

Effecten morfologische ontwikkelingen op functies Rijn en Maas



Blueland Consultancy
Rapport B19.01

Effecten morfologische ontwikkelingen op functies Rijn en Maas

Wilfried ten Brinke

Blueland Consultancy

November 2019

Foto omslag: De Waal tijdens de droge zomer van 2003. De Rijnafvoer bij Lobith was ongeveer 800 m³/s (2300 m³/s is jaargemiddeld) (Fotografie Bert Boekhoven)

Verantwoording

Deze verkenning is uitgevoerd door dr. W. ten Brinke (Blueland), onder begeleiding van drs. M. Boersema en dr. ir. S. Van Vuren (Rijkswaterstaat). Voor een reflectie op de inhoud, en het aandragen van aanvullende bronnen, is gesproken met prof. dr. H. Middelkoop, prof. dr. M. Kleinhans (Universiteit Utrecht), ir. H. Barneveld (HKV) en dr. ir. A. Blom (TU Delft). Ook zijn waardevolle opmerkingen verwerkt van enkele meelezers binnen Rijkswaterstaat (ir. P. Neefjes, dr. S. Quartel, dr. ir. A. Sieben, ir. S. Folkertsma) en van prof. dr. ir. H. De Vriend. BVR heeft een groot aantal van de figuren gemaakt (2,5,6 overgenomen uit Verhaal van de Maas; 7,8,13,20,30,33 + figuren bijlage nieuw voor dit rapport).

November 2019

Samenvatting en aandachtspunten	Blz.
Maas	7
Rijn	9
Rijn-Maasmonding	11
Gedeeld beeld: de cruciale rol van de sedimenthuishouding	13
Inleiding	15
1. Maas	16
1.1. Karakter	16
1.2. Het Maassysteem als geheel	19
1.2.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
1.2.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
1.2.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
1.3. Specifieke ontwikkelingen per traject	30
1.3.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
1.3.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
1.3.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
1.4. Doorkijk langere termijn	34
2. Rijn	36
2.1. Karakter	36
2.2. Het Rijnsysteem als geheel	40
2.2.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
2.2.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
2.2.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
2.3. Bovenrijn en Waal	53
2.3.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
2.3.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
2.3.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
2.4. Pannerdensch Kanaal	60
2.4.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
2.4.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
2.4.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
2.5. Nederrijn-Lek	61
2.5.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
2.5.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
2.5.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
2.6. IJssel	63
2.6.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
2.6.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
2.6.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
2.7. Doorkijk langere termijn	66

3. Rijn-Maasmonding	68
3.1. Karakter	68
3.2. Noordelijke takken	69
3.2.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
3.2.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
3.2.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
3.3. Zuidelijke takken	72
3.3.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
3.3.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
3.3.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
3.4. Verbindende takken	72
3.4.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen	
3.4.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen	
3.4.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed	
3.5. Doorkijk langere termijn	75
Referenties	77
Bijlage	80

Samenvatting en aandachtspunten

Maas

Morfologische ontwikkelingen

Grootschalig

De morfodynamiek van de Maas is sinds de aanleg van de stuwen sterk verminderd. De dynamiek is minder dan die van de vrij-afstromende Rijntakken. Ook de Grensmaas, het meest natuurlijke (ongestuwde) deel van de Maas in Nederland, is weinig dynamisch. Morfodynamiek vindt op de Maas vooral plaats tijdens hoogwater.

De afgelopen honderd jaar is de ligging van het rivierbed van de Maas ingrijpend veranderd. Zand- en grindwinning, en normalisaties waarbij de rivier een smallere en rechttere loop heeft gekregen, hebben geleid tot een aanzienlijk lagere ligging van het zomerbed. Gemiddeld is het zomerbed van de Maas over de afgelopen eeuw 1 tot 3 meter gezakt. De erosie van het zomerbed gaat nog steeds door (tabel S1).

Tabel S1. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling per Maastraject in cm/jaar. De gemiddelde daling van het zomerbed voor de maximale tijdspanne is het gemiddelde sinds de eerste bodempeiling. De gemiddelde daling voor de autonome ontwikkeling is het gemiddelde over de periode waarin geen baggerwerkzaamheden hebben plaatsgevonden. De rechterkolom is de daling in de periode 1995-2007 (Bron: [43]).

Traject	Maximale tijdspanne		Autonome ontwikkeling		Recente ontwikkeling	
	Periode	Gemiddeld (- = erosie)	Periode	Gemiddeld (- = erosie)	Periode	Gemiddeld (- = erosie)
Bovenmaas (km 2-15,4)	1995 – 2007	0	1995 – 2007	0	1995 – 2007	0
Grensmaas (km 15,4-56) ¹⁾	1921 – 2007	-3,2	1970 – 2007	-1,5	1995 – 2007	-3,3
Plassenmaas (km 56-87) ²⁾	1916 - 2007	-2,5	1940 – 2007	-1	1995 – 2007	-2,8
Zandmaas deel Peelhorst (km 87-121)	1916 - 2007	-1	1940 – 2007	-0,7	1995 – 2007	-2,5
Zandmaas deel Venloslenk (km 121-155)	1916 - 2007	-1,2	1942 – 2007	-0,6	1995 – 2007	-2,5
Bedijkte (Beneden) Maas (km 155-200,8) ³⁾	1937 - 2007	-1,9	1942 – 1995	-0,4	1995 – 2007	-6,2
Getijdenmaas (km 200,8-227)	1936 - 2007	-2,4	1942 – 1984	-0,6	1995 – 2007	-4,5

¹⁾De analyse beslaat alleen het traject km 15-53 vanwege beperkte beschikbaarheid data uit 1921 [43].

²⁾De analyse beslaat alleen het traject km 69-87 vanwege beperkte beschikbaarheid data uit 1916 [43].

³⁾De analyse beslaat alleen het traject km 164-200 vanwege beperkte beschikbaarheid data [43].

Kleinschalig

Kleinschalige morfologische ontwikkelingen zijn reacties op ingrepen met lokale effecten op de water- en sedimentbeweging. Deze lokale effecten zijn verstoringen (discontinuïteiten) van het

doorgaande sedimenttransport. De lokale effecten treden op als de rivier ergens, door bijvoorbeeld een rivierverruimende maatregel, meer ruimte krijgt, en daarna weer minder. Daardoor verandert de snelheid van het water en daarmee de capaciteit van de stroming om sediment te verplaatsen. Een uitwisseling van zand en grind met de bedding van de rivier (sedimentatie, erosie) is het gevolg. Ter plaatse van rivierverruiming zal veelal sedimentatie optreden en zal het zomerbed ondieper worden. Benedenstrooms van de verruiming treedt veelal erosie op. De verdiepingen en verondiepingen van de bedding verplaatsen zich vervolgens gedeeltelijk stroomafwaarts.

Deze dynamiek van de bedding vindt vooral plaats tijdens hoge afvoeren, als ook rivierduinen op de bedding ontstaan, die groeien tijdens een afvoergolf en weer afvlakken tijdens laagwater. De reacties op lokale ingrepen en de rivierduinen kunnen elkaar versterken in het vormen van ondieptes. Deze ondieptes kunnen een belemmering vormen voor de scheepvaart en doorwerken in de omvang van het onderhoudsbaggerwerk.

Ook zomerbedverdieping (zoals in de Zandmaas) is een verruiming van de rivier en zal tot sedimentatie leiden. Als de Grensmaas voldoende grof sediment aangevoerd kreeg, zou de verruiming van de Grensmaas op langere termijn tot een ophoging van de rivierbodem leiden. Maar grof sediment wordt, als gevolg van de verstuwing bovenstrooms, amper nog aangevoerd. De komende jaren zal er tijdelijk meer sediment beschikbaar komen door erosie van natuurvriendelijke oevers langs de Maas en fijn sediment in de bedding van de Grensmaas. Deze nieuwe (tijdelijke) sedimentbronnen zijn te klein om het verlies door sedimentonttrekkingen in het zomerbed te compenseren.

Impact op functies

De insnijding van het zomerbed heeft verschillende ongewenste gevolgen. Constructies voor de scheepvaart kunnen instabiel worden. Ook kunnen kabels en leidingen bij verdergaande insnijding bloot komen te liggen en beschadigd raken. Op sommige plaatsen in de Grensmaas en de Zandmaas ligt fijn zand (uit het Mioceen, mediane korrelgrootte $< 210 \mu\text{m}$) dicht onder het beddingmateriaal [57]. Als dit door erosie van de bodem bloot komt te liggen, kan het wegspoelen waardoor plotseling diepe gaten ontstaan. Dat kan gevolgen hebben voor de stabiliteit van waterkeringen en oevers.

Ook voor de natuur is het ingesneden zomerbed ongunstig. In ongestuwde trajecten daalt het grondwater mee, waardoor de weerden verdrogen. Waar het zomerbed is verlaagd, overstroomden de weerden bovendien minder vaak en neemt de dynamiek (zandafzettingen) af. Vooral de hoge weerden langs de Bedijkte Maas verliezen steeds meer het contact met de rivier.

Waar maatregelen in het winterbed de rivier meer ruimte geven zal in het zomerbed veelal sedimentatie optreden en zal het zomerbed ondieper worden. Ook treedt oevererosie op als gevolg van het 'ontstienen' van oevers. Hinder voor de scheepvaart en de omvang van periodiek onderhoudsbaggerwerk kunnen hierdoor toenemen.

De Zandmaas is ruimer en dieper geworden door onder meer zomerbedverdiepingen. Op de plaats van de verdiepingen zal zand en grind sedimenteren. Om de waterveiligheid te garanderen zal hier periodiek baggerwerk nodig zijn. Naast deze consequenties voor beheer en onderhoud hebben

zomerbedverdiepingen de nadelen die hierboven zijn genoemd voor een zich insnijdende rivierbedding.

Aandachtspunten

Een belangrijk aandachtspunt is de samenstelling van de ondergrond van de Maas. Op een aantal locaties zit fijn sediment (mediane korrelgrootte < 210 µm) dicht onder de rivierbedding dat, als het wordt aangesneden, snel kan eroderen. Ook voor de snelheid en uiteindelijke omvang van oevererosie zijn de sedimenteigenschappen zeer relevant. Op een aantal locaties mogen de processen die de oevers eroderen hun gang gaan; de snelheid van de oevererosie wordt echter wel bewaakt. Een ander belangrijk aandachtspunt is het gebrek aan kennis over de sedimenthuishouding van de Maas. Experts geven aan dat de bijdragen van verschillende, mogelijke oorzaken van de bodemerosie moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn.

Rijn

Morfologische ontwikkelingen

Grootschalig

Onderling zijn er grote verschillen tussen de Rijntakken wat betreft de kracht van de stroming, de grootte van erosie en sedimentatie, en de mate waarin de bodemligging en de oeverzone van de rivier reageren op de variatie van de afvoer door de jaren heen. De morfodynamiek verschilt van tak tot tak: de Waal is het meest dynamisch, de IJssel het minst.

Het zomerbed van de Rijntakken is in de afgelopen tientallen jaren jaarlijks gemiddeld 1 tot 2 cm dieper komen te liggen (tabel S2). De erosie was het grootst in Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal en de bovenlopen van de andere Rijntakken. Deze erosie gaat in de bovenlopen van de Rijntakken nog steeds door, met uitzondering van de Bovenrijn, waar de bodemligging in de afgelopen jaren (door suppleties, een vaste laag en/of vergroving van aangevoerd sediment) niet of nauwelijks meer is gezakt.

Van de genomen maatregelen in het kader van Ruimte voor de Rivier heeft alleen de kribverlaging langs de Waal meteen na aanleg al een effect op een groot deel van de rivier: die is over een grote lengte gerealiseerd en zal over een grote lengte initieel al enigszins tot aanzanding van het zomerbed (en erosie van de stranden tussen de kribben) leiden. De langjarige trend van bodemerosie van het zomerbed in de afgelopen 1,5 eeuw wordt hier echter nauwelijks door beïnvloed.

Op het winterbed sedimenteert bij hoge afvoeren fijn zand (vooral op de oeverwallen) en slib (uiterwaarden). In de afgelopen twee eeuwen is het winterbed daardoor sterk opgehoogd. De sedimentatie is geleidelijk afgenomen, van enkele cm's per jaar twee eeuwen geleden tot 0,1 - 9 mm/jaar nu, doordat de hogere uiterwaarden minder vaak meestromen.

Tabel S2. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling van verschillende trajecten van de Rijntakken in cm/jaar (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen)', Rijkswaterstaat).

Traject	Maximale tijdspanne (geen multibeam)		Recente ontwikkeling (alle multibeam data)	
		Gemiddeld (- = erosie)		Gemiddeld (- = erosie)
Bovenrijn (km 858-867)	1934 – 1999	-2,0	1999 – 2018	0,1
Boven Waal (km 868 – 885)	1926 – 1999	-1,9	1999 – 2018	-1,9
Midden Waal (km 886 – 933)	1950 – 1999	-1,0	1999 – 2018	-0,4
Beneden Waal (km 934 – 951)	1950 – 1999	-0,2	1999 – 2018	0,1
Pannerdensch Kanaal (km 868 – 876)	1928 – 2002	-3,1	2002 – 2018	-1,1
Boven Nederrijn-Lek Tot stuw Driel (km 877 – 890 ¹⁾)	1928 – 2002	-1,2	2002 – 2018	-0,1
Midden Nederrijn-Lek Stuw Driel - stuw Hagestein (km 893 ¹⁾ – 945 ²⁾) ³⁾	1928 – 2002	-1,9	2002 – 2018	0,6
Beneden Nederrijn-Lek Benedenstrooms stuw Hagestein (km 949 ²⁾ – 970)	1933 – 2002	-1,5	2002 – 2018	0,3
Boven IJssel (km 879 – 888)	1941 – 2002	-2,1	2002 – 2018	-0,5
Midden IJssel (km 889 – 970)	1950 – 2002	-1,8	2002 – 2018	-0,3
Beneden IJssel (km 971 – 1005) ⁴⁾	1950 – 2002	-0,4	2002 – 2018	0,0

¹⁾Nieuw riviergedeelte aangelegde stuw Driel is ca. km 890-893; voor vergelijkbaarheid trends oud – nieuw is dit deel buiten beschouwing gelaten.

²⁾Nieuw riviergedeelte aangelegde stuw Hagestein is ca. km 945-949; voor vergelijkbaarheid trends oud – nieuw is dit deel buiten beschouwing gelaten.

³⁾Nieuw riviergedeelte aangelegde stuw Amerongen is ca. km 920-927; voor vergelijkbaarheid trends oud – nieuw is dit deel buiten beschouwing gelaten.

⁴⁾Jaren 2016 t/m 2018 weggelaten i.v.m. verlaging zomerbed (maatregel zomerbed RvdR).

Kleinschalig

De meeste maatregelen van het programma Ruimte voor de Rivier hebben geen effect op de grootschalige, lange termijn bodemerosie. Ze kunnen lokaal wel leiden tot meer dynamiek van de bedding waarbij ondieptes worden gevormd die moeten worden weggebaggerd. Ook zal deze sedimentatie zich op de langere termijn terugschrijdend, in bovenstroomse richting, uitbreiden (zie Box 1). In verhouding tot de snelheid van de grootschalige bodemerosie is dit echter een zeer traag verlopend proces. De ondieptes kunnen worden versterkt door duinen die bij hoogwater op de bedding worden gevormd.

Impact op functies

De grootschalige bodemerosie kan voor veel functies negatieve gevolgen hebben. Het functioneren van drempels bij sluisen en de stabiliteit van kades, kribben en brugpijlers kan worden aangetast. Er zullen meer voorzieningen (pompen) nodig zijn om de levering van zoetwater aan het regionale watersysteem te kunnen blijven garanderen. De afvoerverdeling op de beide splitsingspunten (Pannerdensche Kop en IJsselkop) kan wijzigen, met bij hoogwater mogelijk consequenties voor de hoogwaterveiligheid, en bij laagwater voor de scheepvaart en de zoetwatervoorziening van het regionale watersysteem. Op de Bovenrijn en Waal kunnen knelpunten ontstaan voor de scheepvaart

bij vaste lagen en bodemkribben. De gronddekking van kabels en leidingen kan te gering worden

De omvang van het onderhoudsbaggerwerk op de Bovenrijn en Waal kan toe- of afnemen, afhankelijk van de hypothese of het verhang van de bedding toe- of afneemt (zie aandachtspunten hieronder).

De morfologische processen in het zomer- en winterbed zijn met elkaar verbonden: de daling van het zomerbed heeft gevolgen voor de overstromingsfrequentie (en dus sedimentatie) van de uiterwaarden, en dus de natuur. Minder interactie tussen de uiterwaarden met hun wateren en het zomerbed betekent minder paai- en opgroeimogelijkheden voor vis; de water/oeverlijn van de rivier bevindt zich steeds vaker in de 'steile bak' van het zomerbed en steeds minder vaak op de flauwe oevers; bestaande nevengeulen, vispassages e.d. functioneren slechter omdat ze steeds vaker droogvallen of geïsoleerd raken; met de daling van de waterstand in de rivier zakt ook de grondwaterstand langs de rivieren, wat tot verdroging leidt.

Op basis van een verkennende studie is voorspeld dat de maatregelen van Ruimte voor de Rivier de omvang van het onderhoudsbaggerwerk voor de Waal als geheel met ongeveer 10% kunnen doen toenemen. Met het oog op de vereiste vaardiepte op de IJssel en de beperkte breedte van de vaargeul is er slechts zeer beperkt ruimte voor sedimentatie op deze riviertak. Dit betekent dat als na uitvoering van rivierverruimende maatregelen aanzanding van het zomerbed optreedt, dit vrijwel direct weggebaggerd moet worden met grote hinder voor scheepvaart tot gevolg.

Aandachtspunten

Een belangrijk aandachtspunt is het begrijpen van de oorzaken van de bodemdaling. Experts noemen verschillende mogelijke oorzaken (hypothesen) die tot verschillende ontwikkelingen in de toekomst kunnen leiden: een ontwikkeling naar een flauwere helling (door ingrepen in het verleden en een beperkte sedimentaanvoer uit Duitsland) of een ontwikkeling naar een steilere helling (door het grover worden van het sediment dat vanuit Duitsland wordt aangevoerd). Beide hypothesen kunnen samengaan: mogelijk leidt een combinatie van een flauwer verhang benedenstrooms van de Pannerdensch Kop en een steiler verhang van de Bovenrijn tot een meer concaaf profiel van, bijvoorbeeld, het traject Bovenrijn - Waal. Meer onderzoek is nodig naar de processen achter de grootschalige bodemveranderingen van de Rijntakken om de toekomstige ontwikkeling naar een nieuwe evenwichtsbodemligging te kunnen inschatten.

Een belangrijk aandachtspunt is ook het sedimentbeheer op de Niederrhein: dit heeft een grote invloed op de langjarige ontwikkeling van de toekomstige bodemligging van het zomerbed van de Rijntakken.

Rijn-Maasmonding

Morfologische ontwikkelingen

Grootschalig

De takken in het noordelijke deel van de Rijn-Maasmonding worden gekenmerkt door sedimentatie in de benedenlopen van Waal (Merwede) en Lek, en op de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg (tabel S3), dat wordt weggebaggerd voor de scheepvaart. De sterk verdiepte bodemligging wordt hier

direct (baggeren) door de mens bepaald (vergelijk kolom 4 met kolom 3 in tabel S3). In het zuidelijke deel (Haringvliet en Hollandsch Diep) bezinkt sinds de aanleg van de Haringvlietdam zand en slib dat door Rijn en Maas wordt aangevoerd. Op deze takken is het getijverschil door de Deltawerken sterk afgenomen, waardoor in het verleden veel erosie van slikken en platen is opgetreden. Met oeververdediging blijven de bestaande slikken en platen behouden. In de verbindende takken tussen het noordelijke en zuidelijke deel treedt door de hoge stroomsnelheden na het sluiten van het Haringvliet in 1970 veel erosie op. Voor de Oude Maas geldt dat ook de terugschrijdende erosie als gevolg van de verschillende verdiepingen van de Nieuwe Waterweg in het verleden bijdraagt aan de erosie van deze tak.

Tabel S3. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling van de verschillende takken van de Rijn-Maasmonding in cm/jaar (Bron: [47¹]). De getallen in de derde kolom geven de tendens aan van sedimentatie en erosie die zou resulteren uit de processen van zwevend en bodemgebonden sedimenttransport. Door baggeren is de netto bodemontwikkeling, aangegeven in kolom 4, op een aantal trajecten echter geheel anders.

Traject	Tijdvak	Gemiddelde trend natuurlijke processen (- = erosie)	Gemiddeld effect inclusief baggeren (- = erosie)
Noordelijke tak			
Nieuwe Waterweg	2000 – 2012	27,6	-1,8
Nieuwe Maas	2000 – 2012	4,5	-1,7
Lek	2000 – 2012	0,7	-1,3
Beneden Merwede	2000 – 2012	0,4	-0,4
Verbindende takken			
Noord	2000 – 2012	-1,5	-1,5
Oude Maas	2000 – 2012	-5,7 – 0,8 ¹⁾	-6,1 – 0,5 ¹⁾
Spui	2000 – 2012	-1,6	-1,6
Dordtse Kil	2000 – 2012	-1,2	-1,7
Zuidelijke tak			
Haringvliet	2000 – 2012	0,8 – 1,9 ²⁾	0,7 – 1,8 ²⁾
Hollands Diep	2000 – 2012	0,2 – 6,2 ³⁾	0,2 – 6,2 ³⁾
Nieuwe Merwede	2000 – 2012	1,3	-0,8
Bergsche Maas	2000 – 2012	0,9	0,9

¹⁾In de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding wordt de Oude Maas onderverdeeld in 4 trajecten. Dit is de bandbreedte voor de 4 trajecten.

²⁾In de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding wordt het Haringvliet onderverdeeld in 4 trajecten. Dit is de bandbreedte voor de 4 trajecten.

³⁾In de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding wordt het Hollands Diep onderverdeeld in 3 trajecten. De getallen voor een van deze trajecten zijn aantoonbaar onjuist. Dit is de bandbreedte voor de andere 2 trajecten.

¹ Deze tabel is gebaseerd op de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding. De auteur van het rapport over deze sedimentbalans benadrukt dat deze balans veel onzekerheden heeft en dat de 'sedimentbalans dus niet noodzakelijkerwijs een beschrijving van de daadwerkelijk opgetreden processen is.'

Kleinschalig

De grootschalige erosie van de bedding manifesteert zich in de takken met harde lagen vooral door de ontwikkeling van diepe erosiekuilen. Dit is met name het geval daar waar in de rivierbedding (fijn) zand aan de oppervlakte komt. Het merendeel van de kuilen in de beddingen van de verbindende takken bestond al voor het sluiten van het Haringvliet. Op veel plaatsen heeft menselijk handelen het ontstaan of de groei van diepe kuilen versterkt: de Deltawerken leidden tot hogere stroomsnelheden, en in de Dordtsche Kil ligt het zand aan de oppervlakte omdat de afdekkende kleilaag (waarschijnlijk) is weggebaggerd.

Er zijn in de Rijn-Maasmonding ruim 100 erosiekuilen geïdentificeerd die deels te herleiden zijn op de aanwezigheid van constructies in of langs de rivier (brugpijlers, kribben, dammen), op de samenvloeiing van riviertakken, op de geologie (heterogeniteit van de ondergrond), of een combinatie hiervan. Ook nu nog kunnen nieuwe kuilen ontstaan of kunnen bestaande kuilen verder verdiepen (als zij zich horizontaal uitbreiden). In de toekomst zouden kuilen ook onderling aan elkaar kunnen groeien tot een diepe geul waardoor het proces van insnijding in de rivierbedding wordt versneld. Het overgrote deel van de erosiekuilen leidt niet tot problemen, een klein deel wel. Er zijn dieptes van de erosiekuilen gerapporteerd tot maximaal ongeveer 10 meter (opname 2014).

Impact op functies

De diepe kuilen kunnen tot problemen leiden als de dekking boven tunnels, kabels of leidingen onvoldoende wordt, of als de stabiliteit van waterkeringen, oevers of brugpijlers wordt bedreigd. Met name in de Oude Maas zijn de beheerrisico's groot: volgens de beschikbare gegevens hebben enkele kabels en leidingen nu al geen of onvoldoende dekking. Op de andere takken is de erosie minder sterk; de meeste ontgrondingskuilen zijn daar stabiel dan op de Oude Maas.

De diepte in de vaargeul kan verminderen als een steile oever moet worden bestort. Een maatregel voor de waterveiligheid, als reactie op sterke erosie, kan zo voor de scheepvaart een belemmering zijn. Dit speelt onder meer op de Dordtse Kil.

Aandachtspunten

Een belangrijk aandachtspunt is het ontstaan van diepe erosiekuilen. Met name op de verbindende takken kan deze erosie nog lang doorgaan. De erosie zal met name sterk versnellen als de kleilaag verdwijnt die nu in veel takken de erosie nog beperkt. Naarmate er meer gaten in deze kleilaag ontstaan, zullen meer diepe kuilen ontstaan en zullen kuilen aan elkaar groeien.

Gedeeld beeld: de cruciale rol van de sedimenthuishouding

Volgens experts is het weer op gang brengen van doorgaand sedimenttransport een van de sleutelfactoren voor een aanpak van de negatieve gevolgen van morfologische ontwikkelingen in de Maas. Gebaggerd sediment moet volgens hen worden teruggestort. Slim sedimentbeheer is nodig om de daling van het zomerbed af te remmen en de kansen te vergroten voor natuurlijke dynamiek van oevers en weerden.

Ook voor de Rijn geldt dat de transporten van zand en grind een cruciale schakel zijn tussen de ingrepen van de mens en de morfologische reactie van de rivier. Deze constatering stopt niet bij de

overgang naar de Rijn-Maasmonding maar geldt voor het hele systeem van deze rivieren inclusief hun monding. Ook de erosie in vooral de verbindende takken en het ontstaan van erosiekuilen op veel locaties wijst op deze cruciale schakel en op een onbalans tussen de veranderde waterbeweging en de morfologie. De relatie met de samenstelling van de ondergrond (snelle erosie bij aansnijding van fijn zand) is daarbij voor al deze watersystemen een belangrijk aandachtspunt.

Inleiding

Ingrepen in onze rivieren in het verleden hebben geleid tot aanpassingen in de water- en sedimentbeweging, en hebben daarmee de morfologie van het zomerbed, de oevers en het winterbed (de uiterwaarden) veranderd. De veranderingen zijn een reactie op ingrepen in de 19^e en 20^e eeuw, en op meer recente ingrepen zoals de maatregelen van Ruimte voor de Rivier en Maaswerken. Ook toekomstige herinrichtingsmaatregelen kunnen gevolgen hebben voor de morfologie van de rivieren. Veranderingen in de morfologie kunnen op hun beurt een effect hebben op de functies van de rivier.

In dit rapport zijn de morfologische ontwikkelingen van het zomerbed, de oevers en het winterbed van de Rijn, de Maas en de Rijn-Maasmonding in kaart gebracht, en is verkend wat de effecten van deze ontwikkelingen zijn op de functies van de rivier voor de samenleving. Dit is gedaan op basis van rapporten, artikelen, presentaties en reflecties van experts. Deze effecten zijn met name veranderingen in de diepte van de rivier en de bodemligging van de oeverzone, aantasting van de stabiliteit van brugpijlers en dijken, de snelheid van opslibbing en aanzanding van nevengeulen en uiterwaarden, en veranderingen in de samenstelling van het sediment van zomer- en winterbed. Functies van de rivier die hierdoor kunnen worden beïnvloed zijn vooral de veilige afvoer van rivierwater, de scheepvaart, de zoetwatervoorziening (zoutindringing) en de natuur.

Er is een onderscheid gemaakt in grootschalige en kleinschalige morfologische ontwikkelingen. Grootschalige ontwikkelingen zijn veranderingen in de rivier als geheel, zoals een aanpassing van het verhang van het zomerbed als reactie op een verandering in de water- en sedimentbeweging. Kleinschalige ontwikkelingen zijn reacties op ingrepen met een lokaal effect. Een voorbeeld van een reactie op een ingreep is aanzanding van de hoofdgeul bij een aangetakte nevengeul; het lokale effect is een verondieping van de vaargeul. Dit lokale effect blijft in de praktijk veelal beperkt tot hooguit enkele honderden meters. In het algemeen geldt dat hoe grootschaliger een morfologische ontwikkeling is, hoe langer het duurt voordat die ontwikkeling een nieuw 'evenwicht' bereikt. In feite zal er nooit een statisch evenwicht ontstaan: de rivier zal zich blijven aanpassen aan veranderingen in het systeem (fysieke veranderingen in de inrichting van zomer en/of winterbed; variaties in, bijvoorbeeld, de afvoerfluctuaties). De morfodynamiek in de rivieren wordt dus bepaald door ingrepen in het verre en recente verleden.

Dit rapport beperkt zich tot een inventarisatie van morfologische ontwikkelingen en gevolgen voor de rivierfuncties. Er wordt geen analyse gegeven van mogelijke beleidsopties of in te vullen oplossingsrichtingen om de effecten op deze functies te beïnvloeden. Er wordt kort ingegaan op maatregeltypen die in beeld zijn om morfologische ontwikkelingen en/of beperkingen van functies bij te sturen.

Deze verkenning richt zich op ontwikkelingen in het zomerbed, de oevers en de uiterwaarden, en op het systeem als geheel. Binnen de Rijn, Maas en Rijn-Maasmonding kunnen verschillende trajecten of takken worden onderscheiden met verschillen in morfologische ontwikkelingen en verschillen in de doorwerking op de rivierfuncties. Voor zover relevant, brengt deze verkenning ook dit onderscheid in riviertakken en op trajectniveau in beeld. Naast de verkenning van de huidige situatie zal ook een doorkijk worden gegeven van (potentiele) morfologische ontwikkelingen en effecten op functies in de toekomst.

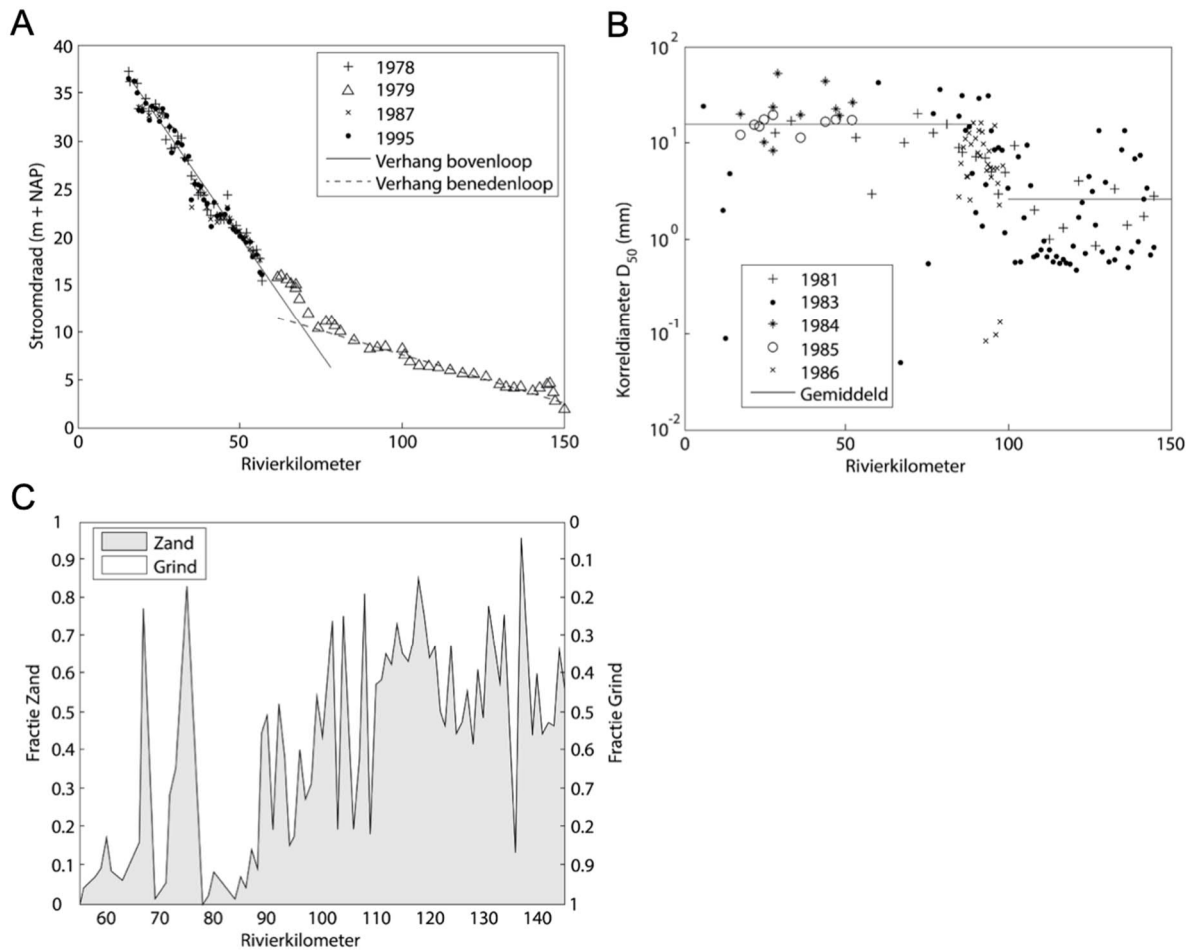
1. Maas

1.1. Karakter

Vanaf de Belgische grens tot Cuijk stroomt de Maas door een vallei. De oplopende oevers ('hoge gronden') bieden een natuurlijke bescherming tegen overstromingen. Tot eind vorige eeuw was dit deel van de rivier, op enkele lage kades na, vrijwel geheel onbedijkt. Na de hoogwaters van 1993 en 1995 zijn afspraken gemaakt over de hoogwaterbescherming van het Maasdal. Op grond van de Deltawet Grote rivieren zijn in 1995 en 1996 door de waterschappen 150 km noodkades gerealiseerd. In 1997 startte het project Maaswerken met rivierverruiming zoals de verbreding en verdieping van de rivier, de verlaging van uiterwaarden, de realisatie van hoogwatergeulen en de aanleg van retentiegebieden. De verruiming van het zomerbed van de Zandmaas en de Grensmaas is in combinatie met zand- en grindwinning tot stand gekomen. Langs de Grensmaas loopt de uitvoering van de werkzaamheden nog door tot 2027 [1].

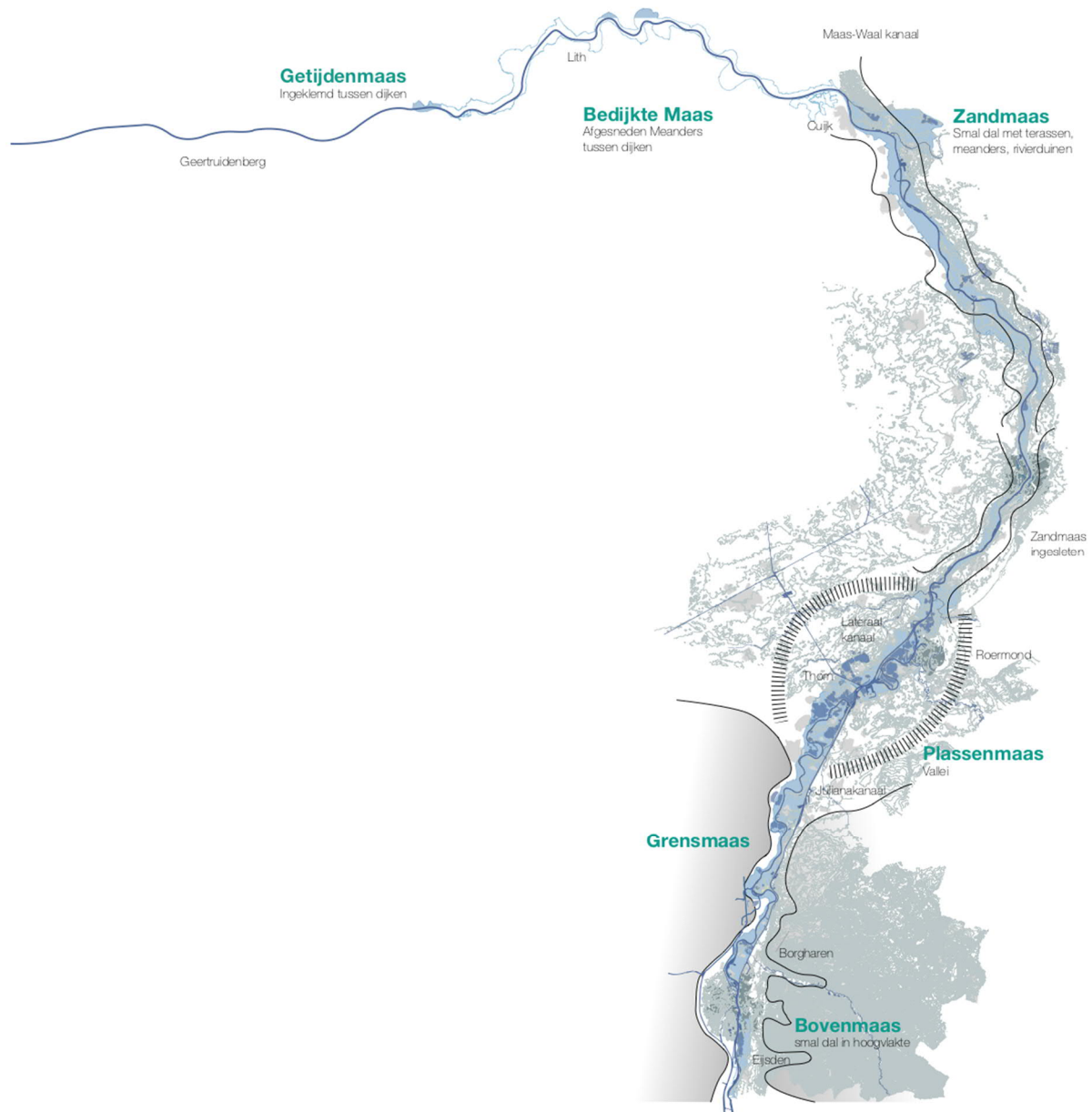
De vele menselijke ingrepen hebben de Maas veel ruimte in het winterbed afgenomen. Door stuwen, zandvangen en verdiepingen van het zomerbed is er bijna geen sediment meer in beweging. Daarnaast komt er weinig zand en grind van bovenstrooms Nederland binnen. Het zomerbed is al sinds een eeuw aan het zakken, de laagwaterafvoer is door het stuwbeheer onnatuurlijk grillig en er is veel kenmerkende riviernatuur verloren gegaan [1].

Het verhang van het zomerbed van de Maas toont een knik op ongeveer 70 km stroomafwaarts van Maastricht. Onderzoekers stellen dat die knik een eeuw geleden waarschijnlijk verder benedenstrooms bij rivierkilometer 95 lag: overeenkomend met de overgang van een grindrijke naar een zandrijke bedding zoals die nu nog te zien is (figuur 1) [22]. De onderzoekers suggereren dat de knik in de afgelopen eeuw naar stroomopwaarts is verschoven door grootschalige bodemerrosie als reactie op ingrepen in de rivier. De relatief hoge pieken in het zandgehalte ter hoogte van rivierkilometers 67 en 75 zijn waarschijnlijk gerelateerd aan het sedimenteren van zand achter de stuwen van Linne en Roermond.



Figuur 1. Het diepste punt van de bedding van de Maas over een traject tot 150 km benedenstrooms van Maastricht (m +NAP) (A), en de mediane korrelgrootte (mm) (B) en het gehalte aan zand (<2mm) en grind (>2mm) (C) in de bovenlaag van het zomerbed van de Maas in stroomafwaartse richting. Km 0 is Maastricht, km 150 is Boxmeer (Bron: [22]). De informatie is gebaseerd op monsters die zijn genomen met een emmer die vanaf een schip over de bodem is gesleept; de monsters bevatten waarschijnlijk sediment van de afpleisterlaag en van de laag daaronder [22].

Voor de Maas wordt vaak een onderscheid gemaakt in zes trajecten (figuur 2) met verschillende karakteristieken en morfologische dynamiek. Onderstaande samenvatting van het karakter van deze trajecten is grotendeels een samenvatting van de beschrijvingen in Het Verhaal van de Maas [1].



Figuur 2. De zes trajecten van de Maas.

Bovenmaas

Van Eijsden tot Borgharen heeft de Maas zich diep ingesneden en terrassen achtergelaten die tot 150 meter hoger liggen dan de huidige rivier. De rivier stroomt hier over een harde mergelbodem die zeer erosiebestendig is. Rond de stedelijke kernen liggen dijken.

Grensmaas

Van Borgharen tot Thorn loopt het natuurlijkste deel van de Maas in Nederland. Het water stroomt vrij af (ongestuwd), er zijn stroomversnellingen, grindbanken en brede overstromingsvlakten. De rivierbedding bestaat uit grind en zand, vaak afgedekt door afpleisterlagen van grof grind. De waterdieptes en stroomsnelheden kunnen sterk fluctueren. De scheepvaart volgt het naastgelegen Julianakanaal. Aan de Nederlandse zijde liggen alleen dijken rond de kernen. Aan de Vlaamse zijde is het traject geheel bedijkt.

Plassenmaas

Van Thorn tot Roermond stroomt de Maas de Roerdalslenk in. Vanaf dit punt wordt de helling van de rivier duidelijk flauwer. De Maas heeft hier in het verleden dikke pakketten grof zand en grind afgezet, als gevolg van de tektonische bodemdaling en aanvoer van sediment. De rivier stroomt door grote meanders in een breed dal. Door grindwinning in de jaren vijftig van de vorige eeuw zijn grote plassen ontstaan. Die plassen dempen hoogwaterpieken. De beroepsscheepvaart volgt het Lateraalkanaal. Er staan twee stuwen in de Plassenmaas, bij Linne en Roermond. Rond de kernen liggen dijken.

