

## Modelinstrument morfodynamiek RMM

Verkenning behoefte en aanpak



**Modelinstrument morfodynamiek RMM**  
Verkenning behoefte en aanpak

**Auteur(s)**

Willem Ottevanger

Anke Becker

## Modelinstrument morfodynamiek RMM

Verkenning behoefte en aanpak

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Arjan Sieben
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	11-02-2025
<b>Projectnummer</b>	11210364-006
<b>Document ID</b>	11210364-006-ZWS-0001
<b>Pagina's</b>	81
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Willem Ottevanger Anke Becker	



# Samenvatting

Het Rijkswaterstaat netwerk in de Rijn-Maasmonding, en de rivierbodem als onderdeel daarvan, is voortdurend in ontwikkeling. Dat maakt het beheer ervan per definitie ook toekomstgericht.

De Rijn-Maasmonding vormt een complex geografisch netwerk door de vele vertakkingen en samenvloeiingen van rivieren en kanalen. Daarnaast zijn er verschillende fysische processen die een rol spelen voor de stroming zoals getij, stormopzet, en variaties in rivierafvoeren uit de Rijn en de Maas. In de Nieuwe Waterweg wordt de stroming ook beïnvloed door dichtheidsverschillen tussen zoetwater van de rivieren en zoutwater van zee.

De rivierbodem wordt gekenmerkt door verschillende combinaties van slib, zand en klei/veenlagen. Lokaal kunnen er harde klei- of veenlagen zijn die niet makkelijk eroderen. Maar wanneer erosie en doorbraak ervan leidt tot aansnijden van eventueel onderliggende zandlagen kunnen zich diepe erosiekuilen ontwikkelen.

Het beheer van de rivierbodem vraagt de inzet van zeer verschillende expertises en goed gedeelde ervaringskennis. De bodemontwikkelingen lopen bovendien zeer uiteen; bijvoorbeeld van langzame grootschalige invloeden door zeespiegelstijging of de aanleg van de Deltawerken tot een abrupte versteiling van lokale onderwateroevers. De impact ervan raakt in veel gevallen niet alleen de kwaliteit van het RWS-netwerk, maar ook dat van anderen.

Dit geeft aanleiding om te verkennen of en hoe een numeriek model de huidige praktijk kan verbeteren door te voorzien in de behoefte om beter en uniformer

- 1) te anticiperen in plaats van reageren op dynamiek,
- 2) vast te stellen hoeveel dynamiek er past binnen de functies en belangen en hoe dit is te handhaven,
- 3) te toetsen op de effecten van maatregelen,
- 4) een strategie van duurzaam beheer (en zo nodig beleid) te ontwikkelen voor bodem en sediment

In dit rapport, dat gezamenlijk is opgesteld met Rijkswaterstaat, is een inventarisatie gemaakt van de verschillende beheersvragen met betrekking op de bodemdynamiek. Vervolgens zijn hieruit de verschillende benodigde analyses afgeleid. Voor de verschillende analyses is de verwachte meerwaarde van een numeriek model ingeschat voor verschillende schaalniveaus, variërend van gehele riviertakken tot lokale ontgronding rondom constructies. Met behulp van een korte systeembeschrijving is dit verder uitgewerkt tot een advies voor de initiële modelontwikkeling voor een numeriek morfologisch model van de Rijn-Maasmonding.

Het advies is om als eerste stap het huidige tweedimensionale D-HYDRO model uit te breiden met sedimenttransport en de tijdsafhankelijke morfologische ontwikkeling. Met dit model kan een belangrijk deel van de beheer- en beleidsvragen worden beantwoord. Dat betreft met name de vragen op groot en middelgroot schaalniveau (schaal van riviertakken en schaal van dwarsprofielen). Zo nodig kunnen er deelmodellen met verfijnde horizontale resolutie of modellen met lokale roosterverfijning van worden afgeleid.

De vragen op kleine schaalniveaus (bijvoorbeeld over lokale ontgrondingskuilen bij constructies zoals brugpijlers, of over het risico van het ontstaan van nieuwe erosiekuilen of de groei van bestaande kuilen) kunnen beter worden beantwoord door de resultaten van het bestaande 2D-model (puur hydraulica) te combineren met empirische relaties, in plaats van een gedetailleerd 3D-model met alle benodigde processen op te bouwen. Dit omdat deze processen nog niet allemaal naar tevredenheid kunnen worden beschreven in een numeriek model. Bij vragen waar zout en slib belangrijke processen zijn, bijvoorbeeld in de Nieuwe Waterweg, kunnen in de verticaal verfijnde 3D modellen worden afgeleid van het 2D-model en het bestaande hydrodynamische 3D-model, wel met de kanttekening dat de processen die daar spelen nog worden onderzocht en dus minder goed gemodelleerd kunnen worden. Voor slibmodellering wordt aangeraden voorlopig gebruik te maken van bewezen methoden zoals de bestaande morfostatische technieken, maar nog niet als onderdeel van het 2D D-HYDRO model.

Dit nieuwe morfologische 2D-model kan meerdere bestaande modellen vervangen waardoor er voor beleidskeuzes en beheersvragen een eenduidigere uitkomst verwacht kan worden. Belangrijk is dat hierbij voor meerdere studies gewerkt kan worden met gelijke aannames en schematisaties.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doel	8
1.3	Organisatie en bijdragen	9
1.4	Aanpak	9
1.5	Leeswijzer	9
<b>2</b>	<b>Welke analyses zijn nodig voor rivierbeheer?</b>	<b>11</b>
2.1	Relevantie bodemdynamiek	11
2.2	Speerpunten bodem voor RWS	12
2.2.1	Sedimentbeheer	12
2.2.2	Hoogwaterveiligheid	12
2.2.3	Natuur	13
2.2.4	Voldoende en schoon water	13
2.2.5	Vaarweg	13
2.2.6	Beheer en onderhoud	14
2.3	Beoogde typen analyse van bodemdynamiek	14
2.3.1	Systeemanalyse	15
2.3.2	Gevoeligheidsanalyse (inzicht in onzekerheden)	15
2.3.3	Prognose van toekomstige ontwikkelingen	15
2.3.4	Conditionering van de bodemdynamiek	15
2.3.5	Evaluatie morfologische effecten	15
2.3.6	Evaluatie morfodynamiek	15
2.4	Overzicht toepassing kennis bodemdynamiek	16
<b>3</b>	<b>Meerwaarde model voor analyse bodemdynamiek</b>	<b>24</b>
3.1	Potentiële toepasbaarheid analyse-instrumenten bodemdynamiek	24
3.2	Modelinzet bij systeemanalyse	26
3.2.1	Begrip waargenomen morfodynamiek	26
3.2.2	Begrip invloed historische ingrepen	26
3.3	Modelinzet bij gevoeligheidsanalyses	27
3.4	Modelinzet bij prognose van toekomstige ontwikkelingen	27
3.5	Modelinzet bij conditionering van bodemdynamiek voor evaluatie, instandhouding en prestatie	28
3.6	Modelinzet bij evaluatie morfologische effecten planstudies en pilots	28
3.7	Modelinzet bij evaluatie huidige morfodynamiek	28
<b>4</b>	<b>Samenvatting verwachte meerwaarde model</b>	<b>29</b>

<b>5</b>	<b>Systeembeschrijving</b>	<b>32</b>
5.1	Overzicht systeem	32
5.2	Historie van het gebied en veranderingen in het RMM-gebied in de afgelopen jaren	32
5.3	Geometrie van het gebied	33
5.4	Keringen	34
5.5	Waterbeweging	34
5.5.1	Getij	34
5.5.2	Rivierafvoer en verdeling over de takken	41
5.5.3	Interactie zoet en zout water	42
5.6	Bodem	43
5.6.1	Sedimentsamenstelling toplaag	43
5.6.2	Slibgehalte	44
5.6.3	Samenstelling ondergrond	46
5.6.4	Trajecten met antropogene ingrepen	47
5.7	Sedimenttransport en bodemdynamiek	48
5.7.1	Sedimenttransport	48
5.7.2	Lange-termijn ontwikkeling bodemligging	50
5.7.3	Aanwezigheid en ontwikkeling erosiekuilen	52
5.7.4	Kleinschalige ontwikkelingen	54
5.7.5	Respons afgravingen	56
5.7.6	Respons bestortingen	58
5.7.7	Respons suppletie	59
5.8	Samenvatting systeembeschrijving	59
<b>6</b>	<b>Advies</b>	<b>61</b>
6.1	Schaalniveau: hele takken	61
6.2	Schaalniveau: dwarsprofielen	65
6.3	Schaalniveau: kuilen	66
6.4	Schaalniveau: lokale ontgroning rond constructies	67
6.5	Samenvatting advies	68
<b>7</b>	<b>Aanpak van modelontwikkeling</b>	<b>71</b>
7.1	Fasering modelopbouw op hoofdlijnen	71
7.2	Afbakening technisch ontwerp	73
7.3	Vorstel eerste (no-regret) stappen voor 2025	73
7.3.1	Start met verzamelen van de benodigde gegevens	73
7.3.2	Morfodynamische kentallen per deelgebied/tak	74
7.3.3	Analyse sedimentsamenstelling en interactie zand-slib	75
7.3.4	Verdere detaillering technisch ontwerp	75
7.3.5	Bouw eerste, eenvoudige modelversie (v0) voor testen rekentijden	75
7.3.6	Inventarisatie behoefte softwareontwikkeling	75
7.4	Rapportage	75
7.5	Databehoeft	76
	<b>Referenties</b>	<b>78</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Het RWS netwerk in de Rijn-Maasmonding (RMM), en de rivierbodembodem als onderdeel daarvan, is voortdurend in ontwikkeling. Dat maakt het beheer ervan per definitie ook toekomstgericht. De rivierbodembodem heeft daarbinnen een geheel eigen dynamiek die de inzet van zeer verschillende expertises en goed gedeelde ervaringskennis binnen het rivierbeheer vergt. De bodemontwikkelingen lopen bovendien zeer uiteen; van langzame grootschalige invloeden door zeespiegelstijging of de aanleg van de Deltawerken tot abrupte versteiling van lokale onderwateroeveren. De impact ervan raakt in veel gevallen niet alleen de kwaliteit van het RWS-netwerk, maar ook dat van anderen. Dit geeft aanleiding om te verkennen of en hoe een morfodynamisch model de huidige praktijk kan verbeteren. Het model zou moeten bijdragen aan de behoefte om beter en uniformer:

- 1) te anticiperen in plaats van reageren op dynamiek, vanwege opgedane ervaringen met:
  - onverwachte risico's (dekking op leidingen, versteilende oevers Dordtsche Kil, Spui, Oude Maas, Nieuwe Waterweg (NWW))
  - hoge herstelkosten (noodbestortingen oevers, opvullen en afdekken erosiekuil Spijkenisse Brug)
  - nieuwe erosie na oeverbestortingen of verruiming vaargeul NWW
  - doorgaande groei van erosiekuilen (bijvoorbeeld tussen Maeslantkering en Brielse Meerleiding)
- 2) vast te stellen hoeveel dynamiek er past binnen de functies en belangen en hoe dit is te handhaven
  - Hoeveel rivierbodembodemdynamiek mag er zijn in het grondmassief voor de keringen?
- 3) te toetsen op de effecten van maatregelen:
  - voor eenduidiger beoordeling van ingrepen (Rivierkundig Beoordelingskader)
    - o bij oevers (bijvoorbeeld het aanbrengen of juist verwijderen van bestortingen)
    - o in de bodem (vaargeulverruiming, aanleg Blankenburgtunnel, suppleren)
  - vanwege risico's door plotselinge erosie bij kwetsbare natuurlijke lagen boven fijne zanden
- 4) een strategie van duurzaam beheer (en zo nodig beleid) te ontwikkelen voor bodem en sediment
  - met verbeterde sedimentbalans voor het areaal en uitgebreider nuttige toepassing van baggerspecie uit vaargeulen

Dat vraagt om meer inzicht in het systeemgedrag, in de impact daarvan op de netwerkqualiteit en in de passende maatregelen en strategie om de netwerkqualiteit duurzaam te handhaven.

## 1.2 Doel

In dit rapport wordt dit verder uitgewerkt en wordt beschreven of en hoe een model dat de morfodynamiek simuleert kan bijdragen aan het huidige beheer van de rivierbodembodem in de Rijn-Maasmonding (zie aanleiding sectie 1.1)..



## 1.3 Organisatie en bijdragen

De verkenning is uitgevoerd met Laurens Baars, Mirjam Flierman, Zaid Bashir, Pim Neefjes, Jerome Breet, Jesse van Leeuwen, Jochem van der Ham, Roeland Lievens, Raoul Linzey, Driton Binaku, Jacco van Voorst. De inbreng van Deltares, door Willem Ottevanger, Victor Chavarrías, Anke Becker en Kees Sloff, valt onder het SITO Rivierkunde programma en wordt uitgevoerd met bijdragen vanuit RWS-WNZ en landelijke taken.

## 1.4 Aanpak

De behoefte aan een instrument voor het voorspellen van de dynamiek in de rivierbodem wordt afgeleid uit de RWS-taken voor beheer en ontwikkeling van het netwerk. Voor de analyses die daarvoor nodig zijn wordt geschetst welk type modellen hiervoor nodig zijn en wat daarvan ten aanzien van het rivierbeheer verwacht kan worden. De gebruikerswensen en –eisen worden opgesteld en een advies wordt afgegeven. Een plan van aanpak in ruwe versie, op basis van de behoefte, het karakter van het areaal en de beschikbare kennis schetst de ontwikkeling van zo'n model en wat daar voor nodig is.

### Deel 1: modelbehoefte

Modellen voor bodemdynamiek in het WNZ beheergebied zouden ingezet moeten kunnen worden voor de morfologische analyses van het rivierbeheer. Om de behoefte aan modellen vast te kunnen stellen moet dan ook worden geïnventariseerd

- 1) om welke analyses het gaat
- 2) welke bijdragen numerieke modellen voor bodemdynamiek aan deze analyses kunnen leveren
- 3) welke verbetering daarmee in het rivierbeheer kan worden bereikt

Hiermee moet duidelijk worden welke morfologische analyses nodig zijn, hoe een model aan elk daarvan kan bijdragen en wat dat uiteindelijk betekent voor het rivierbeheer. Op basis van die meerwaarde wordt een advies opgesteld voor de instrumenten die nodig zijn.

### Deel 2: modelontwikkeling

Op basis van de behoefte (deel 1) en het karakter van het riviersysteem wordt een aanpak voorgesteld voor het maken van passende modellen, indien daartoe besloten zou worden. Dit omvat specificatie van

- 1) gebruikerswensen ten aanzien van voorspeldomein (parameters, horizon, detailniveau, betrouwbaarheid) en gebruikspraktijk in RWS projecten (afstemming in-output, kwaliteitsborging).
- 2) systeem (typering hydraulische processen, transportprocessen, morfologische processen, antropogene invloeden, afbakening invloedsgebieden, opzet bepaling kentallen op geulrooster conform aanpak Rijntakken en Maas)
- 3) aanpak met fasering (als bij Maas en Rijntakken, eerder modelfunctionaliteit), relatieve planning (wat wanneer), benodigde info (vanuit RWS) en omvang

## 1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft welke speerpunten omtrent de rivierbodem voortvloeien uit de kerntaken van RWS en welke types analyse daarvoor nodig zijn. Vervolgens wordt daarin de relevantie van bodemdynamiek voor de kerntaken per organisatieonderdeel in detail uitgewerkt. Het hoofdstuk dekt daarmee stap 1 van de inventarisatie van de modelbehoefte en de inventarisatie van de gebruikerswensen (stap 1 modelontwikkeling). Hoofdstuk 3 beschrijft welke analyse-instrumenten potentieel bestaan voor het beantwoorden van de vragen uit hoofdstuk 2 en geeft aan welke meerwaarde numerieke modellen naar verwachting toevoegen aan de benoemde types analyse (stappen 2 en 3 inventarisatie modelbehoefte).

In hoofdstuk 4 wordt dit verder gespecificeerd voor de verschillende lengteschalen die in het RMM-gebied relevant zijn (constructies zoals brugpijlers of bestorte oevers, kuilen, dwarsprofielen en hele riviertakken). Hoofdstuk 5 geeft een beschrijving van de voor de rivierbodem relevante processen in de Rijn-Maasmonding (stap 2 modelontwikkeling). Om overlap met reeds bestaande systeembeschrijvingen in tal van andere rapporten te minimaliseren, is deze op hoofdlijnen gehouden, met waar nodig referenties naar de andere rapporten. In hoofdstuk 6 worden de inzichten in de werking van het systeem gebruikt om te toetsen welke meerwaarde een numeriek model daadwerkelijk kan bieden ten opzichte van de *verwachte* meerwaarde uit de eerdere hoofdstukken, waarbij er ook rekening mee wordt gehouden dat de verhouding tussen inspanning en meerwaarde acceptabel blijft. Dit mondt uit in een advies over het te ontwikkelen model in Hoofdstuk 6. In Hoofdstuk 7 volgt een aanpak voor de modelontwikkeling.

Hoofdstukken 1 t/m 4 zijn grotendeels door RWS-WNZ en Arjan Sieben opgesteld, de overige hoofdstukken zijn in samenwerking tussen RWS en Deltares ontstaan.

## 2 Welke analyses zijn nodig voor rivierbeheer?

Dit hoofdstuk beschrijft welke speerpunten omtrent de rivierbodembodenvoortvloeiingen uit de kerntaken van RWS (paragraaf 2.1 en 2.2) en welke types analyse daarvoor nodig zijn (2.3). Vervolgens wordt de relevantie van bodemdynamiek voor de kerntaken per organisatieonderdeel in detail uitgewerkt (2.4).

### 2.1 Relevantie bodemdynamiek

De kerntaken van RWS (Tabel 1) zijn het uitgangspunt voor het rivierbeheer als uitvoering van het beleid van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (bijvoorbeeld het Nationaal Waterplan en de Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte).

Tabel 1 Kerntaken Rijkswaterstaat.

Kerntaak	bijvoorbeeld gericht op
Waterveiligheid	uitvoering van de Deltabeslissingen, operatie stormvloedkeringen, versterking afgekeurde primaire keringen, op orde brengen en houden van voldoende stroomberging en stroomvoering
voldoende water	voorkomen van watertekort en wateroverlast, tegengaan van verzilting, beter benutten van beschikbaar zoet water (zoals rivierwateraanvoer naar West-Nederland en hoge zandgronden).
schoon en gezond water	chemische en ecologische kwaliteit van de rijkswateren
vlot en veilig verkeer over water	begeleiding van het scheepvaartverkeer, het beheer en onderhoud van vaarwegen en kunstwerken
een duurzame leefomgeving	verduurzamen van de netwerken door rekeningen te houden met milieu en energie, ruimtelijke kwaliteit en het meekoppelen van andere belangen.

De bodemligging en de dynamiek daarin is voor de regionale uitwerking en uitvoering van deze kerntaken relevant. Immers, de rivierbodembasis is een basis onder veel rivierfuncties en rivierwaarden, want van invloed op waterstanden en getijdestroming, de indringing van zout, de afmetingen van het vaarwater, het habitat van de rijkswateren en de standzekerheid van keringen, constructies en objecten in en bij de rivierbodembasis. Bij al deze aspecten gelden de basisvragen:

- a. Hoe beïnvloedt de bodem de kwaliteit van het netwerk?
- b. Hoe beïnvloedt (*het gebruik en onderhoud van*) het netwerk de bodemdynamiek?
- c. Tot welke eisen en richtlijnen voor bodemligging, netwerkgebruik en -onderhoud leiden a) en b)?
- d. Wat zijn knelpunten in gebruik of onderhoud van het netwerk en wat kan/moet beter?
- e. Welke rivierbodembontwikkeling is te verwachten en wat zijn daarvan de risico's voor het netwerk?
- f. Wat is de optimale pdca cyclus van bodembeheer (*wanneer moet worden ingegrepen, en welke maatregelen zijn geschikt, welke informatie is hiervoor nodig*)?

Deze vragen zijn gericht op het formulering van de netwerkvraag in een ontwikkelend areaal, op ontwikkeling en beoordeling van nieuwe ingrepen (planstudies, vergunningverlening) en een effectieve, duurzame en risico-gestuurde instandhouding van assets. Dat omvat twee enigszins verschillende typen beheer:

- I. *programmerend* rivierbeheer gericht op de ontwikkeling van het netwerk op middellange (5-30 jaar) en lange termijn (> 30 jaar)
- II. *operationeel* rivierbeheer gericht op onderhoud van het netwerk op de korte termijn (< 5 jaar)

Beheer type I richt zich op scenario's en ontwikkelingen op langere termijn (30+ jaar) en vergt bijvoorbeeld bijpassende prognoses van bodemontwikkelingen. Beheer type II omvat de (dagelijkse) instandhouding van het netwerk, maar ook de borging daarvan in de toekomst middels wettelijke toetsing van initiatieven en middels jaarlijkse risicobepaling van bodemdynamiek. Dat vergt *voorspelling* van morfologische effecten door ingrepen, inzicht in *actuele bodemontwikkelingen* en het vermoedelijk verloop daarvan in komende seizoenen. Beide typen overlappen bij programmering van onderhoudscontracten op termijnen van circa 5 jaar.

## 2.2 Speerpunten bodem voor RWS

### 2.2.1 Sedimentbeheer

Rijkswaterstaat is bevoegd gezag voor winning van grondstoffen in rijkswateren. Winning werd in het verleden doorgaans toegestaan als het waterveiligheid, scheepvaart en ecologische kwaliteit niet schaafde of zelfs verbeterde. Er is toen dan ook behoorlijk zand en grind uit het zomerbed gebaggerd. Om verdere insnijding van de rivierbodem te voorkomen is winning van grondstoffen allengs beperkt. Immers, juist in erosieve delen van de Rijn-Maasmonding kunnen erosie-resistente bodemlagen bijdragen aan het behoud van de netwerkkwaliteit. Waar baggerspecie vrijkomt uit onderhoud wordt in toenemende mate een nuttige toepassing binnen het systeem gezocht. Naast bodemhoogte is er de kwaliteit van de waterbodem. Die wordt grotendeels bepaald door de kwaliteit van de slibvrachten uit Maas en Rijnakken. Bodem-gerelateerde vragen van dit thema zijn bijvoorbeeld:

- Zijn onttrekkingen van sediment nog verder af te bouwen?
- Hoe zijn zand en slib dat vrijkomt uit onderhoud nuttig in het systeem toe te passen?
- Welk beheer is passend voor erosie-resistente lagen in de rivierbodem?
- Welke verbetering in beheer van waterbodemkwaliteit zijn denkbaar?
- Welke ontwikkelingen kunnen worden verwacht voor toekomstige zand- en slibvrachten uit Maas en Rijn?

### 2.2.2 Hoogwaterveiligheid

Dit betreft de hydraulische belasting op en de stabiliteit van keringen. Het verschil daartussen mag door menselijk activiteiten of natuurlijke dynamiek niet toenemen. Daarom is het van belang om van bodemontwikkelingen de invloed op de hydraulische belastingen (waterstanden, stroomsnelheden en bodemligging) en de stabiliteit van de keringen te kennen, voorspellen en zo nodig beheersen. Dat vergt monitoring en evaluatie van bodemdynamiek, maar ook een uitvoeringskader en inzicht in en ervaring met passende beheermaatregelen.

Bodem-gerelateerde vragen van dit thema zijn bijvoorbeeld:

- Welke bodemontwikkelingen zijn te verwachten en wat zijn daarvan de risico's voor hoogwaterveiligheid?
- Welke impact hebben nieuwe initiatieven op deze risico's
- Wanneer moet vanuit beheer worden ingegrepen en welke maatregelen zijn hiervoor geschikt?
- Wat is nodig aan monitoring voor dit beheer en de ontwikkeling van benodigde inzichten?
- Wat is voor wat betreft hoogwaterveiligheid een optimale pdca bodembeheercyclus?

### 2.2.3 Natuur

De rivierbodem is vanwege substraat (zand, slib, veen, klei, gestort grind of stortsteen), de mate van dynamiek en waterdiepte relevant voor riviernatuur. Dat betreft vooral de minder diepe delen van het areaal, dus oevers en ondiepe zones en relatief kleine geulen (Biesbosch). Behalve ondergrond en waterbeweging speelt daarbij ook sediment-uitwisseling met laagdynamische zones en getijdegeulen een rol; krekens in getijdeparken hebben instroom van zand en slib nodig. Bodem-gerelateerde vragen van dit thema zijn bijvoorbeeld:

- Welke (bodem)ontwikkelingen zijn te verwachten, wat zijn daarvan de risico's voor biologische kwaliteit?
- Wanneer en hoe zou (bv bodem/sedimentbeheer) moeten worden ingegrepen?
- Wat is nodig aan monitoring voor de ontwikkeling van deze inzichten?
- Wat is op basis van deze inzichten de optimale pdca bodembeheercyclus?

### 2.2.4 Voldoende en schoon water

In de Rijn-Maasmonding stroomt het zoute zeewater met een slibdragende onderstroom de rivier op. Omdat de ligging en ruwheid van de rivierbodem de afvoerverdeling van zoet en zout water over de riviertakken beïnvloedt en bij gelaagdheid de stroming bij de bodem bepaalt, is de bodem van belang voor de mate waarin het zoute water de rivier opkruipt en de inname van zoetwater beïnvloedt. Bodem-gerelateerde vragen van dit thema zijn bijvoorbeeld:

- Wat is de directe invloed van de bodemdynamiek op de zoutindringing via NWW
- Wat is, omgekeerd, de invloed van de onderstroom op de bodemdynamiek
- Wat is de invloed van de bodem op de zoet-waterafvoerverdeling (en daarmee zoutindringing)
- Welke bodemontwikkelingen zijn te verwachten en wat zijn daarvan de risico's voor zoutindringing?
- Wanneer moet worden ingegrepen en welke beheermaatregelen zijn hiervoor geschikt?

### 2.2.5 Vaarweg

Het areaal bevat belangrijke vaarwegen. Binnen de vaargeulen dient een maatgevend schip ruimte te hebben om vlot en veilig te varen. Dat kan betekenen dat bodem en oevers voldoende vloeiend moeten verloopend en dat er onder het onderhoudsprofiel voldoende marge is om de vaargeulen op diepte te kunnen houden. Bodem-gerelateerde vragen van dit thema zijn bijvoorbeeld:

- Wat zijn bodemknelpunten in gebruik en onderhoud van de vaarweg en welke verbetering is mogelijk?
- Welke bodemontwikkelingen zijn te verwachten, wat zijn daarvan de risico's voor de vaarweg, en welke beheer is geschikt?
- Wat is nodig aan monitoring voor de ontwikkeling van deze inzichten?
- Wat is op basis van deze inzichten de optimale pdca bodem-beheercyclus?



### 2.2.6 Beheer en onderhoud

Doel is een bodem die de netwerkfuncties faciliteert en duurzaam en meervoudig gebruik van het watersysteem mogelijk maakt. Dat vergt beheer dat is verankerd in beleid en meerjarig is geprogrammeerd, geïntegreerd in sectorale visies en plannen (kwantiteit, kwaliteit, infra, scheepvaart) met een duidelijk uitvoeringskader (verantwoordelijkheid RWS en wat te doen bij gedeelde verantwoordelijkheden) en risico-gestuurde signalerings- en interventie-niveaus van de assets, een goede prioritering en prognose van toekomstig beheer (programming) en een pdca-cyclus die past bij de aard van de morfodynamiek in het areaal. Enkele bodem-gerelateerde vragen van dit thema zijn bijvoorbeeld:

- Welke bodemdynamiek heeft wel/geen impact op de netwerkkwaliteit (incl assets)?
- Hoe om te gaan met bodemdynamiek buiten RWS-kerntaken maar waar we zorgplichtig voor kunnen zijn?
- Hoe kunnen beheermaatregelen worden beproefd die passen bij het netwerk van de toekomst?
- Wat zijn risicolocaties voor erosie van bodem/oeveren en wat is nodig om de risico's te beheersen?
- Hoe zijn hoogte van natte en droge rivierdelen efficiënt te monitoren?
- Wat is de actuele en verwachte ruimte van bodem/oeveren tot de interventieniveau's en wat zijn passende herstelmaatregelen?

Om te komen tot een scherpe vraagstelling gekoppeld aan de probleem-eigenaar is in volgende secties de organisatie-vorm het startpunt voor inventariseren van bodem-gerelateerde vragen.

## 2.3 Beoogde typen analyse van bodemdynamiek

De uitvoering is georganiseerd in *netwerkontwikkeling* (uitwerking en vertaling van beleidsdoelen tot een regionale beheervisie en uitvoeringsopgave) en *netwerkmanagement* (uitvoering (beheer, onderhoud en aanleg) van de voor de regio uitgewerkte kerntaken):

De directie Netwerkontwikkeling formuleert de netwerkvraag (“*waar moet het netwerk aan voldoen?*”) en de uitvoeringsopgave (“*hoe moet de gevraagde netwerkkwaliteit gerealiseerd worden?*”). Omdat dit netwerk en de omgeving daarvan voortdurend in ontwikkeling is, is beheer een continuüm en de programming ervan inherent toekomstgericht. Dat vergt visie op het netwerk van korte tot lange termijn en daarvan afgeleid een beheerstrategie die toekomstbestendig en gebiedsgericht is, anticipeert op (dynamische) natuurlijke processen en verbetering van ruimtelijke kwaliteit en duurzaamheid (circulair) beoogt.

De directie Netwerkmanagement realiseert de regionale uitvoeringsopgave middels PDCA-cycli en risico-gestuurde programming. Ook met behulp van monitoring en prognose van bodemontwikkeling, instandhoudingsnormen en beheermaatregelen.

Voor beide directies is op verschillende manieren kennis van de rivierbodem, en de toepassing daarvan in beleid en beheer relevant. Om de meerwaarde van een morfologisch model als instrument in analyses te verkennen, worden in de toepassing van kennis van de rivierbodem vijf typen analyse onderscheiden. Elk kan variëren van grootschalige trends op areaalniveau tot lokale bodemveranderingen ter plekke van de assets.

Voor de verschillende toepassingen zoals hierboven beschreven worden verschillende types van analyse benodigd.

Het gaat om:

- systeemanalyse: inzicht bieden in huidige dynamiek en invloed van huidige maatregelen
- gevoeligheidsanalyse: bepalen van de impact van onzekerheden
- prognose: voorspellen verwachte bodemontwikkeling
- conditionering: afleiden bodemcriteria voor instandhouding assets
- evaluatie effecten: bepalen van morfologische effecten van ingrepen
- evaluatie morfodynamiek : (met inzicht) bepalen en beoordelen van actuele morfodynamiek

Deze type analyses worden in de volgende secties toegelicht.

### **2.3.1 Systeemanalyse**

Dit is gericht op een goede diagnose van bodemontwikkelingen en op de impact van uitgevoerde aanlegmaatregelen en uitgevoerd onderhoud. Dit is nodig om prognoses van bodemontwikkelingen en van de invloeden van vergelijkbare maatregelen en onderhoud te kunnen maken.

### **2.3.2 Gevoeligheidsanalyse (inzicht in onzekerheden)**

Dit is gericht op het bepalen van de mogelijke impact van invloeden die onbekend zijn zoals de erodeerbaarheid van de ondergrond en de toekomstige veranderingen hydraulica en sediment op de zeerand en op de rivierranden.

### **2.3.3 Prognose van toekomstige ontwikkelingen**

Prognose van toekomstige ontwikkelingen met scenario's voor ontwikkelingen op de zee- en rivierenrand, voor de erodeerbaarheid van de ondergrond en de harde lagen van het bed, voor het beheerregime (bijvoorbeeld Haringvlietsluizen, Maeslantkering, stabilisering vooroevers).

### **2.3.4 Conditionering van de bodemdynamiek**

Conditionering van de bodemdynamiek voor evaluatie, instandhouding en prestatie Dit is gericht op het formuleren van karakteristieke bodemdynamiek (effecten), prestatie indicatoren en instandhoudingseisen van de netwerkqualiteit, ten behoeve van evaluatie van actuele en toekomstige morfodynamiek.

### **2.3.5 Evaluatie morfologische effecten**

Dit is gericht op een goede en eenduidige bepaling van de invloed van ingrepen, op de bodem en het gebruik en instandhouding van het netwerk. Dit kan in planstudies voor ingrepen die worden voorbereid, maar ook als onderdeel van pilots voor aanleg en onderhoud of bij het formuleren van visies op systeemontwikkelingen en beheerstrategieën.

### **2.3.6 Evaluatie morfodynamiek**

Dit is gericht op een goede bepaling van morfodynamiek uit bodempeilingen, ten behoeve van de toepassing in beleid en beheer.

## 2.4 Overzicht toepassing kennis bodemdynamiek

De relevantie van bodemdynamiek voor de kerntaken is per organisatieonderdeel uitgewerkt in onderstaande tabel.

