

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Wat wil de delta?



Universiteit
Utrecht



Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Wat wil de delta?

Uitzicht met inzicht: neogeografische kaarten
van het Nederlandse laagland
in een toekomst met zeespiegelstijging.



Universiteit
Utrecht

Wat wil de delta?

Uitzicht met inzicht:

Neogeografische kaarten van het Nederlandse laagland
in een toekomst met zeespiegelstijging



Jesper Schra, Maarten Kleinhans, Kim Cohen, Marjolijn Haasnoot, Hans Middelkoop

Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie

April 2022



**Universiteit
Utrecht**

Samenvatting

Het klimaat verandert en dit zal de komende eeuw en ook daarna tot een hogere zeespiegel leiden. De snelheid en mate van stijging hangen af van de opwarming van de aarde, maar duidelijk is dat iedere graad opwarming een zeespiegelerfenis heeft van ongeveer 2.5 m. Nederland moet zich dus niet alleen sterk maken tegen klimaatverandering (mitigatie) maar moet zich ook aanpassen (adaptatie). Verschillende oplossingsrichtingen voor adaptatie zijn mogelijk, maar wat zou er gebeuren met de delta als we niets doen? Wat wil de delta eigenlijk zelf?

Om meer inzicht te krijgen in hoe de Nederlandse delta zich van nature zou kunnen gaan gedragen bij een snellere en steeds hogere zeespiegel zijn twee kaartbeelden gemaakt waarin de lage delen van Nederland getoond worden na een zeespiegelstijging van 2 meter en na een stijging 5 meter. Hierbij is een passieve houding van het waterbeheer verondersteld waarbij langs kust, rivieren en in polders de huidige maatregelen worden voortgezet, maar niet aangepast aan de veranderende omstandigheden. Deze veronderstelling is niet gedaan met het idee dat dit het beoogde toekomstscenario is, maar om inzichtelijk te maken hoe het huidige landschap zou kunnen reageren op de veranderingen. Voor deze studie waren de hoogtekartaal van Nederland en kaarten van de huidige landschapssituatie naar Vos et al. (2011, 2018) de basis. Bij de uitwerking van de +2 m en +5 m kaarten, ligt de focus op de reacties van het deltalandschap op de gestegen zeespiegel en de beweging van sediment door natuurlijke processen in het kustgebied, en daarnaast op de daaraan gekoppeld hogere waterstanden in de rivieren door opstuwing, en vernatting en plaatselijke verzilting van de polders door kwel. Gegeven alle aannames, zijn de +2 m en +5 m kaarten bruikbaar als 'uitzicht' op de toekomst en onderlegger voor de ontwikkeling van adaptatiescenario's.

Het kaartbeeld van Nederland verandert bij gestegen zeespiegel in vier opzichten.

1. Binnendijs ontstaan in een deel van de polders dras- en plasgebieden, met sterkere verzilting en kwel, minder mogelijkheden verzilting tegen te gaan, en grotere kans op wateroverlast. Het IJsselmeerpeil is, om te kunnen spuien nadat de pompen onvoldoende worden, gedwongen het zeespiegelpeil te volgen, maar het Markermeerpeil niet persé. Er ontstaat een polderlandschap waarin de peilen in grote binnenwateren en poldervakken nog sterker getrapt zijn dan tegenwoordig.
2. Ten tweede neemt de faalkans van waterkeringen toe, met name langs de rivierdijken tot ver landinwaarts. Dit is op de kaarten te zien als een kleurverandering van dijken. Daadwerkelijk falen van dijken, zoals dit bij een stormvloed vanuit zee en/of een passage van een grote afvoerpiek in de rivieren zou kunnen plaatsvinden, is op de kaarten niet afgebeeld omdat de locaties van doorbraken zeer onzeker zijn. Falen de rivierdijken, dan zet dit grote polders onder water en zal het zeer moeilijk zijn deze leeg te pompen. Dit wordt in een bijkaart getoond. Er wordt niet verwacht dat dijkdoorbraken tot het uitgroeien van nieuwe riviertakken leiden. Het blijft bij rivierdijkfalen bij Biesbosch-achtige zandwaaiers in onbedoelde retentiepolders.
3. Ten derde gaan buitendijs het huidig intergetijdengebied, het strand, en de uiterwaarden van de benedenrivieren vaker tot permanent onder water staan. In de Waddenzee neemt het intergetijdengebied aanzienlijk in oppervlak af, vooral onder hogere snelheden van zeespiegelstijging doordat er onvoldoende sediment is om mee te groeien. De grote wateren worden wat dieper. In de uiterwaarden gaan (droge) nevengeulen, ook wel groene rivieren genoemd, vaker meestromen en benedenstrooms staan de uiterwaarden permanent van dijk tot dijk onder water. Daarbij zal er langs de rivieren tot verder landinwaarts zoutindringing en getijdeinvloed zijn.

4. Een vierde verandering vindt hoofdzakelijk plaats in de morfologisch actieve getijdensystemen: de Westerschelde en de Waddenzee, inclusief de Eems-Dollard. Naar verwachting zullen grote delen van de Waddeneilanden en platen zich, zonder aanvullend waterbeheer, vaker overspoelen en zich beginnen te verplaatsen. De buitenbochten van getijgeulen in de estuaria zullen tot ver landinwaarts in diepte en grootte willen aanpassen, en daarmee de oevers neigen af te kalven, wat de kans op dijkvallen (en polder-inundatie) fors doet toenemen.

Er zijn per deelgebied effecten, maar er zijn ook belangrijke afhankelijkheden tussen deelgebieden en daardoor cascades van effecten over grotere afstanden te verwachten. Allereerst leiden toegenomen waterstanden op zee en in de watersystemen tot vergroot risico van falen van waterkeringen. Als in het kustbeschermingssysteem een bres ontstaat, kan dit in landschappen met voldoende sediment, zoals delen van Westerschelde, Eems-Dollard, en Friesland/Groningen, in principe ook weer herstellen (helen) als effect van natuurlijke hydrodynamiek. Plaatselijk kan in de kuststrook natuurlijke landophoging plaatsvinden, ook bij gestegen zeespiegelstanden. Op locaties waar sedimentaanvoer er niet is, kunnen bressen in waterkeringen niet vanzelf helen, en zullen deze juist uitschuren en verdiepen. Langs de rivieren is landinwaarts over grote afstanden opzet van de typische waterstanden te verwachten, als doorwerking van zeespiegelstijging. De effecten zijn daar tweeledig: in bovenstroomse richting is er naast opstuwning van rivierwater een verder effect door het dieper landwaarts doordringen van getij. In benedenstroomse richting speelt dat er herverdeling van rivierdebiet over de Rijntakken kan optreden. Deze optellende directe effecten van zeespiegelstijging vergroten de kans op ongewenst overstromen in alle deelgebieden in laag Nederland, en waar overstroming met brak water gebeurt zal dat ook de verzilting weer versterken.

De neogeografische kaarten voor toekomstige zeespiegelstanden tonen de algemene veranderingen in een met de bekende paleogeografische kaartserie van Vos et al. (2011) in vergelijkbare stijl, maar met toegevoegde en gewijzigde legenda-eenheden. De hoofdkaarten zijn digitaal beschikbaar gemaakt als PDF en als GIS-bestanden. Enkele tekstfiguren tonen uitsneden van de kaarten met daarin ook inundaties van polders als gevolg van dijkfalen, als illustratie van effect van toegenomen kans daarop.

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Schra, J., M.G. Kleinhans, K.M. Cohen, M. Haasnoot en H. Middelkoop (2022). Wat wil de delta? Uitzicht met inzicht: neogeografische kaarten van het Nederlandse laagland in een toekomst met zeespiegelstijging. Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie, i.o. Staf Deltacommissaris (rapport 31171979).

De kaarten zijn vrij toegankelijk op hoge resolutie: <https://doi.org/10.24416/UU01-9IT858>

Correspondentie kan worden gericht aan: m.g.kleinhans@uu.nl.