Zandmaas

Van Roermond tot Cuijk stroomt de rivier eerst door een smal dal (Peelhorst) om zich vervolgens weer te verbreden (Venloslenk). Tot tientallen meters boven de rivier liggen oude rivierterrassen. Waar de Maas door de Venloslenk loopt, liggen dikke pakketten grind in de ondergrond. Op sommige plaatsen ligt in dit traject heel fijn zand uit het Mioceen dicht onder het beddingmateriaal. Er staan twee stuwen in de Zandmaas, bij Belfeld en Sambeek. Rond de kernen liggen dijken.

Bedijkte maas

Van Cuijk tot Lith stroomt de Maas door de laaggelegen overstromingsvlakte van de Rijn en de Maas. Het beddingmateriaal is overwegend zandig. Aan weerszijden van de rivier liggen dijken en hoog opgeslibde weerden (uiterwaarden) met daarachter een landschap van oeverwallen en komgronden. Er staan stuwen bij Grave en Lith. De Bedijkte Maas is geheel bedijkt.

Getijdenmaas

Van Lith tot Geertruidenberg stroomt de rivier weer vrij en zijn eb en vloed merkbaar. In het laatste deel van de Getijdenmaas volgt de rivier een gegraven traject (de Bergsche Maas). Belangrijk voor de natuur zijn de Heerewaarden bij Fort St. Andries, waar Maas en Waal elkaar bijna raken. Achter de dijken bepaalt intensieve landbouw het landschap. De Afgedamde Maas is een oude loop van de Maas die nog met de Maas verbonden is. Tot de aanleg van de Bergsche Maas in 1904 vormde dit deel de hoofdstroom van de Maas. De Getijdenmaas is geheel bedijkt en gaat over in de Amer.

1.2. Het Maassysteem als geheel

1.2.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

Dynamiek

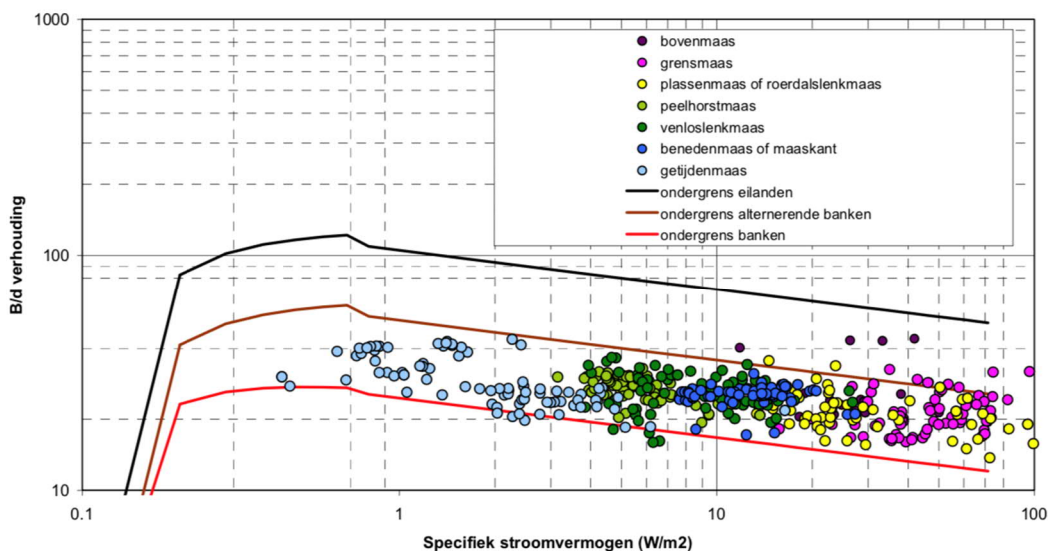
De morfodynamiek in de Maas is sinds de aanleg van de stuwen (tussen 1915 en 1942) sterk verminderd. Dit geldt ook voor de ongestuwde delen van de Maas: de Grensmaas en de Getijdenmaas. De morfodynamiek van de Maas is minder dan die van de vrij-afstromende Rijntakken: jaargemiddeld verplaatsen morfologische veranderingen in het zomerbed zich in de Maas een factor 4 langzamer dan in de Rijntakken [29]. Verstoringen verplaatsen zich ongeveer 250 m per jaar door het systeem. Morfodynamiek vindt op de Maas vooral plaats tijdens hoogwater.

De potentiële grootte van die morfodynamiek kan worden uitgedrukt in de combinatie van twee variabelen: de energie van het stromende water en de verhouding tussen de breedte en diepte van

de rivier [20].

De energie kan worden weergegeven met het stroomvermogen² van de rivier. Het stroomvermogen wordt voornamelijk bepaald door het debiet en het verhang. Het is een maat voor het vermogen van een rivier om sediment te eroderen en te transporteren, en zo morfologische veranderingen tot stand te brengen. De sterkte van de stroming wordt het best aangegeven met het stroomvermogen per eenheid van geulbreedte en geullengte (W/m^2). Rivieren die erg dynamisch zijn, zoeken de ruimte in het landschap en stromen over een grote breedte, als zij daarvoor de kans krijgen. Bij voldoende ruimte vormt de rivier steeds weer nieuwe geulen met daartussen eilanden. Zeer dynamische rivieren hebben dus een hoge breedte-diepte-verhouding. Rivieren die, bijvoorbeeld door dijken, op hun plaats worden gehouden, en dus weinig dynamisch zijn, kunnen voor het vergroten van hun doorstroomprofiel alleen maar de diepte in. Hun breedte-diepte-verhouding is dus klein.

In figuur 3 is het stroomvermogen voor verschillende trajecten van de Maas uitgezet tegen de breedte/diepte-verhouding (B/d). De figuur beschrijft de situatie aan het eind van de vorige eeuw (vóór de realisatie van de Maaswerken). De zwarte lijn is de ondergrens waarbij in de rivier eilanden kunnen worden gevormd. Deze lijn wordt nergens overschreden: de morfodynamiek in de Maastrajecten is te beperkt voor het vormen van eilanden in de rivier. Ook de ondergrens voor het vormen van een regelmatige afwisseling van banken langs linker- en rechteroever van de rivier (alternerende banken: bruine lijn) wordt in het grootste deel van de Maas niet overschreden. In potentie is de Grensmaas, als afpleistering van de bedding het transport van sediment niet zou beperken, van alle Maastrajecten het meest dynamisch.

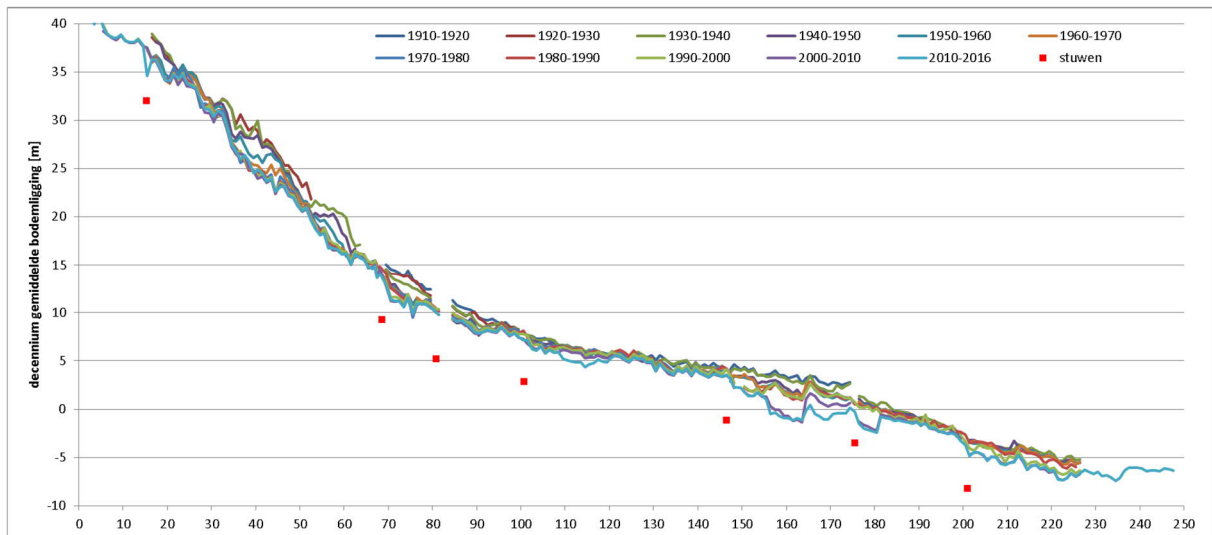


Figuur 3. De mate van dynamiek van morfologische processen in verschillende trajecten van de Maas, uitgedrukt in een verhoudingsgetal van de energie van de rivier (x-as) en de verhouding tussen de breedte en diepte van de rivier (y-as) (Bron: [20]). De figuur beschrijft de situatie van vóór de Maaswerken.

² Strikt genomen is de term 'stroomvermogen' niet correct maar hij wordt zo wel vaak in de literatuur gebruikt (in Engelse literatuur over rivieren 'stream power' genoemd). Vermogen en energie zijn verschillende begrippen. Op de horizontale as in figuur 3 staat feitelijk het energieverbruik per eenheid van tijd, lengte en breedte.

Bodemerosie zomerbed: reactie op ingrepen en zand- en grindwinning 19^e en 20^e eeuw

De afgelopen honderd jaar is het rivierbed van de Maas ingrijpend veranderd. Zand- en grindwinning, en normalisaties waarbij de rivier een smallere en rechttere loop heeft gekregen, hebben geleid tot een aanzienlijk lagere ligging van het zomerbed. Op sommige plaatsen is het zomerbed in de afgelopen honderd jaar wel 5 meter dieper komen te liggen (figuur 4). Gemiddeld zakte het zomerbed van de Maas over de afgelopen eeuw 1 tot 3 meter [1]. De erosie gaat nog steeds door, met uitzondering van delen waar de rivier is verdiept. In tabel 2 in §1.3.1 is de snelheid van de bodemdaling voor verschillende trajecten van de Maas samengevat.



Figuur 4. Langsprofiel van de bodemligging van de Maas en de grootschalige verandering in bodemligging in de periode 1910-2016 (Bron: [54]).

Oorzaken bodemerrosie

Vanaf het begin van de 19^e eeuw is grootschalig ingegrepen in de Maas. De normalisatie en kanalisatie (aanleg van stuwen) van de Maas tussen Maastricht en Den Bosch raakte in een stroomversnelling na het hoogwater van 1926. In de jaren dertig ging Plan Lely in uitvoering en werd het afvoerend vermogen van de rivier vergroot met bochtafsnijdingen die de rivier 20 km korter maakten. Ook werden oevers vastgelegd in steen.

Als reactie op de normalisatie en versmalling is de rivier zich gaan insnijden om op termijn een flauwer verhang te verkrijgen [1,46]. Volgens experts [54] mag verwacht worden dat deze insnijding zowel van bovenstrooms naar beneden (voortschrijdende erosie) als van benedenstrooms naar boven (terugschrijdende erosie) optreedt. Een belangrijke oorzaak van de voortschrijdende erosie is de zeer beperkte aanvoer van zand en grind vanuit België waardoor de rivier in Nederland zand en grind uit de bedding erodeert, waar dat kan. Belangrijke oorzaken van de terugschrijdende erosie zijn de aanpassing van de Maasmond (met name het graven van de Bergsche Maas) en de bochtafsnijdingen, waardoor de rivier korter en steiler is geworden [54].

Een andere belangrijke oorzaak van het zakkende zomerbed zijn de vele onttrekkingen van grind en zand. In de hele Maas wordt regelmatig gebaggerd om de vaargeul op diepte te houden, waarbij het gebaggerde materiaal aan de rivier wordt onttrokken.

In de Zandmaas en de Bedijkte Maas is de afgelopen jaren ook veel zand onttrokken om het zomerbed te verdiepen voor hoogwaterbescherming. In de vorige eeuw heeft op grote schaal grind- en zandwinning plaatsgevonden in de Grensmaas en de Plassenmaas [1]. In het verleden zijn veel oevers met steen vastgelegd, waardoor nog minder sediment in beweging komt. Bovendien zullen diepe plassen zand invangen en zo bijdragen aan het blokkeren van het doorgaande sedimenttransport in de rivier (figuur 5).

De samenstelling van de ondergrond van de Maas is zeer relevant voor mogelijke toekomstige morfologische ontwikkelingen. Op een aantal locaties in de Grensmaas en de Zandmaas zit fijn sediment (uit het Mioceen, mediane korrelgrootte $< 210 \mu\text{m}$) dicht onder het oppervlak van de rivierbedding (veelal een afpleisterlaag) dat, als het wordt aangesneden, snel kan eroderen [57]. Ook voor de snelheid van oevererosie zijn de sedimenteigenschappen zeer relevant [29].

Experts geven aan dat de bijdragen van verschillende mogelijke oorzaken van de bodemerosie moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn.

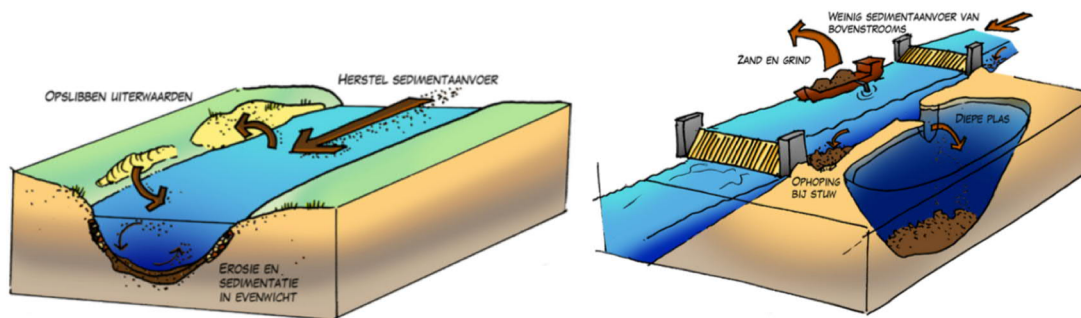
Sedimentatie winterbed

Tijdens hoge afvoeren bezinken slib en fijn zand op de uiterwaarden langs de Maas. Deze sedimentatie is tijdens het hoogwater van 1993 gemeten op uiterwaarden langs de Maas en de Waal. De gemeten sedimentatie was voor beide rivieren van dezelfde orde van grootte: $1 - 2 \text{ kg/m}^2$ langs de Maas en $1,2 - 4 \text{ kg/m}^2$ langs de Waal [45].

Sedimentmanagement

In Het Verhaal van de Maas stellen experts dat het herstel van de sedimenthuishouding, met het weer op gang brengen van doorgaand sedimenttransport, een van de sleutelfactoren is voor een aanpak van de negatieve gevolgen van morfologische ontwikkelingen. In lijn hiermee raden zij zomerbedverruiming af: dit blokkeert het doorgaande sedimenttransport (als het sediment bij onderhoudsbaggerwerk niet stroomafwaarts wordt teruggestort). Gebaggerd sediment moet volgens hen weer worden teruggestort (nu wordt dit aan de rivier onttrokken). Meer doorgaand sedimenttransport remt de daling van het zomerbed en vergroot de kansen voor natuurlijke sedimentdynamiek op oevers en weerden [1].

Voor de sedimenthuishouding in de Nederlandse Maas is natuurlijke aanvoer van sediment vanuit Wallonië een voorwaarde. De omvang van die aanvoer is onbekend. Daar kan meer inzicht in ontstaan door met de andere oeverstaten gezamenlijk de sedimentbalans in beeld te brengen [1].



Figuur 5. De verstoorde sedimenthuishouding van de Maas (rechts) en herstel van doorgaand sedimenttransport (links) (Bron: [1]).

1.2.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Kleinschalige morfologische ontwikkelingen zijn reacties op ingrepen met lokale effecten op de water- en sedimentbeweging. Deze lokale effecten zijn verstoringen (discontinuïteiten) in het doorgaande sedimenttransport. Een voorbeeld van een reactie op een ingreep is aanzanding van de hoofdgeul bij een aangetakte nevengeul; het lokale effect is een verondieping van de vaargeul. De lokale effecten treden op als de rivier ergens meer ruimte krijgt, en daarna weer minder. Met het toe- en afnemen van de afvoercapaciteit van de rivier verandert de snelheid van het water en daarmee de capaciteit van de stroming om sediment te verplaatsen. Een uitwisseling van zand en grind met de bedding van de rivier (sedimentatie, erosie) is het gevolg. De verdiepingen en verondiepingen van de bedding verplaatsen zich vervolgens gedeeltelijk stroomafwaarts. Ook past de rivier zijn bedding terugschrijdend, in stroomopwaartse richting, aan (zie Box 1).

Deze dynamiek van de bedding vindt vooral plaats tijdens hoge afvoeren, als ook rivierduinen op de bedding ontstaan, die groeien tijdens een afvoergolf en weer afvlakken tijdens laagwater. De reacties op lokale ingrepen en de rivierduinen kunnen elkaar versterken in het vormen van ondieptes. Deze ondieptes kunnen een belemmering vormen voor de scheepvaart en doorwerken in de omvang van het onderhoudsbaggerwerk.

Box 1

Lokale ingrepen: Initiële respons en lange termijn effecten:

Het doel van een lokale, kleinschalige ingreep in de morfologie van de rivier is vaak het vergroten van de afvoercapaciteit van de rivier zodat in de directe omgeving van die ingreep de waterstand bij extreem hoge afvoeren wordt verlaagd. De ingreep beïnvloedt de waterbeweging ook bij lagere afvoeren waardoor ook de sedimentbeweging wordt beïnvloedt. Het resultaat van deze lokale verruiming van de rivier, met maatregelen in zomer- en/of winterbed, is veelal sedimentatie in de hoofdgeul. De initiële respons zal lokaal zijn en binnen enkele jaren merkbaar. Het blijft echter niet bij een lokale reactie. De sedimentatie zal zich terugschrijdend, in bovenstroomse richting uitbreiden.

In het verleden zijn ook maatregelen genomen waarbij het omgekeerde proces plaatsvindt. Door twee bochtafsnijdingen op de IJssel in de jaren '50 en '60, bijvoorbeeld, is lokaal het verhang van de rivierbedding steiler geworden. Initieel trad daar direct bovenstrooms van de bochtafsnijding erosie op die zich vervolgens op langere termijn terugschrijdend, in bovenstroomse richting, uitbreidt.

Deze lange termijn effecten op lokale ingrepen verlopen traag. Afhankelijk van de lengte van de rivier en de hoeveelheid sediment die door de rivier (langjarig) wordt getransporteerd, kan de morfologische doorwerking van een ingreep op de rivier als geheel wel honderden jaren duren.

Reactie op Maaswerken (en andere lokale maatregelen)

Rivierverruimende maatregelen zorgen dat het afstromende water bij deze maatregel meer ruimte krijgt terwijl het een eind stroomafwaarts weer de oorspronkelijke ruimte heeft. Waar de rivier meer ruimte krijgt zal veelal sedimentatie optreden en zal het zomerbed ondieper worden; stroomafwaarts van de maatregel treedt dan veelal erosie op.

De komende jaren zal er tijdelijk iets meer sediment beschikbaar komen door erosie van natuurvriendelijke oevers langs de Maas en fijn sediment in de bedding van de Grensmaas. Deze nieuwe (tijdelijke) sedimentbronnen zijn te klein om het verlies door sedimentonttrekkingen in het zomerbed te compenseren [1]. Bovendien zal op locaties waar het zomerbed is verdiept zand en grind worden ingevangen.

Ontwikkelingen in winterbed en oeverzone

Tijdens de normalisatie zijn veel oevers geheel vastgelegd. In de huidige situatie staan de oevers op minder sterk verdedigde stukken (in binnenbochten en bij overgangen) het meest onder druk. In de Grensmaas lijkt ondergraving van oevers door uitspoeling van grind het belangrijkste mechanisme bij oevererosie [37]. Sinds enkele jaren worden oevers in het kader van het ecologisch herstel van de Maas weer 'ontsteend' [1]. Volgens experts zou het 'ontstenen' van oevers de oevererosie op gang kunnen brengen.

De achteruitgang van steilranden op zandige Maasoevers was voor de aanleg van een breuksteenbekleding (periode 1950-1954) maximaal 1 meter per jaar. Sinds de jaren '50 is de oeverbelasting door de scheepvaart (golven, stroming) sterk toegenomen en bedraagt de achteruitgang van steilranden van onverdedigde, zandige oevers 1 tot 4 meter per jaar [38]. Oeverafslag door golfaanval door scheepvaart vindt plaats rondom het waterstandsniveau dat door de stuwen gehandhaafd wordt.

In het winterbed zijn er geen bijzondere, kleinschalige morfologische ontwikkelingen, afgezien van de sedimentatie op de uiterwaarden tijdens hoge afvoeren.

Ontwikkelingen in nevengeulen

Ook in nevengeulen kan zich sediment afzetten of kunnen de bodem en oevers eroderen, waardoor de morfologie van de geul verandert. Dat gebeurt bij hogere afvoeren en, voor sommige geulen, door getijwerking of de waterbeweging opgewekt door passerende scheepvaart. De morfologische processen in nevengeulen zijn grofweg als volgt te karakteriseren [55]:

- ⇒ Horizontaal: Zijdelingse verplaatsing van de geul door erosie van de oevers; in de orde van 0,5 a 2 m verplaatsing per jaar, met lokale uitschieters (bijvoorbeeld bij constructies) van 10 m/jaar.
- ⇒ Verticaal: Aanzanding vanuit de rivier (in de orde van 1 tot 2 dm per jaar) vindt veelal plaats in een zone van ca. 50 m van de instroomrand. Aanzanding verder op in de geul wordt veelal veroorzaakt door interne verplaatsing van sediment. Aanslibbing vindt plaats in de stroomluwe uiterwaarddelen en is in de orde van 1 tot 3 mm per jaar (in strangen 1 tot 2 cm per jaar). Lokaal treedt erosie op bij constructies of bij locaties met meer geconcentreerde stroming langs en

naar hoge oevers en/of kribben (zie ook Box 2).

Voor aanslibbing van nevengeulen komt in de praktijk vaak voor. Voor een selectie van 12 geulen, bestaande uit een mix van recent aangelegde en oudere geulen, van strangen, getijdegeulen en hoogwater geulen, en van geulen langs de Rijntakken, de Maas en in de Rijn-Maasmonding, is een meting verricht van de mate van aanslibbing van de geulbodem en de geuloevers [55]. In deze studie is tevens een voorstel gedaan voor de beoordeling van de mate van aanslibbing waarboven onderhoud plaats zou moeten vinden. Deze 'signaleringswaarde' is gedefinieerd als minstens 10 cm slibdikte in een meestromende nevengeul en 20 cm in een geïsoleerde strang over meer dan 50% van de geuloppervlakte. De resultaten staan in tabel 1. Met rood is aangegeven voor welke nevengeulen deze 'signaleringswaarde' wordt overschreden. Dat is in de twee geselecteerde nevengeulen langs de Maas het geval.

Box 2

Het proces van aanzanding/aanslibbing van nevengeulen [56]:

Sedimentatie in nevengeulen kan plaatsvinden met zand of slib. Aanzanding kan komen door twee verschillende vormen van zandtransport: zand dat over de bodem rolt en zand dat in het water zweeft. In het eerste geval gaat het om relatief grof sediment. In dat geval moet het verschil in bodemligging tussen de hoofd- en de nevengeul klein zijn en de kracht van de stroming groot wil het zand de geul in kunnen komen. Als dit lukt, hangt het van de transportcapaciteit in de nevengeul af hoever het zand de nevengeul in komt. Als die capaciteit (sterkte van de stroming) beperkt is, zakt het zand in de opening van de geul uit en vormt zich daar een drempel. Bij zwevend zandtransport komt zand dat in de hoofdgeul in suspensie wordt verplaatst met de stroming de nevengeul in. Dit zand is fijner dan het zand op de bedding van de hoofdgeul (en het zand dat rollend over de bedding wordt verplaatst). Dit zand kan ook de nevengeul in komen bij grotere verschillen in bodemligging tussen de hoofd- en de nevengeul.

Aanslibbing van nevengeulen vindt plaats door het fijnste sediment dat in het water zweeft (slib). Aanslibbing kan ook plaatsvinden in nevengeulen die alleen benedenstrooms aan de hoofdgeul zijn aangetakt (strangen); zand kan die geulen in principe niet worden in getransporteerd. Aanslibbing van nevengeulen vindt met name plaats als het winterbed gaat meestromen en als ook elders in het winterbed slib sedimenteert.

Afhankelijk van de stromingsomstandigheden, met name de verhouding tussen de sterkte van de stroming en de korrelgrootte van het sediment, en het ontwerp van de nevengeul kunnen al deze drie vormen van aanzanding en aanslibbing in de Nederlandse nevengeulen optreden.

Tabel 1. Gemeten aanslibbing in een aantal nevengeulen langs de Rijntakken, de Maas en in de Rijn-Maasmonding. De kleuren rood/groen geven aan of de gemeten slibdikte op meer/minder dan 50% van de geuloppervlakte een kritische waarde overschrijdt. Deze kritische waarde is 10 cm voor een meestromende nevengeul en 20 cm voor een geïsoleerde strang (bron: [55]).

Locatie nevengeul (jaar realisatie)	Riviertak (type nevengeul)	Geconstateerde aanslibbing
Hemelrijkse Waard (3 geulen) (2016)	Maas (groot deel jaar gestuwd)	Nevengeul oeverzone: Waterbodemb heeft een slibdikte van ca. 10 cm benedenstrooms en 10-20 cm bovenstrooms. Op de oevers is de slibdikte minder (orde 0-5 cm). Oevergeul en Stroomgeul: Geen meting verricht. Verwachting: ook in de oevergeul slibafzetting. Gedempte Oude Maas: Geen meting verricht. Verwachting: ook slibafzetting.
Zuidgeul Well (2016)	Maas (groot deel jaar gestuwd)	Waterbodemb heeft over het algemeen een slibdikte van 5-15 cm, lokaal 10-25 cm. Op de oevers is de slibdikte minder (orde 0-5 cm).
Passewaaij (1996 en 2015)	Waal (vrij afstromend)	Geen slibmetingen verricht in de Passewaaij. Verwachting slibdikte waterbodemb in middendeel van de geul > 10 cm.
Ewijkse Plaat (2015)	Waal (vrij afstromend)	De waterbodemb en oevers van de diagonaalgeulen bestaan uit zandig substraat, er is geen slib gemeten. In westelijke deel van de strang is geen slib gemeten in waterbodemb en oevers. In het oostelijke deel is wel sprake van aanslibbing van de waterbodemb (tot 40 cm).
Gamerense Waard (3 nevengeulen) (1996 tot 1999)	Waal (vrij afstromend)	Waterbodems in de grote geul en de westgeul hebben een slibdikte van 5-10 cm. In de oostgeul is geen slib gemeten.
Bakenhof (2001)	Nederrijn (groot deel jaar gestuwd)	De waterbodemb heeft een slibdikte van 5-40 cm in de geul en ca. 5 cm op de oevers.
Lexkesveer (2010)	Nederrijn (groot deel jaar gestuwd)	Waterbodemb heeft een slibdikte van 20-50 cm over een breedte van zo'n 20 m over gehele lengte van de geul. Op de flauwe oevers is dit 5-10 cm.
Pontwaard (Vianen) (2016)	Lek (vrij afstromend met getij)	De waterbodemb heeft een slibdikte van gemiddeld 5-10 cm, en maximaal 20-30 cm in het diepste deel van de geul. Ook enkele centimeters slib op de oevers.
Vreugderijkerwaard / Westenholte (2002 en 2016)	IJssel (vrij afstromend)	Gevarieerd beeld van de aanslibbing van de waterbodemb, tussen 5 en 40 cm. Op de oeverzones minder slib (orde 0-5 cm).
Duursche Waarden (1990 en 2015)	IJssel (vrij afstromend)	De slibdikte op de waterbodemb over de gehele geul is op veel plekken > 30 cm met maxima van ca. 75 cm.
5 geulen RvR Deventer (2015)	IJssel (vrij afstromend)	Bolwerkplas en Ossenaarwaard: Waterbodemb heeft een slibdikte van 5-15 cm met lokaal diktes van 20-25 cm. Op de oevers is de slibdikte minder (orde 0-5 cm). Zandweerdplas: Waterbodemb heeft een slibdikte van 10-20 cm. Op de oevers is de slibdikte minder (orde 0-5 cm). Stobbenhank: Waterbodemb heeft een slibdikte van 10-20 cm aan zuidelijke zijde van de strang en 5-10 cm bij de opening. Op de oevers is er nauwelijks slibafzetting (orde 0-5 cm). Munnikenhank: Waterbodemb heeft een slibdikte van 5-10 cm aan noordelijke zijde en 10-20 cm aan de zuidelijke zijde. De gemeten slibdikte is erg variabel en met name in oude deel van de strang heel dik (uitschieters van meer dan 50 cm). Op de oevers is er nauwelijks slibafzetting (orde 0-5 cm).
Sophiapolder (2011)	De Noord (vrij afstromend / getijdenrivier)	In de uiteinden van de geulen/kreken ligt een dikke sliblaag op de bodem (30-60 cm). Ook veel slib op de oevers. In bovenstroomse deel van de geulen, door hogere stroomsnelheid, nauwelijks slib.

1.2.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

Per traject is voor de Maas, de Rijntakken en de Rijn-Maasmonding in kaart gebracht waar infrastructuur en kunstwerken liggen die voor verschillende functies (scheepvaart, telecom en nutsvoorzieningen, waterveiligheid, zoetwatervoorziening) van belang zijn. Ook zijn de locaties van KRW-maatregelen aangegeven. Deze kaarten zijn in de bijlage bij dit rapport opgenomen. Morfologische ontwikkelingen kunnen negatieve effecten hebben op deze infrastructuur, kunstwerken en maatregelen.

De impact van grootschalige morfologische ontwikkelingen

De insnijding van het zomerbed heeft verschillende ongewenste gevolgen (figuur 6). Constructies voor de scheepvaart kunnen instabiel worden. Ook kunnen kabels en leidingen bij verdergaande insnijding bloot komen te liggen en beschadigd raken. Als diepe gaten ontstaan door erosie van fijn zand dat nu nog onder het beddingmateriaal ligt, kan de stabiliteit van waterkeringen en oevers hierdoor worden bedreigd [1]. De vraag is in hoeverre één extreem hoogwater tot erosie van fijne zanden kan leiden, of dat meerdere hoogwaters nodig zijn voor veel erosie. In het laatste geval heeft de beheerder tijd om schade te beperken of herstellen, in het eerste geval niet.

Ook voor de natuur is het zakkende zomerbed ongunstig. In gestuwde trajecten wordt de waterdiepte groter en neemt de stroomsnelheid nog verder af. In ongestuwde trajecten daalt het grondwater mee, waardoor de weerden verdrogen. Zo is het grondwater in de weerden langs de Grensmaas ongeveer een meter gezakt na de forse verdieping van het zomerbed halverwege de vorige eeuw. Waar het zomerbed zakt, overstromen de weerden bovendien minder vaak. Daardoor vinden minder zandafzettingen plaats die van belang zijn voor pionier begroeiing. Vooral de hoge weerden langs de Bedijkte Maas verliezen steeds meer het contact met de rivier [1].

In de Grensmaas zijn grindruggen aangelegd in het zomerbed, die de waterstand bij lage afvoer wat opstuwten zodat de grondwaterstand aan de Vlaamse kant van de Grensmaas niet teveel daalt. Deze ruggen moeten worden onderhouden; ze kunnen doorbreken bij een hoge afvoer.

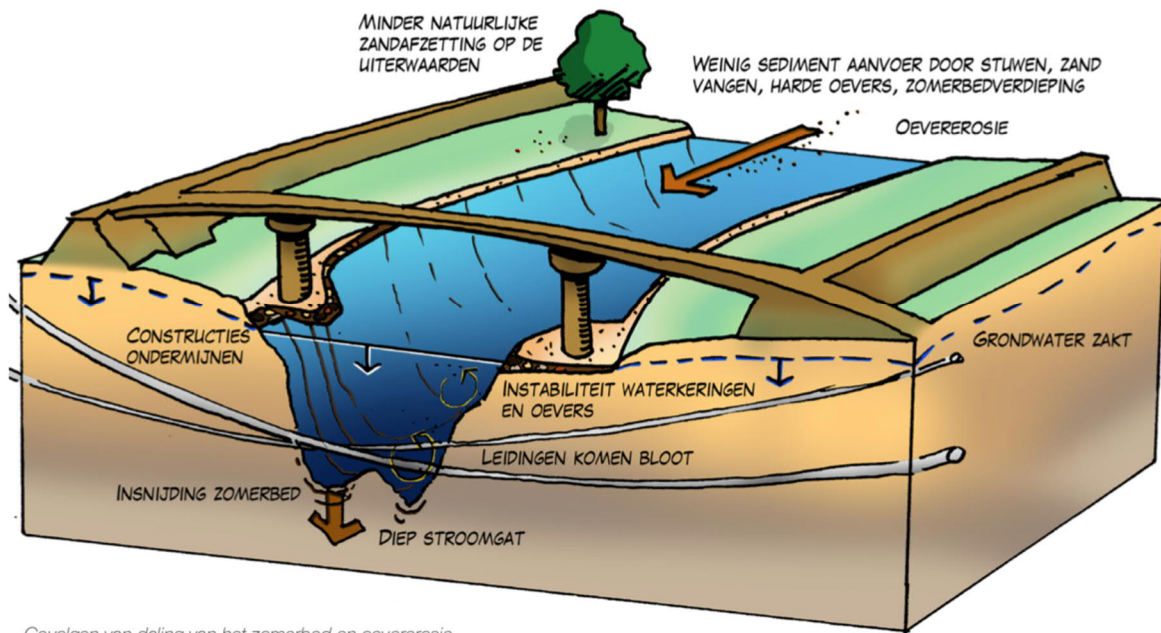
De impact van kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Rivierverruimende maatregelen zorgen dat het afstromende water bij deze maatregel meer ruimte krijgt terwijl het een eind stroomafwaarts weer de oorspronkelijke ruimte heeft. Waar de rivier meer ruimte krijgt zal veelal sedimentatie optreden en zal het zomerbed ondieper worden. De maatregelen leiden dus lokaal tot ondieptes voor de scheepvaart en tot de noodzaak van periodiek onderhoudsbaggerwerk [25].

Rivierverruimende maatregelen vragen ook om onderhoud. Tabel 1 laat zien dat er veel slib in nevengeulen kan bezinken. Die geulen zijn ontworpen om een deel van het hoogwater af te voeren, en zo bij te dragen aan het beperken van extreem hoge waterstanden, en bovendien de ecologische en natuurkwaliteit van het rivierensysteem te vergroten. Bij teveel slibsedimentatie kan de functionaliteit van de geulen voor hoogwaterbescherming verminderen terwijl bovendien de verandering van het substraat (van een zandige naar slibbodem) gevolgen heeft voor de ecologie.

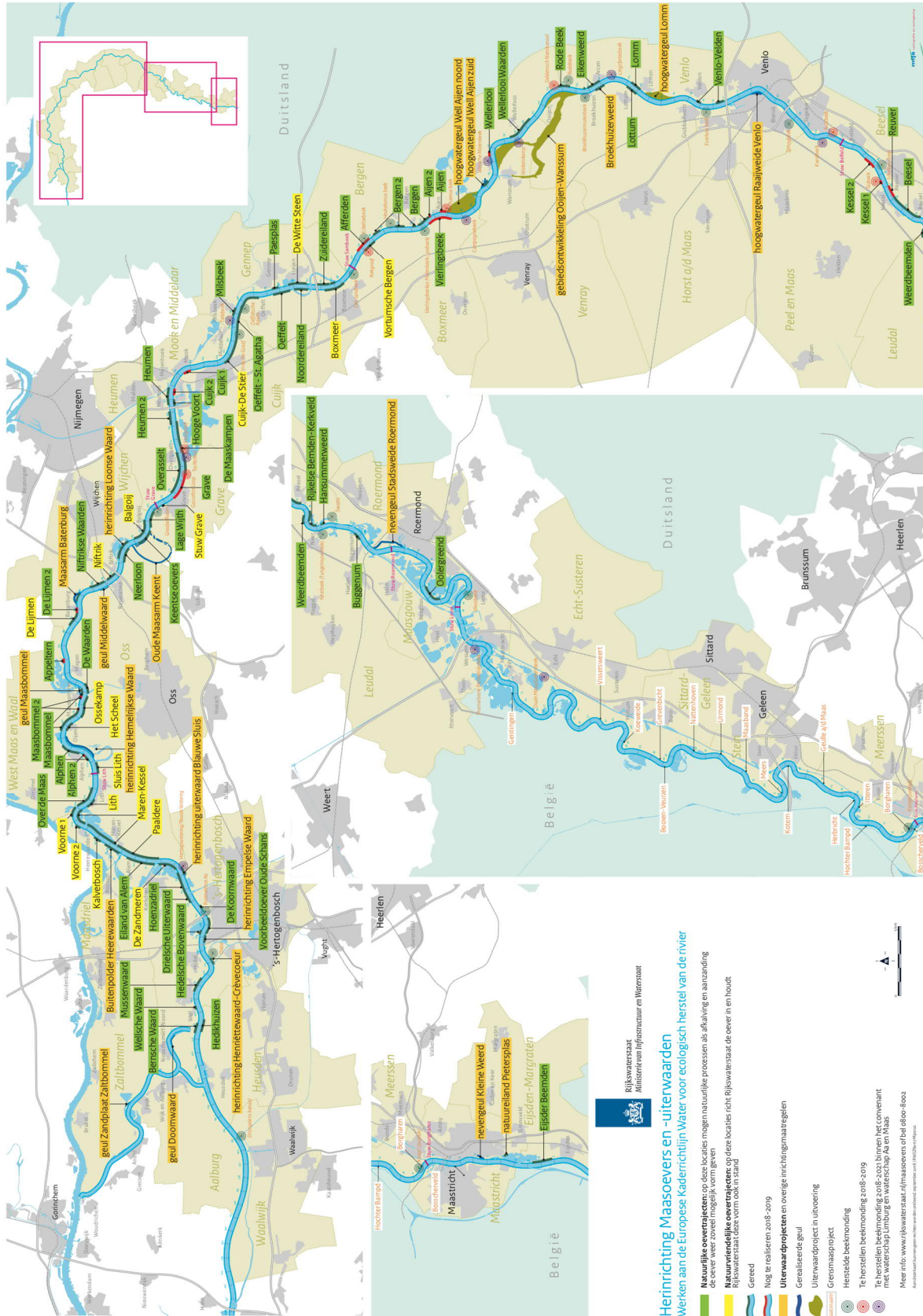
Oevererosie als gevolg van het 'ontstenen' van oevers kan gunstige effecten hebben voor de natuur en (in beperkte mate) voor het leveren van sediment aan de rivier [1]. Met suppleties op eroderende

oeveren zijn eventuele ongewenste effecten op waterkeringen te voorkomen en keren regelmatig pioniersvegetaties terug (cyclische verjonging). Aan het vrijkomen van sediment in de rivier zijn, voor de scheepvaart en het vaargeulonderhoud, ook negatieve consequenties verbonden: het zand kan langs verschillende trajecten van de Maas tot ondieptes voor de scheepvaart leiden. Op een aantal locaties mogen de processen die de oeveren eroderen hun gang gaan; de snelheid van de oevererosie wordt echter wel bewaakt. Deze locaties zijn in groen aangegeven op de kaart van figuur 7.



Gevolgen van daling van het zomerbed en oevererosie

Figuur 6. De mogelijke gevolgen van het zakken van het zomerbed en van erosie van de oeveren van de Maas.



Figuur 7. Overzichtskaart met maatregelen voor de herinrichting van Maasoever- en -uiterwaarden. Op de in groen aangegeven locaties mogen natuurlijke processen als afkalving en aanzanding de oever weer zoveel mogelijk vormgeven.

1.3. Specifieke ontwikkelingen per traject

1.3.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

Tabel 2 geeft de grootschalige ontwikkeling van het zomerbed van de Maas per traject (in cm/jaar). Het minteken geeft aan dat de bodem steeds lager is komen te liggen. In de tabel zijn drie verschillende tijdvakken onderscheiden. De maximale tijdspanne geeft het gemiddelde sinds de eerste bodempeiling. De autonome ontwikkeling geeft het gemiddelde over de periode waarin geen baggerwerkzaamheden hebben plaatsgevonden. De rechterkolom is de erosie in de periode 1995-2007 (overgenomen uit [1]). De getallen voor de autonome ontwikkeling zijn ook weergegeven in figuur 8 (in bandbreedtes).