Tabel 2 Overzicht analyse-behoefte morfodynamiek Rijn-Maasmonding

kernvraag bodem irt netwerk	Doel	gerelateerde onderzoeksvragen	beoogd resultaat/ <i>verwacht product bij de onderzoeksvraag</i>	type analyse
<p><u>NOV &amp; derden</u></p> <p>1) Hoe beïnvloedt in relevante toekomstscenario's de dynamiek van de bodem: de kwaliteit van het netwerk en het beheren en verbeteren daarvan (NSWP)</p> <p>a. de aansluiting van het RWS-netwerk op dat van de regio-partners (omgevingskoers)</p> <p>2) Wat zijn in relevante toekomstscenario's de beleidsmatig en regionaal gewenste netwerkprestaties, hoe kunnen deze toekomstbestendig en duurzaam worden</p>	<p><b>visie op It netwerkvraag en samenwerking regiopartners tav bodem&amp;oever: uit visie afgeleide bodembeheerstrategie</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Welke bodemligging vraagt het beleid (Water en Bodem sturend)</li> <li>Welke bodemligging vraagt het RWS &amp; regio netwerk en welke eisen stelt de netwerkqualiteit aan de bodem en oevers?</li> <li>Wat is uitgevoerd beheer en aanleg in het WNZ beheergebied en hoe reageren rivierbodem en -oevers daarop?</li> <li>Welke bodem kan op It worden verwacht? Hoe erodeerbaar is de ondergrond, hoe ontwikkelen erosiekuilen en wat is de impact daarvan?</li> </ul>	<p>formulering functie-eisen en streefbodem (incl. regio netwerk)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>bij kustfundament, keringen, oevers en objecten</li> <li>tav hoogwaterveiligheid, zoutindringing, natuur, vaarwegbeheer (i.e. RWS functies/taken) en bescherming van assets (ook van derden/overheden)</li> <li>interacties op aansluitingen met netwerken van derden</li> </ul> <p><u>diagnose huidige bodemdynamiek</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Overzicht</b> van zoet&amp;zout onderhoud en relevante ingrepen (Deltawerken (Haringvlietsluizen), Maasvlakte 2 (2012), bestortingen Dordtsche Kil en Spui (2014), verdieping Nieuwe Waterweg (2018), pilots suppletie Oude Maas en NWW, proeftuin RMM</li> <li><b>Overzicht</b> van bodemdynamiek, waterbeweging in afgelopen decennia, en de sedimentologie.</li> </ul>	<p>d) conditionering (mbv a) systeemanalyse, b) gevoeligheidsanalyse en c) prognose)</p> <p>a) systeemanalyse</p> <p>f) evaluatie morfodynamiek</p> <p>c) prognose mbv a) systeemanalyse, b) gevoeligheidsanalyse en f) evaluatie morfodynamiek</p> <p>e) evaluatie effecten &amp; f) evaluatie morfodynamiek</p> <p>c) prognose</p>

kernvraag bodem irt netwerk	Doel	gerelateerde onderzoeksvragen	beoogd resultaat/ <i>verwacht product bij de onderzoeksvraag</i>	type analyse
<p>beheerd en verbeterd en hoe kan het beheer hierop worden voorbereid.</p> <p>Contact: Laurens Baars, Mirjam Flierman, Pim Neefjes</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Welk beheer en beleid is nodig om de voor de gevraagde netwerkkwaliteit benodigde bodem en oevers duurzaam te realiseren?</li> <li>Welke kennis ontbreekt en hoe kan deze worden ontwikkeld?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Karakterisering</b> van trendmatige en mogelijke trendbreuk relatie tussen ingrepen en bodemdynamiek. <u>prognose bodemontwikkeling</u></li> <li><b>overzicht aanleg</b> uitgevoerd en gepland (Blankenburgtunnel (2023), KRW (PAGW) maatregelen, initiatieven derden)</li> <li><b>overzicht beheersvarianten</b> (stortstrategieën zoete &amp; zoute baggercontract (2024, sluitingsregime HVS, rivierontwikkelingen bovenstrooms, oa IRM)</li> <li><b>Overzicht en impactanalyse beleidskeuzes</b> open/gesloten toekomstig beleid, rivierontwikkelingen bovenstrooms, meestijgen</li> <li><b>overzicht en impact analyse scenario's</b> zeespiegelstijging en rivierafvoer</li> <li><b>karakterisering</b> vermoedelijke trendmatige&amp; trendbreuk reactie bodemdynamiek <u>definitie beheermaatregelen</u></li> <li><b>Evaluatie</b> van waargenomen en verwachte dynamiek met de functie-eisen</li> <li>Evaluatie van toegepaste beheerstrategie</li> </ul>	<p>f) evaluatie morfodynamiek c) prognose</p>

kernvraag bodem irt netwerk	Doel	gerelateerde onderzoeksvragen	beoogd resultaat/ <i>verwacht product bij de onderzoeksvraag</i>	type analyse
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaststellen <b>risico's</b> en de dynamische ontwikkeling daarvan</li> <li>• Vaststellen handelingsperspectief op aansluitingen met netwerken derden</li> <li>• samenstellen passend <b>maatregelpakket</b> beheersing risico's bodemdynamiek</li> <li>• Formuleren <b>passende beheerstrategie</b></li> <li>• Uitvoerbaarheidstoets beheerstrategie (effectiviteit, kosten, haalbaarheid)</li> </ul> <u>borgen beheer &amp; systeemkennis</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adviseren en informeren (intern RWS, regiopartners) over bodemdynamiek en RWS-bodembeheer.</li> <li>• Organiseren archivering data en informatie systeemwerking.</li> <li>• Bijdragen aan strategie kennisontwikkeling morfologie RMM</li> </ul>	
<u>Programmeren</u> 3) Hoe beïnvloedt de rivierbodemdynamiek het beheer van de netwerkkwaliteit en de risico-gestuurde afweging daarvan? Contact: Jerome Breet, Jesse van Leeuwen	<b>risico-gestuurde programmering uit beheer-strategie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welke netwerkprestatie (functies) moet worden gerealiseerd voor bodem en oevers?</li> <li>• Hoe en met welke waarschijnlijkheid ontwikkelt deze prestatie door bodemdynamiek?</li> <li>• Hoe kan de prestatie worden geborgd?</li> </ul>	<u>formulering bodem-PIN's</u> (specificatie netwerkkwaliteit, streefbodem, haalbaarheid en te monitoren) <u>betrouwbare en consistente prognose netwerkprestatie</u> bij verwachte bodemdynamiek <u>inschatting grootte en beheersbaarheid van risico's</u> (bv door kuilen). zodanig dat over preventief onderhoud besloten kan worden	d) conditionering c) prognose f) evaluatie morfodynamiek e) evaluatie effecten



kernvraag bodem irt netwerk	Doel	gerelateerde onderzoeksvragen	beoogd resultaat/ <i>verwacht product bij de onderzoeksvraag</i>	type analyse
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wat betekent dit voor de programmering van beheer?</li> </ul>	formulering <u>benodigd beheer</u> (vooruit kijken ipv op basis van verleden) <u>programmering tot (2030)</u> Risico-gestuurde afweging van onderhoud vaargeulen, oevers, havens, kruisende infra.	
<p><u>Vergunning verlening</u>            4) Wat zijn morfologische effecten van initiatieven (OW), hoe beïnvloeden deze de netwerkprestaties en het beheer daarvan in de relevante toekomstscenario's?</p> <p>5) Wat betekent deze effecten en verwachte "autonome" morfodynamiek voor de te verlenen vergunningen, handhaving en de programmering van beheer?            Contact: Jochem van der Ham, Mirjam Flierman</p>	<p><b>eenduidige bepaling en beoordeling van effecten in vergunningaanvragen en vergunningwijzigingen</b>  <b>eenduidige specificatie van voorwaarden bij vergunningverlening.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tbv beoordelen van vergunningaanvraag/wijziging               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Welke morfologische effecten op bodem en oevers worden beschouwd?</li> <li>○ Welke ligging en dynamiek is representatief voor de beoordeling?</li> <li>○ Hoe moeten effecten worden bepaald?</li> <li>○ Hoe moeten deze effecten en stapeling daarvan te beoordelen?</li> </ul> </li> <li>• Welke bodemdynamiek is relevant voor het handhaven van de vergunning en hoe moet dit in de vergunning worden opgenomen?</li> </ul>	<p><u>richtlijn werkwijze bepaling effecten</u>, conform RBK, afgestemd op netwerk en riviersysteem.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Methodiek voor het bepalen van morfologische effecten van maatregelen in getijdengebied.</li> <li>• Methodiek voor inschatting van daaruit volgende beheerlast en risico's voor de gewenste bodemligging.</li> <li>• Realistisch beoordelingscriterium</li> </ul> <p><u>toepassing werkwijze bij</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bepaling effecten zoals KRW planstudie Langsdammen NWW, planstudie Zuiddiepje (Feijenoord City), KRW planstudie Hel en Zuilespolder / Gors Den Aanwas, Vooroever versterking Delflandse dijk, Biesbosch sluisjes, Geulen Lek, Holl. IJssel, oeverversterking werfkade NMS Ridderkerk, buitendijkse ontwikkelingen (oa Strooppot), aanleg nieuwe stadsbrug cq. afgraven Kop vd Esch</li> <li>• evaluatie laagst-verwachte bodemliggingen in vergunningen</li> </ul>	<p>e) evaluatie effecten d) conditionering</p> <p>e) evaluatie effecten d) conditionering</p> <p>d) conditionering f) evaluatie morfodynamiek</p>

kernvraag bodem irt netwerk	Doel	gerelateerde onderzoeksvragen	beoogd resultaat/verwacht product bij de onderzoeksvraag	type analyse
			<u>formulering bodem-criteria in vergunningen</u> (hoe evaluatie bodemdynamiek tijdens vergunning, duur van vergunning,..)	
<u>Verkenningen en Planuitwerkingen</u> 6) Wat is in de relevante toekomstscenario's de wisselwerking tussen bodem en ingrepen en hoe beïnvloedt dat de netwerkqualiteit (RWS en regio-partners).  contact: Twan Dijkstra,...	<b>eenduidige effectbepaling in planstudies</b>	tbv besluitvorming <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Welke morfologische effecten worden beschouwd?</li> <li>○ Welke bodemligging en bodemdynamiek is representatief voor de beoordeling?</li> <li>○ Op welke manier moeten de effecten worden bepaald?</li> <li>○ Hoe moeten deze effecten worden beoordeeld?</li> </ul>	<u>richtlijn werkwijze bepaling effecten en beheersbaarheid,</u> conform RBK, afgestemd op netwerk en riviersysteem.  <u>toepassen werkwijze bij bepaling effecten</u> (zoals bestortingen oevers keringen(HWBP), Vervanging en Renovatie Kunstwerken, Verkenning/Planstudie Maasvlakte 3 en aanleg overige haveninfrastructuur, buitendijkse ontwikkeling (verstedelijking); KRW en PAGW (monding Haringvliet, optimalisatie getij-indringing Noordwaard, optimaliseren bediening Haringvlietsluizen, morfologische respons Nieuwe Merwede, kribvak/oeversuppleties, ontsteningen oevers), Deltaprogramma (invloed open/dicht op bodemdynamiek, aanpassen vaargeul NWW, aanpassen Nieuwe Maas)	d) conditionering e) evaluatie effecten
<u>Handhaving</u> 7) Welke rol speelt morfodynamiek in vergunningen (bv rondom kabels en leidingen) en wat	<b>beoordeling handhaafbaarheid vergunningen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoe zijn vergunningsvoorwaarden tav bodemdynamiek handhaafbaar?</li> <li>• Hoe past al opgetreden en nog te verwachten bodemdynamiek</li> </ul>	<i>Richtlijn hoe huidige en verwachte bodemliggingen te monitoren en evalueren tov vergunningen?</i>	f) evaluatie morfodynamiek

<b>kernvraag bodem irt netwerk</b>	<b>Doel</b>	<b>gerelateerde onderzoeksvragen</b>	<b>beoogd resultaat/verwacht product bij de onderzoeksvraag</b>	<b>type analyse</b>
betekent dat voor de handhaving er van. Contact: Jochem van der Ham, Mirjam Flierman		<p>bij bestaande vergunningen en de handhaving daarvan?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hoe vergunninghouders te informeren van verwachtingen tav bodemdynamiek?</li> </ul>	<i>Richtlijn hoe bodemdata &amp; prognoses te gebruiken bij informatie vergunninghouders</i>	
<u>SLU</u> 8) Welk sediment- en bodembeheer is in het HWS gewenst en mogelijk in aanleg en onderhoudsprojecten? Contact: Jerome Breet, Jesse van Leeuwen	<b>specificatie klanteisen en scope</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Welke dynamiek van bodem en oevers is relevant voor uitvoering van aanleg en onderhoud?</li> <li>Tot welke specificaties leidt dit voor uitvoering en monitoring?</li> </ul>	<i>Klanteisen bodem-, - oever- en en sedimentbeheer inclusief wijze van monitoring en evaluatie</i>	d) conditionering
<u>Stormvloedkeringen</u> 9) Welk sediment- en bodembeheer is gewenst en mogelijk bij de stormvloedkeringen?  Contact: MK/HK: Raoul Linzey, Driton Binaku, Jaco van Voorst. HV: Raoul Linzey, Maarten van de Plas, Gerard van Maanen,	<b>effectief en toekomstbestendig gebruik svk</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wat is de invloed van de svk en het gebruik er van op de bodem en vice versa Welke risico's kunnen daaruit ontwikkelen?</li> <li>Hoe zijn deze risico's te beheersen?</li> </ul>	<p><i>Evaluatie oorspronkelijke bodem-criteria voor instandhouding en operatie van svk lachtergronden niet altijd bekend, interventieniveau's/objecten onduidelijk of onbekend)</i></p> <p><i>Bepalen invloed bodemontwikkelingen buitendijks MLK op hoogwaterveiligheid (binnentreden storm en golfslag)</i></p> <p><i>Bepalen invloed bodemdynamiek op de inzet van de stormvloedkeringen (aanzanding drempel MLK (fenderplaten), gedrag langdurig sediment op de drempel, zandophoping bij de</i></p>	d) conditionering  e) evaluatie effecten  f) evaluatie morfodynamiek

kernvraag bodem irt netwerk	Doel	gerelateerde onderzoeksvragen	beoogd resultaat/verwacht product bij de onderzoeksvraag	type analyse
<p>HIJK: <u>Karl Hamerlink</u> (faalkans specialist) ...?</p>			<p><i>dokdeuren; zijn jets voldoende en is er een duurzamer alternatief)</i>  <i>Bepalen te verwachten bodemdynamiek bij niet-sluiten sluizen Hartelkering</i>  <i>Bepalen invloed bodemontwikkelingen op standzekerheid bodembeschermingen (kuilen)</i></p> <p><i>Protocol voor monitoring en voor beoordeling bodemdynamiek (incl. hoe bodempeilingen met inzicht te interpreteren)</i>  <i>protocol voor afstemming onderhoud bodem op vaargeulonderhoud</i>  <i>protocol voor inspectie objecten op de bodem_</i>  <i>Strategie voor interventie met inzicht in risico's en planning van interventies inclusief inschatting wanneer niet wordt ingegrepen</i></p>	
<p><u>District (AM)</u>  10) Wat is de invloed van morfodynamiek op het functioneel, operationeel en technisch beheer van de assets en welk sediment- en bodembeheer is gewenst?  Contact: Jerome Breet, Linda van Veen,</p>	<p><b>specificatie sediment- en bodembeheer</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wat zijn de bodemcriteria voor instandhouding van assets? Voldoet de bodem incl. verwachte ontwikkeling daaraan?</li> <li>• Hoe kunnen bodempeilingen met inzicht in dynamiek worden beoordeeld?</li> <li>• Wat is de strategie voor bodembeheer? Tot welke specificaties leidt dit (programmering, criteria</li> </ul>	<p><i>bodemeisen voor instandhouding van assets (standzekerheidsvlakken)</i>  <i>protocol voor beoordeling bodemdynamiek bij assets</i>  <i>strategie voor interventie</i>  <i>bodemeisen voor beoordeling vergunningaanvragen</i>  <i>bodemeisen voor aanleg en onderhoud (SLU)</i></p>	<p>d) conditionering  f) evaluatie  morfodynamiek</p>

kernvraag bodem irt netwerk	Doel	gerelateerde onderzoeksvragen	beoogd resultaat/ <i>verwacht product bij de onderzoeksvraag</i>	type analyse
eventueel John Romein, Mathias Buizen (tunnels, sluizen) en bruggen, Jane en Wilbert (dijken dammen duinen)		<p>vergunningen, uitvoering en onderhoud)</p> <p>Eventuele kennisbehoefte tbv AM-beheervisie (incl verantwoordelijkheden naar regio is niet uitgewerkt.</p>		



# 3 Meerwaarde model voor analyse bodemdynamiek

Dit hoofdstuk beschrijft welke analyse-instrumenten potentieel bestaan voor het beantwoorden van de vragen uit hoofdstuk 2 (paragraaf 3.1). Daarbij wordt ook een relatie gelegd met de verschillende ruimte- en daaraan gekoppelde tijdschalen van de relevante vraagstellingen. Vervolgens wordt aangegeven welke meerwaarde numerieke modellen naar verwachting toevoegen aan de verschillende types analyses uit hoofdstuk 2 (paragraaf 3.2 t/m 3.7).

## 3.1 Potentiële toepasbaarheid analyse-instrumenten bodemdynamiek

Het rivierbeheer in de Rijn-Maasmonding betreft met name morfodynamiek op korte (0-5 jaar) en middellange termijn (5-20 jaar) en, met het oog op netwerkontwikkeling, een lange termijn van 20-100 jaar. Zoals is beschreven in de voorgaande secties varieert ook de ruimtelijke schaal van de vraagstelling flink

- enkele meters;      bijvoorbeeld de getijdzone van oevers of de      onderwaterprofielen bij objecten en oevers
- tientallen meters      enkele malen de waterdiepte; bijvoorbeeld de ontwikkeling van erosiekuilen
- honderden meters enkele malen de rivierbreedte; bv sedimentatie in binnenbochten en ter plaatse van wijkende oeverbelijning
- enkele km's      bijvoorbeeld de sedimentbalans over de lengte van riviertakken, de invloed van de bodem op afvoerverdeling en zoutindringing.

Op elk van die termijnen komen de typen analyses van het overzicht in Sectie 2.4 voor:

- a. systeemanalyse:      inzicht bieden in huidige dynamiek & invloed van huidige maatregelen
- b. gevoeligheidsanalyse:      bepalen van de impact van onzekerheden
- c. prognose:      voorspellen verwachte bodemontwikkeling
- d. conditionering:      afleiden bodemcriteria voor instandhouding assets
- e. evaluatie effecten:      bepalen van morfologische effecten van ingrepen
- f. evaluatie morfodynamiek : (met inzicht) bepalen en beoordelen van actuele morfodynamiek

Voor deze analyses zijn verschillende instrumenten denkbaar. In deze verkenning wordt een onderscheid gemaakt in

- empirische methoden
- analytisch-empirische methoden
- analytisch-numerieke methoden
- numerieke methoden

Een indicatie van het toepassingsgebied is gegeven in Tabel 3. De numerieke modellen zijn dus een onderdeel van het gehele potentiële analyse-instrumentarium. Om de potentiële waarde van een numeriek model voor simulatie van bodemdynamiek nauwkeuriger te verkennen, wordt in de volgende secties per type analyse de meerwaarde van een numeriek model geschetst.

Tabel 3 Indicatie potentiële toepasbaarheid analyse-instrumenten.

type aanpak		lengteschaal	Korte termijn (0-5 jr)	Middellange termijn (5-20 jr)	Lange termijn (20-100 jr)	opmerkingen	
empirisch	doortrekken verticale trends uit peilingen; (bodenvormgemiddeld; vanaf 20 maal de waterdiepte)	oevers	te grote bodemgrad.	te grote bodemgrad.	te grote bodemgrad.	excl. trendbreuken; excl. meervoudige ontwikkelingen	
		kuilen	te grote bodemgrad.	te grote bodemgrad.	te grote bodemgrad.		
		dwarsprofielen bodemhelling takken	te veel interne invl. te veel interne invl.	geschikt veel interne invl.	te veel externe invl. te veel externe invl.		
	doortrekken horizontale trends uit peilingen (bij grote hellingen vanaf ca 1 m)	oevers	geschikt	te veel externe invl.	te veel externe invl.		
		kuilen	geschikt	te veel externe invl.	te veel externe invl.		
		dwarsprofielen bodemhelling takken	geschikt te grote bodemgrad.	veel externe invl. te veel externe invl.	te veel externe invl. te veel externe invl.		
	kentallen	oevers	geschikt	veel externe invl.	te veel externe invl.		
		kuilen	geschikt	veel externe invl.	te veel externe invl.		
		dwarsprofielen bodemhelling takken	geschikt geschikt	veel externe invl. veel externe invl.	te veel externe invl. te veel externe invl.		
analytisch & empirisch (formules)	evenwichtsprofielen	oevers	geschikt		te veel externe invl.	excl. temporele en ruimtelijke variaties	
		kuilen	in ontwikkeling	veel externe invl.	veel externe invl.		
		dwarsprofielen bodemhelling takken	veel externe invl. veel externe invl.	veel externe invl. minder geschikt	veel externe invl. veel externe invl.		
	grenswaarden stabiliteit bodemsediment (vanaf 20 maal de waterdiepte)	oevers			veel externe invloed		te veel externe invl.
		kuilen					
		dwarsprofielen bodemhelling takken	geschikt geschikt				
grenswaarden overgang sedimenttype (vanaf 20 maal de waterdiepte)	oevers						
	kuilen						
	dwarsprofielen bodemhelling takken	geschikt geschikt					
analytisch & numeriek (als D-FAST)	evenwichtsbenadering bodem (als MI) (vanaf 20 maal de waterdiepte)	oevers				excl. temporele variaties	
		kuilen					
	dwarsprofielen bodemhelling takken	geschikt	geschikt				
	evenwichtsbenadering oevers (als BE) (getijzone & onderwateroever)	oevers	geschikt	geschikt			
kuilen							
numeriek rekenmodel (D-HYDRO)	grootschalige dynamiek 1D (vanaf enkele malen de rivierbreedte)	oevers				veel parametrizing; grote ruimtelijke vereenvoudiging (e.g. 1D- splittingspuntenrelatie vereist, 2DH-(bij onderstream niet)	
		kuilen					
	dwarsprofielen bodemhelling takken		geschikt	geschikt			
	verticaal-profiel dynamiek langsprofiel 2DV (vanaf 0.1 maal de waterdiepte)	oevers	geschikt	veel externe invl.			
		kuilen	geschikt	veel externe invl.			
	dwarsprofielen bodemhelling takken						
	ruimtelijke dynamiek dieptegemiddeld 2DH (vanaf 20 maal de waterdiepte)	oevers					
		kuilen					
dwarsprofielen bodemhelling takken	geschikt geschikt	rekenintensief geschikt	rekenintensief				
ruimtelijke detail dynamiek 3D (vanaf 0.1 maal de waterdiepte)	oevers	geschikt					
	kuilen	geschikt					
dwarsprofielen bodemhelling takken		rekenintensief					

## 3.2 Modelinzet bij systeemanalyse

Systeemanalyse is gericht op inzicht in de morfodynamiek van het systeem en de invloed van historische ingrepen daarop. Dat kan de grootschalige bodemontwikkelingen over meerdere decennia, of juist de lokale bodemdynamiek binnen enkele maanden betreffen. De inzet van een model in dit type analyse kan als volgt worden geschetst.

### 3.2.1 Begrip waargenomen morfodynamiek

Een eerste stap in de systeemanalyse is om met beschikbare data en inzichten de aard en grootte van de bodemdynamiek en vermoedelijke oorzaken daarvan in kaart te brengen, over meerdere jaren en met goede ruimtelijke dekking van het interessegebied. Het gaat dan om beschrijving en karakterisering in kentallen voor grootte, variatie, trends en trendbreuken van

- **stroming die het bodemsediment in beweging zet.** Dus, variërend in het interessegebied de invloeden van zeespiegel en getij, zoet-zout gelaagdheid, rivierafvoer en windopzet. Hier kan een grote overlap zijn met informatie- en analyse-behoefte ten behoeve van de modellering van zoutindringing.
- **bodemligging zoals deze voor het netwerk relevant is.** Inclusief de dynamiek daarin als indicatie van mobiliteit, de (vermoedelijke) natuurlijke en antropogene aan- en afvoer van sediment naar en uit het interessegebied. De ingrepen in de bodem voor aanleg van maatregelen als onderdeel van beheer, de karakterisering van de mobiliteit van het rivierbed (zand, slib, klei, veen, grind, stortsteen) en de ondergrond daarvan.

De interpretatie start met het verkennen van hydraulische oorzaken voor de waargenomen bodemdynamiek door met een hydraulisch model grootten en gradiënten in stroomsnelheid (nabij de bodem) te berekenen en op basis daarvan een potentiële morfodynamiek (sedimentatie, erosie, eventuele segregatie van zandige en slibbige zones,..) af te leiden. Dat kan worden verfijnd door sediment-eigenschappen aan het hydraulisch model toe te voegen zodat ook bypassende sedimenttransporten kunnen worden berekend. De verschillen tussen waargenomen en potentiële dynamiek kunnen vervolgens een eerste aanduiding geven van bijvoorbeeld bijdragen van

- antropogene invloed (beheer, aanleg, gebruik)
- erodeerbaarheid van zowel bedding als de directe ondergrond daarvan
- ruimtelijke patronen in sedimenteigenschappen
- beperkingen in aanbod van sedimenttransport,
- ontbrekende of onvoldoende gesimuleerde hydraulische gebeurtenissen.
- de kwaliteit van de hydraulische modellering

Als met dergelijke toevoegingen de potentiële morfodynamiek uit hydraulische factoren beter overeenkomt met de waargenomen dynamiek, dan kan de interpretatie geverifieerd en verbeterd worden totdat in de modelsimulatie ook de waargenomen bodemdynamiek goed wordt nagebootst.

### 3.2.2 Begrip invloed historische ingrepen

Als het werking van het systeem met een bypassend model voor simulatie van de morfodynamiek is vastgesteld, kunnen invloeden van systeemwijzigingen uit het verleden worden bekeken. Het gaat daarbij overigens om historische ingrepen waarvan hydraulische effecten groot genoeg zijn om met de hydraulische modellen van RWS te kunnen simuleren. Bijvoorbeeld de Deltawerken (Haringvlietsluizen), aanleg trapjeslijn in de Nieuwe Waterweg, de bodemkribben in de Oude Maas, het opvullen en bestorten van de kuil bij de Spijkenisserbrug, de aanleg van het Hartelkanaal, de Maeslantkering, de oeverbestortingen in Dordtsche Kil en Spui, de vaargeulverruiming in de Nieuwe Waterweg, enzovoort.

Het analyseren van bodemeffecten van ingrepen uit het verleden is mogelijk uit waarnemingen als de bodemontwikkeling na aanleg goed vergeleken kan worden met dat in een referentietraject buiten het invloedgebied van de ingreep, of met de bodemontwikkeling binnen het invloedgebied maar dan in een referentieperiode vóór aanleg. Als zo'n vergelijking niet mogelijk is, dan is opnieuw een modelsimulatie nodig, ook voor de fictieve situatie zonder betreffende ingreep. Als zowel de berekende verandering in hydraulische forcering (dus waterbeweging in de huidige situatie minus de waterbeweging in de fictieve situatie zonder ingreep) als ook de bodemreactie die voor die verandering wordt berekend, beiden binnen de modelverificatie vallen, dan is dat een onderbouwde inschatting van het bodem-effect van de historische ingreep.

### 3.3 Modelinzet bij gevoeligheidsanalyses

Gevoeligheidsanalyses dienen om de potentiële invloed in beeld te brengen van variabelen waarvan de grootte onzeker is. Met die bandbreedte kan de invloed van de onzekere variabele op de onzekerheid van het advies beter worden ingeschat. Dit biedt de mogelijkheid onzekerheden gericht te verkleinen door extra onderzoek en metingen te concentreren op de variabelen die het meest bijdragen aan deze onzekerheden.

In een gevoeligheidsanalyse met een model is het gebruikelijk de waarde van meerdere variabelen en parameters afzonderlijk te variëren binnen hun onzekerheidsbandbreedte, en de invloeden daarvan op de bodemdynamiek zichtbaar te maken. Het kan bijvoorbeeld gaan om het verkennen van de mogelijke impact van de erodeerbaarheid van de onbekende ondergrond of om de diverse veranderingen in hydraulica en sedimentaanbod op de zee en rivieranden. De meerwaarde van modellen is hiervoor groot mits het morfodynamiek betreft waar het model voor is geverifieerd.

### 3.4 Modelinzet bij prognose van toekomstige ontwikkelingen

Bij de prognose gebruiken we het model voor morfologische voorspellingen van toekomstige situaties. De prognose omvat zowel de bodemontwikkelingen als de impact daarvan op het gebruik en instandhouding van de assets.

Voor wat betreft het voorspellen van bodemdynamiek komt dit praktisch neer op het onderkennen van de juiste historische trends en het op juiste wijze voortzetten daarvan, rekening houdend met invloeden van eventuele systeemwijzigingen en trendbreuken binnen de beoogde voorspeltermijn. Een groot aantal prognoses bestaat in de praktijk uit een lineaire extrapolatie van trends in waargenomen bodemontwikkeling.

Echter, als lineaire voortzetting van trends niet representatief is voor de beoogde voorspeltermijn, als er meerdere ontwikkelingen tegelijkertijd door de rivierbodem trekken of invloeden van eventuele systeemwijzigingen / trendbreuken groot zijn, dan volstaat het lineair doortrekken van trends in bodemontwikkeling niet meer en is modelsimulatie nodig om eenduidig prognoses te maken (er kan dan sprake zijn van niet-lineariteit van het systeemgedrag).

Bijvoorbeeld, met toekomstscenario's voor ontwikkelingen op de zee- en rivierenranden (klimaatscenario's), voor de heterogene erodeerbaarheid van de ondergrond (aansnijden harde lagen in het rivierbed), en voor verandering in beheerregime van Haringvlietsluizen ligt prognose van bodemontwikkelingen middels modelsimulatie voor de hand.

### 3.5 Modelinzet bij conditionering van bodemdynamiek voor evaluatie, instandhouding en prestatie

Het afleiden van criteria voor de bodem vanuit functionele, technische en operationele status van een asset vergt vermoedelijk:

- a) verkennen (impact analyse) bij welke bodemligging deze status wordt beperkt. Dergelijke bodemcriteria worden opgesteld vanuit het betreffende asset. Het vergt geen inzet van een model voor bodemdynamiek in het systeem. Voor de meeste objecten zijn hiervoor toetsprofielen en standzekerheidsvlakken (technische status) beschikbaar.
- b) inschatten welke bodemdynamiek kan worden verwacht (op welke termijn en met welke waarschijnlijkheid)  
Voor de grootschaliger ontwikkelingen die richting het asset trekken kan een model worden ingezet (sectie 2.3.3, 3.3). De inschatting van kleinschalige ontwikkelingen kan worden ontleend aan de systeemanalyse (sectie 2.3.1, 3.2)
- c) inschatten hoe de bodem met deze verwachte bodemdynamiek beheerst moet worden  
Dit vergt inzicht in de reactie van de betreffende bodem op beheermaatregelen. Voor de wat grootschaliger maatregelen zou een model kunnen worden ingezet (sectie 2.3.4). Bij kleinschaliger beheermaatregelen leunt bodembeheer al snel op proefondervindelijk opbouwen van ervaring.

### 3.6 Modelinzet bij evaluatie morfologische effecten planstudies en pilots

Dit is gericht op een goede en eenduidige bepaling van effecten van ingrepen op het gebruik en beheer van het netwerk. Dit kan in planstudies voor ingrepen die worden voorbereid, maar ook als onderdeel van pilots voor aanleg en onderhoud of bij formulering van beheerstrategieën.

Bij effectbepaling van nog niet-gerealiseerde ingrepen (planstudie) zou effectbepaling optimaal volgens de beoogde methodiek in het Rivierkundig Beoordelingskader kunnen verlopen als de bijbehorende modellen voor het Rijn-Maasmonding beschikbaar zouden zijn. Als die methodiek er in planstudies aanleiding toe geeft, dan is inschatting van effecten middels modelsimulatie de aangewezen weg. Met een passend model is het immers mogelijk om de hydraulische invloeden van een ingreep eenduidig en met verifieerbare betrouwbaarheid in morfologische effecten te vertalen.

Het analyseren van bodemeffecten bij pilots is mogelijk met waarnemingen als de bodemontwikkeling na uitvoering goed vergeleken kan worden met een referentie traject of referentieperiode. Als zo'n vergelijking niet mogelijk is, dan is ook dan een modelsimulatie nodig.