Inhoud

1 Inleiding	2
1.1 Indeling van Nederland in gebieden op basis van landschap en ondergrond	2
1.2 Landschapsveranderingen weergegeven in legenda-eenheden	4
2 Gekozen randvoorwaarden	7
2.1 Zeespiegelstijging.....	7
2.2 Klimaatverandering	7
2.3 Passief handelen in waterbeheer	7
2.4 Peilen van het IJsselmeer en Markermeer	8
2.5 Zoutindringing en verzilting	8
2.6 Waterstanden in de rivieren.....	9
2.7 Dijken	11
De Neogeografische kaart na 2 m zeespiegelstijging	13
De Neogeografische kaart na 5 m zeespiegelstijging	14
3 Beschrijvingen en onderbouwingen per gebied	15
3.1 Zuid-Zeeland	15
3.2 Midden+Noord Zeeland.....	16
3.3 Zuid-Holland-Zuid	17
3.4 Hollandse Kust en Randstad	18
3.5 Utrechtse Vecht en Hollands-Utrechts veenweidegebied	19
3.6 Centraal rivierengebied	20
3.7 Flevoland, Markermeer en IJ	25
3.8 IJsseldal en Liemers	25
3.9 Wieringermeer, IJsselmeer, Markermeer.....	27
3.10 Waddenzee en -eilanden West.....	28
3.11 Waddenzee en -eilanden Oost	29
3.12 Eems-Dollard	30
3.13 Fries-Groningse klei	30
3.14 Fries en Overijssels veengebied.....	31
4 Reflectie	32
4.1 Nederland, een landschap met verleden	32
4.2 Veranderende omstandigheden door klimaatverandering.....	32
4.3 Verwachte veranderingen van het Nederlandse landschap bij passief beheer	32
4.4 Consequenties voor oplossingsrichtingen voor adaptatie	34

1 Inleiding

Deze publicatie beschrijft, aan de hand van landschapskaarten, hoe de Nederlandse 'delta' kan veranderen bij een zeespiegelstijging van 2 of 5 meter. Deze scenariostudie is gedaan in het kader van de opdracht 'Natuurlijk lange termijn gedrag' van de Staf Deltacommissaris (kenmerk: 31171979) met als doel het begrijpen en visualiseren van het natuurlijke gedrag van de Nederlandse 'delta' bij een verdere, mogelijk veel snellere, zeespiegelstijging als we niets meer doen dan we al deden. De gedachte hierbij is dat het landschap, de ondergrond de natuurlijke morfologische processen de aanpassingsmogelijkheden mede bepalen, en het daarom belangrijk is het ontstaan en natuurlijk gedrag hiervan te begrijpen. Waar 'delta' wordt geschreven, is in feite sprake van een ingepolderde kustvlakte waarin moerasvorming, getijdewerking en rivieren nog maar beperkte invloed hebben. De laaggelegen delen van Nederland ontwikkelden zich in de tweede helft van het Holoceen als een uitgestrekt kustmoeras achter een forse strandwal. Alleen het door Rijn en Maas bediende deel van de kustvlakte functioneerde daadwerkelijk als delta.

Om het natuurlijke gedrag te kunnen illustreren, wordt in deze studie aangenomen dat menselijk handelen gelijk blijft aan de huidige situatie (locaties dijken en kunstwerken zoals in 2020; suppletievolumes en onderhoud van dijken en kunstwerken zoals in 2010-2020, inclusief afronding van lopende versterkingsprogramma's; polderpeilen en gemaalcapaciteit zoals in 2020). De aanname van deze passieve waterbeheerstrategie in reactie op zeespiegelstijging maakt dat deze studie een toekomst schetst die onwaarschijnlijk is. De studie biedt echter wel inzicht ter ondersteuning van het ontwikkelen van een oplossingsrichting die rekening houdt met het natuurlijke gedrag van de Nederlandse delta. Een oplossingsrichting die hier tegen in gaat vereist meer inspanning qua aanleg en onderhoud, een oplossing die hierin meegaat is met minder inspanning vol te houden.

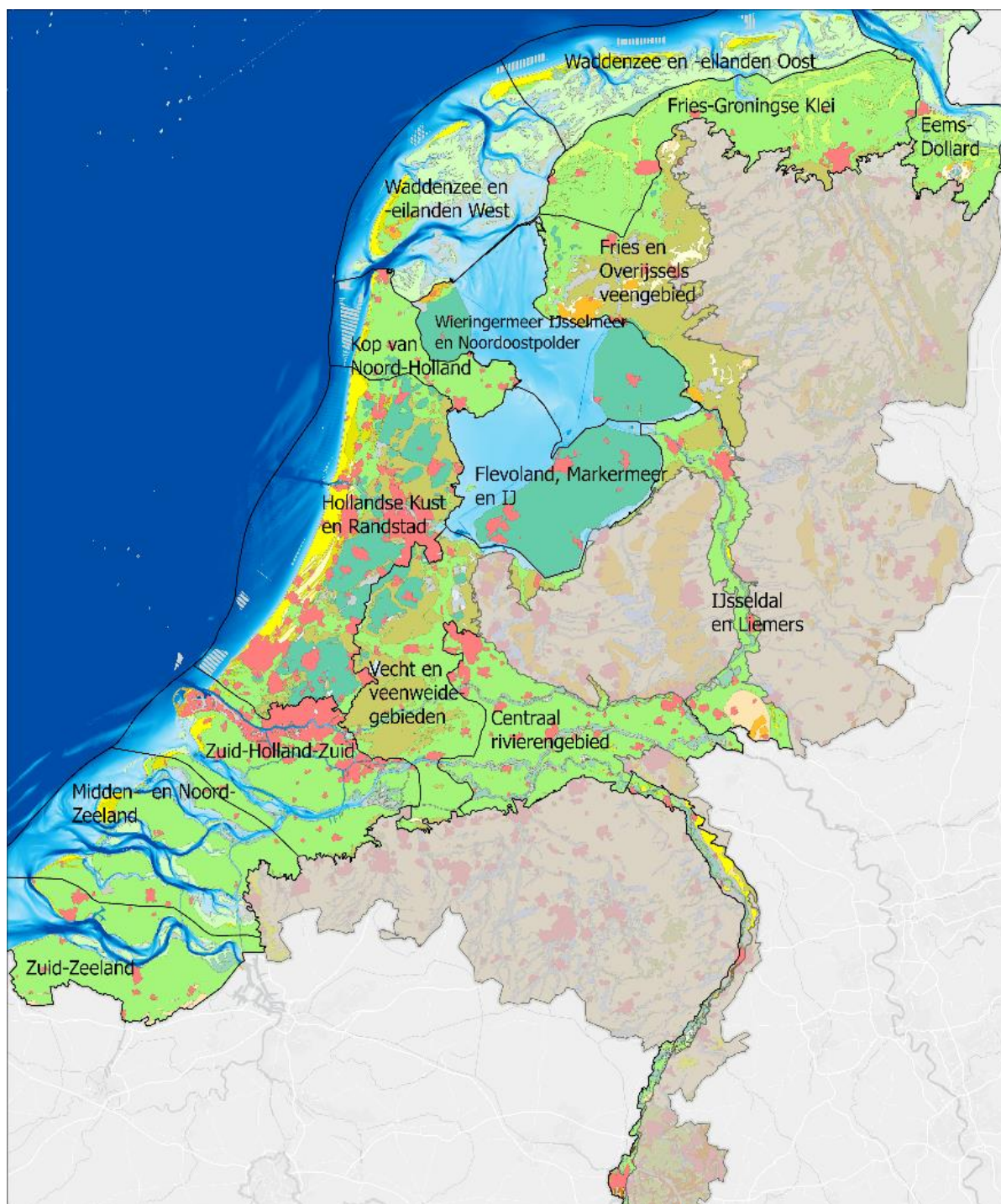
De publicatie vat ook de overwegingen samen achter de in de twee kaarten getoonde veranderingen. Deze veranderingen zijn onder meer gebaseerd op onderzoek van het projectteam en discussie met experts. Als onderdeel van het proces van ontwikkeling van de kaart is op 10 November 2021 en daarna gesproken met een aantal experts: Ad van der Spek (Deltares en UU), Marcel Taal (Deltares), Frans Klijn (Deltares en TUD), Gu Oude Essink (Deltares en UU), Quirijn Lodder (Rijkswaterstaat), Jelmer Cleveringa (Arcadis), Jana Cox (UU), Steven Weisscher (UU) en Jos van Alphen (Staf Deltacommissaris). De verantwoordelijkheid voor de keuzes in de kaarten en de verwoording in de toelichtingen ligt alleen bij de auteurs.

