbevolen om erosie tegen te gaan.

8.6 Risicogebieden en mitigerende maatregelen

8.6.1 Erosie bedding en beschermende maatregelen

In Tabel 8.3 staat voor het MMA aangegeven wáár globaal bodemverdediging nodig is en hoe zwaar de toplaag ervan moet zijn: de toepassing van bijvoorbeeld geotextielen of alternatieve verdedigingssystemen is hierbij buiten beschouwing gelaten. De methodiek bij het bepalen van deze maatregelen is dezelfde als beschreven in paragraaf 6.6. Wederom is van een 1/250 afvoer uitgegaan bij de bepaling van de maatgevende stroomsnelheden.

Tabel 8.3 Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde bodemverdediging in het MMA

	traject	breedte	lengte	snelheid	Dn	dikte	volume	sortering
		(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m ³)	(kg)
Aan de Maas	23.80 - 24.20	100	400	4.0 - 4.5	0.630	1.26	50400	40 - 200
Meers	30.80 - 31.20	100	400	3.5 - 4.0	*	*	*	*
Grevenbicht	40.80 - 41.00	100	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	13760	40 - 200
	41.00 - 41.30	100	300	4.0 - 4.5	0.630	1.260	37800	60 - 300
	41.30 - 41.70	100	400	4.5 - 5.0	0.630	1.260	50400	60 - 300
	41.70 - 42.00	100	0	3.5 - 4.0	*	*	*	*
totaal							152360	

N.B.:

- Bodemverdediging aangebracht indien toutvenant-laag < 2,0 m en stroomsnelheid > 3,5 m/s;
- bij * geen bodemverdediging aangebracht want toutvenant-laag > 2,0 m en stroomsnelheid 3,5 - 4 m/s;

Het grote verschil met het EP is de benodigde bodemverdediging voor Meers: er is in het MMA geen bodemverdediging meer nodig bij Meers, omdat de stroomsnelheid onder 4 m/s komt en er een laag toutvenant > 2 m aanwezig is op de meest kritieke locatie; bij het EP was hier nog circa 74.000 m³ nodig voor bodemvastlegging. Daar staat tegenover dat bij Aan de Maas nu wel een uitgebreide bodemverdediging nodig is als gevolg van meer flessenhalswerking. Bij Nattenhoven is geen verdediging meer nodig en bij Grevenbicht is er sprake van een significante reductie ten opzichte van het EP.

Al met al wordt ongeveer een kwart van de bodemverdediging die in het EP nodig is uitgespaard in het MMA; dit is ook de besparing in bodemverdediging ten opzichte van het eerdere VKA uit het MER Grensmaas 1998. De vergraving van Kotem is van groot belang bij deze besparing.

8.6.2 Erosie oevers en beschermende maatregelen

Bij het bepalen van de eventuele versterking van de oevers langs de kaden van bebouwingskernen geldt de methodiek zoals aangegeven in paragraaf 6.6. De maatgevende stroomsnelheden zijn die bij de 1/250 jaar afvoer.

Tabel 8.4 Indicatie van de locatie en benodigde oeververdediging per locatie in m³ MMA

	oever	traject	lengte	snelheid	Dn	dikte	volume		sortering
			(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m ³)		(kg)
Aan de Maas	L + R	23.80 - 24.20	400	4.0 - 4.5	0.630	1.260	21712	b	60-300
	L + R	24.20 - 24.30	100	3.5 - 4.0	0.344	0.688	3853	b	40 - 200
Meers	R	30.80 - 31.05	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	7706	t	40 - 200
Grevenbicht	L + R	40.80 - 41.00	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	5928	b	40 - 200
	L + R	41.00 - 41.30	300	4.0 - 4.5	0.630	1.260	16284	b	60 - 300
	L + R	41.30 - 41.70	400	4.5 - 5.0	0.630	1.260	21712	b	60 - 300
	L + R	41.70 - 42.00	300	3.5 - 4.0	0.344	0.688	11559	t	40 - 200
totaal							88754		

N.B.: De letter 't' geeft aan dat er een teenverdediging is meegenomen in de hoeveelheden bepaling, te weten 30% van de op de oever aan te brengen breuksteen. Een teenverdediging is niet meegenomen waar sprake is van een bodemverdediging, 'b'.

In totaliteit is er sprake van een beperkte afname van de benodigde oeververdediging ten opzichte van het EP: circa 85.000 m³ ten opzichte van circa 96.000 m³ bij het EP. Dit betekent ook een verdere afname van de benodigde oeververdediging ten opzichte van de VKA van het MER Grensmaas 1998.

Bij het voorliggende MMA blijkt bij Bosscherveld geen oeververdediging meer nodig te zijn, in tegenstelling tot bij het EP. Daar staat tegenover dat bij locatie Aan de Maas meer verdediging nodig is (bijna een verdubbeling van circa 11.500 m³ naar ruim 25.000 m³). Een grote besparing is er bij Meers: van circa 40.000 m³ bij het EP naar circa 8.000 m³. Bij Grevenbicht neemt de benodigde oeververdediging ten opzichte van het EP toe, omdat de locatie meer wordt vergraven zodat de flessenhalswerking bij Obbicht wordt versterkt.

Opgemerkt wordt dat het hier gaat om een indicatie van de benodigde verdedigingen. Voor een gedetailleerd ontwerp is nauwkeuriger informatie vereist over stroomsnelheden (dit geldt vooral voor de oevers), de locale bodem- en oeversamenstelling, de erosiebestendigheid van oevers en bodem, en de hoedanigheid van de huidige oeververdediging.

8.7 Morfologie direct na uitvoering en uitvoeringsvolgorde

De beoordeling van de morfologische effecten direct na uitvoering van de plannen en de invloed van de volgorde van uitvoering komen globaal overeen met de beoordeling voor het EP (zie paragraaf 6.7).

Om zoveel mogelijk morfodynamiek te bewerkstelligen is het van belang dat, waar mogelijk, de benodigde bodem- en oevervastlegging te minimaliseren. Dit kan als aparte doelstelling worden gezien, naast het streven naar zoveel mogelijk van benedenstrooms naar bovenstrooms toe realiseren van de locaties. Nader uitgezocht dient te worden in hoeverre deze doelstellingen verenigbaar zijn. In het MMA worden de Vlaamse Boertien locaties vergraven. Deze zijn van groot belang zijn, omdat ze een 'sleutelrol' kunnen vervullen bij het verminderen van de flessenhalswerking. Ter hoogte van de flessenhalzen dienen deze plannen (dit geldt zeker voor Kotem) vervroegd te worden uitgevoerd, waarna verder van beneden- naar bovenstrooms gewerkt zou kunnen worden. Het zal duidelijk zijn dat deze aspecten, tezamen met economische en uitvoeringstechnische aspecten, een nadere studie behoeven om tot een optimale uitvoeringsvolgorde te kunnen komen.

9 Morfologische effecten EPVL

9.1 Algemeen

Bij het EPVL is de werkwijze hetzelfde als de werkwijze die bij het MMA is aangehouden. Dit betekent dat het EPVL (voor een korte beschrijving wordt verwezen naar paragraaf 9.2), omdat het een volwaardig alternatief betreft, wordt vergeleken met het NA, overeenkomstig de werkwijze in het EP. Dit geldt voor de analyse van de morfodynamiek, de thalwegligging en de vaststelling van de risicogebieden en mitigerende maatregelen. Voor wat betreft de effecten voor het slib, erosie zijbeken en de morfologie direct na uitvoering en uitvoeringsvolgorde is een verkorte methodiek toegepast, waarbij gekeken wordt naar significante veranderingen ten opzichte van het EP.

9.2 Korte beschrijving van het EPVL

De vormgeving van de uitvoeringslocaties in het EPVL is overeenkomstig het EP, dus met dezelfde twaalf ingrepen, echter aangevuld met het uitvoeren van de drie Vlaamse Boertien locaties: Hochter Bampd, Herbricht en Kotem. Verder zijn er geen verschillen met het EP.

Opgemerkt kan worden dat het EPVL niet sterk afwijkt van het MMA; Het grootste verschil tussen het MMA en het EP is immers het al dan niet uitvoeren van de drie Vlaamse locaties. De verschillen tussen EP en MMA bevinden zich hoofdzakelijk in de vormgeving van de locaties Grevenbicht, Koeweide, Aan de Maas en Nattenhoven. Het EPVL lijkt daarmee sterker op het MMA dan op het EP. Een gedetailleerde beschrijving van de ingrepen die onderdeel vormen van het EPVL staat in het hoofdrapport van het MER [De Maaswerken,2003].

9.3 Morfologisch actief oppervlak

De analyse voor de vaststelling van de verandering van het morfologisch actief oppervlak, in termen van mobiliteit van het toutvenant bij hoogwaterafvoeren (hier wordt 1/50 jaar aangehouden), verloopt wederom op de wijze zoals bij het EP aangegeven (zie paragraaf 6.2). Aan de hand van de bodemschuifspannings-kaarten, zijnde de verschilkaarten MMA-NA voor een dynamische bodem (waarbij naar waarden van τ boven 28 N/m² wordt gekeken), zijn de volgende effecten afgeleid (zie Tabel 9.1).

Tabel 9.1 Overzicht van gebieden waar de morfodynamiek van het EPVL verandert t.o.v. het NA

MORFODYNAMIEK EPVL-NA						
locatie	toename morfodynamiek		afname morfodynamiek		verandering morfodynamiek	
	areaal (ha)	rkm	areaal (ha)	rkm	areaal (ha)	rkm
Bossherveld	9.62	14.7-15.3	0.04	*	+9.62	+0.6
		15.7-16.6				+0.9
Borgharen	10.80	16.4-17.8	1.59	16.7-17.1	+9.21	+1.0
Itteren	2.21	20.0-20.2	0.13	19.4-19.7	+2.08	-0.1
Aan de Maas	26.33	22.5-26.4	13.98	24.4-26.8	+12.35	-1.5
		27.0-28.2		27.3-28.2		+0.3
Meers	6.19	28.2-28.5	8.79	28.2-28.5	-2.6	0.0
		29.9-31.6		29-29.5		+1.2
				30.2-31.3		-1.1
Maasband	0.08		0.33	*	-0.25	0
Urmond	3.34	36.1-36.7	0.45	*	+2.89	+0.6
Berg Nattenhoven	6.74	39.0-39.7	0.36	*	+6.38	+0.7
		40.9-41.5				+0.6
Grevenbicht	17.42	41.5-41.8	1.40	42.3-42.6	+16.02	+0.0
		43.3-44.0				+0.7
Koeweide	1.53	44.0-45.0	0	*	+1.53	+1.0
Visserweert			0.7	49.1-49.3	-0.7	-0.2
Roosteren	0.96	51.4-51.6	6.41	51.3-51.9	-5.45	-0.4
				52.3-53.0		-0.7
Totaal	85.21	11.7	34.37	7.7	+50.84	+4.0
Toelichting: - toename morfodynamiek: toename τ EPVL-NA én $\tau > \tau_c$ in EPVL - afname morfodynamiek: afname τ EPVL-NA én $\tau > \tau_c$ in EPVL - verandering morfodynamiek: + is toename; - is afname - de * geeft aan dat er in het beschouwde gebied niet een aaneengesloten traject aan te geven is in het laagwaterbed waar de morfodynamiek toeneemt of afneemt						

De totale morfodynamiek (totale areaal waarbij het toutvenant potentieel erodeerbaar is) is qua orde van grootte wederom vergelijkbaar met het EP (ruim 50 ha), wanneer de effecten worden beschouwd ten opzichte van het NA. Bij vergelijking met het MMA blijkt bovendien dat het erodeerbaar areaal nagenoeg gelijk is aan die bij het MMA. Overigens neemt de (aaneengesloten) lengte langs de rivier waarover het erodeerbaar areaal toeneemt wel af ten opzichte van het MMA: nu circa 12 km tegenover ruim 15 km bij het MMA. Het areaal waarbij sprake is van toename van morfodynamiek is nu circa 85 ha (bij MMA 84 ha), terwijl het areaal waarbij sprake is van een afname van de morfodynamiek circa 34 ha bedraagt (bij het MMA 32 ha).

In het gebied bovenstrooms van Meers, waar zowel bij het EPVL en het MMA de Vlaamse locaties zijn uitgevoerd, blijkt de overeenkomst tussen beide alternatieven zeer sterk te zijn. Verder

benedenstrooms is een afname te constateren bij Urmond (enige afname flessenhalswerking bij het EPVL) en een toename bij Grevenbicht; dit laatste heeft vooral te maken met de toename (ten opzichte van het MMA) van de stroming in de huidige laagwaterbedding van locatie Grevenbicht.

9.4 Ligging thalweg

In Tabel 9.2 is het resultaat van de analyse van de thalwegligging van het EPVL weergegeven.

Tabel 9.2 Overzicht potentiële verandering thalwegligging EPVL-NA

THALWEGLIKKING EPVL-NA					
locatie	rkm potentiële verandering thalweglig- ging	waarvan ..rkm met <i>initiële</i> ero- derende tendens	waarvan ..rkm met <i>initiële</i> se- dimerende tendens	IP	oordeel
Bossherveld					
Borgharen	16,3-17,9	16,3-17,4	17,4-17,9	<1	R, lichte verplaatsing (erosief)
Itteren	19,9-22,3	19,9-20,2	20,2-22,3	>1	R+, stroming gaat door de binnenbocht, waarbij meer gespreid dan bij EP, beperkte erosieve tendens bij ingaan van de bocht (iets minder dan bij EP), verder wei- nig verschil met EP
Herbricht	22,5-22,8	22,5-22,8		<1	L, neiging tot verplaat- sing naar linkeroever bij ingaan van bocht Her- bricht
Aan de Maas	24,2 – 26,4	24,2 – 25,2	25,2 – 26,4	<1	R, t.o.v. NA sterke toe- name van de dwarsgra- diënt (erosief), waarbij ook toename ten opzich- te van EP; wel relatief kleine verplaatsing
	27,0-28,0	27,0-28,0		<1	R, toename tot verplaat- sing (erosief); deze was in EP niet aanwezig; tendens is iets sterker dan bij MMA
Meers	28,1 – 28,4	28,1 – 28,4		<1	L, neiging tot insnijding in verlaagde weerd van Kotem, tendens is wat sterker dan in MMA

	30,9 – 33,2	30,9-31,4	31,4 – 33,2	<1	R+, sterke toename van de dwarsgradiënt, evidente bocht- afsnijding voor het grindeiland langs; gelijk aan MMA
Maasband					
Urmond					
Nattenhoven					
Grevenbicht	41,2-41,6	41,2-41,6		<1	L, neiging tot enige verplaatsing naar binnenbocht
	41,6-41,8		41,6-41,8	<1	R, neiging tot verplaatsing naar binnenbocht (erosief) over korte afstand; laagwaterbed meer stroming dan bij MMA dus minder kans op sedimentatie; vergelijkbaar met EP
Koeweide	45,2 – 47,6	45,2 – 45,4	45,4 – 47,6	<1	R+, beperkte erosieve tendens (gelijk aan EP) bij ingaan van de bocht, stroming bij hogere afvoeren wél over de locatie, bochtafsnijding mogelijk na sedimentatie huidige laagwaterbedding
Roosteren	51,5 – 51,7	51,5 – 51,7		<1	R, toename van de dwargradient, lichte neiging tot verplaatsing, overeenkomend met EP en MMA
totaal km's	13,3	5,3	8,0		
toelichting bij oordeel: R = enige verplaatsing naar rechteroever mogelijk (binnen huidige laagwaterbed) R+ = sterke verplaatsing naar rechteroever mogelijk (buiten huidige laagwaterbed) L = enige verplaatsing naar linkeroever mogelijk (binnen huidige laagwaterbed) L+ = sterke verplaatsing naar linkeroever mogelijk ((buiten huidige laagwaterbed) geen aanduiding: thalweg stabiel					

Resultaten grote thalwegverplaatsingen (tot buiten het huidige laagwaterbed)

Vergelijking van hiervoor aangegeven potentiële thalwegverplaatsingen buiten het huidige laagwaterbed in het EPVL ten opzichte van het MMA laat zien dat er nauwelijks afwijkingen optreden. Dit is ook niet verwonderlijk gezien de grote overeenkomst tussen MMA en EPVL.

T.o.v. het MMA is er nu bij het EPVL bij het ingaan van de bocht bij Koeweide een lichte neiging tot erosie. Hiermee geldt ook de conclusie dat t.a.v. de grootschalige thalwegverplaatsingen er geen wezenlijk onderscheid is met het EP.

Resultaten beperkte thalwegverplaatsingen (binnen het huidige laagwaterbed)

Ook bij de potentiële thalwegverplaatsingen binnen het huidige laagwaterbed is er een grote overeenkomst tussen het EPVL en het MMA, behalve bij locatie Grevenbicht. Doordat daar bij het EPVL geen sanering van Elba is voorzien, waarbij wél een nevengeul is gepland, is er sprake van een thalwegdynamiek die vergelijkbaar is met het EP.

T.o.v. het EP treedt de grootste toename op bij Herbricht (de locatie die bij het EPVL is vergraven). Bij Kotem heeft de stroming als gevolg van de vergraving (weerdverlaging) de neiging meer de binnenbocht te nemen; de stroomsnelheden zijn daarbij dermate afgenomen dat de erosieve tendens voor beperkte thalwegverplaatsing over een kleiner gebied optreedt.

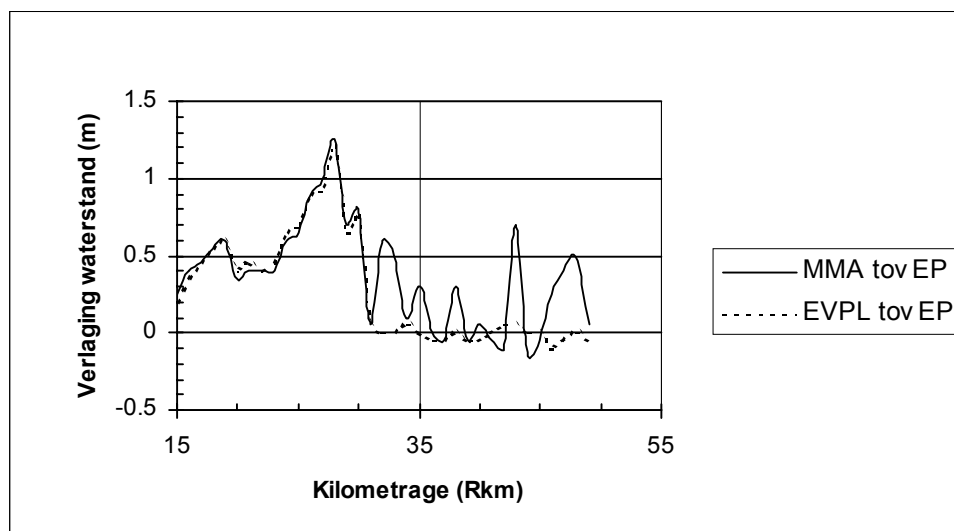
Er is sprake van een tendens tot kleine verplaatsing van de thalweg in de bocht bij Obbicht.

Dit overziende kan worden gesteld dat de totale potentiële thalwegverplaatsingen (lengte ruim 13 km) in het EPVL in sterke mate vergelijkbaar zijn met die in het MMA (lengte circa 12,5 km). Hiervan is over een lengte van 5,3 km een initiële eroderende tendens (MMA: 4,0 km) en over een lengte van 8,0 km een een initiële sedimenterende tendens (MMA: 8,0 km).

9.5 Overige aspecten

9.5.1 Slibhuishouding

De uitvoering van het EPVL zal ook invloed hebben op de slibhuishouding in de Grensmaas en gevolgen hebben voor de slibbelasting van de Zandmaas. Dit gebeurt via de verlaging van de waterstanden. Omdat de verlaging van de waterstanden ten opzichte van EP globaal ongeveer gelijk zal zijn aan de waterstandsverlaging als gevolg van het MMA (zie Figuur 8.1) zal ook de invloed op de slibhuishouding ongeveer gelijk zijn.



Figuur 9.1 Vergelijking van MMA en EPVL met EP ten aanzien van de verlaging van de waterstanden tijdens de 1:250 jaar afvoer

Omdat de onnauwkeurigheid in de invoergegevens (zoals de sedimentconcentraties tijdens zeer hoge afvoeren) groter is dan het onderlinge verschil tussen MMA en EPVL is van een nader analyse afgezien. De conclusies die getrokken zijn ten aanzien van MMA (zie paragraaf 8.5) gelden ook globaal voor het EPVL.

9.5.2 Erosie zijbeken

De uitvoering van het EPVL zal leiden tot een extra verlaging van de waterstanden in de Grensmaas, die ongeveer gelijk is aan de daling als gevolg van het MMA. In principe zal dit ook tot een grotere erosie van de zijbeken leiden. Door de grote tijdsschaal en het feit dat de verdere daling van de waterstanden klein is ten opzichte van de waterstandsdingen in de afgelopen decennia, is van een verder analyse afgezien. De te verwachten verschijnselen zullen niet veel afwijken van hetgeen in paragraaf 6.5 is voorspeld voor het EP.

9.6 Risicogebieden en mitigerende maatregelen

Erosie bedding en beschermende maatregelen

In Tabel 9.3 staat voor het MMA aangegeven wáár globaal bodemverdediging nodig is en hoe zwaar de toplaag ervan moet zijn: de toepassing van bijvoorbeeld geotextielen of alternatieve verdedigingssystemen is hierbij buiten beschouwing gelaten. De methodiek bij het bepalen van deze maatregelen is dezelfde als beschreven in paragraaf 6.6. Wederom is van een 1/250 afvoer uitgegaan bij de bepaling van de maatgevende stroomsnelheden.

Tabel 9.3 Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde bodemverdediging in het EPVL

	traject	breedte	lengte	snelheid	Dn	dikte	volume	sortering
		(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m ³)	(kg)
Aan de Maas	23.80 - 24.00	100	200	3.5 - 4.0	*	*	*	*
	24.00 - 24.10	100	100	4.0 - 4.5	0.63	1.260	12600	60 - 300
	24.10 - 24.40	100	300	3.5 - 4.0	*	*	*	*
Meers	30.80 - 30.90	100	100	3.5 - 4.0	*	*	*	*
	30.90 - 31.00	100	100	4.0 - 4.5	0.63	1.260	12600	60 - 300
	31.00 - 31.10	100	100	3.5 - 4.0				
Nattenhoven	39.10 - 39.30	100	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	13760	40 - 200
Grevenbicht	40.90 - 41.20	100	300	3.5 - 4.0	0.344	0.688	20640	40 - 200
	41.20 - 41.80	100	600	4.0 - 4.5	0.630	1.260	75600	60 - 300
	43.70 - 44.40	100	700	3.5 - 4.0	*	*	*	*
totaal							135200	

N.B.:

- Bodemverdediging aangebracht indien toutvenant-laag < 2,0 m en stroomsnelheid > 3,5 m/s;
- bij * geen bodemverdediging aangebracht want toutvenant-laag > 2,0 m en stroomsnelheid tussen 3,5 en 4 m/s;

Zoals te verwachten, treden de verschillen met het MMA naar voren bij de locatie Grevenbicht (en bovenstrooms ervan), omdat deze locatie op een verschillende manier wordt ingericht. Ook bij Nattenhoven is van de afname van de stroomsnelheid bij het MMA geen sprake meer en moet zoals ook bij het EP de bodem worden verdedigd. In totaliteit ligt de omvang van de bo-

demverdediging met circa 135.000 m³ boven die van het MMA (circa 154.000 m³), maar is nog wel beduidend lager dan bij het EP (circa 204.500 m³).

Erosie oevers en beschermende maatregelen

In Tabel 9.4 is een indicatie van de benodigde oeververdediging gegeven,

Tabel 9.4 Indicatie van de locatie en afmetingen benodigde oeververdediging in het EPVL

	oever	traject	lengte	snelheid	Dn	dikte	volume		sortering
			(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m ³)		(kg)
Aan de Maas	L + R	23.80 - 24.00	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	7706	^t	40 - 200
	L + R	24.00 - 24.10	100	4.0 - 4.5	0.630	1.260	5428	^b	60 - 300
	L + R	24.10 - 24.40	300	3.5 - 4.0	0.344	0.688	11559	^t	40 - 200
Meers	R	30.80 - 30.90	100	3.5 - 4.0	0.344	0.688	1926	^t	40 - 200
	R	30.90 - 31.00	100	4.0 - 4.5	0.630	1.260	3528	^t	60 - 300
	R	31.00 - 31.10	100	3.5 - 4.0	0.344	0.688	1926	^t	40 - 200
Nattenhoven	R	39.10 - 39.30	200	3.5 - 4.0	0.344	0.688	2964	^b	40 - 200
Grevenbicht	L + R	40.90 - 41.30	400	3.5 - 4.0	0.344	0.688	11856	^b	40 - 200
	R	41.30 - 41.80	500	4.0 - 4.5	0.630	1.260	13570	^b	60 - 300
	L	43.65 - 44.40	750	3.5 - 4.0	0.344	0.688	14449	^t	40 - 200
totaal							74912		

N.B.: De letter 't' geeft aan dat er een teenverdediging is meegenomen in de hoeveelheden bepaling, te weten 30% van de op de oever aan te brengen breuksteen. Een teenverdediging is niet meegenomen waar sprake is van een bodemverdediging, 'b'.

De benodigde oeververdediging blijkt wat kleiner te zijn dan bij het MMA: voor het EPVL ruim 75.000 m³, tegenover een kleine 89.000 m³ bij het MMA. De uitvoering van de Vlaamse locaties resulteert in een duidelijke reductie van de benodigde oeververdediging zoals blijkt uit vergelijking van het EPVL en het EP. Met name de uitvoering van Kotem en diensengevolge de lichtere verdediging van de oevers langs de flessenhals bij Meers draagt bij aan deze reductie.

Opgemerkt wordt dat het hier gaat om een indicatie van de benodigde verdedigingen. Voor een gedetailleerd ontwerp is nauwkeuriger informatie vereist over stroomsnelheden (dit geldt vooral voor de oevers), de locale bodem- en oeversamenstelling, de erosiebestendigheid van oevers en bodem, en de hoedanigheid van de huidige oeververdediging.