### 3.7 Modelinzet bij evaluatie huidige morfodynamiek

Evaluatie van de actuele morfodynamiek dient in de meeste gevallen het voorspellen van korte termijn bodemveranderingen, zodanig dat daarmee risico's voor het netwerk kunnen worden afgeleid. Dit vergt een goed onderscheid in stochastisch acterende bodemfluctuaties en trendmatiger bodemontwikkeling. Van beide dient de huidige status en het toekomstig verloop te worden vastgesteld. Omdat dit lokale ontwikkelingen op kortere termijn betreft, is inzet van modellen in dit type analyse beperkt. Wel is er morfologische expertise nodig om evaluatie uit te voeren op basis van onderscheid tussen trendmatige ontwikkeling en stochastische fluctuaties.

## 4 Samenvatting verwachte meerwaarde model

Het voorgaande hoofdstuk heeft een overzicht gegeven van de mogelijke inzet van numerieke modellen voor verschillende types analyse. In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de inzet van verschillende types modellen afhankelijk van de gekozen lengteschaal en daarbij impliciet ook een bijpassende tijdschaal. De relevante lengteschalen in de Rijn-Maasmonding zijn:

- objecten (zoals oevers en kunstwerken, lengteschaal is orde van waterdiepte)
- kuilen (lengteschaal is orde van 1 (bij beginnende kuilen) tot 10 maal de waterdiepte (bij ontwikkelde kuilen))
- dwarsprofielen (binnen/buitenbochten, lokale vernauwingen/verbredingen, lengteschaal is orde groter dan- de geul- of rivierbreedte)
- takken (lengteschaal is orde van kilometers)

Voor iedere van de gekozen lengteschalen zal worden beschreven wat inzet van het bijpassende model (1D..3D) toevoegt aan de volgende punten, die een samenvatting van de analysetypes uit hoofdstuk 3 zijn<sup>1</sup>:

- i) **inzicht** in hoe het systeem ontwikkelt en wat daarvan de oorzaken zijn (*systeemanalyse*), hoe het systeem in de toekomst gaat ontwikkelen (*prognose*), en wat de potentiële invloed van variabelen (scenario's ondergrond, toekomstig beheer en dito condities zee- en rivierrand) die onbekend zijn is (*gevoeligheidsanalyse*)
- ii) **evaluatie nieuwe ingrepen** (schatten en *evalueren morfologische effecten*)
- iii) **specificeren bodembeheer**, ofwel het opstellen van criteria voor instandhouding van netwerk en objecten (*evaluatie, instandhouding en prestatie*) (conditionering vanuit functies en stabiliteit)

Op elk van deze vier lengteschalen voert RWS morfologische analyses uit. Voor elk van deze lengteschalen benoemen we hier voor i), ii) en iii) de meerwaarde van een numeriek morfologisch model. Voor het verder uitwerken van dit overzicht is het van belang om meerwaarde in deze context te definiëren.

Meerwaarde wordt in deze context gedefinieerd als volgt:

*Welke kwaliteit voegt het gebruik van een numeriek model toe aan het proces van Rijkwaterstaat voor systeemanalyse, gevoeligheidsanalyse en prognose van de bodemontwikkelingen in de Rijn-Maasmonding?*

De complexe interacties tussen verschillende fysische processen (stroming en sediment, harde lagen), takken (afvoerdeling), tussen ingrepen, tussen morfologie en beheer) in het RMM maken dat het lastig is om te voorspellen hoe de bodem van het RMM-systeem zich ontwikkelt. Daarnaast wordt het systeem ook beïnvloed door plotselinge of trendmatige veranderingen in het systeem (ingrepen, ontwikkelingen in het beheer of op zee- en rivierrand, e.g. veranderende rivierafvoeren, zeespiegelstijging, bodemdaling).

---

<sup>1</sup> De evaluatie van de huidige bodem, ofwel inspectie (monitoring en beoordeling) van de actuele bodemligging (hoe te inspecteren, met welke signaleringsniveaus en interventieniveaus), is hierbij niet meegenomen, omdat zoals in hoofdstuk 3 al aangegeven, de meerwaarde van numerieke modellen hiervoor beperkt is.

Ten opzichte van het huidige proces kan de inzet van een model bijdragen aan het proces van Rijkswaterstaat voor het beheer en beleid in het netwerk door verbeterde:

- verifieerbaarheid - het model draagt bij aan een beter begrip van het actuele gedrag van het netwerk. Daarnaast helpt het model geobserveerde trends beter te duiden, bijvoorbeeld om vast te stellen of er een relatie is tussen eerdere ingrepen (en gemaakte keuzes daarin) en de bodemontwikkeling ter plaatse en in aanliggende takken.
- uniformiteit - een modelvoorspelling helpt om een uniform beeld te creëren van de toekomstige ontwikkeling, want een specifieke modelinvoer geeft doorgaans dezelfde modeluitvoer
- herleidbaarheid - keuzes voor een of een andere maatregel zijn beter te herleiden, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een pilot, waar vaak meerdere dingen tegelijk kunnen veranderen, bijvoorbeeld de afvoercondities en getijde condities voor en na een nieuwe maatregel zullen meestal verschillend zijn, een model kan hierop worden aangepast

Voor de verschillende lengteschalen is de verwachte meerwaarde van de inzet van een numeriek model in Tabel 4 beschreven.



Tabel 4 Verwachte meerwaarde van numeriek model afhankelijk van lengteschaal

Lengteschaal	Orde van grootte	Modeltype	Inzicht huidig en toekomstig systeem (i)	Evaluatie ingrepen (ii)	Specificeren bodembeheer (iii)
Pijler, Brug, Krib, Bestorte oevers	10 m	3D met RANS met k- $\omega$ of beter (niet morfologisch)	enige meerwaarde voor bepalen hydraulische belasting	enige meerwaarde voor bepalen hydraulische belasting  bijv. risico op ontgronding bij bestortingen / voorkomen sedimentatie drempel Maeslantkering	
Kleine en grotere erosiekuilen	10-100 m	3D	enige meerwaarde: 3D, turbulentie en wervels bij kuil rand/bodem – schuifspanning + drukken (getijfase)  Sediment-zoutconcentraties	Niet (alleen hydrodynamisch voor aanpassing geometrie)	
		2DV (grotere kuilen)	Doorvoer van sediment/zout door de kuil (over meerdere getijcycli)	enigszins, voor ingrepen op 2DV karakter	
Zeer lange kuilen	lengte 500m breedte 100m	2DH*	Dieptegemiddeld: Verdeling stroming over de breedte – diepe geulen trekken meer stroming (getijcycli) + impliciet effect op zoutindringing en vaargeul	betere inschatting van de dynamiek in/rondom de kuil na een ingreep	
Dwarsprofielen	100 m  2-10 jaar	2DH	Lange-termijn ontwikkeling bochtprofielen, lokale vernauwingen/verbredingen	Grote meerwaarde voor evaluatie ingrepen. e.g. Aanpassing geometrie, verruiming Nieuwe Waterweg, Aanleg Blankenburg tunnel	Bepalen of er ruimte is voor terugstorten
		grof 3D (fijn in de verticaal, grof in dwarsrichting / grof in de verticaal 3-5 lagen, fijn in dwarsrichting)	Lange termijn ontwikkeling bij complexe interacties van getij en gelaagdheid en ruimtelijke heterogeniteit	Onderwater bestorting oevers, Maeslantkering versmalling)...	
Takken	O (5 km)  O (5-50 jaar)	1DH* 2DV Grof 2DH* Grof 3D	Grote meerwaarde voor lange termijn ontwikkeling – en randeffecten - zeespiegelstijging - klimaat	Grote meerwaarde voor grootschalige aanpassingen	Afleiden sediment management strategie

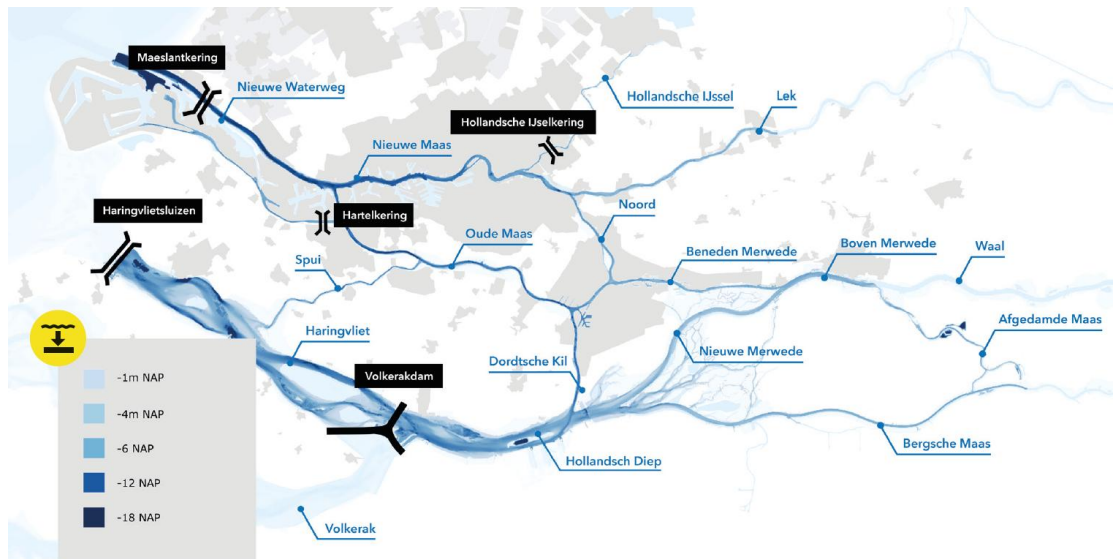
\*(mits – in geval van gelaagdheid – relevante correcties van het snelheidsprofiel worden meegenomen)

## 5 Systeembeschrijving

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de processen in de Rijn-Maasmonding die relevant zijn voor de rivierbodem. De beschrijving is op hoofdlijnen gehouden, om overlap met beschrijvingen in een groot aantal reeds bestaande rapporten te voorkomen. Naar deze rapporten wordt verwezen, zodat meer detail daar nagelezen kan worden naar behoefte.

### 5.1 Overzicht systeem

De Rijnmaasmonding vormt het overgangsgebied tussen de rivieren Rijn en Maas en de Noordzee. Het westelijk gebied wordt gekenmerkt door estuarine processen (getij, zoutindringing) terwijl in het oostelijk deel de invloed van de rivieren belangrijk wordt. Het gebied wordt gekenmerkt door een groot aantal vertakkingen van rivieren en waterwegen en verschillende sluisen en stormvloedkeringen. Het gebied ontvangt rivierwater van de Rijn via de Boven- en Nieuwe-Merwede en de Lek, en van de Maas via de Bergsche Maas en Amer. Uiteindelijk wordt het rivierwater naar de Noordzee afgevoerd via de Scheur, de Nieuwe Waterweg, en het Hartel- en Beerkanaal, en via Haringvliet door de Haringvlietssluisen. Een overzichtskaart wordt in Figuur 1 gegeven.



Figuur 1 Overzichtskaart van de Rijn-Maasmonding, met de diepteligging en de namen van de waterlopen en de Deltawerken (bron: Rijkswaterstaat, 2019b).

### 5.2 Historie van het gebied en veranderingen in het RMM-gebied in de afgelopen jaren

Tabel 5 geeft de belangrijke veranderingen in het RMM-gebied in de afgelopen jaren weer.

Tabel 5 Veranderingen in het RMM-gebied in de afgelopen jaren (lijst ontvangen van Ronald Struijk, RWS-WNZ, 6 maart 2018).

Gereed	start	Rivier	KMR	Naam
1993		Bergsche Maas / Amer	251 / 252	Amertak gegraven
1999		Boven Merwede	954	Polder Aanwas Sleeuwijk
2001		Bergsche Maas	249	Dombosch - geul gegraven
2001		Bergsche Maas	247	Pontonierskazerne
2001		Bergsche Maas	250	Aakvlaai
2007		Hollands Diep		Sassenplaat
2008		Boven Merwede	953-955	Woelse Waard / Dalemse Gat <sup>2</sup>
2008		Beneden Merwede		Dijkversterking Papendrecht thv industrieterrein
2008		Biesbosch - Brabant		Natuurontwikkelingsproject Noordwaard
2008		Biesbosch - Sliedrecht		Herinrichting
2008		Haringvliet		Tiengemeten herinrichting
2011		Biesbosch - Brabant		Ontpoldering Zuiderklip
2011	2008	Biesbosch - Brabant		Doorsteek Moordplaat - Steurgat
2011		Papagaaienbek NWW		Doorsteek en eilandje voor zeehonden gerealiseerd (Nijlhaven)
2012		Noord		Sofiapolder
2012		Nieuwe Merwede	977	Tongplaat
2015	2010	Lek		BAS dijkversterking Bergambacht - Amerstol – Schoonhoven
2015		Oude Maas	986	Geul Kuipersveer
2015		Nieuwe Merwede	964	Noordwaard
2016		Nieuwe Maas		Getijdenpark
2016		Nieuwe Waterweg / Calandkanaal		Verbreding Breeddiep
2016		Noord		Crezéepolder <sup>2</sup>
2018	2013	Lek		Dijkversterking Lekdijk
2018		Nieuwe Waterweg / Botlek		Verdieping
2018		Nieuwe Maas	991	Natuurgebied de Zaag
2019	2022	Boven Merwede	957	Nieuwe brug A27
2021		Boven Merwede	953-954	KRW planstudie 2016 – 2021

Naast de ingrepen in de bovenstaande tabel, zijn er ook nog diverse andere ingrepen relevant voor het (morfologisch) gedrag van het systeem, zoals opening van Beerdam en Hartelkanaal, Kier Haringvlietsluizen, bestortingen in de Dordsche Kil en in het Spui, bestorting Spijkenisserbrug, suppleties in erosiekuilen, enzovoort.

### 5.3 Geometrie van het gebied

Kenmerkend voor het gebied zijn (i) de vele splitsingen en samenvloeiingen van riviertakken die leiden tot een dendritisch systeem en (ii) het grote kombergingsgebied bestaande uit het Haringvliet, Hollands Diep, en de diverse havenbekkens. Karakteristiek voor de Nieuwe Waterweg, de Scheur en de Nieuwe Maas is de stapsgewijze verondieping van NAP-17 m bij de kop van de splitsingsdam (km 1032) naar NAP-8 m bij de Erasmusbrug (km 1001) volgens de zogenaamde trapjeslijn. Deze oorspronkelijke trapjeslijn is echter niet meer onderhouden in de afgelopen decennia (van der Kaaij et al. 2010). In 2018 is verder het bovengenoemde traject extra verdiept om over een grotere lengte een diepte van NAP-17 m te garanderen (tot aan de ingang van de 2<sup>e</sup> petroleumhaven), waarbij de grootste verdieping met name in het oostelijke deel van dit traject is uitgevoerd. Langs vooral de Nieuwe Waterweg (en Calandkanaal), Scheur en de Nieuwe Maas liggen grote havens die van invloed zijn op het getij (demping en vertraging van de getijgolf) en de menging.

<sup>2</sup> Deze verandering is niet beschikbaar als maatregel en kan daarom niet meegenomen worden.

## 5.4 Keringen

In het RMM gebied bevindt zich een zestal keringen. Deze keringen dienen de veiligheid van het achterland te waarborgen en worden gesloten in geval van verwacht hoogwater. De keringen zijn:

- de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg;
- de Hartelkering in het Hartelkanaal;
- de Haringvlietdam en sluisen;
- de Hollandsche IJsselkering;
- de Kromme Nol Kering in het Heusdensch Kanaal; en
- de Volkerakdam en sluisen.

De Haringvlietdam en sluisen hebben naast een functie als stormvloedkering ook een functie om een deel van het overtollige water uit de rivieren af te voeren bij hoge rivierafvoer en om voldoende water via de Nieuwe Waterweg te laten stromen voor het tegengaan van de zoutindringing bij lage rivierafvoer. De Haringvlietsluisen vormen daarmee een belangrijke schakel in het dagelijkse beheer van de waterstanden en de afvoer in het RMM-gebied. In 2019 is bij de Haringvlietsluisen stapsgewijs de kier ingevoerd, waarbij ook een beperkte opening van de sluisen wordt ingesteld wanneer de waterstand op het Haringvliet lager is dan op zee. Het doel daarvan is het verbeteren van de situatie voor trekvisserij. Veenstra et al. (2022) beschrijven de keringen in de Rijn-Maasmonding in meer detail.

## 5.5 Waterbeweging

De waterbeweging in de Rijn-Maasmonding is complex en wordt bepaald door de volgende processen:

- de waterstanden op zee bij de mondingen (Maasmond en Haringvliet-buiten), met name de stormopzet en het getij,
- de afvoer van de Rijntakken en de Maas
- de afvoer door de Haringvlietsluisen (spuiregime en kier),
- de komberging in havenbekkens, in Hollands Diep en in Haringvliet,
- het dichtheidsverschil tussen het zoute zeewater en het zoete rivierwater,
- de impulsuitwisseling met bodem en geometrie,
- de menging in het hele gebied,
- windopzet en windgolven in Haringvliet en Hollands Diep
- scheepvaart (scheepsgolven, retourstroming)
- opening en sluiting van keringen,
- overige lozingen en onttrekkingen.

### 5.5.1 Getij

Getij vormt een belangrijke aandrijving voor morfologische processen. Het semi-diurnaal getij zorgt dat het twee maal per dag eb en vloed is. Stroomsnelheden tijdens de eb- en vloedstroom zijn voldoende voor erosie en sedimentprocessen van zowel zand als slib. Het getij loopt het rivierengebied binnen via de Nieuwe Waterweg en het Beer- en Hartelkanaal. De gemiddelde hoog- en laagwaters voor doortij, gemiddeld tij en springtij in Hoek van Holland en Moerdijk zijn vermeld in Tabel 6. De getijvariatie bij Moerdijk wordt sterk gedempt door het grote kombergingsoppervlak van het Haringvliet en Hollands Diep en de afstand en beperking van de doorstroomprofielen van de riviertakken tussen de Maasmond en deze voormalige estuaria.

Tabel 6 Getij karakteristieken Hoek van Holland en Moerdijk over de periode 1980-1990 (Rijkswaterstaat, Slotgemiddelde 1991.0).

	Gem. laagwater [m NAP]	Gem. hoogwater [m NAP]	Gem. getijslag [m]
<b>Hoek van Holland</b>			
Doodtij	-0,60	0,88	1,48
Gemiddeld tij	-0,63	1,11	1,74
Springtij	-0,60	1,30	1,90
<b>Moerdijk</b>			
Doodtij	+0,42	+0,66	0,24
Gemiddeld tij	+0,39	+0,65	0,26
Springtij	+0,45	+0,72	0,27

De getijslag neemt af en de getijdegolf verandert van vorm in stroomopwaartse richting als gevolg van veranderingen in geometrie, door berging, door reflecties, en door energiedissipatie door bodemwrijving en andere vormen van energieverlies. Langs de noordrand (Waterweg-Scheur-Nieuwe Maas-Lek) neemt de gemiddelde getijslag geleidelijk af tot 1,30 m bij Krimpen a/d Lek ( $\approx 40$  km opwaarts van Hoek van Holland) en 0,99 m bij de stuw van Hagestein ( $\approx 80$  km stroomopwaarts van Hoek van Holland). Door het grote kombergend oppervlak blijft de getijvariatie in het Haringvliet en Hollands Diep beperkt: gemiddeld 0,26-0,28 m bij Moerdijk en Hellevoetsluis bij een gemiddelde Bovenrijnafvoer van 2200 m<sup>3</sup>/s. Op de Waal bij Zaltbommel is bij een gemiddelde Bovenrijnafvoer nog een geringe getijinvloed merkbaar (getijslag 0,09 m) maar deze invloed is bij Tiel verdwenen. Bij de stuw van Lith op de Maas is de gemiddelde getijslag 0,13 m bij een gemiddelde Maasafvoer van 320 m<sup>3</sup>/s. Door de grotere waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand ten opzichte van de situatie van vóór de afsluiting zijn de debieten in de Oude Maas, Dordtse Kil, Spui en Noord toegenomen met als gevolg erosie van deze riviertakken sinds de afsluitingen.

Over het algemeen geldt dat een toename van de doorstroomprofielen van de riviertakken kan leiden tot een toename van getijdvolume, en daarmee een versterking van de getijdoordringing. In theorie kan dit betekenen dat erosie zichzelf kan versterken, echter binnen bepaalde grenzen afhankelijk van de complexe interacties tussen getij, rivierafvoer en spuiregime Haringvliet, en bodemgesteldheid (bijv. erosiviteit).

Rijkswaterstaat (2024a) heeft ook een karakterisering van de waterbeweging gemaakt gebaseerd op verschillende 1D berekeningen. Dit betreft het Sobek-RE TMR2006/NDB110 of het Sobek 3 j15\_5v4 model. De simulatie van het spuien is volgens LPH'84 (Tabel 7). Verder is het slotgemiddeld getij 2011.0 met 3 cm zeespiegelstijging (situatie '2023') gebruikt. De afvoerverdeling in de Rijntakken is volgens WBI2017 (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium). De Maasafvoer is hierbij gecorreleerd aan de Rijnafvoer. Ook de lateralen volgen de aanpak WBI2017 en zijn voor de gekozen afvoeren lineair geïnterpoleerd. Er is geen intern windveld opgelegd, noch een externe windopzet op zee.

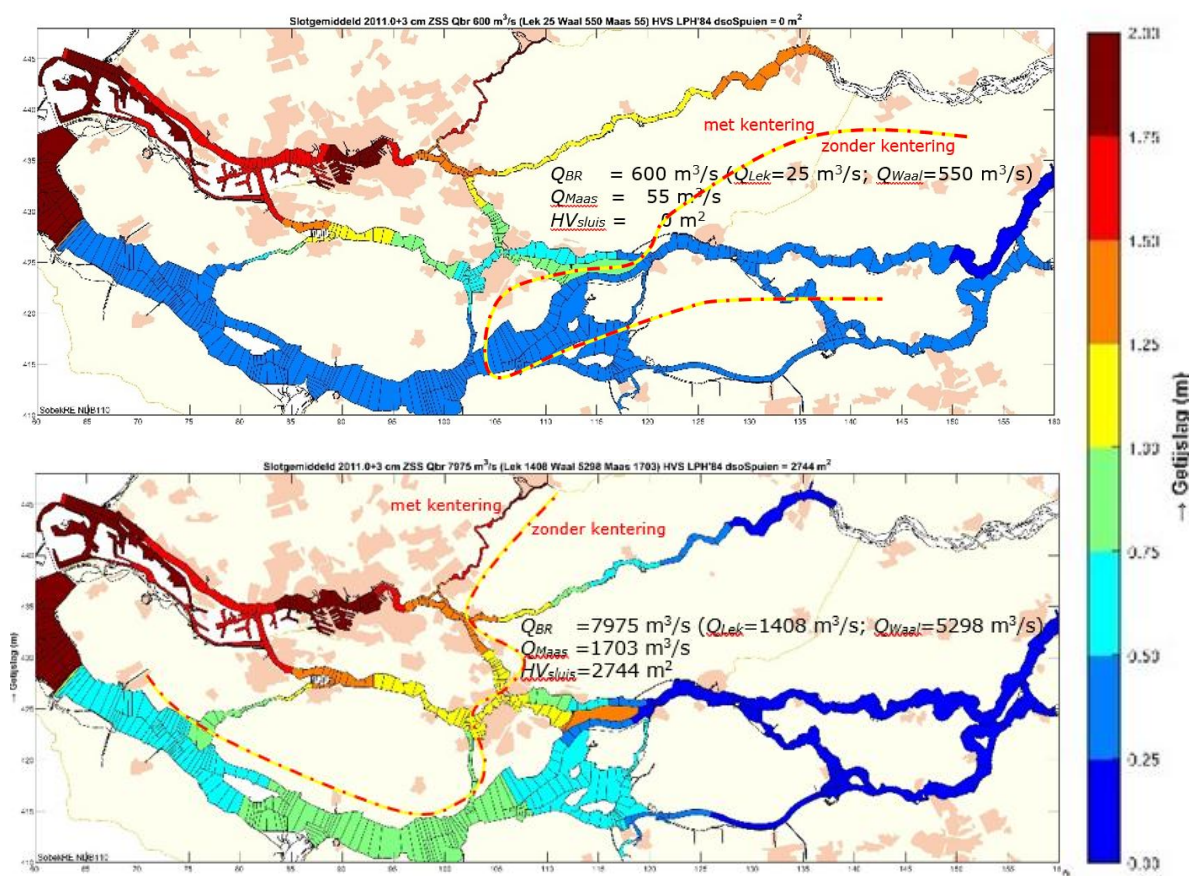
Tabel 7 Lozingsprogramma Haringvlietsluizen LPH'84 (overgenomen uit Rijkswaterstaat (2019a))

Boven-Rijnafvoer [m <sup>3</sup> /s]	Haringvlietsluizen
< 1100	sluizen gesloten op de zouten visriolen na, deze staan alleen open als de buitenwaterstand lager is dan de binnenwaterstand. Via deze riolen wordt dan ongeveer 10 m <sup>3</sup> /s gespuid
1100 - 1700	sluizen 25 m <sup>2</sup> open als de waterstand buiten lager is dan binnen om een doorspoeldebiet in het westelijke deel van het Haringvliet van ca 50 m <sup>3</sup> /s gemiddeld per getij te handhaven
1700 - 3900	spui-opening wordt groter met de rivierafvoer, zodanig dat getijgemiddeld ca 1500 m <sup>3</sup> /s over de noordrand (Nieuwe Waterweg en Hartelkanaal) wordt afgevoerd i.v.m. verzilting. Laagwaterstanden bij Moerdijk blijven ruimschoots boven NAP.

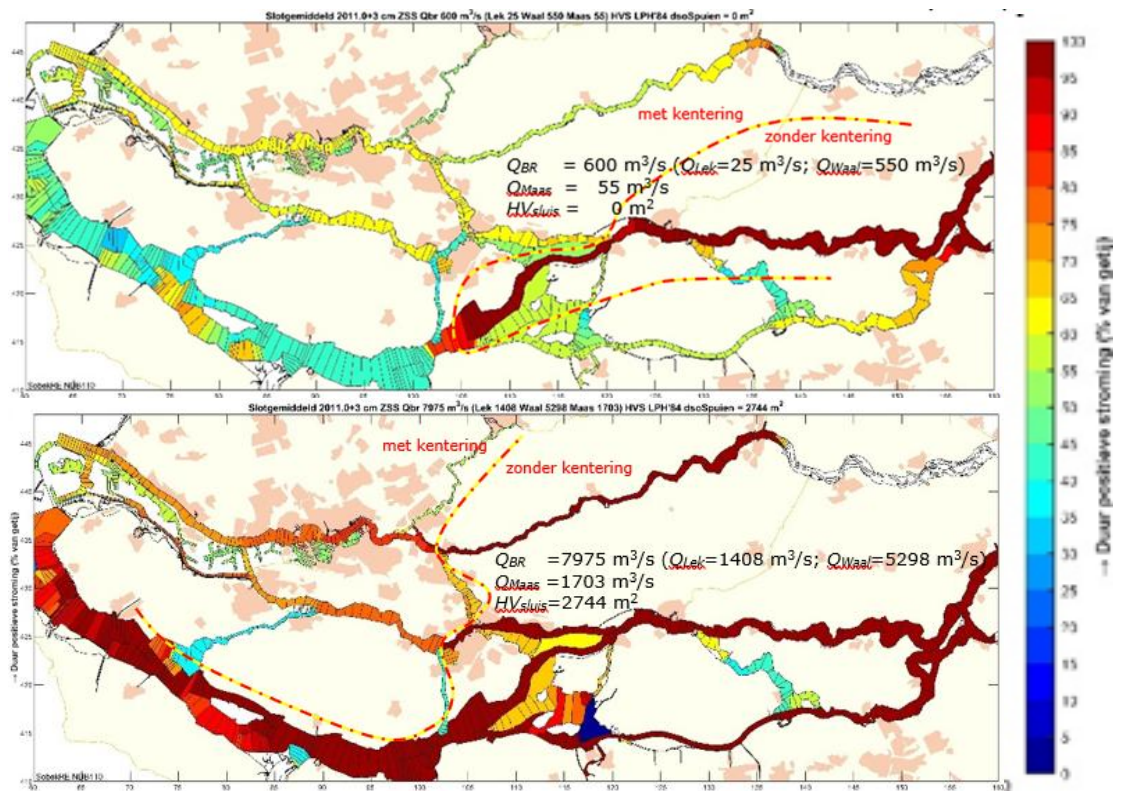


Boven-Rijnafvoer [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Haringvlietsluizen
3900 - 9500	spui-opening neemt toe met de rivierafvoer, zodanig dat de waterstand van NAP bij Moerdijk wordt gehandhaafd. Het debiet door de noordrand neemt eveneens toe.
> 9500	sluizen helemaal open ( $6000 \text{ m}^2$ ) als de buitenwaterstand lager is dan de binnenwaterstand

Met behulp van deze simulaties is het mogelijk dit ook grafisch weer te geven. In Figuur 2 is te zien hoe het getij op de Nieuwe Waterweg de Rijn-Maasmonding binnentreedt via het Scheur & Nieuwe Maas en via de Oude Maas. Op de Oude Maas dempt de getijslag sneller dan in de Nieuwe Maas, waar de amplitude ter hoogte van de Waalhaven en stadhavens zelfs plaatselijk is versterkt in de modelberekening. De demping per afgelegde km is in de Nieuwe Maas grofweg tweemaal kleiner dan in de Oude Maas. Daardoor resteert een relatief grote getijslag in Lek en Noord. Een versterking van getij is bij lage rivierafvoeren ook terug te vinden aan de bovenstroomse rand van de Lek en Bergsche Maas, maar dat vermindert snel bij hogere rivierafvoer. Het spuien met de Haringvlietsluizen bepaalt de getijslag in Haringvliet, Hollandsch Diep, Nieuwe en Boven Merwede, Amer en Maas. Omdat dit spuiregime varieert met rivierafvoer, is ook de doordringing van getij op deze trajecten sterk afvoerafhankelijk.



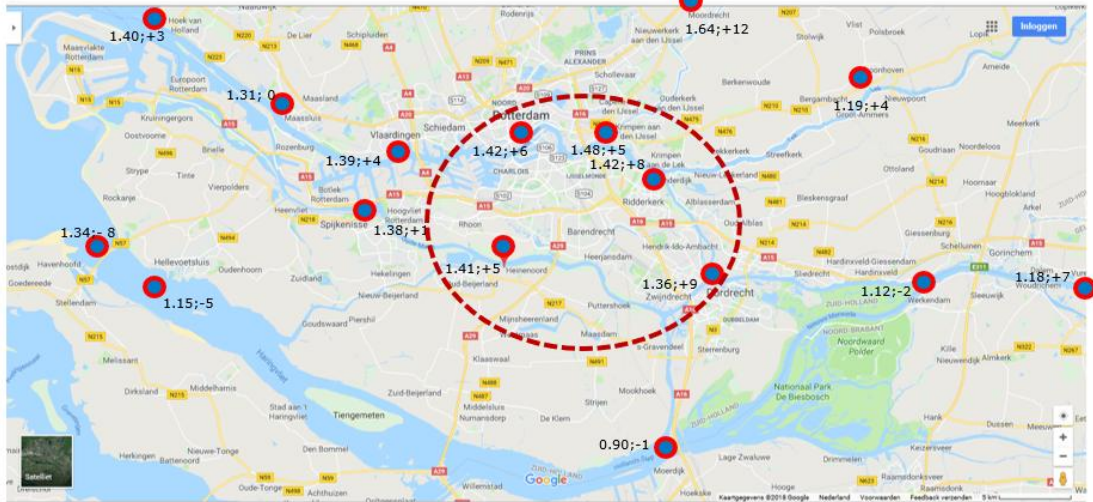
Figuur 2 Getijslag voor a) lage en b) hoge rivierafvoer.



Figuur 3 Relatieve duur van positieve stroomsnelheden voor a) lage en b) hoge rivierafvoer.