1.1 Indeling van Nederland in gebieden op basis van landschap en ondergrond

We onderscheiden een aantal deelgebieden in laag Nederland die ieder hun eigen karakter hebben en daardoor verschillend gaan reageren op een (sneller) stijgende zeespiegelstijging in combinatie met veranderend klimaat (Figuur 1). De snelheid en mate van zeespiegelstijging zijn echter niet de enige aanleiding, of 'trigger', voor verandering. Per deelsysteem wordt ook besproken wat de gevolgen van klimaatverandering in het achterland (hoog Nederland maar ook de stroomgebieden in de buurlanden) kunnen geven voor de toenemende kansen op grote hoogwaters in de rivieren. Ook de gebiedseigen karakteristieken zoals de inrichting en het waterbeheer (en bodembeheer) kunnen een trigger zijn voor verandering. Daarnaast zullen cascadegevolgen (consequenties voor andere gebieden) benoemd worden, bijvoorbeeld doordat ze zijn verbonden via de rivieren. Deze oorzaken van veranderingen noemen we de *zee-trigger*, de *achterland-trigger*, de *gebiedseigen-trigger* en *connectiviteits-trigger* voor consequenties in andere gebieden.

Het doel van de kaarten is om de systeemveranderingen als gevolg van een hoge zeespiegelstijging weer te geven. Het kaartbeeld voor 2000 AD uit de kaartserie Atlas van Nederland in het Holoceen (Vos et al.

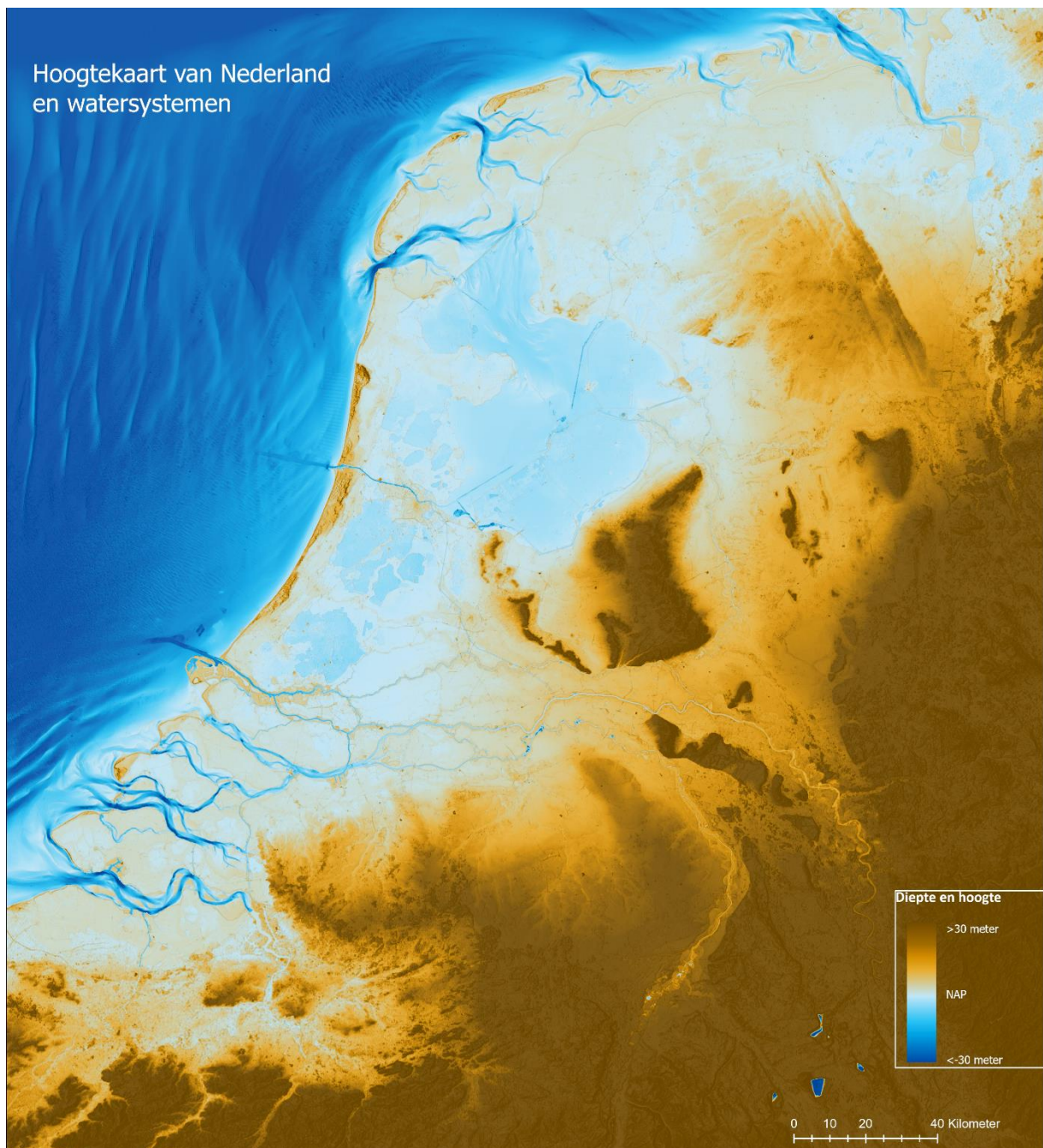
2011, 2018) is het uitgangspunt voor de nieuwe kaarten geweest. Daarnaast is voor het algemene beeld van de hoogteligging van het land, de grote wateren en de zee een bathymetrische kaart (Figuur 2) als achtergrond gebruikt als canvas bij de expertbijeenkomsten en in de uiteindelijke kaarten.



Figuur 1. Gebiedsindeling laag Nederland met benaming. De deelgebieden worden in de tekst min of meer met de klok mee besproken, te beginnen bij Zuid-Zeeland. Achtergrond: kaartbeeld voor 2000 AD van Vos et al. (2018) aangevuld met bathymetrie uit diverse bronnen (zie Fig. 2).

Kennis en kaartvisualisatie van zich ontwikkelende deelsystemen in het verleden (zoals bijvoorbeeld in de kaartserie Atlas van Nederland in het Holoceen) zijn niet eenvoudig als analogieën te gebruiken voor toekomstverkenningen. Dit heeft met name te maken met de (veel snellere) snelheid van de zeespiegelstijging in de toekomst en de aannames over waterbeheermaatregelen, waaronder de cumulatieve- en overervings-effecten van een millennium lang waterbeheer, bodemdaling en verlies van

veengebieden. Daarnaast is de toevoer van sediment door de rivieren in de jongste eeuw wezenlijk afgenomen (Van der Perk et al., 2019). Toch zijn er aanwijzingen in de ontwikkeling in het verleden die generiek inzicht geven in mogelijke toekomstontwikkelingen. Hierbij gaat het onder meer om landwaartse verplaatsing van strandwallen en Waddeneilanden bij snelle zeespiegelstijging, en inbraken van de zee in gebieden die laaggelegen zijn geworden door waterbeheer en bodemdaling.



Figuur 2. Hoogtekaart van Nederland en watersystemen, samengesteld uit Lidardata (voor Nederland: www.ahn.nl), bathymetrische data (<https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>) en voor het omliggend gebied EMODNET (<https://portal.emodnet-bathymetry.eu/>).