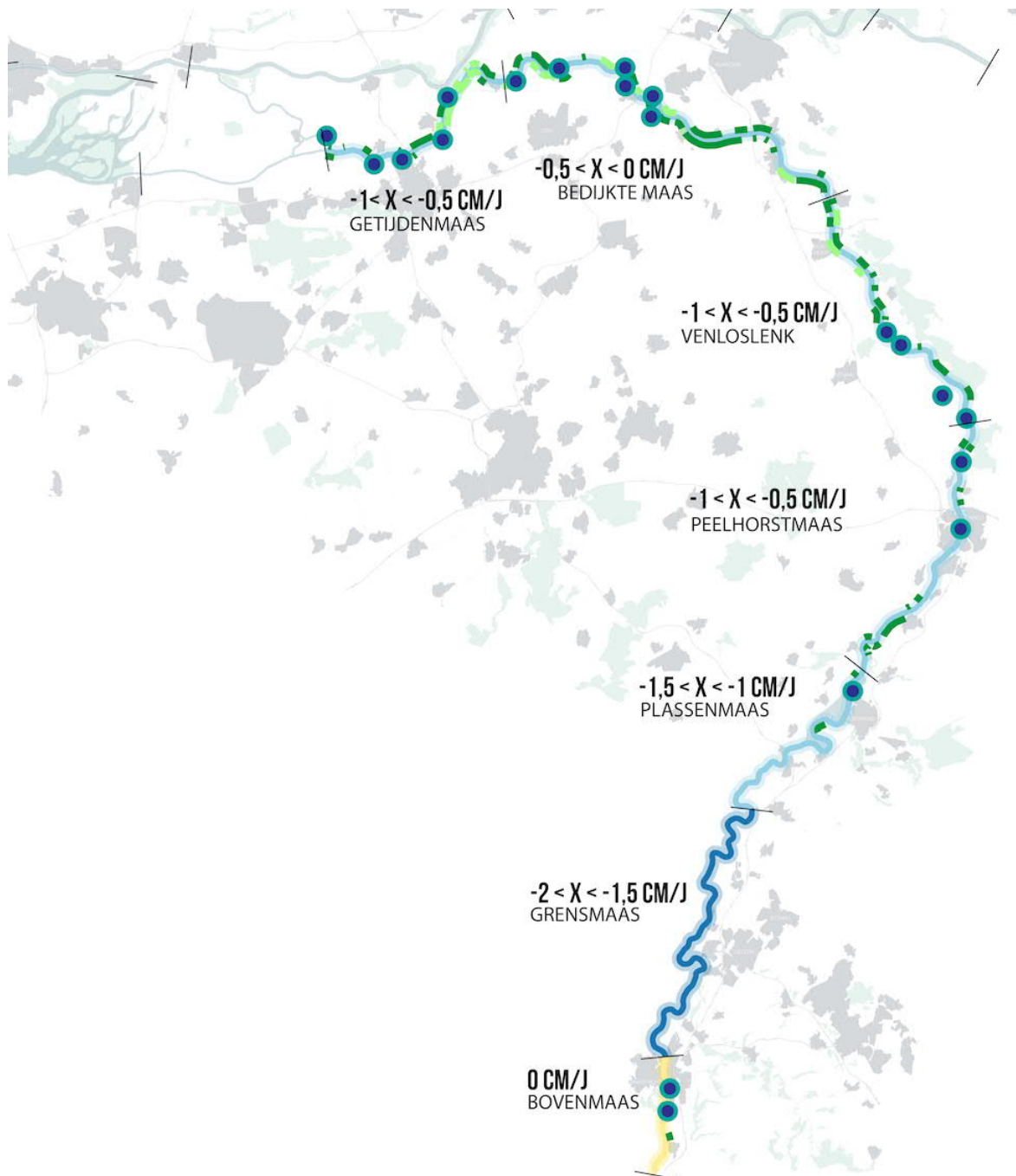
Tabel 2. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling per Maastraject in cm/jaar. De gemiddelde daling van het zomerbed voor de maximale tijdspanne is het gemiddelde sinds de eerste bodempeiling. De gemiddelde daling voor de autonome ontwikkeling is het gemiddelde over de periode waarin geen baggerwerkzaamheden hebben plaatsgevonden; ook zijn deze data exclusief zomerbedverdiepingen. De rechterkolom is de daling in de periode 1995-2007 (Bron: [43]).

Traject	Maximale tijdspanne		Autonome ontwikkeling		Recente ontwikkeling	
	Periode	Gemiddeld (- = erosie)	Periode	Gemiddeld (- = erosie)	Periode	Gemiddeld (- = erosie)
Bovenmaas (km 2-15,4)	1995 – 2007	0	1995 – 2007	0	1995 – 2007	0
Grensmaas (km 15,4-56) ¹⁾	1921 – 2007	-3,2	1970 – 2007	-1,5	1995 – 2007	-3,3
Plassenmaas (km 56-87) ²⁾	1916 - 2007	-2,5	1940 – 2007	-1	1995 – 2007	-2,8
Zandmaas deel Peelhorst (km 87-121)	1916 - 2007	-1	1940 – 2007	-0,7	1995 – 2007	-2,5
Zandmaas deel Venloslenk (km 121-155)	1916 - 2007	-1,2	1942 – 2007	-0,6	1995 – 2007	-2,5
Bedijkte (Beneden) Maas (km 155-200,8) ³⁾	1937 - 2007	-1,9	1942 – 1995	-0,4	1995 – 2007	-6,2
Getijdenmaas (km 200,8-227)	1936 - 2007	-2,4	1942 – 1984	-0,6	1995 – 2007	-4,5

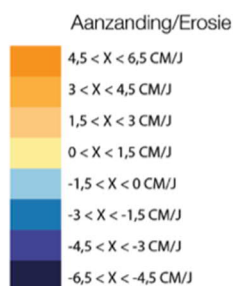
¹⁾De analyse beslaat alleen het traject km 15-53 vanwege beperkte beschikbaarheid data uit 1921 [43].

²⁾De analyse beslaat alleen het traject km 69-87 vanwege beperkte beschikbaarheid data uit 1916 [43].

³⁾De analyse beslaat alleen het traject km 164-200 vanwege beperkte beschikbaarheid data [43].



GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK

GEÏNDUCEERD DOOR:

- Rivierverruiming in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

Figuur 8. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling per Maastraject in cm/jaar. Weergegeven is de gemiddelde daling voor de autonome ontwikkeling. Zie ook de kolom 'Autonome ontwikkeling' in tabel 2; in de figuur zijn de getallen uitgedrukt in bandbreedtes (Bron: [43]).

Bovenmaas

Er wordt nauwelijks zand en grind vanuit Wallonië aangevoerd. In de Bovenmaas vindt geen erosie plaats vanwege de harde ondergrond en vastgelegde oevers. Hier komt dus ook geen sediment beschikbaar [1].

Grensmaas

Het beeld van de Grensmaas aan het eind van de vorige eeuw was dat de rivier hier sediment opneemt uit de oevers en de bedding. De rivier zou hierdoor jaarlijks circa 55.000 m³ zand en grind uit de Grensmaas wegvoeren [1]. Alleen bij extreme hoogwaters zou de afpleisterlaag worden opengeboken en zou het sediment dat daaronder ligt in beweging kunnen komen [27].

Het is niet bekend hoe de sedimentbalans er na de uitvoering van de programma's Zandmaas en Grensmaas uit ziet. De Grensmaas is sterk verruimd. Daardoor nemen de stroomsnelheden en de capaciteit van het water om sediment te transporteren af. Aan de andere kant ligt er door de grootschalige verruiming vers, niet-geroerd materiaal in het zomerbed dat nog niet door een afpleisterlaag is afgedekt. De verwachting is dat dit materiaal bij hoogwater zal wegspoelen. Door de afgenomen stroomsnelheden gaat dit proces langzaam. Door variaties in stroomsnelheden kan lokaal erosie optreden. Het geërodeerde sediment wordt over korte afstand getransporteerd, voordat het in ruimere trajecten weer neerslaat. Fijn sediment kan neerslaan in stroomluwe delen [1].

Als de Grensmaas voldoende grof sediment aangevoerd kreeg, zou de verruiming van de Grensmaas op langere termijn tot een sedimentatie van de verruimde delen leiden. Maar grof sediment wordt, als gevolg van de verstuwings bovenstrooms, amper nog aangevoerd. Zodra de nu tijdelijk beschikbare erodeerbare sedimenten zijn verplaatst, zal de afpleistering van het zomerbed weer gaan domineren [26].

Plassenmaas

Geen bijzonderheden t.o.v. het Maassysteem als geheel (§1.2.1).

Zandmaas

Voor de Zandmaas is aan het eind van de vorige eeuw een jaarlijks zandtransport van gemiddeld 40.000 m³ geschat. Het is niet bekend hoe de sedimentbalans er nu uitziet.

Bedijkte maas

Geen bijzonderheden t.o.v. het Maassysteem als geheel (§1.2.1).

Getijdenmaas

Geen bijzonderheden t.o.v. het Maassysteem als geheel (§1.2.1).

1.3.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Bovenmaas

Geen bijzonderheden t.o.v. het Maassysteem als geheel (§1.2.2).

Grensmaas

De verlaagde weerden kunnen een bron van sediment zijn op plekken waar erodeerbare afzettingen aan de oppervlakte zijn gekomen³. Anderzijds kunnen de verlaagde weerden ook meer slib gaan invangen dan vroeger, waardoor ze sneller gaan aanslibben dan voor de afgraving [26].

Plassenmaas

Geen bijzonderheden t.o.v. het Maassysteem als geheel (§1.2.2).

Zandmaas

Voor de Zandmaas is geconcludeerd dat de morfologische veranderingen onder invloed van beoogde maatregelen, zoals zomerbedverdieping en aanleg hoogwatergeulen, initieel vooral tot lokale effecten leiden. Deze effecten werken terugschrijdend, in bovenstroomse richting door (zie Box 1). Voor de komende 100 jaar zijn de berekende bodemveranderingen rond de verdiepte trajecten van Zandmaas en Grensmaas gering, en zijn slechts lokale (soms tijdelijke) aanzandingen te verwachten ter plaatse van hoogwatergeulen [39].

Bedijkte maas

Geen bijzonderheden t.o.v. het Maassysteem als geheel (§1.2.2).

Getijdenmaas

Geen bijzonderheden t.o.v. het Maassysteem als geheel (§1.2.2).

1.3.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

De impact van grootschalige morfologische ontwikkelingen

§1.2.3 geeft een overzicht van effecten op functies die gelden voor de Maas als geheel. Aanvullend zien we voor specifieke trajecten vooral gevolgen voor de natuur langs de Bedijkte Maas. Figuur 6 geeft een overzicht van de morfologische ontwikkelingen en de gevolgen hiervan voor functies van de Maas.

Langs met name de Bedijkte Maas heeft de natuur op de weerden nu weinig verbinding met de rivier als gevolg van de erosie van het zomerbed en het hoog opgeslibd raken van de weerden.

Weerdverlaging ('meedalen met de rivier') en cyclische verjonging brengen de ecologische verbinding met de rivier terug. Dit vergroot bovendien de afvoercapaciteit. Kansen voor sedimenttransport en gevarieerde riviernatuur ontstaan ook door meer oevers te 'ontstenen' en zo nodig met suppleties te onderhouden [1].

De impact van kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Kleinschalige morfologische ontwikkelingen hebben vooral een impact op functies in de Grensmaas en de Zandmaas:

- Grensmaas: De morfologische ontwikkelingen op de langere termijn, met name de reactie op ingrepen die na 1995 in Nederland en Vlaanderen hebben plaatsgevonden, zijn onbekend en

³ Volgens experts die voor deze analyse zijn geraadpleegd, kunnen met het in beweging komen van fijn sediment van de oevers en de bedding ook zware metalen als zink en cadmium vrijkomen. Deze metalen hebben zich in het verleden aan fijn sediment gebonden en zijn op zomer- en winterbed uitgezakt.

kunnen nog niet worden ingeschat [9]. De beheerskosten kunnen sterk oplopen [14].

- Zandmaas: De Zandmaas is ruimer en dieper geworden door onder meer zomerbedverdiepingen. Op de plaats van de verdiepingen zal zand en grind sedimenteren. Om de waterveiligheid te garanderen zal hier periodiek baggerwerk nodig zijn. Benedenstreams van de verdiepingen zal juist erosie optreden. De nieuwe natuurvriendelijke oevers langs de Zandmaas zullen eroderen, waardoor extra sediment in het water komt [1].

1.4. Doorkijk langere termijn

Mogelijke relevante ontwikkelingen voor de langere termijn (meerdere tot tientallen jaren) zijn [29]:

- Invloed verandering afvoerregime (klimaatverandering) op de bodemligging van de Maas. Op termijn zullen hoge afvoeren vaker voorkomen en hoger worden. Morfologische processen tijdens hoogwater kunnen daardoor worden versterkt. Bovendien zal het aantal hogere afvoeren relatief toenemen. Daardoor neemt de jaarlijkse transportcapaciteit toe en zal het verhang van de rivier, bij een gelijkblijvend sedimentaanbod, af willen nemen. Het gevolg is dat de voortschrijdende erosie wordt versterkt en de rivier zich (verder) zal insnijden.
- Invloed zeespiegelstijging. De zeespiegelstijging leidt tot hogere waterstanden aan de benedenstroomse kant van de rivieren waardoor het waterspiegelverhang van de rivier en de snelheid van het stromende water minder worden. Dit kan sedimentatie benedenstreams versterken (en tot verminderde terugschrijdende erosies leiden). Klimaatverandering kan ook leiden tot een ander beheer van kunstwerken (stuwen, sluizen), waardoor ook de stroming en morfologische processen worden beïnvloed.
- Invloed van verschillen in sedimentsamenstelling van de ondergrond. Waar fijn zand wordt aangesneden kunnen diepe kuilen ontstaan, met mogelijke gevolgen voor de stabiliteit van waterkeringen en oevers.
- Invloed van meerdere maatregelen (Maaswerken) op de Maasbodem, door herverdeling van zomer- en winterbedafvoeren en/of door tijdelijk aanbod van mobiel (fijn) bodemmateriaal na oplevering van uiterwaardverlagingen en/of eroderende Maasoevers.

De morfologie van de Maas is sterk bepaald door menselijke ingrepen en door de interactie met de ondergrond. De geologische opbouw van de Maas is complex en wordt in sterke mate bepaald door de vele van zuidoost naar noordwest georiënteerde breuklijnen in de ondergrond. De verschillende delen, de smalle horsten en slenken, hebben hun eigen tektonische bewegingspatroon wat van invloed is op de morfologie van de rivier. Waar grote ingrepen voor herinrichting van Grensmaas en Zandmaas hebben plaatsgevonden (Maaswerken), zal de toekomstige morfologische ontwikkeling ook door deze ingrepen worden bepaald [9]⁴.

Naar verwachting zal het zomerbed van de Maas nog verder eroderen, als naijlend effect op de normalisatie. De overstromingsfrequentie van uiterwaarden (weerden) zal daardoor afnemen. Het is voornamelijk niet duidelijk of een voortgaande erosie van het zomerbed grote gevolgen kan hebben voor andere functies van en rondom de rivier.

⁴ Experts voegen hieraan toe dat de grote invloed van menselijk ingrijpen op de Maas er toe heeft geleid dat de ontwikkeling van de rivier op lange termijn niet meer te duiden is. De vraag 'Wat wil de rivier zelf?' is voor de Maas niet te beantwoorden.

Een aandachtspunt is de ligging van de thalweg (de lijn van laagste punten) in de Grensmaas. Dit bepaalt immers de grens tussen Nederland en België. De stroomdraad kan verschuiven door morfologische veranderingen in de dwarsrichting van de rivier als reactie op maatregelen nu of in de toekomst (toevoeging expert).

2. Rijn

2.1. Karakter

Afvoerverdeling

Sinds de aanleg van de stuwen in de Nederrijn-Lek, eind jaren '60, wordt gemiddeld over het jaar ca. 68% van het water dat bij Lobith binnenkomt via de Waal afgevoerd, 17% stroomt af via de Nederrijn-Lek en 15% via de IJssel. Alleen voor de maatgevende afvoer bij Lobith, 16.000 m³/s, is de afvoerverdeling wettelijk vastgelegd en wordt gestuurd op het realiseren van deze afvoerverdeling [24]. De beleidsmatige afvoerverdeling komt neer op ongeveer tweederde via de Waal, tweenegende via de Nederrijn-Lek en eennegende via de IJssel.

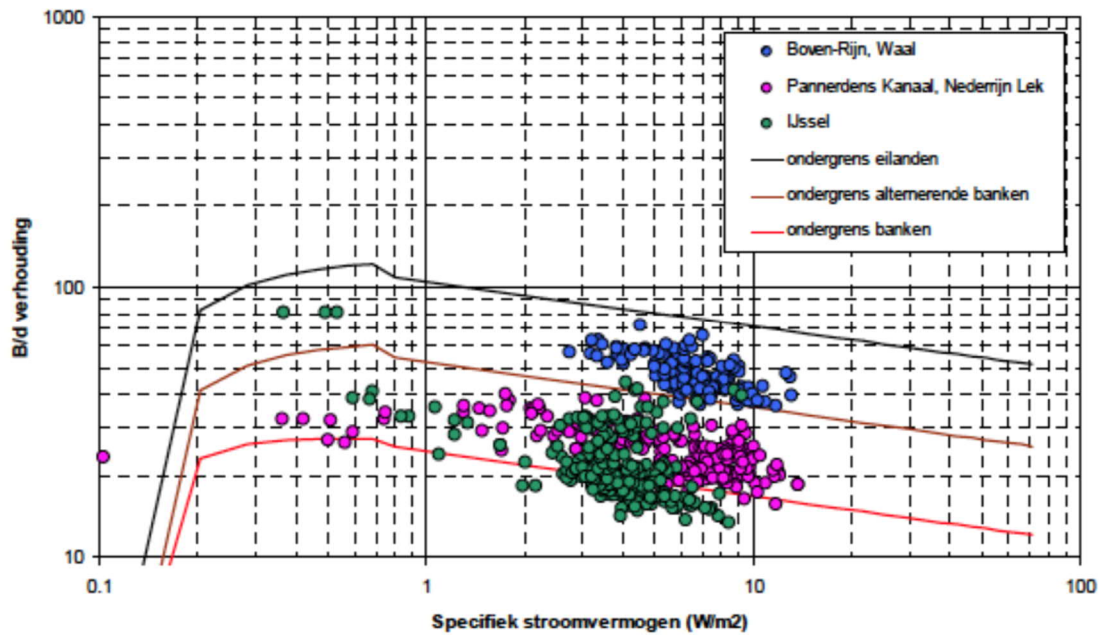
Met de stuwen in de Nederrijn-Lek wordt de verdeling van de afvoer over de IJssel en de Nederrijn-Lek gestuurd als de waterstanden bij Lobith relatief laag zijn. Met regelwerken bij de Pannerdensche Kop (Pannerdensche Overlaat) en de IJsselkop (Hondsbroeksche Pley) kan de afvoerverdeling bij zeer hoogwater worden (bij)gestuurd zodat de beleidsmatige afvoerverdeling kan worden gehandhaafd.

Dynamiek

Onderling zijn er grote verschillen tussen de Rijntakken wat betreft de kracht van de stroming, de grootte van erosie en sedimentatie, en de mate waarin de bodemligging en de oeverzone van de rivier reageren op de variatie van de afvoer door de jaren heen. De morfodynamiek verschilt van tak tot tak. De grootte van die morfodynamiek kan worden uitgedrukt in de combinatie van twee variabelen: de energie van het stromende water en de verhouding tussen de breedte en diepte van de rivier (voor nadere toelichting: zie §1.2.1).

In figuur 9 is dit stroomvermogen voor de Rijntakken uitgezet tegen de breedte/diepte-verhouding (B/d). Alle meetpunten langs de Waal liggen boven in het spectrum: van de Rijntakken heeft de Waal het meest dynamische karakter, de IJssel het minst. In deze figuur is de Nederrijn-Lek vrij stromend (niet gestuwd). In vergelijking met de historische situatie zijn alle riviertakken minder dynamisch geworden, omdat de B/d-verhouding kleiner is geworden [24]. In vergelijking met de Maas (zie §1.2.1) vallen twee dingen op:

- Net als bij de Maas wordt de zwarte lijn, de ondergrens waarbij in de rivier eilanden kunnen worden gevormd, nergens in de Rijntakken overschreden. Net als bij alle Maastrajecten is de morfodynamiek van de Rijntakken te beperkt voor het vormen van eilanden in de rivier.
- In de Waal wordt de ondergrens voor het vormen van een regelmatige afwisseling van banken langs linker- en rechteroever van de rivier (alternerende banken: bruine lijn) wel overschreden (in de Maas slechts op enkele locaties). De Waal is, als enige rivier van de Maas en de Rijntakken, nog dynamisch genoeg om een afwisseling van banken (ondieptes) langs beide oevers te vormen.



Figuur 9. De mate van dynamiek van morfologische processen in de Rijntakken, uitgedrukt in een verhoudingsgetal van de energie van de rivier (x-as) en de verhouding tussen de breedte en diepte van de rivier (y-as) (Bron: [20]).

Het verhang van de waterspiegel van de Waal is vrij constant langs een groot deel van de rivier (ongeveer 10 cm/km); na Zaltbommel neemt het verhang snel af tot vrijwel 0 bij de overgang naar de Merwede. In de IJssel neemt het verhang van boven- naar benedenstrooms heel geleidelijk af; bovenstrooms is het verhang ca. 12 cm/km en iedere 10 km stroomafwaarts wordt het verhang ca. 1 cm/km minder [24].

In de benedenloop van de Waal is het getij bij zeer lage afvoer (< 900 m³/s) merkbaar tot bij Tiel (enkele centimeters), maar bij hogere afvoeren is het getij pas echt merkbaar benedenstrooms van Zaltbommel (ca. 20 cm verschil tussen eb en vloed bij gemiddelde afvoer). Verder stroomafwaarts neemt dit toe tot ca. 45 cm bij Woudrichem [24].

Bij lage Rijnafoeren is de Nederrijn-Lek gestuwd: door middel van 3 stuwen worden de afvoer en het waterpeil gereguleerd. De stuw van Hagestein vormt de grens tussen het gestuwde deel van de Lek en het gedeelte dat in open verbinding staat met het Benedenrivierengebied. Zodra de stuw Hagestein gestreken wordt, kan het getij ook bovenstrooms van de stuw doordringen. De getijslag bedraagt dan in het traject tussen Culemborg en Hagestein ca. 70 cm. Verder bovenstrooms, en ook bij toenemende waterstanden, neemt dit effect langzaam af [24].

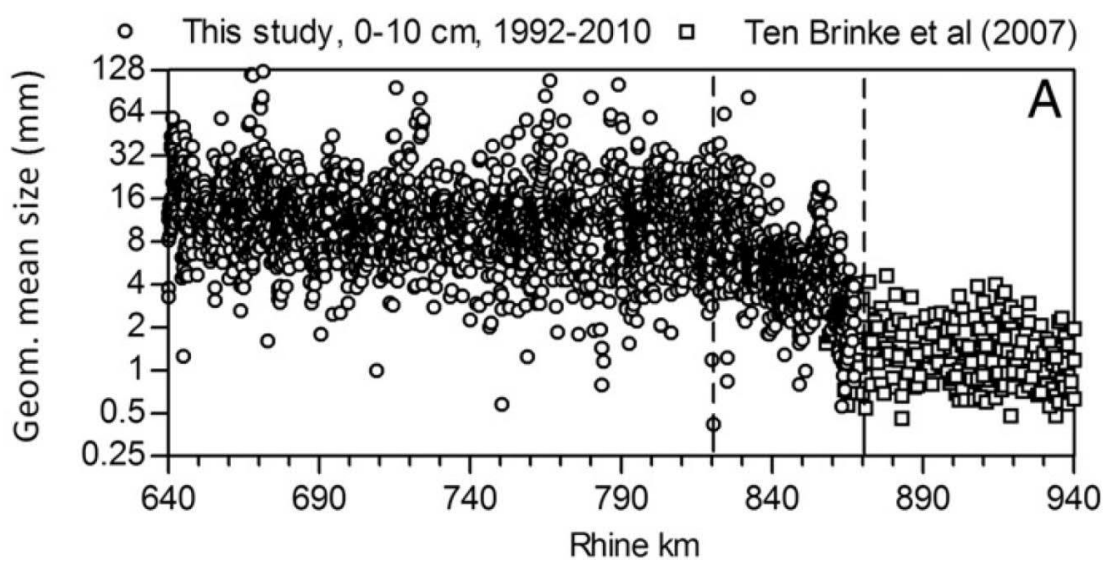
Bij hogere afvoeren worden de stuwen één voor één gestreken en stroomt de Nederrijn-Lek wel vrij af. Stroomafwaarts van Culemborg neemt het verhang van de waterspiegel van de vrij-afstromende rivier snel af [24].

Korrelgrootte zomerbed

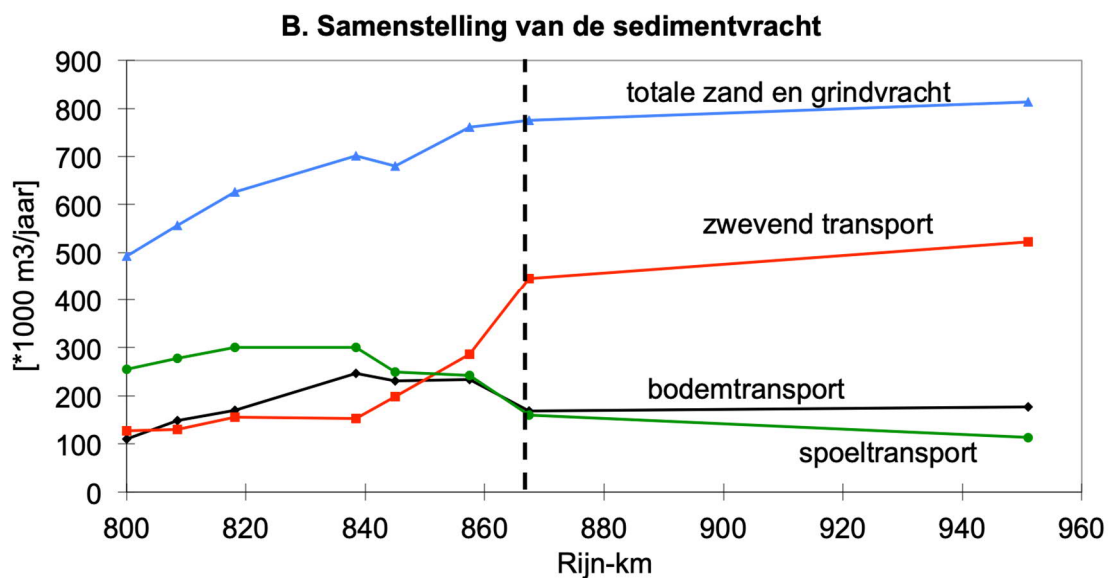
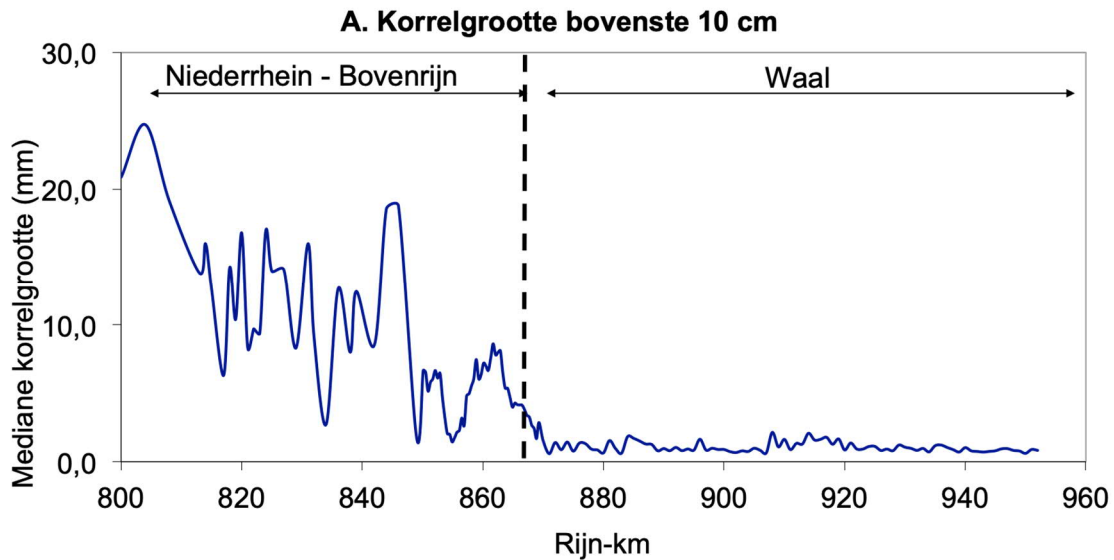
De toplaag van de bedding van de Niederrhein en de Bovenrijn bestaat grotendeels uit grind. Op de overgang van de Bovenrijn naar de Waal en het Pannerdensch Kanaal verandert de korrelgrootte van deze toplaag snel over een korte afstand (figuur 10). Het splitsingspunt Pannerdensche Kop

(rivierkilometer 867: aangegeven met de verticale gestreepte lijn) valt ongeveer samen met een verandering in het karakter van de bedding van grind-gedomineerd naar een mengsel van zand en grind.

Figuur 11 zoomt in op de overgang van de Niederrhein en Bovenrijn naar de Waal en toont zowel de gemiddelde korrelgrootte voor het traject van rivierkm 800 (Niederrhein) tot 950 (Waal) als de samenstelling van het sedimenttransport. Ook in deze figuur is het splitsingspunt Pannerdensche Kop aangegeven met een verticale gestreepte lijn. De figuur laat zien dat de overgang van een grindrijke toplaag van de bedding (Niederrhein – Bovenrijn) naar een zandige toplaag (Waal) gepaard gaat met een verandering van het sedimenttransport van overheersend rollend over de bodem naar meer zwevend transport. De verandering van de samenstelling van de toplaag van de bedding en het sedimenttransport lijken aan elkaar gerelateerd te zijn.

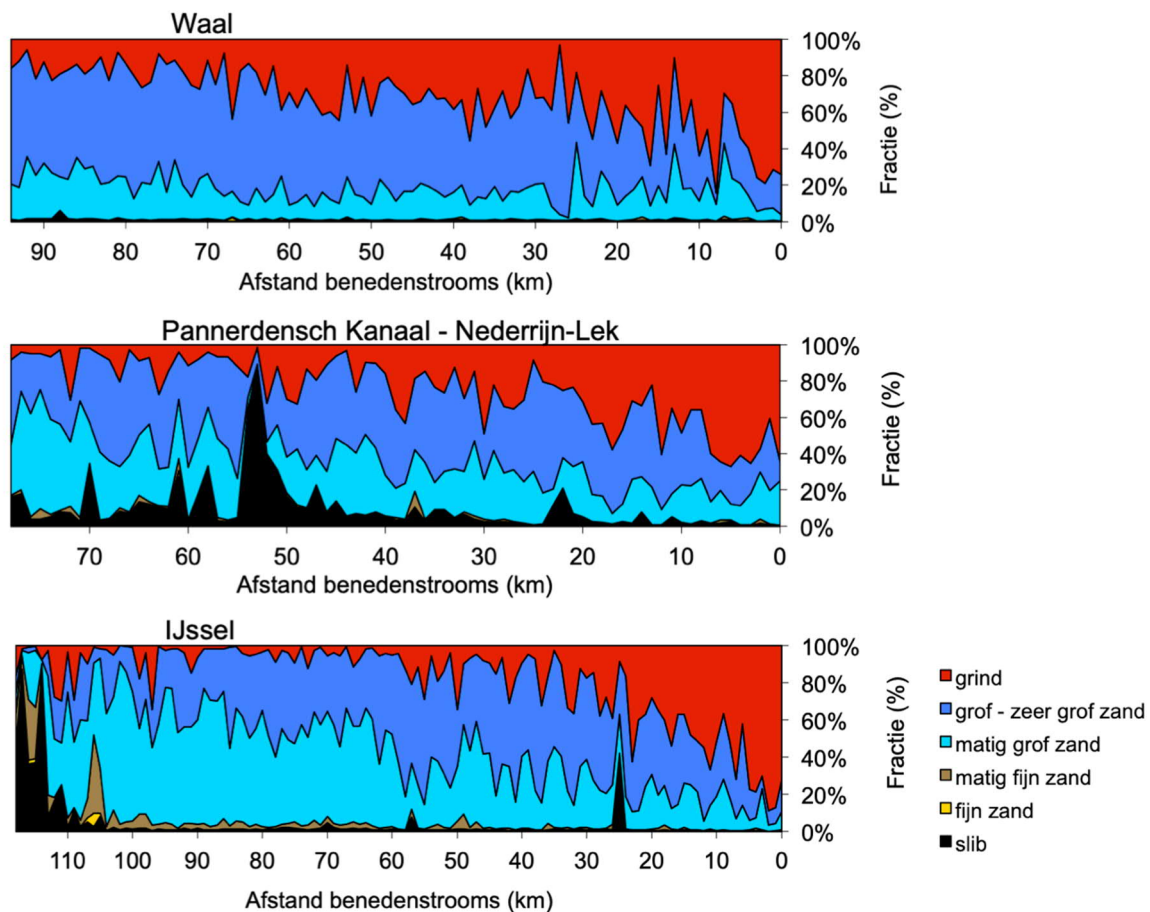


Figuur 10. De korrelgrootte (mm) van de toplaag van de rivierbedding van de Niederrhein (km 640-856), de Bovenrijn (km 856-km 867) en de Waal (km 867-940) (Bron: [15]). De data voor de Niederrhein hebben betrekking op 1992-2010, die voor de Bovenrijn en Waal op 1995.



Figuur 11. De verandering van de korrelgrootte (mm) van de toplaag van de rivierbedding (A) en het transport van zand en grind (B) gaande vanaf de Niederrhein via de Bovenrijn (km 856-km 867) naar de Waal (km 867-940) (Bron: [30]).

De toplaag van de bodem van het zomerbed van de Rijntakken bevat bovenstrooms veel grind. Stroomafwaarts neemt het grindgehalte af en bestaat de bodem vooral uit zand. Op de Nederrijn-Lek kan zich in de stuwpanden een laag slib vormen. Op de IJssel komt slib helemaal benedenstrooms voor, waar de IJssel uitmondt in het Ketelmeer (figuur 12).



Figuur 12. De korrelgrootteverdeling van de bovenste 10 cm van de bodem van het zomerbed van de Bovenrijn en de Waal (figuur boven), het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn-Lek (figuur midden) en de IJssel (figuur onder) (Bron: [30]).

2.2. Het Rijnsysteem als geheel

2.2.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

Bodemosie zomerbed

Het zomerbed van de Rijntakken is in de afgelopen tientallen jaren jaarlijks gemiddeld 1 tot 2 cm dieper komen te liggen (tabel 3). De kolommen in tabel 3 geven een onderscheid weer in twee tijdvakken, met bodemontwikkelingen op basis van twee verschillende methoden: in kolom 5 multibeampelingen sinds 1999 (Bovenrijn en Waal) en 2002 (andere Rijntakken), en in kolom 3 single beam peilingen en handlood (oudste data). Omdat toepassing van beide methoden op de Rijntakken tot verschillen in bodemhoogtes leidt, zijn deze twee datasets niet als één geheel beschouwd. De data in kolom 5 zijn (als bandbreedtes) ook weergegeven in figuur 13.

De erosie was het grootst in Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal en de bovenlopen van de andere Rijntakken. Deze erosie gaat op de bovenlopen nog steeds door. Alleen op de Bovenrijn is de bodemligging in de afgelopen jaren (door suppleties, een vaste laag en/of vergroving van aangevoerd sediment) niet of nauwelijks gezakt (figuur 14) [5].

Halverwege de jaren '90 is gestopt met het grootschalig onttrekken van sediment uit het zomerbed

van de Rijntakken; gebaggerd sediment wordt sindsdien in de rivier teruggestort. De overgang van beide meetmethoden valt ongeveer⁵ samen met deze beleidswijziging.

Tabel 3. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling van verschillende trajecten van de Rijntakken in cm/jaar (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen)', Rijkswaterstaat).

Traject	Maximale tijdspanne (geen multibeam)		Recente ontwikkeling (alle multibeam data)	
		Gemiddeld (- = erosie)		Gemiddeld (- = erosie)
Bovenrijn (km 858-867)	1934 – 1999	-2,0	1999 – 2018	0,1
Boven Waal (km 868 – 885)	1926 – 1999	-1,9	1999 – 2018	-1,9
Midden Waal (km 886 – 933)	1950 – 1999	-1,0	1999 – 2018	-0,4
Beneden Waal (km 934 – 951)	1950 – 1999	-0,2	1999 – 2018	0,1
Pannerdensch Kanaal (km 868 – 876)	1928 – 2002	-3,1	2002 – 2018	-1,1
Boven Nederrijn-Lek Tot stuw Driel (km 877 – 890 ¹⁾)	1928 – 2002	-1,2	2002 – 2018	-0,1
Midden Nederrijn-Lek Stuw Driel - stuw Hagestein (km 893 ¹⁾ – 945 ²⁾ ³⁾	1928 – 2002	-1,9	2002 – 2018	0,6
Beneden Nederrijn-Lek Benedenstrooms stuw Hagestein (km 949 ²⁾ – 970)	1933 – 2002	-1,5	2002 – 2018	0,3
Boven IJssel (km 879 – 888)	1941 – 2002	-2,1	2002 – 2018	-0,5
Midden IJssel (km 889 – 970)	1950 – 2002	-1,8	2002 – 2018	-0,3
Beneden IJssel (km 971 – 1005) ⁴⁾	1950 – 2002	-0,4	2002 – 2018	0,0

¹⁾Nieuw riviergedeelte aangelegde stuw Driel is ca. km 890-893; voor vergelijkbaarheid trends oud – nieuw is dit deel buiten beschouwing gelaten.

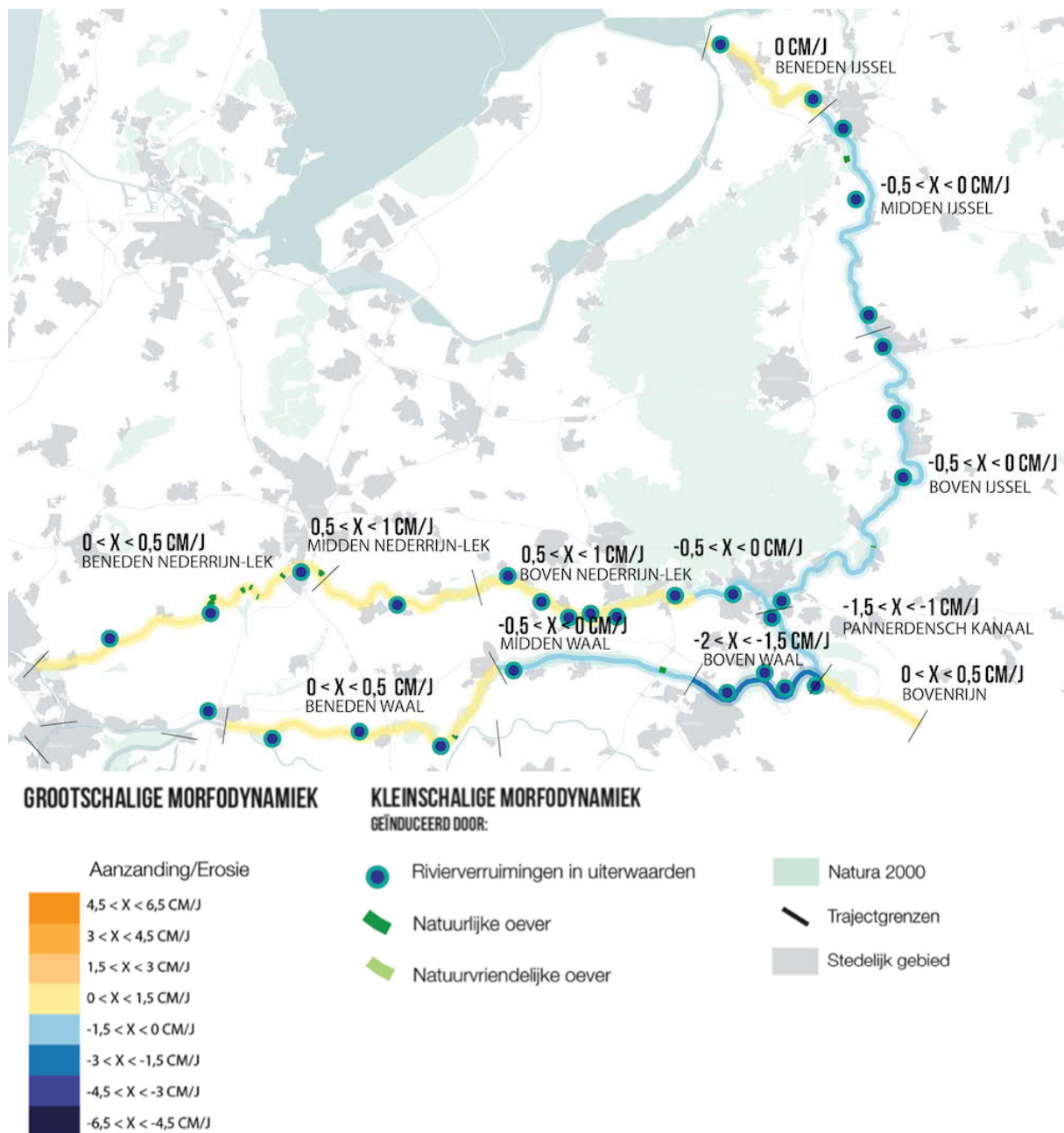
²⁾Nieuw riviergedeelte aangelegde stuw Hagestein is ca. km 945-949; voor vergelijkbaarheid trends oud – nieuw is dit deel buiten beschouwing gelaten.

³⁾Nieuw riviergedeelte aangelegde stuw Amerongen is ca. km 920-927; voor vergelijkbaarheid trends oud – nieuw is dit deel buiten beschouwing gelaten.

⁴⁾Jaren 2016 t/m 2018 weggelaten i.v.m. verlaging zomerbed (maatregel zomerbed RvdR).

De bodemdaling werkt door op het aantal dagen dat de stuwen op de Nederrijn-Lek dicht staan. Het sluiten van de stuwen op de Nederrijn-Lek wordt gestuurd op basis van de waterstand bij Lobith. Door de opgetreden bodemerosie op de Bovenrijn komen lagere waterstanden vaker voor en is de Nederrijn-Lek dus vaker gestuwd. Er gaat dus ook vaker meer water naar de IJssel die zich daardoor verder insnijdt (als er niet ook meer sediment meekomt) waardoor nog meer water naar de IJssel gaat. Deze positieve terugkoppeling zet zich net zo lang door totdat de daling van de Bovenrijn stopt of het stuwprogramma wordt aangepast. Het niet aanpassen van het stuwprogramma aan de opgetreden bodemdaling op de Bovenrijn heeft dus een effect op de langjarige afvoerverdeling en het morfologisch gedrag van (in ieder geval) het splitsingspunt IJsselkop.

⁵ Binnen de dataset van single beam en handlood peilingen is geen onderscheid gemaakt in een periode voor en na de beleidswijziging t.a.v. het teruggestorten van gebaggerd sediment. Deze beleidswijziging heeft mogelijk effect op slechts een paar jaar uit deze reeks en zal de berekende langjarige bodemontwikkeling op basis van deze dataset niet noemenswaardig beïnvloeden.



Figuur 13. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling van verschillende trajecten van de Rijntakken in cm/jaar. Weergegeven is de gemiddelde daling voor de periode waarover multibeam peilingen beschikbaar zijn. Zie ook de kolom 'Recente ontwikkeling' in tabel 3 (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen'), Rijkswaterstaat).