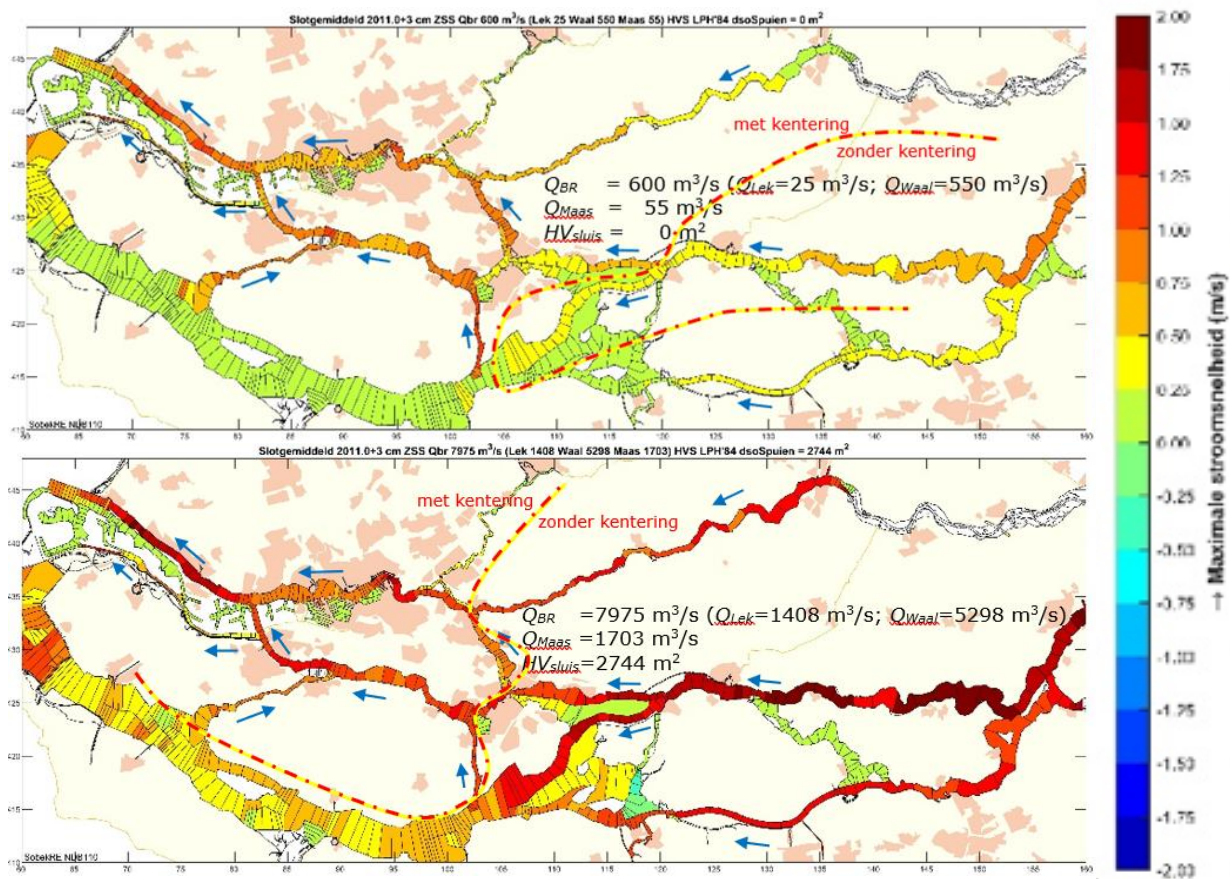
Met de relatieve duur van positieve (zeewaarts gerichte) stroomsnelheden is af te bakenen waar stroming bij gemiddeld getij kentert (zie hiervoor Figuur 3). Dat is op trajecten waar de duur van positieve stroming kleiner is dan de maximum waarde (kleur dus anders is dan donkerrood). Deze duur varieert uiteraard met de rivierafvoer zoals blijkt uit de vergelijking tussen de bovenste en onderste figuur. Daarnaast zijn er ook tussen takken onderling wat verschillen. Takken met een ongeacht rivierafvoer permanente significante kentering (minder dan 90% van het getij zeewaarts gerichte stroomsnelheden) zijn Nieuwe Waterweg & Scheur, Calandkanaal, Hartelkanaal, Oude Maas, Spui, Dordtsche Kil, Nieuwe Maas, Hollandse IJssel, Noord, Afdamde Maas, en Biesbosch. Op Lek, Wantij, Beneden-Merwede, Amer en Bergsche Maas lijkt dit te variëren met de rivierafvoer, net als op het Haringvliet (vanwege het afvoerafhankelijke spuiregime). Echter, omdat bij lage stroomsnelheden modelverificatie gecompliceerder is, is voor die condities ook de kwaliteit van modelresultaten wat onduidelijker. De trendlijnen van deze figuren, waarin wel of geen kentering is aangegeven, zijn ten behoeve van de interpretatie ook over de andere figuren geprojecteerd.





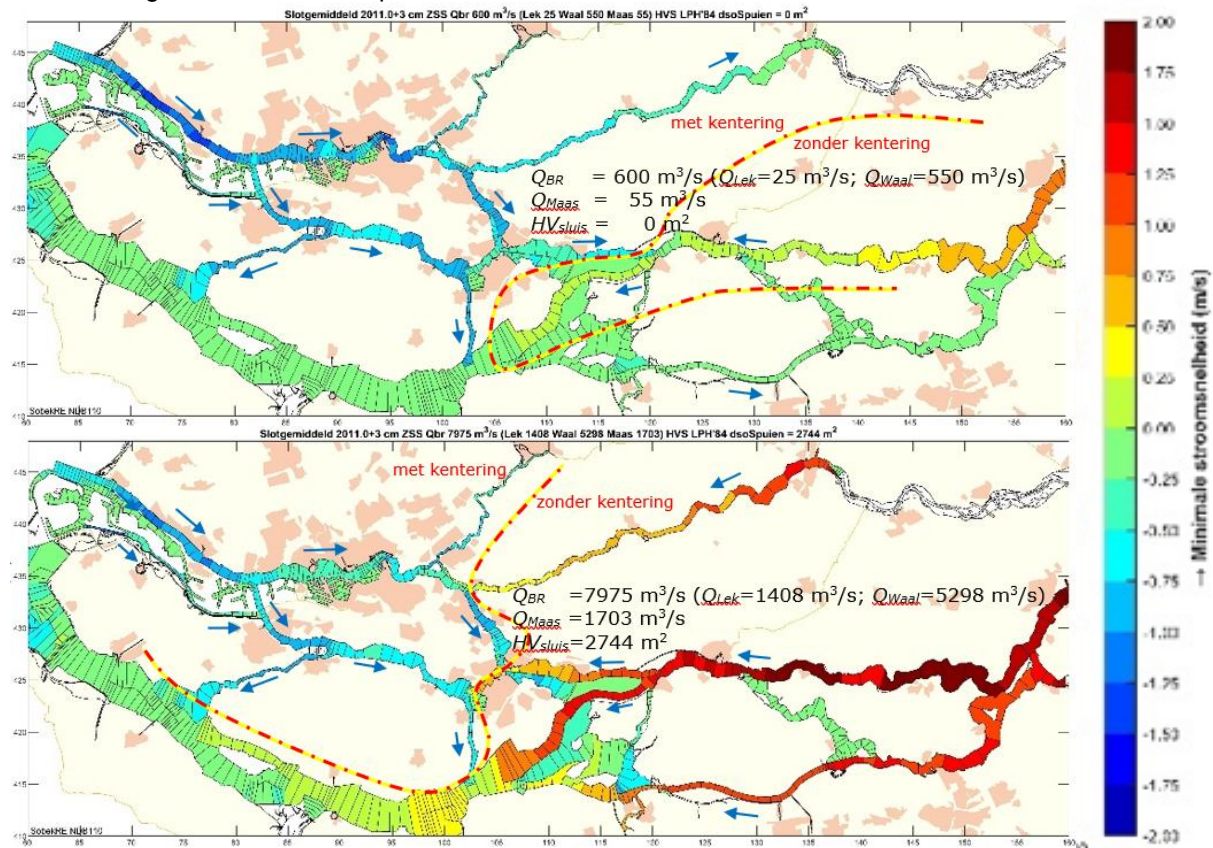
Figuur 4 Gemiddelde getij-amplitude [m] en trends in cm/jaar 1975-2018 bij een Boven-Rijnafvoer van 2000 m<sup>3</sup>/s.

Rijkswaterstaat (2019a) hebben een analyse op basis van de MWTL (Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands) stations gemiddelden en trends bepaald van de waterstanden in de RMM. Figuur 4 toont de gemiddelde getijamplitude en de langjarige trend. In het gebied Noord, Nieuwe Maas en Oude Maas is een toename van de getijamplitude te zien in de periode 1975-2018.



Figuur 5 Maximale berekende stroomsnelheid bij afgaand tij, gedurende een getijperiode met gemiddelde getij, en voor lage rivierafvoer (boven) en hoge rivierafvoer (onder).

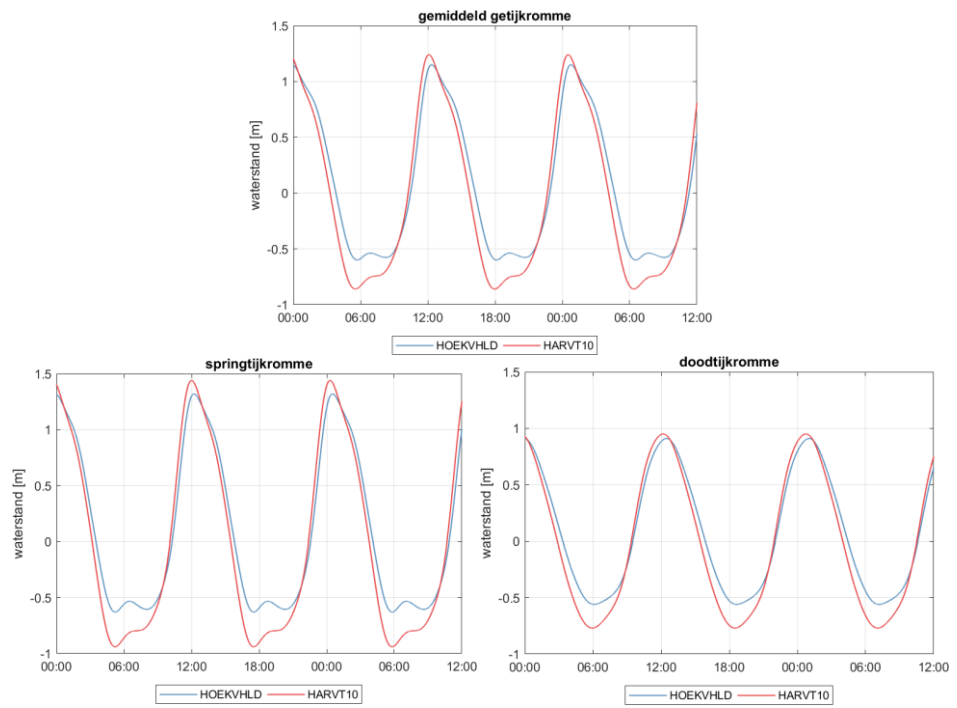
De maximale stroomsnelheid bij ebstroming (afgaand tij, zeewaarts gericht, maximaal in een gemiddeld getij) laat gradiënten zien door variaties in getij, rivierafvoer en rivier-geometrie (vgl. Figuur 5). Deze maxima zijn onafhankelijk van rivierafvoer redelijk hoog in Nieuwe Waterweg en Scheur, Oude Maas vanaf het Spui (km 995), Dordtsche Kil en Nieuwe Maas tussen Hollandsche IJssel (km 994) en Noordereiland (km 1000). Het spuien van de Haringvlietssluis bepaalt de maxima in Haringvliet en Hollandsch Diep. Met uitzondering van grote delen van het Haringvliet is in vrijwel alle takken de grootschalige stroming sterk genoeg om dynamiek van zandig bodemsediment op te wekken. Daarbij is in de figuur aangegeven waar grofweg kentering kan worden verwacht, dus waar door getij sediment in twee richtingen zou kunnen verplaatsen.



Figuur 6 Maximale berekende stroomsnelheid bij opkomend tij, gedurende een getijperiode met gemiddeld getij, en voor lage rivierafvoer (boven) en hoge rivierafvoer (onder).

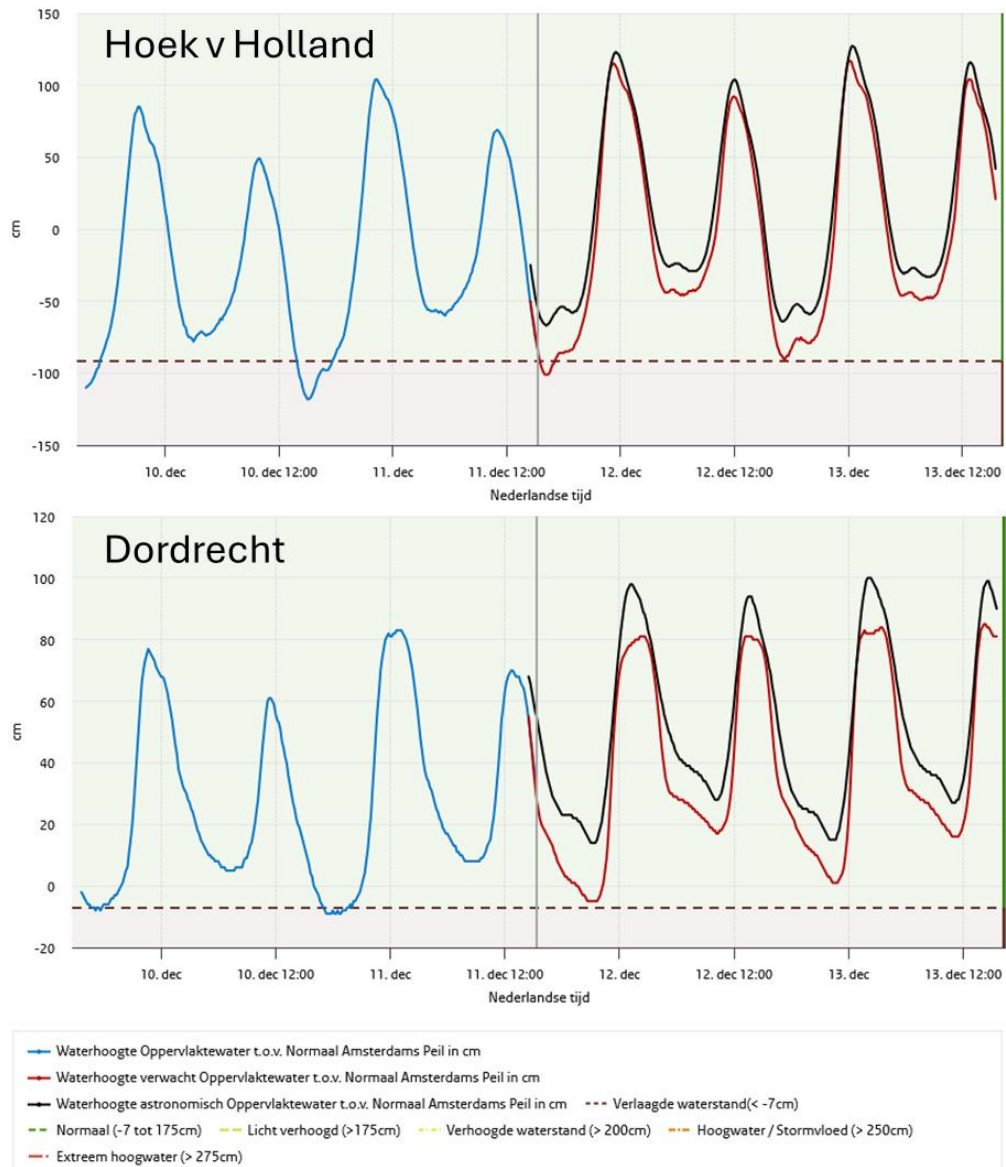
Ook in de maximale stroomsnelheden bij vloedstroming (zie Figuur 6) zijn patronen te herkennen door variaties in getij, afvoer en geometrie. In takken met kentering zijn de maxima landinwaarts gericht. De hoogste landinwaarts gerichte snelheden zijn te vinden in Nieuwe Waterweg en Scheur (nog berekend zonder bijdrage van zoet-zout gelaagdheid), Nieuwe Maas tussen km 1000 en 994, Spui en Dordtsche Kil. Iets minder hoge snelheden, maar nog steeds voldoende voor verplaatsing van zandig sediment landinwaarts, zijn te vinden in Oude Maas, Nieuwe Maas en Noord. Hoewel bij ebstroming snelheden groot genoeg zijn om zandig bodemsediment landinwaarts te verplaatsen, is door de duur en asymmetrie van de eb- en vloedstroming er sprake van een netto zeewaarts transport van dat zand. De combinatie van ebstroming en rivierafvoer draagt dus netto meer bij aan dit transport.

De gemiddelde getijkrommen in Figuur 7 en de waterstanden in Figuur 8 laten zien dat het getij langs het Zuidwestelijke delta asymmetrisch verloopt. Dit heeft gevolgen voor het sedimenttransport dat met het getij het RMM-gebied binnen komt en de netto transporten in de verschillende takken (paragraaf 5.7.1).



Figuur 7 Gemiddelde getijkrommen voor stations Hoek van Holland en Haringvliet 10 (bron: Veenstra et al., 2021).





Figuur 8 Waargenomen en voorspelde waterstanden (astronomisch getij) bij Hoek van Holland en Dordrecht voor 11 december 2024 (bron: Rijkswaterstaat Waterinfo).

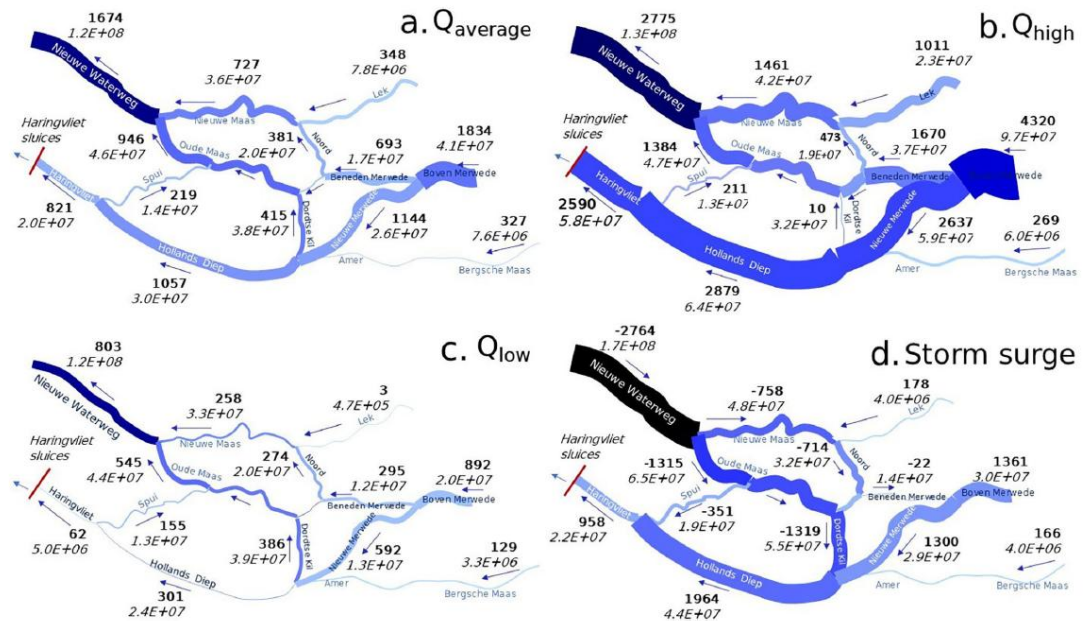
### 5.5.2 Rivierafvoer en verdeling over de takken

Aan de oostkant van het gebied stroomt rivierafvoer binnen via de Waal, Lek en Maas. Volgens Arcadis (2015) gebeurt dit ruwweg in een verhouding van 4:1:1 en is de verhouding van de uitstromende afvoer via de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet ruwweg 3:1. Uiteraard hangt de precieze verdeling af van veel factoren, zoals de Rijn- en Maasafvoer, de getijdesituatie (bv. spring- of doottij), welke fase van het getij, wel of geen storm, etc. De overige lozingen en onttrekkingen zijn in vergelijking hiermee verwaarloosbaar klein (Arcadis, 2015).

Bij hoge Bovenrijnafvoeren wordt er meer zoet water afgevoerd via de Haringvlietsluizen dan via de Nieuwe Waterweg. Bij lage afvoeren (tot 1100 m<sup>3</sup>/s) zijn de Haringvlietsluizen tot 2019 gesloten..

Voor de afvoeren is in onderstaande Figuur 9 te zien dat afhankelijk van de rivierafvoer en wel of geen stormopzet de stroming zich anders door het RMM gebied verdeelt.

Voor het westelijk deel van de RMM heeft stormopzet grote invloed op stroomsnelheden in de takken. Bijvoorbeeld in het Spui treden de grootste snelheden op tijdens stormopzet, terwijl in deze tak het effect van rivierafvoer zeer gering is door het spuiregime van de Haringvlietssluisen (de Goederen, 2022).



Figuur 9 Overzicht van afvoer (vetgedrukt) en getijvolume (schiuingedrukt) voor gemiddeldgetijcondities voor a) gemiddelde, b) hoge en c) lage rivierafvoer en d) gemiddelde rivierafvoer met stormopzet op basis van SOBEK berekening voor 2013 (overgenomen uit Cox et al. 2021)

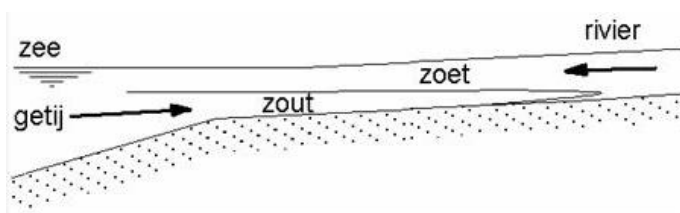
### 5.5.3 Interactie zoet en zout water

Het zoutwater beïnvloedt het stroombeeld in de verticaal en nabij de bodem (bijv. vorming van een “zouttong”) en leidt tot flocculatie (vlokvorming) van slib wat leidt tot meer aanslibbing. Figuur 10 toont verschillende situaties van verzilting in der Rijn-Maasmonding. Deze beperkt zich meestal tot de Nieuwe Waterweg, en het westelijke deel van de Nieuwe en Oude Maas. Bij lage afvoeren kan de punt van de zouttong reiken tot Krimpen aan de IJssel langs de Hollandsche IJssel, en tot de Beerenplaat op de Oude Maas bij de monding van het Spui. Bij extreme condities, lage rivierafvoer in combinatie met doortij en/of middenstandsverandering op zee ten gevolge van storm, kan het zout komen tot op de Lek en op de Oude Maas bij Dordrecht, en kan zelfs via het Spui en de Dordtsche Kil het Haringvliet en Hollandsch Diep bereiken. In dat geval wordt gesproken van achterwaartse verzilting. Dit betreft dan meestal een kortstondige verzilting gedurende enkele uren (Kuijper & Van der Kaaij, 2009).

Verziltings type	-	0	1	2	3	Schaal (mg Cl/l)
Omschrijving	Gemiddelde omstandigheden	Oprukkende zouttong bij lage afvoer	Eenmalige sterke achterwaartse verzilting	Zuidrand verzilt, najaareffect van extreme type 1 verzilting	Verzilting door hoge achtergrondconcentraties rivierwater	
Zout verspreiding						
Getij	gemiddeld	normaal	forse getijopzet waarbij de vloedstroom richting Haringvliet langer dan één getijperiode aanhoudt	normaal	normaal	
Rivierafvoer	gemiddeld	laag	normaal/laag	laag	extreem laag	
Periode	jaarrond	jaarrond	najaar/ winter	najaar/ winter	zomer/ najaar	
Verzilting Noordrand	0	+	++	0	+	
Verzilting Zuidrand	0	0	++	++	+	
Duur	1 getij	weken - maanden	2 getijden	weken - maanden	weken - maanden	
Frequentie	Groot deel van het jaar	Jaarlijks	Eens in de 5 jaar	Eens in de 10 jaar	Eens in de 3 jaar	

Figuur 10 Vier verschillende situaties van verzilting van de Rijn-Maasmonding (bron: Rijkswaterstaat, 2019b)

In de Nieuwe Waterweg is een zouttong aanwezig, die ontstaat door dichtheidsverschillen tussen het zoute water dat vanuit zee binnenstroomt en het zoete water dat vanuit de rivieren wordt aangevoerd. De zout-zoet dynamiek is afhankelijk van de getijomstandigheden en de hoogte van de rivierafvoeren. Bij een gemiddelde Rijnafvoer én gemiddelde getijomstandigheden op zee reikt de zouttong ongeveer tot de Willemsbrug in Rotterdam (Bijlsma, 2011). Als het water op zee hoog staat en de Rijn tegelijkertijd weinig water heeft af te voeren kan de zouttong verder landwaarts reiken (Arcadis, 2015).



Figuur 11 Schematische weergave van de gelaagdheid van de stroming in een estuarium (bron onbekend).

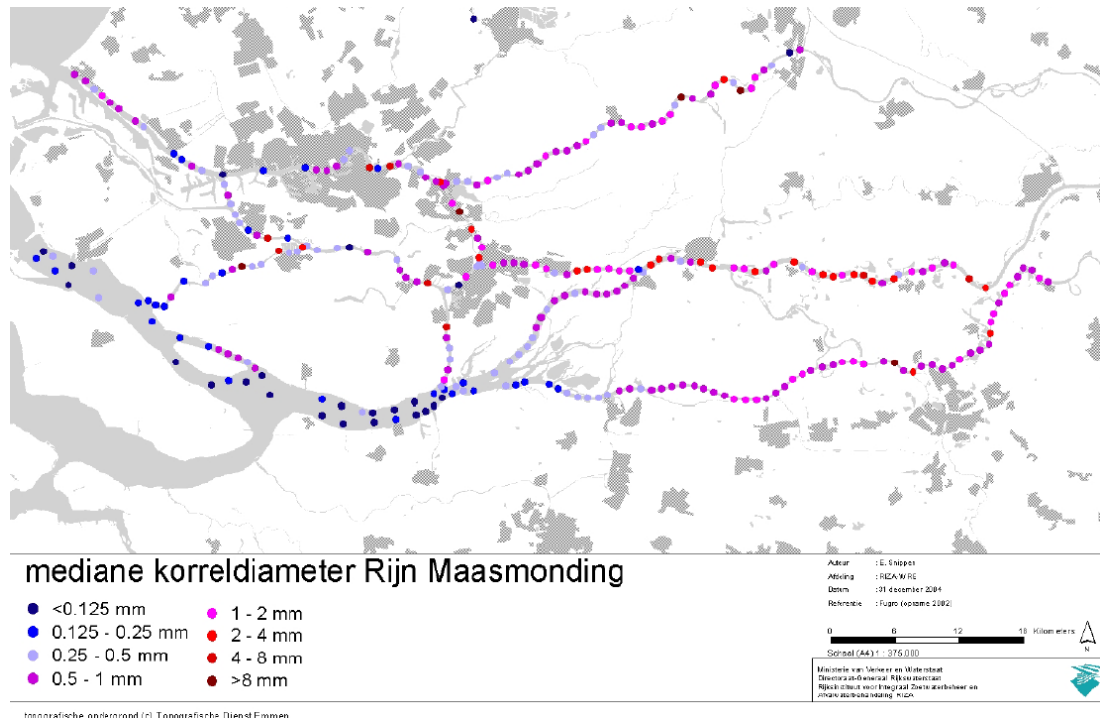
Sinds het Kierbesluit in 2019 worden de Haringvlietsluizen bij vloed vaak op een kier gezet, voor vismigratie, als de waterstand in het Haringvliet lager is dan op zee. Daardoor stroomt er sindsdien incidenteel zout water het Haringvliet binnen. Dit heeft een minimale invloed op de waterbeweging maar zorgt wel voor een aanbod van zout water in het westelijk deel van het Haringvliet. Niet al het zout kan worden verwijderd door spuien tijdens eb, omdat een deel achterblijft in een aantal diepe kuilen.

## 5.6 Bodem

### 5.6.1 Sedimentsamenstelling toplaag

Arcadis (2015) heeft de bronnen van informatie over de sedimentsamenstelling in de Rijn-Maasmonding geïnventariseerd. Dit betreft monsternames met een "valbom" en sonderingen en boringen (tot aan de nieuwe diepte na verdieping van de Nieuwe Waterweg).

Een gebiedsdekkende analyse van de sedimentsamenstelling in de toplaag is in 2002 uitgevoerd door Fugro (Fugro, 2002). Figuur 12 laat de mediane korreldekmeter zien. Daaruit blijkt dat het sediment in de toplaag van boven- naar benedenstrooms fijner wordt en het fijnste materiaal voorkomt in het Hollandsch Diep en Haringvliet (Arcadis, 2015).



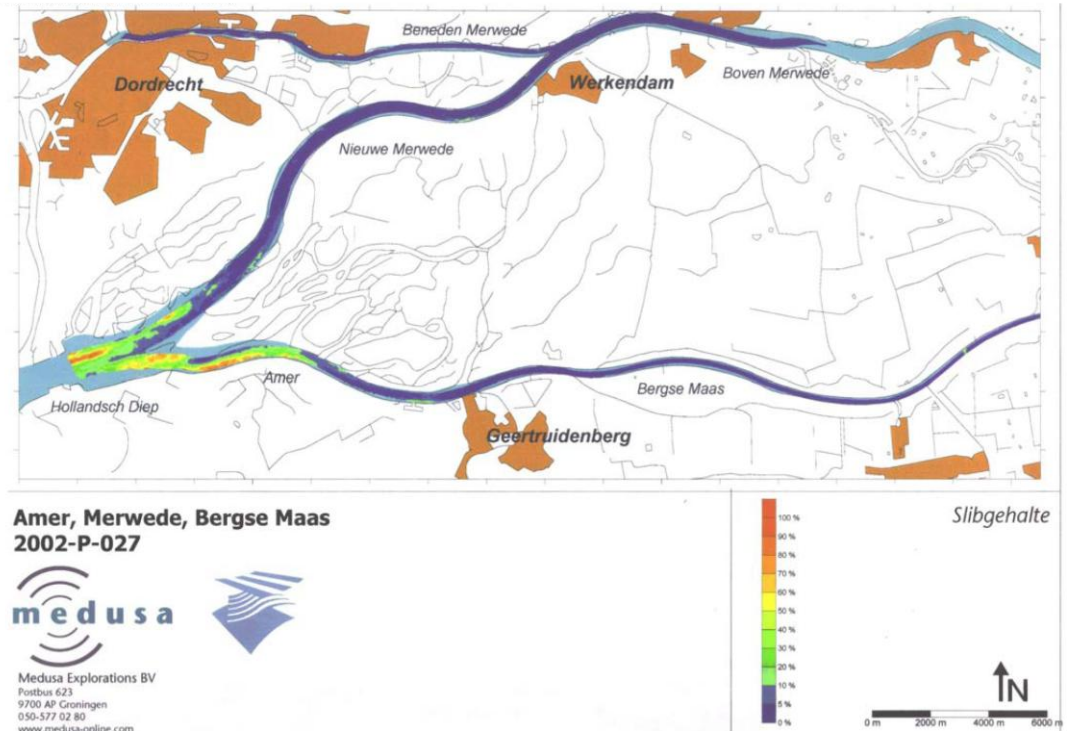
Figuur 12 Mediane korreldekmeter  $D_{50}$  Rijn-Maasmondung zoals bepaald door Fugro (2002).

## 5.6.2 Slibgehalte

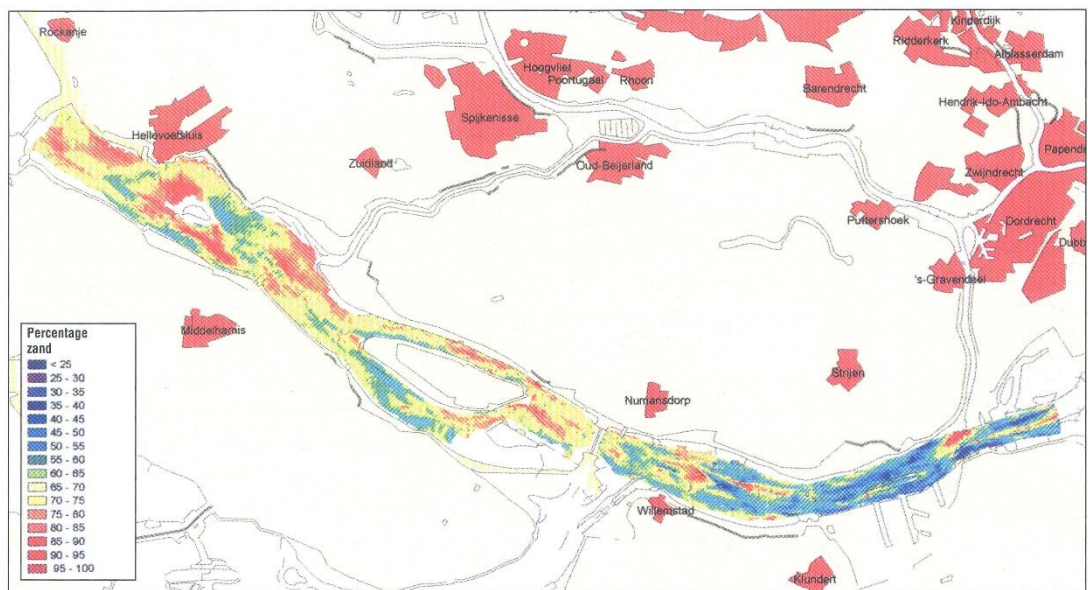
In de Rijn-Maasmondung bestaat de bodem uit zand in de snel stromende delen (zoals de vaargeul, Maasmond) en uit slib in zwak stromende of stilstaande delen (zoals het Haringvliet, de havens en getijdekreeken). Bij het einde van de Nieuwe Merwede is een overgang van zand- naar slibbodem te zien (Figuur 13). Het slibaandeel is het grootst in het zwak stromende Haringvliet (Figuur 14). Op de Nieuwe Waterweg zijn, veroorzaakt door de complexe dynamiek met getij, rivierafvoeren en zout ter plekke, hogere slibaandelen te vinden tussen km 1005 en 1015 (Figuur 15). Dit heeft te maken met het turbiditeitsmaximum (hoge slibconcentratie) die zich ontwikkelt bij de kop van de zouttong.