1.2 Landschapsveranderingen weergegeven in legenda-eenheden

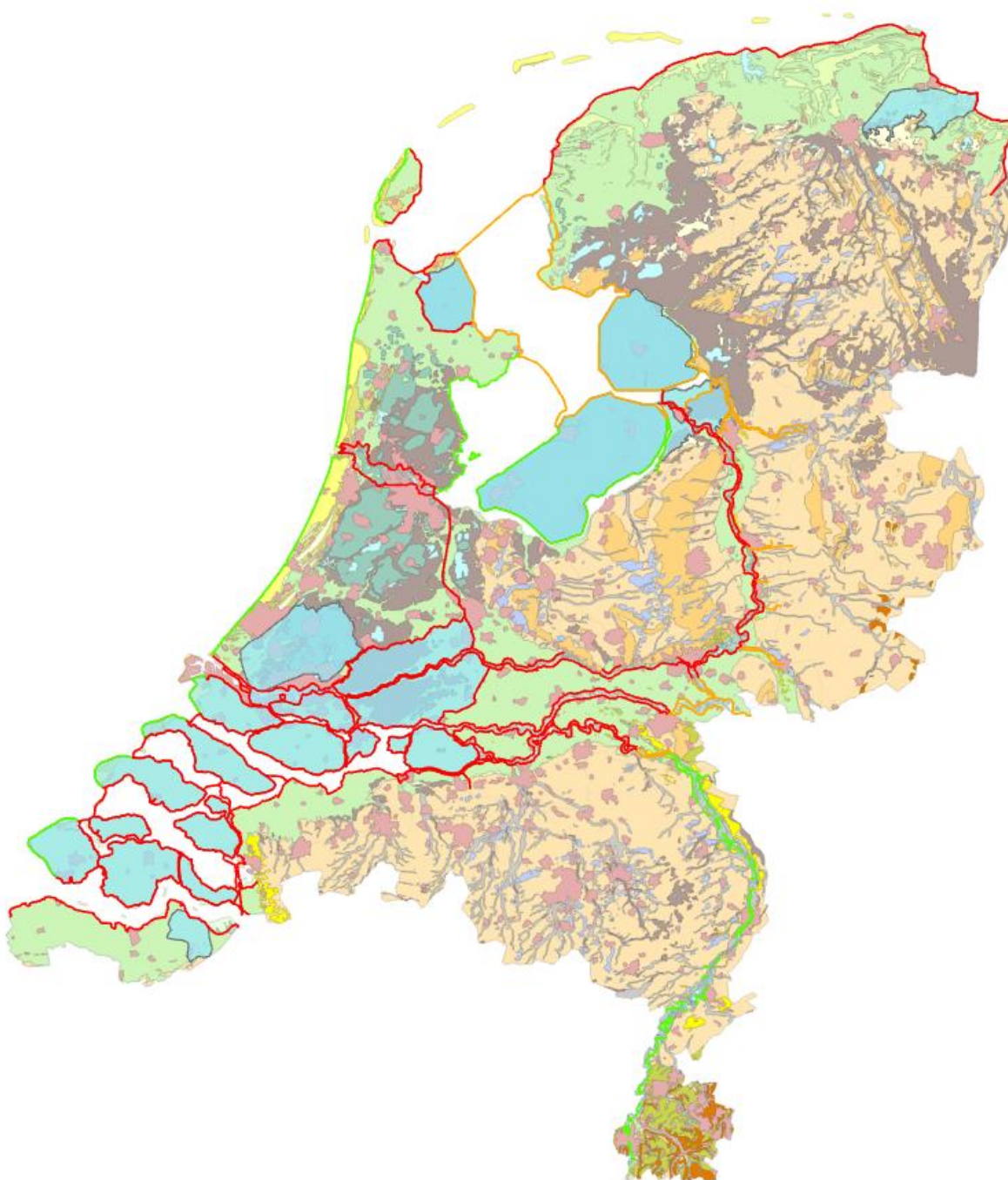
Om de veranderingen als gevolg van een gestegen zeespiegel te tonen zijn nieuwe legenda-eenheden toegevoegd (Figuur 3). Droogmakerijen, welke in de kaartenserie van Vos op de kaarten 1850 en 2000 AD

verschenen in met name West Nederland, zijn omringd door ‘veengebieden’ (veenweide-poldergebieden) en diverse andere ‘bedijkte gebieden’ (o.a. polders rivierengebied) zoals die vanaf 1250/1500 AD in beeld kwamen. Dit zijn poldergebieden die vanaf de bedijking een historische ontwikkeling hebben ondergaan van ontginning en waterbeheer en als gevolg daarvan bodemdaling. De kaarten voor gestegen zeespiegel laten de trendbreuk door nieuwe processen die in deze gebieden bij zeespiegelstijging gaan optreden zien als nieuwe legenda-eenheden. De eerste trendbreuk is die van verzilting van het grondwater en slootwater in met name de diepst gelegen polders (de droogmakerijen). Dit speelt lokaal al in de huidige situatie, en wordt met waterbeheer tegengegaan (met name doorspoelen). Het gebied waarin het zal optreden wordt groter (Delsman, 2021) en de mogelijkheden tot inzetten huidig gebruikelijke tegenmaatregelen minder. De tweede trendbreuk is die van verdrassing van veenweidegebieden: door hogere neerslagextremen in combinatie met bodemdaling en kweldruk komt het grondwaterpeil dichterbij het maaiveld dan in de huidige situatie, omdat dit niet langer met verdere peilverlagingen en bemaling tegengegaan zal worden (vanwege de voor deze kaarten aangenomen passieve waterbeheerstrategie). Ook delen van bedijkte riviervlakten en kwelders worden op dezelfde manier moerassig en/of ziltig.

- Verzilte bedijkte kwelders en riviervlakten
 - Verzilt duingebied
 - Verzilte bedijkte kwelderruggen
 - Drassig bedijkt veengebied
 - Drassige bedijkte kwelders en riviervlakten
 - Drassige bedijkte kwelderruggen
 - Verzilt bedijkt veengebied
 - Verzilte droogmakerijen
 - Permanent natte uiterwaarden
-
- Dijk onder zware druk
 - Dijk onder middelmatige druk
 - Dijk onder lichte druk

Figuur 3. Nieuwe legenda-eenheden in de kaarten voor +2 en +5 m, ingevoerd om de veranderingen ten opzichte van het historisch ontstane kustvlaktelandschap (duingebieden, polders, uiterwaarden) weer te kunnen geven.

Daarnaast wordt op de kaarten aangegeven waar dijken minder bescherming gaan bieden tegen overstroming, wat betekent dat het gebied erachter een grotere kans heeft op overstromen (Figuur 3). In een deelkaart (Figuur 4) worden voorbeelden gegeven waarin gebieden waar een dergelijke overstroming plaats kan vinden als geïnundeerd staan weergegeven (zie ook de Bruijn en Klijn 2009). Dit is niet op de hoofdkaarten aangegeven anders dan de indicatie van onveiligere dijken, omdat dijkdoorbraken op veel plaatsen kunnen plaatsvinden, niet noodzakelijkerwijs tegelijkertijd zullen optreden, en er cascades kunnen optreden van inundatie van naburige gebieden. De inundatie-voorbeelden kunnen vergeleken worden met de overstromingsscenario's voor de huidige situatie: <https://basisinformatie-overstromingen.nl/#/>.



Figuur 4. Voorbeelden van gebieden met risico op langdurige inundatie na dijkfalen (blauw), door bij 5 m zeespiegelstijging onveilig geworden huidige dijken. Achtergrond: kaart van Vos et al. (2018) van 2000 AD.

2 Gekozen randvoorwaarden

In dit hoofdstuk beschrijven we welke keuzes we gemaakt hebben in de veranderingen van de randvoorwaarden van de laaggelegen delen van Nederland. Hieronder verstaan we niet alleen de randvoorwaarden in de zin van zeespiegelstijging en klimaatverandering, en menselijke ingrepen (of de afwezigheid daarvan), maar ook de hydrologische veranderingen binnen de 'delta' die deze op hun beurt weer zouden teweegbrengen, en die daarmee op hun beurt ook weer de 'randvoorwaarden' vormen voor morfologische veranderingen.