9.7 Morfologie direct na uitvoering en uitvoeringsvolgorde

Evenals bij het Meest-milieuvriendelijke Alternatief (MMA) kan voor het Eindplan Grensmaas in combinatie met de Vlaamse Locaties (EPVL) worden gesteld dat de beoordeling van de morfologische effecten direct na uitvoering van de plannen en de invloed van de volgorde van uitvoering overeen komen met de beoordeling voor het EP (zie paragraaf 6.7).

Omdat bij het EPVL ook de Vlaamse Boertien locaties worden uitgevoerd en de verschillen met het MMA niet groot zijn, kunnen hier dezelfde overwegingen als bij het MMA worden aangegeven. Deze betreffen het optimaliseren van de kansen op zoveel mogelijk morfodynamiek door, waar mogelijk, minimalisatie van de benodigde bodem- en oevervastleggingen. Dit kan als

aparte doelstelling worden gezien, naast het streven naar zoveel mogelijk vanaf benedenstrooms naar bovenstrooms toe realiseren van de verwijdingen. Nader uitgezocht dient te worden in hoeverre deze doelstellingen verenigbaar zijn. De Vlaamse locaties zijn in dat opzicht van groot belang, omdat ze veelal een 'sleutelrol' vervullen bij het verminderen van de flessenhalswerking. Ter hoogte van de flessenhalzen dienen deze plannen vervroegd te worden uitgevoerd (dit geldt zeker voor Kotem), waarna verder van beneden- naar bovenstrooms gewerkt zou kunnen worden.

Omdat naast morfologische ook hydraulische, economische en uitvoeringstechnische aspecten moeten worden meegenomen bij de afweging ten aanzien van de uitvoeringsvolgorde, is een nadere studie zeker nodig.

10 Conclusies

10.1 Algemeen

1. Het voorliggende rapport beschrijft een morfologische bureaustudie van de effecten van de Grensmaasverkenningen Eindplan (EP), Eindplan + 0,5 m (EPP), Eindplan -0,5 m (EPM), het Meest Milieuvriendelijk alternatief (MMA) en het Eindplan inclusief Vlaamse Boertien locaties (EPVL); de effecten worden beschouwd ten opzichte van het Nulalternatief (NA). Deze bureaustudie is voornamelijk gebaseerd op de uitkomsten van hydraulische berekeningen met het 2D model (WAQUA) van de Grensmaas [Royal Haskoning & Meander Advies, 2003] en het MER 1998. Inzichten en kennis die niet in het MER 1998 zijn verwerkt, hebben ook bijgedragen aan dit onderzoek.
2. Het onderzoek heeft zich gericht op de morfodynamiek, de erosieveilgheid en noodzakelijke beschermingsmaatregelen, de thalweg, effecten op zijbeken en de slibhuishouding nadat de werken zijn uitgevoerd en de bodem de gelegenheid heeft gehad zich af te pleisteren. In aanvulling hierop is een beschouwing gegeven van de morfologische effecten onmiddellijk na uitvoering van de werken en van de uitvoeringsvolgorde.
3. De voorliggende bureaustudie vormt tezamen met morfologische berekeningen met SOBEK-graded het morfologisch onderzoek ten behoeve van het onderhavige MER. Met de SOBEK-graded berekeningen [Royal Haskoning & Meander Advies en onderzoek, 2003b] wordt inzicht verkregen in de morfologische ontwikkeling van de bodem op langere termijn; deze berekeningen zijn vooral als aanvullend te beschouwen op de voorliggende bureaustudie.
4. De bureaustudie heeft zich, voor wat betreft de analyse van de morfodynamiek, de thalwegligging en de benodigde bodem- en oeververdedigingen, gericht op de situatie direct na gereedkomen van de werken. In de hiertoe geanalyseerde WAQUA-berekeningen is verder de huidige bodemligging aangehouden, terwijl bij de analyse is verondersteld dat de afpleisteringslaag weer is hersteld (deze is direct na uitvoering van de werken opgebroken). In de tussentijd kunnen aanzienlijke sedimentatie- en erosieprocessen hebben plaatsgevonden. Door monitoring dient te zijner tijd te worden nagegaan in hoeverre hiervan sprake is, waarna de analyse eventueel zou moeten worden geactualiseerd. Een andere beperking is dat in de WAQUA-berekeningen is uitgegaan van een grotere lengte aan bodemverdediging dan in de onderhavige bureaustudie is geschat. Een betere schatting kan worden verkregen door een iteratieslag, aan de hand van nieuwe WAQUA berekeningen met in dit rapport geschatte verdedigingen (per alternatief zijn deze verschillend). Bij het detailontwerp van de bodemverdediging dient ons inziens dit punt verder te worden opgepakt.

10.2 Eindplan (EP)

10.2.1 Morfodynamiek

5. Naar verwachting zal de morfodynamiek van de Grensmaas op termijn in beperkte mate toenemen bij uitvoering van het EP: qua oppervlakte is deze toename ongeveer 10% van het totale 500 ha grote gebied waar rivierverruiming en weerdverlaging wordt toegepast. Qua rivierlengte zal de morfodynamiek over ongeveer 7,5 km toenemen.
6. Ter plaatse van de locaties met de grootste verruiming, Itteren en Koeweide, neemt de morfodynamiek relatief maar weinig toe. Ook het gevaar van terugschrijdende erosie vanuit de benedenstroomse aansluiting met de laagwaterbedding is beperkt door de relatief lage stroomsnelheden op het benedenstroomse deel van de bochtafsnijdingen (1 tot 1,5 m/s

bij de 1/50 jaar afvoer). Deze conclusie geldt voor een afgepleisterde bedding ter plaatse van de vergravingslocatie (dus enige tijd na aanleg van de locatie). Bij de benedenstroomse aansluiting op de laagwaterbedding kan wel enige erosie optreden als de afpleisteringslaag is opgebroken; de nieuwe vorming van de afpleisteringslaag zal deze erosie stoppen. Het resultaat kan een 'stapsgewijze' erosie zijn van steeds circa 0,1 m; deze erosie is bij benadering nodig voor de vorming van de afpleisteringslaag, na een opgetreden fors hoogwater.

7. De sterkste toename van de morfodynamiek treedt op in de flessenhalzen nabij Meers en Grevenbicht als gevolg van de verruimingen benedenstrooms van de flessenhalzen. In deze flessenhalzen zullen de bodem en oevers (al dan niet gedeeltelijk) moeten worden vastgelegd; de potentiële toename van de morfodynamiek blijft daarmee ten dele onbenut. Wel zal er door de versterkte dynamiek in de flessenhalzen meer materiaal van bovenstrooms kunnen worden meegevoerd, wat vervolgens aan de bovenstroomse zijde in de vergravingslocaties kan worden afgezet.

10.2.2 Risico's voor bodem- en oevererosie en benodigde maatregelen

Uitgangspunten

8. Op basis van gangbare ontwerppraktijk bij RWS is een stroomsnelheid van 3,5 m/s aangehouden als ondergrens voor de toepassing van bodem- en oeverbescherming. Ingeval de laagdikte van het tout-venant groter is dan 2m, wordt deze ondergrens verruimd naar 4 m/s.
9. Het indicatieve ontwerp van de eventuele bodem- en oeverbescherming, dat in deze studie is uitgewerkt, is gebaseerd op de bodemschuifspanningen die optreden bij een stationaire ontwerpafvoer met een gemiddelde frequentie van 1/250 jaar.

Bodemverdediging

10. Nabij drie locaties, Nattenhoven, Meers en Grevenbicht, zijn bodemverdedigingen noodzakelijk; bij het indicatieve ontwerp wordt uitgegaan van ongeveer 100 m breedte over een totale lengte van ongeveer 2,1 km. Per locatie is de verdeling als volgt:

Meers:

Lengte [m]	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
300	0,344	0,688	20.640	40 – 200
250	0,344	0,688	17.200	40 – 200
450	0,630	1,260	56.700	300 – 1000

Nattenhoven

Lengte [m]	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
200	0,344	0,688	13.760	40 – 200

Grevenbicht

Lengte [m]	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
300	0,344	0,688	20.640	40 – 200
600	0,630	1,260	75.600	60 – 300

11. De hoeveelheid benodigde breuksteen van ruim 200.000 m³ voor bovengenoemde bodemverdedigingen komt qua orde van grootte overeen met de bodemverdedigingen voortvloeiend uit de VKA van het MER1998.

Oeververdediging

12. Oeververdediging is noodzakelijk ter plaatse van Bosscherveld, Aan de Maas, Meers, Nattenhoven en Grevenbicht. De totale te verdedigen oeverlengte is ongeveer 4,8 km, soms aan één zijde van de Grensmaas en soms aan beide zijden van de genoemde locaties. Per locatie is de verdeling als volgt (L=linkeroever, R=rechteroever; de aangegeven lengtes betreffen de riviervakken; volumes zijn afgerond op 100 m³):

Bosscherveld

Lengte [m]/L,R	riviervak	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
75/ L		0,344	0,688	1.400	40 – 200

Aan de Maas

Lengte [m]/L,R	riviervak	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
300/ L,R		0,344	0,688	11.600	40 – 200

Meers

Lengte [m]/L,R	riviervak	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
300/ R		0,344	0,688	4.400	40 – 200
250/ L		0,344	0,688	3.700	40 – 200
450/ L,R		0,630	1,260	24.400	300 – 1.000
200/ L,R		0,344	0,688	7.700	40 – 200

Nattenhoven

Lengte [m]/L,R	riviervak	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
200/ R		0,344	0,688	3.000	40 – 200

Grevenbicht

Lengte [m]/L,R	riviervak	Dn [m]	Dikte [m]	Volume [m ³]	Sortering [kg]
400/ L,R		0,344	0,688	11.900	40 – 200
500/ R		0,630	1,260	13.600	60 – 300
750/ L		0,344	0,688	14.400	40 – 200

13. De totale hoeveelheid van de ongeveer 100.000 m³ benodigde breuksteen is aanzienlijk kleiner dan de uit de VKA [MER 1998] resulterende hoeveelheid van 340.000 m³. Als belangrijkste reden hiervoor geldt dat de stroming over de lengte van de Grensmaas voor het

EP over de grootste lengte van de Grensmaas (behalve bij de flessenhals bij Meers) gelijkmatiger is dan voor de VKA.

10.2.3 Thalweg

14. Er zijn een aantal locaties waar naar verwachting een significante verlegging van de Thalweg zal optreden; dit is het geval over in totaal ongeveer 6,6 km lengte van de Grensmaas. Dit betreft de thalweg bij Meers, Itteren en Koeweide, waarbij respectievelijk 500 m, 200 m en 500 m verlegging mogelijk is naar de binnenbochten toe. Bij de VKA (MER, 1998; aangeduid met categorie c) lag dit in dezelfde orde van grootte. Een verschil met de VKA is wel dat de overgangen van de flessenhalzen naar Itteren en Koeweide minder geprononceerd zijn. De stroming vanuit de flessenhalzen naar deze locaties heeft bij het EP dus minder erosiecapaciteit dan bij de VKA, terwijl de stroomsnelheden in het meer benedenstroomse deel van de locaties niet veel veranderen ten opzichte van de VKA. Bij Meers is het beeld omgekeerd (doordat het niet vergraven van Kotem overheerst).
15. Bij Meers kan de oever aan de binnenbocht tijdens hoogwaters door erosie eroderen. Hierdoor is er een grote kans dat de thalweg zich vanuit de buitenbocht naar binnen verlegt. Naar verwachting kan deze ontwikkeling zich binnen afzienbare tijd (enkele jaren) voltrekken, afhankelijk van het optreden van forse hoogwaters. De thalweg zal dan voor het grindeiland langs (d.w.z. ten oosten van het grindeiland) zijn gesitueerd.
16. Bij Itteren en Koeweide zal de verlegging van de thalweg vooral moeten plaatsvinden door sedimentatie van de oude bedding in de buitenbocht. Dit is waarschijnlijk een aanzienlijk langduriger proces dan bij Meers; dit proces kan echter wel worden versneld door afzetting van sediment aan het begin van de verruiming, afkomstig van net uitgevoerde bovenstroomse locaties (er is dan veel vrij sediment aanwezig). Hoe langdurig dit proces is valt op voorhand niet te voorspellen en is mede afhankelijk van de uitvoeringsvolgorde.
17. Naast de locaties met potentiële grote thalwegverplaatsingen buiten de huidige laagwaterbedding kunnen zich over een totale lengte van ongeveer 5 km lichte thalwegverplaatsingen voordoen binnen de huidige laagwaterbedding. Dit is het geval bij Borgharen (naar rechteroever), Aan de Maas (naar rechteroever), linkerbocht Kotem (bovenstrooms van Meers, naar linkeroever), boven- en benedenstrooms van Grevenbicht (naar rechteroever), en de rechterbocht bovenstrooms van Roosteren (naar rechteroever). De aangegeven lengte van 5 km is minder dan een kwart van eerdere voorspellingen (MER, 1998; aangeduid met categorie b).

10.2.4 Beken

18. Aan Nederlandse zijde is er één beek van betekenis die in de Grensmaas uitmondt en wel de Geul. De monding ligt nabij rkm 23. Daarnaast kan worden genoemd de Ur, nabij rkm 39. De beken vanuit de Belgische zijde zijn buiten beschouwing gelaten.
19. Verwacht wordt dat door verlaging van de erosiebasis de genoemde beken orde 0,5 m kunnen dalen t.o.v. het NA. Deze respons zal snel zijn nabij de monding en uiterst traag op grotere afstand. Ruwe schattingen geven aan dat het tientallen tot honderden eeuwen duurt voordat de bodem op globaal 6 tot 12 km uit de monding zich voor 50% heeft aangepast aan de nieuwe erosiebasis
Erosie van de zijrivieren kan eenvoudig worden tegengegaan door de aanleg van een stuw-

drempel, welke de waterstand bij de uitmonding van de zijrivier op nagenoeg het huidige peil houdt.

10.2.5 Slibhuishouding

20. In het huidige systeem vindt een gemiddelde aanslibbing in de weerden plaats in de orde van enkele mm per jaar. Lokaal kan dit hoger zijn (o.a. nabij Itteren). Deze aanslibbing treedt op in bepaalde fasen van de hoogwaters waarbij de weerden overstromen. Het daarbij meegenomen slib komt deels tot bezinking in de weerden.
21. Na het uitvoeren van EP daalt de gemiddelde waterstand in de Grensmaas en neemt bij hoogwater de afvoer door de weerden af. Naar verwachting zal de bovengenoemde aanslibbing hierdoor reduceren. Indicatieve berekeningen leiden tot een reductie van ongeveer 50%.
22. Het effect van de aanslibbing in de Grensmaas op de slibbelasting voor de Zandmaas is in de huidige situatie relatief klein (afname van circa 15% in de slibconcentraties); een verminderde aanslibbing bij uitvoering van het EP zal daarom maar een beperkte toename van de slibbelasting voor de Zandmaas betekenen.
23. In de tijd toenemende vegetatie zal sedimentatie bevorderen (en omgekeerd) zodat op termijn, ook in locaties met hogere stroomsnelheden, de aanslibbing in bepaalde delen van de verruimingslocaties (namelijk die waar vegetatie zal ontstaan) zal toenemen. Verwacht wordt niet dat deze aanslibbing de huidige aanslibbing van de weerden zal overstijgen; wel kan de aanslibbing qua orde van grootte meer in de buurt komen van de huidige aanslibbing, en daarmee ook met die van het NA (NA en huidige situatie zullen niet veel verschillen).
24. De verruimingslocaties zelf zijn afwisselend droog, met name in periodes in de zomer en stroomvoerend gedurende de rest van het jaar. In tegenstelling tot hetgeen in recente literatuur [Van den Berg et al, 2000] wordt gesuggereerd, wordt verwacht dat hier in eerste instantie maar heel beperkte of hooguit tijdelijke aanslibbing zal optreden omdat op nagenoeg alle plaatsen in het dwarsprofiel het aanwezige slib door voldoende hoge stroomsnelheden zich niet of nauwelijks kan afzetten op de bodem. Een uitzondering betreft de huidige laagwaterbedding bij Itteren en Koeweide, waar in het EP de stroomsnelheid hooguit enige tientallen cm/s zal bedragen, omdat de hoofdstroom zich naar de binnenbocht verlegt.

10.2.6 Morfologie na uitvoering

25. Er zal direct na uitvoering van de rivierverruiming sprake zijn van een sterke toename van sedimenttransport vanuit de afgegraven riviergedeelten totdat zich weer een afpleisterlaag heeft gevormd. Gedacht moet worden aan een verdubbeling tot verdrievoudiging tot orde 75.000 à 150.000 m³ per jaar.
26. Door dit grotere sedimentaanbod zal met name in de volgende benedenstrooms hiervan gelegen uitvoeringslocatie de morfodynamiek toenemen.
27. Een gedeelte van dit vrijkomende sediment zal door spiraalstroming naar binnenbochten verplaatsen en daar aan bankvorming bijdragen. Hier zal sedimenttransport van zand en grind plaatsvinden over de aanwezige grovere afpleisteringslaag heen. Dit laatste zal in de verruimingslocaties in sterkere mate optreden dan in de niet verruimde gedeelten van de rivier.
28. In het bovenstroomse deel van de verruimingslocaties zal een gedeelte van het sediment dat uit het uitgevoerde bovenstrooms gelegen locaties beschikbaar komt, worden afgezet.

Het aldus (weer) gereduceerde profiel zal niet kleiner worden dan het oorspronkelijke dwarsprofiel op die plaats.

29. Vegetatieontwikkeling op banken in verruimingslocaties zal bijdragen aan de (versnelde) vorming van één of meerdere kortsluitgeulen in de binnenbocht.
30. De fasering van werken heeft invloed op de morfologie. Zoals aangegeven in [Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek, 2003a] geldt dit ook voor de waterstanden. In het volgende worden enkele conclusies getrokken m.b.t. de invloed van de uitvoeringsvolgorde op de morfologie.
31. Twee extreme gevallen zijn beschouwd, successievelijke uitvoering van alle verruimingen in benedenstroomse richting enerzijds en uitvoering in bovenstroomse richting anderzijds. Bij uitvoering in benedenstroomse richting zal er geen significante versterking van de morfodynamiek optreden, omdat veel van het vrijkomende sediment het Grensmaas systeem zal verlaten zonder veel interactie met de bestaande afgepleisterde bodem en ondergrond. Bij uitvoering in bovenstroomse richting zal de morfodynamiek significant toenemen en zullen zich ontwikkelende afpleisteringslagen in reeds voltooide locaties eerder kunnen worden doorbroken door nieuwe aankomende sedimentgolven vanuit later uitgevoerde bovenstrooms gelegen verruimingslocaties. Een belangrijk effect hierbij is dat de verminderde stroomsnelheden in de verbrede riviergedeelten van voltooide locaties tot sedimentatie zullen leiden, met name in de bovenstroomse delen hiervan. Het sediment is dan afkomstig van de nieuwe locaties die (bij deze uitvoeringsvolgorde) hier bovenstrooms van zijn gelegen.
32. Bij het vaststellen van de optimale uitvoeringsvolgorde zijn meerdere aspecten van belang (waterstanden en stroomsnelheden, effecten op grondwater, economische en uitvoeringsaspecten, vergunningverlening). Voor de morfologie is er één aspect dat naast voorgaande punt zeker aandacht verdient: het, waar mogelijk, minimaliseren van benodigde bodem- en oeververdedigingen. Daarbij kan het nodig zijn om plaatselijk juist van boven- naar benedenstrooms te werken om tijdelijke flessenhalswerking en daardoor onnodig zware en uitgebreide bodem- en oeververdedigingen te voorkomen. Daarbij spelen eventuele Vlaamse plannen een sleutelrol, omdat deze veelal aangrenzend aan de flessenhalzen liggen (vroegtijdige uitvoering Vlaamse locaties die iets bovenstrooms van de grote vergravingslocaties zijn gelegen is dan aan te bevelen).

10.3 Eindplan+0,5m (EPP) en Eindplan-0,5m (EPM)

33. De verschillen in waterstanden en stroomsnelheden tussen EP enerzijds en EPP en EPM anderzijds zijn zeer beperkt.
34. De locale verschillen in schuifspanningen, waarbij sprake is van circa 5 tot 10% afname respectievelijk toename van schuifspanningen in de flessenhalzen, leiden toch tot merkbare verschillen in morfodynamiek.
35. Er zal een verschuiving optreden van de stroming door de binnenbochten van de vergravingslocaties, met name bij Itteren en Koeweide. Bij het EPP is deze verschuiving naar binnen minder dan bij het EP, bij het EPM is dit juist meer het geval. Anderzijds is er t.o.v. het EP sprake van kleinere (EPP) dan wel grotere (EPM) stroomsnelheden in de aansluitende flessenhalzen.
36. Beide effecten leiden er toe dat bij het EPP minder morfodynamiek in de binnenbochten bij de ingangen van de verruimingslocaties optreedt. Bij het EPM is dit andersom.

37. Deze wijzigingen in morfodynamiek uiten zich in relatief minder (EPP) of meer (EPM) bankvorming en beddingvormen in de binnenbochten.
38. Voorgaande wijzigingen zullen naar verwachting overigens vrij beperkt zijn. Een voordeel van het EPP ten opzichte van het EP is dat er een grotere buffer aan sediment op de vergraven weerden aanwezig is tegen toekomstige doorgaande erosie; zou deze laatste bijvoorbeeld 2 cm per jaar bedragen, dan kan met de buffer van 0,5 m een periode van 25 jaar worden overbrugd. Voor het EPM geldt het tegenovergestelde.
39. De waterstandsdeling is iets kleiner bij het EPP dan bij het EP. Het gaat daarbij om circa 10% minder daling; dit percentage geldt zowel voor de gemiddelde daling als ook voor de maximale waterstandsdeling (locatie Meers). Bij het EPM is er sprake van een 10% sterkere waterstandsdeling. Met deze beperkte veranderingen in de erosiebasis voor de zijrivieren blijven de bij het EP vermelde conclusies ten aanzien van terugschrijdende erosie in de zijrivieren overeind.

10.4 Meest milieuvriendelijk Alternatief (MMA)

Morfodynamiek

40. T.o.v. het EP treedt in het MMA netto ongeveer dezelfde toename op in morfodynamiek.
41. Per locatie is er echter wel sprake van grote veranderingen t.o.v. het EP. Daarbij is er zowel een toename van het areaal te bespeuren waar de morfodynamiek toeneemt als ook een toename van het areaal waar de morfodynamiek afneemt. Deze veranderingen worden vooral veroorzaakt door de uitvoering van de Vlaamse Boertien locaties in het MMA.

Risico's voor bodem- en oevererosie en benodigde maatregelen

Bodemverdediging

42. In het MMA kan t.o.v. het EP een besparing van circa 25% in het volume van de benodigde bodemverdediging worden gerealiseerd. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een afname van de flessenhalswerking bij Meers als gevolg van het uitvoeren van de locatie Kotem.

Oeververdediging

43. T.o.v. van het EP kan met het MMA een beperkte besparing (rond 8%) op de benodigde oeververdediging worden gerealiseerd.

Thalweg

44. T.a.v. de potentiële thalwegverplaatsingen buiten het huidige laagwaterbed zijn er geen significante afwijkingen tussen MMA en EP.
45. Ter plaatse van de locaties Koeweide en Itteren ontbreekt echter bij het MMA een eroderende tendens tot bochtafsnijding bij het ingaan van de verruimingslocatie, in tegenstelling tot het EP; verwacht kan dus worden dat de bochtafsnijding bij het MMA trager zal verlopen dan bij het EP.

Beken

46. Bovenstrooms van locatie Meers is de waterstandsdeling in het MMA is fors groter dan bij het EP (tot circa 1,2m meer bovenstrooms van de bocht Kotem). Benedenstrooms van Meers is sprake van gemiddeld een beperkte daling ten opzichte van het EP. Ter hoogte van de erosiebasis van de zijrivieren Geul (rkm 23) en Ur (rkm 39) is sprake van een verlaging van de erosiebasis met 0,4 m respectievelijk 0,2 m ten opzichte van het EP. Dit betekent een versterking van de tendens van terugschrijdende erosie in deze zijrivieren. De tijdschaal

voor erosie in beide zijrivieren verandert niet. Voor beide zijrivieren wordt op termijn een stuwdrempel in de monding aanbevolen om erosie tegen te gaan.

Slibhuishouding

47. Door de sterke waterstandsval bovenstrooms van Meers is aldaar sprake van minder frequente overstroming van de hoger gelegen weerden dan bij het EP. Gemiddeld gezien over de lengterichting van de Grensmaas neemt de afvoer waarbij de weerden gaan overstromen daardoor toe met circa 200 m³/s; de bijbehorende overstromingsduur neemt daardoor ten opzichte van het EP met ongeveer de helft af, waardoor de slibsedimentatie op de hogere weerden ook met de helft afneemt. Omdat bij het EP ten opzichte van het NA al sprake was van een halvering, zal de slibsedimentatie ongeveer een kwart zijn van de huidige sedimentatie op de weerden. De slibbelasting van de Zandmaas (slibconcentratie) neemt daardoor toe ten opzichte van het EP, maar deze toename is absoluut gezien zeer beperkt. Vegetatie kan de aanslibbing op de weerden versterken, waardoor de vergroting van de slibbelasting verder afneemt (zie ook conclusie 22).

Morfologie na uitvoering

48. Voor wat betreft de interactie van vrijkomend sediment verandert de conclusie bij het EP, om vanaf benedenstrooms te ontgraven, niet voor het MMA. Omdat bij het MMA de Vlaamse Boertien locaties worden uitgevoerd, moet wel worden gezien in hoeverre met een goede timing van de uitvoering van deze locaties de benodigde bodem- en oeververdedigingen kunnen worden geminimaliseerd. Daarbij kan worden gedacht aan een vroegtijdige uitvoering van de Vlaamse locaties (dit geldt zeker voor Kotem). Een nadere studie voor het bepalen van de optimale volgorde, tezamen met andere van belang zijnde aspecten (hydraulica, economie, uitvoering) lijkt gewenst om tot een optimale afweging te kunnen komen.