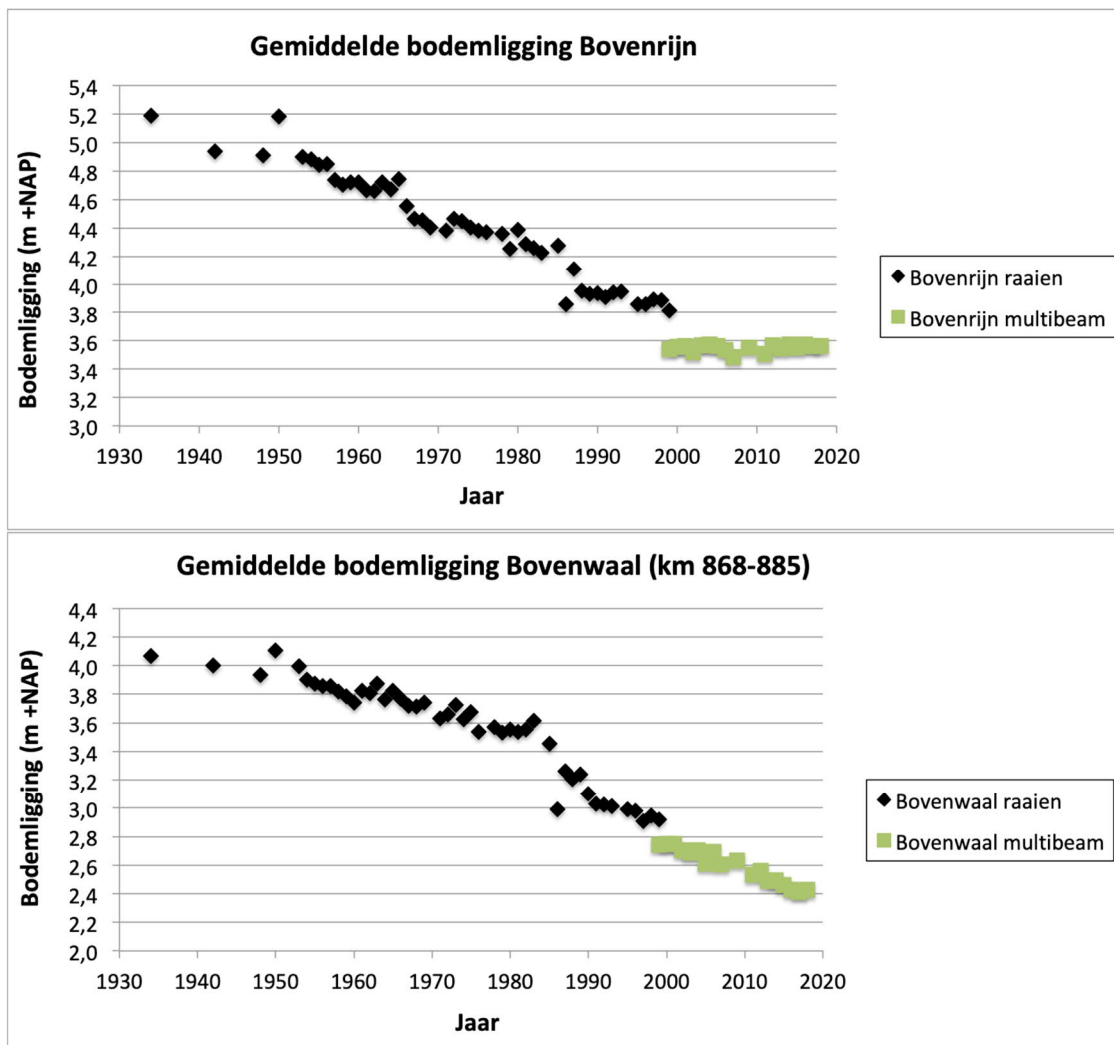
Oorzaken grootschalige bodemerisatie

De grootschalige veranderingen in de bodemligging van het zomerbed van de Maas en de Rijntakken zijn het gevolg van verschillende factoren. Onderstaand overzicht van deze factoren is gegeven in relatie tot de bodemerisatie van de Waal [28]. Deze factoren gelden feitelijk ook voor de andere Rijntakken en de Maas:

- Ingrepen in de rivier (normalisatie, zand- en grindwinning, graven Nieuwe Merwede, zie ook [30]). Met de normalisaties in de tweede helft van de 19^e en de eerste helft van de 20^e eeuw is het zomerbed van de Rijntakken rechter getrokken en versmald. De rivier reageert hierop door zijn verhang aan te passen. Het verhang wordt kleiner: het bodemprofiel van de rivier

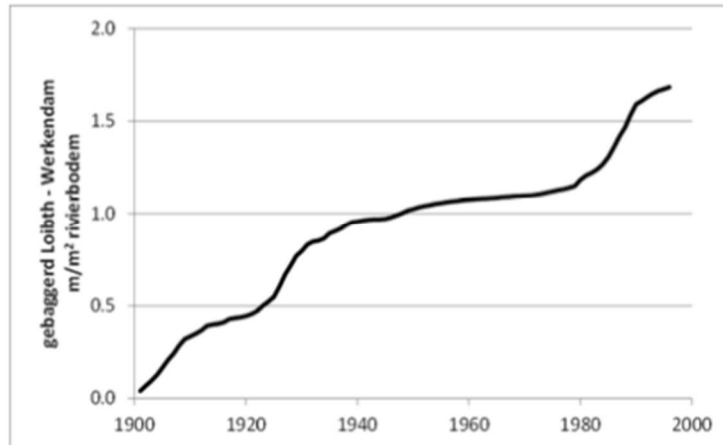
kantelt om het benedenstroomse punt (de Rijn-Maasmonding) en de rivier snijdt zich dus stroomopwaarts in. Ook de aanleg van de Nieuwe Merwede heeft hier invloed op gehad. Deze aanpassing is versneld door de grote hoeveelheden zand en grind die in de 20^e eeuw aan de Rijntakken zijn onttrokken. Voor de Bovenrijn en Waal komt deze zand- en grindwinning neer op een verlaging van de bodem van ongeveer 1,5 m (zie figuur 15).

- Een beperkte aanvoer van sediment. De aanvoer van zand en grind vanuit Duitsland is beperkt doordat een deel van dit sediment daar wordt ingevangen in relatief diepe delen van het zomerbed (onder meer als gevolg van bodemdalingen door mijnbouw) en doordat de insnijding in de bedding daar in de afgelopen tientallen jaren heeft geleid tot een afpleistering van de bedding. Deze afpleistering betekent dat zand en fijn grind zijn uitgespoeld en grof grind is blijven liggen; die grove toplaag voorkomt dat het materiaal dat daar onder ligt, in beweging komt. Ten aanzien van de aanvoer vanuit Duitsland geldt bovendien dat deze wordt beïnvloed door het sedimentmanagement op de Niederrhein: door suppleties met relatief grof sediment komt minder en grover sediment Nederland binnen.



Figuur 14. Verandering in de bodemligging (t.o.v. NAP) van de Bovenrijn (boven: gemiddeld over het hele traject) en de bovenloop van de Waal (onder: gemiddeld over de meest stroomopwaartse 17 km) in de afgelopen 80-90 jaar. De sprong tussen de zwarte en de groene data is een verschil in meetmethode (single-versus multibeam) (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen', Rijkswaterstaat).

De aanvoer van zand en grind uit Duitsland is recent berekend op basis van een uitgebreide analyse van sediment transportmetingen en de bodemligging van de Niederrhein [15]. Geconcludeerd is dat in de periode 1991-2010 jaarlijks gemiddeld 0,66 miljoen ton (spreiding (onzekerheid) rond dit getal: $\pm 26\%$) zand en grind bij Lobith de Nederlandse Rijn binnenkomt⁶. Volgens de onderzoekers wijkt deze hoeveelheid niet significant af van het sedimenttransport naar de Nederlandse Rijndelta in het Holoceen voordat de mens in de rivier ingreep. Overigens is het aandeel grind in de sedimenttoevoer vanuit Duitsland nu wel veel hoger dan in de tijd voordat de mens in de rivier ingreep [16].



Figuur 15. De gemiddelde dikte van de bodemlaag van de Bovenrijn en Waal die in de afgelopen eeuw door zand- en grindwinning aan de rivier is onttrokken (Bron: [28]).

Trends ontwikkeling bodemligging en afvoerverdeling Rijntakken

Figuur 16 toont de ontwikkeling van de bodemligging van de Bovenrijn en het Pannerdensch Kanaal, en van de bovenlopen van de Waal, Nederrijn en IJssel. Figuur 17 laat zien hoe de afvoerverdeling zich tussen 1991 en 2016 heeft ontwikkeld.

In de periode 1991-2016 is de bovenloop van de Waal sneller geërodeerd dan het Pannerdensch Kanaal; als gevolg hiervan gaat bij het splitsingspunt Pannerdensch Kop geleidelijk meer water (en sediment) naar de Waal en minder naar het Pannerdensch Kanaal.

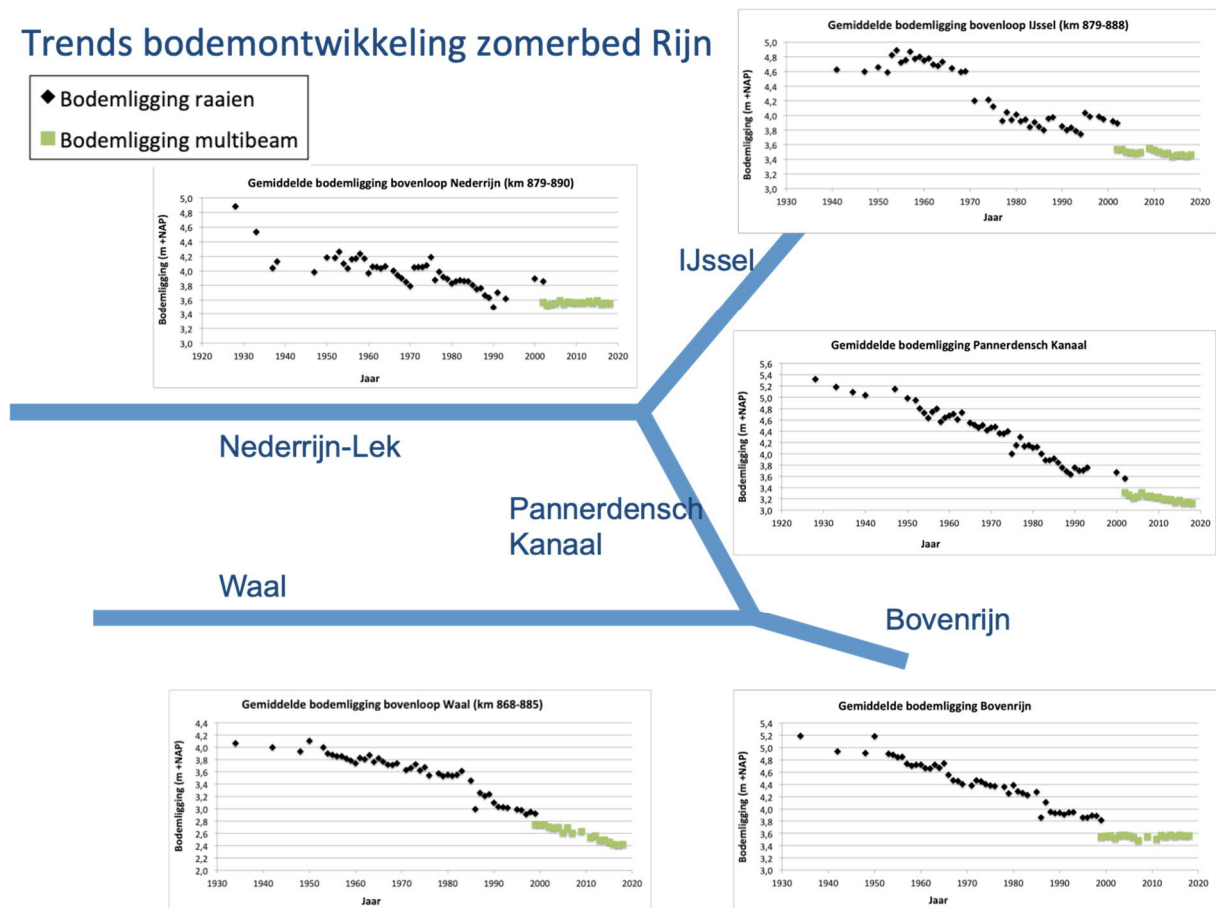
Voor de veranderingen van de afvoerverdeling bij de splitsingspunten zijn niet alleen de trends in de bodemligging van belang, maar ook het feit dat de Nederrijn-Lek gestuwd wordt op basis van de waterstand bij Lobith: een effect van de bodemdaling van de Bovenrijn in de afgelopen tientallen jaren is dat waterstanden bij Lobith onder een bepaalde waarde steeds vaker zijn gaan voorkomen en de stuwen dus vaker dichtgaan. Dit is in figuur 17 duidelijk te zien: bij een afvoer van de Bovenrijn bij Lobith tussen de 1500 en 1700 m³/s is de Nederrijn-Lek nu nog volledig gestuwd, terwijl de stuwen bij deze afvoeren in 1991 al deels geopend waren. Deze combinatie van effecten heeft

⁶ Er zijn in het verleden verschillende sedimentbalansen voor de Niederrhein en voor de Nederlandse Rijntakken opgesteld. De getallen voor het jaargemiddelde transport van zand en grind in deze balansen verschilt onderling. Dit kan komen doordat de balansen uitgaan van verschillende tijdvakken voor de ontwikkeling van de bodemligging de rivierbedding, verschillende sedimenttransportmetingen en verschillende aannames voor de sedimentdichtheid/porositeit bij de omrekening van volumes naar hoeveelheden sediment. Het getal van 0,66 miljoen ton/jaar heeft betrekking op het tijdvak 1991-2010. De sedimentbalans van Ten Brinke et al. (zie [30]) geeft voor de Bovenrijn de waarde 0,85 miljoen ton/jaar en heeft betrekking op het tijdvak 1990-2000. Gezien de grootte van de onzekerheidsmarges rond deze getallen kan niet worden gesteld dat deze getallen significant van elkaar verschillen.

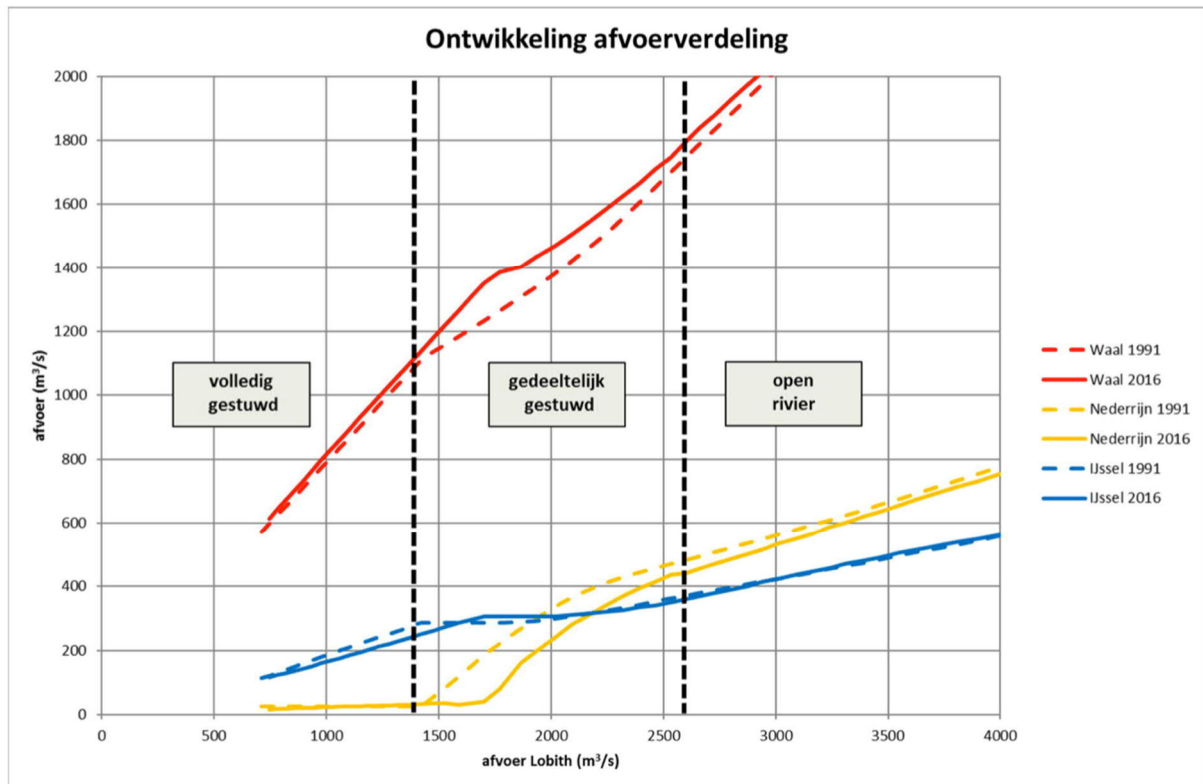
gevolgen voor het deel van de Bovenrijnafvoer dat naar de IJssel gaat:

- ⇒ Bij heel lage afvoeren op de Bovenrij en gesloten stuwen vertaalt de afname van het deel dat naar het Pannerdensch Kanaal zich in een afname van de afvoer over de IJssel.
- ⇒ Bij hogere afvoeren, als de stuwen in de Nederrijn-Lek getrokken zijn en deze Rijntak vrij afstroomt, trekt de IJssel meer afvoer doordat de bovenloop van de IJssel erodeert. Voor de IJssel is het gecombineerde effect van minder afvoer naar het Pannerdensch Kanaal maar daarvan wel weer een groter deel naar de IJssel dat het deel van de Bovenrijnafvoer dat naar de IJssel gaat niet veel is veranderd.

Trends bodemontwikkeling zomerbed Rijn



Figuur 16. Trends van de ontwikkeling van de dwarsdoorsnede gemiddelde bodemligging van de (bovenlopen van de) Rijntakken.



Figuur 17. Trends van de ontwikkeling van de verdeling van de Rijnaflower over de Rijntakken tussen 1991 en 2016 (Bron: M. Schropp).

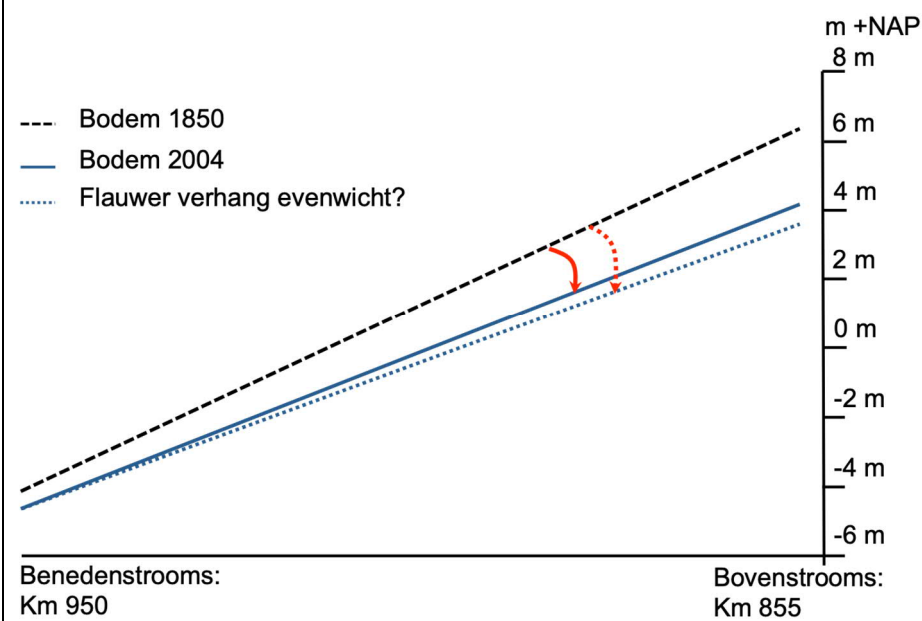
Toekomstverwachtingen

De bodemligging van de Rijntakken ontwikkelt zich naar een nieuwe evenwichtsligging. Er zijn veel factoren die samen deze toekomstige ontwikkeling bepalen. Hoe de evenwichtsligging er uit ziet is op dit moment niet te zeggen. In rapportages is vooral veel aandacht voor de bodemontwikkeling van de Bovenrijn en Waal. Experts verschillen van mening hoe deze ontwikkeling zich in de komende tientallen jaren zal doorzetten: is dit traject met de huidige grootschalige bodemerosie al een eind op weg naar een bedding met een flauwer verhang (zie Box 3) of leidt een vergroving van aangevoerd sediment uit Duitsland op het bovenstroomse traject tot een steiler verhang (Box 4)?

Box 3

Hypothese 1: op weg naar een flauwer verhang van de bedding?

De normalisaties in het verleden hebben het zomerbed van de Rijn takken rechter getrokken en versmald. De energie van het afstromende water is hierdoor toegenomen. Het verhang van de bedding van de rivier is feitelijk te steil in relatie tot de water- en sedimentbeweging van de rivier. De rivier zal zich aanpassen tot een nieuw evenwicht is bereikt. Dat nieuwe evenwicht is een rivier met een flauwer verhang (figuur 18). De rivier kan dat flauwere verhang alleen maar krijgen door zich bovenstrooms in te snijden (de bodem benedenstrooms ligt min of meer vast doordat deze is gekoppeld aan het zeeniveau). Het bodemprofiel van de rivier kantelt om het benedenstroomse punt (de Rijn-Maasmonding). Ook de aanleg van de Nieuwe Merwede heeft hier invloed op gehad: over deze tak is de afstand van de Merwede naar de monding verkleind.



Figuur 18. Hypothese 1: Het verhang van de rivier wordt flauwer doordat het zomerbed zich bovenstrooms insnijdt en kantelt om het benedenstroomse punt. Een groot deel van de verflauwing is in de afgelopen 1,5 eeuw al gerealiseerd. Mogelijk zet die verflauwing nog verder door.

Box 4

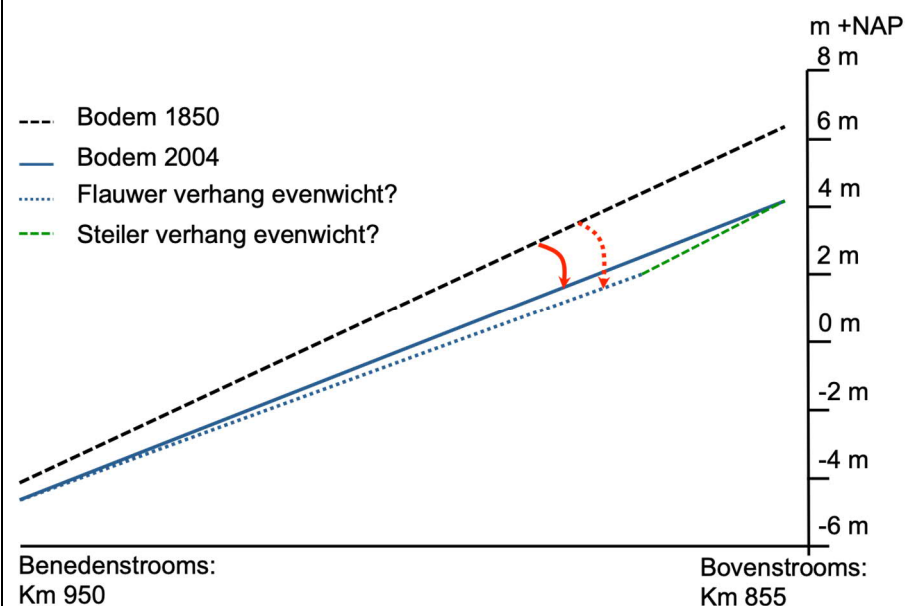
Hypothese 2: op weg naar een steiler verhang van de bedding?

Volgens experts kan het grover worden van de sedimentaanvoer uit Duitsland ook een rol spelen bij de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Rijntakken. Het kost meer energie om grover sediment te verplaatsen. De rivier zal zich op grover sediment aanpassen door zijn verhang te versteilen totdat het verhang van de rivier, en dus de sterkte van de stroming om sediment te verplaatsen, weer in evenwicht is met het grovere sediment. Mogelijk treedt dit steiler worden van het verhang in Nederland met name in de Bovenrijn op en leidt een combinatie van een flauwer verhang benedenstrooms van de Pannerdensch Kop (hypothese 1) en een steiler verhang van de Bovenrijn (hypothese 2) tot een meer concaaf profiel van, bijvoorbeeld het traject Bovenrijn - Waal (figuur 19). Beide hypothesen kunnen immers ook goed samengaan.

Voordat de mens de Rijn met ingrepen veranderde was de Niederrhein een zandrivier. De toplaag van de bedding bestond voor meer dan 90% uit zand [16]; deze toplaag bevat nu minder dan 25% zand [40]. Er komt nu aanzienlijk meer grind de Nederlandse Rijndelta binnen ten koste van de aanvoer van zand. Experts noemen 3 mogelijke redenen voor deze vergroving van het sediment:

- (1) vergroving van de toplaag in de bedding van de Rijn in Duitsland doordat het fijne sediment daaruit is weggespoeld en van bovenstrooms te weinig fijn sediment wordt aangevoerd om dit te compenseren;
- (2) door voortgaande bodemerrosie in Duitsland worden daar nu grovere afzettingen uit het Pleistoceen aangesneden dan vroeger;
- (3) in Duitsland wordt al enkele tientallen jaren grof sediment in de rivier gesuppleerd om bodemerrosie tegen te gaan.

Als het van bovenstrooms aangevoerde sediment grover wordt, zou benedenstrooms meer erosie van de bedding kunnen optreden omdat de rivier het benedenstroomse, fijnere sediment gemakkelijker kan transporteren dan het grovere sediment bovenstrooms. Het zou kunnen dat de vergroving van de sedimentaanvoer vanuit Duitsland nu al bijdraagt aan de bodemerrosie in de (Boven)waal en het Pannerdensch Kanaal [5]. Deze hypothese zal de komende jaren door de TU Delft worden onderzocht.



Figuur 19. Hypothese 2 (groene lijn): Het verhang van de rivier wordt in de bovenloop van de Waal en de Bovenrijn steiler door het grover worden van het uit Duitsland aangevoerde sediment, totdat het verhang van de rivier, en dus de sterkte van de stroming om sediment te verplaatsen, weer in evenwicht is met het grovere sediment. Mogelijk erodeert de bedding van de Bovenrijn niet verder of komt deze door grindaanvoer vanuit Duitsland nog wat hoger te liggen.

Sedimentatie winterbed

Tijdens hoge afvoeren bezinken slib en fijn zand op de uiterwaarden langs de Rijntakken. Deze sedimentatie is tijdens het hoogwater van 1993 gemeten op uiterwaarden langs de Maas en de Waal. De gemeten sedimentatie was voor beide rivieren van dezelfde orde van grootte: 1 – 2 kg/m² langs de Maas en 1,2 – 4 kg/m² langs de Waal [45].

2.2.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Reactie op maatregelen Ruimte voor de Rivier⁷

In §1.2.2 is voor de Maas beschreven hoe ingrepen met lokale effecten op de water- en sedimentbeweging tot kleinschalige morfologische ontwikkelingen kunnen leiden. Dit geldt ook voor maatregelen in de Rijntakken, zoals die van het programma Ruimte voor de Rivier. Ook die kunnen leiden tot meer dynamiek van de bedding waarbij ondieptes worden gevormd die moeten worden weggebaggerd.

De ondieptes kunnen worden versterkt door duinen die bij hoogwater op de bedding worden gevormd. Tabel 4 geeft een overzicht van de hoogste duinen die in de afgelopen 30 jaar op de bedding van verschillende Rijntakken zijn gemeten. Over het algemeen geldt: hoe hoger de afvoer, hoe hoger (en langer) de duinen. Het groeien van de duinen ijlt na op de afvoer. De duinen zijn het hoogst als de afvoer alweer afneemt en vlakken pas weer af als de afvoergolf gepasseerd is. Daardoor kan de scheepvaart bij lagere afvoeren na een hoogwater last hebben van de ondieptes door duinen die tijdens hoogwater zijn ontstaan.

In de eerste jaren na de realisatie van de maatregelen van Ruimte voor de Rivier is vooral sprake van een initiële respons. Maatregelen in uiterwaarden leiden ertoe dat tijdens hoogwaters meer water vanuit het zomerbed, cq. de vaargeul, de uiterwaarden in- en uitstroomt. Hierdoor zand het zomerbed ter plaatse van de instroming naar de uiterwaarden aan (met enkele decimeters), en schuurt het zomerbed uit waar het water vanuit de uiterwaarden weer het zomerbed instroomt. Bij langsdammen en kribverlaging zal sprake zijn van een meer frequente verandering van stroming in het winterbed, en zal over lange trajecten sprake zijn van verondieping of verdieping [28].

De maatregelen van het programma Ruimte voor de Rivier hebben de afvoercapaciteit van de rivier vergroot. Langs de Rijntakken zijn verschillende maatregelen gerealiseerd, op de ene plek in het zomerbed, op een andere in het winterbed. De maatregelen beïnvloeden de stroming waardoor lokaal ook morfologische aanpassingen optreden. Vanwege het verschillende karakter van de maatregelen zijn die morfologische aanpassingen ook verschillend [25]:

- De omvang van de erosie- en sedimentatie hangt af van de lokale bodemhoogte, locatie van de maatregel in de rivier (binnen- en buitenbocht), e.d;
- De omvang van de erosie- en sedimentatie hangt af van de hoogte van afvoeren en de frequentie daarvan, en kan dus van jaar tot jaar verschillen;

⁷ Er zijn in de afgelopen jaren ook maatregelen uitgevoerd die niet onder het programma Ruimte voor de Rivier vielen, maar bijvoorbeeld onder de Kaderrichtlijn Water of NURG (Nadere Uitwerkingen Rivierengebied). De morfologische impact van deze maatregelen is kleiner dan die van Ruimte voor de Rivier, en wordt hier daarom niet specifiek benoemd.

- De vormgeving van een maatregel bepaalt de interactie met de water- en sedimentbeweging in de rivier, en daarmee ook de grootte van het morfologisch effect;
- Vaak bestaat een rivierverruiming uit combinaties van verschillende maatregelen. Het morfologisch effect is niet de som van de effecten van deze maatregelen; de samenwerking en beïnvloeding is veel complexer.

De meeste maatregelen hebben initieel, binnen een termijn van enkele jaren, geen effect op de grootschalige, lange termijn bodemerrosie; de effecten zijn daarvoor te lokaal. Deze effecten werken wel terugschrijdend, in bovenstroomse richting door (zie Box 1), maar dit proces verloopt, in verhouding tot de snelheid van de grootschalige bodemerrosie, erg traag. Een uitzondering is de kribverlaging langs de Waal: die is over een grote lengte gerealiseerd en zal over een grote lengte initieel, binnen enkele jaren al enigszins tot aanzanding van het zomerbed leiden. De processen achter deze aanzanding staan los van de processen achter de verhangaanpassing volgens de twee hiervoor beschreven hypothesen. Deze aanzanding zal de autonome processen (waaronder de langjarige trend van bodemerrosie van het zomerbed in de afgelopen 1,5 eeuw) nauwelijks beïnvloeden [28].

Tabel 4. De hoogst gemeten duinen met bijbehorende lengten bij hoge en lage afvoeren op een viertal meetlokaties in de Rijntakken (Bron: [44]).

Locatie	Jaar	Hoogst gemeten lokale afvoer (m ³ /s)	Hoogst gemeten duin (m)	Lengte hoogst gemeten duin (m)
Bovenrijn (Pann. Kop)	1994	5415	0,78	57,1
Bovenrijn (Pann. Kop)	1995	11885	1,40	31,6
Bovenrijn (Pann. Kop)	1997	6926	0,58	14,8
Bovenrijn (Pann. Kop)	1998	9476	1,13	26,0
Pannerdensch Kanaal (Pann. Kop)	1997	2323	0,41	11,9
Pannerdensch Kanaal (Pann. Kop)	1998	3314	0,68	22,2
Waal (Pann. Kop)	1997	4603	0,39	11,8
Waal (Pann. Kop)	1998	6177	0,54	12,9
Waal (Druten)	1989	1774	0,78	39,5
Waal (Druten)	1990	2104	0,89	39,0
Waal (Druten)	1992	2311	0,70	35,5
Waal (Druten)	1994	2956	1,26	38,3
Waal (Druten)	1995	7008	1,14	37,1
Waal (Druten)	1997	4660	1,14	38,7
Waal (Druten)	1998	6135	1,24	40,6

De morfologische effecten van verschillende maatregelen kunnen elkaar beïnvloeden: effecten kunnen daardoor worden versterkt of afgezwakt. Ook zullen opeenvolgende trajecten van aanzanding en erosie zich als uitdempende golven door de rivier verplaatsen [28]. Uit een verkennende studie is geconcludeerd dat de maatregelen van Ruimte voor de Rivier de omvang van het onderhoudsbaggerwerk met ongeveer 10% kunnen doen toenemen [34].

Interactie zomerbed - winterbed

Door maatregelen in het winterbed, maar ook door klimaatverandering en ander landgebruik bovenstrooms kan de overstromingsfrequentie van het winterbed en/of het aanbod aan (fijn) sediment veranderen, en daarmee ook de snelheid van ophoging van het winterbed. Volgens schattingen op basis van de klimaatscenario's van het KNMI kan de sedimentatie op de uiterwaarden van de Rijntakken deze eeuw met ongeveer 60% toenemen doordat hoge afvoeren, waarbij de uiterwaarden meestromen, vaker voorkomen [19].

2.2.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

Per traject is voor de Maas, de Rijntakken en de Rijn-Maasmonding in kaart gebracht waar infrastructuur en kunstwerken liggen die voor verschillende functies (scheepvaart, telecom en nutsvoorzieningen, waterveiligheid, zoetwatervoorziening) van belang zijn. Ook zijn de locaties van KRW-maatregelen aangegeven. Deze kaarten zijn in de bijlage bij dit rapport opgenomen. Morfologische ontwikkelingen kunnen negatieve effecten hebben op deze infrastructuur, kunstwerken en maatregelen.

De impact van grootschalige morfologische ontwikkelingen

Op langere termijn ondervinden verschillende functies negatieve gevolgen van de bodemerrosie. Figuur 20 geeft een overzicht van de morfologische ontwikkelingen en de gevolgen hiervan voor functies van de Rijn. De gevolgen zijn [21,28]:

- Problemen met de functionaliteit van vaste constructies, bv. drempels bij sluizen en de stabiliteit van kades, kribben en brugpijlers;
- Er zullen meer voorzieningen (pompen) nodig zijn om de levering van zoetwater aan het regionale watersysteem te kunnen blijven garanderen (als gevolg van lagere waterstanden in de rivier). Met die voorzieningen wordt (economische) schade aan landbouw en natuur voorkomen die als gevolg van verdroging kan ontstaan (lagere (grond)waterstanden);
- De afvoerverdeling op de beide splitsingspunten (Pannerdensch Kop en IJsselkop) zal bij niet-ingrijpen uiteindelijk gaan wijzigen [48,49]. Deze verandering is in de afgelopen jaren al een beetje opgetreden (zie figuur 16 en figuur 17). Dat is uiterst ongewenst:
 - ⇒ hoogwatersituaties: vanwege de hoogwaterveiligheid teveel (meer dan beleidsmatig is vastgelegd) water over een Rijntak geeft op deze tak extra overstromingsrisico. Programma's als Ruimte voor de rivier, Kaderrichtlijn Water, en het (toekomstige) Deltaprogramma Rivieren gaan daarom ook uit van het in stand houden van de beleidsmatig vastgestelde afvoerverdeling op de beide splitsingspunten;
 - ⇒ laagwatersituaties: te weinig water over een specifieke Rijntak geeft problemen voor de scheepvaart (minder aflaaddiepte) en voor de zoetwatervoorziening aan het regionale watersysteem. Hier staat tegenover dat een andere tak wel meer afvoer heeft en de negatieve gevolgen van bodemerrosie daar, voor die omstandigheden, worden beperkt.

Volgens een groep van experts is het systeem uit balans gebracht, al sinds de normalisaties in de 19^e eeuw, en wordt het nog verder uit balans gebracht. Zij benadrukken dat het Rijnsysteem zijn grenzen kent en wanneer deze overschreden worden dit gepaard gaat met een voortdurende, en mogelijk toenemende, onderhoudsopgave [11].

Bij kleinschalige morfologische ontwikkelingen gaat het veelal om ondieptes voor de scheepvaart. Deze hebben een effect op de omvang van het vaargeulonderhoud en leveren daardoor hinder op voor de scheepvaart.

2.3. Bovenrijn en Waal

2.3.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

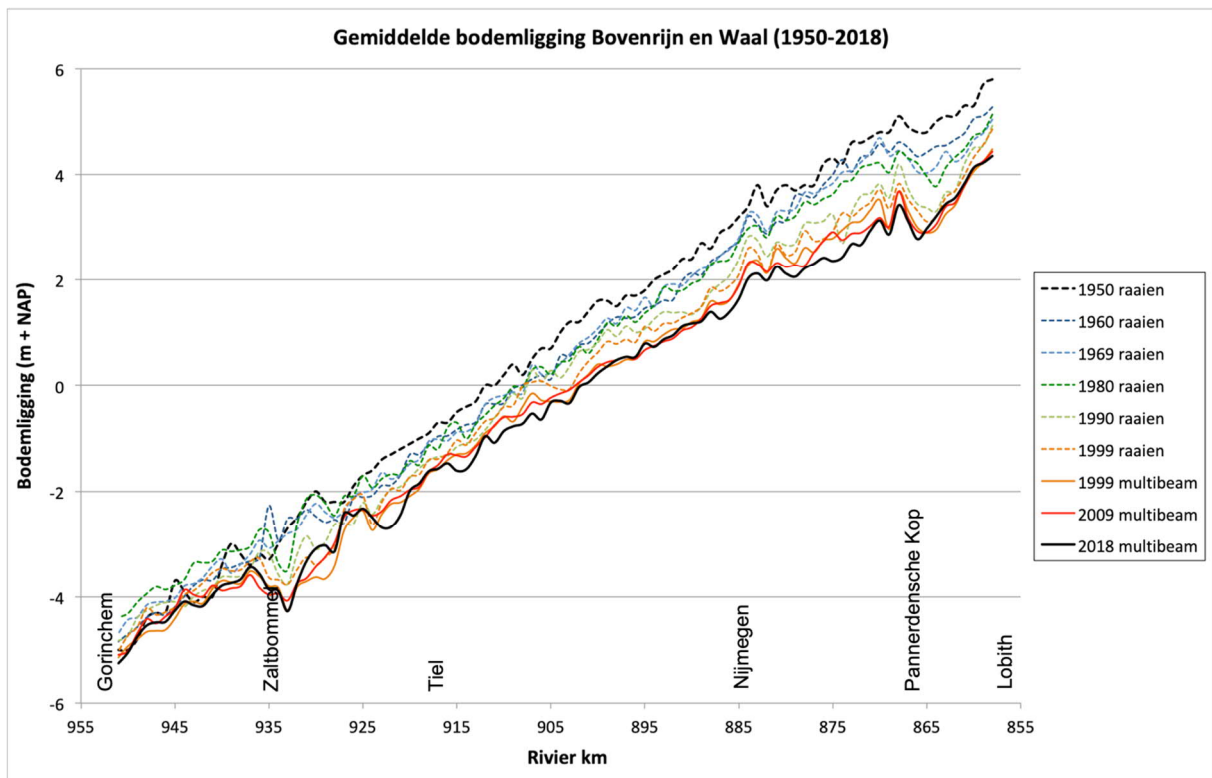
Reactie op ingrepen en zand- en grindwinning 19^e en 20^e eeuw

Als reactie op ingrepen in de rivier in de 19^e en 20^e eeuw passen de Bovenrijn en Waal het verhang van het zomerbed aan (figuur 21). Volgens een verkenning van Rijkswaterstaat hebben de ingrepen een daling van het zomerbed op gang gebracht waardoor het verhang uiteindelijk 20% minder wordt. Normaal gesproken is dit een aanpassing die eeuwen duurt. Voor de Bovenrijn-Waal gaat het een stuk sneller doordat met de onttrekking van grote hoeveelheden zand en grind in het verleden al een groot deel van de aanpassing is bereikt [28]. In hoeverre die aanpassing al is gerealiseerd hangt af van de aanvoer van zand en grind uit Duitsland. Als de aanvoer nog minder wordt dan nu, en als uitgevoerde suppleties in de Niederrhein Lobith niet bereiken, kan de bodemligging van het zomerbed nog een flink stuk zakken. Het sedimentbeheer in de Niederrhein heeft een grote invloed op de langjarige ontwikkeling van de toekomstige bodemligging van het zomerbed van de Rijntakken [28].

Mogelijke impact vergroving sediment

In de verkenning van Rijkswaterstaat (zie onder meer [28]) wordt gesteld dat de bodemligging van de Bovenrijn-Waal naar een nieuw evenwicht gaat waarbij de helling ten opzichte van een kantelpunt bij de monding (zee) flauwer wordt. De relatief sterke bodemerosie van de Bovenrijn en de bovenloop van de Waal past in dit beeld. Experts geven aan dat, in ieder geval op het bovenstroomse traject van de Bovenrijn – Waal, ook een andere ontwikkeling denkbaar is, waarbij een vergroving van het uit Duitsland aangevoerde sediment tot een steilere helling zou leiden (zie Box 4 §2.2.1). De in de afgelopen 20-30 jaar afgenomen bodemerosie van de Bovenrijn, in combinatie met een vergroving van het sediment van de rivierbedding, past in dit beeld. Beide hypothesen kunnen samengaan: een flauwer verhang van de Waal en een steiler verhang van de Bovenrijn zou tot een meer concaaf profiel kunnen leiden van de Bovenrijn - Waal.

Meer onderzoek is nodig naar de processen achter de grootschalige bodemveranderingen van de Rijntakken om de toekomstige ontwikkeling naar een nieuwe evenwichtsbodemligging te kunnen inschatten. Binnen het onderzoeksprogramma Rivers2Morrow wordt dit onderzoek nu opgepakt.