2.1 Zeespiegelstijging

De twee kaartbeelden zijn gemaakt op basis van randvoorwaarden voor twee verschillende toekomstige situaties die duidelijk afwijkend zijn van de huidige situatie. In overleg met de geraadpleegde experts is als eerste situatie gekozen voor een zeespiegelstand (ZSS) van 2 m+NAP, met daarbij een zeespiegelstijgingssnelheid van 10 millimeter per jaar (gemiddeld 1 meter per eeuw), en als tweede situatie voor een zeespiegelstand van 5 m+NAP met meer dan 20 millimeter per jaar (gemiddeld meer dan 2 meter per eeuw). Aan deze situaties is geen specifieke tijdshorizon gekoppeld, omdat ze alleen bedoeld zijn om de natuurlijke reactie van de delta te verkennen. Deze scenario's zijn wel denkbaar in de komende 80 jaar (voor 2 m) tot 150 jaar (voor 5m) volgens een kleine kans scenario met een hoge opwarming en een zeer grote en versnelde bijdrage van Antarctica (Fox-Kemper et al., 2021). Over honderden jaren zijn een stijging van 2 en 5 m ook reële situaties bij lagere opwarmingsscenario's.

2.2 Klimaatverandering

Beide kaartbeeld situaties veronderstellen een klimaatopwarming van enkele graden t.o.v. de 19^e eeuw (minstens de 2 graden waar het Parijs-akkoord naar streefde onder te blijven) en daarmee veranderende neerslagpatronen over Europa, leidend tot grotere en meer frequente hoogwaters op de grote rivieren in de winter en lagere afvoer in de zomer (KNMI 2021, Sperna Weiland et al. 2015). In die situatie wordt verwacht dat in Nederland zelf in de zomer gemiddeld een vergroot neerslagtekort optreedt (er is vaker droogte), terwijl de neerslag die valt grotere extremen gaat vertonen (KNMI 2015, 2021). Volgens de KNMI-2014 scenario's neemt de winterneerslag (eind deze eeuw, in het hoge scenario Wh) toe met 30%, en de hoogte van de extreme 10-daagse neerslagsom (met jaarlijkse overschrijdingskans = 1/10) met 25%. Deze 10-daagse extreme neerslagsom neemt in de zomer tussen 5% en 40% toe, ondanks dat de zomers gemiddeld droger gaan worden. De combinatie van gestegen zeespiegel met deze andere oorzaken maakt in westelijke polders het wegpompen van overvloedig regenwater lastiger en langzamer.

2.3 Passief handelen in waterbeheer

De uitwerking van het uitgangspunt van gelijkblijvend menselijk handelen is niet eenduidig. We kiezen bij dijk- en kustbeheer in de scenario's voor grote passiviteit in de zin dat er geen adaptieve maatregelen genomen worden, om de kaarten een rol te geven in het debat over de inrichting van Nederland bij veranderende omstandigheden. Dit betekent dat stormvloedkeringen en dammen in deze scenario's niet worden aangepast (dus niet hoger/sterker gemaakt), dijken na afronding van het huidig lopend hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) niet worden verlegd en/of verzaamd en verhoogd, het suppletievolume voor de kust gelijk blijft en ook de spui- en pompcapaciteit gelijk blijven. De huidige pompcapaciteit in polders is er vooral voor de afvoer van piekbuien (het grootste volume) en in de rest van de tijd wordt ze ook gebruikt voor wegpompen van kwelwater, en voor het inlaten en doorspoelen om droogte en verzilting tegen te gaan. In de scenario's blijft men de bestaande pompcapaciteit en inlaatpunten (voor zover die niet zelf verzilten) zo effectief mogelijk inzetten (en voor droogtemaatregelen ook de waterbuffers in

Markermeer en IJsselmeer). Verder nemen we aan dat de kunstwerken (dijken, stormvloedkeringen, pompen etc.) blijven bestaan en dat enig onderhoud dus nog wel plaats vindt.

De uitwerking van het 'passief handelen' laat nog wel enige ruimte voor interpretatie en keuzes, omdat het huidige handelen deels adaptief is. Zo is de reeks locaties waar de 12 miljoen kubieke meter per jaar aan suppletiezand wordt neergelegd niet vastgelegd, en zijn er protocollen voor spuien, keringen en pompen in reactie op omstandigheden. Tot slot zijn de huidige stedelijke gebieden gehandhaafd, ongeacht of dit binnen het huidige waterbeheer onder veranderende omstandigheden mogelijk zou zijn. Scenario's over uitbreiding van stedelijk gebied of infrastructuur zijn niet meegenomen.

2.4 Peilen van het IJsselmeer en Markermeer

Als gevolg van een gestegen zeespiegel kan het huidige IJsselmeerpeil steeds minder goed gehandhaafd worden: de spui- en pompcapaciteit bij de Afsluitdijk hiervoor zijn te klein. Steeds vaker is het meerpeil daarom hoger en uiteindelijk stijgt het IJsselmeerpeil mee met de zeespiegel. Bij 2 m ZSS levert dit vooral veiligheidsproblemen op voor de IJsselmeerdijken onder extreme omstandigheden, zoals NW-wind die spuien onmogelijk maakt in combinatie met springvloed en hoge IJsselafvoer. Door de Houtribdijk is in het Markermeer nog een lager peil te handhaven, evenals in de Randmeren. De inrichting van Amsterdam en de toestand van de Markermeerdijk vereisen dat ook min of meer (het Markermeerpeil niet laag houden, betekent grote aanpassingen bij Amsterdam, of inundatie). Bij 5 m ZSS zal het IJsselmeerpeil verder mee stijgen, en gebeurt dit – in wat mindere mate – ook in met Markermeer en de Randmeren. Dit heeft grote gevolgen voor de polders langs het IJsselmeer, omdat de dijkhoogte onvoldoende bescherming biedt tegen overstroming. Daarnaast zal bij NW storm en hoogwater veel water over de Afsluitdijk slaan, waardoor er geregeld zout water in het IJsselmeer terechtkomt. Dat is daar niet goed meer weg te krijgen, en zal waarschijnlijk leiden tot een brakwaterzone in het IJsselmeer achter de Afsluitdijk. Ook zoute kwel draagt hieraan bij. Dit vindt nu al plaats en neemt toe met een stijgende zeespiegel (Haasnoot et al. 2019; Delsman, 2021).

2.5 Zoutindringing en verzilting

Voor zoutindringing die leidt tot verzilting is in onze kaartbeelden gebruik gemaakt van bestaande modelstudies (Delsman 2021). Dat werk (Figuur 5) geeft een overzicht van de verschillende voor verzilting gevoelige gebieden. De gestegen zeespiegel is hierbij de feitelijke randvoorwaarde, maar omdat grondwaterprocessen langzaam verlopen en sterk afhankelijk zijn van de karakteristieken van de ondergrond, waterbeheer en bodemhoogte, zijn de tijdschalen van de vertraagde reacties erg afhankelijk van het scenario. Figuur 5 splitst de verziltingseffecten die optreden uit naar de primaire oorzaken. Delsman (2021) onderscheidt een autonoom verziltingsproces als gevolg van huidige polderinrichting en gebruik in gebieden die ook nu al verziltingsproblematiek hebben, en het bijkomend verziltingsproces aangedreven door de verhoging van de zeespiegelstand.

Door de zeespiegelstijging neemt de kweldruk toe langs de Zeeuws-Zuid Hollandse estuaria en in Waddenzee incl. Eems-Dollard. Er is ook een toename van de kweldruk van zout grondwater op enige diepte in de kustzone, en een effect van opdrijven van de zoetwaterbel in de Hollandse duingebieden. Bij 2 m ZSS heeft dat laatste nog een beperkt effect, bij 5 m ZSS slinkt de zoetwaterbel omdat ze draineert langs laagtes in het duingebied en treft dan de drinkwatervoorzieningsfunctie van deze gebieden. Drainage van het bovenste deel van de zoetwaterbel gaat samen met aanzienlijke verkleining van het ondergrondse deel door optrekken van het zoutwaterfront waarop de lichter geworden zoetwaterbel drijft. Doordat in de zomer de rivierafvoeren lager worden neemt met een stijgende zeespiegel ook de zoutindringing in de mondingen van rivieren toe. Dit leidt tot een toename van zoute kwel langs de randen van de rivierpolders.