Een deel van het slib in de bodem is verontreinigd, en dat heeft vooral te maken met oude slibafzetting (met name in de jaren 70, 80). Inmiddels is het aanbod van bovenstrooms en uit zee schoner.

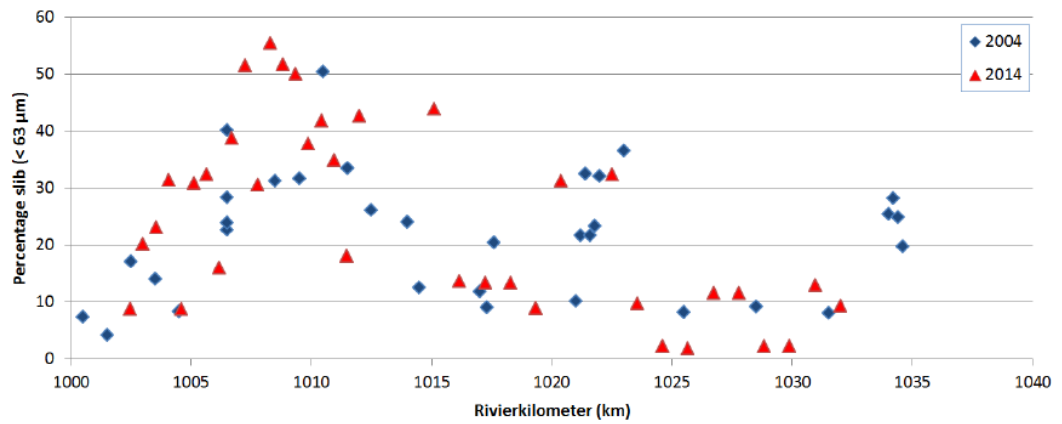




Figuur 13 Slibgehalten in de toplaag van de waterbodem (MEDUSA, 2003).



Figuur 14 Zand-slibgehalte in het Hollandsch Diep en Haringvliet (RIZA, 2000).



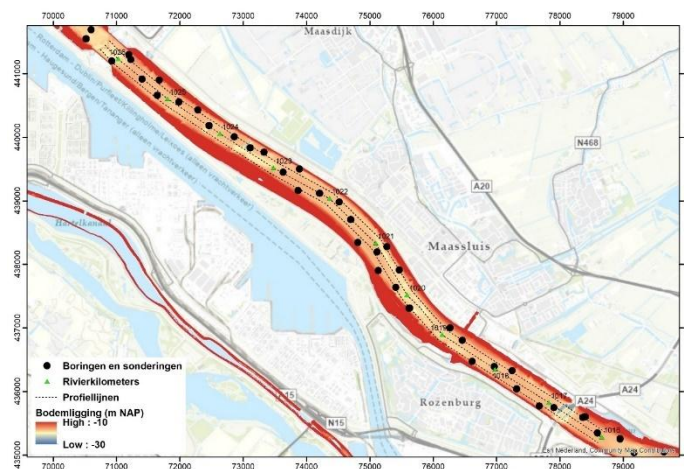
Figuur 15 Percentage slib in bodemonsters genomen langs de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas in 2004 (Wensveen, 2004) en 2014 (Van Bruchem & Goosens, 2015a+b) .

### 5.6.3 Samenstelling ondergrond

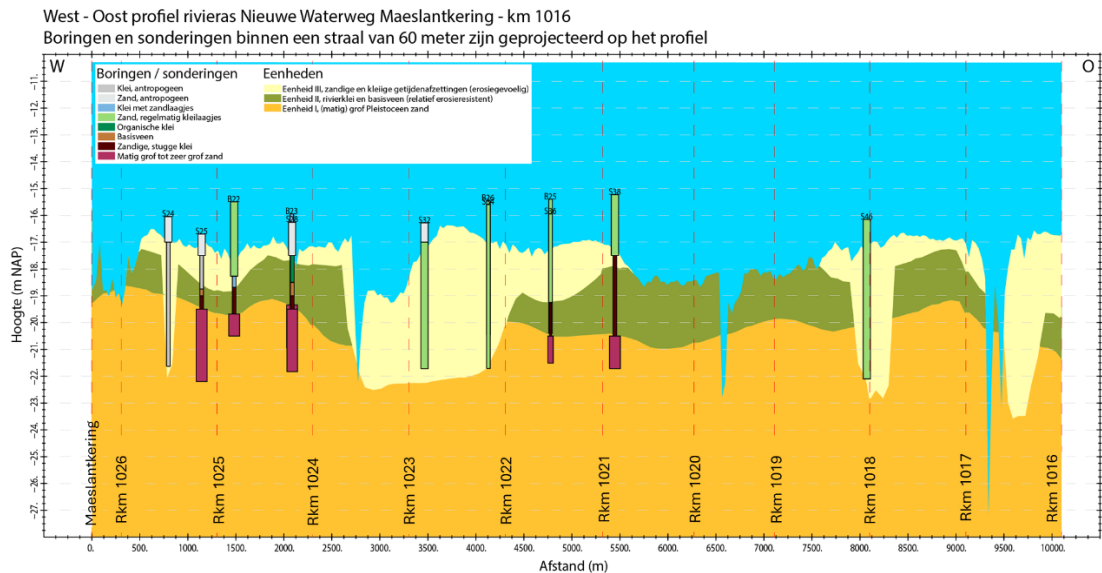
De Rijn-Maasmonding heeft een heterogene ondergrond met onder andere veel veen- en kleilagen. De klei- en veenlagen zijn slecht erodeerbaar, terwijl zandlagen wel makkelijk erodeerbaar zijn. Op veel plaatsen zijn door het blootliggen van deze zandafzettingen diepe erosiekuilen ontstaan. Soms zijn deze meer dan 10 m dieper ten opzichte van aanliggende (slecht-erodeerbare) trajecten. Op andere locaties is sprake van een geringe klei/veenafdekking op een zandpakket, en kan in de toekomst bij verdere erosie alsnog het zand worden aangesneden (Huisman et al., 2021, Sloff et al., 2013).

Beschrijving en kartering van type en sterkte van de ondergrond zijn onder andere beschreven door Stouthamer en de Haas (2011), Wiersma (2015) en Wiersma en Hijma (2015).

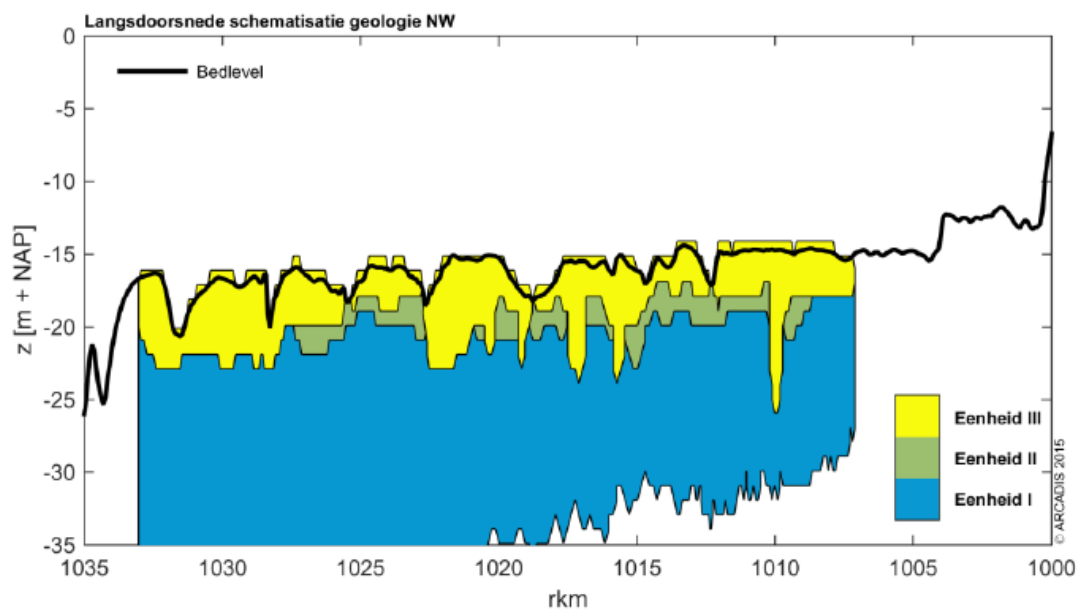
Figuur 16 toont de locaties van de ondergrond-profielen die gemaakt zijn tussen km 1016 en 1028,5, Figuur 17 laat het conceptuele model zien dat daaruit is opgebouwd, en Figuur 18 toont een geologisch profiel langs de as van de rivier. Eenheid III vormt de huidige waterbodem en is daarmee belangrijk voor de huidige morfologie en morfodynamiek. Eenheid II bestaat uit geconsolideerde klei en veenpakketten die moeilijk erodeerbaar zijn. Daarmee vormt Eenheid II in principe de ondergrens voor de morfologische ontwikkeling op plekken waar erosie plaats vindt, maar is op sommige locaties ook afwezig (Arcadis, 2015). Op die locaties is dus verdergaande erosie mogelijk.



Figuur 16 Locatie van ondergrondprofielen tussen km 1016 en 1028.5 (Wiersma & Hijma, 2015).



Figuur 17 Ondergrondkartering voor het Scheur tussen Rkm 1016 – 1026.3 (Kranenburg et al., 2024), actualisatie (bodempligging 2018) van de ondergrondkartering van Wiersma & Hijma (2015).



Figuur 18 Geologisch model van de Nieuwe Waterweg (bron: Arcadis, 2015).

#### 5.6.4 Trajecten met antropogene ingrepen

Als voorbeeld van antropogene ingrepen is in Figuur 19 een overzicht van de verschillende technieken voor de aanleg van de trapjeslijn in de Nieuwe Maas, het Scheur en de Nieuwe Waterweg. Langs andere takken zijn ook sporen van menselijke ingrepen te vinden, zoals bijvoorbeeld de aanleg van scheepvaartgeulen, oeverbescherming en harde lagen, enzovoort.



Figuur 19

## 5.7 Sedimenttransport en bodemdynamiek

### 5.7.1 Sedimenttransport

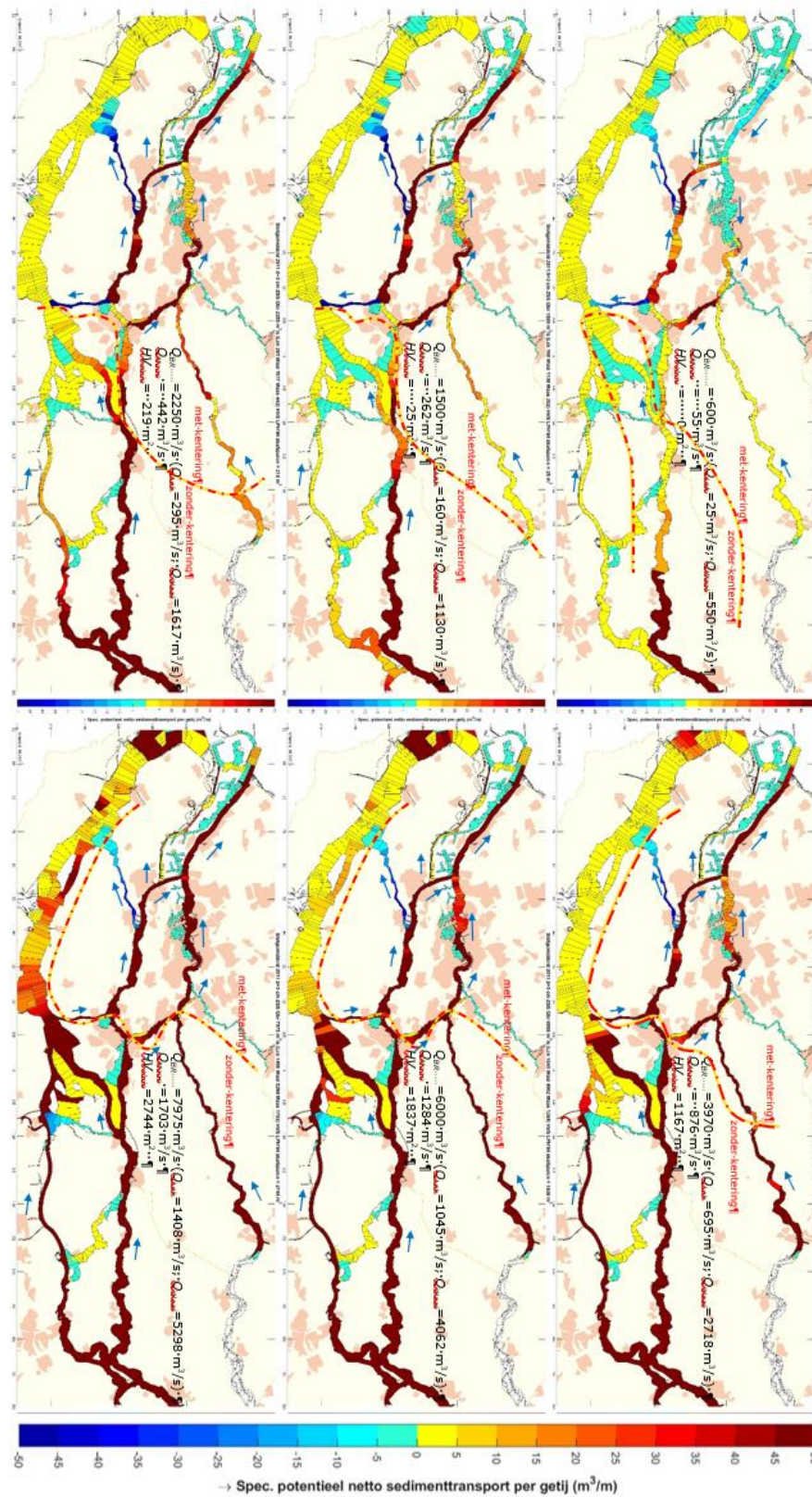
In de Rijn-Maasmonding wordt sediment aangevoerd vanuit de rivieren (vooral naar de oostelijke en zuidelijke delen) en vanuit zee (vooral de noordrand, bijvoorbeeld de Nieuwe Waterweg). Rijkswaterstaat (2024a) heeft, met behulp van berekeningen met het in paragraaf 5.5.1 beschreven hydraulisch 1D-model, het potentiële sedimenttransport over de verschillende takken ingeschat, waarbij vanwege de aard van het model de invloed van de gelaagdheid (5.5.3) niet meegenomen kon worden. Figuur 20 laat de indicatie van het netto potentiële sedimenttransport over één getijdencyclus bij verschillende rivierafvoeren zien. De figuren van de indicatie van het potentiële sedimenttransport zeewaarts en landinwaarts alsmede een analyse van de rekenresultaten staat in Rijkswaterstaat (2024a). Het potentiële netto getijgemiddelde transport (Rijkswaterstaat, 2024a) laat zien dat de import van sediment vanuit zee beperkt lijkt tot het gebied bij de monding van de Nieuwe Waterweg.

Door de asymmetrie van het getij (paragraaf 5.5.1) zijn de stroomsnelheden bij vloed hoger dan bij eb. Vanwege de niet-lineaire afhankelijkheid van het sedimenttransport van de stroomsnelheid resulteert dit in een netto transport landinwaarts vanuit zee. Het is echter nog niet voldoende onderzocht tot hoe ver dit materiaal het RMM-gebied binnen komt, en hoe dit wordt beïnvloedt door de complexe interactie tussen stroming, zout en sediment en de duur van eb en vloed.

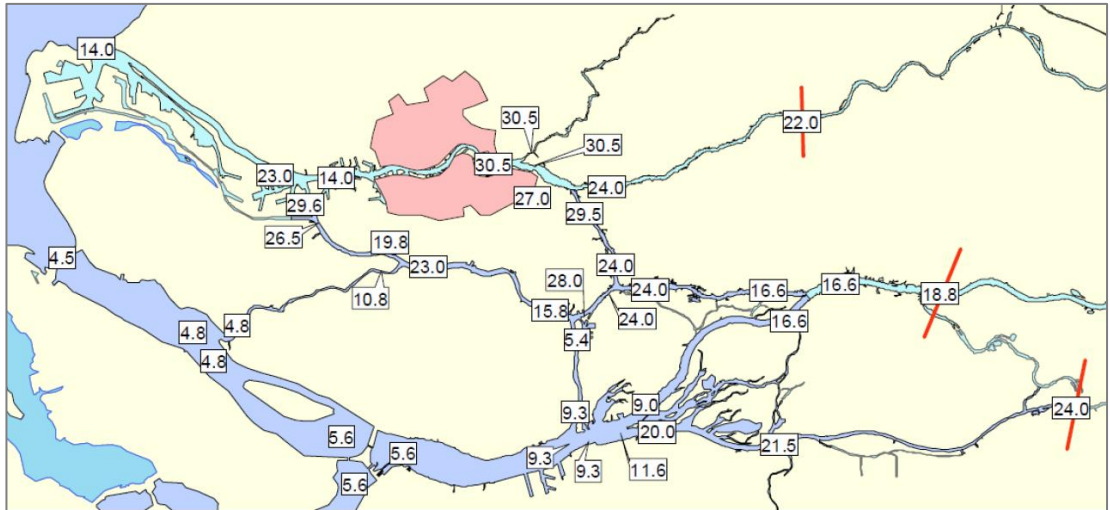
In de sedimentbalansen van Snippen et al. (1995), Van Dreumel (1995), Becker (2015) en Frings et al. (2019) wordt een netto import van marien sediment, zowel fijn sediment (silt <math><0,063 \mu\text{m}</math>) als zand beschreven. Zand dat vanuit zee de Nieuwe Waterweg binnenkomt wordt vermoedelijk grotendeels snel weer gebaggerd om de vaargeul op diepte te houden. De invloed op de rest van het systeem is in dat geval klein.



Arcadis (2015) geven een overzicht van metingen van zwevend stof in de Rijn-Maasmonding. Uit onderzoek van Meijers & Icke (2006) blijkt dat de zwevend stof concentraties in het RMM-gebied sterk afhankelijk zijn van de rivierafvoeren (zie hiervoor Figuur 21).



Figuur 20 Indicatie netto potentieel sediment transport (positief zeewaarts) excl. bijdrage gelaagdheid, [ $m^3$ ] per [ $m$ ] rivierbreedte bij gemiddeld getij en variërende afvoer (1D hydraulisch model).



Figuur 21 Dieptegemiddelde concentraties zwevend stof in de Rijn-Maasmondung (Snippen et al., 2005).

### 5.7.2 Lange-termijn ontwikkeling bodemligging

Tabel 8 toont een overzicht van verschillende eigenschappen van de vaargeulen in de RMM. Voor deze vaargeulen zijn in Tabel 9 de gemiddelde bodemligging voor verschillende jaren getoond. In Tabel 10 staat het verschil van de gemiddelde bodemligging met de vroegste gemiddelde bodem uit Tabel 9.

Voor de Bergsche Maas, de binnenvaartgeul langs de Dordtsche Kil, het Haringvliet, het Hollandsch Diep uitgezonderd de Oversteek en het Wantij, is een netto toename van de gemiddelde bodemligging waargenomen. De gemiddelde bodemligging in de Amer is vrijwel constant in de tijd. Voor de overige vaargeulen is een daling van de gemiddelde bodemligging zichtbaar. Hierin zijn zowel natuurlijke processen, sedimentatie en erosie en onderhoud van de vaarweg meegenomen. Zo is het herstel van de trapjeslijn in de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg goed zichtbaar in de ontwikkeling van de gemiddelde bodemligging.

Tabel 8: Overzicht van geometrische eigenschappen van vaargeulen in de RMM (via Laurens Baars).

Vaargeul	bereik [kmr]	Lengte [km]	Breedte (m)	Opp [ha]
Amer	250-262	12	204	245
Beneden Merwede	961-976	15	185	278
Bergsche Maas	247-250	3	177	53
Boven Merwede	952-961	9	263	237
Dordtsche Kil zeevaart	979-988	9	206	185
Dordtsche Kil binnenvaart	979-989	10	186	186
Haringvliet	100-128	28	289	809
Hollandsch Diep (oversteek)	983-988	5	172	86
Hollandsch Diep ex. Oversteek	978-1000	22	664	1460
Hollandsche IJssel	0-19	19	49	94
Lek	978-989	11	197	217
Nieuwe Maas	989-1012	23	235	540
Nieuwe Merwede	961-979	18	222	399
Nieuwe Waterweg	1012-1035	23	268	616
Noord	976-984	8	189	151
Oude Maas zeevaart	976-1006	30	210	631
Oude Maas binnenvaart	976-980	4	215	86
Spui	995-1010	15	70	105
Wantij	0-7	7	0	0

Tabel 9: Gemiddelde multibeam-bodempeilingen in (m+N.A.P.) in het RMM (via Laurens Baars). Oranje gemarkeerd houdt in dat er onderhoud mogelijk de waarneming heeft beïnvloed. Een cel met een rode rechterbovenhoek is op basis van één meting.

Vaargeul	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Amer		-5.90	-5.91	-5.93		-5.94	-5.95	-5.88	-5.91	-5.95	-5.94	-5.95	-5.92	-5.91		-5.90
Beneden Merwede	-6.46	-6.46	-6.50	-6.52	-6.52	-6.52	-6.52	-6.55	-6.53	-6.60	-6.58	-6.58	-6.61	-6.56	-6.62	-6.52
Bergsche Maas		-5.97	-5.94	-5.95	-6.03	-5.97		-5.90	-5.94	-5.98	-5.94	-5.94	-5.95	-5.93		-5.90
Boven Merwede	-5.89	-5.90	-5.95	-5.96	-5.97	-5.95	-5.95	-5.98	-5.95	-6.00	-5.98	-6.02	-6.01	-6.02	-5.99	-5.95
Dordtsche Kil zeevaart	-11.87	-11.95	-11.96	-11.97	-12.05	-12.04	-12.03	-12.03	-12.09	-12.16	-12.16	-12.19	-12.21	-12.21	-12.22	-12.24
Dordtsche Kil binnenvaart	-10.14	-10.19	-10.10	-9.94	-9.97	-9.91	-9.91	-9.87	-9.95	-10.00	-9.99	-10.01	-10.04	-10.04		
Haringvliet						-11.61						-11.53				
Hollandsch Diep (oversteek)	-9.47	-9.45	-9.39	-9.36	-9.44	-9.37	-9.47	-9.49	-9.42	-9.49	-9.44	-9.45	-9.44	-9.52	-9.56	-9.60
Hollandsch Diep ex. Oversteek		-8.65	-8.65	-8.59		-8.61	-8.55		-8.51	-8.54	-8.48		-8.47			
Hollandsche IJssel	-5.58	-5.58	-5.65	-5.71	-5.77	-5.74	-5.73	-5.71	-5.76	-5.76	-5.78	-5.75	-5.78	-5.77		-5.77
Lek	-6.00	-5.99	-6.04	-6.08	-6.10	-6.09	-6.06	-6.03	-6.08	-6.01	-6.10	-6.10	-6.10	-6.09		-6.07
Nieuwe Maas	-10.90	-10.85	-10.88	-11.01	-11.04	-11.06	-11.05	-11.10	-11.01	-11.25	-11.20	-11.20	-11.24	-11.28		-11.40
Nieuwe Merwede	-5.15	-5.15	-5.22	-5.25	-5.31	-5.27	-5.24	-5.23	-5.30	-5.37	-5.36	-5.38	-5.40	-5.36	-5.39	-5.36
Nieuwe Waterweg	-16.60	-16.60	-16.63	-16.71	-16.77	-16.79	-16.97	-16.86	-16.91	-16.96	-17.17	-17.47	-17.50	-17.59	-17.66	-17.73
Noord	-7.29	-7.23	-7.32	-7.34	-7.35	-7.32	-7.34	-7.31	-7.35		-7.34	-7.43	-7.37	-7.44	-7.42	-7.41
Oude Maas zeevaart	-13.57	-13.58	-13.63	-13.66	-13.73	-13.72	-13.76	-13.76	-13.83	-13.87	-13.78	-13.73	-13.78	-13.80	-13.82	-13.83
Oude Maas binnenvaart	-9.61	-9.62	-9.69	-9.69	-9.74	-9.77	-9.95	-9.73	-9.92	-9.78	-9.83	-9.89	-9.92	-9.94		-9.94
Spui		-9.11			-9.11	-9.11	-9.08	-9.01		-9.05	-9.09	-9.11	-9.18	-9.15	-9.15	-9.17
Wantij				-3.33						-3.16						-3.18

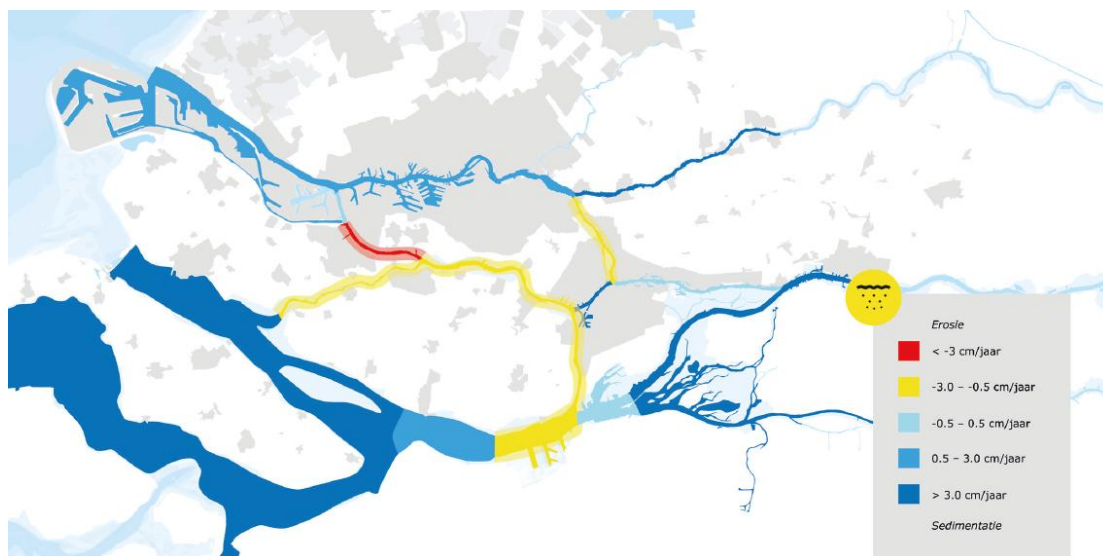
Tabel 10: Bodemverandering ten op zichte van het eerste jaar met een gemiddelde waarde. Een cel met een rode rechterbovenhoek is op basis van één meting. Cellen met een rode kleur duiden op gemiddelde erosie, en cellen met een blauwe kleur duiden op gemiddelde sedimentatie.

Vaargeul	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Amer		0.00	-0.01	-0.02		-0.04	-0.04	0.03	0.00	-0.05	-0.03	-0.05	-0.01	0.00		0.00
Beneden Merwede	0.00	0.00	-0.03	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.09	-0.06	-0.14	-0.12	-0.11	-0.15	-0.10	-0.16	-0.06
Bergsche Maas		0.00	0.03	0.02	-0.06	0.00		0.07	0.03	-0.01	0.04	0.03	0.02	0.04		0.08
Boven Merwede	0.00	0.00	-0.06	-0.07	-0.08	-0.05	-0.06	-0.09	-0.06	-0.11	-0.09	-0.13	-0.12	-0.13	-0.10	-0.06
Dordtsche Kil zeevaart	0.00	-0.08	-0.08	-0.10	-0.17	-0.17	-0.15	-0.16	-0.22	-0.28	-0.29	-0.31	-0.34	-0.33	-0.35	-0.37
Dordtsche Kil binnenvaart	0.00	-0.05	0.04	0.20	0.17	0.23	0.23	0.27	0.19	0.14	0.15	0.13	0.10	0.10		
Haringvliet						0.00						0.08				
Hollandsch Diep (oversteek)	0.00	0.01	0.08	0.11	0.03	0.10	0.00	-0.02	0.04	-0.03	0.03	0.02	0.02	-0.05	-0.10	-0.13
Hollandsch Diep ex. Oversteek		0.00	0.00	0.06		0.03	0.09		0.13	0.10	0.17		0.17			
Hollandsche IJssel	0.00	0.00	-0.07	-0.13	-0.19	-0.16	-0.15	-0.13	-0.18	-0.18	-0.20	-0.17	-0.20	-0.19		-0.19
Lek	0.00	0.01	-0.05	-0.08	-0.10	-0.10	-0.06	-0.03	-0.08	-0.01	-0.11	-0.10	-0.10	-0.09		-0.08
Nieuwe Maas	0.00	0.05	0.03	-0.11	-0.13	-0.16	-0.15	-0.19	-0.11	-0.34	-0.30	-0.30	-0.34	-0.38		-0.50
Nieuwe Merwede	0.00	0.00	-0.07	-0.10	-0.16	-0.13	-0.10	-0.09	-0.16	-0.23	-0.21	-0.24	-0.25	-0.22	-0.25	-0.21
Nieuwe Waterweg	0.00	0.00	-0.03	-0.11	-0.17	-0.19	-0.37	-0.26	-0.31	-0.36	-0.57	-0.87	-0.90	-0.99	-1.06	-1.13
Noord	0.00	0.06	-0.03	-0.05	-0.07	-0.03	-0.05	-0.02	-0.06		-0.05	-0.15	-0.08	-0.15	-0.13	-0.12
Oude Maas zeevaart	0.00	-0.01	-0.06	-0.09	-0.16	-0.15	-0.19	-0.19	-0.26	-0.30	-0.21	-0.16	-0.21	-0.23	-0.25	-0.26
Oude Maas binnenvaart	0.00	-0.01	-0.08	-0.08	-0.13	-0.16	-0.34	-0.12	-0.31	-0.17	-0.22	-0.28	-0.31	-0.33		-0.33
Spui		0.00		0.00	-0.01	-0.06	0.03	0.10	0.08	0.06	0.02	-0.01	-0.07	-0.05	-0.04	-0.07
Wantij				0.00						0.17						0.15

Om het onderhoud uit de bodemtrends te halen heeft Rijkswaterstaat (2019b) een overzicht gemaakt van de natuurlijke lange-termijn trend van de bodemligging in de Rijn-Maasmonding (zie Figuur 22), d.w.z. exclusief baggerwerk. 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. Waar vroeger het getij via de monding van Haringvliet en Nieuw Waterweg naar binnen en buiten stroomde, moet het nu de weg vanuit de Nieuwe Waterweg afleggen. Daardoor stroomt er veel meer water door de tussentakken en is de stroomsnelheid juist toegenomen, waardoor er erosie optreedt (Spui, Oude Maas, Dordtsche Kil, Noord) (Rijkswaterstaat, 2019b). Op de Oude Maas speelt daarnaast terugschrijdende erosie veroorzaakt door de verdieping van de Nieuwe Waterweg een rol. De Boven Merwede, Beneden Merwede en Nieuwe Merwede laten natuurlijkerwijs een trend tot sedimentatie zien, echter wordt dat sediment gebaggerd, zodat de bodemligging netto gezien redelijk stabiel blijft. Hetzelfde geldt voor de Bergsche Maas en Amer, Lek, Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg.

Verassend is wel de natuurlijke trend in de Oversteek (in Figuur 22), aangezien dit een bekende locatie is voor sedimentatie. Mogelijk is door het samenvoegen van verschillende deelgebieden in de figuur de trend juist omgekeerd, ten opzichte van de trend in de Oversteek.





Figuur 22 Natuurlijke lange-termijn trend bodemontwikkeling exclusief baggerwerk in de Rijn-Maasmondung (overgenomen uit Rijkswaterstaat (2019b)).