10.5 Eindplan inclusief Vlaamse Boertien Locaties (EPVL)

Morfodynamiek

49. In het EPVL is ten opzichte van het NA sprake van vrijwel dezelfde netto toename in morfodynamiek als bij het MMA en EP, wanneer naar het totale oppervlak wordt gekeken (51 ha ten opzichte van respectievelijk 52 ha en 52 ha).
50. Per locatie is er echter wel sprake van grote verschillen t.o.v. het EP. Bovendien komt, bovenstrooms van Meers, door de dominante invloed van de uitvoering van de Vlaamse Boertien locaties het EPVL sterker overeen met het MMA dan met het EP. Benedenstrooms van Meers zijn de verschillen ten opzichte van het EP niet noemenswaardig, wat logisch is omdat het EP en EPVL daar overeenkomen.

Risico's voor bodem- en oevererosie en benodigde maatregelen

Bodemverdediging

51. In het EPVL kan t.o.v. het EP een besparing van ruim 30% in het volume van de benodigde bodemverdediging worden gerealiseerd. Dit betekent een verdere besparing ten opzichte van het MMA van ongeveer 5%. Wel zijn er, in detail gezien, tamelijk grote wijzigingen ten opzichte van het MMA. Zo is bij het EPVL bij Aan de Maas minder bodemverdediging nodig (100 m in plaats van 400 m); bij Meers is over een lengte van 100 m nu ook een verdedi-

ging nodig, waar dit in het MMA niet nodig was; bij Nattenhoven is dit ook het geval (200 m en bij het MMA niet); bij Grevenbicht is de benodigde hoeveelheid iets minder.

Oeververdediging

52. De benodigde oeververdediging bij het EPVL is nog wat kleiner dan bij het MMA, ruim 75.000 m³, tegenover een kleine 89.000 m³ bij het MMA. Ten opzichte van de ruim 96.000 m³ bij het EP is sprake van een grotere besparing. De reductie ten opzichte van het EP wordt vooral veroorzaakt door de winst in het EPVL bij de oevers langs de flessenhals bij Meers, door het uitvoeren van Kotem (deze moet dan wel voorafgaande aan Meers zijn uitgevoerd).

Thalweg

53. Ten aanzien van de grootschalige thalwegverplaatsingen buiten het laagwaterbed zijn er nauwelijks afwijkingen tussen EPVL en MMA; daarmee is er ook geen wezenlijk onderscheid met het EP. Dit betekent dat in de locaties Itteren, Meers en Koeweide grote verplaatsingen kunnen optreden.
54. Een klein verschil met het MMA is dat in het EPVL ter plaatse van de locatie Koeweide bij het ingaan van de bocht er een beperkte eroderende tendens tot bochtafsnijding optreedt; dit komt overeen met het EP.

Beken

55. De verlaging van de erosiebasis is in het EPVL voor de Roer en de Ur nagenoeg gelijk aan het MMA. Daarmee gelden de conclusies die bij het MMA zijn vermeld ook voor het EPVL (zie conclusie 46).

Slibhuishouding

56. De waterstandsverlaging komt bij het EPVL globaal overeen met die bij het MMA (bovenstrooms Meers nagenoeg gelijk, benedenstrooms Meers bij het MMA op enkele trajecten meer waterstandsverlaging). Daardoor zal de aanslibbing in de Grensmaas en de slibbelasting van de Zandmaas niet wezenlijk anders zijn dan bij het MMA (zie conclusie 47).

Morfologie na uitvoering

57. Het EPVL komt in grote lijnen overeen met het MMA. Ten aanzien van een optimale uitvoeringsvolgorde geldt het gestelde uit conclusie 48, dat de timing van de uitvoering van de Vlaamse Boertien locaties een cruciale rol speelt bij het minimaliseren van bodem- en oeververdedigingen. Dit laatste is van belang voor het toelaten van een zo groot mogelijke morfodynamiek in de situatie na gereedkomen van het Eindplan Grensmaas.

11 Kennisleemten en monitoring

11.1 Inleiding

Op grond van de voorliggende morfologische bureaustudie worden hierna kennisleemten aangegeven en aanbevelingen gedaan voor monitoring. Dit laatste punt is van groot belang, omdat de Grensmaas in zekere zin een onberekenbare rivier is én blijft door enerzijds de complexiteit van de morfologische verschijnselen en anderzijds doordat versterking van de morfodynamiek juist wordt nagestreefd. Naast de eigenlijke monitoring is het van belang dat in de toekomst op regelmatige basis de morfologische voorspellingen worden geactualiseerd door gebruik van actuele topografische en bathymetrische informatie, door toepassing van verbeterde rekenmodellen en dergelijke. Deze actualisering van voorspellingen wordt hier inbegrepen gedacht bij de monitoring.

Opgemerkt wordt dat de kennisleemten zijn beperkt tot die aspecten welke niet met SOBEK-graded worden onderzocht; globale erosie en sedimentatie op de middenlange en lange termijn wordt dus niet apart in ogenschouw genomen; aan kennisleemten m.b.t. dit aspect zal in het betreffende rapport [Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek, 2003b – in voorbereiding] aandacht worden besteed. Wel willen we hier onder de aandacht brengen dat voor het verkrijgen van een meer volledig morfologisch inzicht het wenselijk zou zijn ook de lange termijn bodemontwikkeling in de WAQUA berekeningen in te brengen, met aansluitend een analyse op basis van deze berekeningen voor de 'eindtoestand', overeenkomstig de analyse uit deze bureaustudie voor de begintoestand.

Achtereenvolgens wordt ingegaan op de aspecten die bij deze bureaustudie in beschouwing zijn genomen. Vervolgens worden algemene kennisleemten aangegeven

11.2 Morfodynamisch areaal

De toegepaste methodiek voor het bepalen van het morfodynamisch areaal is recht-toe-rechtaan en baseert zich op de meest recente berekeningen met WAQUA voor de situatie na gereedkomen van de werken, waarbij de afpleisteringslagen weer aanwezig zijn. Belangrijk is na te gaan of de daaraan voorafgaande fase, namelijk die direct na gereedkomen waarin zeer veel 'vrij' sediment aanwezig is, aanleiding geeft tot een wezenlijk andere bodemligging door sterke sedimentatie en mogelijk ook erosie (zie verder bij 11.7). Door monitoring van de bodemligging (laagwaterbedding én vergraven locaties) kan worden vastgesteld of dit het geval is of niet. Mocht er wel sprake zijn van sterke bodemveranderingen, dan wordt aanbevolen de analyse opnieuw te doen aan de hand van geactualiseerde WAQUA-berekeningen.

11.3 Benodigde bodem- en oevervastleggingen

In deze studie is een schatting gemaakt van de globaal benodigde bodem- en oevervastleggingen voor de verschillende alternatieven van het Eindplan Grensmaas, uitgaande van de volledig gerealiseerde eindsituatie. Gebleken is echter (vergelijk MMA en EPVL met EP) dat de uitvoering van Vlaamse Boertien locaties van groot belang zijn voor het minimaliseren van deze verdedigingswerken. Dit heeft is niet alleen van belang voor de kosten, maar ook voor het zoveel mogelijk handhaven van beweeglijke bodem en oevers teneinde de morfodynamiek te verbeteren.

Men bedenke hierbij dat de grootste dynamiek ter plaatse van de flessenhalzen optreedt; deze vervolgens goeddeels vastleggen betekent een sterke verslechtering van het morfodynamisch areaal.

We zouden ervoor willen pleiten bij de bepaling van minimaal benodigde bodem- en oevervastleggingen ook de uitvoeringsvolgorde als sturende parameter mee te nemen. Ook zou daarin een verdere uitdetaillering van deze werken moeten worden gemaakt (bodemvastlegging versus zware teenverdedigingen; keuze van verdedigingssystemen, meer gedetailleerde dimensionering en dergelijke). Op deze wijze kan een afgewogen keuze voor de vastleggingen worden gemaakt.

Een ander punt is dat in de WAQUA-berekeningen is uitgegaan van een grotere lengte aan bodemverdediging dan in de onderhavige bureaustudie is geschat (zie punt 4 bij de conclusies). Bij het detailontwerp van de bodemverdediging zou ons inziens een extra iteratieslag moeten worden gemaakt, met geactualiseerde WAQUA-berekeningen. Tenslotte zou ook aandacht moeten worden besteed aan de morfologische lange-termijn effecten.

Opgemerkt wordt dat een optimalisatie van de verdediging van andere constructies, zoals leidingen en brugpeilers, van minder van belang is, door het beperkte ruimtebeslag en de beperkte consequenties van afwijkende stroomaanval voor de dimensionering van de verdedigingsconstructies.

11.4 Thalwegverplaatsingen

Onderscheid kan worden gemaakt in kleinschalige verplaatsingen binnen het huidige laagwaterbed en grootschalige verplaatsingen buiten het huidige laagwaterbed. De kleinschalige verplaatsingen zijn hydraulisch en morfologisch minder interessant en volgen uit regelmatige bodemopnamen van de laagwaterbedding. De grootschalige verplaatsingen zijn sterk afhankelijk van het sedimentatiepatroon (vooral locaties Itteren en Koeweide) in de oude laagwaterbedding en in het bovenstroomse deel van de vergravingen. Door een goede monitoring kan deze sedimentatie gevolgd worden en wordt een steeds beter inzicht verkregen in de te verwachten toekomstige verplaatsingen en de bijbehorende dynamiek. Een aandachtspunt is ook de mogelijk terugschrijdende erosie aan de benedenstroomse zijde van de verwijdingslocaties, waar de stroming weer in de oude laagwaterbedding komt. Hier is een versterkte erosiecapaciteit; deze kan door een adequate monitoring worden gevolgd, waaruit kan blijken in hoeverre de erosie in de vergravingslocatie zal insnijden van benedenstrooms naar bovenstrooms toe.

Voor de thalwegverplaatsingen geldt hetzelfde als is gesteld voor het morfodynamisch areaal; mocht er sprake zijn van sterke bodemveranderingen als gevolg van de interactie van 'vrij' sediment in het systeem direct na gereedkomen, dan wordt aanbevolen de analyse opnieuw te doen aan de hand van geactualiseerde WAQUA-berekeningen.

11.5 Erosie zijbeken

De zijrivieren van de Grensmaas, met name Geul en Ur, krijgen door de daling van de hoogwaterstand te maken met een daling van de erosiebasis, waardoor terugschrijdende erosie in de zijrivieren mogelijk is. Dit proces gaat vrij langzaam en is moeilijk nauwkeurig te voorspellen. Er is voldoende tijd voor monitoring van de bedding van de beken bij de uitmonding in de Maas om

dit proces te volgen en desgewenst mitigerende maatregelen te nemen door het plaatsen van een stuwdrempel in de monding van de beken.

11.6 Aanslibbing Grensmaas en slibblast Zandmaas

Uit de voorliggende bureaustudie blijkt dat de aanslibbing in de weerden af zou kunnen nemen bij uitvoering van het Eindplan Grensmaas. Door andere onderzoekers (o.a. Van den Berg et al, 2000) wordt aangenomen dat de aanslibbing versterkt zal plaatsvinden. Onze verwachting richt zich vooral op slibsedimentatie op de hoger gelegen weerden en de verwachting van de andere onderzoekers richt zich vooral op sedimentatie in stroomluwe delen van de vergraven locaties. Onduidelijk is welke tendens de overhand heeft. Daarmee wordt ook de slibblast naar de Zandmaas beïnvloed; overigens blijkt uit de voorliggende bureaustudie wel dat het slibverlies in de Grensmaas door aanslibbing maar een klein percentage bedraagt van de totale slibblast (in de huidige situatie zou circa 15% sedimenteren).

Kennisvergroting zal vooral kunnen worden verkregen door gerichte monitoring nadat de eerste werken zijn uitgevoerd. De uitvoeringsvolgorde speelt bij de aanslibbingsproblematiek mogelijk slechts een beperkte rol; dit zou bij een definitiestudie t.a.v. de monitoring verder kunnen worden onderbouwd. De slibblast naar de Zandmaas zou ook moeten worden gemonitord teneinde een sluitende slibhuishouding te kunnen vaststellen.

11.7 Sedimentverplaatsingen na uitvoering

Een van de grootste onzekerheden is ons inziens de wijze waarop het sediment in de laagwaterbedding en de verruimde locaties zich zal gedragen direct nadat de locaties zijn vergraven. Hierbij speelt ook de uitvoeringsvolgorde een grote rol. In die situatie is nog niet sprake van een afgepleisterde bedding. Zoals bekend is de transportcapaciteit in de Grensmaas vele malen (mogelijk orde 100 maal) groter dan het sedimentaanbod in de huidige situatie, wanneer de afpleisteringslaag nog intact is. Na vergraving zal dit aanbod aanvankelijk juist zeer groot zijn, zodat te verwachten is dat er, in vergelijking met de huidige situatie, zeer grote transporten zullen plaatsvinden tijdens de eerste hoogwaters. De interactie van dit sediment met de lokale bodem is dus van cruciaal belang voor de vorming van de (eerste) zand- en grindbanken en de variatie van het sedimentatiepatroon in de verwijdingslocaties. Ook de snelheid van opvulling van de huidige laagwaterbedding op plaatsen waar bochtafsnijding kan plaatsvinden (Itteren, Koeweide) hangt hier nauw mee samen en daarmee de snelheid van verplaatsing van de thalweg.

Kennisvergroting zal vooral moeten komen door gerichte monitoring bij aanvang van de werken, voorafgegaan aan een nadere bureaustudie over de van belang zijnde monitoringparameters. Het grote belang van de in de jaren '90 uitgevoerde sedimenttransportmetingen, waarmee het inzicht in de huidige morfodynamiek van de Grensmaas sterk is vergroot, geeft het belang aan van voortzetting van dergelijke metingen, zowel voor de huidige situatie (tijdens hoogwatergolven) als tijdens en na de uitvoering van de werken.

Als de uitgangssituatie na gereedkomen van de werken sterk verschilt met de huidige, kan een actualisatie van de hydraulische (WAQUA) en morfologische (SOBEK) rekenmodellen nuttig zijn.

11.8 Algemene kennisontwikkeling

Uit vergelijking tussen de MER 1998 en de voorliggende bureaustudie blijkt dat de kennis van de Grensmaas en de potentie van de beschikbare onderzoeksmiddelen, ondanks de korte tussenliggende periode, sterk is toegenomen. Ons inziens moet onverminderd worden gestreefd deze kennis en kennishulpmiddelen verder te verbeteren. Daarbij kunnen worden genoemd (zonder uitputtend te willen zijn):

- adequate monitoring en analyse, zoals in voorgaande paragrafen aangeven;
- beter inzicht in de ondergrond van de Grensmaas (meer boringen in de laagwaterbedding);
- metingen en analyse m.b.t. sedimentbalans en slibbalans (w.o. analyse zandvang Maas-bracht);
- 'hindcasting' van ontwikkelingen tijdens de uitvoering van de werken met bureaustudies en modelberekeningen ter verhoging van het inzicht in verschijnselen en de voorspelbaarheid.

Referenties

Projectgerelateerde referenties

De Maaswerken (2002), projectbeschrijving betreffende: Rivierkundig onderzoek ten behoeve van het MER Grensmaas, Nr. LB-7231, Projectplan 18 juli 2002

De Maaswerken en Provincie Limburg (2001), Beschrijving locaties Eindplan Grensmaas

Iwaco, CSO, WL|Delft Hydraulics, MER Grensmaas (1998), Deelrapport 2 Rivierkunde, in opdracht van De Maaswerken

Royal Haskoning (2001), Methodiek ontwerp rivierkundige werken Grensmaas ten behoeve van de standzekerheid kaden, in opdracht van Rijkswaterstaat, De Maaswerken, project G0940.P0

Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek (2003a), MER Grensmaas 2003 – Achtergronddocument 1 – Rivierkunde. Auteur: R. Achtersloot. In opdracht van Rijkswaterstaat, De Maaswerken. Project 9M4711.A0 Royal Haskoning/ 10064 Meander Advies en Onderzoek.

Royal Haskoning en Meander Advies en Onderzoek (2003b), MER Grensmaas 2003 – Achtergronddocument 2.2 – Morfologie – modelonderzoek met SOBEK Gegradeerd™. Auteur: D. Meier et al. In opdracht van Rijkswaterstaat, De Maaswerken. Project 9M4711.A0 Royal Haskoning/ 10064 Meander Advies en Onderzoek (in voorbereiding).

TNO-NITG (2002), Geologisch ondergrondmodel Grensmaas, in opdracht van Rijkswaterstaat, De Maaswerken, NITG 02-157-B

Overige referenties

Anonymus (2000); Ruimte voor Rijntakken (RvR). De Bestuurlijke Begeleidingsgroep Ruimte voor Rijntakken bij monde van Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland

Asselman, N.E.M. (1997), Suspended sediment in the Rhine River. The impact of climate change on erosion, transport and deposition, Utrecht University, The Netherlands, Ph.D. thesis, 341 pp. + fig.

Asselman, N.E.M. (1999a), Slibmodellering in RvR – Fase 1, WL/Delft Hydraulics, Rapport R 3337

Asselman, N.E.M. (1999b), Slibmodellering in RvR – Fase 2, WL/Delft Hydraulics, Rapport R 3337

Berg, G.A. van den & Wijngaarden, M. van (2000), Sedimentatie langs de Grensmaas (snelheid van sedimentatie en kwaliteitsontwikkeling op de weerden), RWS, RIZA, rapport 2000.046, ISBN 9036953456

Berg, J.H. van der, Kramer, J. de, Kleinhans, M. & Wilbers, A. (2000), De Allier als morfologisch voorbeeld voor de Grensmaas, Deel I: Vergelijkbaarheid en rivierpatroon, Natuurhistorisch Maandblad, Vol. 89, no. 7, pp. 118-122

Blom, A., Ribberink, J.S. & Vriend, H.J. de (2003), Vertical sorting in bedforms. Flume experiments with a natural and a tri-modal sediment mixtures, Water Resources Research, Vol. (...), No. (...), pp.

Breukel, R.M.A., Silva, W., Vuuren, W.E. van, Botterweg, J. and Venema, R. (1992), De Maas. Verleden, heden en toekomst, RWS, RIZA, Arnhem, nota 91.052 (in Dutch)

Burgdorffer, M.C. (1993), Sedimenttransportmetingen in de Maas te Eijsden en Maaseik,

Rijkswaterstaat RIZA, Report no. 10-1993

Chen, C.-N. (1975), Design of sediment retention basins, In: Nat. Symp. On Urban Hydrology and sediment control, Lexington, Kentucky, pp. 285-298

Duizendstra, H.D. en Flokstra (1998), The necessity of modelling non-uniform sediment in an 1-D morphological bed and sand bed river in The Netherlands, Proc. First Federal Interagency Hydrologic Modelling Conf., Las Vegas, USA, Vol. 1, pp. 3-63 ... 3-70

Duizendstra, H.D. en Lee L.R. (1998), Video tape bed load transport measurements in the Common Meuse, an armoured gravel river bed in the Netherlands, from bridges with the BTMA-2, Rijkswaterstaat RIZA

Duizendstra, H.D. (1999), Sedimenttransport in de Grensmaas. Transportcapaciteit en aanbod van sediment, RWS, RIZA, Werkdocument 99.158X

Fioole, A. (1992), Relatie zwevend stof – afvoer in de Maas bij Eijsden, in de Rijn bij Lobith, RWS, RIZA, werkdocument 91.119X

Gerretsen, J. (1968), Materiaaltransport door de Maas, Rijkswaterstaat, Directie Limburg, Studiedienst Maas, nota 68.8

Helmer, W., Klaassen, G.J. and Silva, W. (1991), Future for a gravel bed river, RWS, RIZA, Arnhem, nota 91.0007 (in Dutch)

Hickin, E.J. & Nanson, G.C. (1984), Lateral migration rates of river bends, Journ. Hyd. Eng. ASCE, Vol. 110, no. 11, pp. 1557-1567

Jansen, P.Ph., L. van Bendegom, J. van den Berg, M. de Vries & A. Zanen (1979), Principles of river engineering; The non-tidal alluvial river, Pitman Publ. Cy., London.

Klaassen, G.J. (1971), Oriënterend onderzoek naar de aard en afmetingen van het bodemmateriaal van de Grensmaas, RWS, Directie Limburg, Studiedienst Maas, nota 71.7

Klaassen, G.J. (1981), Morfologische verschijnselen Grensmaas, Waterloopkundig Laboratorium. Verslag Vooronderzoek, Rapport R 863 Band A (tekst) en Band B (tabellen en figuren)

Klaassen, G.J. (1986), Morfologie afgepleisterde beddingen, Proeven met hoogwatergolven, Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek, Rapport M 2061/Q212

Klaassen, G.J. (1988), On time scales of transient processes in rivers, Budapest, Hungary, Proc. Intern. Conf. on Fluvial Hydraulics, Keynote lecture

Klaassen, G.J. (1997), Armoured river beds during floods, Euromech 215, Genova, Italy, 6 pp.

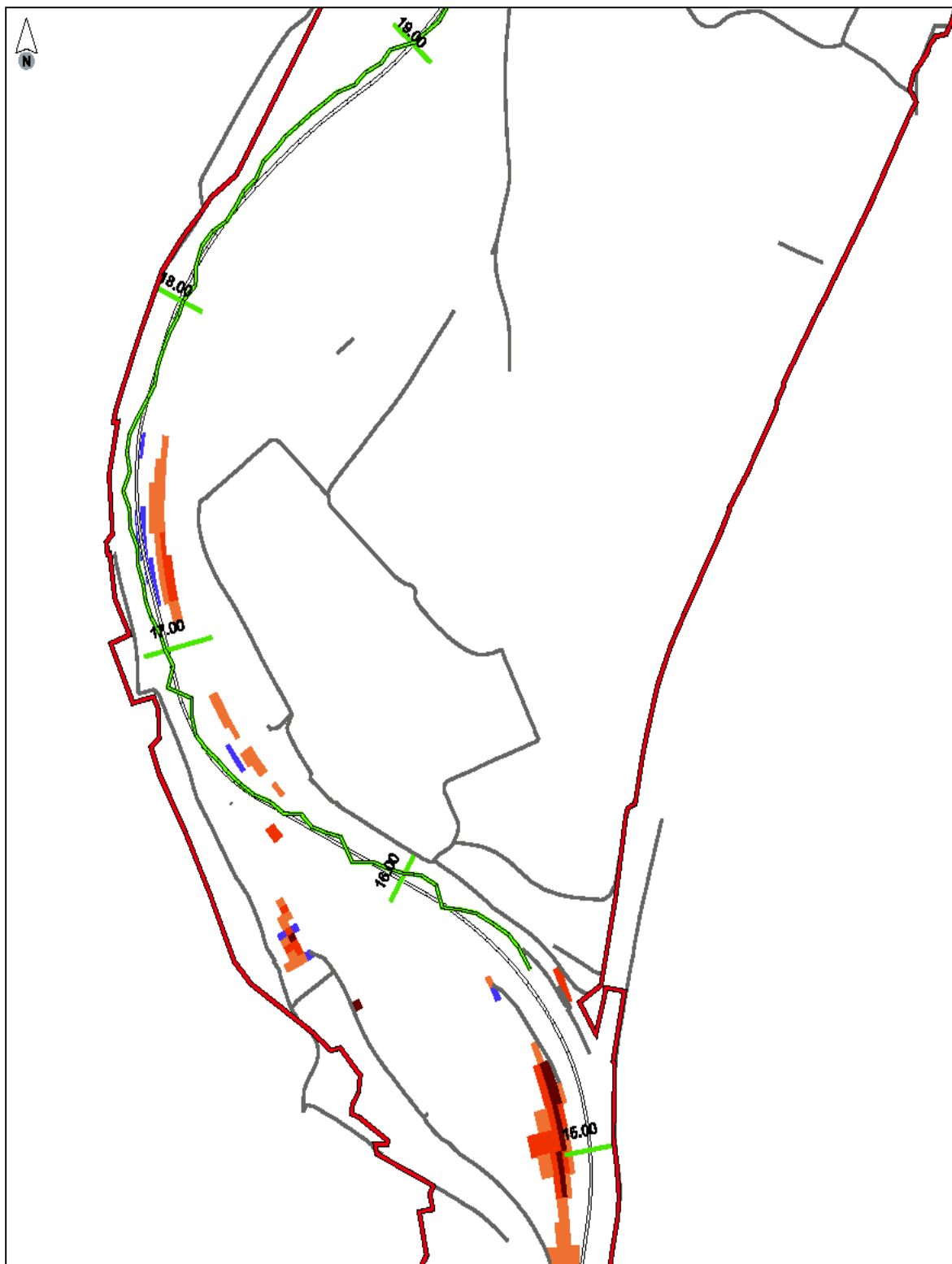
Klaassen, G.J. (1990), Sediment transport in armoured river beds during floods – literature survey, WL/Delft Hydraulics, Report Q 790

Klaassen, G.J. (1992), MER Grensmaas. Vooronderzoek, WL/Delft Hydraulics, Rapport Q1437