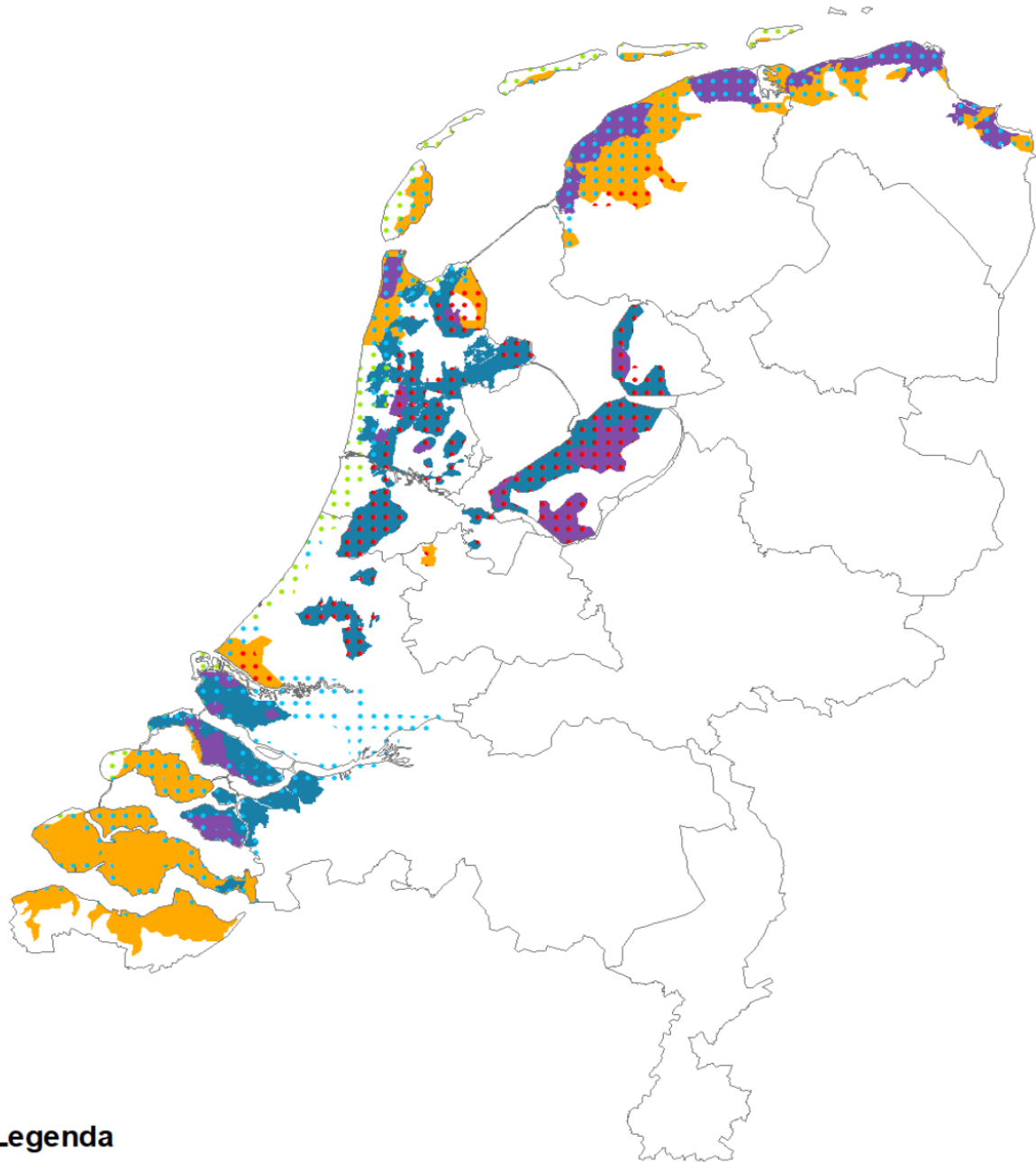
Bij elkaar zijn dit de directe effecten van zeespiegelstijging die in een randzone langs de kustwateren en de benedenrivieren voor verzilting (brakke kwel) zullen zorgen.

Dit komt bovenop de verzilting die reeds in de huidige situatie van poldergebruik en waterbeheer in een aantal droogmakerijen optreedt ('autonoom'). In deze gebieden wordt door zeespiegelstijging de kweldruk wat groter en verslechteren vooral de mogelijkheden om op de huidige wijze de sloten in de polders met uit het rivierengebied ingelaten zoetwater door te spoelen. In onze kaartbeelden is verzilting door beide oorzaken samen weergegeven.

2.6 Waterstanden in de rivieren

In de grote rivieren zal zeespiegelstijging via de open riviermondingen leiden tot opstuwung van de rivierwaterstanden. Dit kan leiden tot het permanent onder water staan van uiterwaarden met water dat permanent tegen de dijk staat, en tot het overstromen of anderszins falen van dijken bij passeren van piekafvoeren (bij lagere debieten dan in de huidige situatie). De toename van waterstanden en inundatieduur langs de rivieren zal vanaf bovenstrooms richting zee geleidelijk sterker worden, en daarmee ook de mate waarin uiterwaarden permanent onder water komen te staan, en de faalkans van de rivierdijken. Op de kaarten zijn deze effecten weergegeven in twee zones: benedenstrooms waar uiterwaarden permanent onder water staan en de huidige dijken onveilig worden, en een bovenstroomse zone waar uiterwaarden een deel van het jaar onder water staan en het belangrijkste effect de onveiligheid van de dijken is. De doorrekening van toegenomen waterstanden bij combinatie van hogere zeespiegelstanden met effecten van storm en getij en van hoogwaters met verschillende herhalingstijden vergt hydrodynamische modellering, die buiten het bestek van dit project valt. In plaats daarvan is een grove schatting gemaakt tot hoe ver stroomopwaarts en in welke mate de gestegen zeespiegel de rivierwaterstand verhoogt (en waarbij rekening is gehouden met getij), en is deze vergeleken en afgewogen tegen grenswaarden die in <https://waterinfo.rws.nl> zijn opgenomen: de Verhoogde Waterstand vanaf welke lage kades en uiterwaarden beginnen onder te lopen.

Als voorbeeld: bij Hoek van Holland is de Verhoogde Waterstand nu 2,20 m+NAP (het dagelijks hoogwater door vloed is er ca. 1 m+NAP). De verhoging wordt bereikt bij regelmatig voorkomende combinaties van verhoogde rivierafvoer en lichte stormopzet. Bij 2 m ZSS nemen we aan dat de vergelijkbare verhoogde waterstand daar 4,20 m wordt. Een vergelijkbare exercitie is voor meetstations langs de rivieren gedaan. Daar zijn de gemiddelde en verhoogde waterstanden wat hoger boven NAP (door het rivierverhang), maar is het ophoogeffect bij zeespiegelstijging minder dan de 2 m aan de monding. Vergelijking van de rivierwaterstanden 'bij 2 m ZSS' met de huidige kengetallen voor 'verhoogd', is gebruikt om vast te stellen tot hoever stroomopwaarts de rivieruiterwaarden veel vaker dan nu of zelfs permanent onder water zullen staan. In onze uitwerking is dat voor de Waal bij 2 m ZSS tot aan Zaltbommel het geval. De grens voor 'permanent' onder staan van de uiterwaarden is daarom in het kaartbeeld daar gelegd. In werkelijkheid gaat het niet om een harde grens maar om een zonerings, vanwege de verschillen in uiterwaardhoogte en fluctuaties in afvoer op de rivieren en waterstanden op zee.



Legenda

Toename verziltingsproblemen toekomst

- Toename verzilting door autonoom verziltingsproces
- Toename verzilting door zeespiegelstijging
- Zeespiegelstijging geeft mogelijk grondwaterproblemen, drinkwatervoorraad duinen niet in gevaar

Verzilting huidige situatie

- Kans op verzilting wortelzone
- Doorspoeling nodig wegens verzilting oppervlaktewater
- Doorspoeling en kans op verzilting

Figuur 5. Verandering van verzilting in Nederland bij 1 m verhoging van zeespiegelstand (Deltares: Delsman & Oude Essink 'NL later'; Delsman 2021). De kaart maakt onderscheid tussen (i) door tegenwoordig poldergebruik ('autonoom' van ZSS; rode stippels) en (ii) door zeespiegelstijging veroorzaakte verzilting (direct ZSS afhankelijk; blauw en groene stippels). Voor (ii) zijn ook berekeningen beschikbaar bij +5 m ZSS: *die* verzilting dringt dan verder landwaarts in (Delsman et al., 2020; Deltares 2021: Fig. 9).