### 5.7.3 Aanwezigheid en ontwikkeling erosiekuilen

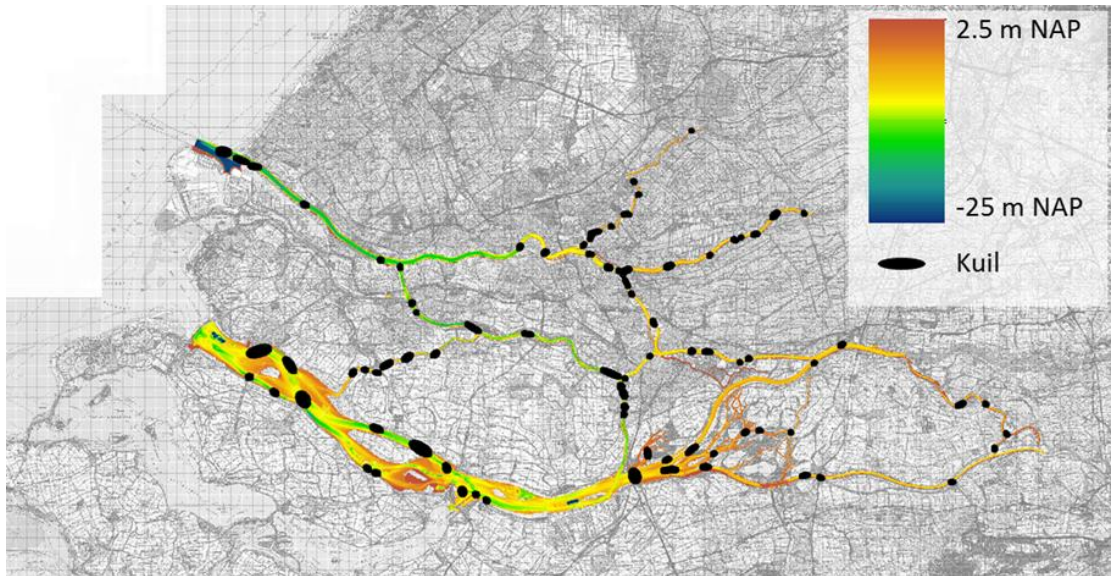
In de Rijn-Maasmondung liggen ruim 100 erosiekuilen (Figuur 23). Figuur 24 en Figuur 25 tonen enkele voorbeelden van kuilen. De kuilen vormen een risico voor stabiliteit van de constructies, oevers en waterkeringen.

Koopmans (2017) heeft de erosiekuilen in de Rijn-Maasmondung geclassificeerd naar de oorzaak voor hun ontstaan (Figuur 25). Als oorzaak kan onderscheid worden gemaakt tussen de lokale geometrie (bijvoorbeeld bochten, versmallingen, samenvloeiingen), harde constructies zoals kribben en brugpijlers en de geologie (het aansnijden van makkelijk erodeerbare lagen in de ondergrond), of een combinatie daarvan.

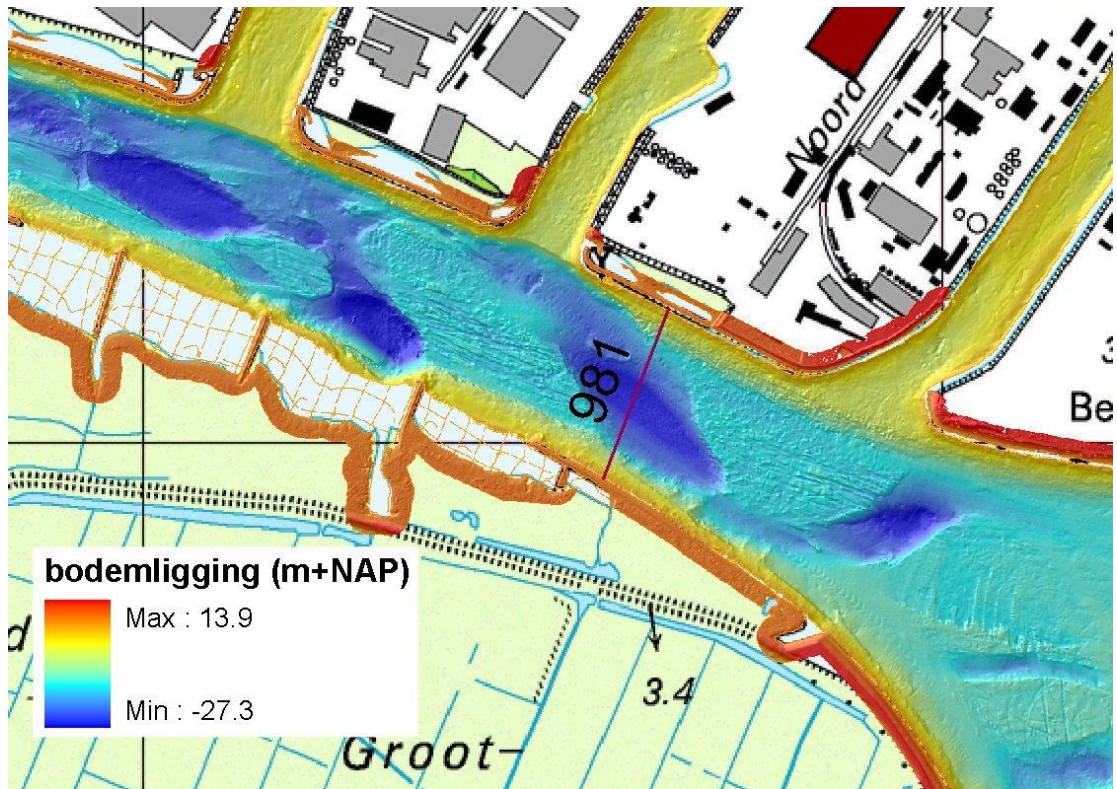
De groei van de kuilen in diepte en oppervlak is heel divers, omdat de geologische compositie van de ondergrond en lokale hydrodynamische condities sterk verschillen (Koopmans, 2017). De sterkste groei is te zien bij de kuilen veroorzaakt door (onder andere) de geologie. De groei van kuilen wordt veroorzaakt door een combinatie van hydraulische belasting en geotechnisch falen (onderspoelde kuilranden storten in). De hydraulische belasting wordt veroorzaakt door een complex, driedimensionaal stromingspatroon door de kuil.

In kuilen die groeien komt zand vrij. De hoeveelheid kan dusdanig groot worden dat dit de bodemligging benedenstrooms beïnvloedt.

De meeste kuilen bestonden al voor het sluiten van het Haringvliet in 1970 en zijn sindsdien sterk ontwikkeld. Velen daarvan zijn inmiddels in een “stabele” fase beland. Er ontstaan echter nog steeds nieuwe kuilen. De kans op het ontstaan van nieuwe kuilen is het grootst op locaties waar de bodemligging een eroderende trend vertoont (paragraaf 5.7.2) en zich onder een veen of kleilaag een zandpakket bevindt. Dit is ofwel op een locatie waar een oude rivierloop (zandbaan) de huidige ligging van de rivier kruist (Cohen en Stouthamer, 2012), ofwel waar de laag van Wijchen – de kleilaag die het Pleistocene zand afdekt – dun is (Huismans & van Duin, 2016).

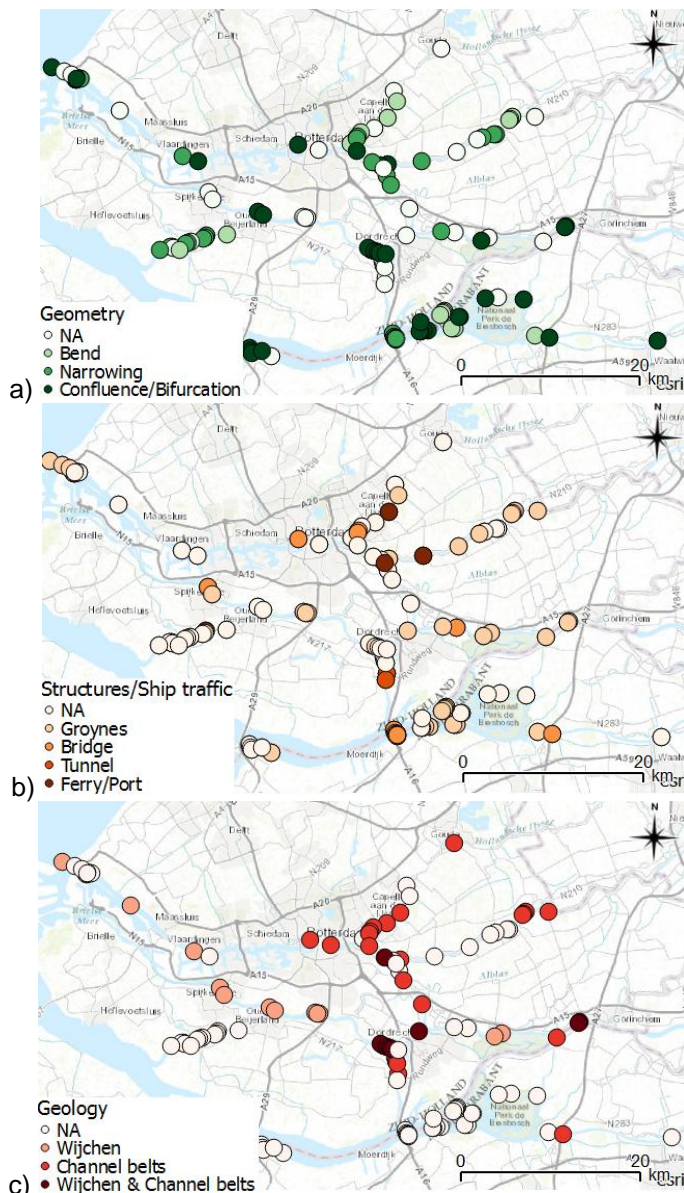


Figuur 23 Kuilen in de bodem van de Rijn-Maasmond (bron: Huismans & van Duin, 2016).



Figuur 24 Voorbeelden van erosiekuilen in het Spui (bron: Sloff et al. 2011).





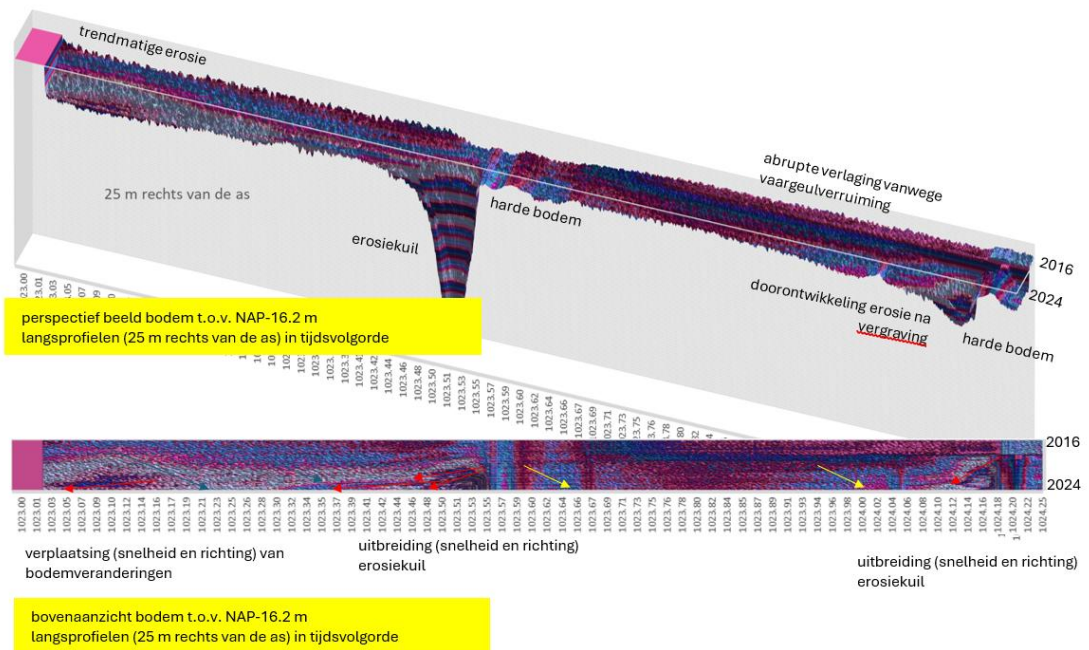
Figuur 25 Classificatie van de erosiekuilen in de Rijn-Maasmondung naar a) geometrie b) kunstwerken en c) geologie (bron: Koopmans, 2017).

Koopmans (2017) (zie Figuur 25) schrijft dat de meeste erosiekuilen te koppelen zijn aan de lokale geometrie, kunstwerken of scheepvaart. Verder valt op dat de erosiekuilen bij voormalige riviergeulen meestal in het oostelijke deel van de Rijnmaasmondung liggen. De erosiekuilen die tot onder de laag van Wijchen reiken zijn vooral aanwezig in de Oude Maas en de Nieuwe Waterweg.

#### 5.7.4 Kleinschalige ontwikkelingen

Rijkswaterstaat (2024b) heeft een detail studie gedaan naar de kleinschalige ontwikkeling in de Nieuwe Waterweg tussen rkm 1023 en 1032. Deze analyse heeft verschillende langs verschillende raaien -100 m tot 100 m de bodemontwikkeling bekeken. Op de grafieken zijn met name kleinschalige details van de morfologie zichtbaar. Een voorbeeld is te zien in Figuur 26 waarin meerdere ingrepen en morfologische trends zichtbaar zijn. Van bovenstrooms naar benedenstrooms is te zien dat er erosie plaatsvindt tussen 1023 en 1023.4. De erosiekuil bij 1023.5 vertoont terugschrijdende erosie. Mogelijk heeft dit te maken met de harde laag net benedenstrooms.

Verder is te zien hoe de bodem reageert op de vaargeulverruiming in 2018. Er lijkt door het afgraven een doorontwikkeling van de bodemerosie te zijn tot 1024.1 waar weer een erosiebestendige laag zichtbaar is.



Figuur 26 Bodemontwikkeling middels een perspectief en x-t diagram tussen rkm 1023 (links) en 1024 (rechts) (overgenomen uit Rijkswaterstaat (2024b))

Rijkswaterstaat (2024b) concludeert uiteindelijk voor kleinschalige bodemvormen (orde 5 m lengte) en deze aanpak van de visualisatie:

- met kleine amplitude, lage verplaatsingsnelheden en beperkte demping (dus goed door de jaren te volgen).
- amplituden en verplaatsingsnelheden op veel plekken met verdieping niet veranderd door de verdieping.
- meeste bodemvormen linkerhelft van het profiel.
- rivierwaarts verplaatsend; alleen zeewaarts van grofweg km 1030 (soms gelijktijdig met zeewaarts verplaatsende bodemvormen).
- zeewaarts verplaatsend; op alle trajecten
- afwezig of plaatsvast op trajecten met duidelijk hardere lagen.
- met scherp onderscheid tussen patronen in stroomluw en stroomvoerende zones (geulranden, kribvakken)

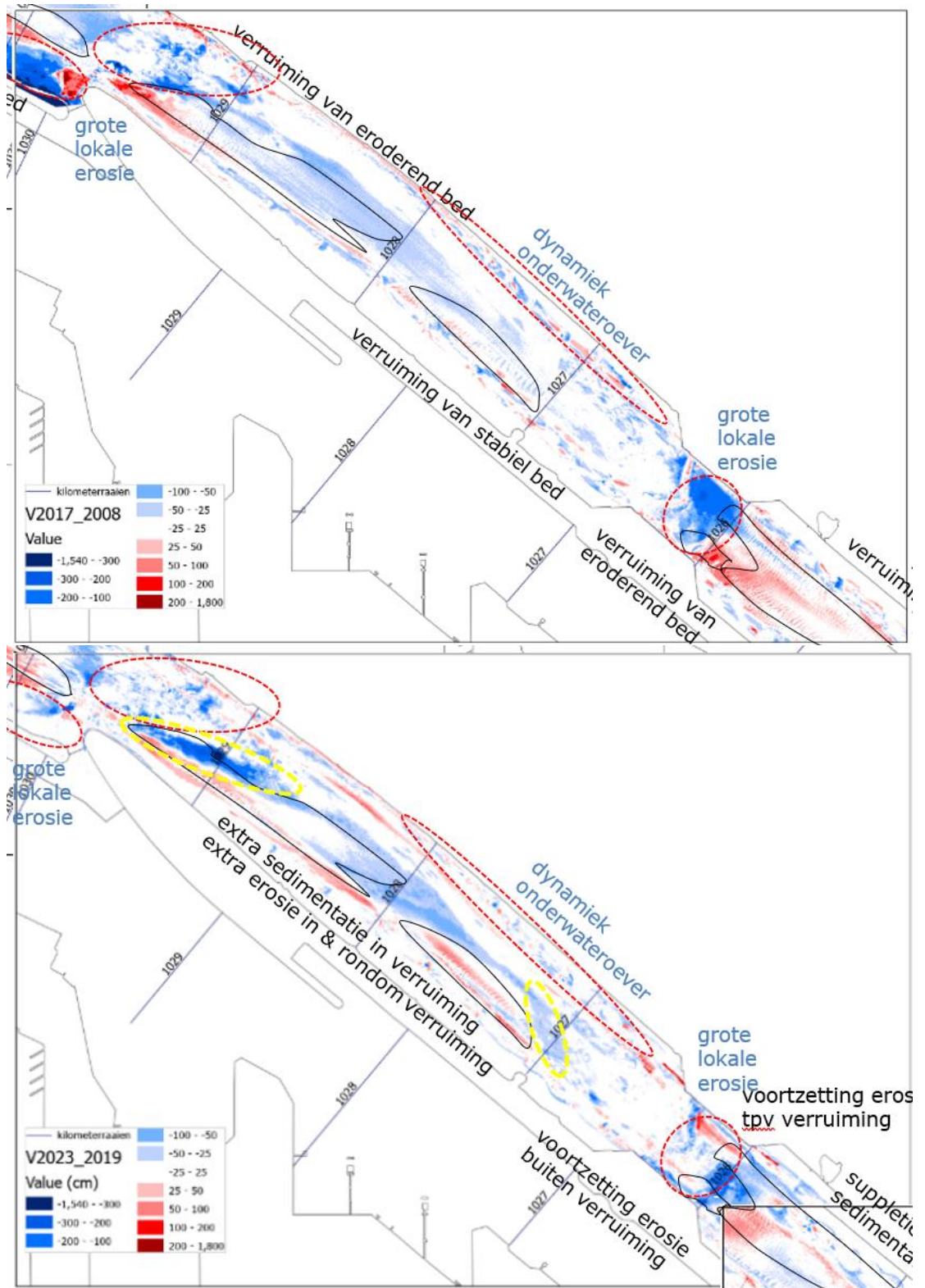
Daarnaast is de conclusie dat deze grafieken ook de mogelijkheid geven tot het volgen van grootschalige bodempatronen (of erosie en sedimentatie):

- zowel rivier- als zeewaartse verplaatsend (of uitbreidend)
- clusters/perioden (aantal aaneengesloten jaren) van kleinschaliger bodemvormen
- met dynamiek met component in breedte-richting
- in de vorm van kuilen bij randen harde lagen
- plaatsvast bij hardere bodem

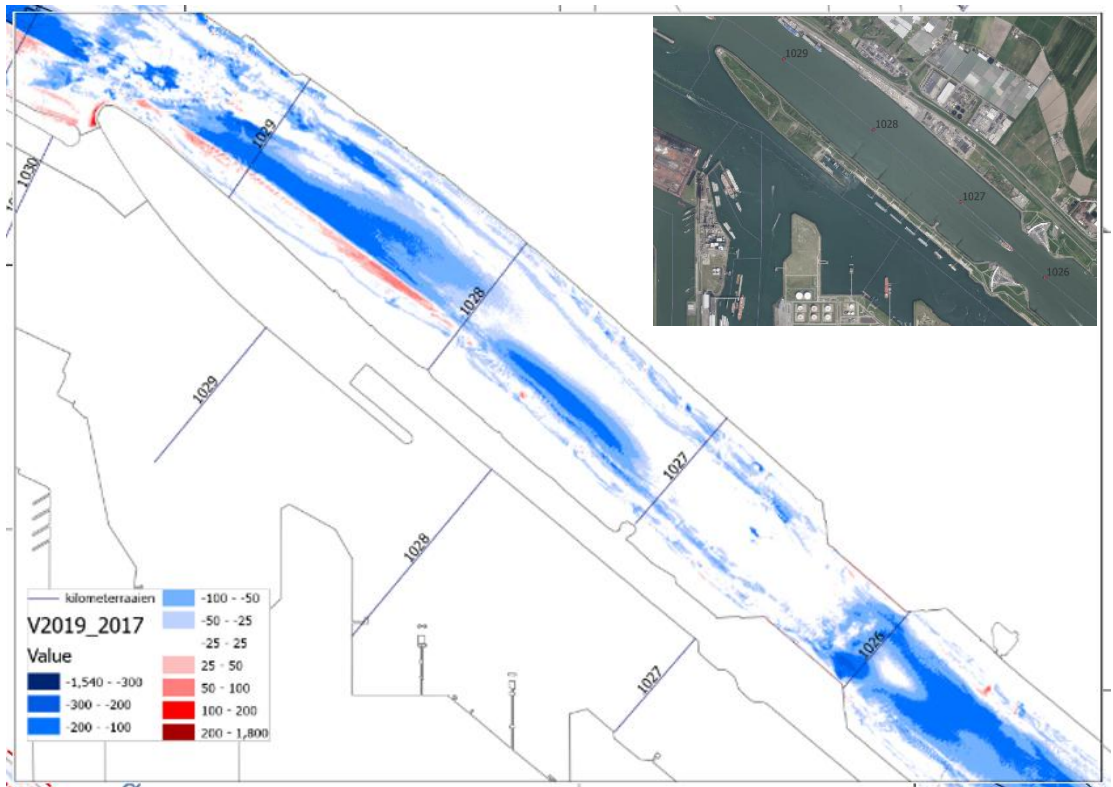
### 5.7.5 Respons afgravingen

Zoals al zichtbaar in Figuur 26, was er een traject waar de vaargeulverruiming in 2018 heeft geleid tot een erosieve trend. In dit hoofdstuk wordt ruimtelijk deze ontwikkeling verder weergegeven. Figuur 27 toont hoe de verruiming van de vaargeul lokaal leidt tot zones met aanvullende erosie. De verruiming zelf is zichtbaar in Figuur 28. In het oostelijke deel van de trapjeslijn, ten oosten van de Maeslantkering en tot de 2<sup>e</sup> Petroleumhaven is nog veel meer verdiept. Het is belangrijk om ook zicht op deze bodemontwikkeling te hebben.





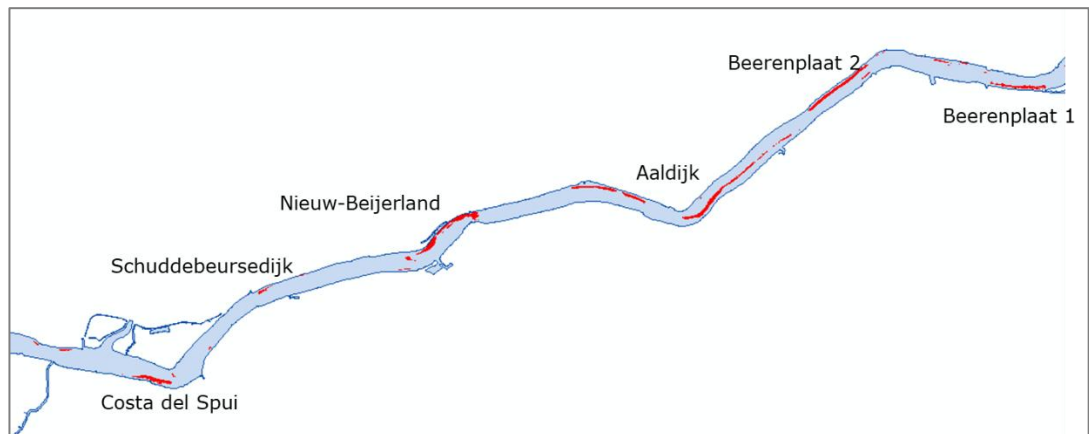
Figuur 27 Bodemontwikkeling voor (boven) en na (onder) vaargeulverruiming in 2018 tussen rkm 1025 en 1030.



Figuur 28 Bodemverschil ten gevolge van de vaargeulverruiming in 2018

### 5.7.6 Respons bestortingen

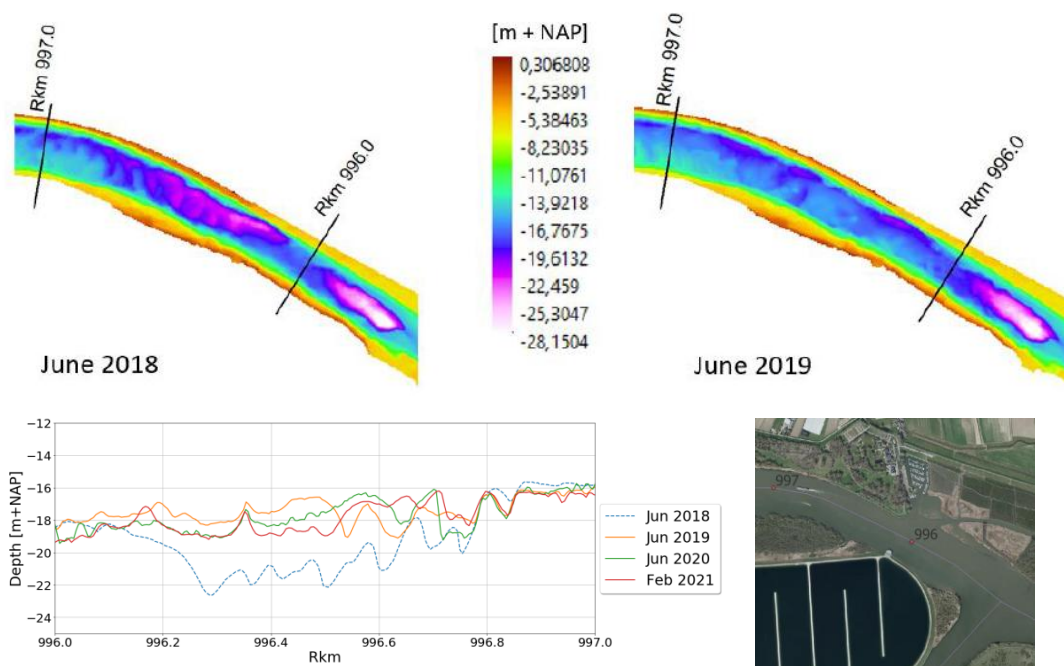
Op het Spui zijn rond en na 2015 op diverse locaties oeverbeschermingen aangebracht in het kader van hoogwaterveiligheid. Deze zijn relatief fors uitgevoerd en vernauwen daardoor het dwarsprofiel. Dat heeft tot plaatselijke erosie van de bedding en de tegenoverliggende oever gevoerd (Sloff, 2022).



Figuur 29 Locaties van de belangrijkste oeverbestortingen aangelegd rond en na 2015 op het Spui en erosiekulen op deze locaties (bron: Sloff, 2022).

### 5.7.7 Respons suppletie

De lokale ontwikkeling van een suppletie in een erosiekuil is te zien in Figuur 30. Te zien is dat ter plaatse van de suppletie de bodem weer deels is verdiept enkele jaren na aanleg. Dit is slechts een voorbeeld van een suppletie, en het gedrag is daarmee niet representatief voor alle takken in het RMM.



Figuur 30 Bodemontwikkeling bij pilotsuppletie in erosiekuil in de Oude Maas (net benedenstrooms van de samenvloeiing met het Spui, overgenomen uit Van Duuren (2022)).

## 5.8 Samenvatting systeembeschrijving

De Rijn-Maasmonding is een complex systeem, vanwege het grote aantal samenvloeiingen en vertakkingen van rivieren en waterwegen (zie Figuur 30). Daarnaast zijn er verschillende sluizen, keringen en stuwen. Het gebied heeft in de historie meerdere veranderingen ondergaan voor waterveiligheid, natuur en scheepvaart.

De waterbeweging kenmerkt zich door de afvoer vanaf de Rijn en Maas, en getijcondities bij Hoek van Holland langs de Nieuwe Waterweg. Afhankelijk van de combinatie van de verschillende condities is het getij verder landinwaarts merkbaar. Voor de stroming geldt ook dat er in meerdere takken de stroomrichting kan variëren. Bij het Haringvliet wordt er bij hogere rivierafvoeren gespuid naar de Noordzee en bij eb wordt er een minimaal debiet doorgelaten ten behoeve van vismigratie.

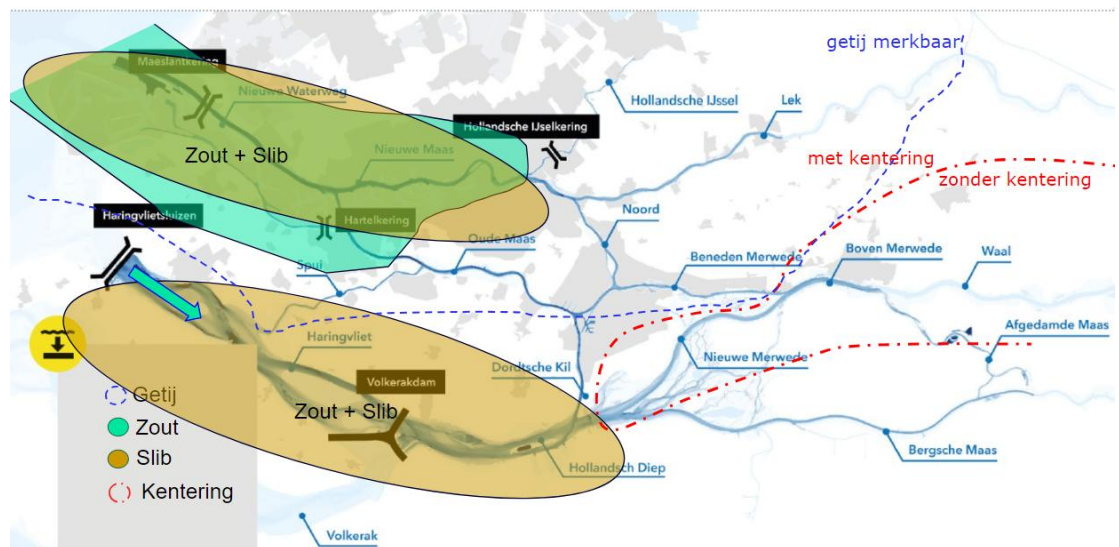
In de Nieuwe Waterweg geldt dat dichtheidsgradiënten in de verticaal vanwege zoutconcentraties belangrijk zijn. Deze gradiënten hebben invloed op de stroming en zijn daarmee ook belangrijk zijn voor het sedimenttransport. Op termijn is mogelijk de invloed van zout in de Haringvliet ook een belangrijk systeemonderdeel.

Voor het sedimenttransport zijn de eigenschappen van de ondergrond van belang. De ondergrond bestaat uit afwisselend zand, klei en slib. Harde lagen in de rivierbodem lijken een grote invloed te hebben op de morfodynamiek. Waar deze lagen zijn afgegraven of geërodeerd ontstaan lokaal diepe kuilen en hierbij komt veel materiaal vrij.

De dynamiek van het sediment transport kan ook worden beïnvloed door de aanwezigheid van slib. Tot een slib/zand verhouding van 30% geldt dat slib en zand afzonderlijk worden getransporteerd, maar daarboven zie je dat het slibrijke materiaal de erosie van zand belemmert. Deze overwegingen gelden met name langs de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas, en bij het Hollands Diep en Haringvliet.

De bodemveranderingen lijken vraag traag te lopen op de Nieuwe Waterweg. De getijgemiddelde bodemtransportrichting is zeewaarts gericht, met uitzondering vanaf rkm 1032 op de Nieuwe Waterweg.

Concluderend is het Rijn-Maasmonding een complex systeem, met interacties tussen meerdere fysische processen (zout / slib / zand / heterogene ondergrond / rivierafvoervariaties / zeespiegelstijging). De mate waarin deze interacties moeten worden meegenomen hangt af van de lengteschaal waarop de vraag gesteld wordt. In het volgende hoofdstuk zal afhankelijk van de verschillende lengte schalen een advies voor een eerst af te leiden model worden geformuleerd.



Figuur 31: Systeemkarakteristiek gebied waar getij, zout slib en kentering belangrijk kunnen zijn.



## 6 Advies

De morfologische behoefte voor het beheer van het netwerk, nu en in de toekomst, omvat vele vragen zoals duidelijk uit Tabel 2. De vragen hebben betrekking op verschillende onderwerpen namelijk sedimentbeheer, hoogwaterveiligheid, natuur, voldoende en schoon water, de vaarweg en beheer en onderhoud (hoofdstuk 3). Elk van de afzonderlijk vragen kunnen ook nog eens variëren met de relevante lengte- en tijdschalen, vaak ingegeven door de verschillende fysische processen die hierbij van belang zijn. Er zijn verschillende analyse-instrumenten beschikbaar, met elk hun specifieke kracht. In *Tabel 3* is een overzicht van de potentiële toepasbaarheid van elk van de methodes gegeven. Voor temporele en ruimtelijke ontwikkeling biedt een numeriek model meerdere voordelen. In Tabel 4 staan afhankelijk van de voor de Rijn-Maasmonding relevante lengte- en tijdschalen verwachtingen omtrent de meerwaarde van een numerieke model.