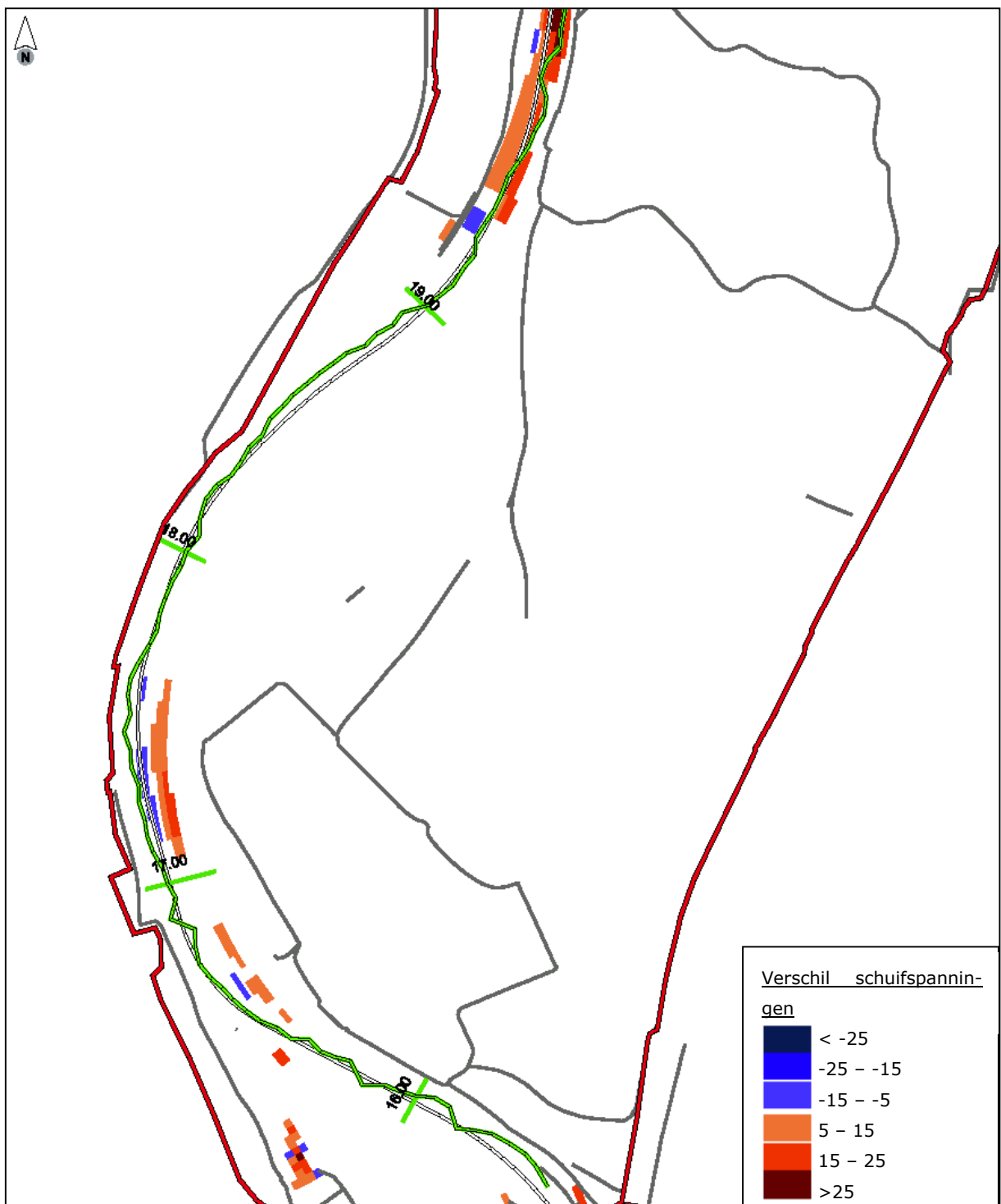
Klaassen, G.J. (1998), Definitiestudie Slib in RvR, WL/Delft Hydraulics, Rapport R3211

- Kleinhans, M., Berg, J.H. van der, Wilbers, A. & Kramer, J. de (2000), De Allier als morfologisch voorbeeld voor de Grensmaas, Deel III: Sedimenttransport en afpleistering, *Natuurhistorisch Maandblad*, Vol. 89, no. 9, pp. 202-207
- Kleinhans, M.G., Wilbers, A.W.E., Swaaf, A. de & Berg, J.H. van den (2002), Sediment supply-limited bedforms in sand-gravel bed rivers, *Journ. Sediment Res.*, Vol. 72, no. 5, pp. 629-640
- Kleinhans, M.G. (2002), Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers, Utrecht University, The Netherlands, Ph.D. thesis
- Kramer, J. de (1997); Oevererosie en meandermigratie langs de Grensmaas. Rijksuniversiteit Utrecht, stageverslag
- Kramer, J. de, Wilbers, A., Berg, J.H. van der & Kleinhans, M. (2000), De Allier als morfologisch voorbeeld voor de Grensmaas, Deel II: Oevererosie en meandermigratie, *Natuurhistorisch Maandblad*, Vol. 89, no. 8, pp. 189-196(?)
- Micha, J.C. and Borlee, M.C. (1989), Recent historical changes on the Belgian Meuse, In: Petts, G.E. (1989), *Historical changes*
- Middelkoop, H. (1997), Embanked floodplains in The Netherlands, Utrecht University, The Netherlands, Ph.D. thesis
- Mierlo, Th. van & Wijbenga, J.H.A. (1989), Reductie aanslibbingsproblematiek Papenwater, Waterloopkundig Laboratorium, Rapport Q665
- Ministry of Public Works (1985), The Belgian dams, Belgium, Verviers, Ministry of Public Works, Service de Barrages, 55 pp.
- Narinesingh, P. (1995), Nature restoration and floodplain sedimentation, IHE Delft, M.Sc. thesis, No. HH 218
- Narinesingh, P., Klaassen, G.J. & Ludikhuizen, D. (1999), Floodplain sedimentation along extended river reaches, *Journ. Hydr. Res.*, Vol. 37, No. 6, pp. 827-845
- Pilarczyk, K.W. (1990) editor, *Coastal Protection*, Balkema, Delft.
- Scheer, P van der, Ribberink, J.S. & Blom, A. (2002), Transport formulas for graded sediment. Behaviour of transport formulas and verification with data, Universiteit Twente, Civil Engineering, Research Report 2002R-002, ISSN 1568-4652
- Sloff, K. (2002), Morfologische berekeningen Zandmaas Scope 2000 met gegradeerd material, WL/Delft Hydraulics, Report Q 2772.
- Talmon, A.M., N. Struiksma & M.C.L.M. van Mierlo (1995), Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial-bed slopes, *Journ. Hydr. Res., IAHR*, Vol.33, No.4, pp.495-517
- Vries, M. de (1975), A morphological time-scale for rivers, *Proc. 16th Congress IAHR, São Paulo* (also Delft Hydr. Lab. Publ. No.147).
- Wilbers, A.W.E. (1996), De Grensmaas over de jaren, Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Vakgroep Fysische Geografie, stageverslag
- Wu, W., Wang, S.S.Y. & Jia, Y. (2000), Nonuniform sediment transport in alluvial rivers, *Journ. Hydr. Res.*, Vol. 38, No. 6, pp. 427-434

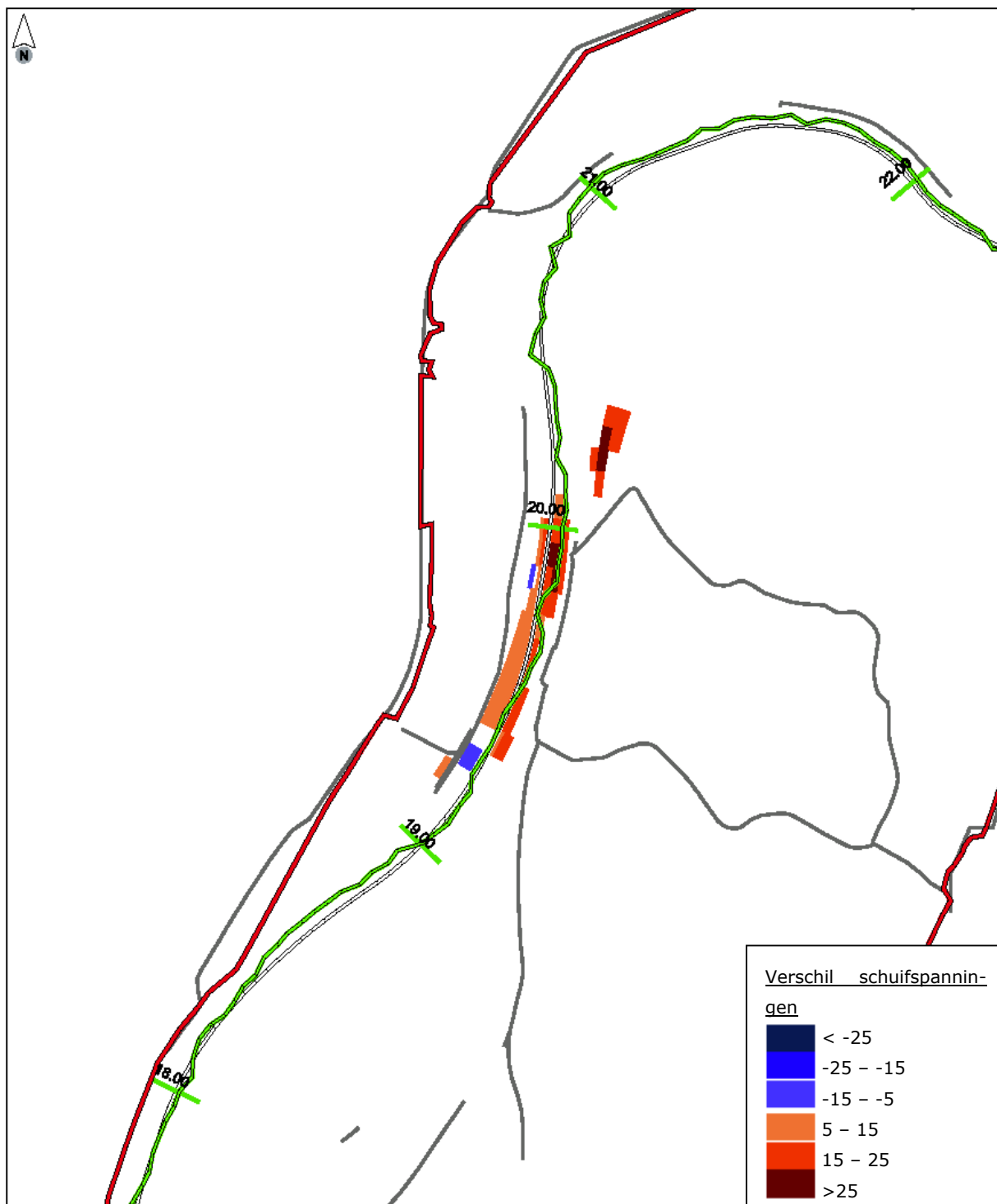
Bijlage A: verandering schuifspanningen EP ten opzichte van NA (mobiele condities)



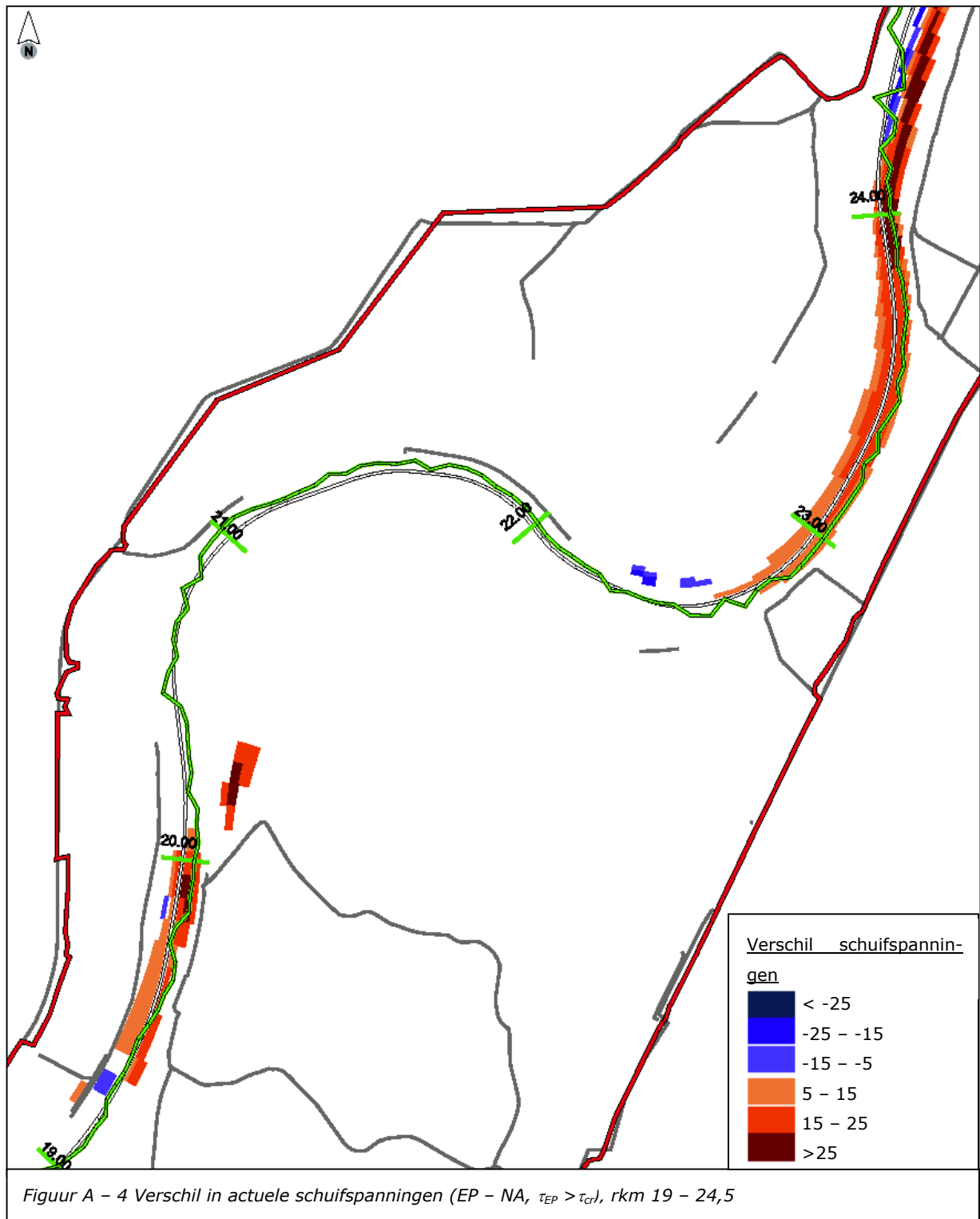
Figuur A - 1 Verskil in actuele schuifspanningen ($EP - NA$, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 14,4 - 19,4

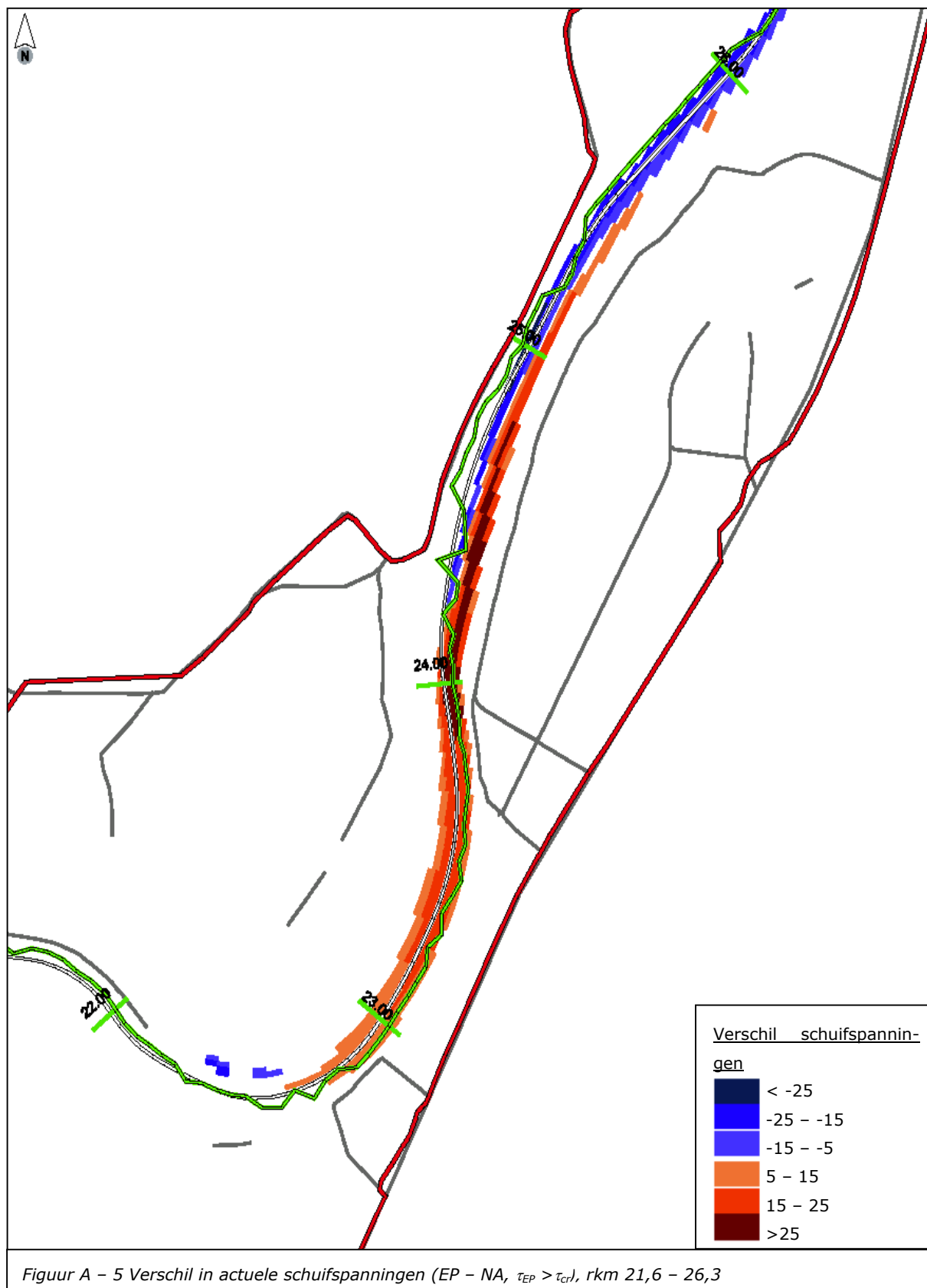


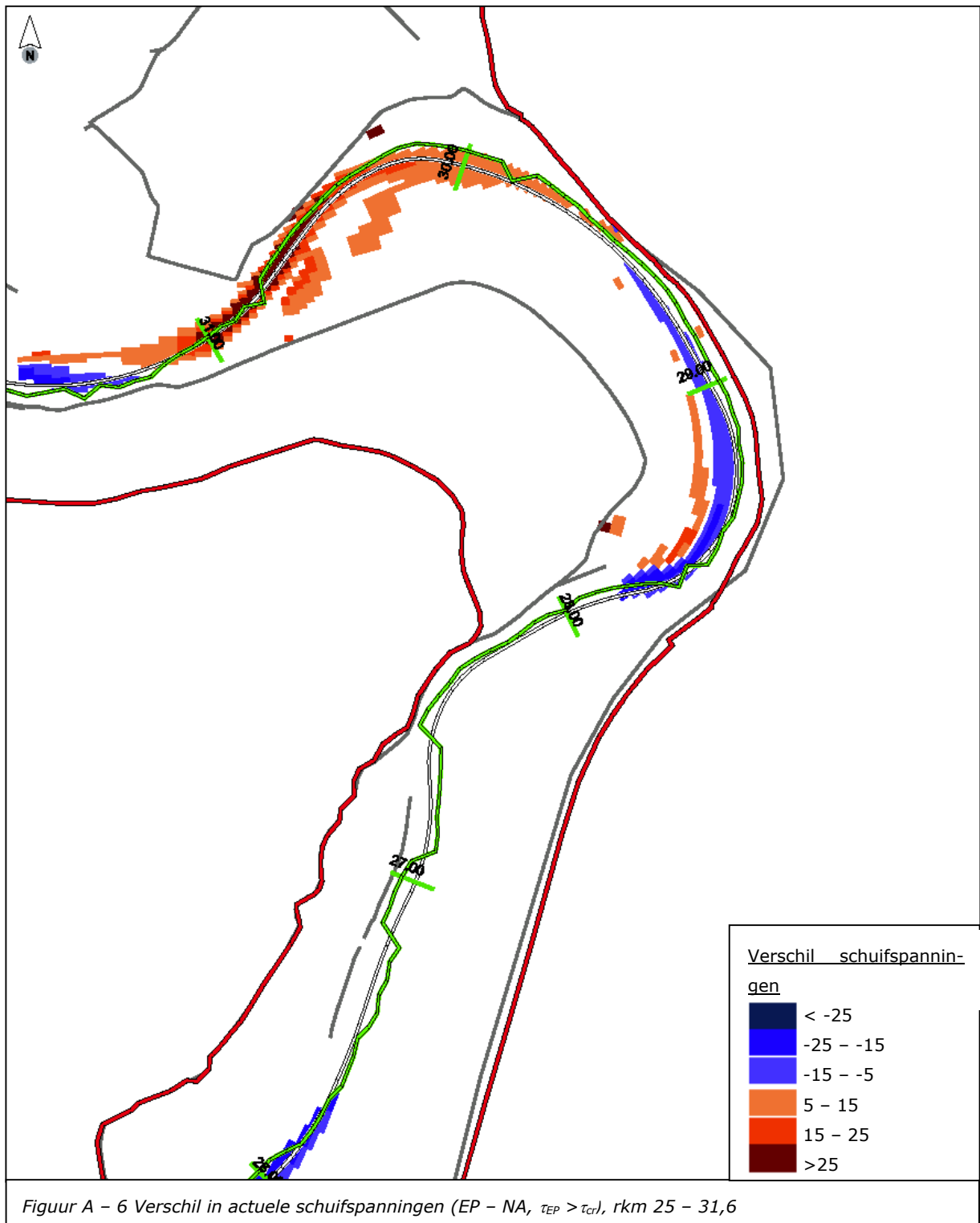
Figuur A - 2 Vershil in actuele schuifspanningen ($EP - NA$, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 15,5 - 19,9

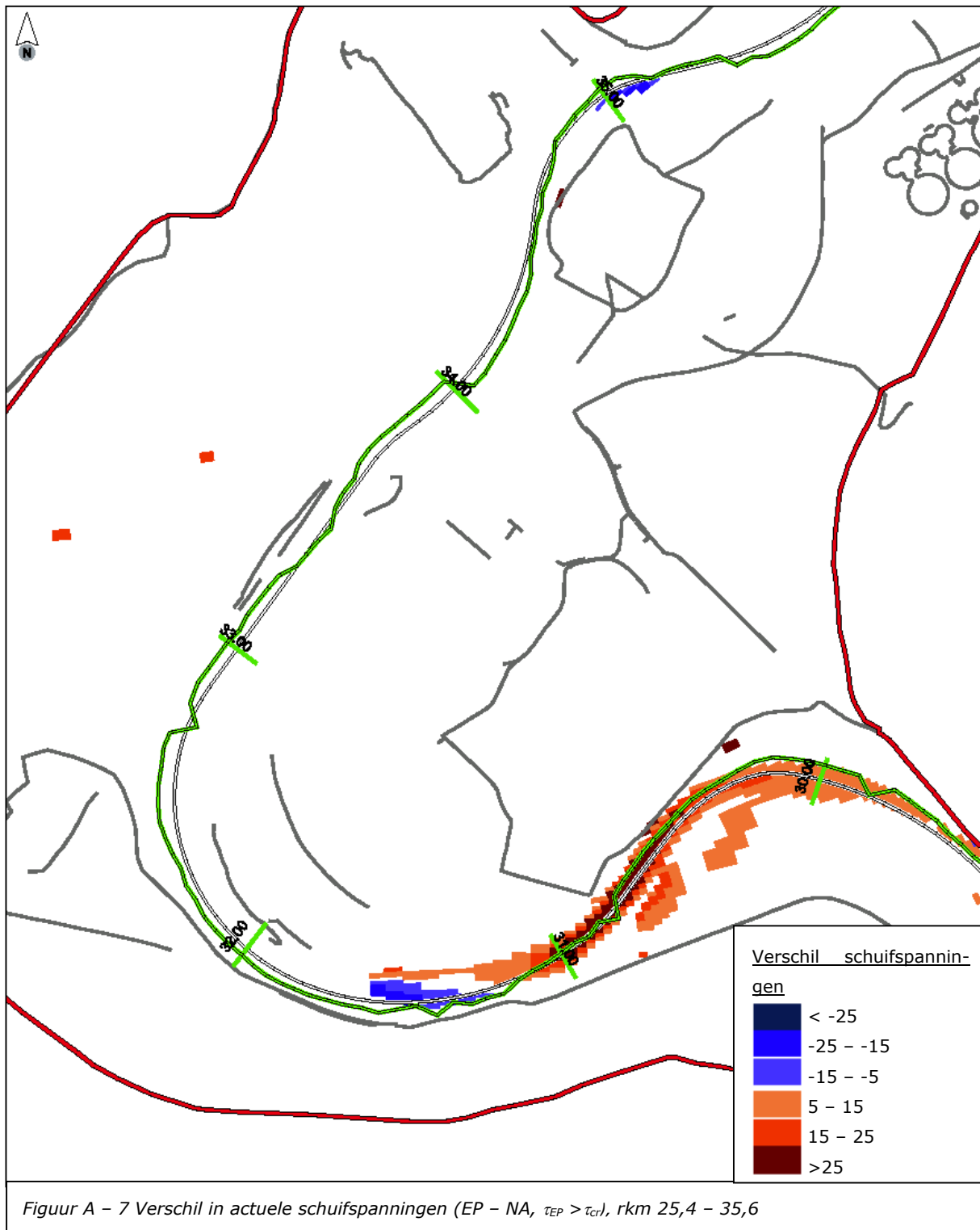


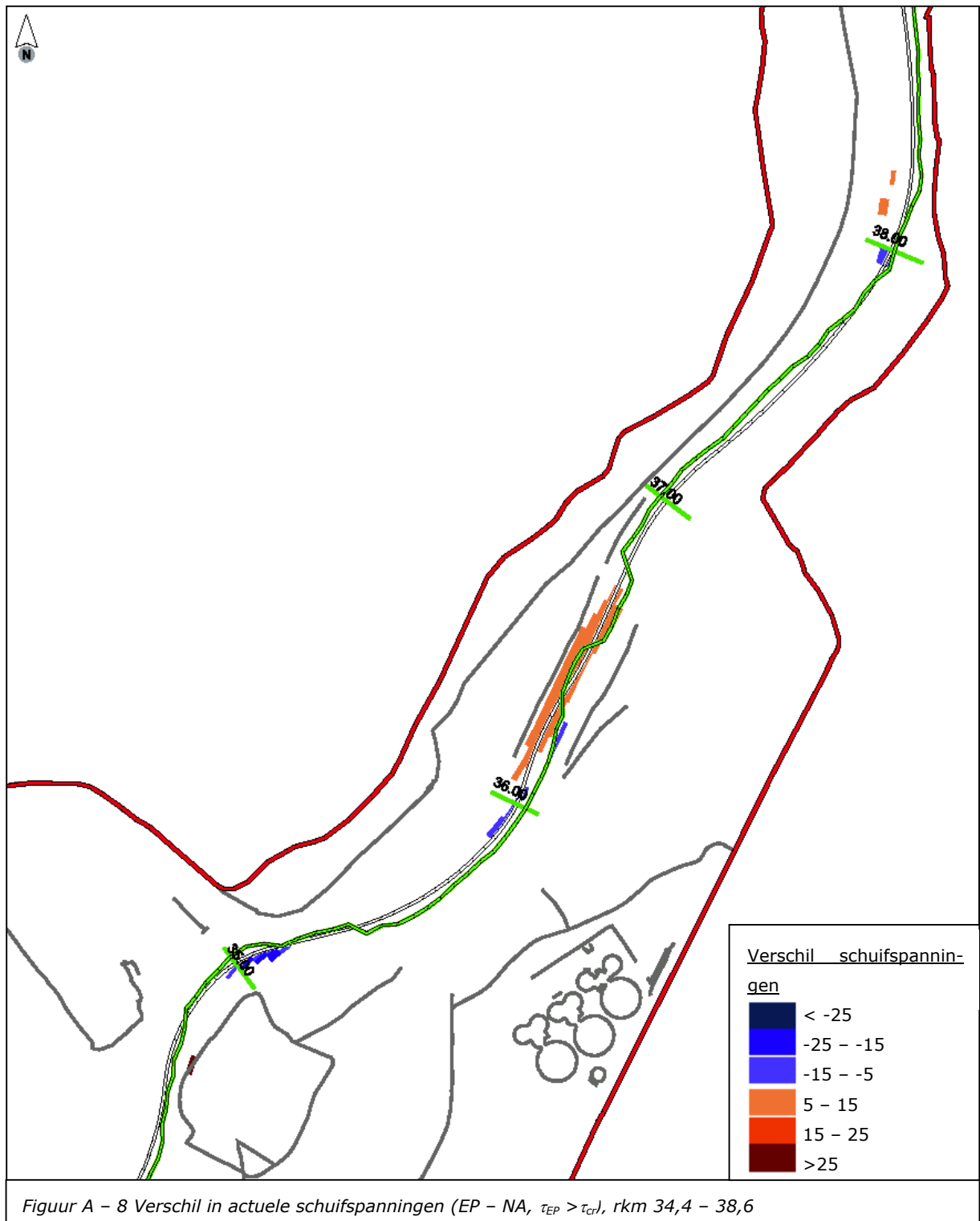
Figuur A - 3 Verskil in actuele schuifspanningen (EP - NA, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 17,5 - 22,3