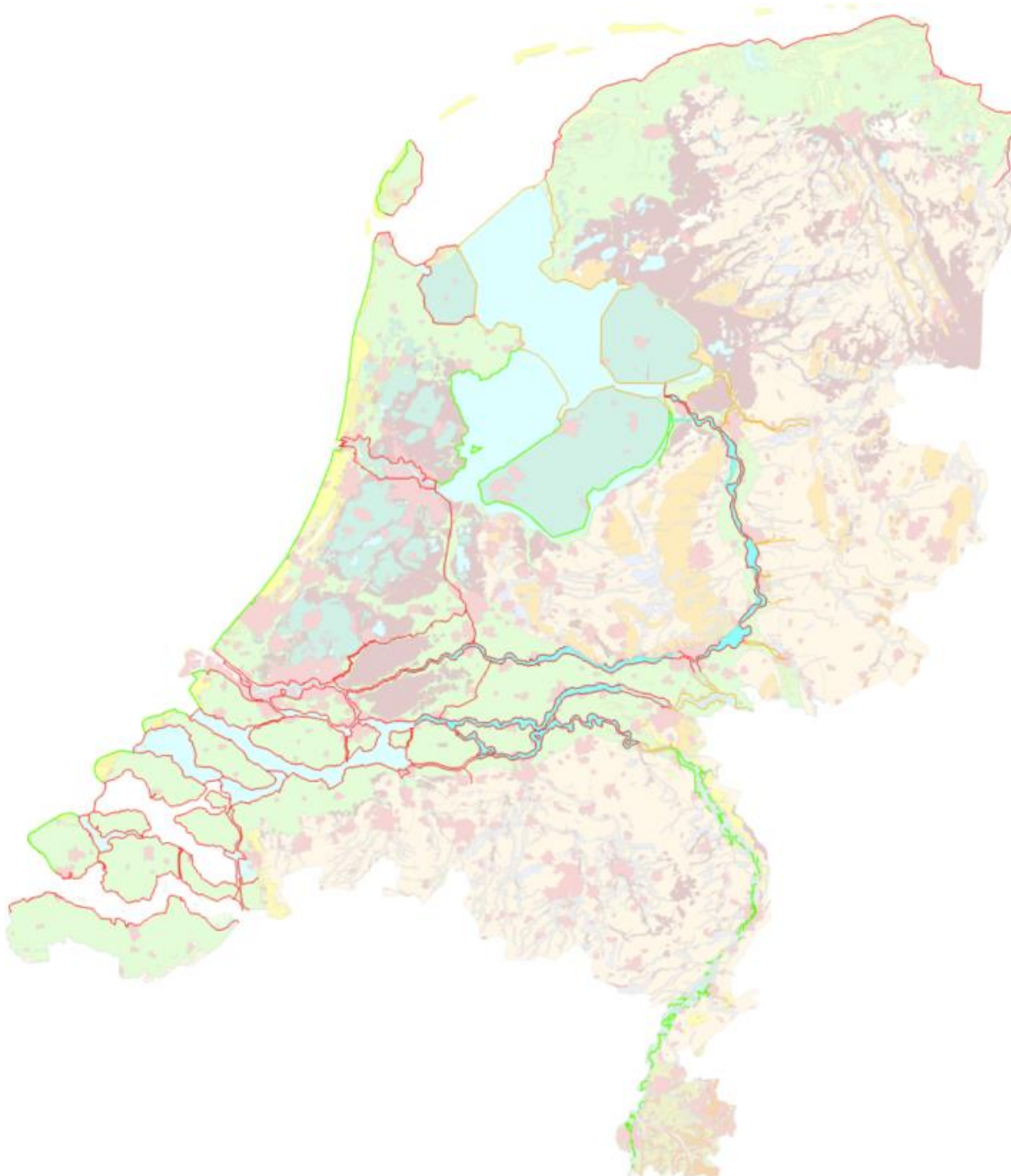
De toegenomen waterstanden in de rivieren zijn dus effecten die op grote afstand vanaf de zee merkbaar zijn en in de kaartbeelden zichtbaar: bij 5 m zeespiegelstijging tot in het oosten van het land. Daarmee wordt ook de verdeling van rivierdebiet op de splitsingspunten beïnvloed, maar in welke richting deze afvoerverdeling over de riviertakken verandert is niet zonder modellering vast te stellen. Ook morfologische veranderingen van de rivierbedding die hierbij kunnen ontstaan, en de effecten daarvan weer op de waterstanden zijn niet eenvoudig te bepalen, en worden daarom hier niet meegenomen. Een toegenomen debiet door de IJssel door fors gestegen waterstanden van de Waal, die in directe verbinding met de zee staat, levert voor deze tak een verder veranderde randvoorwaarde die bijvoorbeeld zou kunnen leiden tot een cascade van effecten in het IJsseldal en in het IJselmeergebied.

2.7 Dijken

De hoogte van de huidige rivierdijken is berekend op de waterstanden die de rivier bij maatgevende afvoer bereikt: nog iets hoger dan de Extreem Hoogwater grenswaarden uit Waterinfo.nl. Voor de Waal zijn hiervoor benaderingen overgenomen, die rekening houden met de huidige inrichting van de uiterwaarden en de geschatte ruwheid voor de stroming (Straatsma et al. 2019: piekafvoer van 16.000 m³/s bij Lobith en huidige zeespiegelstand; en piekafvoer van 18.000 m³/s bij 1.8 m ZSS). Daar waar de invloed van zeespiegelstijging volgens de scenario's de waterstand met meerdere decimeters tot meters ophoogt, zullen de dijken al bij flink minder extreme rivierafvoeren niet meer voldoen. Wellicht zijn ze nog hoog genoeg om de frequente hoogwaters te weerstaan, maar veel rivierdijken zijn niet berekend op permanente waterdruk, waardoor ze zullen verzwakken en er plas en dras achter de dijken ontstaat door kwel. In de kaarten wordt daarom aangenomen dat, op dezelfde locatie waar de uiterwaarden min of meer permanent plas en dras worden of zelfs onder water komen te staan, de dijken niet meer voldoen aan de huidige veiligheidsnorm. Vooral in het westen en midden van het land betekent het dat – bij passief handelen – verhoogde kans op dijkfalen en inunderen van grote polders (Figuur 6).