Afhankelijk van de vraag, is het wel of niet van belang om specifieke processen mee te nemen in de modelering. In dit hoofdstuk worden de inzichten in de werking van het systeem gebruikt om te toetsen welke meerwaarde een numeriek morfologisch model kan bieden ten opzichte van de *verwachte* meerwaarde uit Tabel 4, waarbij er ook rekening mee wordt gehouden dat de verhouding tussen inspanning en meerwaarde acceptabel blijft. Dit wordt per lengteschaal beschreven in paragrafen 6.1 tot en met 6.4. Paragraaf 6.5 vat dit advies samen.

### 6.1 Schaalniveau: hele takken

Op dit schaalniveau gaat het met name over de langjarige trends in de bodemontwikkeling van hele takken, en hoe deze worden beïnvloed door veranderingen in het systeem, zoals grote ingrepen (bijvoorbeeld aanleg van de Maasvlakte 2) of “autonome ontwikkelingen” zoals zeespiegelstijging en klimaatverandering. Ook het bepalen van een strategie voor sedimentmanagement in het gebied valt onder dit schaalniveau.

Normaalgesproken kunnen dat soort vragen worden beantwoord met 1D-modellen (zie verwachting in Tabel 4). In een 1D morfologisch model moet echter de verdeling van sediment over splitsingspunten worden opgegeven door de gebruiker. Dit is alleen mogelijk als deze verdeling (of de invloed van de verdeling op de bodemligging) bekend is, dus het kan alleen voor een bekende en bemeeten situatie. Een 1D-model verliest zijn voorspellende waarde als veranderingen in het systeem moeten worden berekend die de verdeling sterk beïnvloeden. In feite geldt dit deels zelfs al voor de verdeling van afvoer over splitsingspunten. Die verdeling moet weliswaar niet worden opgegeven door de gebruiker, maar een 1D-model kan deze minder betrouwbaar berekenen dan een 2DH- of 3D-model, omdat de geometrie van het splitsingspunt met veel minder detail geschematiseerd wordt. Daarom wordt de afvoerverdeling in het 1D-Rijntakkenmodel na elke grotere actualisatie opnieuw gekalibreerd aan de hand van resultaten uit het 2D-model.

In de Rijn-Maasmonding is de verdeling van afvoer en sediment bepalend voor het lange-termijn gedrag van het hele systeem, en alle grotere ingrepen en autonome ontwikkelingen zullen deze verdeling beïnvloeden. Daarmee is een 1D morfologisch model van dit systeem niet geschikt voor het beoordelen van de invloed van ingrepen of autonome ontwikkelingen.

In de berekeningen moet de stroming onder invloed van getij, rivierstroming en spuiregime worden gesimuleerd.



Dat betekent dat hydrodynamica in ieder geval een niet-stationaire component zal bevatten, waarbij ook de ruimtelijke variaties (bijv. eb- en vloedgeulen) kunnen worden voorspeld.

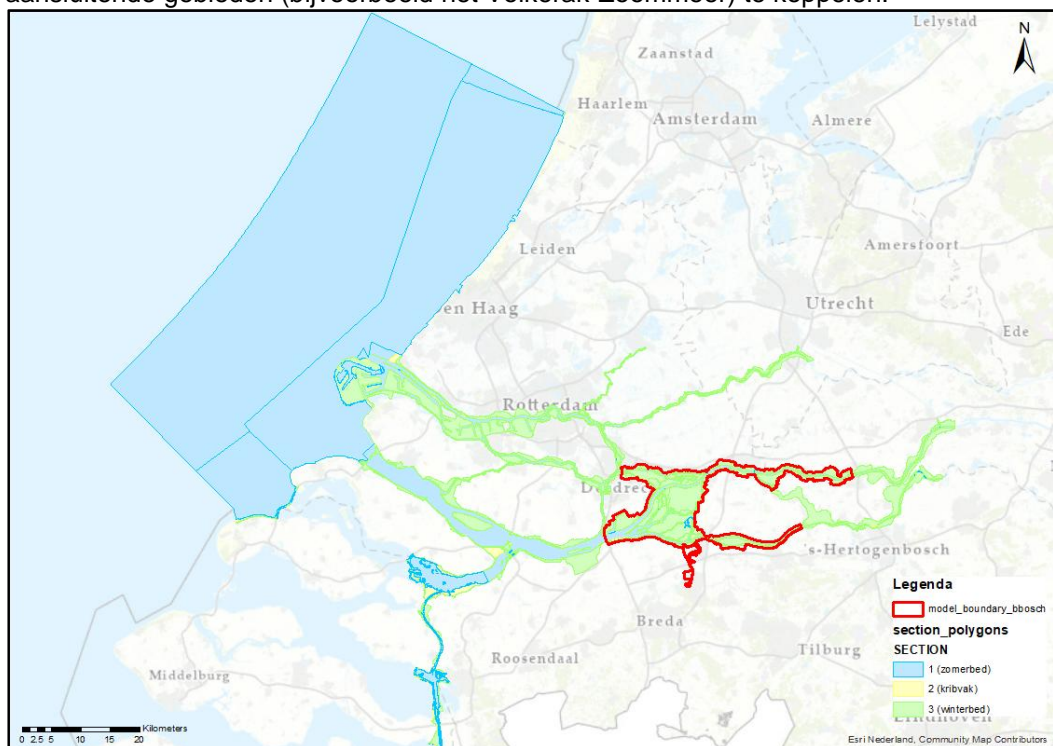
Daarom wordt aanbevolen om voor de Rijn-Maasmonding een 2DH-model op te zetten dat de splitsingspunten in voldoende detail beschrijft, dus met voldoende roosterresolutie, en met niet-stationaire stroming. Er is geen duidelijk criterium beschikbaar voor de benodigde roosterresolutie, maar het bestaande 2DH-model in D-HYDRO, met 10 of meer cellen over de breedte van de hoofdgeul, lijkt ons voldoende (zie voorbeeld in Figuur 33).

Bijkomende voordelen van het gebruik van het bestaande 2DH-model in D-HYDRO als basis voor het morfologisch model zijn dat het model

- reeds is gekalibreerd en gevalideerd voor de hydrodynamica (Veenstra et al., 2022), er moet alleen de beschrijving van de morfologie worden toegevoegd en gekalibreerd.
- onderdeel is van het standaard B&O-traject van RWS onder SITO modelschematisaties. Daarin komen regelmatige actualisaties van de schematisatie beschikbaar, die voor het morfologische model hergebruikt kunnen worden.

Wel moet in de eerste fase van de modelopzet worden gekeken hoe de rekestijden van een morfologisch model met deze basis uitpakken, want het is bekend dat het model ook zonder morfologie al vrij rekenintensief is. De rekestijden worden niet alleen door de keuze van het modeltype (1D, 2D, 3D) en de roosterresolutie bepaald, maar ook door de modelleerstrategie voor de relevante vraagstellingen. Dit wordt in hoofdstuk 7 nader beschreven.

Figuur 32 laat het bereik van het bestaande hydrodynamische model zien. Dit dekt alle relevante takken van de Rijn-Maasmonding, inclusief delen van de Bovenrivieren (Maas tot aan Lith, Lek tot aan Hagestein en Waal tot aan Tiel) en biedt de mogelijkheid om zo nodig aansluitende gebieden (bijvoorbeeld het Volkerak-Zoommeer) te koppelen.



Figuur 32 Modelgebied van het bestaande 2DH-model van de Rijn-Maasmonding in D-HYDRO (groene, gele en blauwe vlakken) en geografische ligging van het verfijnde Biesbosch deelmodel (rode polygoon) (Visser, 2023).

Ook bevat het model een uitsnede van de Noordzee om de stromingspatronen bij de mondingen van Nieuwe Waterweg en Haringvliet goed te kunnen berekenen.

Vanwege rekentijd wordt aanbevolen om in de eerste fase van de modelbouw te onderzoeken in hoeverre dit deel voor morfologische berekeningen kan worden afgeknipt, zo nodig door informatie uit het hydrodynamische model mee te nemen in de randvoorwaarden. Deze vraag heeft ook een link met de beoogde aanpak voor de modelberekeningen.

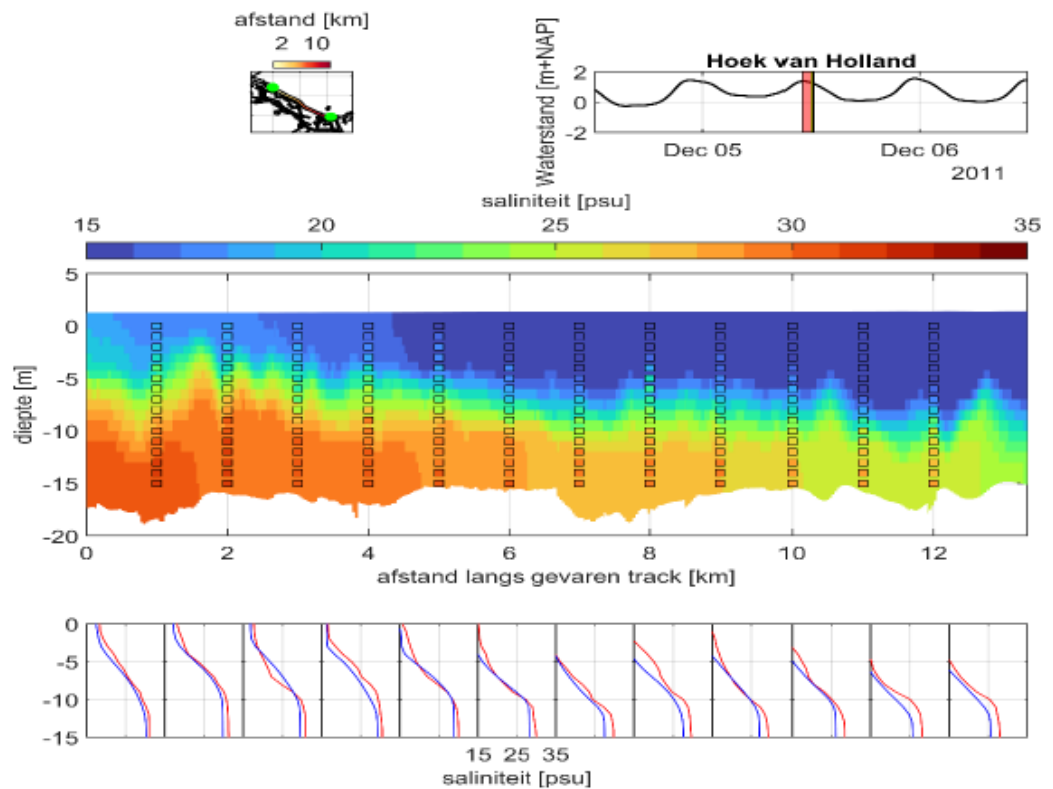
Het 2DH-model voorspelt niet hoeveel sediment uit groeiende erosiekuilen vrijkomt. Dit kan wel de benedenstroomse morfologie beïnvloeden, bijvoorbeeld in de casus van de zandmotor bij Zwijndrecht, en is daarom relevant voor dit schaalniveau. De hoeveelheid kan worden geschat op basis van de geobserveerde kuilgroei in voorgaande jaren en de kennis over de geologie (hoe ver kan de kuil maximaal groeien?). Deze hoeveelheid kan als externe bron worden opgelegd aan het 2DH-model voor voorspellingen voor kortere termijnen. Daarbij is het belangrijk om de gevoeligheid van het gedrag op takniveau voor de hoeveelheid te onderzoeken vanwege de onzekerheid in de schatting.

Het 2DH-model kan geen gedetailleerde beschrijving van de complexe driedimensionale stromingspatronen op de Nieuwe Waterweg (interactie zouttong en transport van slib en zand) geven. Daarom is het nog de vraag in hoeverre het model de uitwisseling van sediment met de Noordzee goed kan weergeven. Dit moet blijken uit eerste testen met het nieuwe model. Zo nodig moet de invloed van deze uitwisseling op een slimme manier worden verwerkt in de morfologische randvoorwaarde. De invloed van zout op het Haringvliet is op dit moment nog beperkt. Als echter besloten wordt om het Haringvliet in de toekomst verder open te zetten dan “op een kier”, wordt deze vraag ook relevant voor de modelrand bij de Haringvlietsluizen.

Voor de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, of eventueel bij een volledige opening van de Haringvlietsluizen, zou het relevant kunnen zijn om dit soort fenomenen in detail met een morfologisch model te onderzoeken. In dat geval kan worden overwogen om de morfologische invoer van het 2D-model onder het bestaande 3D-model van de Rijn-Maasmonding te hangen. Ook dat model is beschikbaar, en de kalibratie en validatie hebben uitstekende resultaten laten zien voor de zoutindringing in het gebied (zie Figuur 34 en Van der Kaaij et al., 2022). Echter zijn de morfologische processen in de Nieuwe Waterweg dusdanig complex, dat de vraag is of alle relevante processen al goed gemodelleerd kunnen worden. Ook wordt er nog onderzoek gedaan welke processen er precies spelen, onder andere via lopend onderzoek in het programma Rivers2morrow. Voordat dat duidelijk is, is het modelleren ervan niet nuttig. Ook is het nog de vraag hoe sterk de lokaal complexe processen überhaupt de bodemontwikkeling op takniveau en dus de ontwikkeling van de rest van het Rijn-Maasmondinggebied beïnvloeden. Wel worden nieuwe inzichten in de processen over het algemeen verwerkt in de softwaresuite D-HYDRO. Het is dus mogelijk om het nieuwe model uit te breiden zodra voldoende nieuwe inzichten en modelleeropties beschikbaar komen. De optie van een 3D-model voor een gedetailleerdere beschrijving van de processen in de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas moet dus op dit moment gezien worden als optie voor de (verdere) toekomst.



Figuur 33 Rooster D-HYDRO-model Rijn-Maasmond bij de splitsing Nieuwe Maas – Oude Maas – Scheur.



Figuur 34 Voorbeeld van 3D verijnd model gebruikmakend van hetzelfde 2D rooster (Van der Kaaij et al., 2022) in dit geval voor de modellering van saliniteit.

Voor het modelleren van slib in de Rijn-Maasmonding wordt in eerste instantie aangeraden om aan te sluiten bij de huidige werkwijze. Hieronder volgen verschillende toepassingen die het huidige gebruik illustreren:

- Hendriks en Schuurman (2017) hebben met behulp van DELWAQ en Delft3D 4 model alternatieve loslocaties onderzocht.
- Cronin *et al.* (2019) maakten op basis van het OSR-NSC model (Operationeel Stromingsmodel Rotterdam) een morfostatisch Delft3D 4 model. Eerst werden op basis van de hydrodynamica in combinatie met Delft3D-WAQ slibconcentraties bepaald, die vervolgens ook voor een maand werden doorgerekend in combinatie met dichtheidseffecten in de stroming (zie ook Kirichek *et al.* (2021)).
- Cronin *et al.* (2021) maakten een 3 keer verfijnd model van het OSR-NSC model die vervolgens weer naar Delft3D 4 model is omgezet in combinatie met Delft3D-WAQ gebruikt is om te kijken naar de impact van WID (water injection dredging) op de slibverspreiding in het systeem. Slibbronnen zijn ingeschat met TUDflow3D (<https://github.com/openearth/tudflow3d>) en via COSUMO toegevoegd aan de grootschalige Delft3D-WAQ berekening).

Daarmee vervalt het 3D modeleren van slib in de eerste versie van het geadviseerde morfologische model. De software-uitbreidingen voor slibmodellering worden ook gedaan in de D-HYDRO Suite. Wanneer deze ontwikkelingen gereed zijn voor gebruik is het denkbaar dat ook in combinatie met een D-HYDRO hydrodynamische berekening worden gebruikt, en mogelijk op nog verdere termijn, ook in combinatie met bodemveranderingen.

## 6.2 Schaalniveau: dwarsprofielen

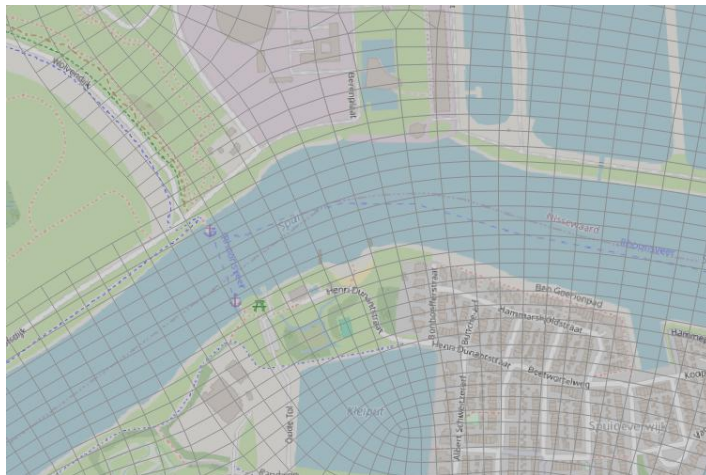
Het volgende schaalniveau gaat over de ontwikkeling van de bodem op het niveau van dwarsprofielen, over een schaal van orde 250 m. Daarbij kan worden gedacht aan de reactie op lokale vernauwingen of verbredingen van de dwarsdoorsnede, of aan bochtprofielen (ondiepe binnenbocht, diepe buitenbocht). Ook het vinden van geschikte locaties voor het terugstorten van gebaggerd sediment valt onder dit schaalniveau.

Bij voldoende resolutie over de breedte van een tak (minimaal orde 8-10 cellen) en in lengterichting (ingeven door maximale verhouding tussen de roosterlengte in stroomrichting en de roosterlengte haaks erop van ongeveer 2 tot 3) kan ook deze bodemontwikkeling met een 2DH-model worden gemodelleerd. Het huidige D-HYDRO model heeft hiervoor voldoende resolutie met cellen van orde 30-40 m lengte en meer dan 10 cellen over de breedte in de hoofdgeul. De enige uitzondering hierop is het Spui. Bij enkele scherpe bochten langs die tak is ervoor gekozen om het rooster niet volledig aan de hoofdgeul uit te lijnen, zoals dat op andere takken wel is gebeurd, en daarbij is duidelijk ook minder op de roosterresolutie gelet (Figuur 35). Voor een analyse of voorspelling van de trend in de bodemligging op de hele tak (schaalniveau: takken) is dit waarschijnlijk voldoende, omdat de splitsingspunten aan het begin en einde van het Spui wel redelijk gedetailleerd zijn gemodelleerd. Maar voor meer detail op de schaal van orde 250 m is de resolutie naar verwachting niet hoog genoeg en zou het rooster verfijnd moeten worden. In D-HYDRO is het mogelijk om het rooster lokaal te verfijnen, en dit is niet veel werk. Hiermee is in de afgelopen jaren al geëxperimenteerd met het model van de IJssel voor een havenaanpassing.

Ook voor dit schaalniveau geldt dat de invloed van vrijkomend sediment uit kuilen meegenomen moet worden door een bron van sediment op te leggen (zie paragraaf 6.1). Ook geldt dat de invloed van de complexe interactie tussen zout en het sediment, waaronder slib, op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas (en in de toekomst mogelijk op het Haringvliet en Hollandsch Diep) niet wordt weergegeven door een 2DH-model.



Voor vragen waarvoor dit relevant is moet worden terug gevallen op een 3D-model. Ook hier weer met de kanttekening dat de complexe processen in dit gebied nog onderwerp van onderzoek zijn op dit moment.



Figuur 35 Roosterresolutie in het bestaande D-HYDRO model van de Rijn-Maasmond in de bocht bij Oud-Beijerland in het Spui.

Qua roosterresolutie is de resolutie te grof om de horizontale verplaatsing van de scheepvaartgeulranden te modeleren. Deze ontwikkeling zal dus ook waarschijnlijk niet goed kunnen worden gemodelleerd op het huidige 2DH D-HYDRO rooster, vanwege de beperkte horizontale resolutie. Wanneer de hellingen bij een geulrand niet te steil zijn kan de roosterresolutie lokaal worden verhoogd en kan dit alsnog met een 2DH-model worden berekend. Als de hellingen wel steil zijn is er misschien een mogelijkheid om verder te denken aan een onderzoeklijn voor oevererosie die is ingebouwd in een branch van Delft3D 4 (Spruyt *et al.*, 2015; Canestrelli *et al.*, 2016; Chavarrias, 2023).

Voor bijvoorbeeld oevers van smalle geulen in de Biesbosch, die niet goed te schematiseren zijn in het 2D hydrodynamische model, kan een vergelijkbare redenering worden gevolgd en mogelijk bieden beide genoemde oevererosie tools hier ook uitkomst. Ook zou hier mogelijk de analytische tool D-FAST BE (Van der Deijl, 2003) kunnen worden ingezet. Dit is een module waarmee de ontwikkeling van oeverlijnen kan worden ingeschat op basis van een hydrodynamische 2DH-berekening (Ook hier zou het gaan om een onderzoekstraject).

### 6.3 Schaalniveau: kuilen

Voor erosie en sedimentatie in en rond erosiekuilen zijn 3D hydrodynamische processen en geotechnische processen van belang. Bij kuilen kan een 2DH model inzicht geven in de mogelijke contractie van de hoofdstroom (doordat de kuil water trekt). Dat is niet voldoende om de ontwikkeling van de kuil te simuleren, maar kan wel iets zeggen over de stroming in de omgeving van de kuil. Bij kuilen die zo groot zijn, dat ze de breedte van de rivieren beslaan en vele malen langer zijn dan dat ze breed zijn, spreken we liever van geulen, en deze zijn goed op te lossen met een 2DH model.

Voor de verticale variatie in stroming is bij de inschatting van de modellering nog een mogelijke rol voor een 2DV model genoemd. Echter, omdat over het algemeen de erosiekuilen een beperkte grootte hebben ten opzichte van de rivierbreedte en een ruimtelijk variërende vorm wordt de stroming en sediment in de kuil bepaald door driedimensionale processen. Het is daarmee niet mogelijk om de stroming in kuilen met een 2DV model te modeleren in D-HYDRO.



De erosiekuilen beïnvloeden de stroming vooral lokaal in en direct naast de kuil. Dit is te complex om met D-HYDRO goed te modelleren, aangezien dit naast 3D niet-hydrostatische stroming ook turbulentie voldoende moet worden gemodelleerd (Bom, 2017). Er is een duidelijke analogie met lokale erosie bij constructies, zie paragraaf 6.4. Hiervoor zou een volledig 3D rekende software, bijvoorbeeld CFX, OpenFOAM van Nabi (2012), nodig zijn met minstens k- $\omega$  turbulentie sluittermen of zelfs hiervoor voldoende resolutie een volledige 3D Large-Eddy Simulation (LES). Dat soort modellen kunnen meer inzicht geven in de turbulentie en wervels bij de kuilrand en -bodem, resulterende schuifspanningen en drukken, en hoe die over een getijdencyclus variëren, maar op dit moment zijn er nog geen modeltoepassingen bekend die aangetoond hebben dat de ontwikkeling van de kuilen goed kan worden gesimuleerd. Daarbij speelt ook dat concepten voor erosie en transport in combinatie met complexe turbulentie nog in ontwikkeling zijn, en er concepten voor geotechnische stabiliteit aan toegevoegd moeten worden voor de kuilranden. Het risico van het ontstaan van nieuwe kuilen, of de invloed van ingrepen op dit risico, kan daarom vooralsnog beter aan de hand van de opbouw van de ondergrond, de schuifspanningen op de bodem, en de grootschalige erosie worden beoordeeld (2DH-modellering voor schaalniveau: takken en dwarsprofielen). En de verwachte groei van bestaande kuilen kan kortere tijd vooruit worden voorspeld door extrapolatie van geobserveerde kuilgroei van de betreffende kuil en vergelijkbare kuilen in voorgaande jaren. Belangrijker dan complexe modellering is dan ook een goede monitoring van het gedrag van de bestaande kuilen, en het in beeld brengen van mogelijke risico locaties voor het ontstaan van nieuwe kuilen. Daarnaast kan verder onderzoek en monitoring bijdragen aan ontwikkeling van modelconcepten voor deze erosiekuilen.

De hoeveelheid sediment die vrijkomt uit een kuil tijdens de kuilgroei is relevant op de schaalniveaus “takken” en “dwarsprofielen” en wordt in paragraaf 6.1 beschreven.

## 6.4 Schaalniveau: lokale ontgroning rond constructies

Lokale ontgroningen naast constructies zoals brugpijlers of kribben zijn, net als bij de erosiekuilen, het resultaat van complexe 3D-stromingsprocessen. Deze complexe stromingen kunnen niet met 2DH D-HYDRO model worden gemodelleerd. Dit geldt, in het algemeen, ook voor 3D D-HYDRO modellen, omdat er een ondiepwater aanpak is toegepast, waarmee de verticale versnellingen klein worden geacht. Los daarvan, is de turbulentie modelering niet gedetailleerd genoeg voor deze kleine afmetingen. Om de stroming op deze locaties in detail te kunnen modelleren zou een detailmodel moeten worden opgezet in een volledig 3D rekende software, bijvoorbeeld CFX, Nabi (2012) of OpenFOAM (met de volgende eigenschappen: niet-hydrostatisch, bijvoorbeeld RANS k- $\omega$  of Shear Stress Transport (SST) model, of LES, mogelijk ook met vrij oppervlak). Dan is het echter nog steeds lastig om de daaraan gekoppelde morfologische processen goed te berekenen, dit is op dit moment nog onderwerp van wetenschappelijk onderzoek.

In plaats van een volledige detailmodellering wordt daarom aanbevolen om het risico op ontgroningen en het ontwerp van bodembescherming te baseren op empirische relaties, bijvoorbeeld uit de Scour Manual (Hoffmans en Verheij, 1997). Het 2DH-model kan hiervoor waardevolle input leveren, omdat voor de empirische formules kennis over de (diepte-gemiddelde) hydrodynamica ter plekke nodig is (bijvoorbeeld stroomsnelheden) en bijvoorbeeld het aanbod van sediment vanuit de ongestoorde zones (live-bed scour). Hiervoor is overigens in veel situaties, wanneer sediment aanbod geen rol speelt, het bestaande 2DH hydraulisch model van de Rijn-Maasmonding voldoende. Er hoeft dan geen module voor sedimenttransport en morfologie te worden ingeschakeld.

## 6.5 Samenvatting advies

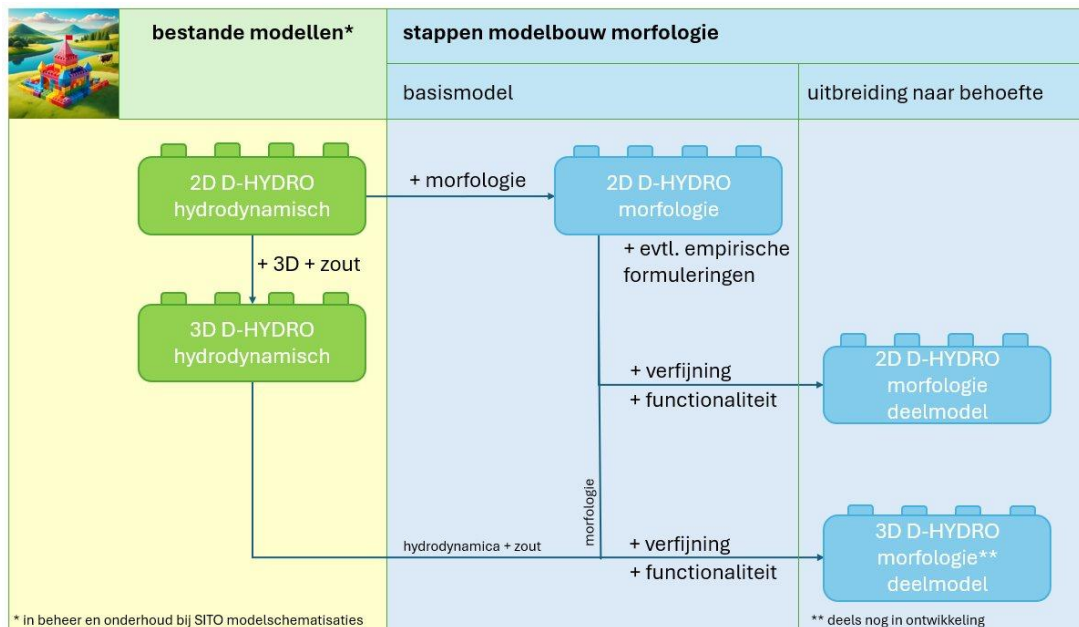
Voor de morfologische ontwikkeling in het Rijn-Maasmonding gebied adviseren wij om als eerste stap het huidige tweedimensionale D-HYDRO model uit te breiden met sedimenttransport en de tijdsafhankelijke morfologische ontwikkeling. Met dit model kan een belangrijk deel van de beheer- en beleidsvragen, die in dit advies worden beschreven (hoofdstuk 2), worden beantwoord. Dat betreft met name de vragen op groot en middelgroot schaalniveau (schaal van riviertakken en schaal van dwarsprofielen). Zo nodig kunnen er deelmodellen met verfijnde horizontale resolutie of modellen met lokale roosterverfijning van worden afgeleid. Veel van de ruimtelijke invoer kan direct worden overgenomen uit het 2D-basismodel of opnieuw geprojecteerd op basis van bestaande Baseline-schematisaties. Een voorbeeld hiervan is het verfijnde RMM 2D model voor de Biesbosch (Figuur 32). Het 2D-model kan informatie leveren over de randvoorwaarden voor de detailmodellen.

De vragen op kleine schaalniveaus (bijvoorbeeld over lokale ontgrondingskuilen bij constructies zoals brugpijlers, of over het risico van het ontstaan van nieuwe erosiekuilen of de groei van bestaande kuilen) kunnen beter worden beantwoord door de resultaten van het 2D-model te combineren met empirische relaties, in plaats van een gedetailleerd 3D-model met alle benodigde processen op te bouwen.

Bij vragen waar zout en slib belangrijke processen zijn, bijvoorbeeld in de Nieuwe Waterweg, kunnen in de verticaal verfijnde 3D modellen worden afgeleid van het 2D-model en het bestaande hydrodynamische 3D-model, wel met de kanttekening dat de processen die daar spelen nog worden onderzocht en dus minder goed gemodelleerd kunnen worden. Voor slibmodellering wordt aangeraden voorlopig gebruik te maken van bewezen methoden zoals de bestaande morfostatische technieken, maar nog niet als onderdeel van het 2D D-HYDRO model.

D-HYDRO bevat meerdere processen, en zodoende kan dit model meerdere bestaande modellen vervangen waardoor er voor beleidskeuzes en beheersvragen een eenduidigere uitkomst verwacht kan worden. Belangrijk is dat hierbij voor meerdere studies gewerkt kan worden met gelijke aannames en schematisaties.

Figuur 36 en Tabel 11 geven een samenvatting van bovenstaand advies. Het tabel is afgeleid van Tabel 4, maar de *verwachte* meerwaarde van een numeriek model is met de kennis over de werking van het systeem en een afweging van wat realiseerbaar is met een acceptabel tijdspad en budget vertaald naar een pragmatische en realiseerbare aanpak, waarin nieuwe morfologische modellen worden gecombineerd met beschikbare analytische en empirische methodes.



Figuur 36 Advies aanpak ontwikkeling morfologisch model Rijn-Maasmonding.

Tabel 11 Advies meerwaarde van numeriek model afhankelijk van lengteschaal.