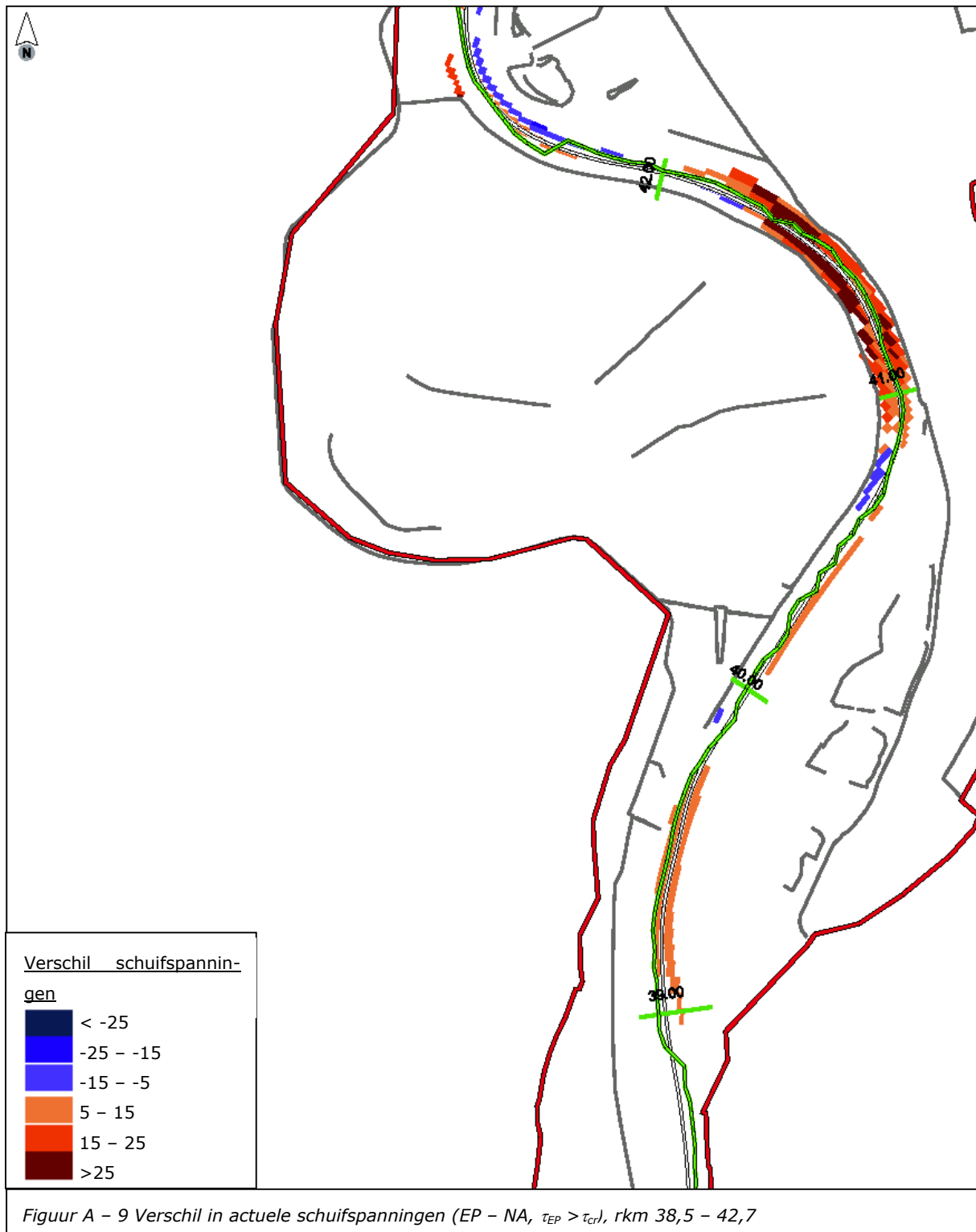


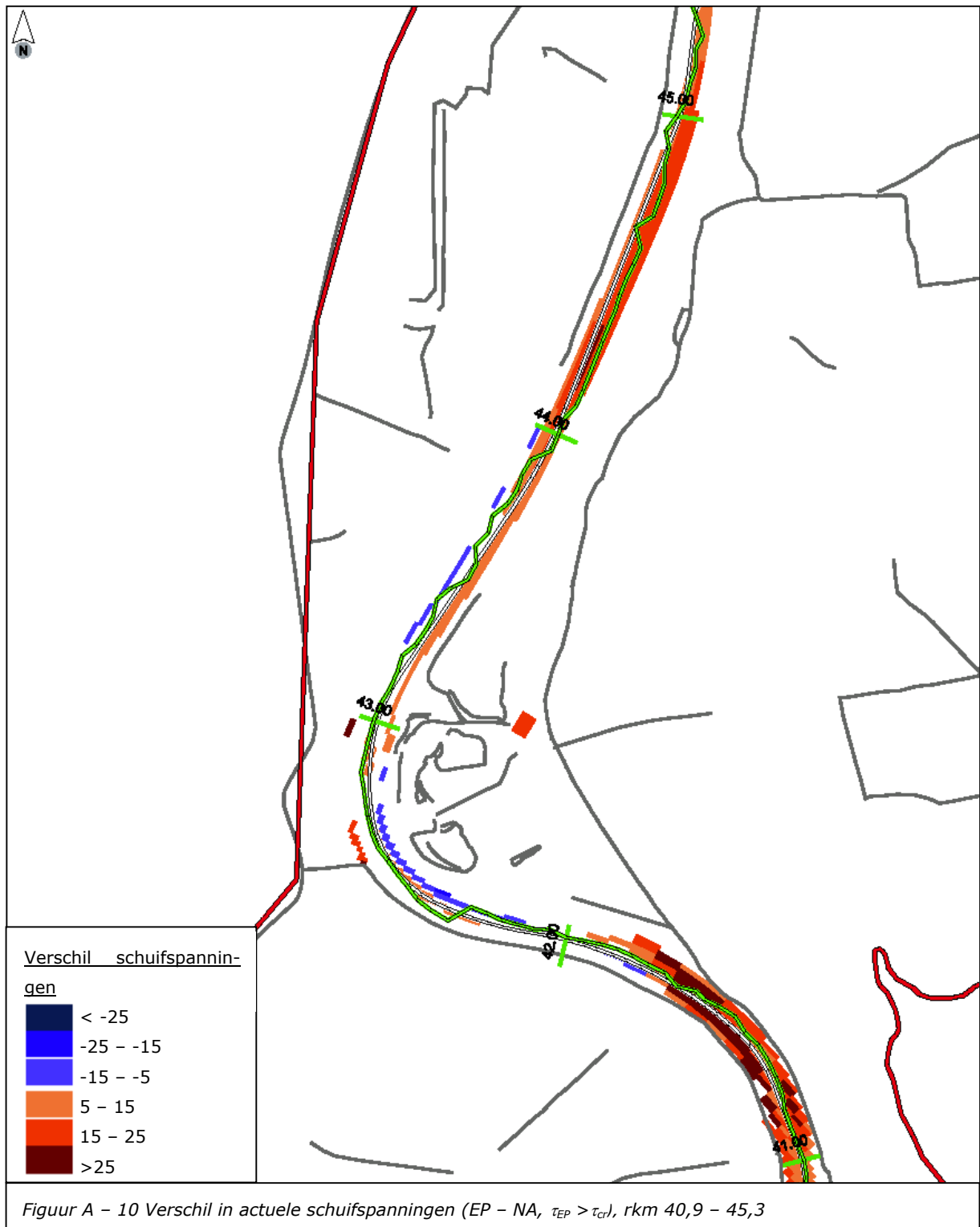


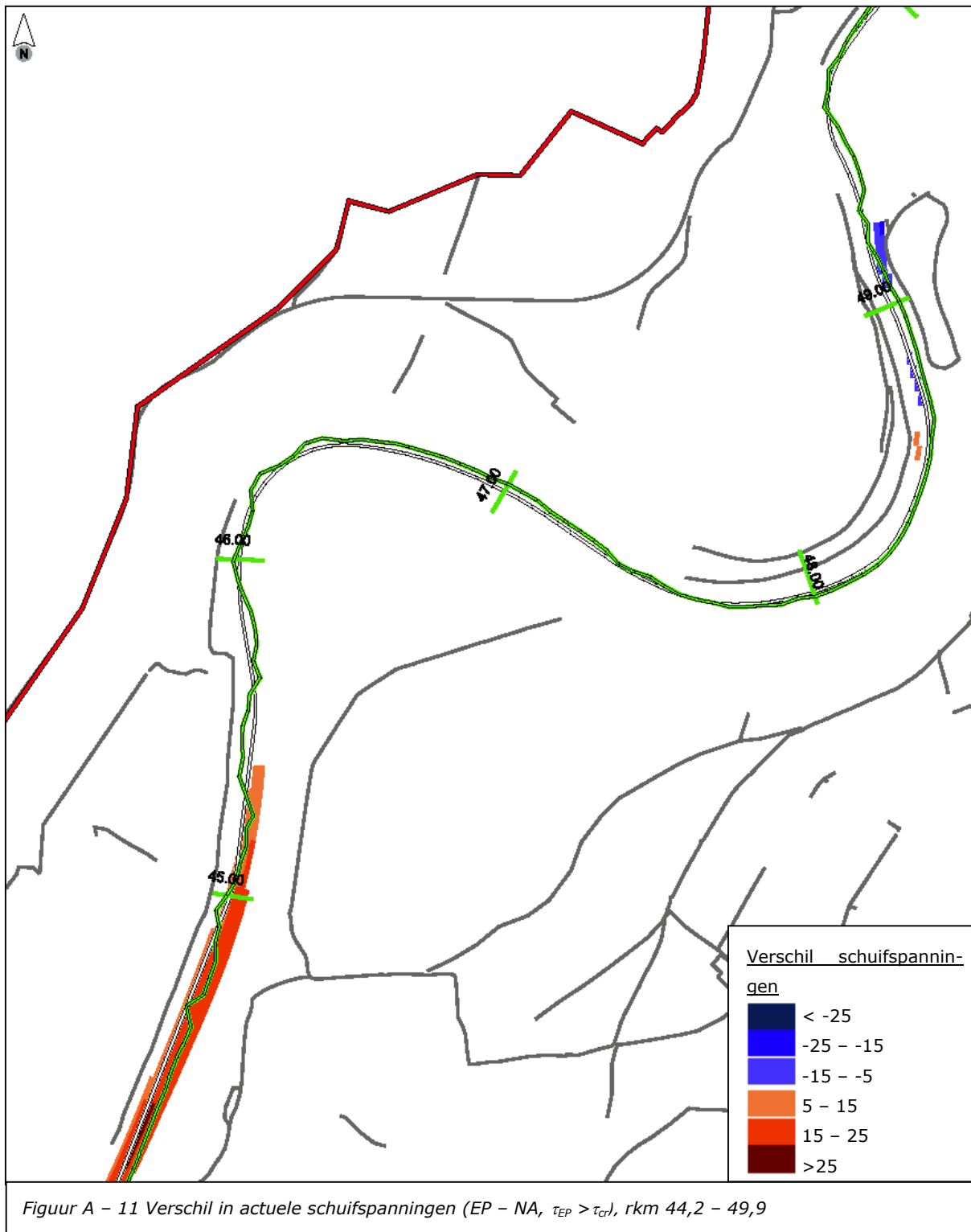


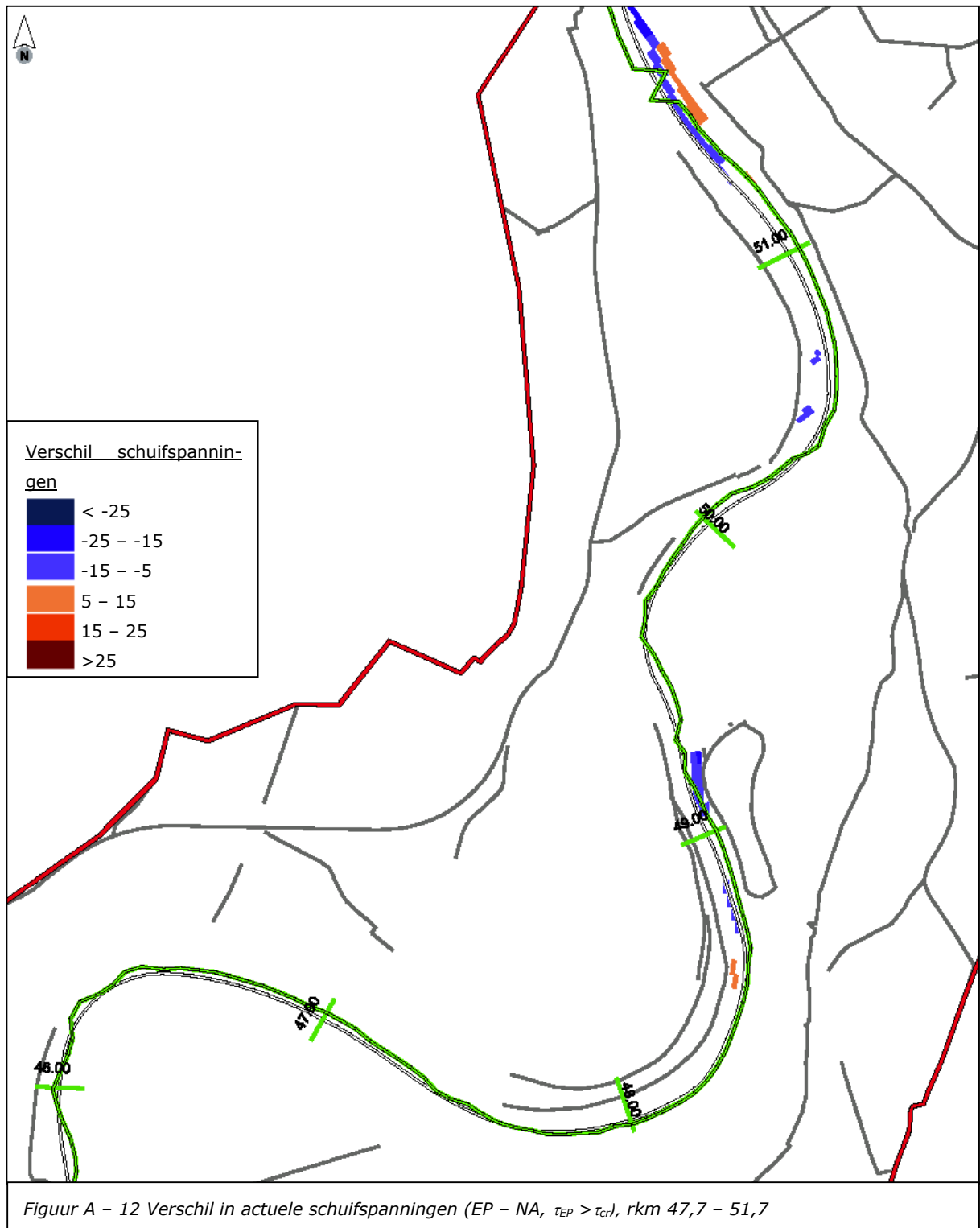


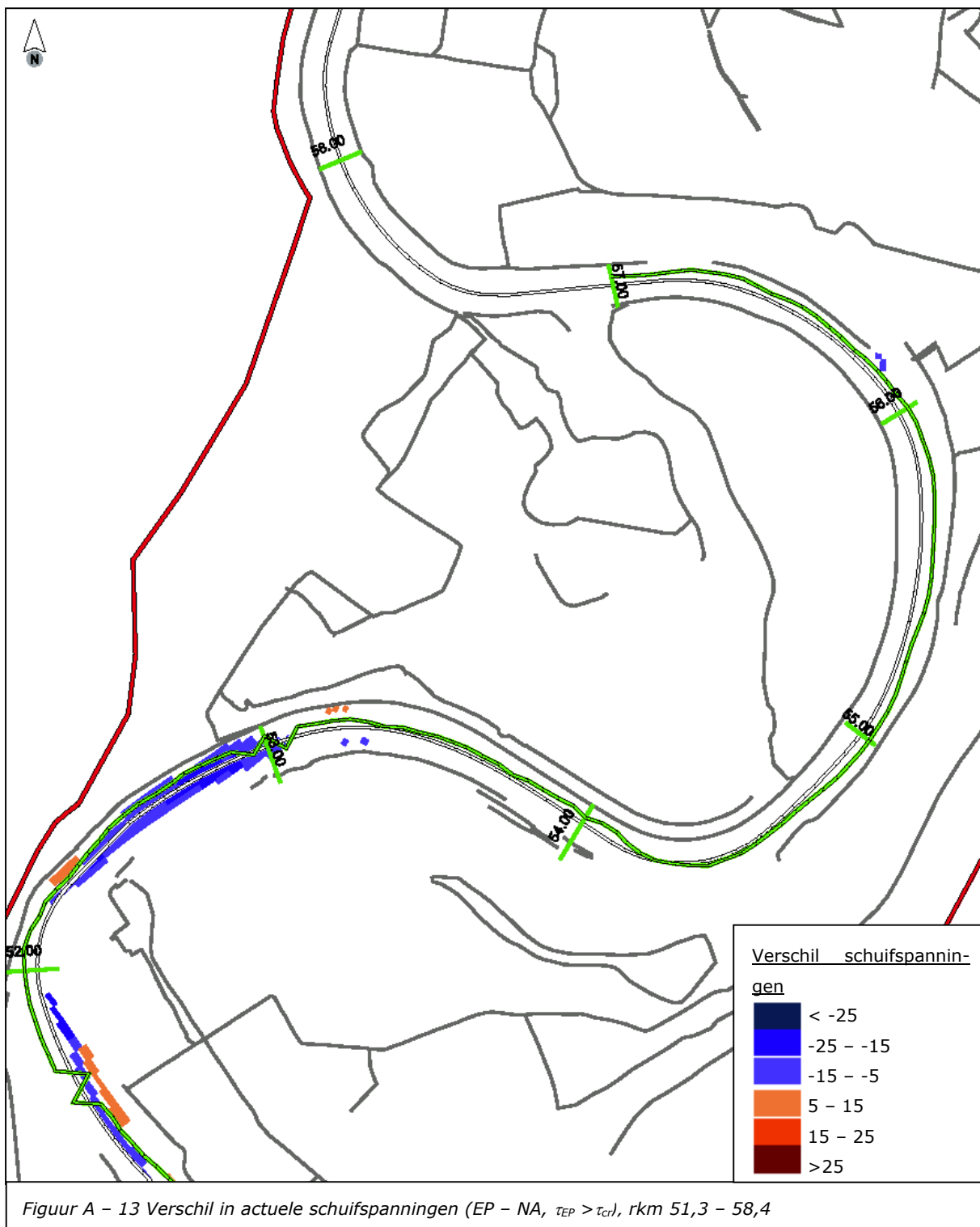




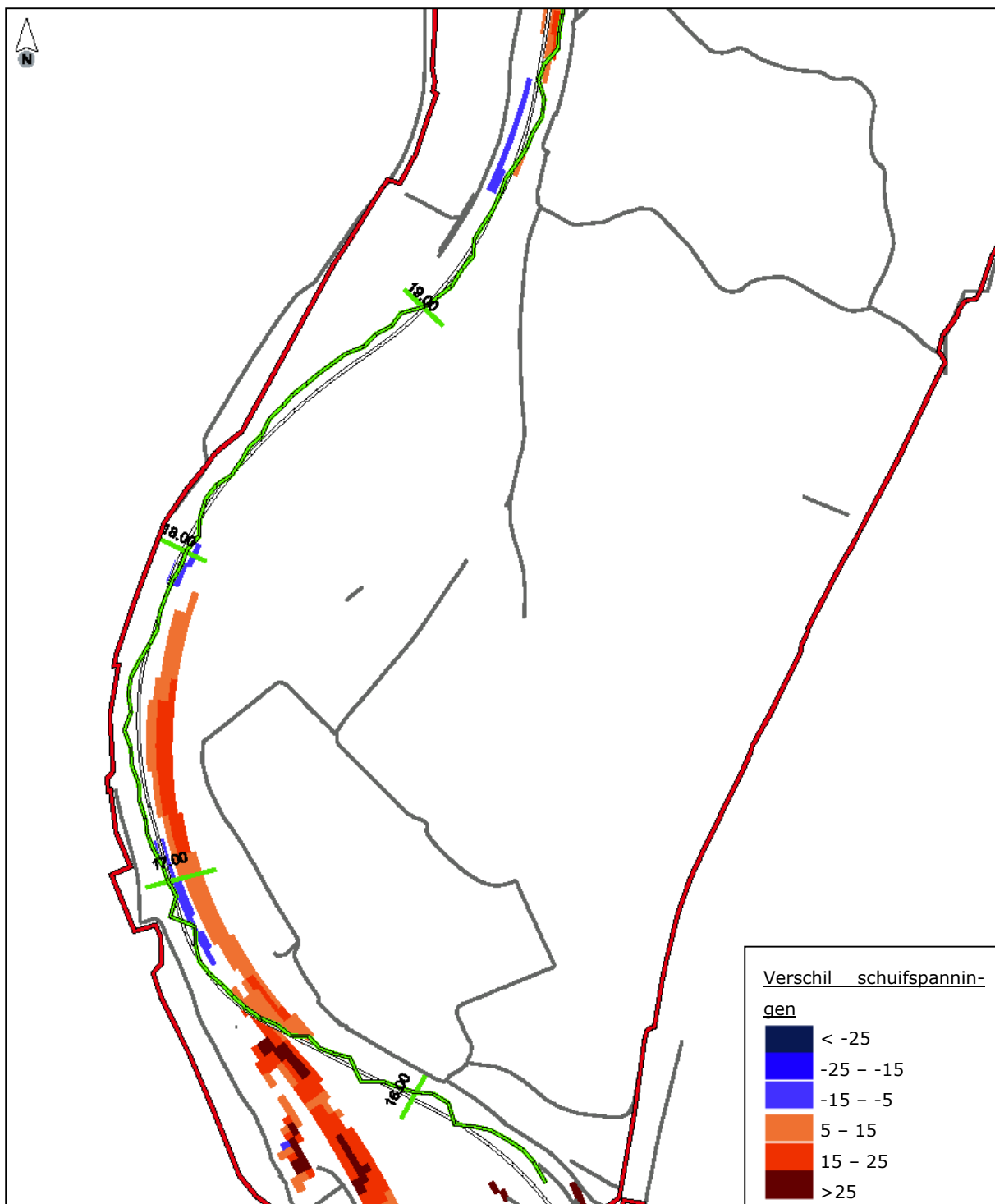




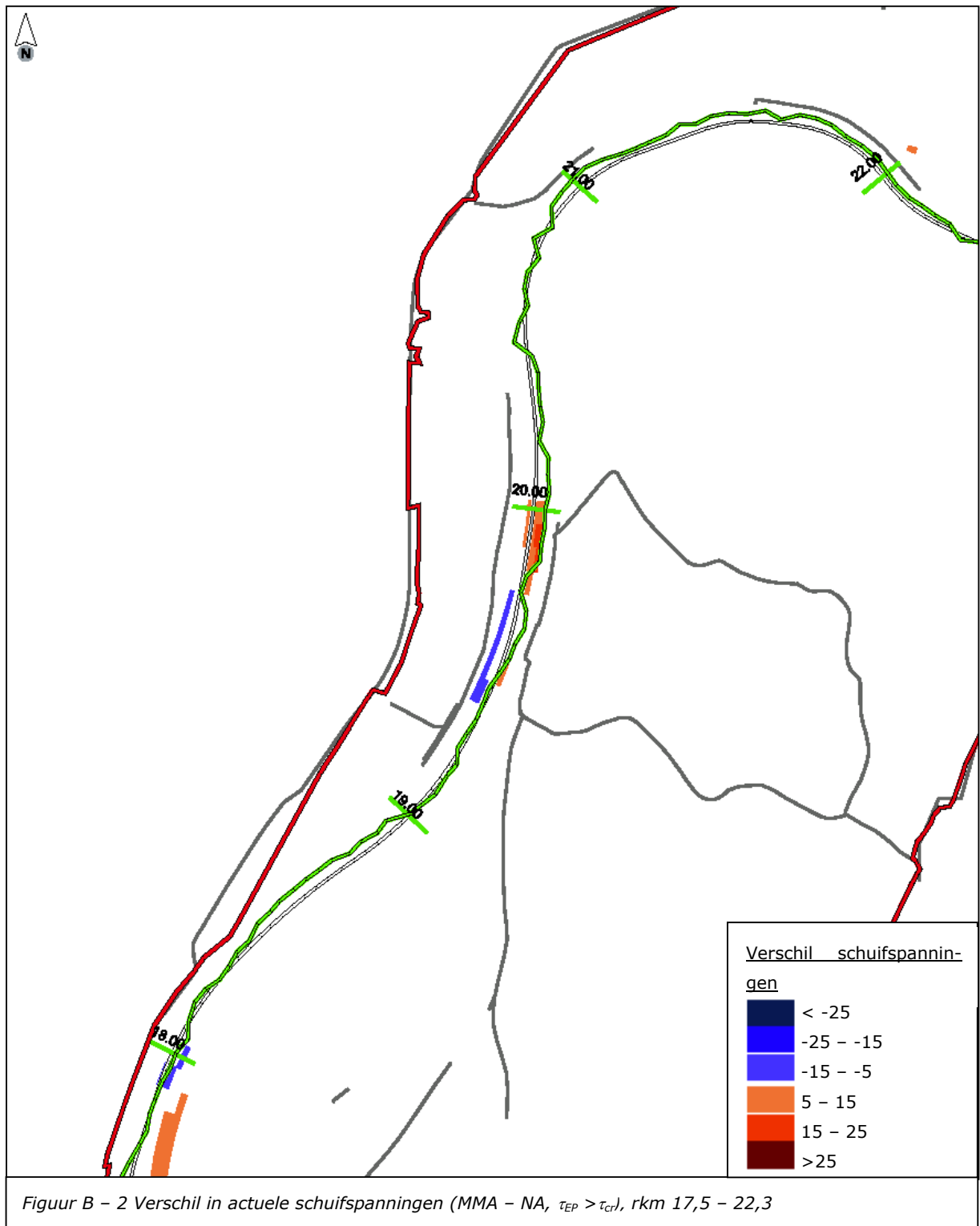


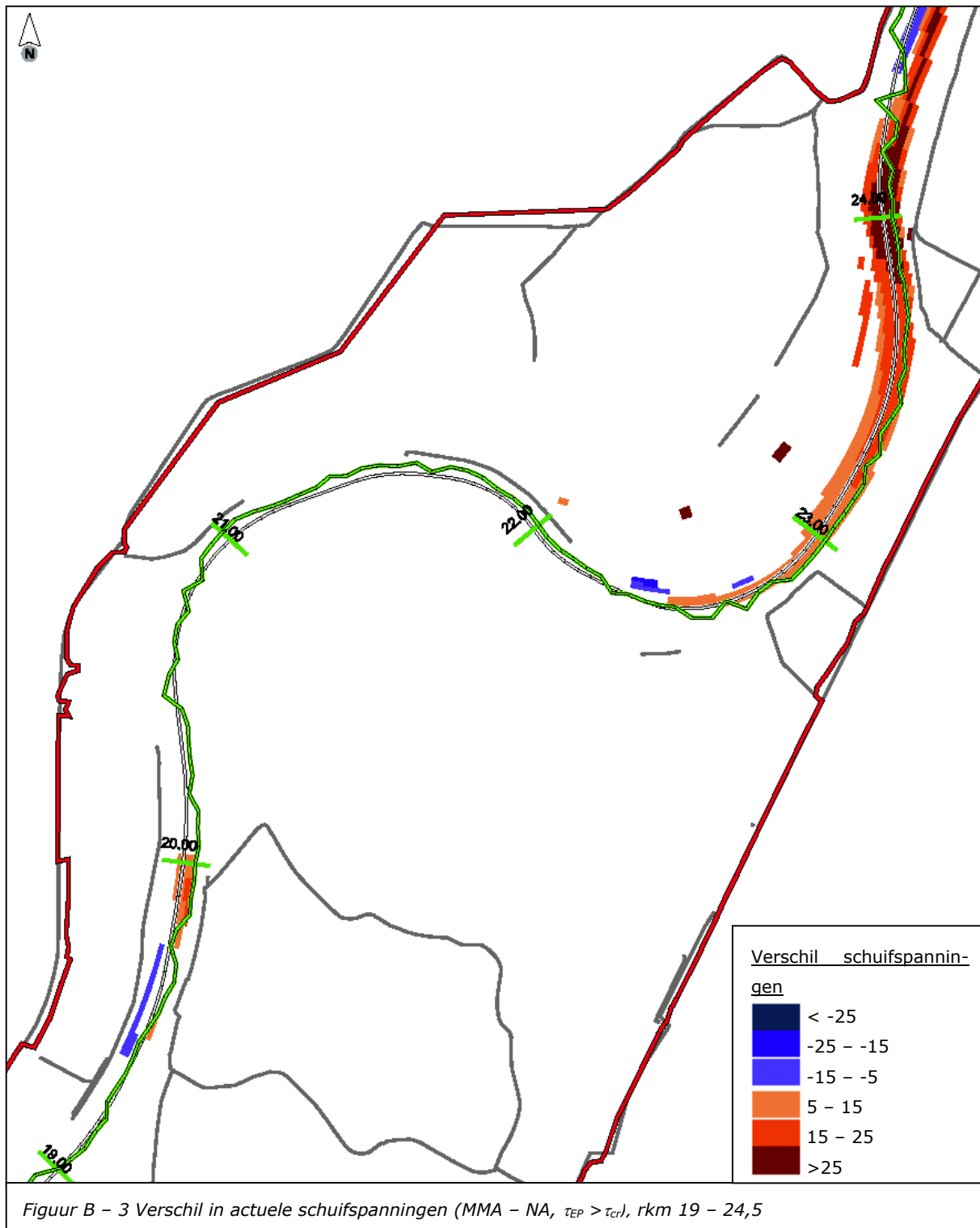


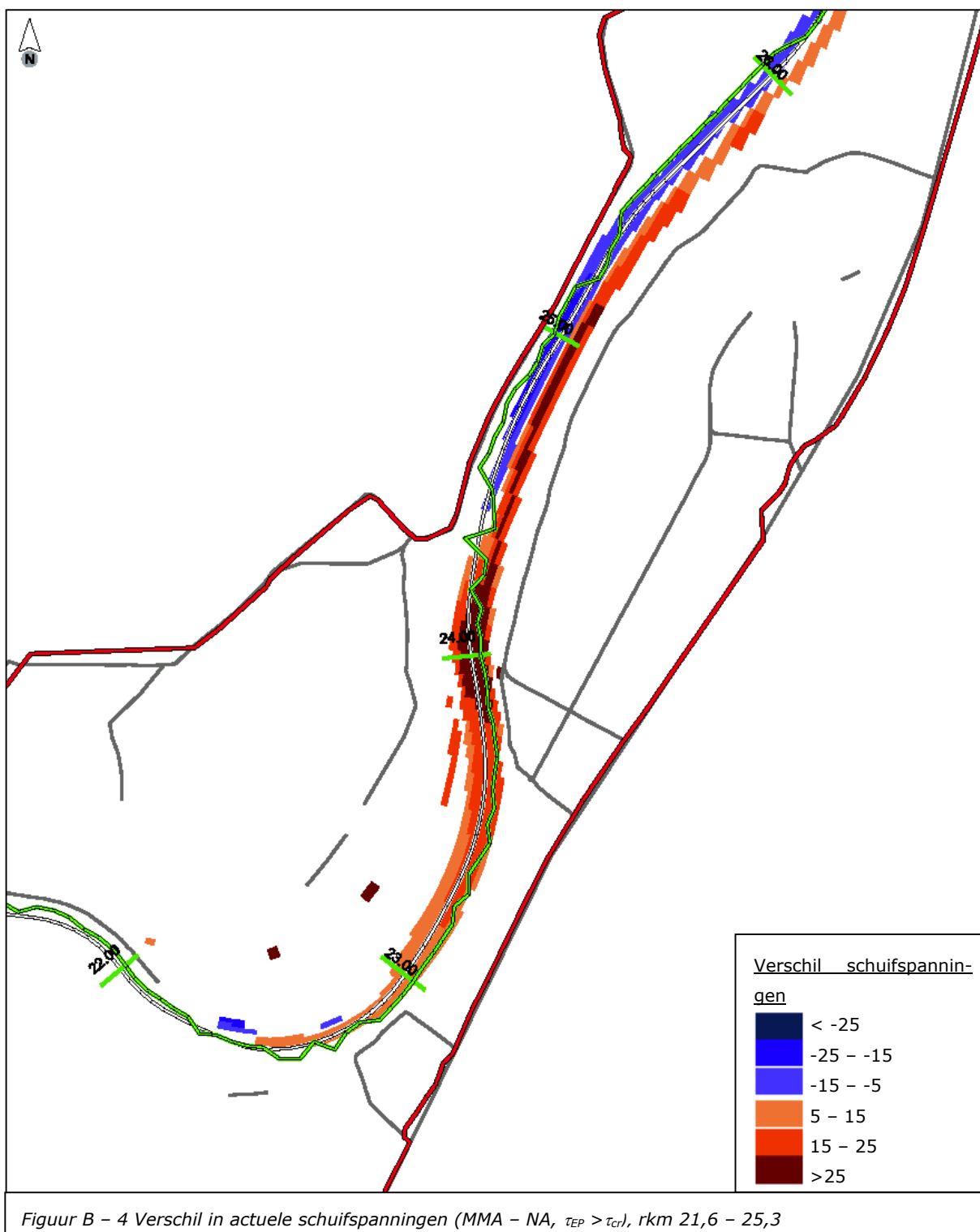
Bijlage B: verandering schuifspanningen MMA ten opzichte van NA (mobiele condities)

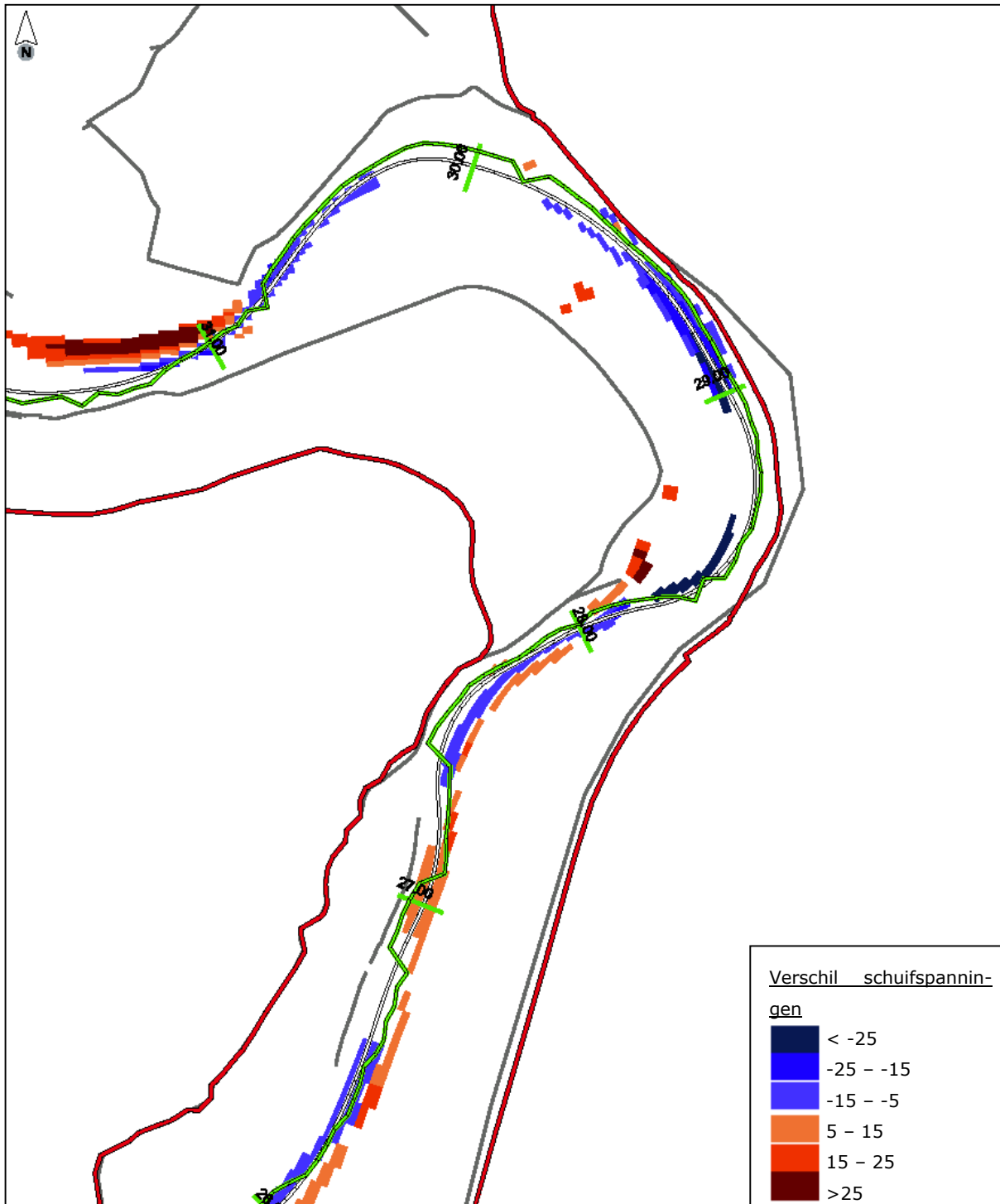


Figuur B - 1 Verskil in actuele schuifspanningen ($MMA - NA$, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 15,5 - 19,9