Figuur 21. Erosie van de bodem van de Bovenrijn en de Waal (m +NAP) over een periode van 60 jaar (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen', Rijkswaterstaat).

Reactie op ontwikkelingen Niederrhein

Voor een inschatting van de bodemerosie van het zomerbed op de langere termijn (meerdere tot tientallen jaren) moeten we ook kijken naar ontwikkelingen in de Niederrhein. Zonder suppleties zal de bodem daar de komende jaren blijven dalen met ongeveer 2 cm per jaar [28]. Op dit moment wordt deze daling lokaal onderbroken door een stijging van de bodemhoogte als gevolg van lokale suppleties (zie ook [23]). Deze veranderingen zullen zich stroomafwaarts verplaatsen, naar de Bovenrijn en vervolgens, in meer of mindere mate, naar de Rijntakken. Bij Lobith zal de bodem dus blijven dalen, waarbij deze daling af en toe, gedurende enige jaren, vermindert doordat het in de Niederrhein gesuppleerde sediment langs komt [28].

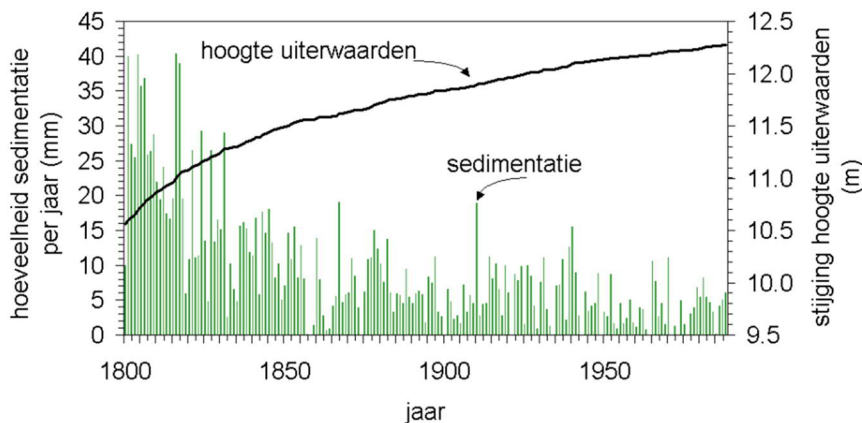
Beleid terugstorten gebaggerd zand en grind

Waar aanzanding van het zomerbed tot ondieptes voor de scheepvaart kan leiden, wordt periodiek gebaggerd. In het verleden werd het gebaggerde zand en grind afgevoerd, en dus aan de rivier onttrokken. Hiermee werd de bodemerosie van het zomerbed versterkt. Sinds halverwege de jaren '90 is een terugstortbeleid van kracht. Het huidige beleid schrijft voor dat de terugstortlocatie zich in een straal van 1,5 km van de baggerlocatie tussen de normaallijnen moet bevinden, en dat de terugstortlocatie bij voorkeur zijwaarts of net stroomafwaarts van de baggerlocatie moet zijn [50].

Ontwikkelingen in winterbed en oeverzone

Op het winterbed sedimenteert bij hoge afvoeren fijn zand (vooral op de oeverwallen) en slib (uiterwaarden). In de afgelopen twee eeuwen is het winterbed daardoor sterk opgehoogd (figuur 22). De sedimentatie is geleidelijk afgenomen doordat de hogere uiterwaarden minder vaak meestromen. Geschat is dat op dit moment jaarlijks gemiddeld 0,39 miljoen ton aan (fijn) zand en

slib op het winterbed van de Rijntakken wordt afgezet, met een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 0,1 - 9 mm/jaar. Een kleine 50% hiervan wordt afgezet op het winterbed van de Waal en ongeveer 20% en 30% op het winterbed van respectievelijk de IJssel en de Nederrijn-Lek [19]. Dit is slechts een fractie (16%) van het fijne sediment dat op jaarbasis door de Rijntakken 'stroomt': 2,44 miljoen ton⁸ (58). Het overgrote deel van het aangevoerde fijne sediment in de Rijntakken zakt uit in de havenbekkens van Rotterdam, in het Haringvliet en Ketelmeer, of verdwijnt in de Noordzee [19].



Figuur 22. De grootte van de jaarlijkse sedimentatie van slib op de uiterwaarden en de hierdoor veroorzaakte ophoging van het land (Bron: [18]).

De oevers van de Waal bestaan voor het grootste deel uit zandstranden tussen kribben, met een steile overgang naar de bedding van de rivier en een flauwe overgang naar de begroeide oeverwal. Voor de realisatie van de maatregelen van het programma Ruimte voor de Rivier waren deze stranden langjarig in een dynamisch evenwicht met de variabele rivierafvoer en de scheepsgeïnduceerde waterbeweging (zuiging door stroming en scheepsgolven). Als hoogwaters een aantal jaren uitbleven, leidde de zuiging en golven van passerende schepen tot erosie van het strand. Bij een hoogwater werd die erosie gecompenseerd door zandaanvoer uit de rivier. Op een tijdschaal van enkele tientallen jaren hielden deze episodes van erosie en sedimentatie elkaar in evenwicht [31].

Een van de maatregelen van Ruimte voor de Rivier is de verlaging van kribben langs een groot deel van de Waal. Naar verwachting zal de bodemligging van de stranden als reactie daarop lager komen te liggen, zodat de stranden weer in dynamisch evenwicht komen met de nieuwe situatie van verlaagde kribben. Het geërodeerde zand zal op de bedding van de Waal worden afgezet. Monitoring van de bodemligging van kribvakstranden tussen verlaagde kribben en van de nabijgelegen bedding van de Waal laat zien dat deze ontwikkeling inderdaad is opgetreden [3,4].

2.3.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Reactie op maatregelen Ruimte voor de Rivier

Zie §2.2.2.

⁸ Waarvan 2,107 miljoen ton/jaar anorganisch slib, 0,119 miljoen ton/jaar fytoplankton en 0,214 miljoen ton/jaar zeer fijn zand (58).

Ontwikkelingen in winterbed en oeeverzone

In §1.2.2. is een toelichting gegeven op de mogelijke aanslibbing van nevengeulen aan de hand van observaties van slibdiktes op de geulbodem en de geuloevers in een selectie van 12 geulen, waaronder geulen langs de Waal [55]. In een voorstel voor de beoordeling van de mate van aanslibbing waarboven onderhoud plaats zou moeten vinden is een 'signaleringswaarde' voor handelen gedefinieerd: bij minstens 10 cm slibdikte in een meestromende nevengeul en 20 cm in een geïsoleerde strang over meer dan 50% van de geuloppervlakte. De resultaten staan in tabel 1. Met rood is aangegeven voor welke nevengeulen deze 'signaleringswaarde' wordt overschreden. Dat is in twee van de drie geselecteerde nevengeulen langs de Waal niet het geval. In de derde geul zijn geen slibmetingen verricht maar hiervoor is de verwachting dat de 'signaleringswaarde' wel wordt overschreden.

2.3.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeeverzone – Winterbed

De impact van grootschalige morfologische ontwikkelingen

In §2.2.3 is de impact samengevat op het Rijnsysteem als geheel, zoals de gevolgen van de verschuiving van de afvoerverdeling over de Rijntakken voor de waterveiligheid (hoogwater) en de scheepvaart en zoetwatervoorziening (laagwater), en de inlaat van zoetwater naar het regionale systeem. In aanvulling hierop heeft de grootschalige bodemerosie van de Waal op korte termijn negatieve gevolgen voor de volgende functies [21,28]:

- Er ontstaan scheepvaartknelpunten bij in het verleden aangelegde vaste lagen en bodemkribben. Als gevolg van deze knelpunten kan bij laagwater minder vracht worden vervoerd. Circa een derde van al het transport in Nederland komt voor rekening van de binnenvaart [21]. Zie ook Box 5.
- De gronddekking van rivier kruisende kabels en leidingen (gas, elektra, telecommunicatie) neemt af. Een van de risico's is dat als schepen in nood hun anker uitgooien, ze daarbij kabels of leidingen kapot kunnen trekken. Uit een eerste analyse blijkt dat bij ca. 25% van de in totaal ongeveer 600 kabels en leidingen in de Rijntakken de gronddekking onvoldoende is [21].
- Het grondwaterpeil zakt mee met de daling van de laagwaterstanden in de rivier, waardoor in droge zomers de vegetatie langs de rivieren meer van de droogte te lijden heeft.
- Het rivierwater in de uiterwaarden en nevengeulen stroomt minder frequent en kortstondiger mee. Dit is nadelig voor de flora en fauna in de betreffende gebieden.

Bodemerosie van het zomerbed kan ook positieve effecten hebben:

- Er is een positief effect op de hoogwaterveiligheid. Door de daling van de rivierbodem neemt de dwarsdoorsnede in de rivier toe waardoor een groter watervolume kan worden afgevoerd en de waterstanden bij hoge rivierafvoeren afnemen. Dit effect is echter maar zeer beperkt doordat de hoogwaterstanden worden beïnvloed door de hele dwarsdoorsnede tussen de winterdijken, waar het zomerbed maar een beperkt deel van uit maakt [21].
- Een ander positief effect kan een afname van de baggervolumes halverwege deze eeuw zijn als een voortschrijdende bodemerosie op de Bovenrijn en Waal geleidelijk aan tot een kleinere helling zou leiden (kleiner verhang). Gevolg van een kleiner verhang is immers dat gemiddeld genomen de stroomsnelheden gaan afnemen, met als direct gevolg grotere waterdieptes over het gehele traject, en daardoor minder benodigd baggerwerk. Er is een afname berekend (voor 2055) van ca. 460.000 m³/jaar [28]. Ter vergelijking: in 2006-2013

werd jaarlijks gemiddeld 560.000 m³ (beunvolume) gebaggerd op de Bovenrijn en Waal (28). Het is echter nog niet duidelijk of het verhang van de Bovenrijn-Waal kleiner (Box 3 in §2.3.1) of juist groter (door vergroving sediment: Box 4 in §2.3.1) wordt. In het laatste geval zou de waterdiepte bij lage afvoeren op de Bovenrijn en Waal juist kleiner worden.

In Box 6 is een verkenning samengevat van mogelijke maatregelen om de bodemerrosie van het zomerbed te beheersen.

De impact van kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Er zijn ook negatieve gevolgen als gevolg van lokale aanzanding op de rivier [28]:

- Aanzanding leidt eveneens tot scheepvaartknelpunten (beperkte aflaaddiepte door ondieptes), baggerhinder en -kosten. Als gevolg van de realisatie van rivierverruimende maatregelen (Ruimte voor de rivier, Kaderrichtlijn Water, Deltaprogramma Rivieren) zal aanzanding verder toenemen, en daarmee ook de scheepvaarthinder [51]. Volgens morfologische modelberekeningen zal de omvang van het baggerwerk door de realisatie van de maatregelen van het programma Ruimte voor de Rivier en NURG in de eerste jaren na deze realisatie toenemen met ca. 90.000 m³/jaar [28].
- De verwachte toename van de hoeveelheden te baggeren materiaal als gevolg van deze maatregelen leidt er toe dat nieuwe projecten moeilijk(er) vergunbaar zijn in het kader van de Waterwet. Eén van de eisen waaraan een nieuwe maatregel moet voldoen om een Watervergunning te verkrijgen is immers dat de door de maatregel geen hinder voor de scheepvaart mag opleveren. Vaker baggeren betekent meer hinder.

Box 5

Vaardiepte bij laagwater

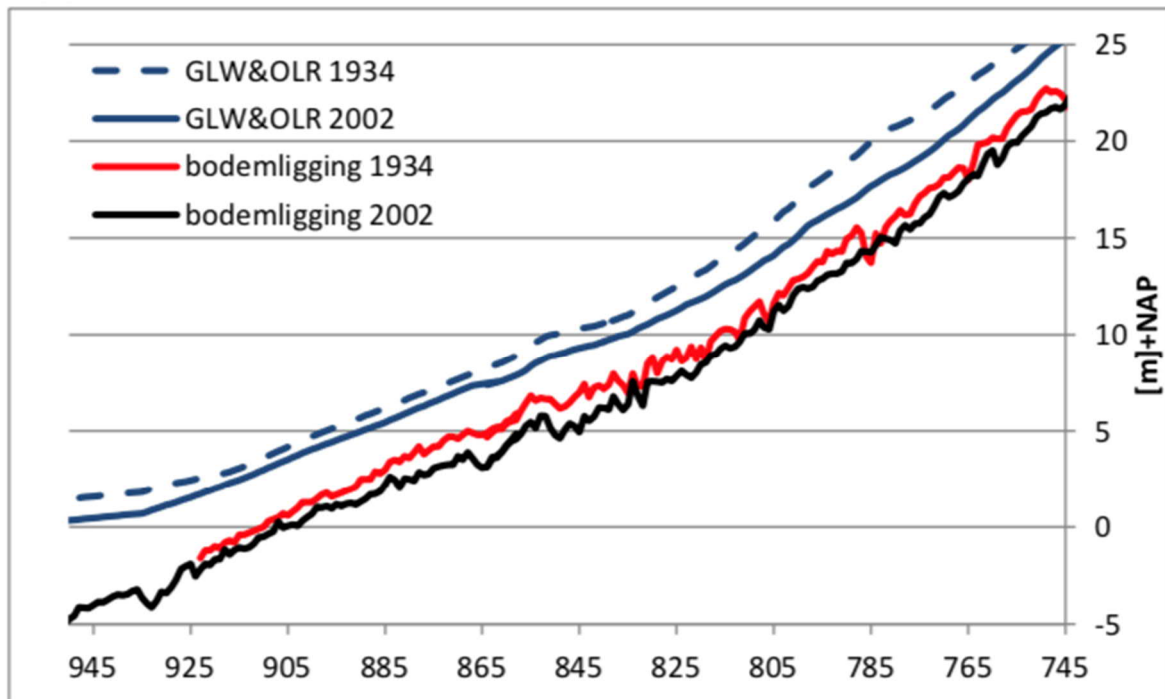
Met de daling van het zomerbed daalt ook de waterstand bij een bepaalde afvoer, vooral bij lage afvoeren. Figuur 23 laat de daling van de waterstand zien bij de overeengekomen lage afvoer (OLA) tussen 1934 en 2002. De OLA is een vastgestelde afvoer van 1020 m³/s. Voor deze OLA wordt een bijbehorende waterstand afgeleid: de OLR (Overeengekomen Lage Rivierwaterstand), welke eens per 10 jaar wordt vastgesteld door de CCR (Centrale Commissie voor de Rijnvaart). Internationaal is afgesproken dat de waterdiepte minstens 2,80 m moet zijn. Als gevolg van de daling van de OLR wordt deze waterdiepte niet meer overal op de Waal gehaald. Vooral de waterdiepte boven de vaste laag bij Nijmegen zal geleidelijk een steeds grotere beperking voor de scheepvaart gaan vormen: de bodemligging en waterstand in de omgeving dalen, maar de vaste laag zelf niet [28].

Indien niet tijdig passende maatregelen worden genomen zal de waterdiepte boven de vaste laag bij Nijmegen over 10-20 jaar niet meer aan de internationale afspraak voldoen [28]. Onder extreme omstandigheden (snelle bodemerrosie, droge zomer) zou dit zelfs al in 2024 het geval kunnen zijn [17].

De oorzaak van de afnemende diepte bij Nijmegen is een grootschalige insnijding van de rivier in het zomerbed van de Midden-Waal. Een gerichte suppletie van extra sediment in het stroomvoerend bed tussen km 886 en 896 kan deze trend op de korte termijn economisch en least-regret onderbreken, zodat de diepte bij Nijmegen gehandhaafd blijft. Een andere optie is de aanleg van langsdammen tussen km 886 en 906. Een derde optie is tenslotte de verlaging van de vaste laag zelf maar dit kan de werking van de vaste laag (vaargeulverruiming) verminderen en rivierbodeminnsijding in de bovenloop van de Waal versnellen [28].

Vervolg Box 5

Overigens is de vaste laag bij Nijmegen aangelegd op een moment (1987) dat de afgesproken minimale waterdiepte nog 2,50 m was. Pas in 1996 is besloten de minimale vaardiepte tot 2,80 m te verlagen; deze nieuwe afspraak is operationeel vanaf 2004. Ook deze extra 30 cm waterdiepte is een van de redenen waarom de waterdiepte boven de vaste laag bij Nijmegen op termijn niet meer aan de internationale afspraak voldoet.



Figuur 23. Het langspoor van de bodemligging van de Niederrhein, Bovenrijn en Waal, en van de laagwaterstanden (bij OLA) in 1934 en 2002 (Bron: [28]).

Box 6

Verkenning beheersmaatregelen bodemerose zomerbed

De rivierbodembodem kan door middel van actief sedimentbeheer en herinrichting van de rivier (rivierverruiming, systeemingen) op een gewenst niveau worden gebracht en gehandhaafd [28]:

- Het toevoegen van sediment aan de rivier (suppleren). Uitgevoerde modelsimulaties geven aan dat met periodiek suppleren de voortschrijdende bodemerose in de Rijntakken tot stilstand kan worden gebracht: bodemligging en waterstanden stabiliseren zónder dat dit leidt tot een substantiële toename van de baggerhoeveelheden. Daarnaast kan met suppleren ook de afvoerverdeling bij laagwater worden beheerst. Potentiële suppletie-trajecten zijn de trajecten met de grootste erosie in de Bovenrijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel.
- Herinrichting van de rivier. Hiermee kan de sedimenttransportcapaciteit van de rivier worden beïnvloed, waardoor de bodemerose wordt beperkt of afgeremd. Een voorbeeld van herinrichting is een 'kralensnoer' van verschillende type rivierverruiming (uiterwaarden vergraven, aanleg nevengeulen, verwijderen van obstakels, dijkverlegging), waarbij niet lokaal, maar langs het gehele eroderende riviertraject de rivier verruimd wordt en er water uit het zomerbed door de uiterwaarden wordt geleid (bij waterstanden boven kritiek niveau voor scheepvaart en zoetwater).

Vervolg Box 6

Langsdammen zijn een voorbeeld van een herinrichtingsmaatregel die volgens een verkenning van Rijkswaterstaat effectief kan zijn om de erosie van het zomerbed beheersbaar te maken.

Rijkswaterstaat schrijft hierover [28]:

- Een langsdam is een parallel aan de stroomrichting lopende dam die het zomerbed opdeelt in twee geulen: een hoofdgeul en een oevergeul. In het ontwerp voor de Nederlandse situatie ligt de langsdam in de binnenbocht van de rivier. De kruin van de langsdam ligt op enige afstand van de oorspronkelijke kribkoppen in de richting van de as van de rivier. De oevergeul wordt gevormd door in de binnenbocht de bestaande kribben en eventuele gestrekte oevers of obstakels te verwijderen. De langsdammen verdelen het water en sediment anders, waardoor stroomsnelheden in hoofd- en oevergeul zullen veranderen. Langsdammen stabiliseren de bodemerosie en daarmee de waterstanden. Doordat de langsdammen het water opzetten in laagwatersituaties worden ook de langere en lagere laagwaterstanden als gevolg van klimaatverandering gecompenseerd (toekomstbestendig vaarwegbeheer). Zolang deze klimaateffecten nog niet optreden wordt de scheepvaart door het opzetten van het laagwater méér vaardiepte geboden onder deze omstandigheden (ongeveer 0.1 m). Daarbovenop neemt door de aanleg van langsdammen de baggerhinder af, wordt een bijdrage geleverd aan de hoogwaterveiligheid (lagere maatgevende hoogwaterstanden), worden ecologische kansen gecreëerd, en ontstaan meekoppel-/ontwikkelkansen in de uiterwaarden (waaronder recreatie en natuur). Met betrekking tot dit laatste: door de langsdammen neemt de invloed van scheepsgolven op oevers (en nevengeulen) af, waar de ecologie van kan profiteren [21].
- Voor de aanleg van een langsdam is langs de Waal in de binnenbocht voldoende vrije ruimte naast het vaarwegprofiel aanwezig. Op de smallere IJssel zou hiervoor waarschijnlijk een deel van de oever afgegraven moeten worden. Gezien de uitvoeringskosten daarvan lijkt voor de IJssel suppleren de meest kosteneffectieve beheersmaatregel [28].

Uit de pilot met aangelegde langsdammen in de Waal bij Tiel zal moeten blijken hoe de rivier hierop reageert. Uit een eerste verkenning bleek erosie benedenstrooms en sedimentatie bovenstrooms van de langsdammen op te treden [35]. Volgens een expert zou dit er op kunnen wijzen dat de constructie de sediment transportcapaciteit van de rivier beïnvloedt (een vergroting van het verhang als reactie op een afname van de transportcapaciteit).

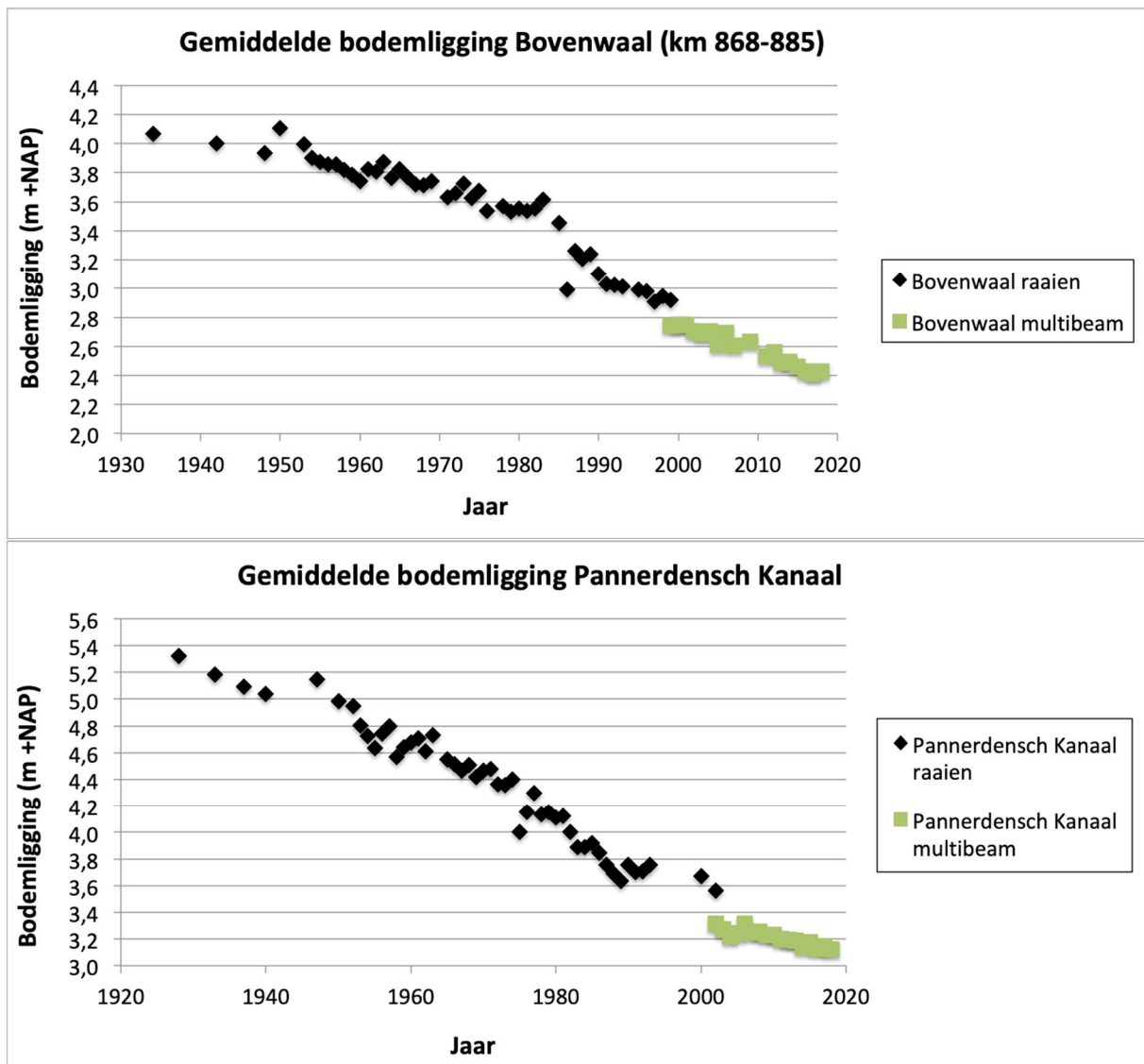
Zolang er sprake is van voortgaande bodemerosie op de Niederrhein is ook doorgaand ingrijpen in de Nederlandse Rijntakken nodig. Dat betekent dat prioriteit moet komen te liggen bij in ieder geval het tot stilstand brengen van de bodemerosie op de Niederrhein. Zolang dat laatste nog niet het geval is volstaat op de Rijntakken eenmalig ingrijpen niet (zoals een eenmalige suppletie, aanleg van langsdammen of kribaanpassing). Zolang is hetzij herhaald suppleren hetzij een combinatie van herhaald suppleren en de aanleg van langsdammen en/of kribaanpassingen nodig [28].

Rivierverruimende maatregelen vragen ook om onderhoud. Tabel 1 laat zien dat er veel slib in nevengeulen kan bezinken. Die geulen zijn ontworpen om een deel van het hoogwater af te voeren, en zo bij te dragen aan het beperken van extreem hoge waterstanden, en de ecologische en natuurkwaliteit van het rivierensysteem te vergroten. Bij teveel slibsedimentatie kan de functionaliteit van de geulen voor hoogwaterbescherming verminderen terwijl bovendien de verandering van het substraat (van een zandige naar slibbodem) gevolgen heeft voor de ecologie.

2.4. Pannerdensch Kanaal

2.4.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

Net als op de bovenloop van de Waal gaat de bodemerrosie van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal nog steeds door, de afgelopen jaren met 1,1 cm/jaar (tabel 3). De erosiesnelheid op het Pannerdensch Kanaal is wel lager dan op de bovenloop van de Waal (figuur 24).



Figuur 24. De snelheid van de erosie van het zomerbed van de bovenloop van de Waal (boven) en het Pannerdensch Kanaal (onder) (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen', Rijkswaterstaat).

2.4.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Een mogelijke maatregel op het Pannerdensch Kanaal in de toekomst is het verlagen van de kribben. Modelberekeningen laten zien dat dit tot aanzanding van het zomerbed leidt, en dus tot de noodzaak van meer onderhoudsbaggerwerk, maar dat de te baggeren volumes beheersbaar zijn [10].

2.4.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

De lagere erosiesnelheid op het Pannerdensch Kanaal dan op de bovenloop van de Waal (figuur 24) leidt er toe dat de afvoerverdeling geleidelijk verschuift naar meer water door de Waal en minder door het Pannerdensch Kanaal. Dit kan gevolgen hebben voor de beschikbare waterdiepte voor de scheepvaart bij laagwater en voor het kunnen handhaven van de beleidsmatige afvoerverdeling bij extreem hoogwater (16.000 m³/s).

2.5. Nederrijn-Lek

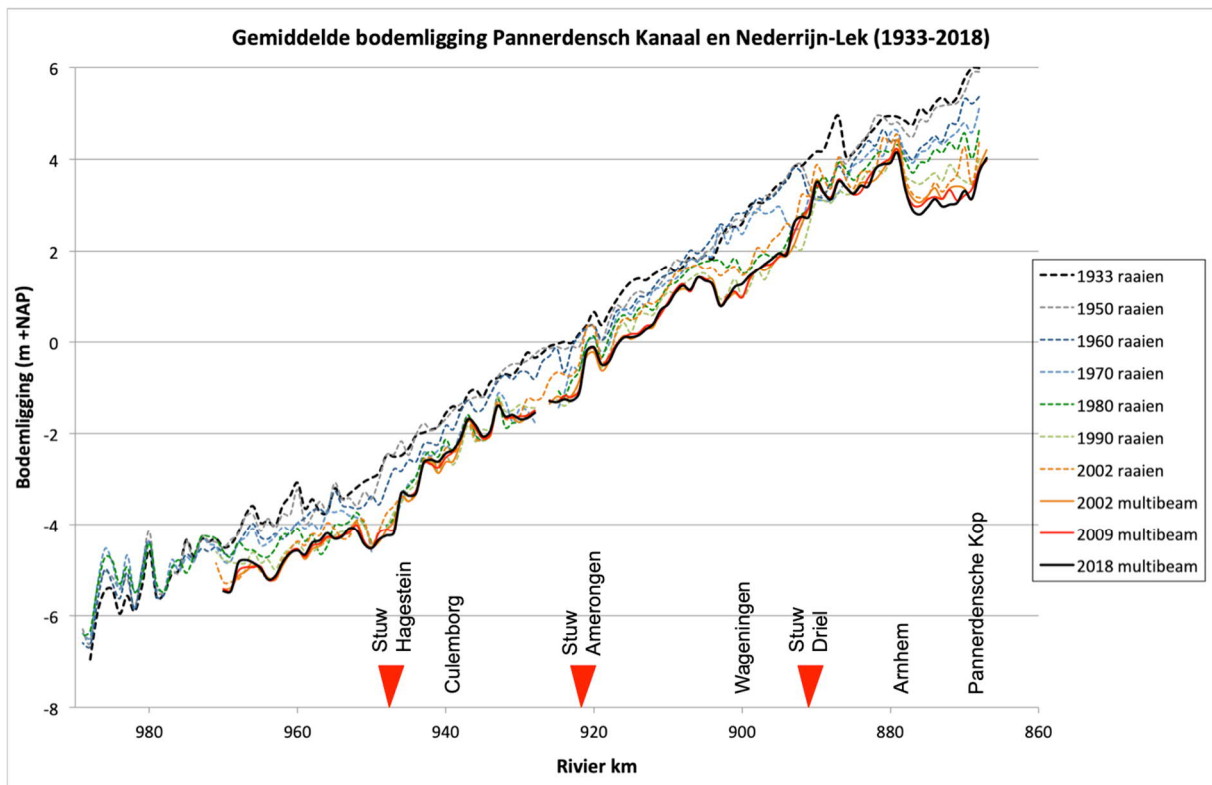
2.5.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

De ontwikkeling van de bodemligging van de bedding van de Nederrijn-Lek is sterk beïnvloed door de aanleg van de 3 stuwen (tabel 5). De stuwen zijn gebouwd in gegraven geulen naast de rivier. Bij voltooiing van de stuw is de rivier door het gegraven geuldeel geleid. Dit geuldeel lag in alle drie gevallen lager dan de oorspronkelijke geul. Dit betekent dat een meting van de bodemligging van de rivier ná voltooiing van de stuw in een ander, lager stuk rivier heeft plaatsgevonden dan vóór de voltooiing. Dit leidt tot een bodemdaling die kunstmatig is. Maar de verandering in bodemligging nabij die nieuwe stukjes rivier is voor een deel ook het gevolg van erosie en sedimentatie, als morfologische reactie op die gegraven diepere delen. Deze reactie bestaat uit sedimentatie van zand en grind in die nieuwe geuldelen, en erosie direct benedenstrooms hiervan (doordat het water zijn zand en grind is kwijtgeraakt en dan teveel energie heeft in verhouding tot de hoeveel sediment die het water verplaatst) [30].

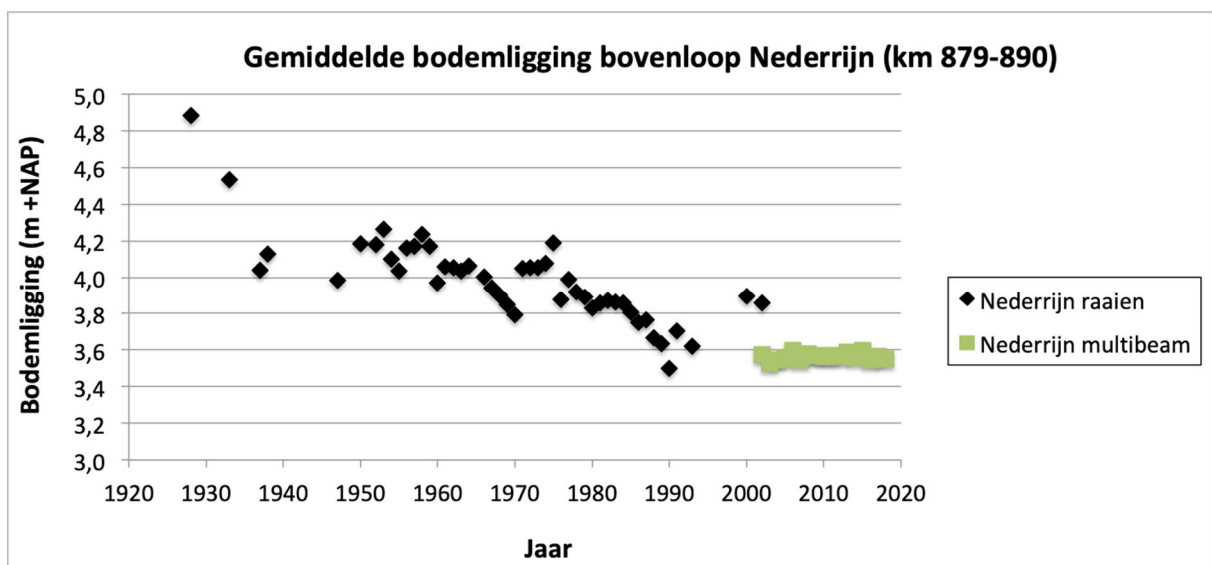
De combinatie van deze ingrepen en morfologische ontwikkelingen levert voor de periode 1950-1980 een wat rommelig beeld op (figuur 25). Duidelijk is in ieder geval de erosie benedenstrooms van de stuw bij Hagestein en de erosie in de bovenloop van de Nederrijn net stroomafwaarts van het splitsingspunt IJsselkop. Volgens de jaarlijkse multibeampeilingen is de bodemligging van de Nederrijn-Lek in de afgelopen 15 jaar min of meer stabiel (figuren 25 en 26).

Tabel 5. Data en locaties bouw stuwen in de Nederrijn-Lek (Bron: [55]).

Locatie	Stuwcomplex Hagestein	Stuwcomplex Amerongen	Stuwcomplex Driel
Rivierkm stuw	946.800	922.400	891.600
Rivierkm nieuw riviergedeelte	945-949	920-927	890-893
Begin aanleg stuw	1954	1985	1962
Ingebruikname nieuw riviergedeelte	1961	1964	1967
Ingebruikname stuw	1961	1967	1970



Figuur 25. Bodemerosie in het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn-Lek over een periode van bijna 70 jaar (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen', Rijkswaterstaat).



Figuur 26. De snelheid van de erosie van het zomerbed van de bovenloop van de Nederrijn (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen', Rijkswaterstaat).

2.5.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Ontwikkelingen in de hoofdgeul

Stroomopwaarts van de stuwen bezinkt sediment. Dit is ook goed te zien in de figuur van de korrelgrootte van de bovenste laag van de rivierbedding (figuur 12 in §2.1): de pieken met hoge slibgehalten zijn de sedimentatiegebieden achter de stuwen. Als bij hogere afvoeren de stuwen worden getrokken en de rivier weer vrij afstroomt, zal een deel van dat sediment weer wegspoelen.

Maar ook zal hier periodiek moeten worden gebaggerd. Dit laatste geldt ook voor ondieptes die tijdens hoogwaters op de Nederrijn ontstaan; de rivier heeft deze ondieptes nog niet altijd zelf 'opgeruimd' op het moment dat de stuwen, bij het weer lager worden van de afvoer, weer worden gesloten.

Ontwikkelingen in winterbed en oeeverzone

In §1.2.2. is een toelichting gegeven op de mogelijke aanslibbing van nevengeulen aan de hand van observaties van slibdiktes op de geulbodem en de geuloevers in een selectie van 12 geulen, waaronder geulen langs de Nederrijn en Lek [55]. In een voorstel voor de beoordeling van de mate van aanslibbing waarboven onderhoud plaats zou moeten vinden is een 'signaleringswaarde' voor handelen gedefinieerd: bij minstens 10 cm slibdikte in een meestromende nevengeul en 20 cm in een geïsoleerde strang over meer dan 50% van de geuloppervlakte. De resultaten staan in tabel 1. Met rood is aangegeven voor welke nevengeulen deze 'signaleringswaarde' wordt overschreden. Dat is voor de twee geselecteerde nevengeulen langs de Nederrijn het geval, en voor de nevengeul langs de Lek niet.

2.5.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeeverzone – Winterbed

Elke ingreep die wordt gedaan in de Nederrijn en Lek zal direct doorwerken op het baggerbezwaar bij deze stuwen [25]. Baggeren bij de stuwen heeft direct effect op de scheepvaart, hinder is moeilijk te voorkomen.

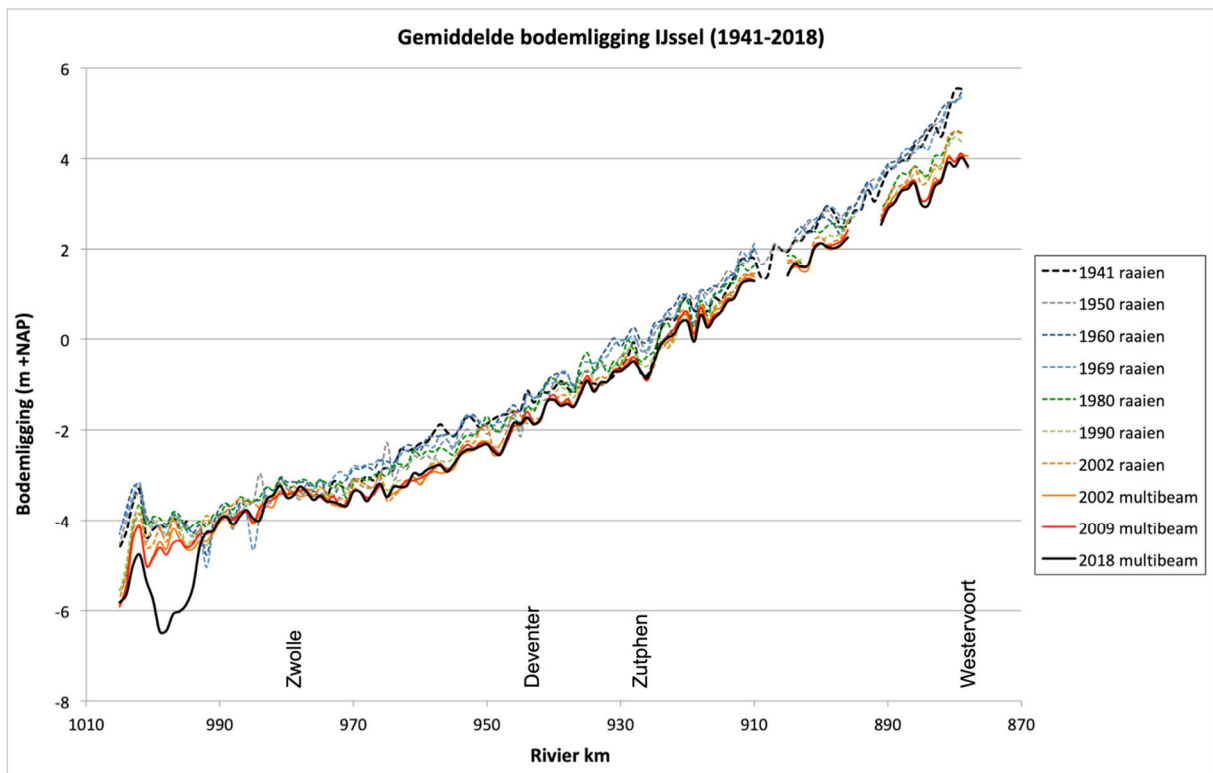
Rivierverruimende maatregelen vragen ook om onderhoud. Tabel 1 laat zien dat er veel slib in nevengeulen kan bezinken. Die geulen zijn ontworpen om een deel van het hoogwater af te voeren, en zo bij te dragen aan het beperken van extreem hoge waterstanden, en de ecologische en natuurkwaliteit van het rivierensysteem te vergroten. Bij teveel slibsedimentatie kan de functionaliteit van de geulen voor hoogwaterbescherming verminderen terwijl bovendien de verandering van het substraat (van een zandige naar slibbodem) gevolgen heeft voor de ecologie.

2.6. IJssel

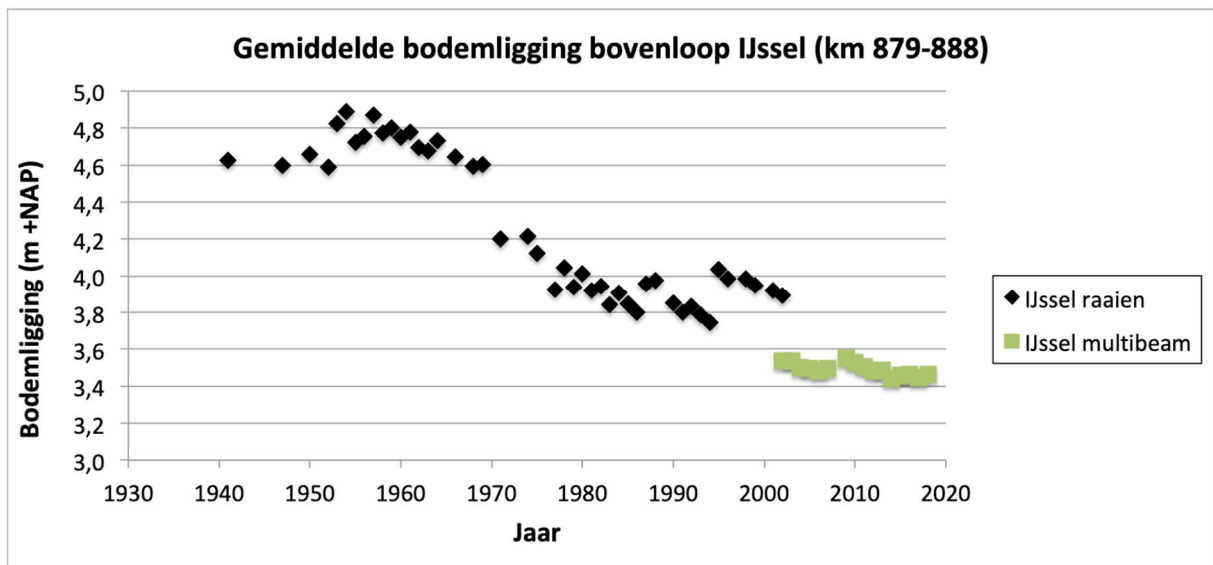
2.6.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

De bedding van de IJssel is de afgelopen eeuw sterk geërodeerd (figuur 27). In de afgelopen 20 jaar, grotendeels samenvallend met de periode waarin de bodemligging met multibeam is gepeild, is de erosie sterk afgenomen. Wellicht is dit (mede) het gevolg van de afpleistering van de toplaag van het zomerbed met zeer grof sediment (figuur 12 in §2.1). De bovenloop van de IJssel erodeert nog wel maar de snelheid waarmee de bedding hier erodeert is een stuk minder dan in het verleden (figuur 28).