Lengteschaal	Orde van grootte	Modeltype	Inzicht	Evaluatie ingrepen	Specificeren Bodembeheer
Pijler, Brug, Krib, Bestorte oevers	10 m	2DH hydrodynamica + empirische formules voor ontgroning	Invloed op gemiddelde stroming in omgeving, maar niet in lokale turbulente structuren. Empirische formules voor verwachtingswaarde (maximale) ontgroning bij constructie, met input stroming uit 2DH model.	Verandering in gemiddeld stroombeeld gebruiken als input voor empirische relaties voor bepalen verwachtingswaarde (maximale) ontgroning.	
Erosiekuilen	100 m	2DH morfologie + ondergrond + geobserveerde kuilgroei	risico ontstaan nieuwe kuilen (o.a. voor assetmanagement) <b>(grootschalige morfologie uit 2DH morfologiemodel + ondergrond)</b>  verwachte kuilgroei (extrapolatie geobserveerde kuilgroei – <b>gebruik data, geen 2D model evt. onderzoek schaalmodellen, nog geen detail numerieke modelering bijv. 3D k-<math>\omega</math></b> )	invloed op risico ontstaan nieuwe kuilen <b>(grootschalige morfologie uit 2DH morfologiemodel + ondergrond)</b>	
Geulen (niet grotere kuilen)	lengte 500m, breedte 100m	2DH	verdeling stroming over de breedte – impliciet effect op de vaargeul	betere inschatting van de <i>grootschalige</i> dynamiek in/rondom de geul na een ingreep	
Dwarsprofielen	250 m tot 10 jaar	Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, en evt. (later) Haringvliet/ Hollandsch Diep: (grof) 3D	<b>nog met onderzoekstatus:</b>  lange termijn ontwikkeling bij complexe interacties van getij en gelaagdheid en ruimtelijke heterogeniteit	<b>nog met onderzoekstatus:</b>  evaluatie invloed van ingrepen op de lange termijn ontwikkeling bij complexe interacties van getij en gelaagdheid en ruimtelijke heterogeniteit	

Lengteschaal	Orde van grootte	Modeltype	Inzicht	Evaluatie ingrepen	Specificeren Bodembeheer
		overige takken: 2DH	Ontwikkeling bochtprofielen, lokale vernauwingen/verbredingen op lange-termijn, maar ook op seizoenseffecten of gedurende een getijcyclus.  <b>kan met 2DH morfologisch model</b>	grote meerwaarde voor evaluatie ingrepen, bv. aanpassing geometrie, verruiming Nieuwe Waterweg, aanleg Blankenburgtunnel, onderwater bestorting oevers, Maeslantkering (versmalling)  <b>kan met 2DH morfologisch model</b>	bepalen of er ruimte is voor terugstorten is met model mogelijk  <b>op takniveau</b>
Takken	5-10 km)  5-50 jaar	Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas, en evt. (later) Haringvliet/ Hollandsch Diep: 3D i.v.m. gelaagdheid en zwevend sediment	<b>nog met onderzoekstatus</b>	<b>nog met onderzoekstatus</b>	
		overige takken: 2DH	grote meerwaarde voor lange termijn ontwikkeling en randeffecten, bijvoorbeeld: - zeespiegelstijging - klimaat	grote meerwaarde voor bepalen invloed van grootschalige aanpassingen	afleiden strategie voor sedimentmanagement is met model mogelijk

\*(mits – in geval van gelaagdheid – relevante correcties van het snelheidsprofiel worden meegenomen)

# 7 Aanpak van modelontwikkeling

## 7.1 Fasering modelopbouw op hoofdlijnen

Voor de morfologische modellen van Rijntakken en Maas is de volgende fasering voor modelversies aangehouden. Er wordt voorgesteld om deze ook voor de Rijn-Maasmonding te hanteren.

- v0 Werkend basismodel met de meest belangrijke functionaliteit voor een eerste set van toepassingen, nog niet gekalibreerd, gebaseerd op het rooster van het hydrodynamische model. Doel is een draaiend maar nog niet al te complex model. Op stap naar v1 worden de volgende tussenstappen gezet:
  - v0.5 De eerste keuze van passende modelinstellingen is gemaakt, bijvoorbeeld op basis van data-analyse en “offline” kalibratie.
  - v0.8 De 1D-kalibratie (dus op grootschalige lange-termijn ontwikkelingen) is afgerond.
- v1 Volledig gekalibreerd model (dus t.o.v. v0.8 ook op 2D-patronen zoals bochthellingen), geschikt voor een eerste set van toepassingen.
- v2 Ten opzichte van v1 is de functionaliteit uitgebreid om het model geschikt te maken voor meer toepassingen (bijvoorbeeld lokaal verfijnd rooster, functionaliteit voor oevererosie, ...).
- v3 Deze modelversie wordt gemaakt om nieuwe inzichten en nieuwe (model- en software)functionaliteit te ontwikkelen.

Uitgangspunt voor het morfologisch model is het bestaande 6<sup>e</sup> generatie hydrodynamisch model van de Rijn-Maasmonding, waarbij in eerste instantie (t/m v1) uitgegaan wordt van de 2D-versie van dat model. Een uitbreiding naar 3D voor bepaalde takken is, zo nodig, onderdeel van modelversie v2. Om deze langere-termijn ontwikkeling verder te structureren, zijn meerdere activiteitengebieden gedefinieerd, die worden gepresenteerd in Tabel 12. Het ontwikkeltraject beslaat meerdere jaren. Elk jaar worden specifieke activiteiten per gebied gedefinieerd in overleg tussen RWS en de ontwikkelaars.

Tabel 12 Stappen in de modelontwikkeling.

activiteitengebieden	gerelateerde activiteiten	modelversie
dataverzameling	<ul style="list-style-type: none"><li>• Verzamelen gegevens die nodig zijn voor de modelbouw, bijvoorbeeld randvoorwaarden, kalibratiedata voor hydrodynamica en sedimenttransportbodemsamenstelling, etc.</li></ul>	v0 v1
morfologische modelontwikkeling: naar een goed werkend basismodel (v0)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bouw van een eerste, werkende modelversie met:<ol style="list-style-type: none"><li>a. dynamische rivierbodem</li><li>b. representatieve beginbodempligging (zo nodig uitgefilterde bodemvormen)</li><li>c. ruwheidsformulering die goed werkt voor morfologieberekeningen</li><li>d. sediment (samenstelling toplaag en onderlagen, met focus op de actieve toplaag)</li><li>e. secondary flow</li><li>f. eerste keuze transportformule en parameters (nog niet gekalibreerd)</li><li>g. niet of slecht erodeerbare lagen</li><li>h. geschikte roosterresolutie</li></ol></li></ul>	v0



activiteitengebieden	gerelateerde activiteiten	model-versie
	<ul style="list-style-type: none"> <li>testfase v0-model, identificeren van problemen en aanpassen van de modelschematisatie</li> </ul>	
uitbreiding model naar v1 versie	<ul style="list-style-type: none"> <li>t.o.v. v0 uitgebreide beschrijving van <ul style="list-style-type: none"> <li>a. bodemruwheid</li> <li>b. samenstelling en dikte van onderlagen, inclusief niet of slecht erodeerbare lagen</li> </ul> </li> <li>module voor vaargeulonderhoud en zandwinning</li> <li>testfase v1-model, en iteratief aanpassen van de modelschematisatie zo nodig</li> </ul>	v1
ontwikkelen methodes en tools voor het gebruik van het model	<ul style="list-style-type: none"> <li>aanpak en tools voor het uitvoeren van modelberekeningen (bijvoorbeeld Simulation Management Tool)</li> <li>strategie voor morfologisch inspelen van het model</li> <li>strategie en tools voor de evaluatie en presentatie van modelresultaten</li> <li>strategie en tools voor het vereenvoudigen van de bouw van nieuwe modelschematisaties en om de reproduceerbaarheid van modelschematisaties te vergroten</li> </ul>	v0 v1
modelkalibratie en validatie	<ul style="list-style-type: none"> <li>kalibratie- en validatiestrategie</li> <li>aanpassingen aan het hydrodynamische model om het geschikt te maken voor morfologische berekeningen (bijvoorbeeld gladde overgangen in bodemruwheid)</li> <li>hydrodynamische validatie</li> <li>“offline” kalibratie om een eerste indruk te geven van de morfologische respons op de stromingscondities in het gebied</li> <li>1D morfologische kalibratie en validatie (gericht op breedtegemiddelde, grootschalige lange-termijn trends, schaalniveau takken)</li> <li>2D morfologische kalibratie (gericht op 2D-patronen in de bodemligging, schaalniveau dwarsprofielen)</li> <li>validatie module voor vaargeulonderhoud en zandwinning</li> </ul>	v1
numerieke verkenning invloed onzekerheden	<ul style="list-style-type: none"> <li>invloed van onbekende fysische variabelen (bijvoorbeeld ruwheid in het transport, bodemsamenstelling, dikte actieve laag)</li> <li>invloed van modelparameters (bijvoorbeeld initiële bodemligging en samenstelling, randvoorwaarden) of modelconcepten (bijvoorbeeld Hirano-model)</li> <li>invloed van de strategie voor modelberekeningen (bijvoorbeeld methodes om de rekentijd te beperken, keuze van de simulatieperiode)</li> </ul>	v1-v3
afleiden strategie voor toekomstige modeltoepassing	<ul style="list-style-type: none"> <li>identificeren van beoogde types toepassing en de eisen aan het model</li> <li>ontwikkelen van strategieën voor de modeltoepassing (bijvoorbeeld keuze van scenario's, keuze voor modelinstellingen en schematisaties, type ingrepen)</li> <li>identificeren van behoeftes voor uitbreiding van de modelfunctionaliteit (de behoefte voor zowel de kennisontwikkeling als de benodigde data)</li> <li>implementatie en testen</li> </ul>	v1-v3
verificatie modeltoepassing	<ul style="list-style-type: none"> <li>testen van de modeltoepassing voor bijvoorbeeld <ul style="list-style-type: none"> <li>a. evaluatie effect van ingrepen</li> <li>b. planstudies</li> <li>c. (lange-termijn) voorspelling systeemgedrag</li> </ul> </li> <li>verbetering van de modelschematisaties, de strategieën voor toepassing, methodes en tools n.a.v. de bevindingen</li> </ul>	v1-v3
implementatie nieuwe functionaliteit in D-HYDRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>identificeren van behoefte aan nieuwe functionaliteit in D-HYDRO</li> <li>functioneel ontwerp van de nieuwe functionaliteit</li> </ul>	v2-v3

activiteitengebieden	gerelateerde activiteiten	model-versie
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• technisch ontwerp van de implementatie</li> <li>• implementatie en testen</li> <li>• actualisatie gebruikershandleidingen</li> </ul>	

## 7.2 Afbakening technisch ontwerp

Uitgangspunt voor het morfologisch model is het 6<sup>e</sup> generatie hydraulisch model (geometrie en roosterresolutie). Het modelgebied oriënteert zich dan ook daaraan (Figuur 32/Figuur 36), waarbij wordt onderzocht hoe de randvoorwaarden benedenstrooms kunnen worden opgelegd direct bij de Maasmond en de Haringvlietssluzen om het stuk Noordzee niet mee te hoeven nemen.

De functionaliteiten van de v1-versie van het model richten zich met name op:

- 1 Voorspellen langjarige (orde 10 jaar) profiel-gemiddelde en ruimtelijke bodemdynamiek binnen dwarsprofiel zomerbed (aanzanding en erosie, schaalniveau takken en dwarsprofielen)
- 2 Voorspellen (minimale) waterdiepten
- 3 Voorspellen waterstanden
- 4 Voorspellen stroomsnelheden
- 5 Voorspellen onderhoud (baggeren/storten) + beheerinspanning
- 6 Voorspellen van effecten en ontwikkeling in afvoer- en sedimentverdeling bij de splitsingspunten
- 7 Voorspellen van de beweging van niet-cohesief sediment

Daarbij worden de volgende zaken in het model meegenomen:

- Samenstelling van de bodem (substraat)
- Permanente harde lagen
- Automatische bagger/stort procedure
- Ontwikkeling van bodemvormen (subgrid voor ribbels en duinen t.b.v. baggeren/storten)
- Afvoerdeling bij splitsingspunten
- Sedimentverdeling bij splitsingspunten

Het model wordt afgeregeld op meerjarentrends en is daarmee geschikt voor het voorspellen van lange-termijn ontwikkelingen en de effectbepaling (in het zomerbed) van ingrepen of autonome ontwikkelingen, zoals beschreven in hoofdstuk 6.

Het model wordt op dezelfde manier opgezet als de modellen voor de Maas en de Rijntakken, zodat er landelijk een consistente aanpak kan worden gebruikt met name voor vergunningverlening. Daarbij kan worden geprofiteerd van het onderzoek dat voor de Maas en Rijntakken al is uitgevoerd in de afgelopen jaren. De schematisatie van de Waal tot aan Werkendam kan worden overgenomen van het reeds bestaande Waal-model (deze moet in 2025 nog afsluitend gekalibreerd worden).

## 7.3 Voorstel eerste (no-regret) stappen voor 2025

### 7.3.1 Start met verzamelen van de benodigde gegevens

Er kan 2025 alvast een start worden gemaakt met het verzamelen van de benodigde gegevens. Paragraaf 7.5 geeft een overzicht van de databehoeftes.

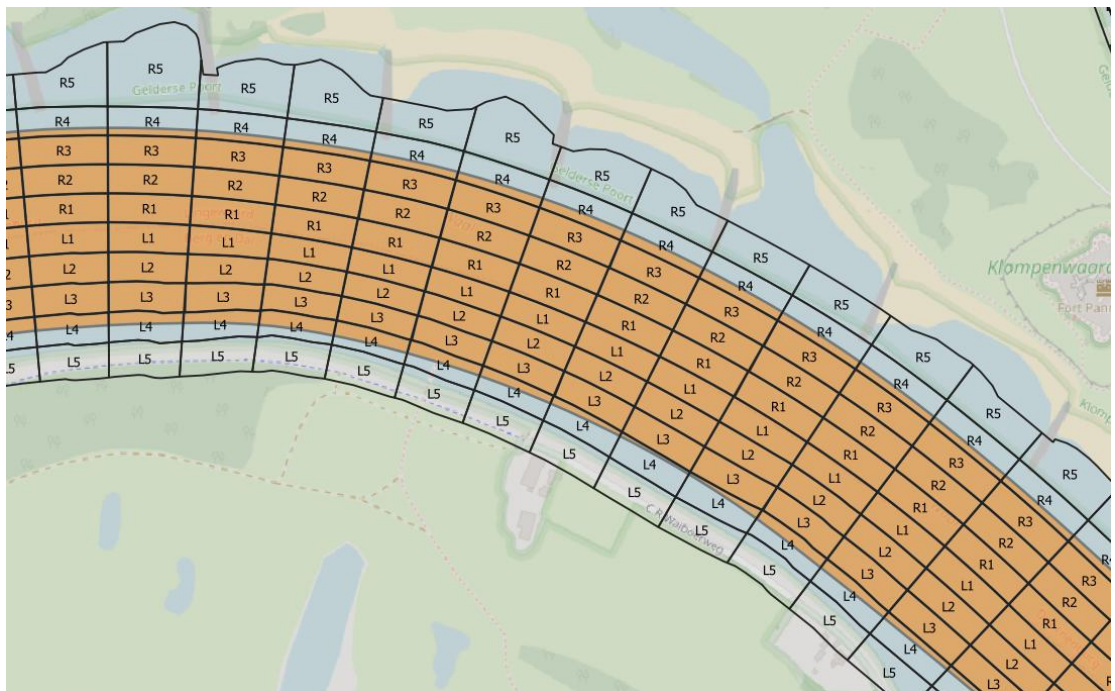
Het belangrijkste zijn de bodempeilingen (want die zijn nodig voor het afleiden van de morfologische kentallen, zie paragraaf 7.3.2) en data over de sedimentsamenstelling in de morfologisch actieve toplaag (voor nadere analyse sedimentsamenstelling, zie paragraaf 7.3.3). Beiden zijn relevant voor het verdere detailleren van het technische ontwerp (paragraaf 7.3.4).

### 7.3.2 Morfodynamische kentallen per deelgebied/tak

Om het 2D-model (en later daarvan afgeleide verfijnde 2D- of 3D-modellen) te kunnen bouwen wordt aanbevolen om allereerst morfodynamische kentallen per deelgebied af te leiden, zoals dat ook voor de Bovenrivieren (Maas en Rijntakken) is gebeurd. Daarvoor wordt een hulprooster opgebouwd (Figuur 37) en voor elke cel worden morfologische parameters (gemiddelde bodemligging, standaardafwijking, etc.) bepaald. Daarmee kan het morfologische gedrag van het systeem op een eenduidige en gestandaardiseerde manier worden beoordeeld. De kentallen dienen later ook voor

- het bepalen van homogene tijdvakken per deelgebied, die als kalibratie- en validatieperioden gebruikt kunnen worden, en
- de beoordeling van modelresultaten (kalibratie, voorspelling toekomstige trends of invloed van ingrepen).

Deze gestandaardiseerde aanpak wordt op dit moment uitgewerkt en toegepast voor de nieuwe morfologische modellen van Maas en Rijntakken. De dimensies van de cellen van dit rooster moeten worden bepaald voor het RMM-gebied. Op Maas en Rijntakken is de hoofdgeul over de breedte ingedeeld in 8 vakken (L4 t/m R4), daarnaast zijn vakken voor de krib/oeverzone gedefinieerd (L5 en R5). Dat kan worden aangehouden voor RMM. De lengte van de vakken was voor de Maas en Rijntakken 100 m (op de rivieras) en moet voor RMM nog worden bepaald. Als ondergrens kan de lengte van typische duinvormen worden gehanteerd. In dwarsrichting zijn mogelijk de randen van de scheepvaartgeulen ook nuttig om op te nemen in de opsplitsing van de verschillende vakken.



Figuur 37 Hulprooster ("vakken") voor de analyse van morfologische kentallen op de Waal (zwarte lijnen). Het oranje vlak geeft het morfologisch actieve deel van het zomerbed (in het model) weer.

### 7.3.3 Analyse sedimentsamenstelling en interactie zand-slib

Voor het maken van het technische ontwerp van het model moet nog nader geanalyseerd worden hoe belangrijk het is om de zand-slib interactie mee te modelleren. Kunnen we in een eerste modelversie volstaan met enkel zand, of moet ook gelijk een slibfractie worden meegenomen? In het laatste geval, wat is daarvoor nodig in het model? Voor het beantwoorden van deze vraag voorzien wij overleg met de experts voor de modellering van slib en zand-slib-interactie bij Deltares. Er kan worden terug gegrepen op ervaring met modellen die zij in het verleden gemaakt hebben: een DelWAQ<sup>3</sup> module bovenop de hydrodynamica van het OSR-model, en een deelmodel van het OSR-model waarin de invloed van slib op de waterbeweging (via dichtheidseffecten) is meegenomen, nog zonder aanpassing van de bodemligging.

### 7.3.4 Verdere detaillering technisch ontwerp

Paragraaf 7.2 schetst een eerste afbakening van het technisch ontwerp van het nieuwe model. Dit moet nog verder worden gedetailleerd, waarbij de ervaring met het bestaande Delft3D 4 model en de kennis, die in de laatste jaren is opgebouwd in relatie tot de toepassing van D-FAST MI in het gebied, meegenomen moet worden. Dit laatste kan vooral uitsluitel geven over de maatgevende hydraulische condities, wat kan helpen bij de nodige vereenvoudiging van randvoorwaarden.

### 7.3.5 Bouw eerste, eenvoudige modelversie (v0) voor testen rekentijden

Om te testen welke rekentijden met het nieuwe model kunnen worden behaald en hoe die kunnen worden verkort (bijvoorbeeld door gebruik van een morfologische factor, een gemiddeld getij en trapsgewijze geschematiseerde rivier-afvoerhydrografen) is het nuttig om een eerste, eenvoudige modelversie op te zetten. Deze hoeft nog niet gekalibreerd te worden en nog niet alle processen te bevatten (bijvoorbeeld alleen zandtransport).

### 7.3.6 Inventarisatie behoefte softwareontwikkeling

De verwachting is dat alle benodigde softwarefunctionaliteit voor de hierboven beschreven v1-versie van het nieuwe model al beschikbaar is in D-HYDRO. Het is echter zinvol om dat te verifiëren en ook alvast vooruit te kijken welke ontwikkeling nog nodig zou zijn voor de stap naar een v2-versie. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan sedimenttransport in 3D-modellen of de interactie tussen zand- en slibfracties.

## 7.4 Rapportage

Net als voor de morfologische D-HYDRO-modellen voor Rijn en Maas stellen we voor om voor het nieuwe RMM-model als volgt te rapporteren. Jaarlijks wordt er een “status rapport” gemaakt over de werkzaamheden van dat jaar. Als het model (v1) gekalibreerd en gevalideerd is, volgen er de volgende rapporten:

- 1 een afsluitend technisch rapport waarin alle definitieve keuzes en (kalibratie-/validatie-)resultaten worden gepresenteerd
- 2 en kort syntheserapport, dat per deelgebied samenvat welke informatie in het model gebruikt is en hoe het gebruikt kan worden. Dit rapport moet eenvoudig te volgen zijn, ook door lezers die geen experts zijn op het gebied van morfologische modellering.
- 3 Gebruikershandleiding met informatie over
  - a handleiding hoe een nieuwe schematisatie op te zetten
    - i. Hoe moet de modelinvoer worden aangepast, zo nodig per deelgebied?
    - ii. Welke invoer mag de gebruiker wijzigen, en welke niet?

---

<sup>3</sup> DelWAQ is het module voor waterkwaliteitsmodellering, dat inmiddels ook gekoppeld is aan D-HYDRO. Met dit module kan het transport van zwevend stof en slib worden berekend, inclusief interactie met de bodem.

- iii. Hoe moeten de beschikbare scripts voor het aanmaken van modelinvoer en het visualiseren van modelresultaten worden gebruikt?
  - b beschrijving hoe het model gebruikt moet worden voor vergunningaanvragen volgens het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK)
    - i. welke randvoorwaarden gebruiken
    - ii. hoeveel jaar doorrekenen
    - iii. welke standard figuren te maken
    - iv. etc.
  - c beschrijving hoe het model voor beleidsstudies moet worden gebruikt
    - i. welke randvoorwaarden gebruiken
    - ii. hoeveel jaar doorrekenen
    - iii. welke standard figuren te maken
    - iv. etc.
- 4 factsheets, voor gebruik op de IPLO website, waar de modelschematisaties door gebruikers kunnen worden opgevraagd. Deze moeten helpen de juiste keuze van een modelschematisatie voor de beoogde toepassing te maken.
- 5 Protocol van Overdracht (PvO), een vragenlijst die moet worden beantwoord voordat het model opgenomen kan worden in het beheer en onderhoud (B&O) van de RWS modelschematisaties

## 7.5 Databehoeft

De volgende data is nodig voor het maken van een nieuw morfologisch model:

- 1) Bodempeilingen (hoofdgeul) en bodemligging buiten de hoofdgeul tussen de primaire keringen: Het model (v1) is vooral bedoeld om de ontwikkeling van de bodemligging te berekenen. Voor kalibratie en validatie zijn historische bodempeilingen nodig, waarvan zowel grootschalige lange-termijntrends (schaalniveau takken, "1D kalibratie") als lokale veranderingen (schaalniveau dwarsprofiel, "2D kalibratie") worden afgeleid.
- 2) Metingen van de hydraulica (afvoeren, waterstanden, laterale bronnen, stroomsnelheden): Het sedimenttransport en de resulterende bodemontwikkeling worden bepaald door stroomsnelheden, die worden berekend door het hydrodynamische deel van het model. Metingen hiervan zijn nodig om enerzijds goede randvoorwaarden af te kunnen leiden voor het model en anderzijds voor kalibratie en validatie. Zo zijn afvoermetingen rond de splitsingen op verschillende momenten in het getij waardevol voor een goede hydraulische kalibratie.
- 3) Samenstelling van de morfologisch actieve toplaag van de bodem: Deze bepaalt mede het sedimenttransport en dus de bodemontwikkeling. Er is informatie nodig over de aanwezige sedimenttypes (zand, slib), hoeveelheden en korreldiameters (zeefkrommes).
- 4) Samenstelling onderlagen: als er in het model erosie optreedt wordt ook de samenstelling van de onderlagen relevant.
- 5) Metingen sedimenttransport: Het sedimenttransport bepaalt de bodemontwikkeling. Omdat sedimenttransportmetingen veel onzekerheid bevatten, is het echter bij de modelkalibratie en -validatie belangrijker om de resulterende bodemverandering goed te reproduceren. Metingen van sedimenttransport geven echter wel nuttige informatie over de orde grootte van het sedimenttransport en de verdeling tussen verschillende sedimentfracties. In het RMM-gebied zijn zowel bodemtransport als zwevend stof transport (i.e. concentraties) relevant. Ook data voor de verdeling van beiden over splitsingspunten is belangrijk voor een goede modelkalibratie.
- 6) Karakteristieken van de aanwezige bodemvormen: Het model zal en te grove resolutie hebben om bodemvormen apart te modelleren. De grootte van bodemvormen kan echter wel meegenomen worden in de module voor vaargeulonderhoud.



Daarom wordt informatie benodigd over de (statistiek van) de eigenschappen van bodemvormen (bijvoorbeeld lengte en hoogte van duinen of kleinere bodemvormen) en hoe deze veranderen bij verschillende stromingscondities.

- 7) Locatie van bestortingen in de bodem: Op meerdere locaties in het RMM-gebied liggen er bestortingen, waardoor de bodem niet of minder mobiel is (bijvoorbeeld kribben, rond brugpijlers, bescherming in erosiekuilen). Deze beïnvloeden de bodemontwikkeling lokaal en moeten daarom als “vaste lagen” worden meegenomen in het model. Daarvoor wordt initieel de sedimentbeschikbaarheid op 0 gezet.
- 8) Belangrijke veranderingen in het system in het verleden: (menselijke) ingrepen in het systeem kunnen een grote invloed hebben op de ontwikkeling van de bodemligging lokaal en op grote schaal. Voor een goede kalibratie van het model moet bij de keuze van kalibratie- en validatieperioden rekening worden gehouden met dit soort trendbreuken.
- 9) Sedimentbeheer (vaargeulonderhoud en zandwinning): Het sedimentbeheer kan een grote invloed hebben op (lokale) bodemveranderingen. Er wordt een modelversie gemaakt waarin de strategie voor vaargeulonderhoud en zandwinning worden opgelegd, om te verifiëren of de berekende volumes de juiste orde grootte hebben. Daarvoor is de volgende informatie nodig
  - a. interventieniveaus
  - b. stortregime,
  - c. frequentie van vaargeulonderhoud,
  - d. gebaggerde volumes
  - e. volumes zandwinning.

# Referenties

- Bom, S. (2017), Scour holes in heterogeneous subsoil: A numerical study on hydrodynamical processes in the development of the scour holes, Master's thesis, Delft University of Technology.
- Becker, A. (2015), Sediment in (be)weging : deel 2 (periode 2000-2012), rapport Deltares, Deltares, Delft, 121 p. pp.
- Chavarrias, V. (2023), Bank erosion literature review, Tech. Rep. 11208420-005-OA-0002 v0.1.14, Deltares, the Netherlands.
- Cohen, K.M., and E. Stouthamer (2012) "Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta." DANS, Utrecht University. <http://dx.doi.org/10.17026/dans-x7g-sjtw>.
- Cox, J. R., Y. Huismans, S. M. Knaake, J. R. F. W. Leuven, N. E. Vellinga, M. van der Vegt, A. J. F. Hoitink, and M. G. Kleinhans (2021), Anthropogenic Effects on the Contemporary Sediment Budget of the Lower Rhine-Meuse Delta Channel Network, *Earth's Future*, 9 (7), e2020EF001,869, doi:<https://doi.org/10.1029/2020EF001869>, e2020EF001869 2020EF001869.
- Cronin, K., L. de Wit, and M. Georgiou (2021), Sediment trap efficacy combined with WID, rapport Deltares, Deltares, Delft, 117 p. pp.
- Cronin, K., Y. Huismans, and T. van Kessel (2019), Local mud dynamics and sedimentation around the Maasmond, rapport Deltares, Deltares, Delft, 33, [45] p. pp.
- van der Deijl, E. (2023), Verificatie van WAQBANK / D-FAST Bank Erosion : analyse van de ontwikkeling van negen KRW-Maasoevers, rapport Deltares, Deltares, Delft, 140 p. pp.
- van Duuren, K. P. (2022), Flow processes forcing the development of the scour hole Beerenplaat in the Rhine-Meuse delta, Master's thesis, Delft University of Technology.
- Fugro Ingenieursbureau (2002) Laboratoriumresultaten betreffende morfologisch modelleren (datarapport). opdracht nummer H-4086.
- De Goederen, S. (2022) Stroomsnelheden in het Spui. Nota RWS/WNZ/NOV/2022.04. 3 juni 2022.
- Hendriks, E., and F. Schuurman (2017), Modelling alternatieve loswal locaties, rapport Deltares, Deltares, Delft, 78 p. pp.
- Hoffmans, G.J.C.M., en H.J. Verheij (1997): Scour Manual. ISBN 9054106735.
- Huismans, Y., O. van Duin (2016) Advies beheer rivierbodem van de Rijn-Maasmonding. Eindadvies project "Advies beheer rivierbodem RMM". Deltares-rapport 1208925-000-ZWS-0040.
- Huismans, Y., H. Koopmans, A. Wiersma, T. de Haas, K. Berends, K. Sloff, E. Stouthamer (2021) Lithological control on scour hole formation in the Rhine-Meuse Estuary, *Geomorphology*, Volume 385, 2021, 107720, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107720>.
- van der Kaaij, T, H. van den Boogaard, K. Kuijper, K. Sloff, J. van Zetten (2010) Herstel van de "trapjeslijn" in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas (Fase 2). Rapport 1002366, Deltares, 26 april 2010.

- van der Kaaij, T., V. Chavarrias, and W. Kranenburg (2022), RMM 3d, een nieuw 3d model van de Rijn-Maasmonding in D-HYDRO: Vergelijking met zout- en debietmetingen najaar 2018, Tech. rep., Deltares, the Netherlands.
- Kirichek, A., K. Cronin, L. de Wit, E. Meshkati Shahmirzadi, D. van Keulen, and J. Terwindt (2021), PRISMA I : final report, rapport Deltares, Deltares, Delft, 198 p. pp.
- Koopmans, H. (2017), Scour holes in tidal rivers with heterogeneous subsoil under anthropogenic influence, Master's thesis, Delft University of Technology.
- Kranenburg, W., K. Sloff, D. van Keulen, V. Chavarrias, M. Hijma (2024) Langsdammen NWW-Scheur. Aanvullend effectonderzoek morfologie en verzilting. Deltares rapport 11210695-002. September 2024.
- Kuijper, C., en T. van der Kaaij (2009): Herstel van de "trapjeslijn" in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas. Fase 1: Voorstudie naar de effecten op de zoutindringing. Deltares-rapport 1002366-001-ZKS-0003.
- Nabi, M. (2012) Computational Modelling of Small-Scale River Morphodynamics. A new approach. PhD thesis TUDelft. Juni 2012.
- Nielsen, I., Y. Huismans, en A. T. Hoitink (2024), Ebb-dominant mixing increases the seaward sediment flux in a stratified estuary, Authorea Preprints.
- Oldenhof, M. (2024), Understanding the development and behaviour of scour holes in fluvial lowland rivers, no. 2024R-002/WEM-002 in CE&M Research Report, University of Twente, Netherlands.
- Rijkswaterstaat (2019a) Beknopt overzicht waterstandstrends Rijn-Maasmonding 1975-2018
- Rijkswaterstaat (2019b) Het verhaal van de Rijn-Maasmonding versie 1.1
- Rijkswaterstaat (2024a) Karakteristiek huidige grootschalige waterbeweging.
- Rijkswaterstaat (2024b) Overzicht en karakterisering morfodynamiek Nieuwe Waterweg km 1023-1032, 2016-2024
- RIZA (2000) Bodem in beeld. RIZA rapport 2000.005. Maart 2000.
- Sloff, C.J., G.A. van den Ham, E. Stouthamer, J.W. van Zetten (2011) Beheer bodemligging in Spui, Oude Maas en Noord. Rapport Deltares 1203316-000. Februari 2011.
- Sloff, K., Van Spijk, A., Stouhamer, E., Sieben, A. 2013. Understanding and managing the morphology of branches incising into sand-clay deposits in the Dutch Rhine Delta, International Journal of Sediment Research, Volume 28, 127-138, [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6279\(13\)60025-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60025-6)
- Sloff, K. (2022): Casestudie erosieprocessen Spui. Deltares-rapport 11208033-004-ZWS-0003, december 2022.
- Snippen, E., A. Fiolle, H. Geelen, A. Kamsteeg, A. van Spijk, and T. Visser (2005), Sediment in (be)weging : sedimentatiebalans Rijn-Maasmonding 1990-2000, RIZA rapport; 2005.023 .
- Spruyt, A., H. R. A. Jagers, A. Canestrelli, and W. Ottevanger (2015), An immersed boundary method for modeling bank retreat in 2d numerical models, in RCEM.

- Stouthamer, E. en T. de Haas (2011) Erodibiliteit en risico op zettingsvloeiing als maat voor stabiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodems van de Noord, de Oude Maas en het Spui. Universiteit Utrecht. Rapport 6 januari 2011.
- Veenstra, J., T. van der Kaaij, A. Visser, A. Becker, en R. van der Wijk (2022), Ontwikkeling zesde-generatie Rijn-Maasmonding-model : modelbouw, kalibratie en validatie 2D model, rapport Deltares, Deltares, Delft, 158 p. pp.
- Veenstra., J., B. Domhof, S. Laan, T. Visser, R. van der Wijk (2021): Kenmerkende Waarden Rijn-Maasmonding. Deltares-rapport 11205232-007-ZKS-0003, januari 2021.
- Visser, T. (2023) 11208053-004-ZWS-0017\_v1.0-Zesde generatie Rijn-Maasmonding beno-deelmodel van de Biesbosch
- Wiersma, A. (2015) De ondergrond van de Boven Merwede, Dordtsche Kil, Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg. In relatie tot stabiliteit van oevers, onderwatertaluds en waterbodems. Deltares rapport 1208925-000-ZWS-0024. Maart 2015.
- Wiersma, A. en M. Hijma (2015) Ondergrondopbouw van de Nieuwe Waterweg. Deltares rapport 1210219-001. Februari 2015.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

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