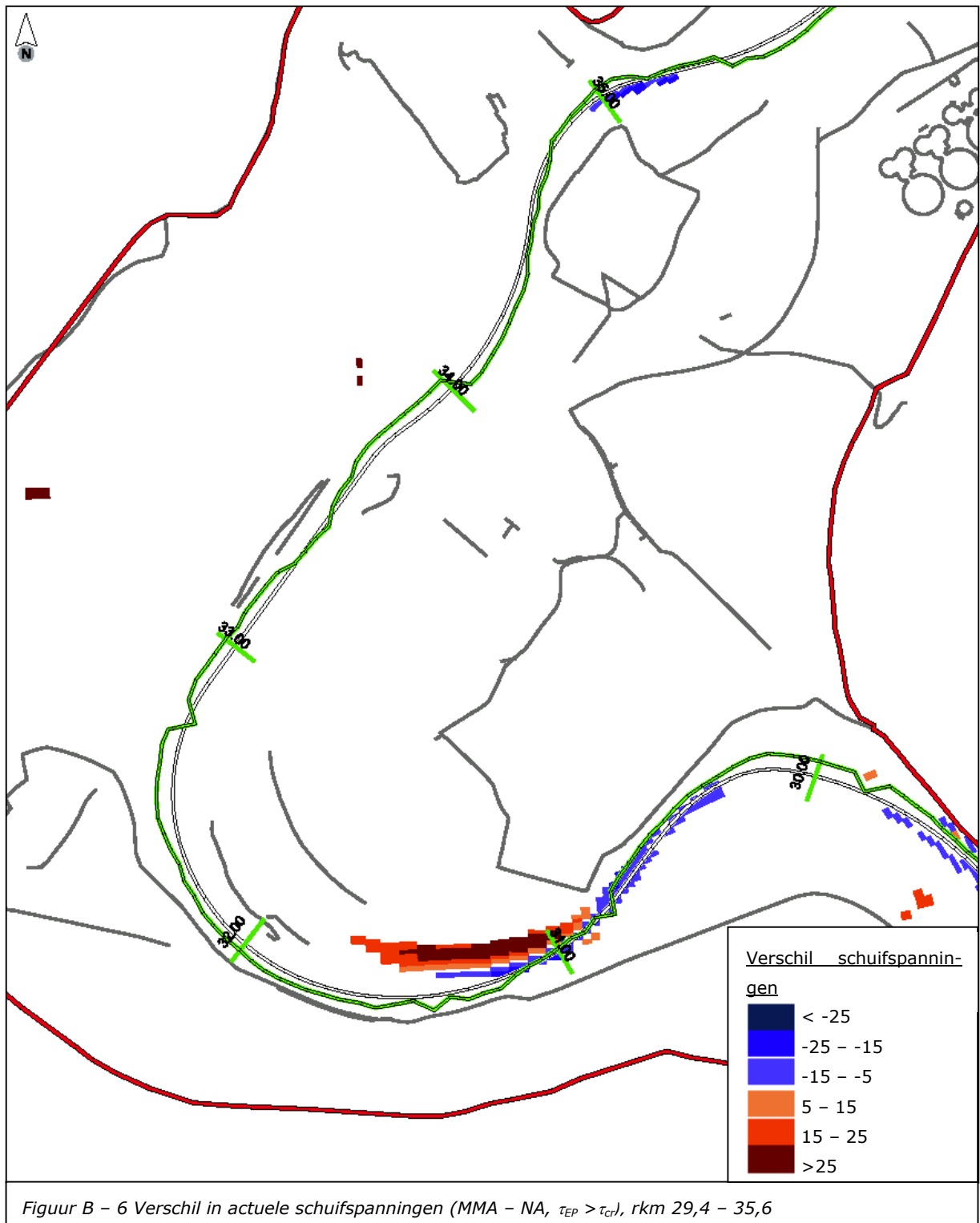


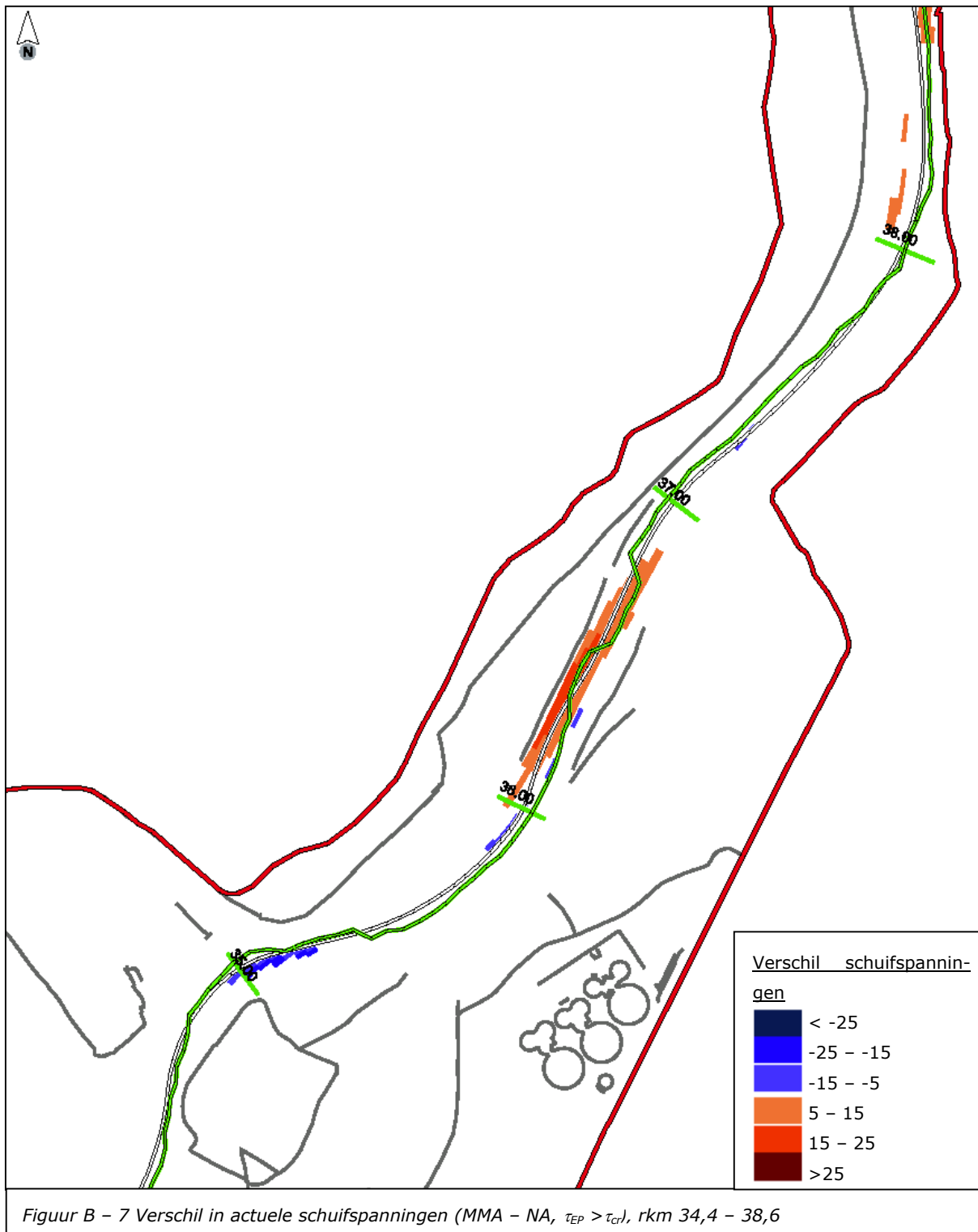


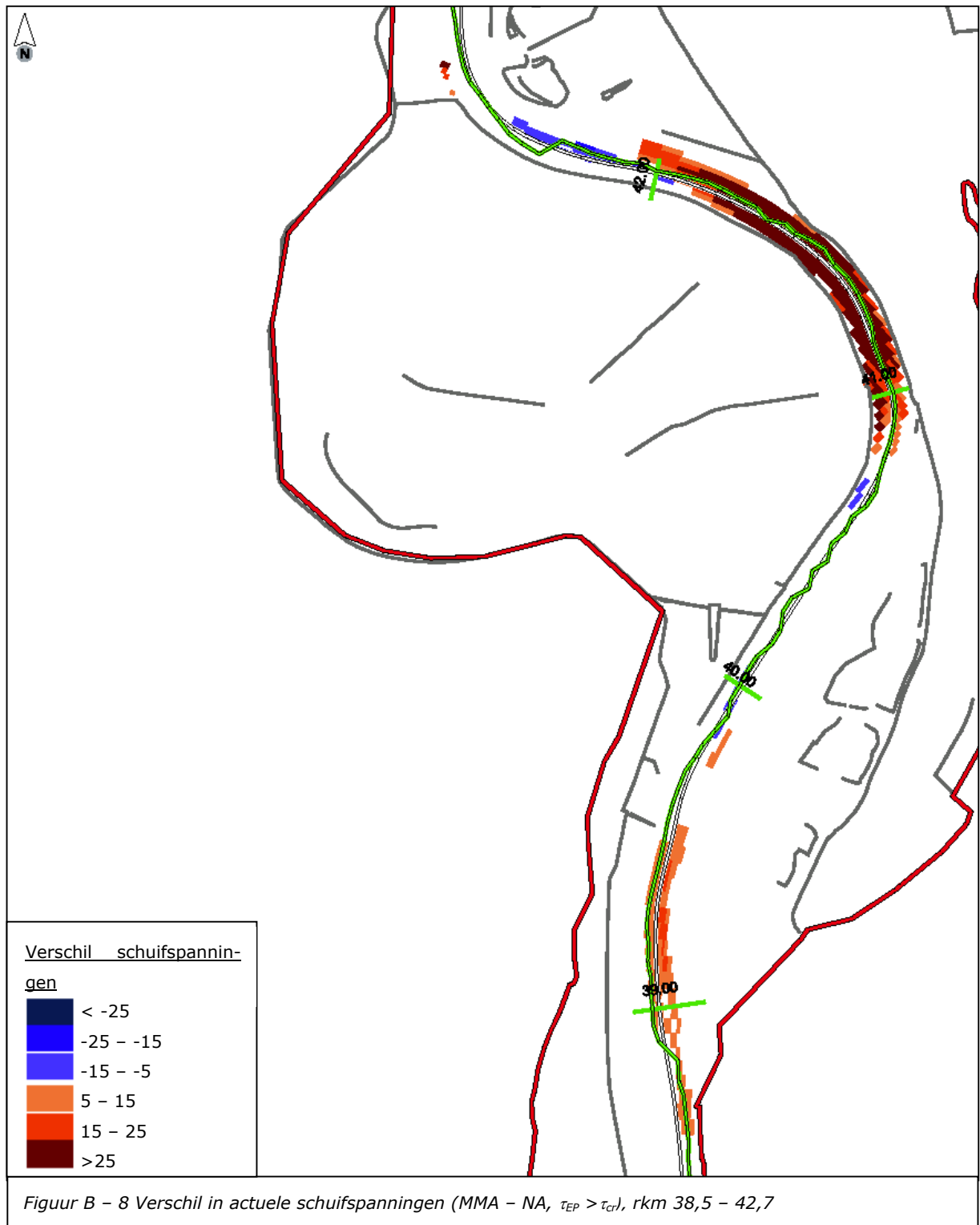


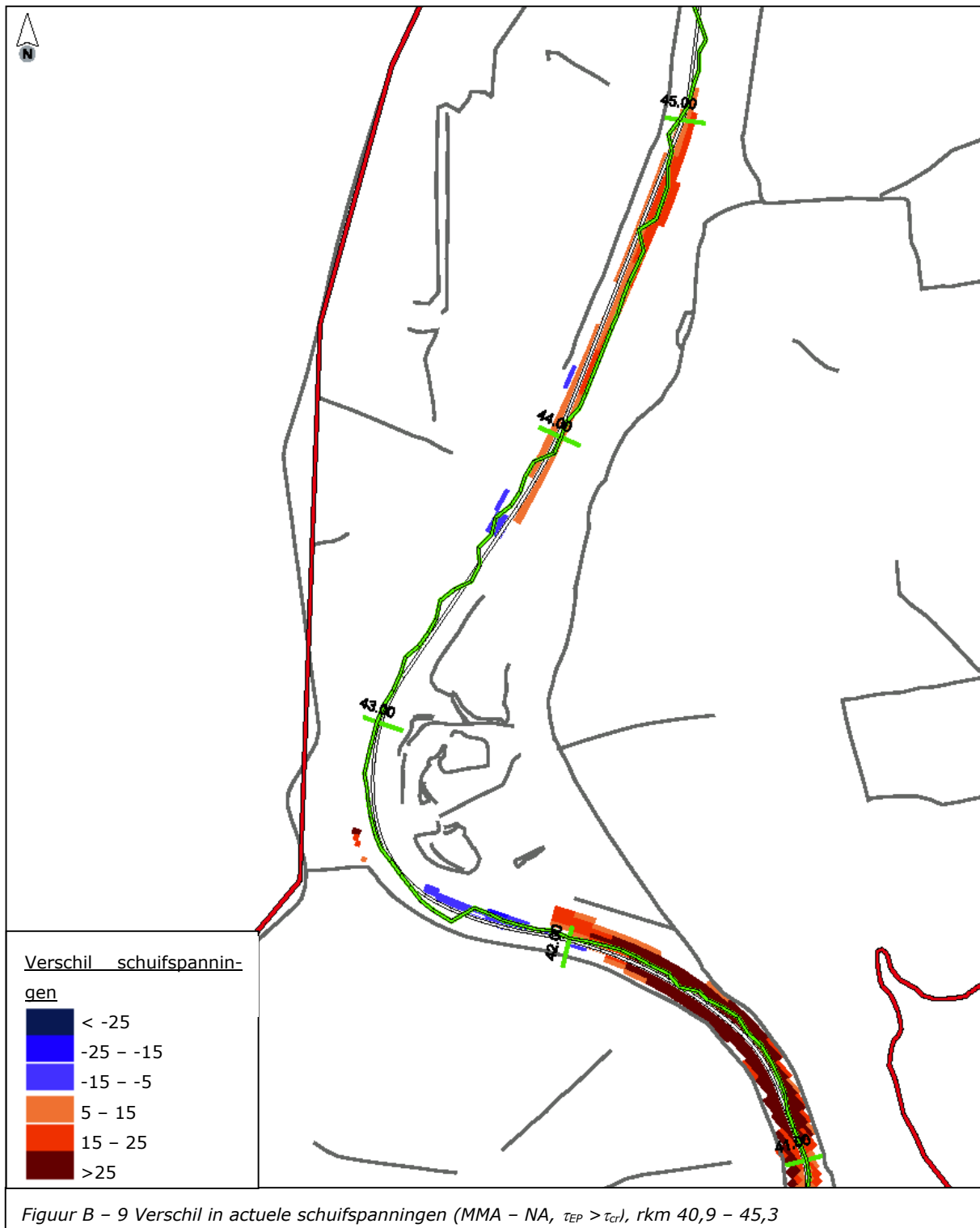


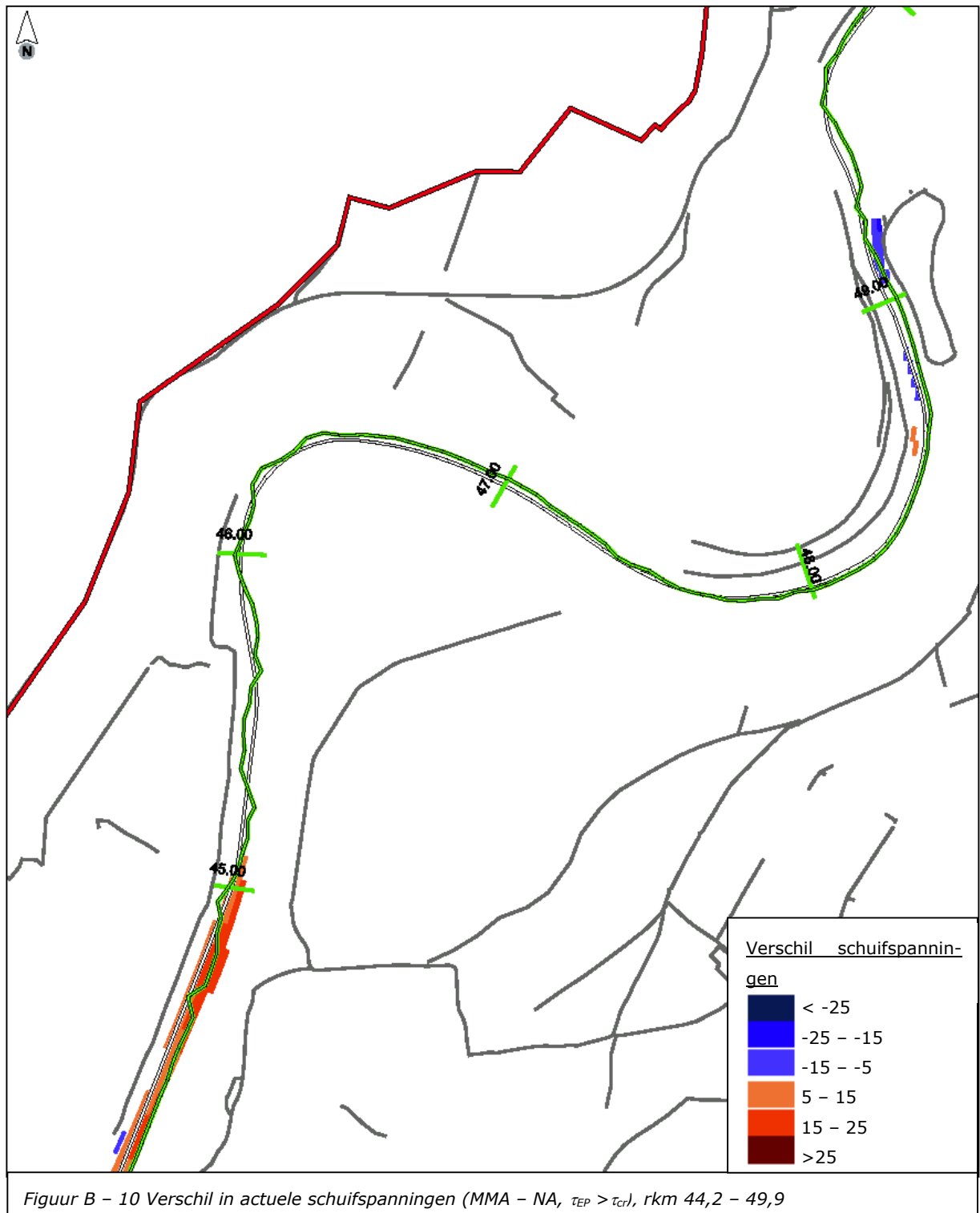
Figuur B – 5 Verschil in actuele schuifspanningen (MMA – NA, $\tau_{EP} > \tau_{Cr}$), rkm 26 – 31,6