Een maatregel van Ruimte voor de Rivier met potentieel grootschalige morfologische gevolgen is de verdieping van het zomerbed van de benedenloop van de IJssel over een lengte van 7,5 km, duidelijk te zien in figuur 27. Deze zomerbedverlaging leidt benedenstrooms tot een verlaging van de waterspiegel. De morfologische reactie is een terugschrijdende erosie van het zomerbed van de IJssel. Stroomopwaarts van de zomerbedverlaging zal het zomerbed naar verwachting eroderen tot de bedding zich heeft aangepast aan deze verlaagde erosiebasis [13].



Figuur 27. Bodemerosie in de IJssel over een periode van bijna 60 jaar (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen', Rijkswaterstaat).



Figuur 28. De snelheid van de erosie van het zomerbed van de bovenloop van de IJssel (Bron: jaarlijkse dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemliggingen per km (de 'P-mappen', Rijkswaterstaat).

2.6.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Ontwikkelingen in de hoofdgeul

Uit verkennende studies is gebleken dat de toename van de baggerinspanning als gevolg van het ontstenen van oevers en het aanleggen van vooroevers en nevengeulen kan worden beperkt tot hoogstens een paar procent [42].

De verdieping van het zomerbed van de benedenloop van de IJssel kan ook effecten hebben op de korte termijn. De zomerbedverlaging kan leiden tot aanzanding en aanslibbing van het verdiepte traject. Het bovenstroomse deel van de verdieping zal de rol van zandvang vervullen en met periodiek baggerwerk zal dit zand worden verwijderd. In het kader van de MER toets van deze maatregel is aan deze aanzanding gerekend: geconcludeerd is dat de "opgave voor het veiligheidsonderhoud gemiddeld 65.000⁹ m³ per jaar bedraagt" (met een onzekerheidsmarge van 50% met het oog op het al dan niet optreden van hoge afvoeren) [59]. Er is niet gerekend aan de potentiële slibsedimentatie in dit gebied. Daarmee zijn de baggerinspanning, en de daaraan verbonden consequenties voor beheer en onderhoud (hinder scheepvaart, kosten, vertroebeling water bij baggeren), potentieel onderschat [52].

Ontwikkelingen in winterbed en oeverzone

In §1.2.2. is een toelichting gegeven op de mogelijke aanslibbing van nevengeulen aan de hand van observaties van slibdiktes op de geulbodem en de geuloevers in een selectie van 12 geulen, waaronder geulen langs de IJssel [55]. In een voorstel voor de beoordeling van de mate van aanslibbing waarboven onderhoud plaats zou moeten vinden is een 'signaleringswaarde' voor handelen gedefinieerd: bij minstens 10 cm slibdikte in een meestromende nevengeul en 20 cm in een geïsoleerde strang over meer dan 50% van de geuloppervlakte. De resultaten staan in tabel 1. Met rood is aangegeven voor welke nevengeulen deze 'signaleringswaarde' wordt overschreden. Dat is voor vrijwel alle geselecteerde nevengeulen langs de IJssel het geval.

2.6.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

Met het oog op de vereiste waterdiepte op de IJssel en de beperkte breedte van de vaargeul is er slechts zeer beperkt ruimte voor sedimentatie op deze riviertak. Dit betekent dat als na uitvoering van rivierverruimende maatregelen aanzanding van het zomerbed optreedt, dit vrijwel direct weggebaggerd moet worden met grote hinder voor scheepvaart tot gevolg [25]. De verwachte aanzanding/aanslibbing van de zomerbedverdieping in de benedenloop van de IJssel (zie vorige §) is in dit opzicht een belangrijk aandachtspunt: de verlaagde bodem zal op de lagere diepte gehouden moeten worden om het effect van deze verlaging op de waterstand bij extreem hoge afvoer te waarborgen.

Zoals in §2.2.3 is beschreven zal de afvoerverdeling op de beide splitsingspunten (Pannerdensche Kop en IJsselkop) bij niet-ingrijpen gaan wijzigen [48,49]:

⁹ In de MER-rapportage wordt gesteld dat dit overeenkomt met vrijwel de gehele sedimentvracht die de IJssel van bovenstrooms aanvoert, waarbij met 'sediment' zand en grind wordt bedoeld aangezien niet aan de sedimentatie van slib is gerekend. Daarmee lijkt dit getal aan de hoge kant: in een sedimentbalans voor de Rijntakken is de vracht aan zand en grind op de IJssel op 40.000 m³/jaar (60.000 ton/jaar) geschat [30]. In een recente actualisatie van deze balans is dit getal naar beneden bijgesteld (50.000 ton/jaar) [58].

- Er gaat bij het splitsingspunt Pannerdensche Kop geleidelijk meer water (en sediment) naar de Waal en minder naar het Pannerdensch Kanaal.
- Van de afvoer over het Pannerdensch Kanaal gaat bij de IJsselkop meer water naar de IJssel en minder naar de Nederrijn. Dit geldt voor zowel gestuwde als ongestuwde condities. Wanneer de stuwen in de Nederrijn-Lek getrokken zijn en deze Rijntak vrij afstroomt, trekt de IJssel meer afvoer doordat de bovenloop van de IJssel erodeert. In de loop der tijd komen periodes met gestuwde condities vaker voor omdat gestuwd wordt op basis van de waterstand bij Lobith: een effect van de bodemdaling is dat waterstanden bij Lobith onder een bepaalde waarde vaker voorkomen en de stuwen dus vaker dichtgaan.

De combinatie van deze ontwikkelingen bij beide splitsingspunten heeft gevolgen voor de IJssel: bij zowel hoge als lage afvoeren bij Lobith gaat voor de huidige situatie van de Rijn een kleiner deel van de afvoer via de IJssel in vergelijking tot voorgaande jaren. Voor laagwater heeft dit gevolgen voor de scheepvaart (minder aflaaddiepte), voor de zoetwatervoorziening van het regionale watersysteem, en voor de interactie met het grondwater. Voor hoogwater kan dit gevolgen hebben voor het halen van het beoogde niveau van hoogwaterbescherming omdat hiervoor is uitgegaan van een bepaalde afvoerverdeling over de Rijntakken [8].

Rivierverruimende maatregelen vragen ook om onderhoud. Tabel 1 laat zien dat er veel slib in nevengeulen kan bezinken. Die geulen zijn ontworpen om een deel van het hoogwater af te voeren, en zo bij te dragen aan het beperken van extreem hoge waterstanden, en de ecologische en natuurkwaliteit van het rivierensysteem te vergroten. Bij teveel slibsedimentatie kan de functionaliteit van de geulen voor hoogwaterbescherming verminderen terwijl bovendien de verandering van het substraat (van een zandige naar slibbodem) gevolgen heeft voor de ecologie.

2.7. Doorkijk langere termijn

Klimaatverandering

De gevolgen van klimaatverandering zullen doorwerken op de bodemligging van de Rijntakken:

- Met de stijgende zeespiegel neemt de stroomsnelheid in de benedenstroomse delen van de Rijntakken af. Hierdoor sedimenteert meer sediment in het benedenstroomse deel van de delta en deze sedimentatie zal zich geleidelijk stroomopwaarts uitbreiden. Deze sedimentatie werkt de huidige lange-termijn bodemerosie tegen, wat gunstig is, maar het zal een ongunstig effect hebben op de waterstand tijdens hoogwater [5].
- De Rijn wordt steeds meer een regenrivier; de afvoer wordt steeds grilliger. De afvoeren bij laagwater worden minder en deze lage afvoeren duren langer. Knelpunten voor de scheepvaart bij laagwater kunnen daardoor een groter probleem worden. De afvoeren bij hoogwater kunnen hoger worden en vaker voor gaan komen. Hierdoor kan de morfodynamiek toenemen.

Doorgaande erosie zomerbed

De negatieve gevolgen van morfologische ontwikkelingen voor functies van de rivier, die op korte termijn al merkbaar zijn, zullen naar verwachting op de langere termijn groter worden. Als het zomerbed van de Rijntakken blijft eroderen, zakt daarmee ook de waterstand bij lage afvoeren. De waterdiepte boven constructies en erosiebestendige delen in de rivieren kan daardoor afnemen.

Bovendien zullen lage afvoeren door klimaatverandering vaker voorkomen en langer duren. Waterdieptes zullen in de zomer, zonder ingrepen of veranderingen in beheer en onderhoud, af en toe minder zijn dan nu, en deze situaties zullen vaker voorkomen en langer duren dan nu. De natuur langs de rivieren zal in toenemende mate last krijgen van verdroging doordat ook de grondwaterstand met de lagere laagwaterstand mee zakt. De frequentie waarmee nevengeulen meestromen zal afnemen: volgens een verkennende studie van 300 dagen per jaar nu naar 260 dagen per jaar in 2050, en onder extreme omstandigheden (snelle bodemerrosie, snelle klimaatverandering) naar 150 dagen per jaar in 2050 [17].

Als bij het splitsingspunt Pannerdensche Kop de bedding van de Waal sneller blijft eroderen dan die van het Pannerdensch Kanaal (conform de huidige situatie), zal de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop geleidelijk (blijven) veranderen. Hierdoor kan de afspraak over het handhaven van de beleidsmatige afvoerverdeling bij extreem hoogwater (16.000 m³/s) in de knel komen. Dit kan consequenties hebben voor de waterveiligheid benedenstrooms van dit splitsingspunt.

Morfodynamiek bij extreem hoogwater

De Rijntakken zijn er op ingericht om 16.000 m³/s veilig te kunnen afvoeren. In de afgelopen eeuw hebben we een dergelijke hoge afvoer niet meegemaakt. De vraag is welke morfologische veranderingen er bij een dergelijke extreme afvoer zouden optreden. Deze vraag is in het bijzonder relevant met het oog op het handhaven van de beleidsmatige afvoerverdeling bij een extreem hoogwater. Kunnen veranderingen in de bodemligging bij de splitsingspunten dan in korte tijd zodanig veranderen dat de afvoerverdeling sterk verandert en de veiligheid benedenstrooms gevaar loopt? In dit kader wijzen experts er op dat we niet goed weten hoe de afgepleisterde bedding zich bij extreem hoge afvoeren zal gedragen (8) en dat de bekende relaties voor de afvoer- en sedimentverdeling empirisch bepaald zijn aan de hand van bekende situaties en niet bij extreme afvoeren [32].

Een eventuele doorbraak van de pleisterlaag hoeft niet tot problemen te leiden: wellicht is tijdig herstel mogelijk voordat een snelle verdieping van de bodem plaatsvindt, of leidt de aanvoer van veel grof sediment van bovenstrooms er toe dat de bodemligging netto niet veel verandert.

Minder fijn sediment (slib)

De hoeveelheid fijn sediment (slib) die de Rijn vanuit Duitsland aanvoert, is de afgelopen tientallen jaren met 70% afgenomen. Deze vracht bedroeg in 1950 nog 4 miljoen ton per jaar (bij Lobith) en nam af tot 2,44 miljoen ton per jaar volgens de sedimentbalans van de Rijn over de periode 1991 - 2010 [58] en zelfs 1,2 miljoen ton per jaar volgens concentraties zwevende stof in de afgelopen jaren [33]. Sinds 2005 lijkt de slibvracht zich op deze lagere aanvoer te hebben gestabiliseerd [33]. De oorzaak van deze afname, en de mogelijke gevolgen voor de morfologie van uiterwaarden (aanslibbing) en de sedimenthuishouding van de Rijn-Maasmonding en het Ketelmeer, zijn niet duidelijk. Experts voegen hieraan toe dat door de verdieping van de Nieuwe Waterweg nu meer slib vanuit zee de Rijn-Maasmonding zal binnenkomen dan vroeger het geval was.

3. Rijn-Maasmonding

De morfologische ontwikkelingen in de Rijn-Maasmonding en de gevolgen hiervan voor de functies in dit gebied zijn beschreven in het onlangs verschenen Verhaal van de Rijn-Maasmonding (2019). De teksten in onderstaande paragrafen zijn samenvattingen van dit verhaal [2].

Per traject is voor de Maas, de Rijntakken en de Rijn-Maasmonding in kaart gebracht waar infrastructuur en kunstwerken liggen die voor verschillende functies (scheepvaart, telecom en nutsvoorzieningen, waterveiligheid, zoetwatervoorziening) van belang zijn. Ook zijn de locaties van KRW-maatregelen aangegeven. Deze kaarten zijn in de bijlage bij dit rapport opgenomen. Morfologische ontwikkelingen kunnen negatieve effecten hebben op deze infrastructuur, kunstwerken en maatregelen.

3.1. Karakter

Waterbeweging

Het verloop van de waterstanden en de stroming in de Rijn-Maasmonding is complex. Dit komt door de interactie van de afvoeren van meerdere riviertakken (Bergsche Maas, Merwede, Lek), het beheer van de Haringvlietsluizen, het getij en de wind.

Voor de aanleg van de Deltawerken kwam het getij vanuit het zuiden en het noorden de Rijn-Maasmonding in. De vloedstromen ontmoetten elkaar in de verbindende takken tussen de noordkant en de zuidkant, en de stroomsnelheden waren daar gering. Met de aanleg van de Deltawerken is dit compleet veranderd. Het getij komt niet langer vanuit het zuiden naar binnen, maar nog wel vanuit het noorden. De verschillen in waterstand bij eb en vloed tussen de noordkant en de zuidkant van de verbindingstakken zijn nu groot. Daardoor stroomt het hard in het Spui, de Dordtsche Kil en de Oude Maas.

De grootte en richting van de afvoeren door de verschillende takken worden grotendeels bepaald door het beheer van de Haringvlietsluizen. In principe¹⁰ zijn de sluisen landwaarts gesloten als het water zeewaarts van de sluisen hoger staat. Dan stroomt al het rivierwater via de Nieuwe Waterweg naar zee. De sluisen worden geopend als de waterstand zeewaarts van de sluisen lager wordt dan de waterstand landwaarts van de sluisen en de afvoer van de rivieren niet heel laag is: de ingestelde grootte van de spuiopening hangt af van de grootte van de rivierafvoer. Alleen bij lage rivierafvoer blijven de Haringvlietsluizen langere tijd gesloten om het zoetwater vast te houden. De Waal draagt het meest bij aan de rivierafvoer. Gemiddeld stroomt ongeveer de helft van de Waalafvoer via de Nieuwe Merwede af naar het Hollandsch Diep.

Van oost naar west wordt het getij steeds dominantier. Langs de zuidrand is het getijverschil bij gesloten Haringvlietsluizen niet meer dan een paar decimeter. Als er gespuid wordt kan dat verschil oplopen tot ongeveer een halve meter (bij windopzet nog iets meer). Het getijverschil bij Hoek van Holland bedraagt gemiddeld ongeveer 1,75m. Langs de noordrand neemt dit verschil tot Rotterdam weinig af, maar verder naar het oosten wordt het verschil snel minder. Bij Dordrecht bedraagt het getijverschil minder dan 1m.

¹⁰ Sinds kort staan de Haringvlietsluizen op een kier en mag zeewater in beperkte mate het Haringvliet instromen.

Zoutindringing

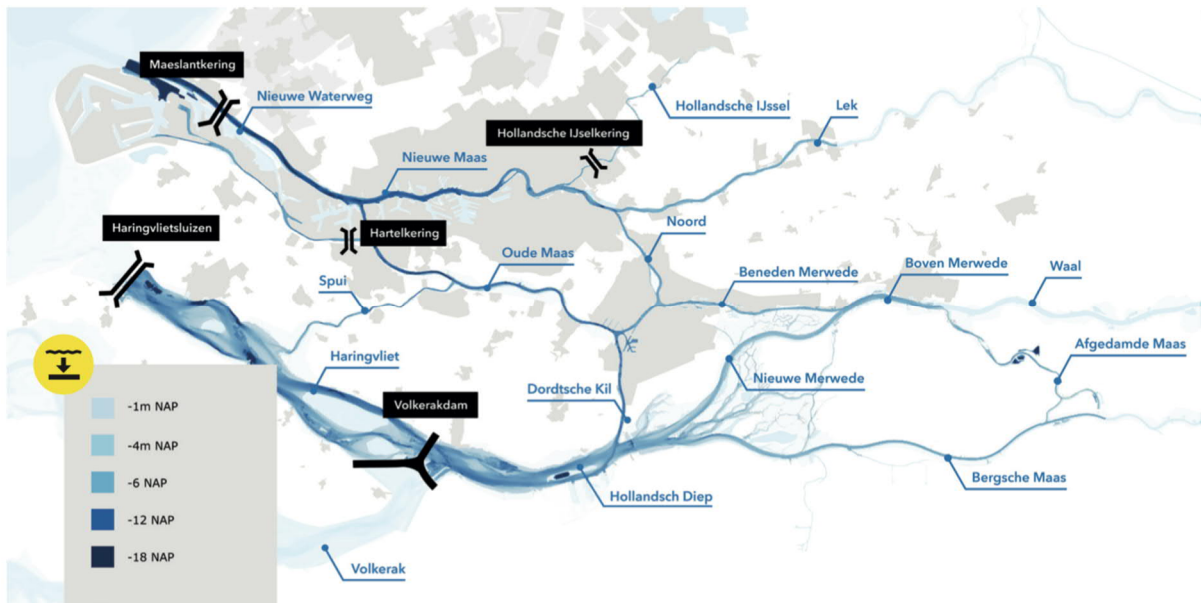
De indringing van zeewater via de Nieuwe Waterweg varieert met, onder meer, het getij en de afvoer van Rijn en Maas. Als het verschil tussen hoog- en laagwater (de getijslag) groter wordt, kan het zout verder binnendringen, en als de rivierafvoer toeneemt, neemt de zoutindringing af. Zout water kan bij lage rivierafvoeren ver het systeem binnendringen.

Sedimentatie en erosie

Als gevolg van de aanleg van de Deltawerken is de stroomsnelheid op een aantal riviertakken sterk afgenomen, zoals op Hollandsch Diep en Haringvliet, waardoor daar nu veel sediment van de rivieren uitzakt. Op andere riviertakken is de stroomsnelheid door de aanleg van de Deltawerken juist toegenomen en treedt erosie op. Deze ontwikkelingen hangen met elkaar samen: de dammen hebben de stroming op een aantal takken sterk verminderd waardoor deze op andere takken juist is toegenomen. Daarnaast wordt de vaargeul met baggeren op diepte gehouden voor de scheepvaart en wordt zand gewonnen voor de industrie.

Drie deelsystemen

In de Rijn-Maasmonding kunnen drie deelsystemen worden onderscheiden: de noordelijke takken met een open verbinding naar zee en met een sterk verdiepte bodem, de zuidelijke takken afgesloten van zee door de Haringvlietdam en de verbindende takken hiertussen (figuur 29).



Figuur 29. Overzicht met de namen van de waterlopen en de Deltawerken in de Rijn-Maasmonding, en de diepteligging van de geulen.

3.2. Noordelijke takken

3.2.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

De takken in het noordelijke deel van de Rijn-Maasmonding worden gekenmerkt door sedimentatie in de benedenlopen van Waal (Merwede) en Lek, en op de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg (tabel 6, figuur 30), dat wordt weggebaggerd voor de scheepvaart. De sterk verdiepte bodemligging wordt hier direct (baggeren) door de mens bepaald (vergelijk kolom 4 met kolom 3 in tabel 6).

Tabel 6. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling van de verschillende takken van de Rijn-Maasmonding in cm/jaar (Bron: [47¹¹]). De getallen in de derde kolom geven de tendens aan van sedimentatie en erosie die zou resulteren uit de processen van zwevend en bodemgebonden sedimenttransport. Door baggeren is de netto bodemontwikkeling, aangegeven in kolom 4, op een aantal trajecten echter geheel anders.

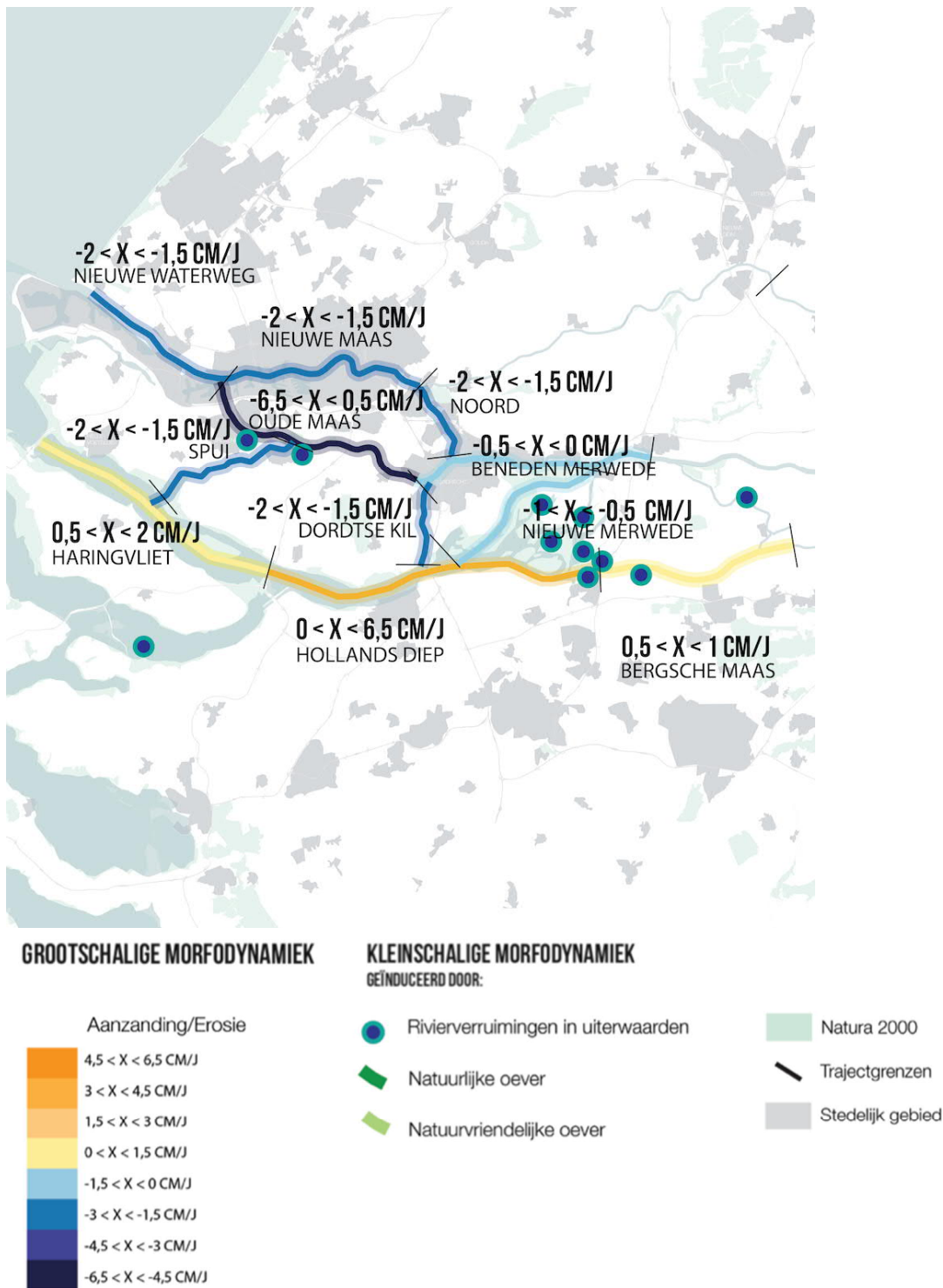
Traject	Tijdvak	Gemiddelde trend natuurlijke processen (- = erosie)	Gemiddeld effect inclusief baggeren (- = erosie)
Noordelijke tak			
Nieuwe Waterweg	2000 – 2012	27,6	-1,8
Nieuwe Maas	2000 – 2012	4,5	-1,7
Lek	2000 – 2012	0,7	-1,3
Beneden Merwede	2000 – 2012	0,4	-0,4
Verbindende takken			
Noord	2000 – 2012	-1,5	-1,5
Oude Maas	2000 – 2012	-5,7 – 0,8 ¹⁾	-6,1 – 0,5 ¹⁾
Spui	2000 – 2012	-1,6	-1,6
Dordtse Kil	2000 – 2012	-1,2	-1,7
Zuidelijke tak			
Haringvliet	2000 – 2012	0,8 – 1,9 ²⁾	0,7 – 1,8 ²⁾
Hollands Diep	2000 – 2012	0,2 – 6,2 ³⁾	0,2 – 6,2 ³⁾
Nieuwe Merwede	2000 – 2012	1,3	-0,8
Bergsche Maas	2000 – 2012	0,9	0,9

¹⁾In de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding wordt de Oude Maas onderverdeeld in 4 trajecten. Dit is de bandbreedte voor de 4 trajecten.

²⁾In de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding wordt het Haringvliet onderverdeeld in 4 trajecten. Dit is de bandbreedte voor de 4 trajecten.

³⁾In de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding wordt het Hollands Diep onderverdeeld in 3 trajecten. De getallen voor een van deze trajecten zijn aantoonbaar onjuist. Dit is de bandbreedte voor de andere 2 trajecten.

¹¹ Deze tabel is gebaseerd op de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding. De auteur van het rapport over deze sedimentbalans benadrukt dat deze balans veel onzekerheden heeft en dat de 'sedimentbalans dus niet noodzakelijkerwijs een beschrijving van de daadwerkelijk opgetreden processen is.'



Figuur 30. Trends in de jaarlijkse bodemontwikkeling van verschillende trajecten van de Rijn-Maasmonding in cm/jaar. Weergegeven is het gemiddelde effect inclusief baggeren. Zie ook de meest rechtse kolom in tabel 6 (Bron: [47]).

3.2.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

In de hele Rijn-Maasmonding komen lokaal diepe erosiekuilen voor. Dit is met name het geval daar waar in de rivierbedding (fijn) zand aan de oppervlakte komt (figuur 31). Als we de natuurlijke processen hun gang laten gaan, kan deze erosie nog heel lang doorgaan.

3.2.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

In de sterk verdiepte geulen sedimenteert het zand dat Rijn en Maas naar de Rijn-Maasmonding voeren. Aan baggeren valt hier niet te ontkomen, maar met het gebaggerde zand kunnen we anders omgaan. In het huidige beheer wordt jaarlijks circa 350.000 m³ zand aan het gebied onttrokken. Dit zand kan zoveel mogelijk voor het gebied behouden blijven (sedimentbeheer), door het terug te storten in de verbindingstakken die eroderen op plekken waar het de scheepvaart niet hindert.

Door de grote diepte van de vaargeulen kan zeewater verder landinwaarts doordringen dan zonder de verdieping het geval zou zijn geweest. De vaardiepte heeft dus invloed op de zoutindringing [12].

3.3. Zuidelijke takken

3.3.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

In het Haringvliet en Hollandsch Diep vindt sinds de aanleg van de Haringvlietdam sedimentatie plaats van zand en slib dat door Rijn en Maas wordt aangevoerd (tabel 6).

Op deze takken is het getijverschil door de Deltawerken sterk afgenomen. De energie van de golven komt nu terecht op een veel kleiner deel van het talud van de slikken en platen dan vroeger. Daardoor is een groot deel van deze natuurgebieden geërodeerd. Het op een kier zetten van de Haringvlietssluisen zal de getijrange en de stroomsnelheden niet noemenswaardig vergroten. Oeververdediging blijft nodig om de bestaande slikken en platen te behouden.

3.3.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Geen bijzonderheden.

3.3.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

In het Hollands Diep ligt een gebaggerde geul voor de oversteek van zeeschepen naar het havengebied van Moerdijk. De sedimentatie in dit gebied heeft consequenties voor het onderhoudsbaggerwerk van deze geul.

Het afgenomen getijverschil heeft grote gevolgen gehad voor de natuurgebieden in het zuidelijke deel van de Rijn-Maasmonding (oevererosie). Toch is een deel, dankzij vooroeverbescherming (dammen in het water op korte afstand voor de randen van de slikken en platen), behoed voor erosie. Dit zijn waardevolle natuurgebieden gebleven.

3.4. Verbindende takken

3.4.1. Grootschalige morfologische ontwikkelingen

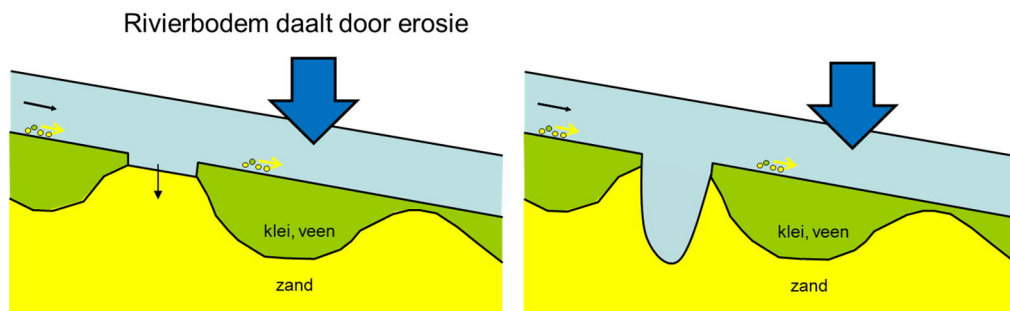
De Oude Maas, De Noord, Dordtsche Kil en het Spui eroderen mede door de hoge stroomsnelheden na het sluiten van het Haringvliet in 1970 (tabel 6). Voor de Oude Maas geldt dat ook de terugschrijdende erosie als gevolg van de verschillende verdiepingen van de Nieuwe Waterweg in het verleden bijdraagt aan de erosie van deze tak. In het Spui en in de Noord is de opgetreden

(breedtegemiddelde) daling van de rivierbedding sinds 1976 0,5 tot 1,5 m, en in de Oude Maas 0 tot 4 m. In de Dordtsche Kil is de verlaging van de rivierbedding grotendeels het gevolg van baggeren.

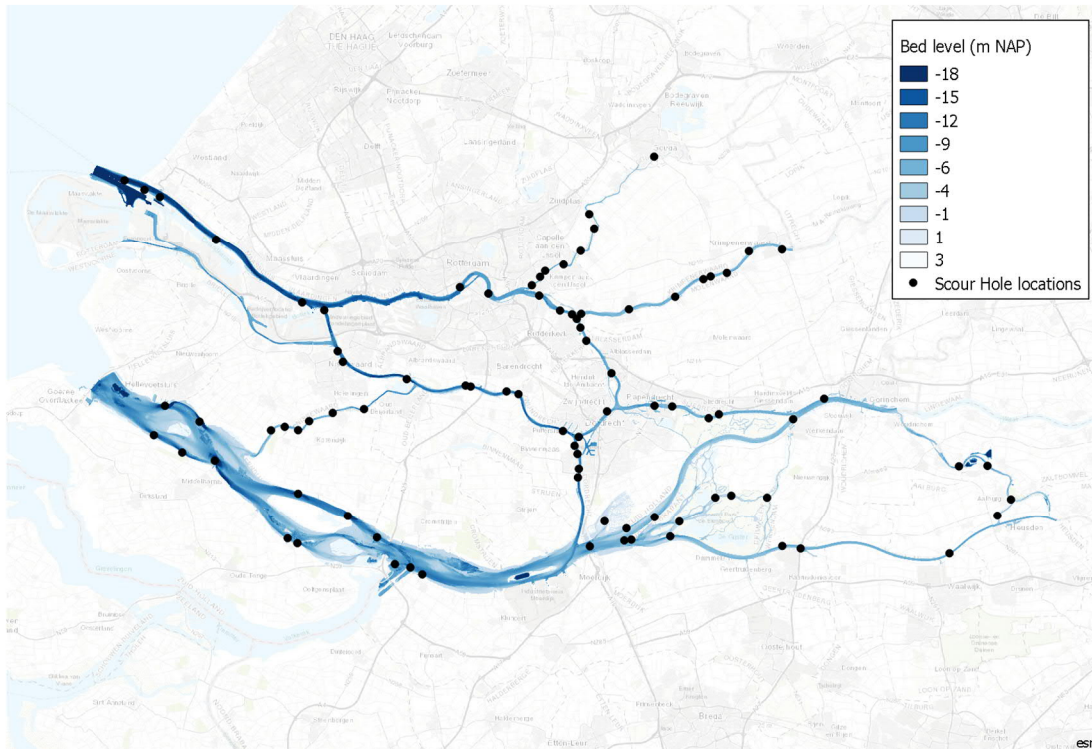
3.4.2. Kleinschalige morfologische ontwikkelingen

Ontwikkelingen in de hoofdgeul

Het merendeel van de kuilen in de beddingen van de verbindende takken bestond al voor het sluiten van het Haringvliet. Op veel plaatsen heeft menselijk handelen het ontstaan of de groei van diepe kuilen versterkt: de Deltawerken leidden tot hogere stroomsnelheden (zie hiervoor), en in de Dordtsche Kil ligt het zand aan de oppervlakte omdat de afdekkende kleilaag (waarschijnlijk) is weggebaggerd. Er zijn in de Rijn-Maasmonding ruim 100 erosiekuilen geïdentificeerd (figuur 32) die deels te herleiden zijn op de aanwezigheid van constructies in of langs de rivier (brugpijlers, kribben, dammen), op de samenvloeiing van riviertakken, op de geologie (heterogeniteit van de ondergrond), of een combinatie hiervan. Ook nu nog kunnen nieuwe kuilen ontstaan of kunnen bestaande kuilen verder verdiepen. Het overgrote deel van de erosiekuilen leidt niet tot problemen, een klein deel wel. Er zijn dieptes van de erosiekuilen gerapporteerd (opname in 2014) tot maximaal 10 meter [53].



Figuur 31. Daar waar zand aan de oppervlakte ligt, kan dit door de hoge stroomsnelheden op een aantal takken in het Rijn-Maasmonding tot grote diepte worden geërodeerd. Daar waar klei aan de oppervlakte ligt, vindt geen noemenswaardige erosie plaats. Deze afwisseling van zand en klei leidt tot het ontstaan van diepe erosiekuilen.



Figuur 32. Overzicht van erosiekuilen in de Rijn-Maasmond.

Ontwikkelingen in winterbed en oeverzone

In §1.2.2. is een toelichting gegeven op de mogelijke aanslibbing van nevengeulen aan de hand van observaties van slibdiktes op de geulbodem en de geuloevers in een selectie van 12 geulen, waaronder geulen in de Sophiapolder langs De Noord [55]. In een voorstel voor de beoordeling van de mate van aanslibbing waarboven onderhoud plaats zou moeten vinden is een 'signaleringswaarde' voor handelen gedefinieerd: bij minstens 10 cm slibdikte in een meestromende nevengeul en 20 cm in een geïsoleerde strang over meer dan 50% van de geuloppervlakte. De resultaten staan in tabel 1. Met rood is aangegeven voor welke nevengeulen deze 'signaleringswaarde' wordt overschreden. Dat is voor de geselecteerde geulen langs De Noord het geval.

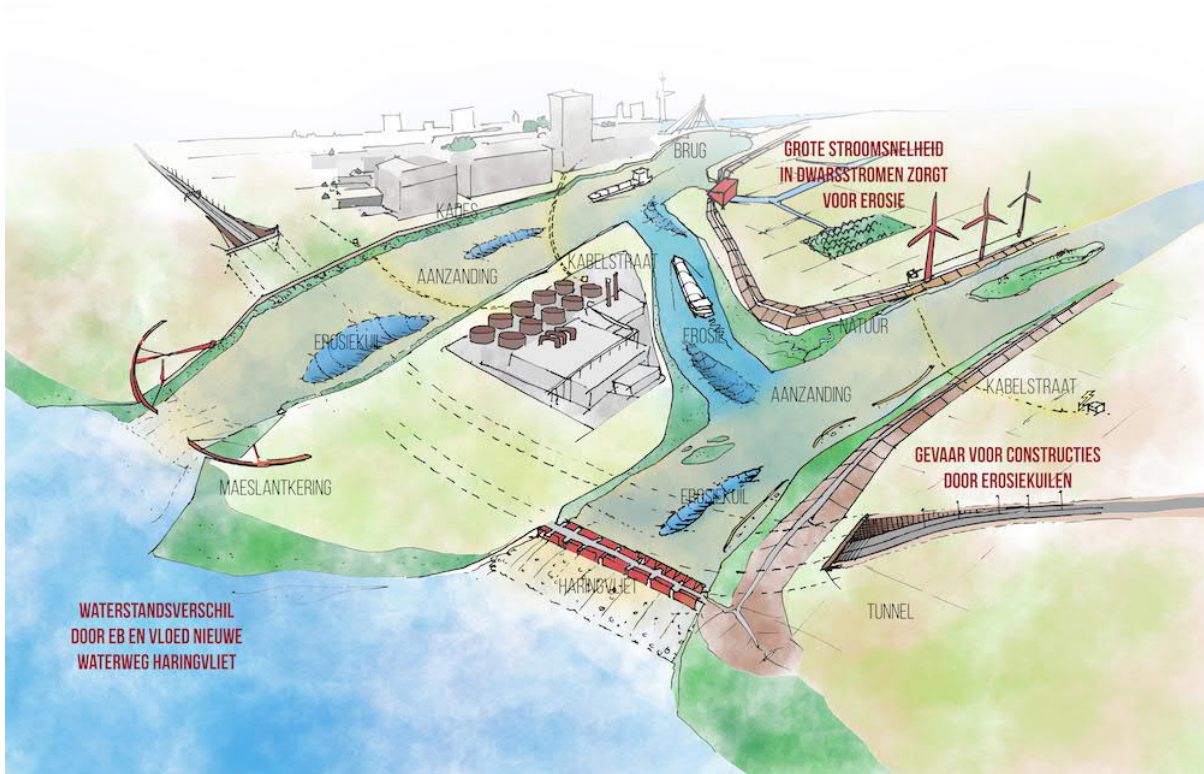
3.4.3. Impact op functies: Zomerbed – Oeverzone – Winterbed

Erosiekuilen boven tunnels, kabels en leidingen, en bij waterkeringen

De diepe kuilen in de Rijn-Maasmond kunnen tot problemen leiden als de dekking boven tunnels, kabels of leidingen onvoldoende wordt, of als de stabiliteit van waterkeringen, oevers of brugpijlers wordt bedreigd (figuur 33). Met name in de Oude Maas zijn er meerdere locaties waar het Pleistocene zand bijna wordt ingesneden. Deze tak erodeert. Hier worden de meeste nieuwe kuilen verwacht en kunnen bestaande kuilen aan elkaar groeien. De beheerrisico's zijn hier groot: volgens de beschikbare gegevens hebben enkele kabels en leidingen nu al geen of onvoldoende dekking [53]. Op de andere takken is de erosie minder sterk; de meeste ontgrondingskuilen zijn daar stabiel dan op de Oude Maas [53].

Scheepvaart

De vaarbreedte is met name op de Beneden Merwede en de Oude Maas een knelpunt. In het algemeen moet vooral in de bochten de vaargeul extra breed zijn omdat schepen daar meer ruimte nodig hebben om te manoeuvreren. De breedte van de vaargeul kan versmallen als een oever moet worden bestort bij een diepe kuil die de stabiliteit van die oever bedreigt. Een maatregel voor de waterveiligheid, als reactie op sterke erosie, kan zo voor de scheepvaart een belemmering zijn. Dit speelt onder meer op de Dordtse Kil.



Figuur 33. De mogelijke gevolgen van morfologische ontwikkelingen in de Rijn-Maasmonding voor de functies van de rivier.

3.5. Doorkijk langere termijn

De water- en sedimentbeweging in de Rijn-Maasmonding is door de Deltawerken en door maatregelen voor de haven en de scheepvaart (zoals verdieping bestaande en graven nieuwe takken) compleet veranderd. Door deze ingrepen zal de morfologie blijven veranderen, een ontwikkeling die zich tot in volgende generaties zal doorzetten. Daarmee zal ook de interactie tussen de rivierafvoer en het getij, en dus de zoutindringing, blijven veranderen.

Als we de huidige situatie niet meer wijzigen, zullen de sedimentatie op het Haringvliet en Hollandsch Diep, en de erosie op de verbindende takken nog lang blijven doorgaan. Die erosie kan in de komende decennia meerdere meters bedragen, gemiddeld voor een riviertak. Deze erosie zal met name sterk versnellen als de kleilaag verdwijnt die nu in veel takken de erosie nog beperkt. Naarmate er meer gaten in deze kleilaag ontstaan, zullen meer diepe kuilen ontstaan en zullen kuilen aan elkaar groeien waarna de erosie versnelt. Baggeren voor de scheepvaart blijft nodig, tenzij door innovaties alternatieve oplossingen beschikbaar komen. Voortgaande erosie van de verbindende

takken zou kunnen leiden tot meer getij-invloed en een toename van de zoutindringing, een veranderende afvoerverdeling, hogere stroomsnelheden en nog meer erosie.

In de Rijn-Maasmonding zijn de morfologische effecten van het op een kier zetten van de Haringvlietsluizen en van de uitgevoerde maatregelen van het programma Ruimte voor de Rivier waarschijnlijk klein.

Als gevolg van klimaatverandering zal de zeespiegel waarschijnlijk versneld verder stijgen. Het wordt niet waarschijnlijk geacht dat het stormregime voor de Nederlandse kust deze eeuw significant zal veranderen. Naar verwachting worden piekafvoeren op de rivieren hoger en komen zij vaker voor, terwijl de lage afvoeren lager worden en langer duren. Zowel de zeespiegelstijging als de veranderingen in het afvoerregime van Rijn en Maas zullen op de lange termijn effect hebben op de morfologie van de Rijn-Maasmonding.