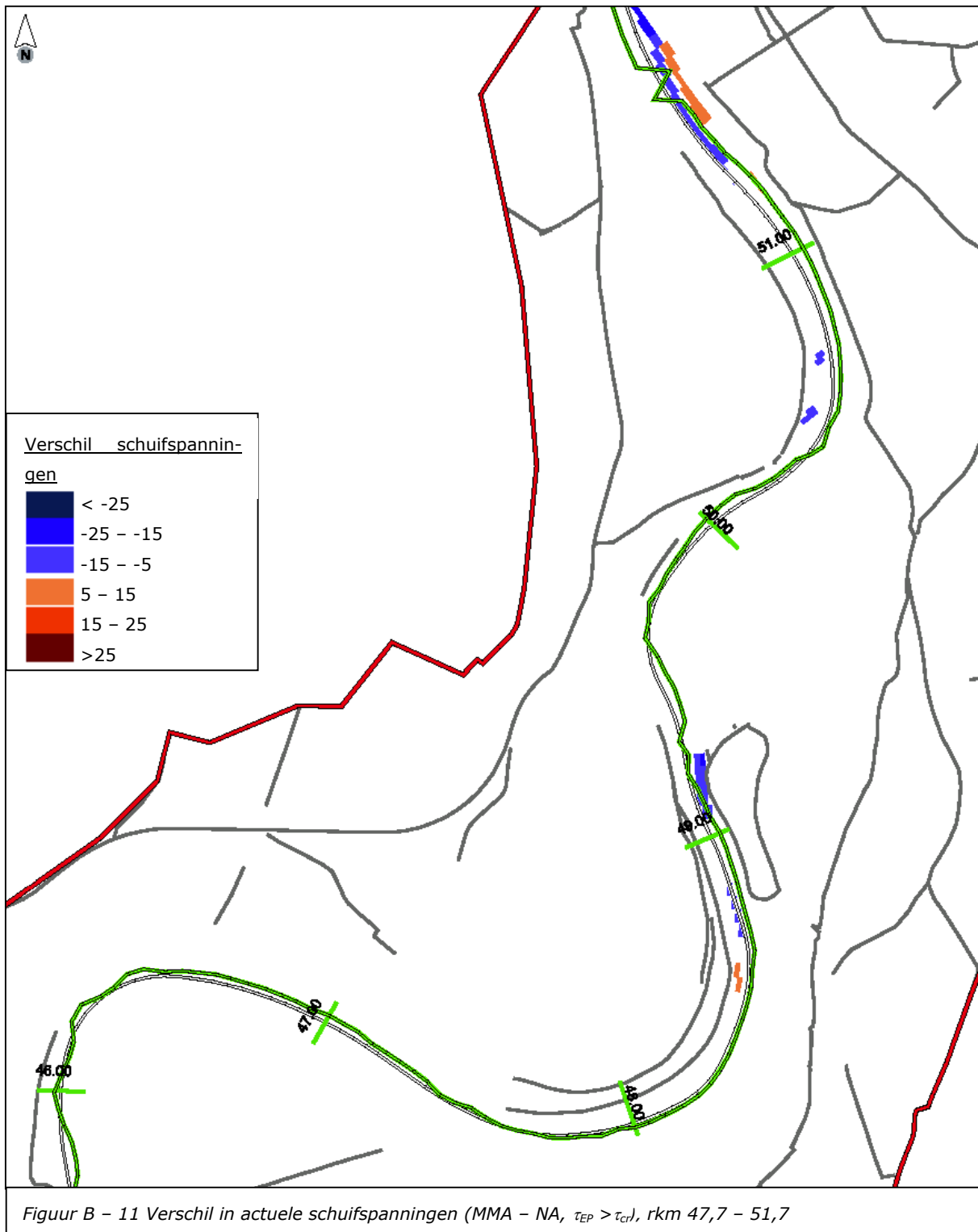


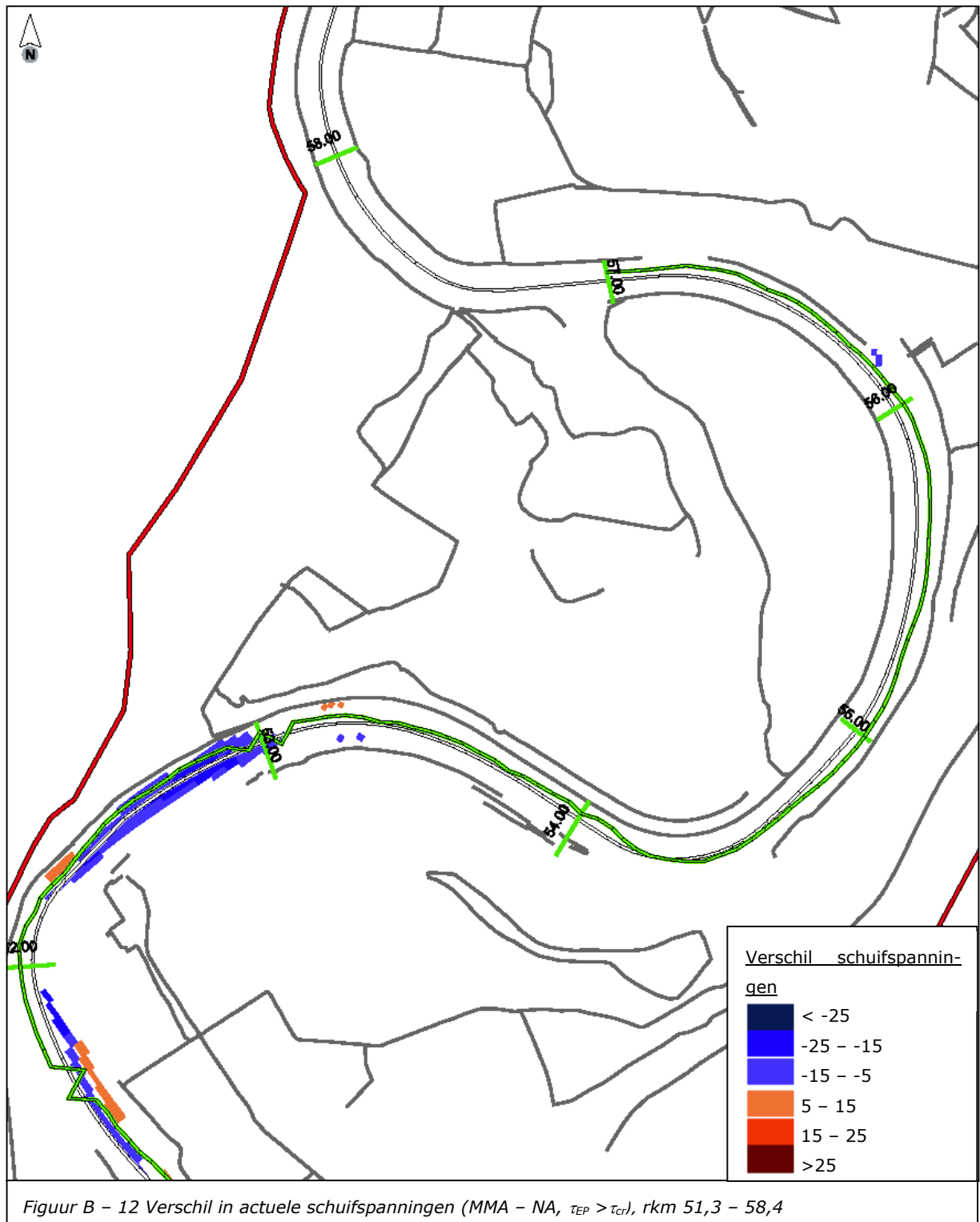




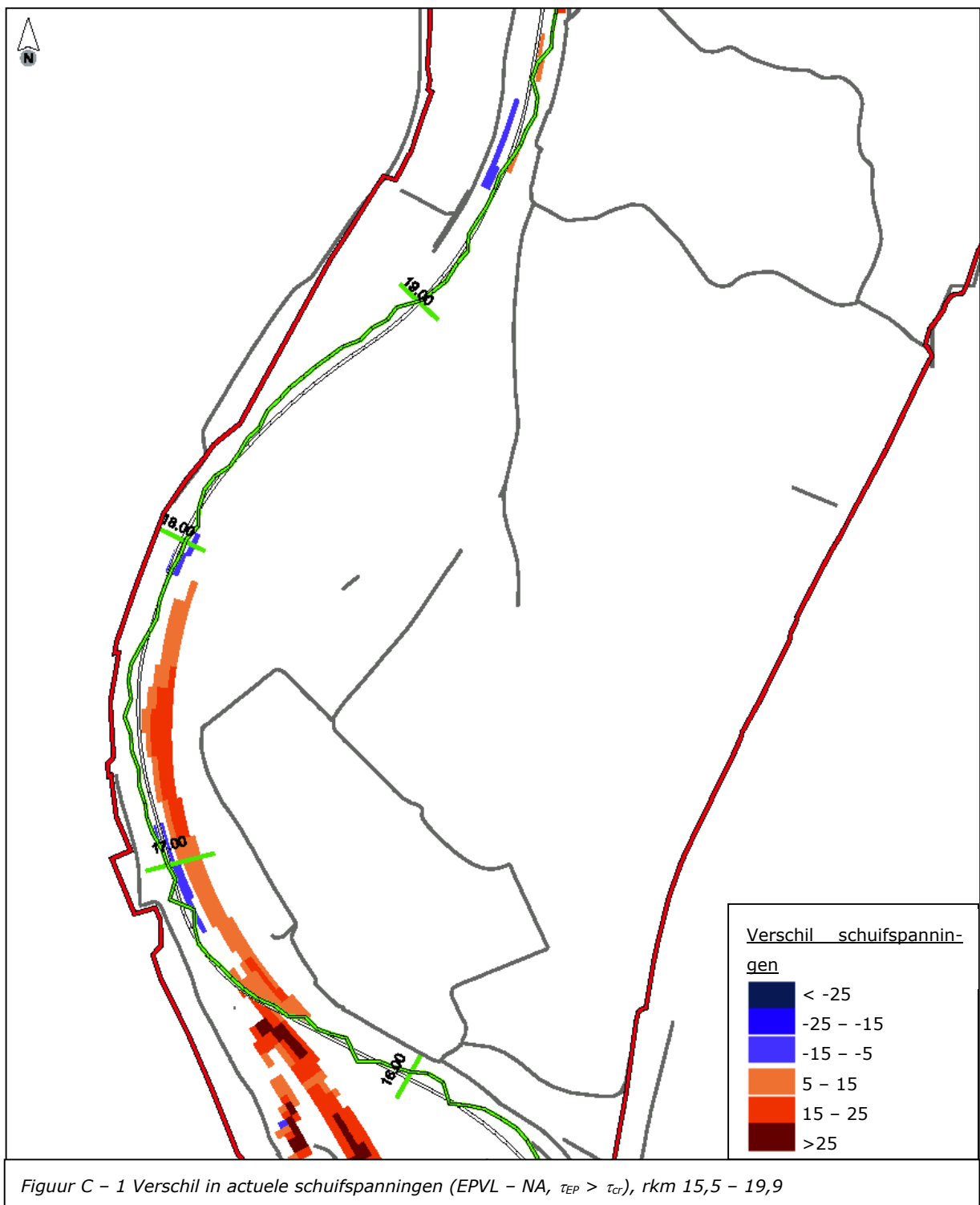


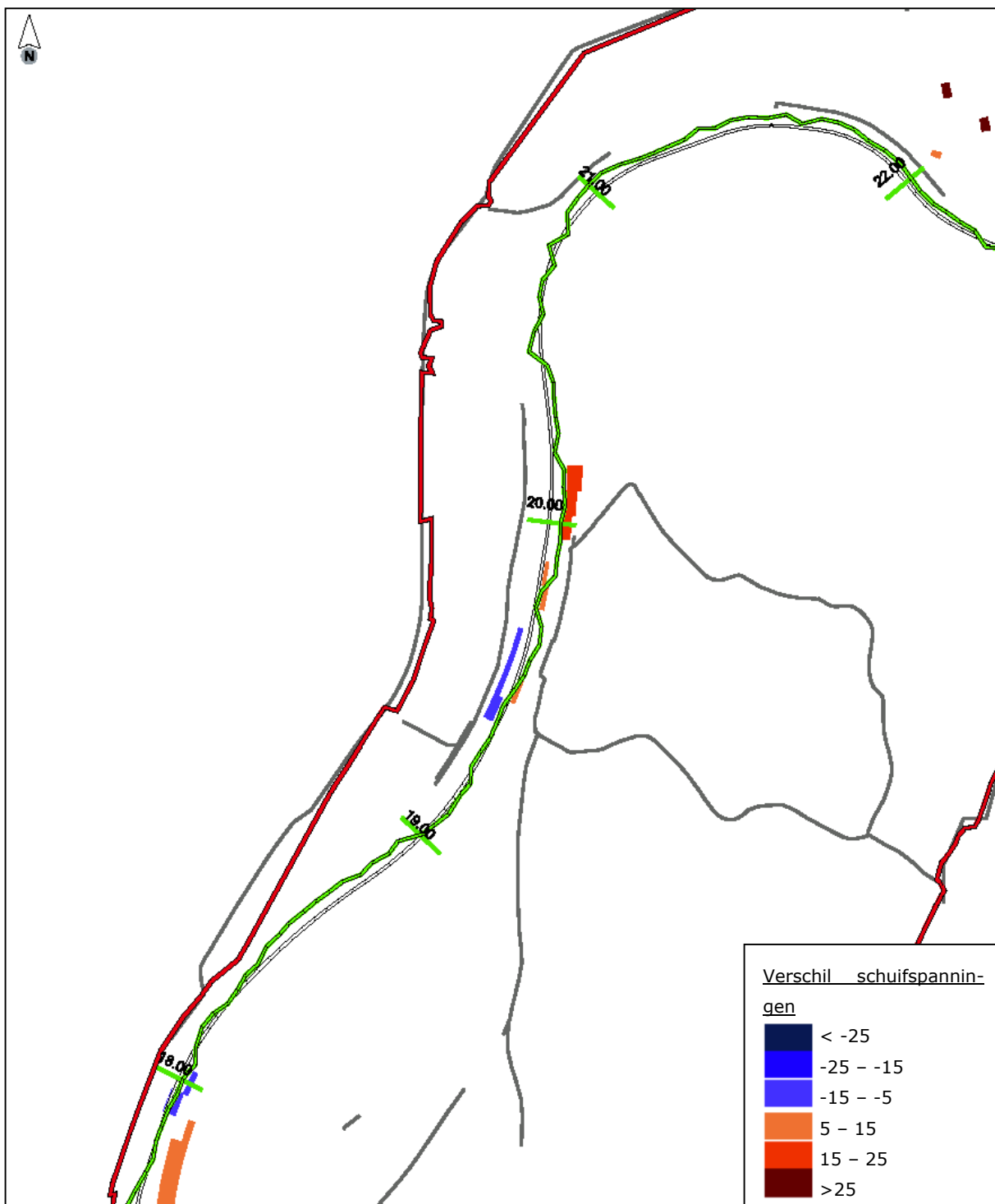




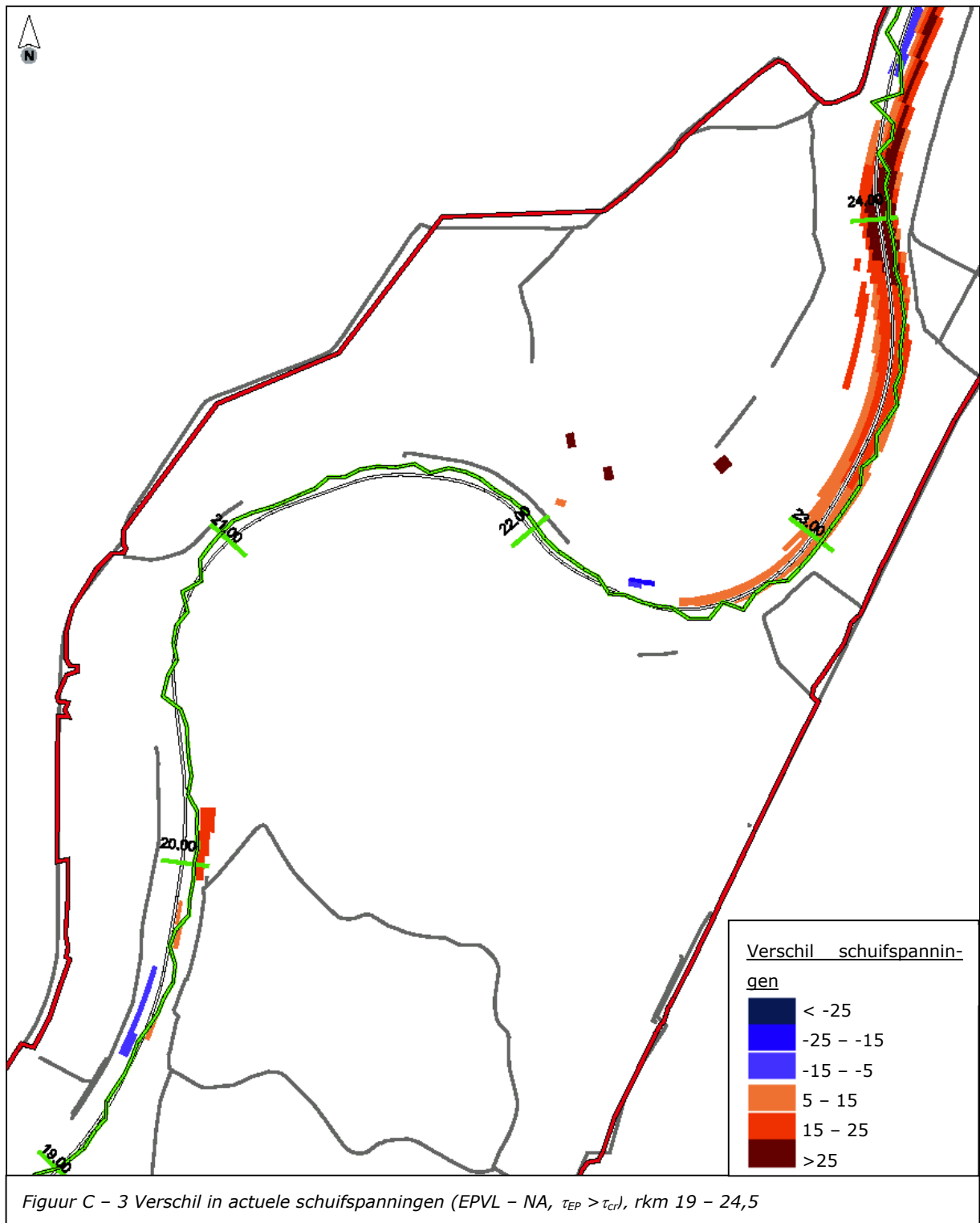


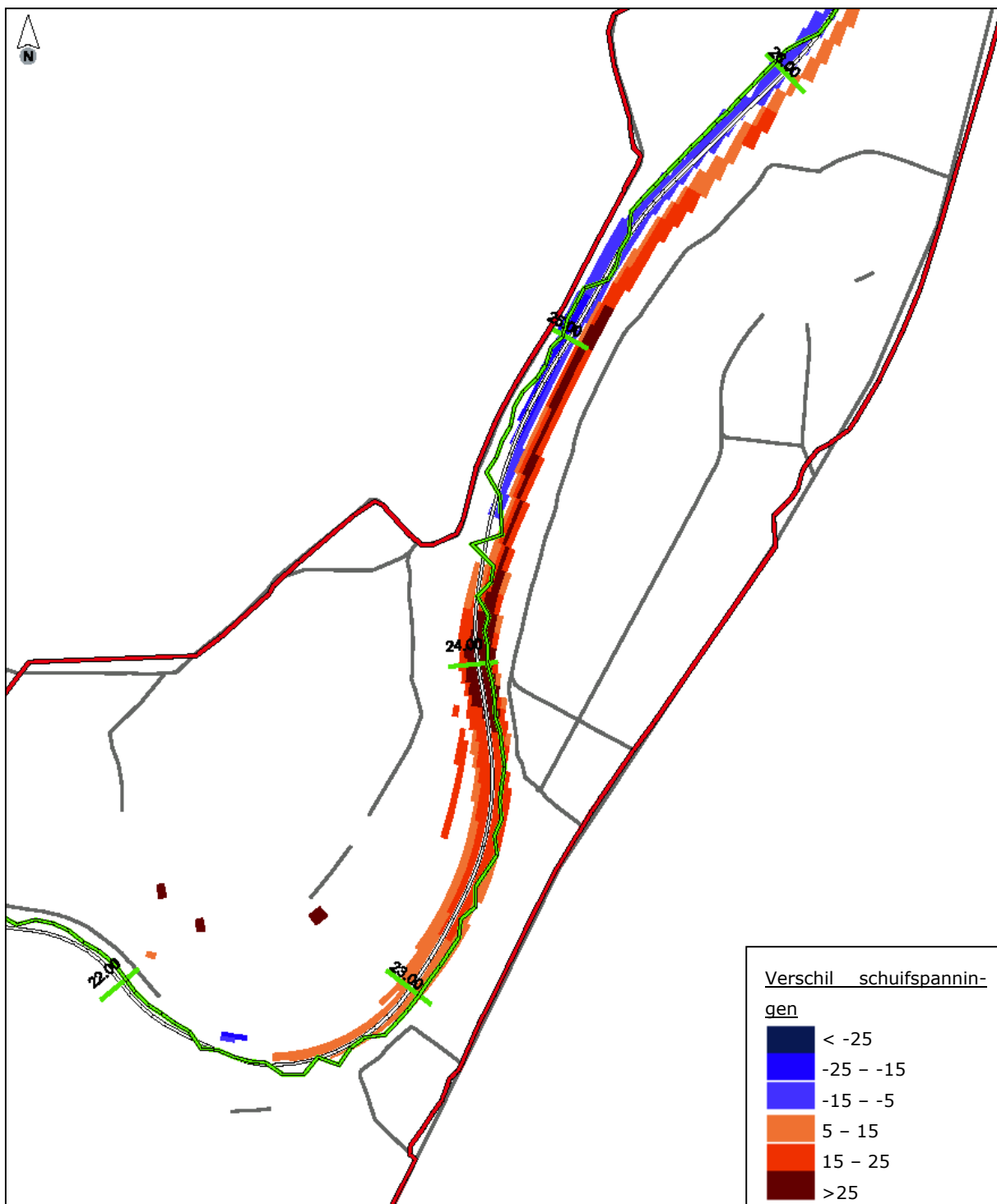
Bijlage C: verandering schuifspanningen EPVL ten opzichte van NA (mobiele condities)



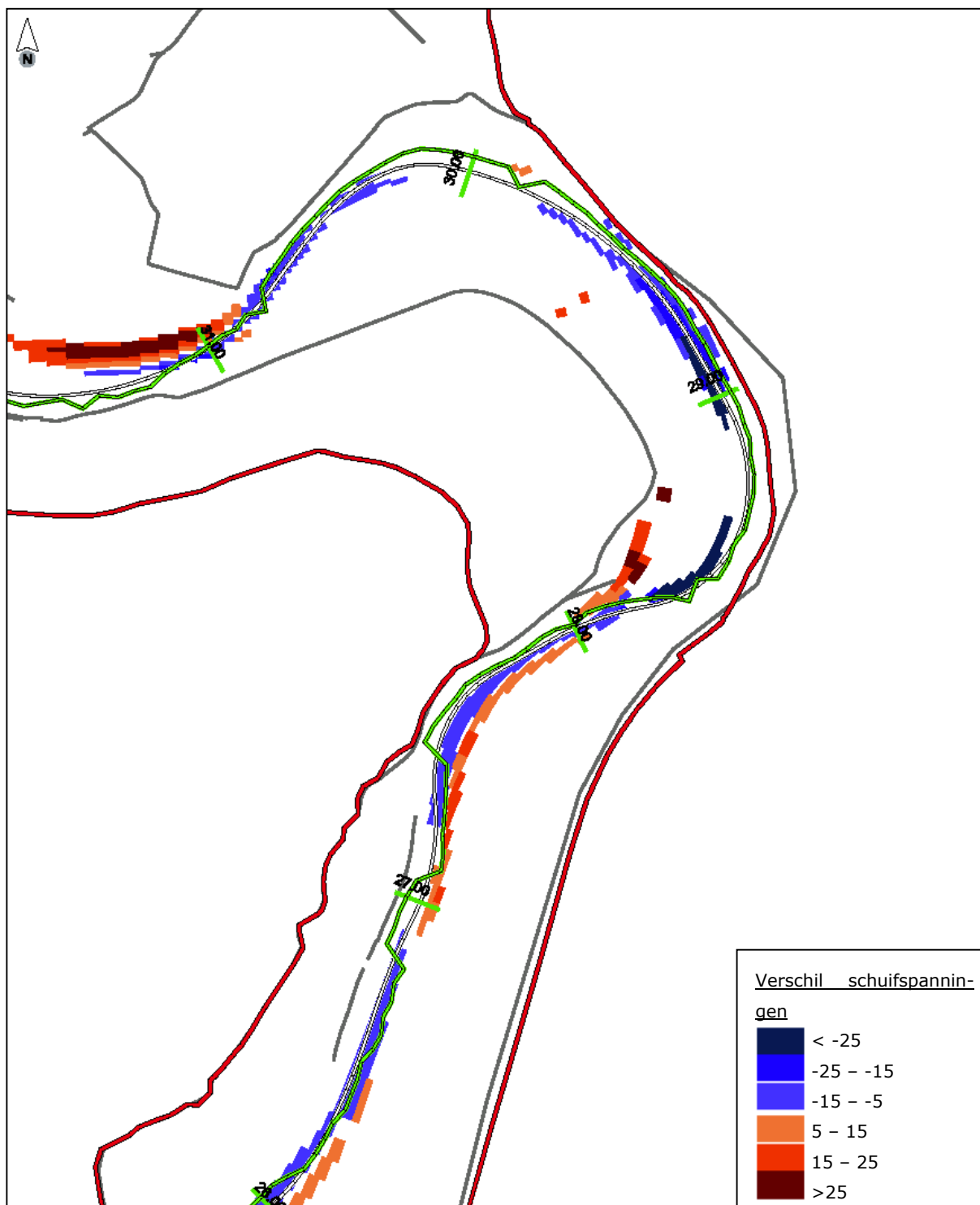


Figuur C - 2 Vershil in actuele schuifspanningen (EPVL - NA, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 17,5 - 22,3

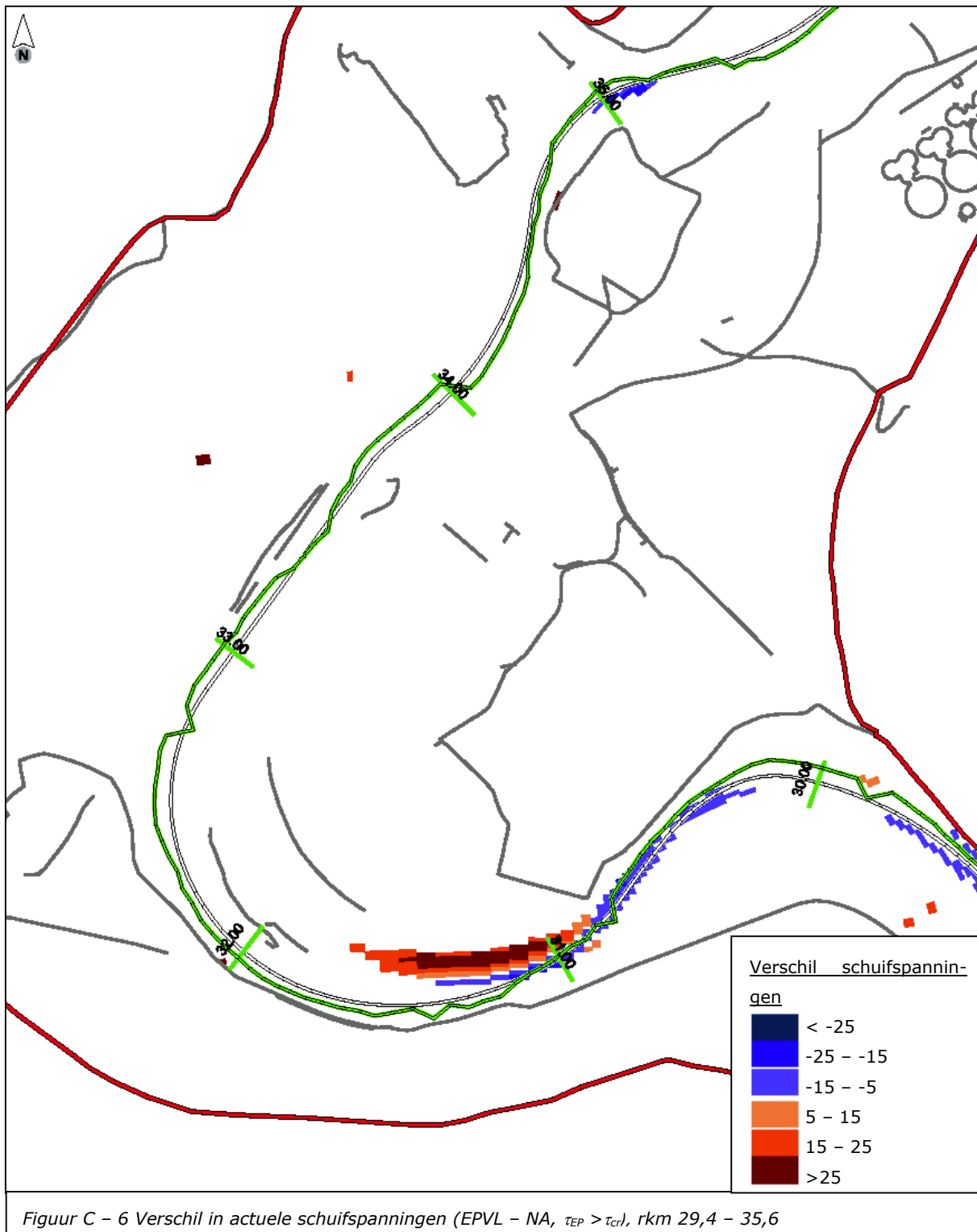


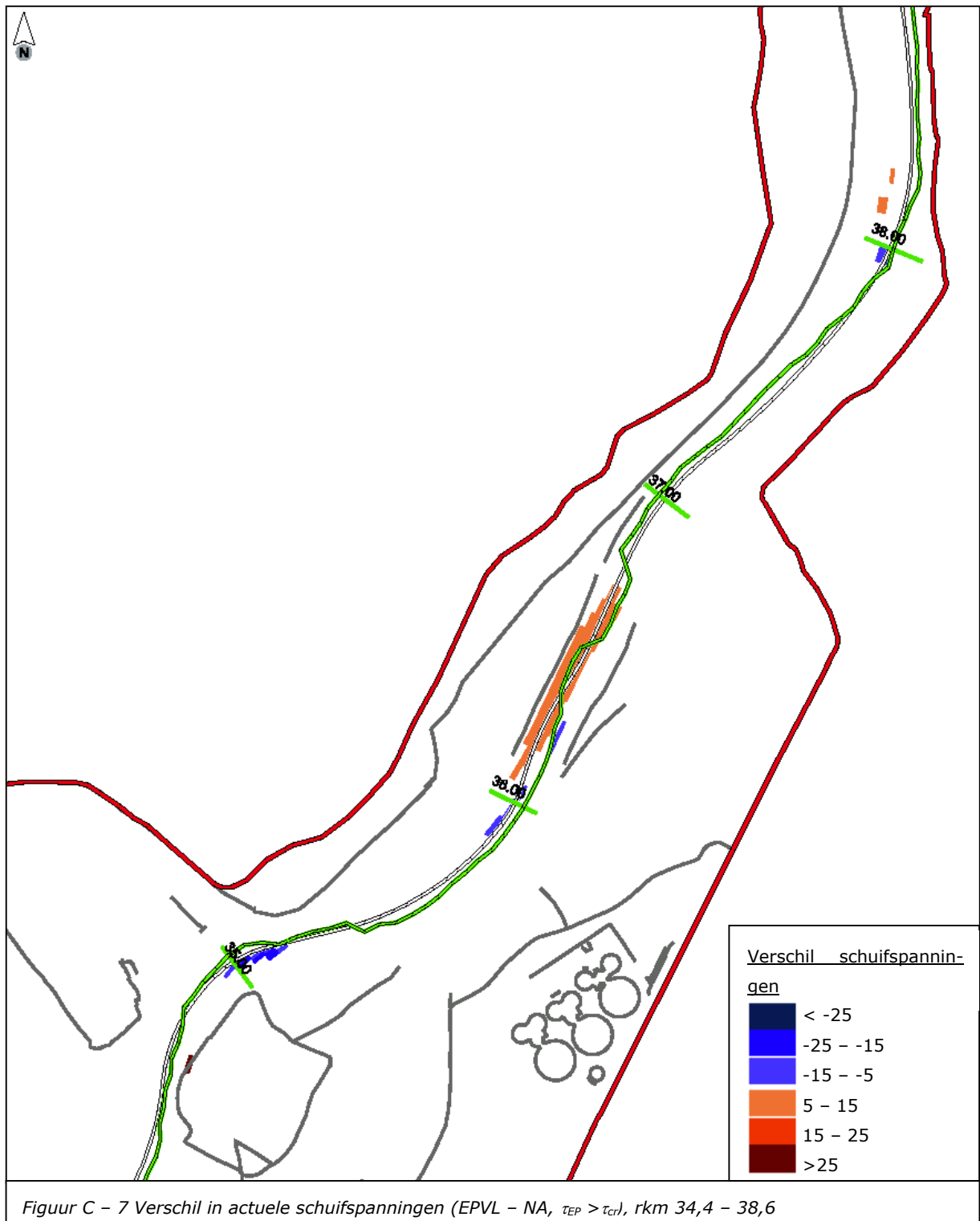


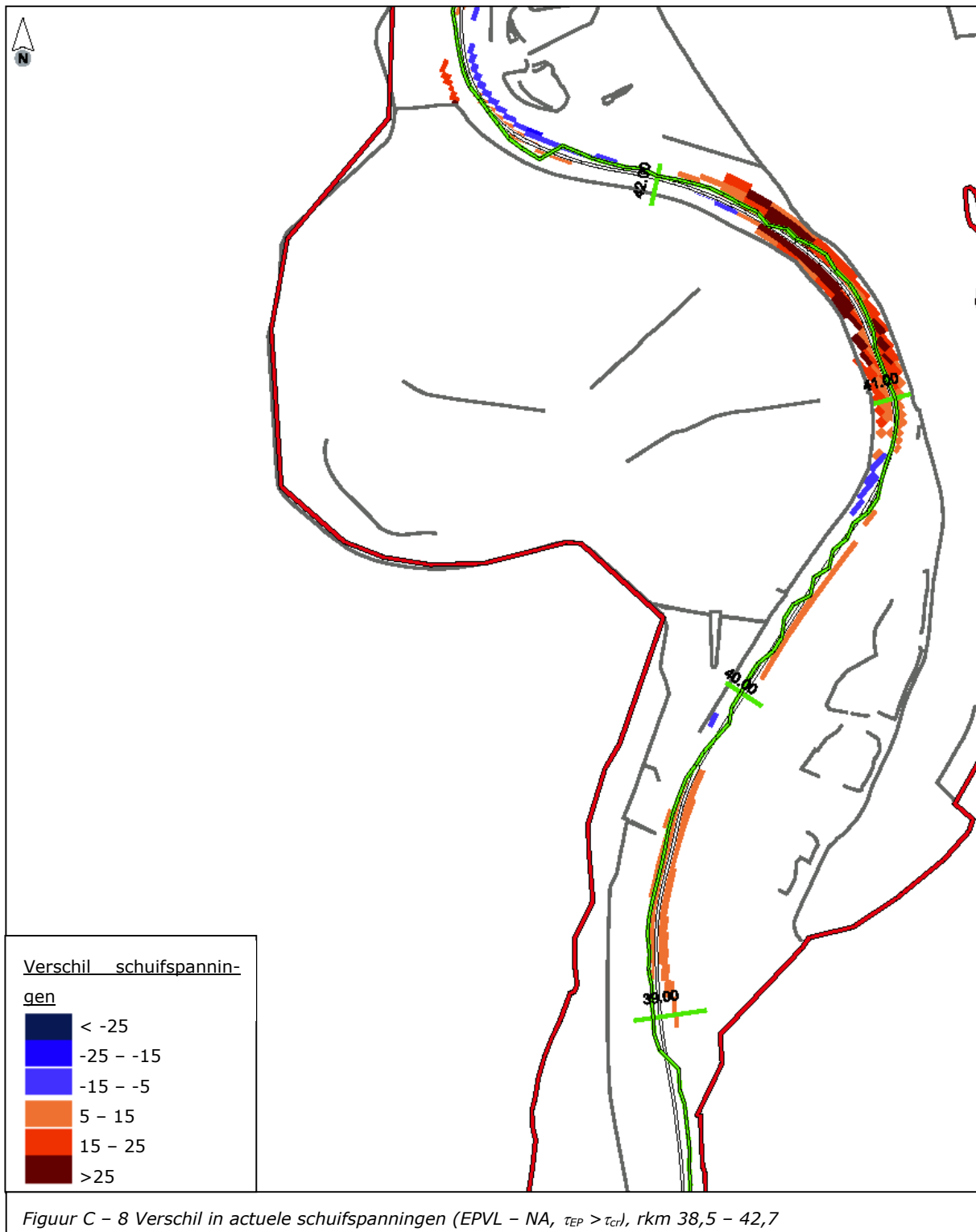
Figuur C - 4 Verschil in actuele schuifspanningen (EPVL - NA, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 21,6 - 25,3

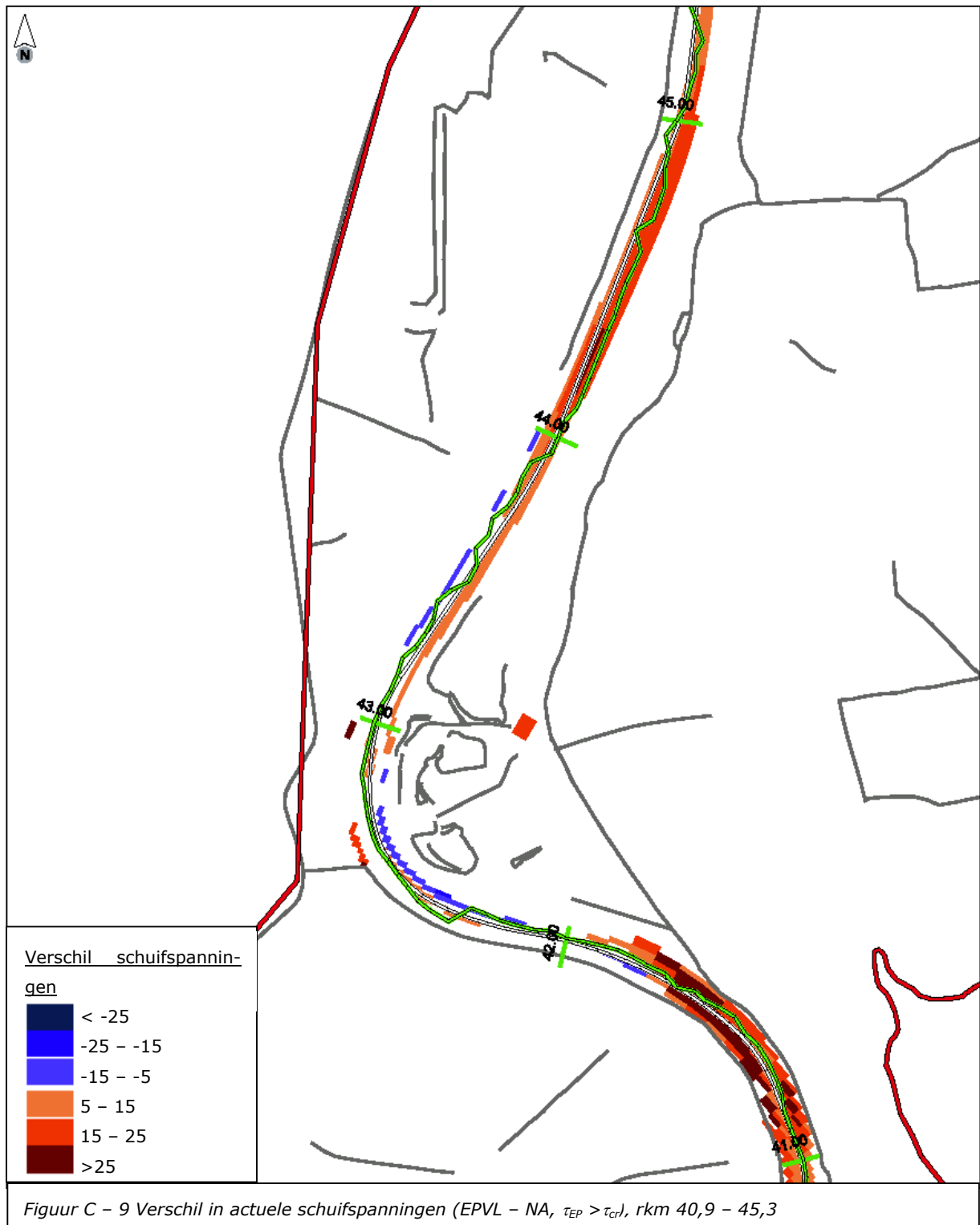


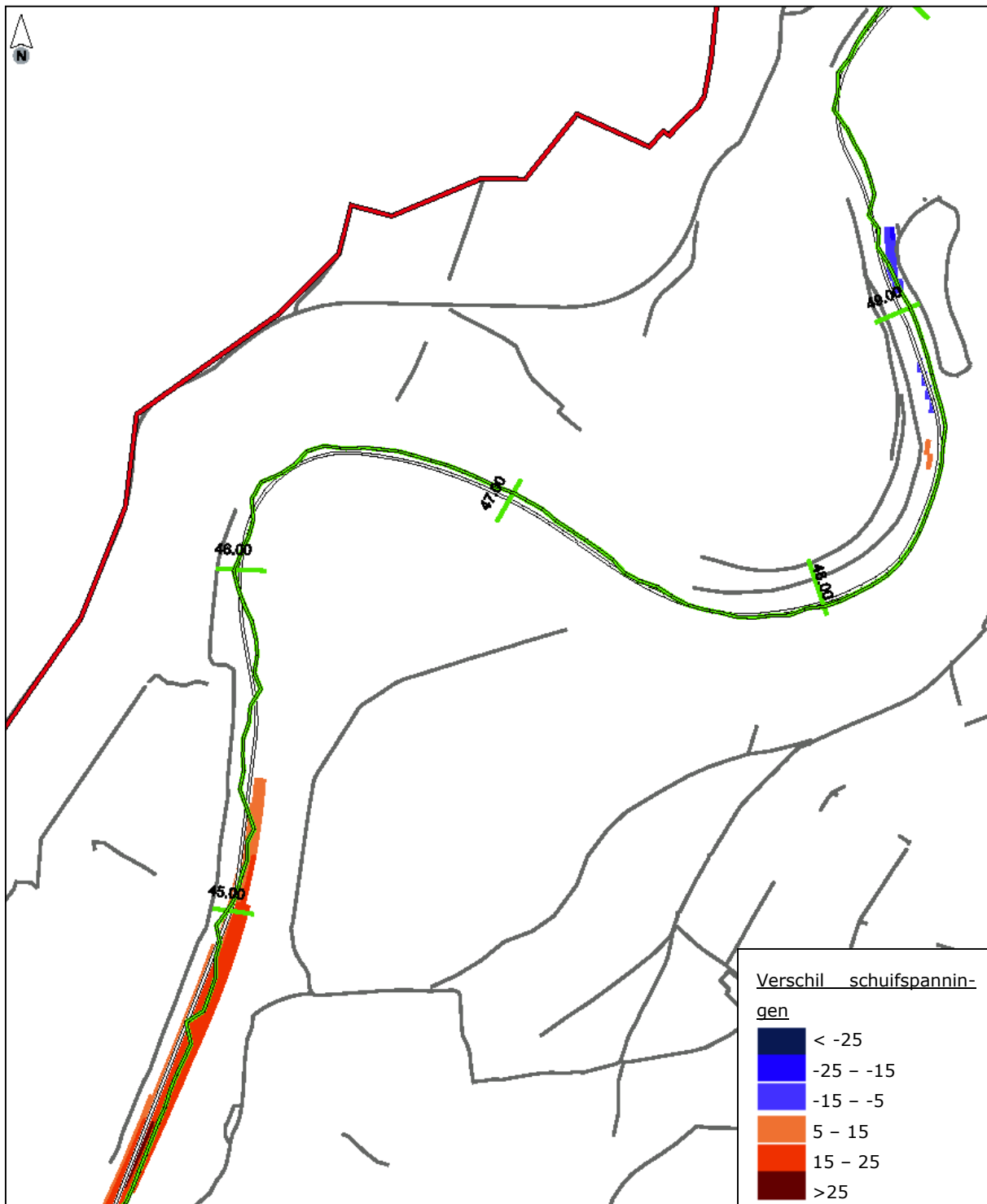
Figuur C - 5 Vershil in actuele schuifspanningen (EPVL - NA, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 26 - 31,6











Figuur C - 10 Verschil in actuele schuifspanningen (EPVL - NA, $\tau_{EP} > \tau_{cr}$), rkm 44,2 - 49,9