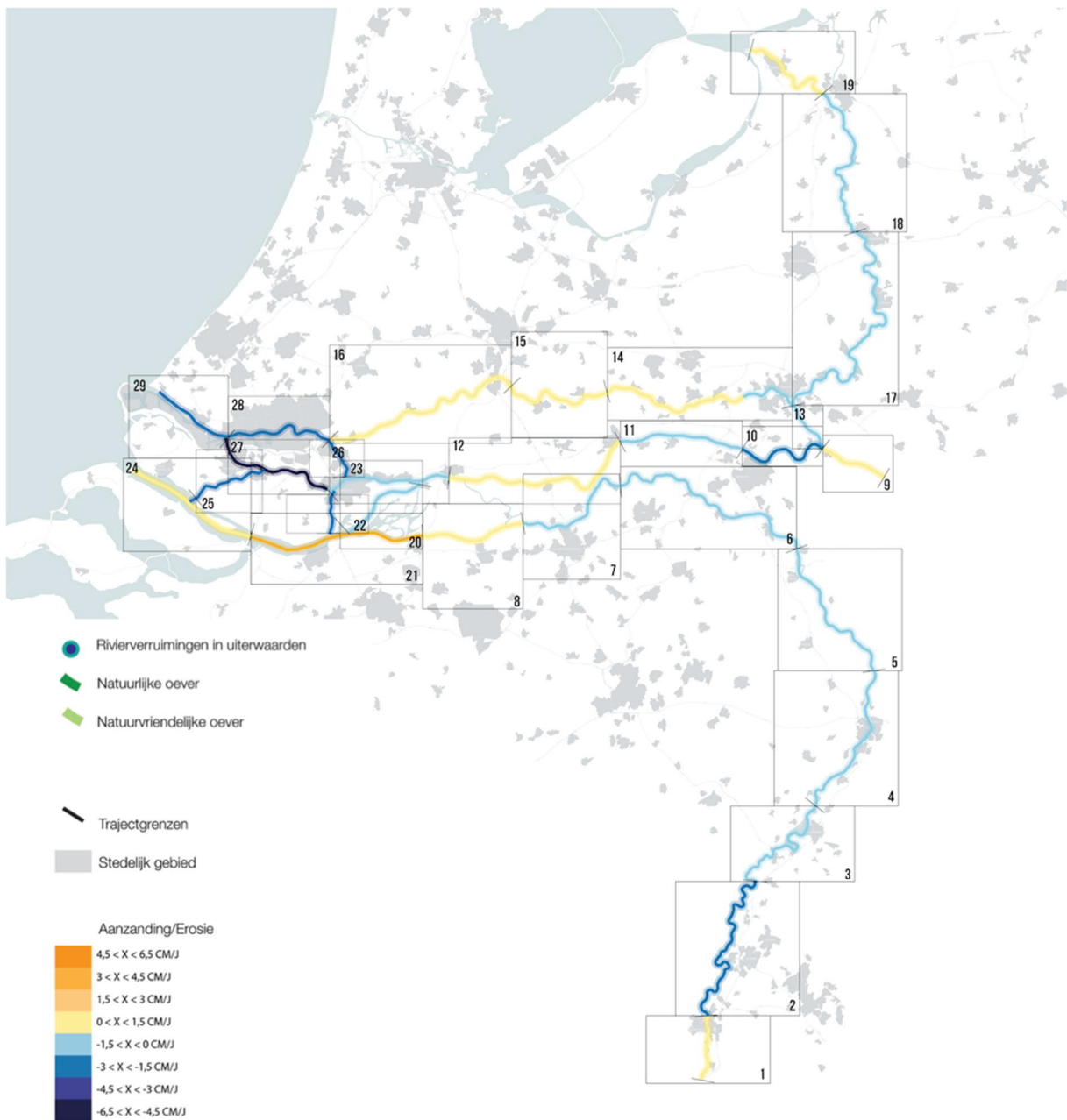
Referenties

1. Verhaal van de Maas (2019)
2. Verhaal van de Rijn-Maasmonding (2019)
3. ARCADIS (2016a). Morfologische ontwikkeling oevers na kribverlaging op basis van laseraltimetrie gegevens 2010 t/m 2015. Rapportage C03021.000140.0500 voor Rijkswaterstaat PDR.
4. ARCADIS (2016b). Morfologische ontwikkeling hoofd- en vaargeul na kribverlaging op basis van multibeamgegevens in periode 2009-2015. Rapportage C03021.000140.0500 voor Rijkswaterstaat PDR.
5. Blom, A. (2016). Bodemerosie in de Rijn. TU Delft DeltaLinks.
6. Blom, A. (2019). Effects of climate change on the Dutch Rhine branches. TU Delft DeltaLinks.
7. Blom, A. Riviermorfodynamica en waterveiligheid. Presentatie TU Delft.
8. Blueland (2013). Fact finding afvoerverdeling Rijntakken. Rapport Blueland B13.01.
9. Deltares (2011). Deltaprogramma Rivieren. Morfologie en scheepvaart. Bepalen opgave 2100. Rapport 1203442-000.
10. Deltares (2015). Sustainable Fairway Rhinedelta II. Effects of yearly bed stabilisation nourishments, Delta Program measures and training walls. Rapport 1209175-000.
11. Deltares (2018a). Memo Bevindingen en aanbevelingen Reflectiegroep MIRT onderzoek Duurzame Bodemligging.
12. Deltares (2018b). Verondieping Oude Maas als potentiële maatregel tegen verzilting: een verkenning. Rapport kenmerk 11202241-003-ZWS-000 1.
13. De Vriend, H. (2015). The long-term response of rivers to engineering works and climatechange. Civil Engineering 168 Issue CE3: 139-144.
14. Folkertsma, S. (2019). Nut en noodzaak van een morfologisch model voor de Maas. Presentatie.
15. Frings, R. et al. (2014). Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. Catena 122: 91-102.
16. Frings, R. (2016). De verstoorde sedimentbalans van de Rijn. Presentatie Sedimentbalans Workshop Utrecht, 4 oktober 2016.
17. Hiemstra (2019). Development of a methodology to assess functional performance of the Dutch Rhine. A case study on the impact of autonomous trends and sediment management strategies. Master of Science thesis TU Delft.
18. Middelkoop, H. (2001). Embanked floodplains in the Netherlands. Proefschrift Universiteit Utrecht.
19. Middelkoop, H., Erkens, G. en M. Van der Perk (2010). The Rhine delta - a record of sediment trapping over time scales from millennia to decades. J. Soils Sediments 10: 628-639.
20. Middelkoop, H., Stouthamer, E., Schoor, M.M., Wolfert, H.P. en G.J. Maas (2003). Kansrijkdom voor rivierecotopen vanuit historisch-geomorfologisch perspectief. NCR Publication 21-2003.
21. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2018). MIRT Onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken. Eindrapportage.
22. Murillo-Muñoz, R.E. (1998). Downstream fining of sediments in the Meuse River. M.Sc. Thesis, International Institute for Infrastructural Hydraulic and Environmental Engineering, Delft, Netherlands.
23. Paarlberg, A. en S. Quartel (concept). Bundeling systeemkennis bodemtrends Rijntakken, met voorstel beheer komende decennia. Memo Rijkswaterstaat Oost-Nederland.
24. Reeze, B., van Winden, A., Postma, J., Pot, R., Hop, J. en W. Liefveld (2017). Watersysteemrapportage Rijntakken 1990-2015. Ontwikkelingen waterkwaliteit en ecologie. Bart Reeze Water & Ecologie, Harderwijk.
25. Royal Haskoning DHV (2016). Morfologische effecten rivierverruiming. Rapport WATRC_BE9738-101_R0001_902199_f1.0.
26. Royal Haskoning DHV (2018). Systeemanalyse Grensmaas. Rapport WATBF5303R003F0.1.

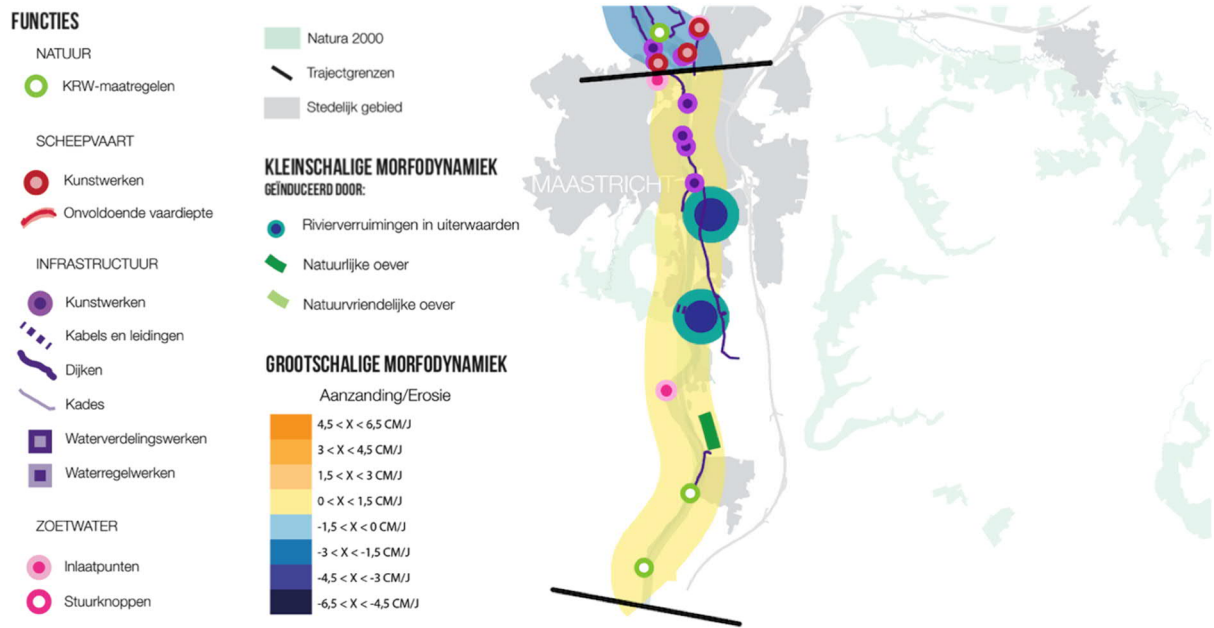
27. Royal Haskoning en Meander (2003). MER Grensmaas 2003. Achtergronddocument 2.1. Morfologie – bureaustudie. Rapport 9M4711.B0/R001//Nijm.
28. RWS Oost-Nederland (2016). Duurzame Vaardiepte Rijntakken (DVR2). Studie naar problematiek en mogelijke aanpak van bodemerosie en aanzanding in het zomerbed van de Rijntakken in Oost-Nederland. Incl. Bijlagenrapport DVR2.
29. RWS Waterdienst (2008). Kennis en instrumenten Maas morfologie. Inventarisatie behoefte monitoring en voorspelgereedschap. Waterdienst rapport nr. 2008-050.
30. Ten Brinke, W. (2004). De Beteugelde Rivier. Veen Magazines, Diemen.
31. Ten Brinke, W.B.M., Schulze, F.H. en P. van der Veer (2004). Sand exchange between groyne-field beaches and the navigation channel of the Dutch Rhine: the impact of navigation versus river flow. *River research and applications* 20: 899-928.
32. Tollenaar, K. (2002). Morfologische effecten door klimaatverandering bij de toepassing van Ruimte voor Rijntakken maatregelen. Eindverslag afstudeerproject TU Delft.
33. Van der Perk, M., C.A.T. Sutari en H. Middelkoop (2019). Examination of the declining trend in suspended sediment loads in the Rhine River in the period 1952-2016. Book of abstracts NCR Days 2019.
34. Van Vuren, S., Paarlberg, A. en H. Havinga (2015). The aftermath of 'Room for the River' and restoration works: Coping with excessive maintenance dredging. *Journal of Hydro-environment Research* 9: 172-186.
35. Van Weerdenburg (2018). Measured change in bed elevation and surface texture near longitudinal training dams in the Waal River. Master Thesis TU Delft.
36. Wijbenga, J.H.A. (2001). Diepgang en morfologie te Lith. Memo.
37. Sorber en De Vaan (1995), in: Rijkswaterstaat Waterdienst (2008)
38. DWW (2001), in: Rijkswaterstaat Waterdienst (2008)
39. Sloff (2000), in: Deltares (2011)
40. Frings en Erkens, in: Blom (2016)
41. Rijkswaterstaat. Presentatie Watersysteemrapportage Rijntakken.
42. DHV (2013), in: Royal Haskoning DHV (2016)
43. Van Dongen, B. en D. Meijer (2008). Zomerbedveranderingen van de Maas (1889-2007). Rapport Meander Advies 10314.
44. Wilbers, A. (2004). The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. Proefschrift Universiteit Utrecht.
45. Middelkoop, H. en N.E.M. Asselman (1998). Spatial variability of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 561-573.
46. De Wit, M. (2008). Van regen tot Maas. Uitgeverij Veen Magazines, Diemen.
47. Becker, A. (2015). Sediment in (be)weging. Deel 2 (periode 2000-2012). Rapport Deltares 1208925-000.
48. Quartel, S. (2019) Verdeling afvoer over de Rijntakken. Memo Rijkswaterstaat Oost-Nederland.
49. Kroekenstoel, D. en M. van den Berg (2011). Inschatting trends afvoerverdeling op basis van bodemliggingen. Memo Rijkswaterstaat.
50. Rijkswaterstaat Oost-Nederland (2010). Sedimentbeheer Rijntakken 2010 – 2015. Memo.
51. Van Vuren, S. en H. Havinga (2012). Preparing self supporting river systems: how to cope with excessive maintenance dredging?
52. Commissie voor de milieueffectrapportage (2013). Zomerbedverlaging Beneden-IJssel. Toetsingsadvies over het milieuraapport. Rapport 2485-90.
53. Huismans, Y. en O. Van Duin (2016). Advies beheer rivierbodemp van de Rijn-Maasmonding. Rapport Deltares 1208925-000.
54. Plan van aanpak onderzoeksprogramma morfologie Maas.
55. Royal HaskoningDHV (2019). Grip op nevengeulen.

56. Van Denderen, R.P., Schielen, R.M.J., Straatsma, M.W., Kleinhans, M.G., Hulscher, S.J.M.H. (2019). A characterization of side channel development. *River Research and Applications* 1-7. <https://doi.org/10.1002/rra.3462>.
57. Rijkswaterstaat, Arcadis, Deltares en TNO (2011). Inventarisatie en interpretatie ondergrondgegevens Maas. Eindrapportage. Rapport Arcadis C03021.910426.0100.
58. Hillebrand, G. en R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Rapport CHR/KHR II-22.
59. Rijkswaterstaat Programmadirectie Ruimte voor de Rivier (2013). MER deel A Zomerbedverlaging Beneden-IJssel.

Bijlage. Overzicht van KRW-maatregelen en van infrastructuur en kunstwerken die voor verschillende functies (scheepvaart, telecom en nutsvoorzieningen, waterveiligheid, zoetwatervoorziening) van belang zijn. De genummerde deelfiguren staan, in volgorde van nummering, op de volgende bladzijden.



Bijlage deelfiguur 1



Bijlage deelfiguur 2

FUNCTIES

NATUUR

- KRW-maatregelen

SCHEEPVAART

- Kunstwerken
- Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

- Kunstwerken
- Kabels en leidingen
- Dijken
- Kades
- Waterverdelingswerken
- Waterregelwerken

ZOETWATER

- Inlaatpunten
- Stuurknoppen

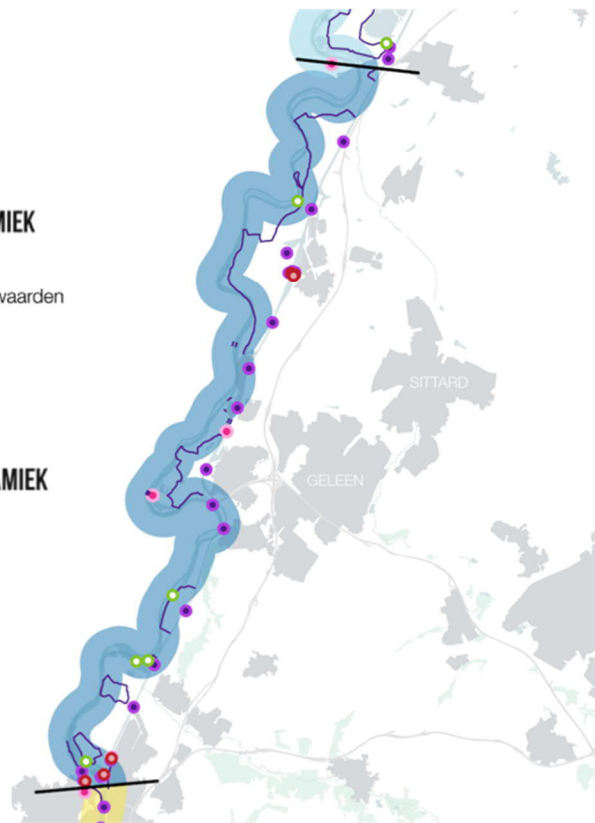
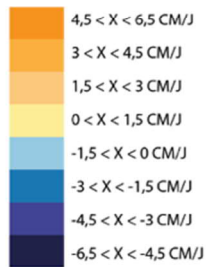
- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

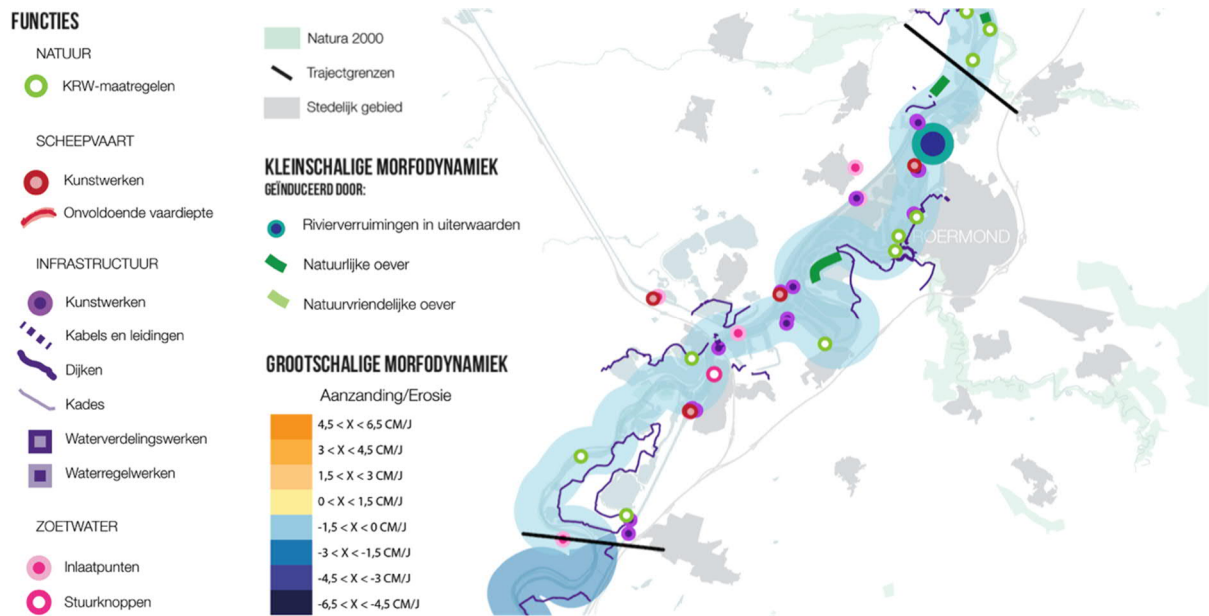
- Rivierverruimingen in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

Aanzanding/Erosie



Bijlage deelfiguur 3



Bijlage deelfiguur 4

FUNCTIES

NATUUR

- KRW-maatregelen

SCHEEPVAART

- Kunstwerken
- Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

- Kunstwerken
- Kabels en leidingen
- Dijken
- Kades
- Waterverdelingswerken
- Waterregelwerken

ZOETWATER

- Inlaatpunten
- Stuurknoppen

- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

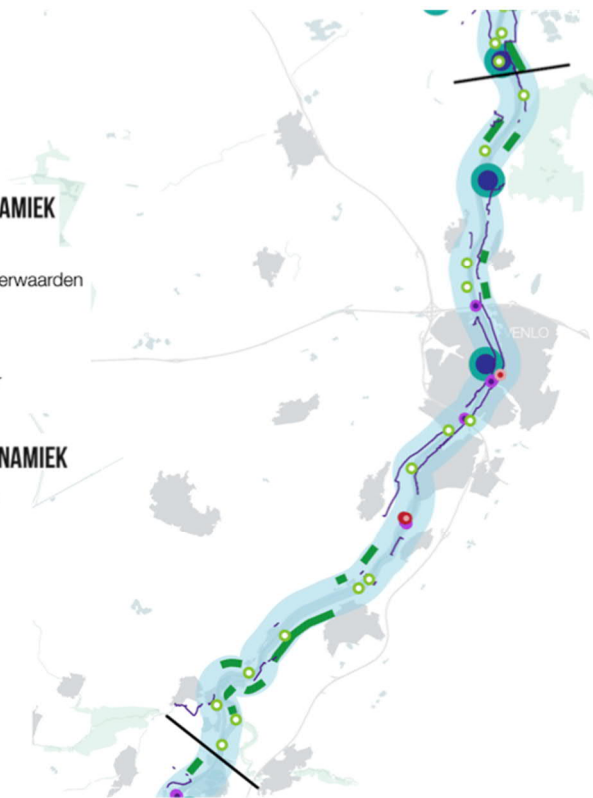
KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:

- Rivierverruiming in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

Aanzanding/Erosie

- $4,5 < X < 6,5$ CM/J
- $3 < X < 4,5$ CM/J
- $1,5 < X < 3$ CM/J
- $0 < X < 1,5$ CM/J
- $-1,5 < X < 0$ CM/J
- $-3 < X < -1,5$ CM/J
- $-4,5 < X < -3$ CM/J
- $-6,5 < X < -4,5$ CM/J






Bijlage deelfiguur 5

FUNCTIES

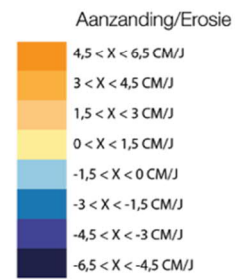
- NATUUR**
-  KRW-maatregelen
- SCHEEPVAART**
-  Kunstwerken
 -  Onvoldoende vaardiepte
- INFRASTRUCTUUR**
-  Kunstwerken
 -  Kabels en leidingen
 -  Dijken
 -  Kades
 -  Waterverdelingswerken
 -  Waterregelwerken
- ZOETWATER**
-  Inlaatpunten
 -  Stuurknoppen

-  Natura 2000
-  Trajectgrenzen
-  Stedelijk gebied

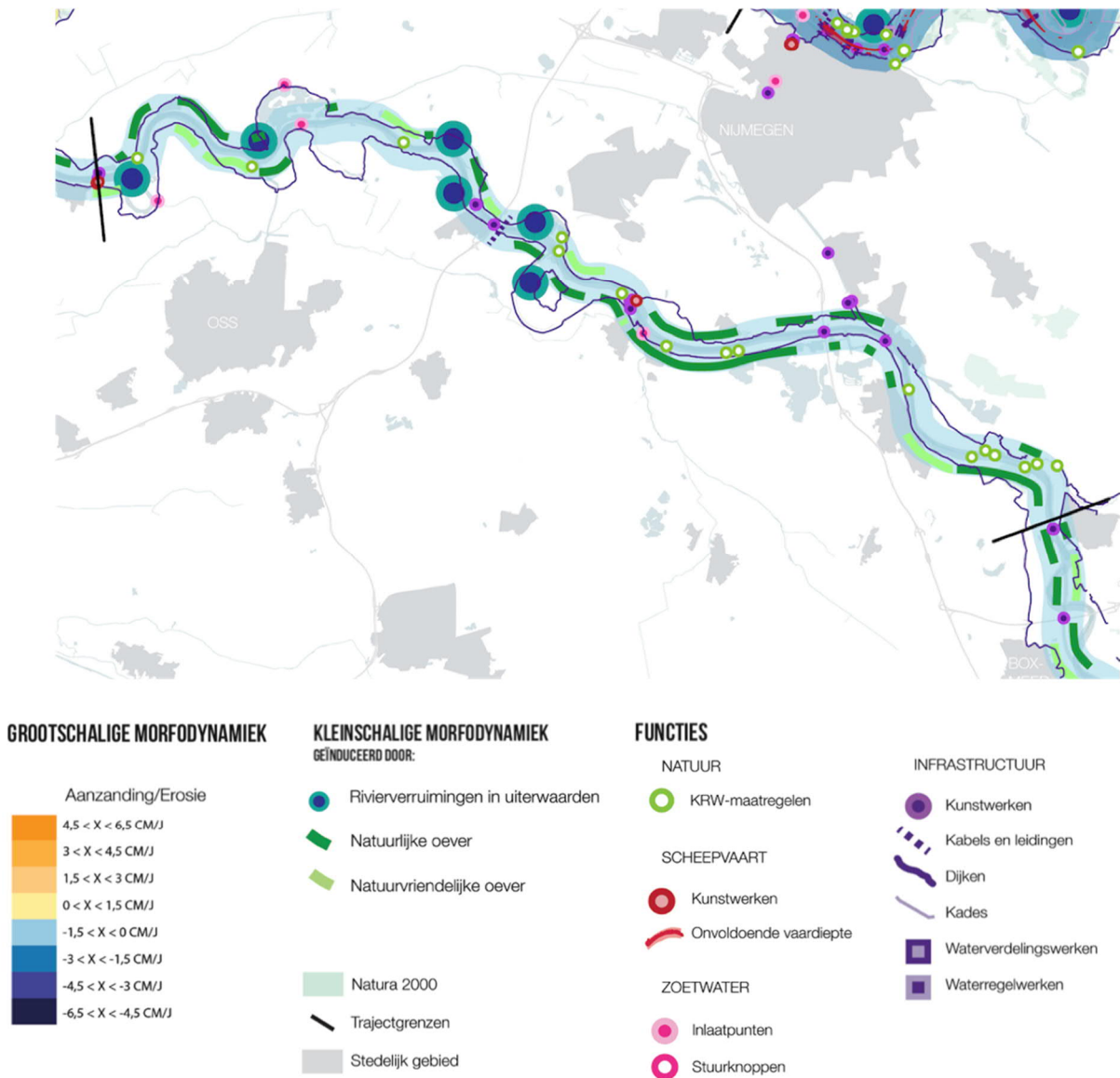
**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

-  Rivierverruiming in uiterwaarden
-  Natuurlijke oever
-  Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK






Bijlage deelfiguur 6






Bijlage deelfiguur 7

FUNCTIES









- NATUUR**
-  KRW-maatregelen
- SCHEEPVAART**
-  Kunstwerken
 -  Onvoldoende vaardiepte
- INFRASTRUCTUUR**
-  Kunstwerken
 -  Kabels en leidingen
 -  Dijken
 -  Kades
 -  Waterverdelingswerken
 -  Waterregelwerken
- ZOETWATER**
-  Inlaatpunten
 -  Stuurknoppen

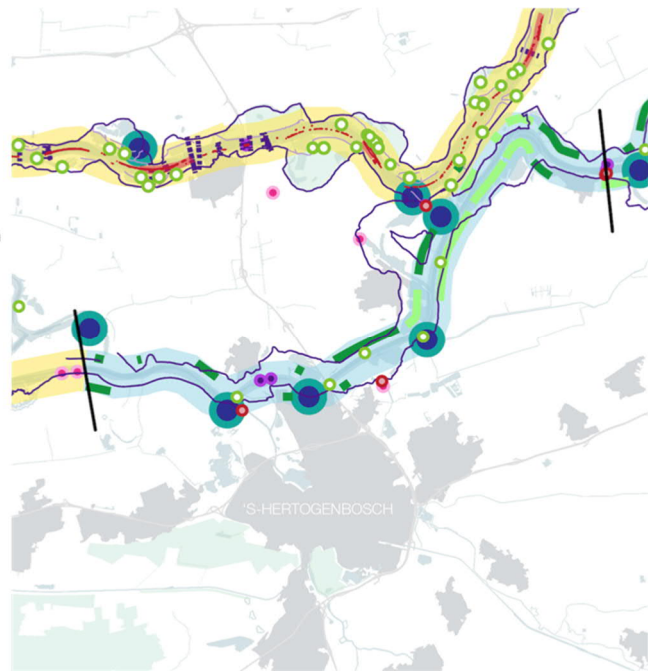
-  Natura 2000
-  Trajectgrenzen
-  Stedelijk gebied

**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

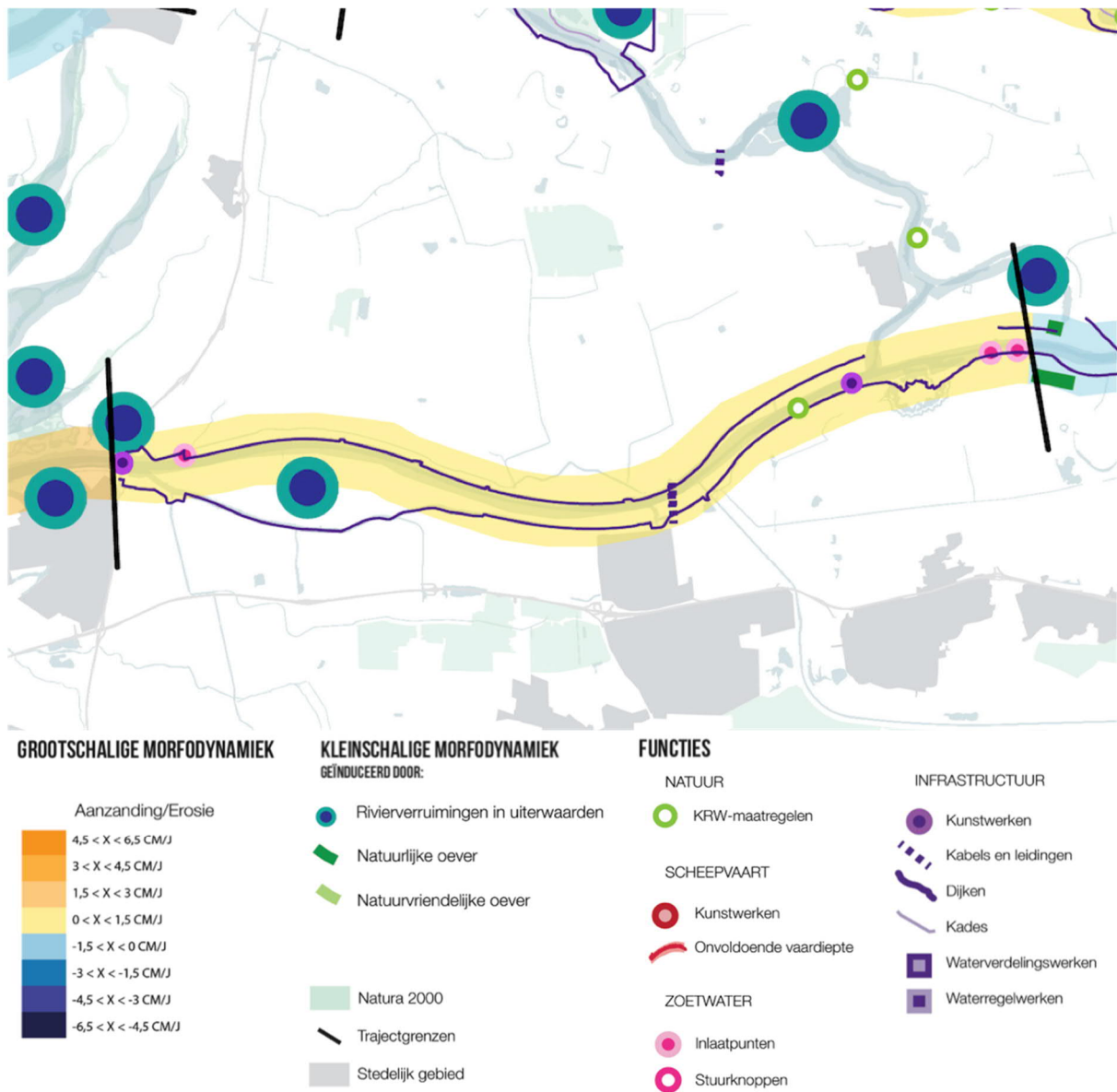
-  Rivierverruiming in uiterwaarden
-  Natuurlijke oever
-  Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

- Aanzanding/Erosie
-  $4,5 < X < 6,5 \text{ CM/J}$
 -  $3 < X < 4,5 \text{ CM/J}$
 -  $1,5 < X < 3 \text{ CM/J}$
 -  $0 < X < 1,5 \text{ CM/J}$
 -  $-1,5 < X < 0 \text{ CM/J}$
 -  $-3 < X < -1,5 \text{ CM/J}$
 -  $-4,5 < X < -3 \text{ CM/J}$
 -  $-6,5 < X < -4,5 \text{ CM/J}$




Bijlage deelfiguur 8



Bijlage deelfiguur 9

FUNCTIES

NATUUR

 KRW-maatregelen


SCHEEPVAART

 Kunstwerken

 Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

 Kunstwerken

 Kabels en leidingen

 Dijken

 Kades

 Waterverdelingswerken

 Waterregelwerken

ZOETWATER

 Inlaatpunten

 Stuurknoppen

 Natura 2000

 Trajectgrenzen

 Stedelijk gebied

KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK

GEÏNDUCEERD DOOR:


 Rivierverruiming in uiterwaarden


 Natuurlijke oever


 Natuurvriendelijke oever


GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK


Aanzanding/Erosie


 $4,5 < X < 6,5 \text{ CM/J}$

 $3 < X < 4,5 \text{ CM/J}$


 $1,5 < X < 3 \text{ CM/J}$

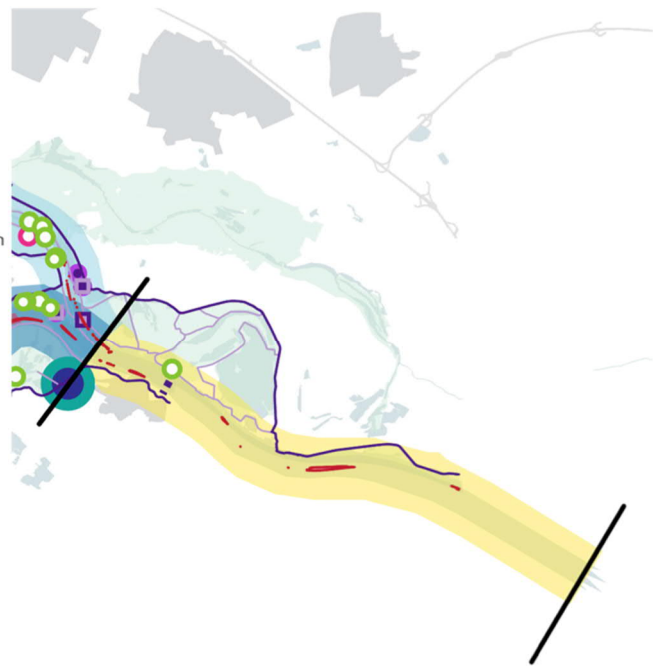
 $0 < X < 1,5 \text{ CM/J}$

 $-1,5 < X < 0 \text{ CM/J}$

 $-3 < X < -1,5 \text{ CM/J}$

 $-4,5 < X < -3 \text{ CM/J}$

 $-6,5 < X < -4,5 \text{ CM/J}$



Bijlage deelfiguur 10

FUNCTIES

NATUUR

- KRW-maatregelen

SCHEEPVAART

- Kunstwerken
- Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

- Kunstwerken
- Kabels en leidingen
- Dijken
- Kades
- Waterverdelingswerken
- Waterregelwerken

ZOETWATER

- Inlaatpunten
- Stuurknoppen

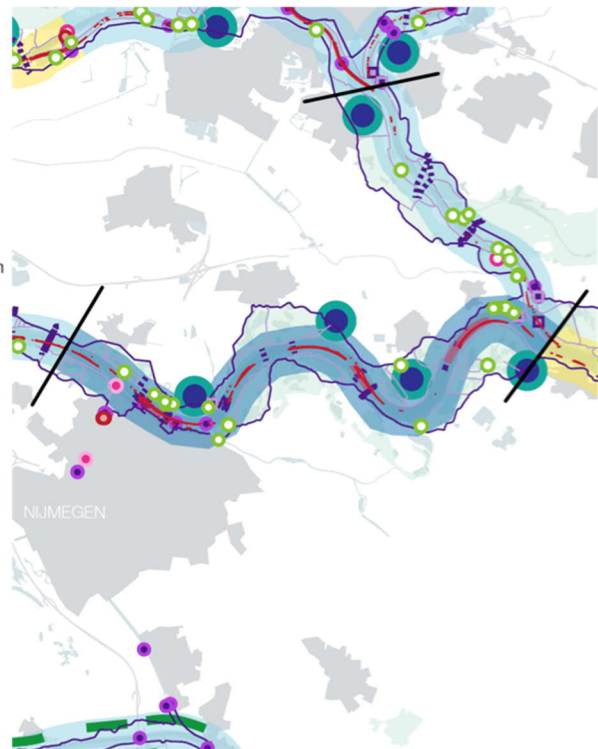
- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

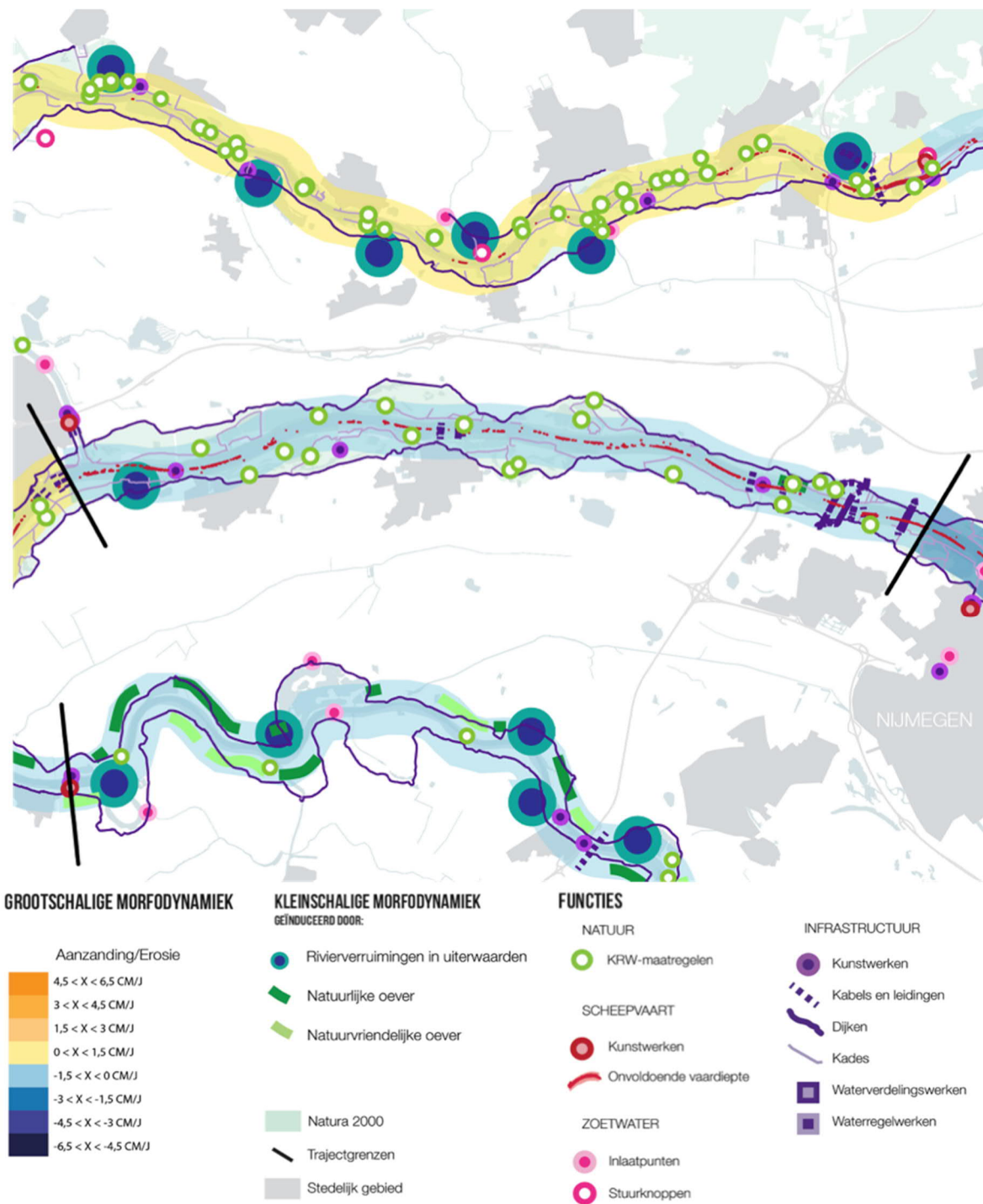
- Rivierverruiming in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

- Aanzanding/Erosie
- $4,5 < X < 6,5 \text{ CM/J}$
 - $3 < X < 4,5 \text{ CM/J}$
 - $1,5 < X < 3 \text{ CM/J}$
 - $0 < X < 1,5 \text{ CM/J}$
 - $-1,5 < X < 0 \text{ CM/J}$
 - $-3 < X < -1,5 \text{ CM/J}$
 - $-4,5 < X < -3 \text{ CM/J}$
 - $-6,5 < X < -4,5 \text{ CM/J}$



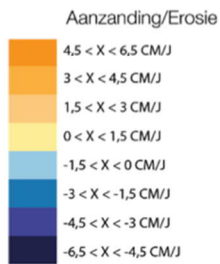
Bijlage deelfiguur 11



Bijlage deelfiguur 12



GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK

GEÏNDUCEERD DOOR:



FUNCTIES



Bijlage deelfiguur 13

FUNCTIONIES

NATUUR

- KRW-maatregelen

SCHEEPVAART

- Kunstwerken
- Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

- Kunstwerken
- Kabels en leidingen
- Dijken
- Kades
- Waterverdelingswerken
- Waterregelwerken

ZOETWATER

- Inlaatpunten
- Stuurknoppen

- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

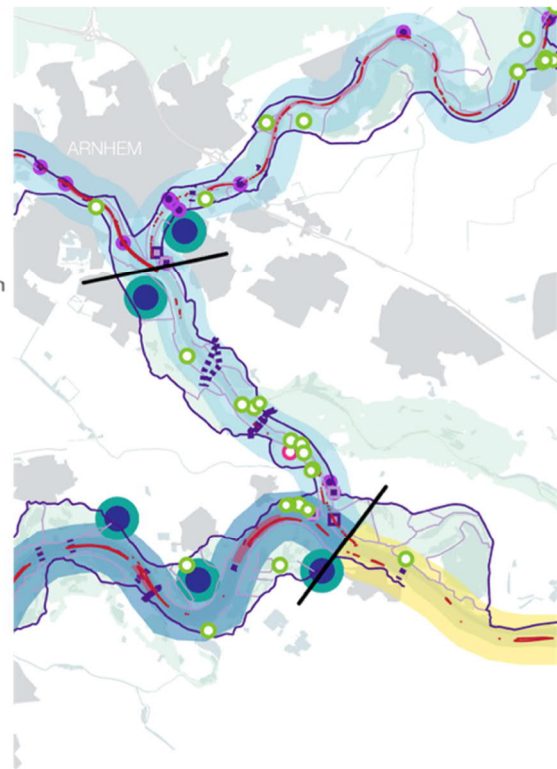
**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

- Rivierverruiming in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

Aanzanding/Erosie

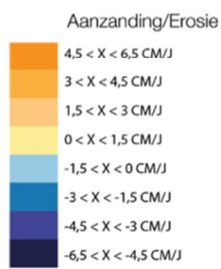
- $4,5 < X < 6,5 \text{ CM/J}$
- $3 < X < 4,5 \text{ CM/J}$
- $1,5 < X < 3 \text{ CM/J}$
- $0 < X < 1,5 \text{ CM/J}$
- $-1,5 < X < 0 \text{ CM/J}$
- $-3 < X < -1,5 \text{ CM/J}$
- $-4,5 < X < -3 \text{ CM/J}$
- $-6,5 < X < -4,5 \text{ CM/J}$



Bijlage deelfiguur 14



GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



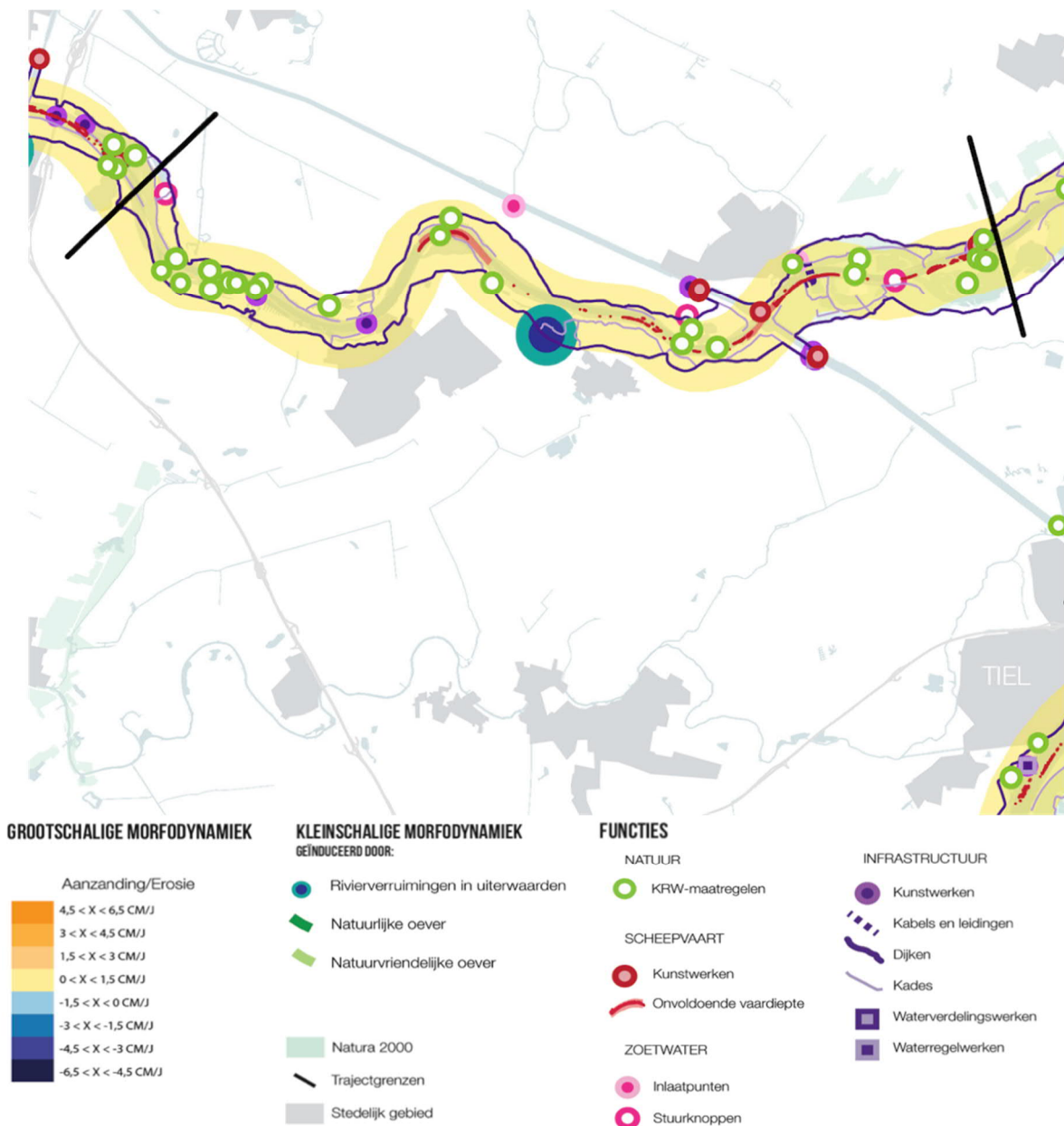
**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**



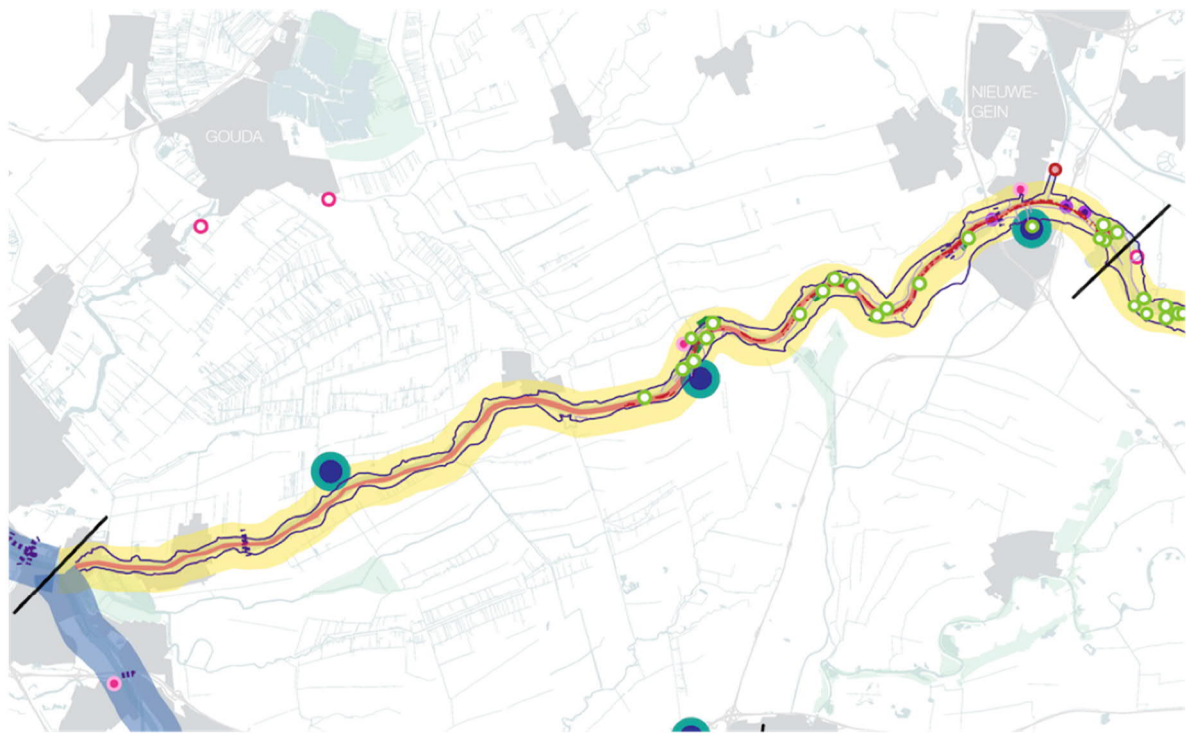
FUNCTIES



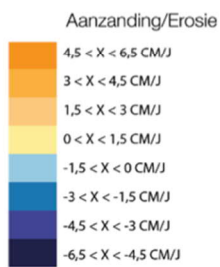
Bijlage deelfiguur 15



Bijlage deelfiguur 16



GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**



FUNCTIES



Bijlage deelfiguur 17

FUNCTIES

NATUUR

- KRW-maatregelen

SCHEEPVAART

- Kunstwerken
- Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

- Kunstwerken
- Kabels en leidingen
- Dijken
- Kades
- Waterverdelingswerken
- Waterregelwerken

ZOETWATER

- Inlaatpunten
- Stuurknoppen

- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

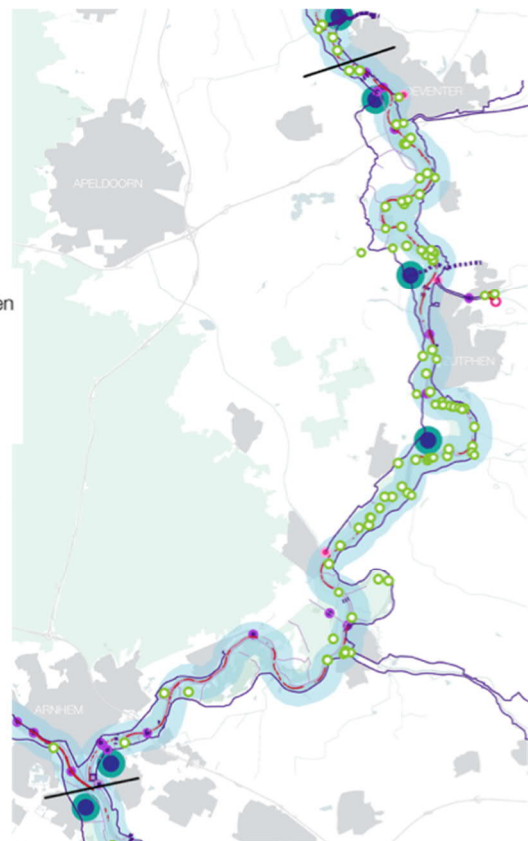
**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

- Rivierverruimingen in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

Aanzanding/Erosie

- $4,5 < X < 6,5 \text{ CM/J}$
- $3 < X < 4,5 \text{ CM/J}$
- $1,5 < X < 3 \text{ CM/J}$
- $0 < X < 1,5 \text{ CM/J}$
- $-1,5 < X < 0 \text{ CM/J}$
- $-3 < X < -1,5 \text{ CM/J}$
- $-4,5 < X < -3 \text{ CM/J}$
- $-6,5 < X < -4,5 \text{ CM/J}$



Bijlage deelfiguur 18

FUNCTIES

- NATUUR**
-  KRW-maatregelen
- SCHEEPVAART**
-  Kunstwerken
 -  Onvoldoende vaardiepte
- INFRASTRUCTUUR**
-  Kunstwerken
 -  Kabels en leidingen
 -  Dijken
 -  Kades
 -  Waterverdelingswerken
 -  Waterregelwerken
- ZOETWATER**
-  Inlaatpunten
 -  Stuurknoppen

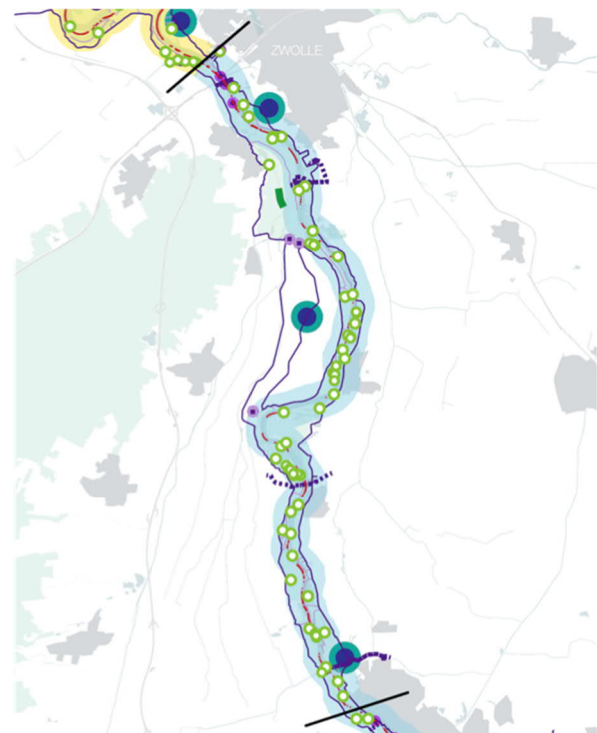
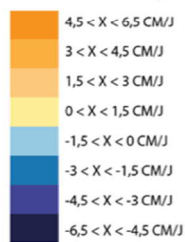
-  Natura 2000
-  Trajectgrenzen
-  Stedelijk gebied

**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

-  Rivierverruiming in uiterwaarden
-  Natuurlijke oever
-  Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

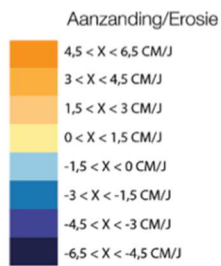
Aanzanding/Erosie



Bijlage deelfiguur 19



GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK

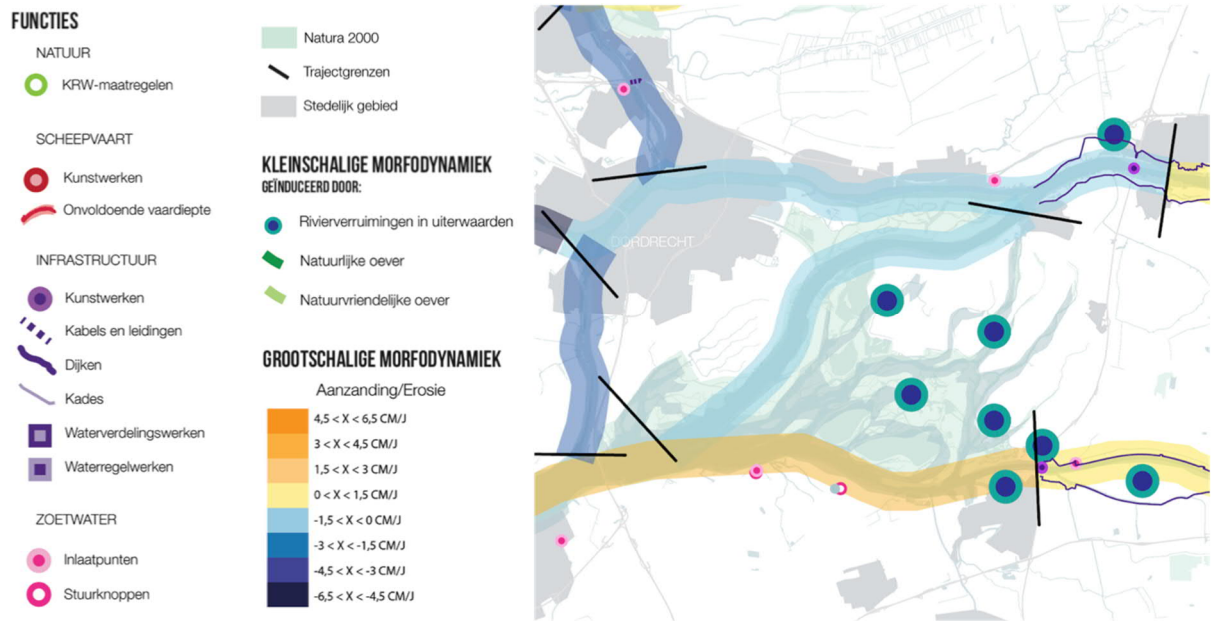
GEÏNDUCEERD DOOR:



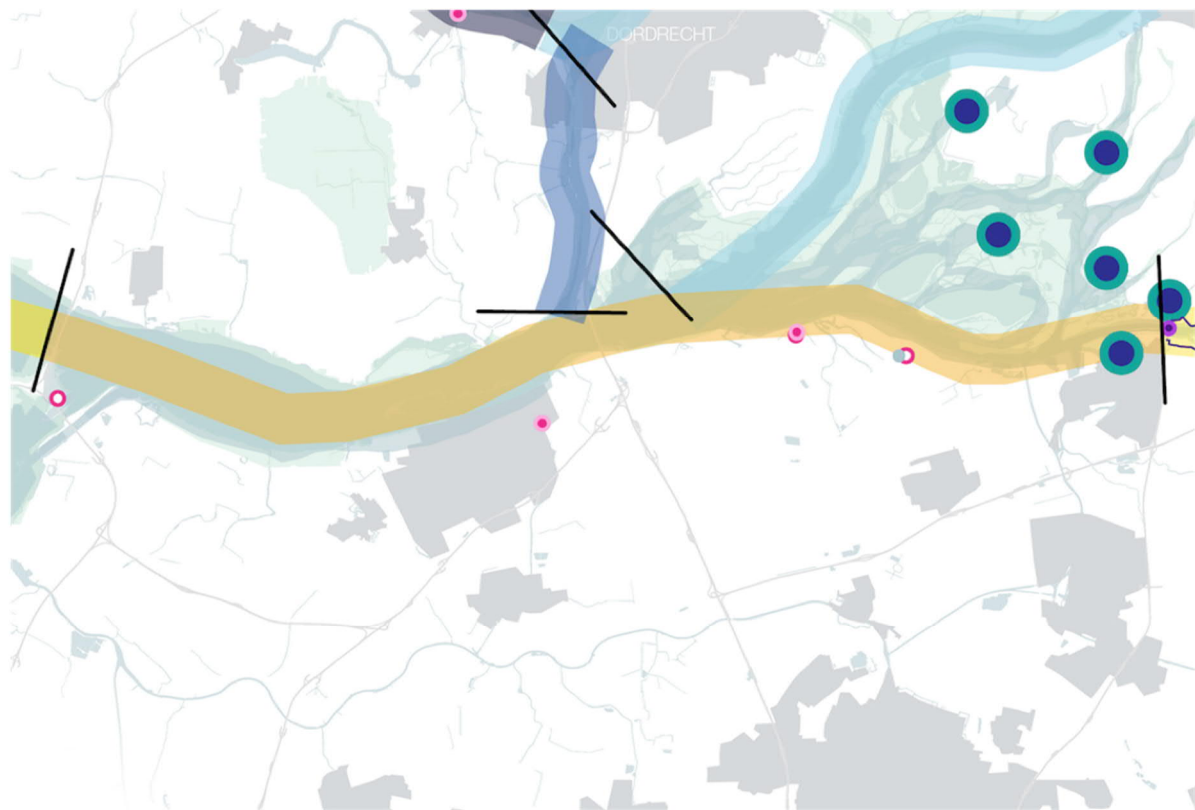
FUNCTIES



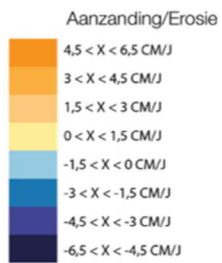
Bijlage deelfiguur 20



Bijlage deelfiguur 21



GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**



FUNCTIES



Bijlage deelfiguur 22

FUNCIES

NATUUR

- KRW-maatregelen

SCHEEPVAART

- Kunstwerken
- Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

- Kunstwerken
- Kabels en leidingen
- Dijken
- Kades
- Waterverdelingswerken
- Waterregelwerken

ZOETWATER

- Inlaatpunten
- Stuurknoppen

- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

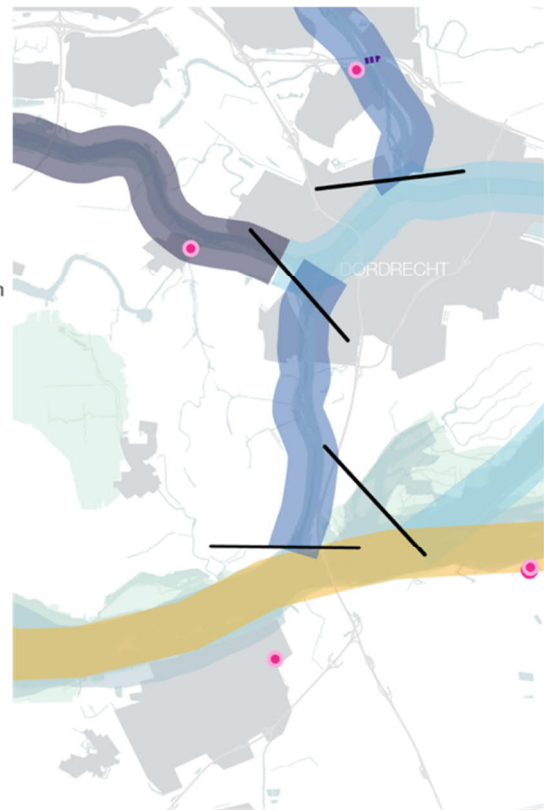
**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

- Rivierverruiming in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

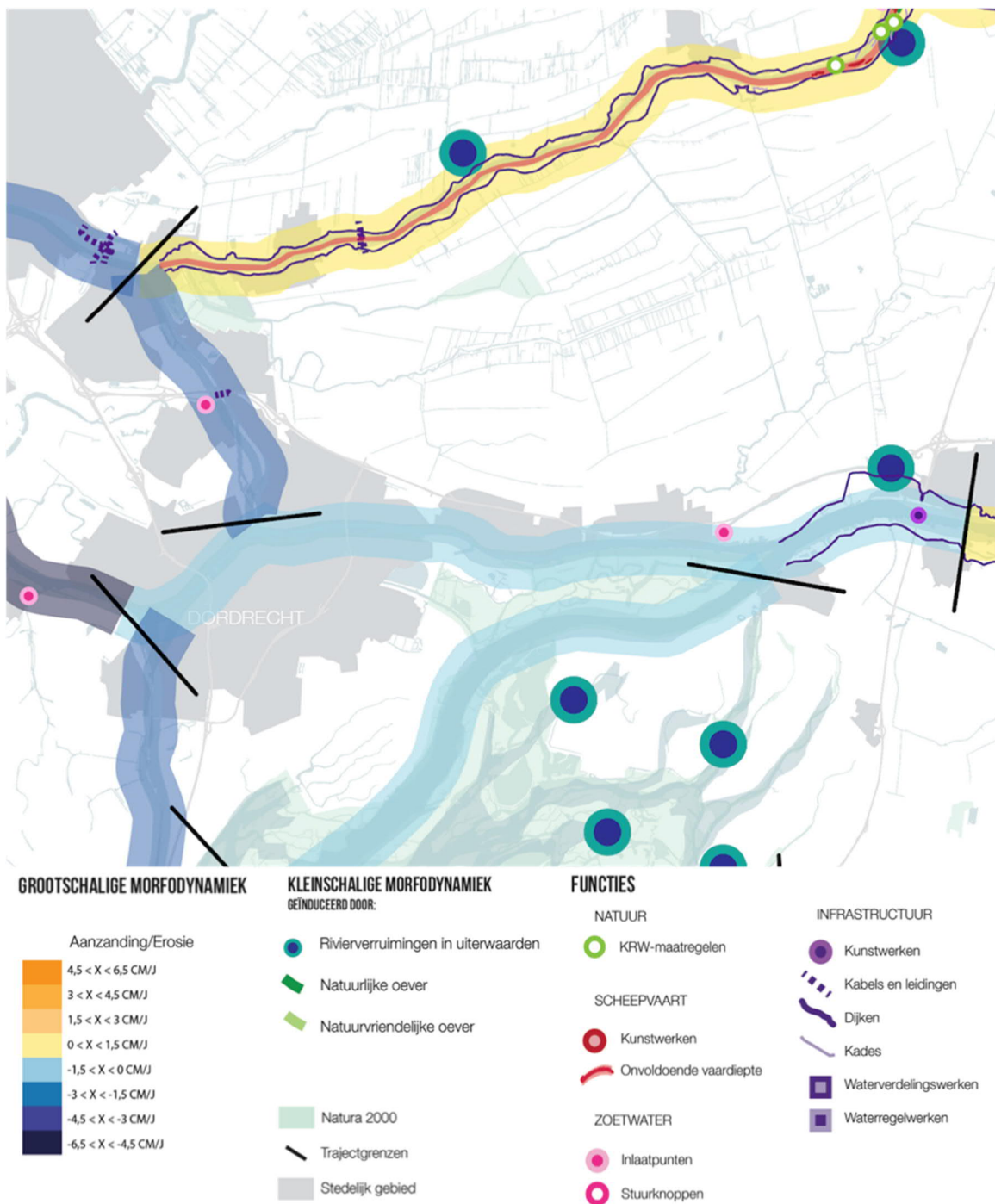
GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

Aanzanding/Erosie

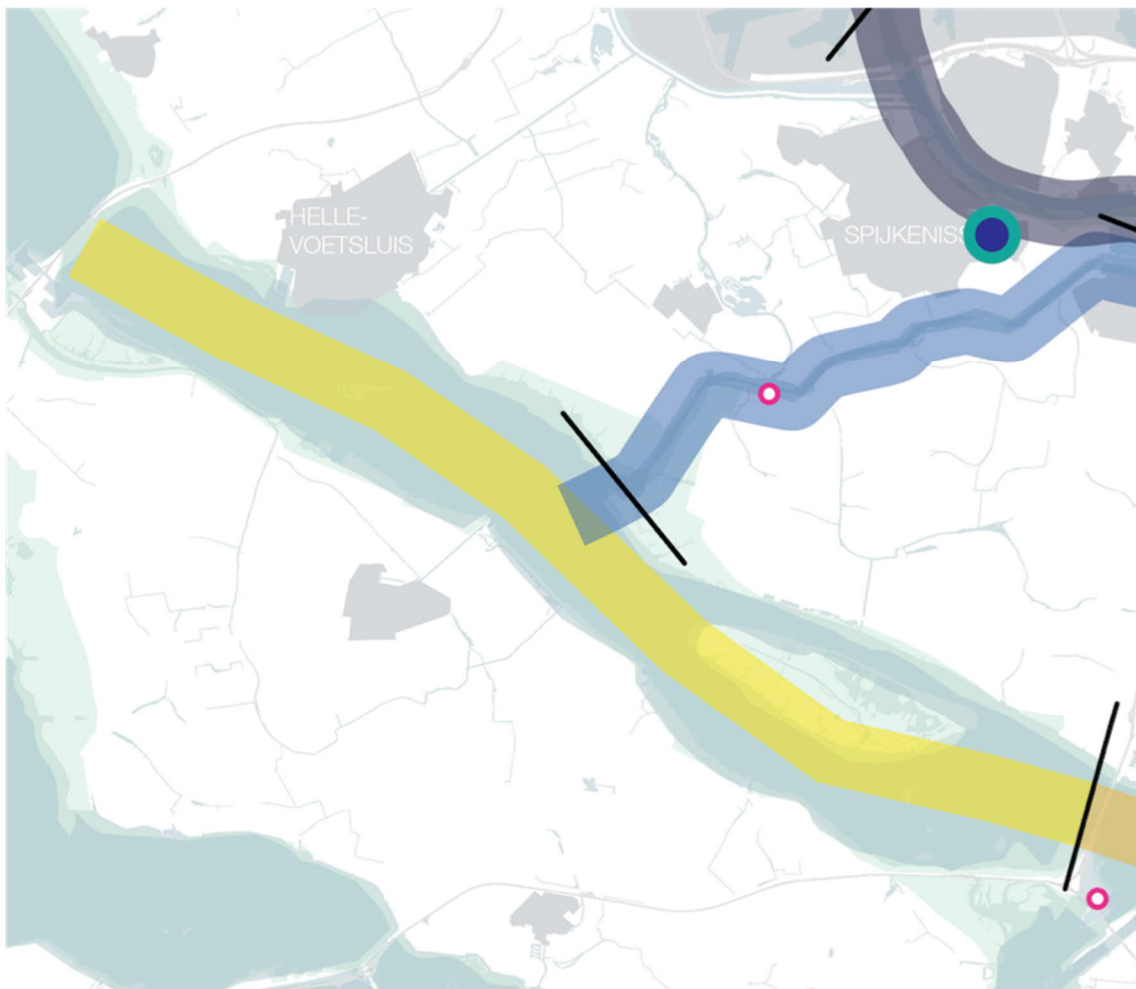
- $4,5 < X < 6,5 \text{ CM/J}$
- $3 < X < 4,5 \text{ CM/J}$
- $1,5 < X < 3 \text{ CM/J}$
- $0 < X < 1,5 \text{ CM/J}$
- $-1,5 < X < 0 \text{ CM/J}$
- $-3 < X < -1,5 \text{ CM/J}$
- $-4,5 < X < -3 \text{ CM/J}$
- $-6,5 < X < -4,5 \text{ CM/J}$



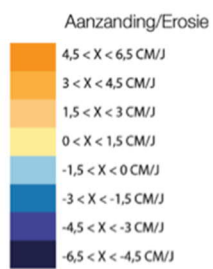
Bijlage deelfiguur 23



Bijlage deelfiguur 24



GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**



FUNCTIES






Bijlage deelfiguur 25

FUNCTIES

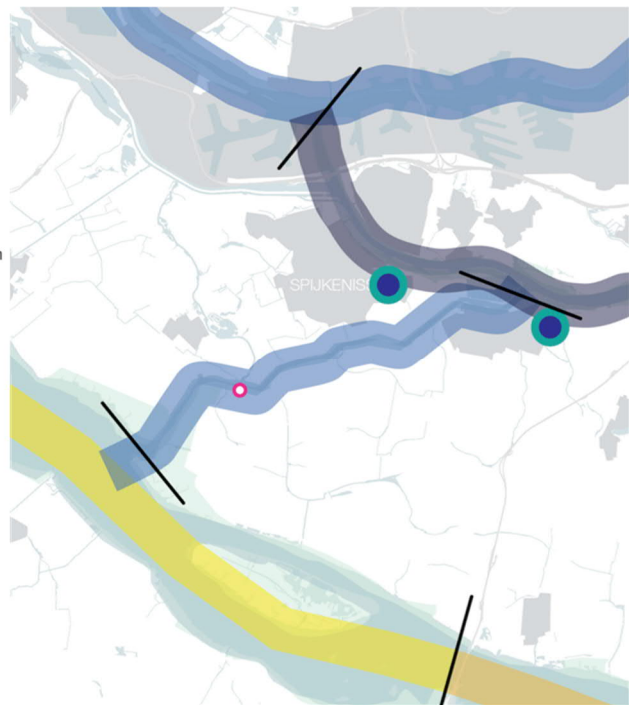
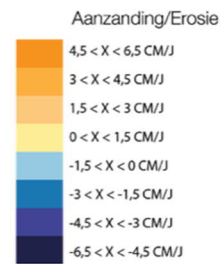
- NATUUR**
-  KRW-maatregelen
- SCHEEPVAART**
-  Kunstwerken
 -  Onvoldoende vaardiepte
- INFRASTRUCTUUR**
-  Kunstwerken
 -  Kabels en leidingen
 -  Dijken
 -  Kades
 -  Waterverdelingswerken
 -  Waterregelwerken
- ZOETWATER**
-  Inlaatpunten
 -  Stuurknoppen

-  Natura 2000
-  Trajectgrenzen
-  Stedelijk gebied

**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

-  Rivierverruimingen in uiterwaarden
-  Natuurlijke oever
-  Natuurvriendelijke oever

GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK



Bijlage deelfiguur 26

FUNCTIES

NATUUR

- KRW-maatregelen

SCHEEPVAART

- Kunstwerken
- Onvoldoende vaardiepte

INFRASTRUCTUUR

- Kunstwerken
- Kabels en leidingen
- Dijken
- Kades
- Waterverdelingswerken
- Waterregelwerken

ZOETWATER

- Inlaatpunten
- Stuurknoppen

- Natura 2000
- Trajectgrenzen
- Stedelijk gebied

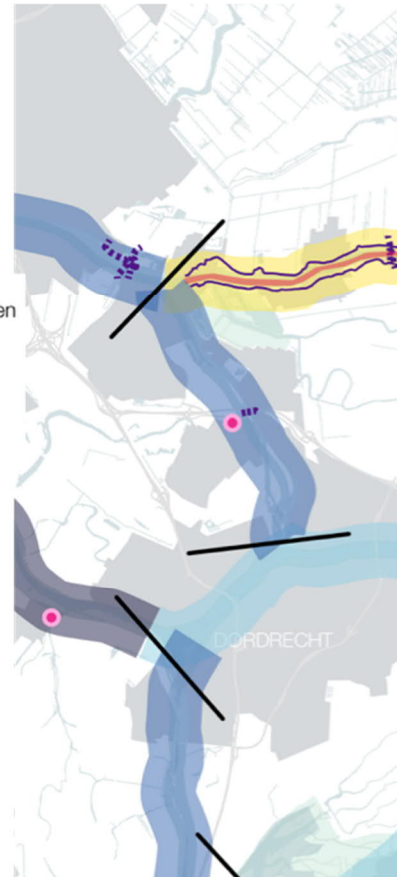
**KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK
GEÏNDUCEERD DOOR:**

- Rivierverruimingen in uiterwaarden
- Natuurlijke oever
- Natuurvriendelijke oever

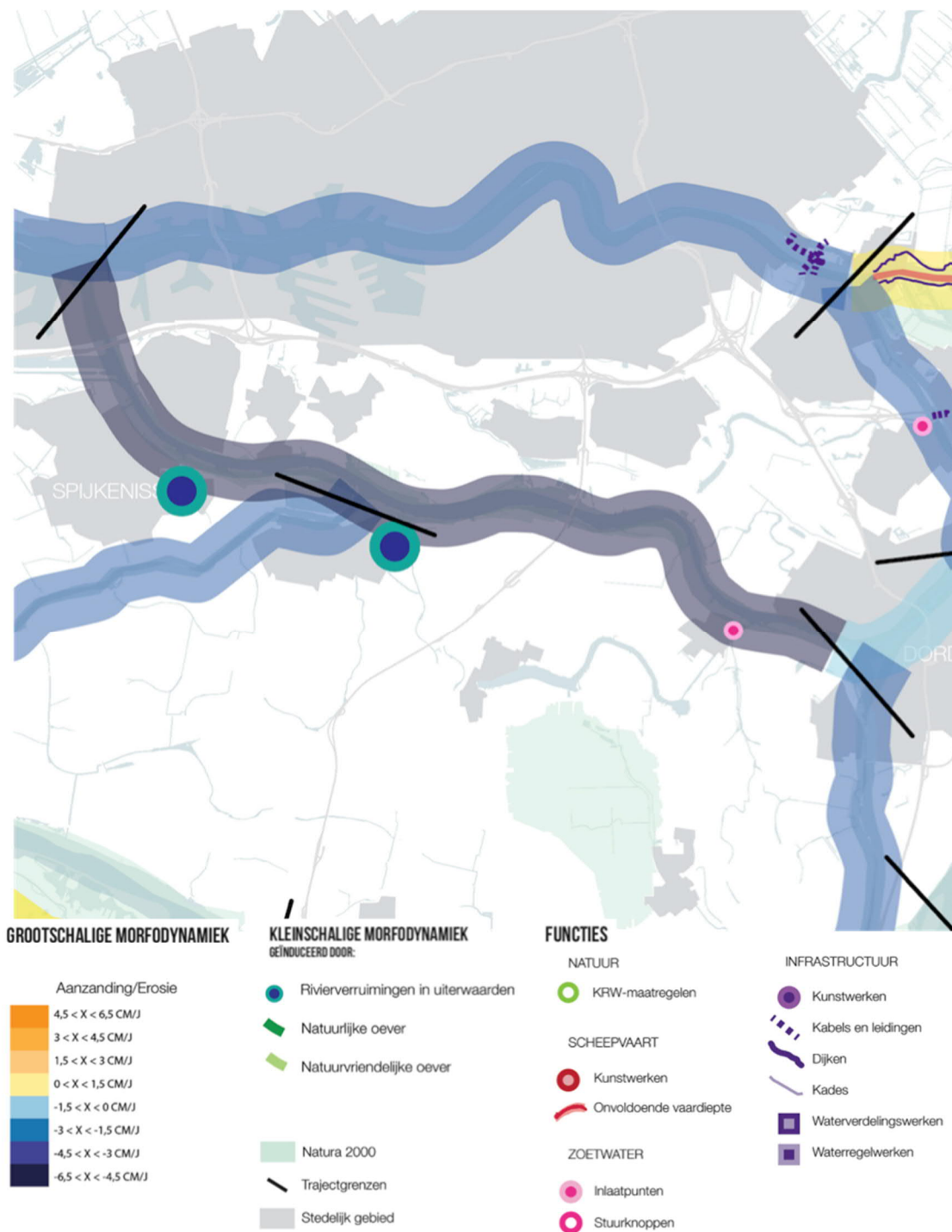
GROOTSCHALIGE MORFODYNAMIEK

Aanzanding/Erosie

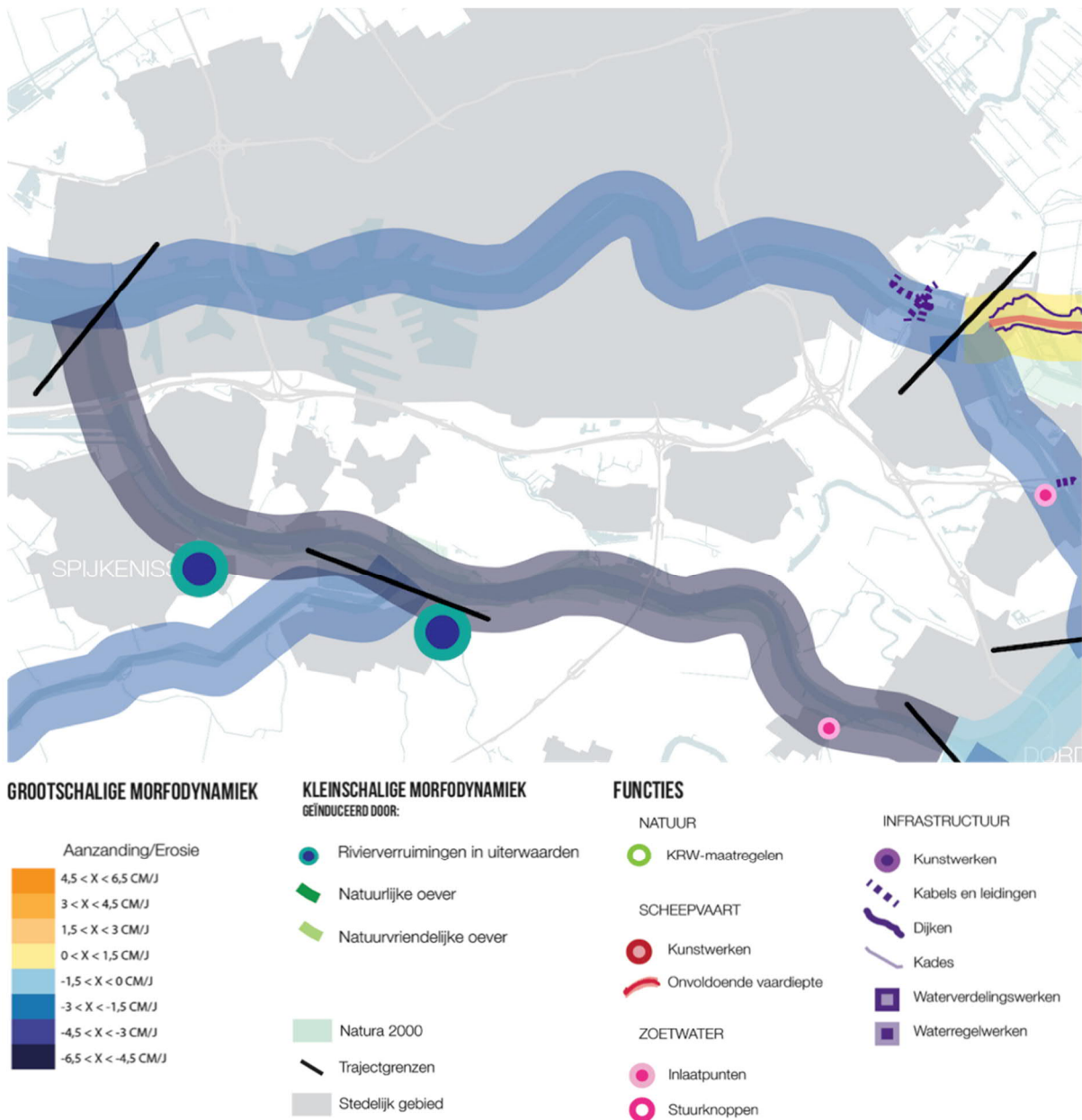
- $4,5 < X < 6,5 \text{ CM/J}$
- $3 < X < 4,5 \text{ CM/J}$
- $1,5 < X < 3 \text{ CM/J}$
- $0 < X < 1,5 \text{ CM/J}$
- $-1,5 < X < 0 \text{ CM/J}$
- $-3 < X < -1,5 \text{ CM/J}$
- $-4,5 < X < -3 \text{ CM/J}$
- $-6,5 < X < -4,5 \text{ CM/J}$



Bijlage deelfiguur 27



Bijlage deelfiguur 28



Bijlage deelfiguur 29