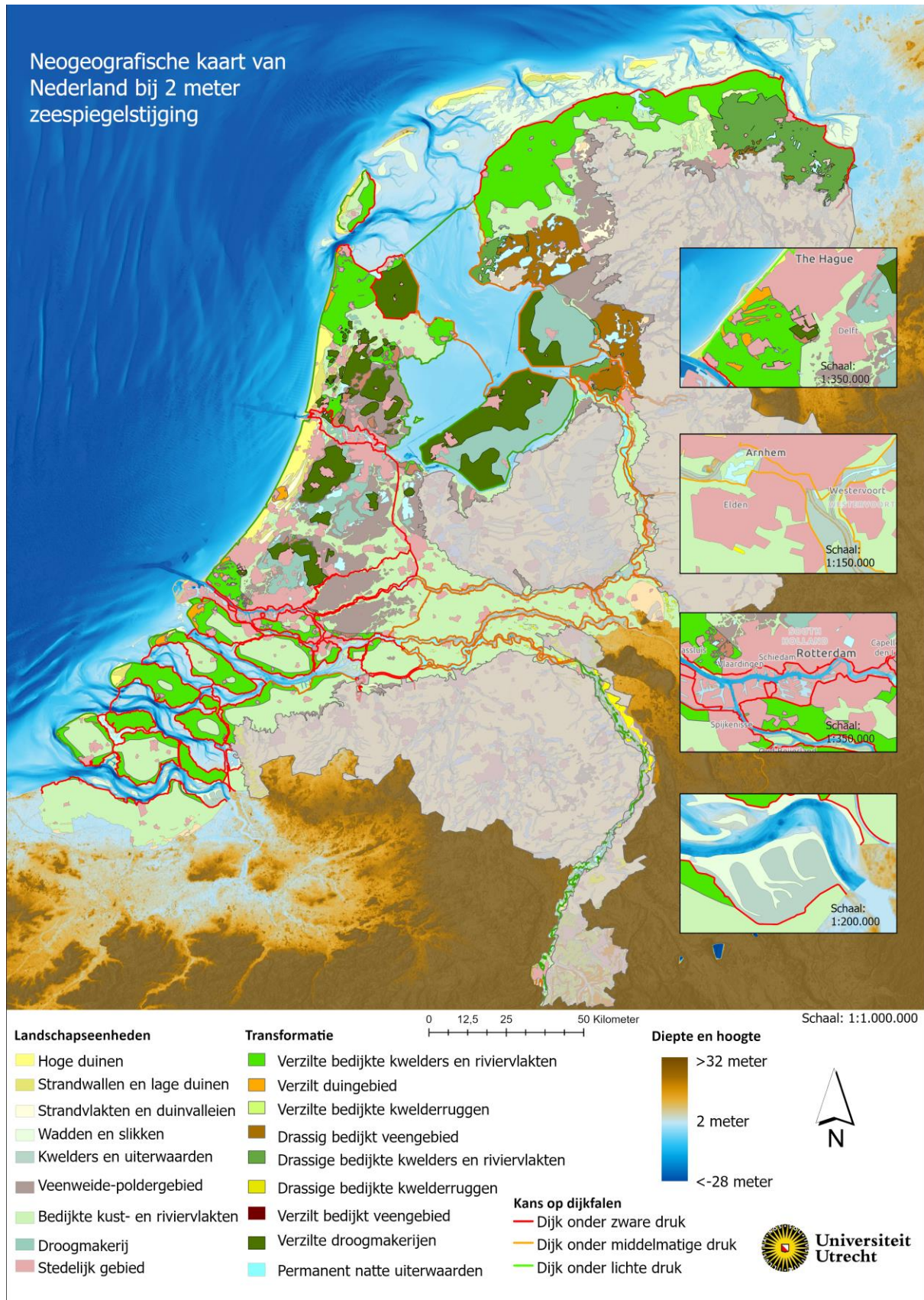
Bij grotere zeespiegelstijging wordt de faalkans van dijken geleidelijk hoger, en bij ca. 5 m ZSS stroomt het water bij hoge rivierafvoer of opstuwing bij stormvloed vanuit zee over de dijken en is de faalkans voor rivierdijken extreem hoog (Figuur 6). Bij 5 m ZSS zal de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg vrijwel permanent gesloten zijn. Als in een dergelijke situatie een afvoergolf van de Rijn komt zal deze in het benedenrivierengebied bij gesloten kering niet snel naar zee afgevoerd kunnen worden, maar wellicht deels tijdelijk in het gebied opgevangen moeten worden, wat tot nog hogere waterstanden leidt. Als gevolg van de grote onzekerheid over het gelijktijdig optreden van afvoerpieken en sluiting van de kering, en het bergbare volume in het mondingsgebied is dit effect hier buiten beschouwing gelaten.

De stijging van de waterstanden in de rivieren is niet helemaal lineair gekoppeld aan de zeespiegelstijging: daar waar uiterwaarden permanent onder water komen, is de weerstand voor de stroming verminderd door de grotere waterdiepte, waardoor een laag verhang optreedt. Ook zal de ruwheid van de uiterwaarden verminderen als er geen bomen meer kunnen groeien. Dit is in tegenstelling tot de situatie bovenstrooms, buiten de invloed van de zeespiegel, waar het wateroppervlak bij benadering hetzelfde verhang heeft als het landoppervlak van de uiterwaarden. Op basis van deze analyses is een inschatting gemaakt waar op de kaart de dijken groen (veilig), oranje (onveilig) of rood (gevaarlijk) zijn gekleurd.



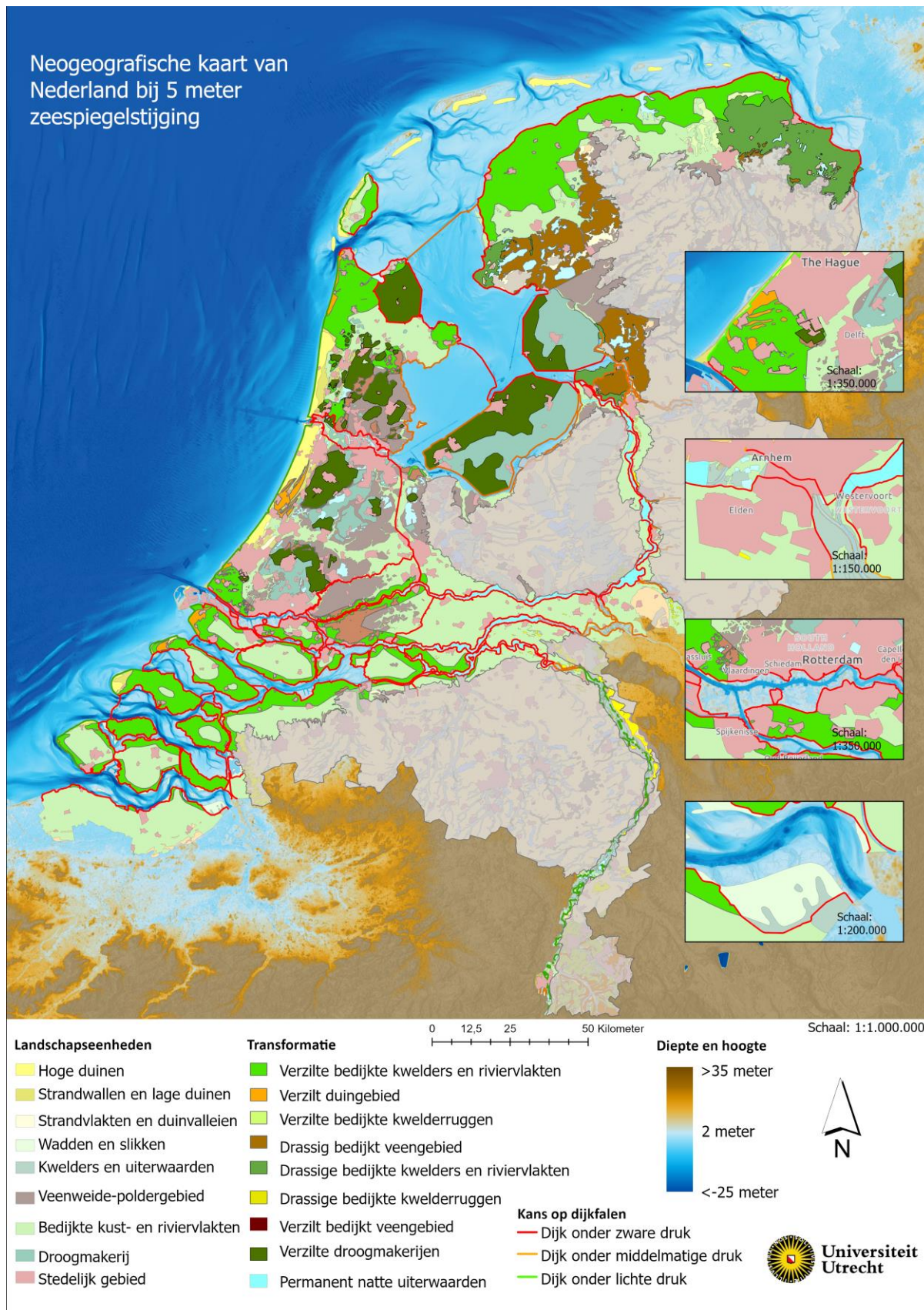
Figuur 6. In rood aangegeven: dijksecties die niet langer voldoen aan de huidige veiligheidsnormen, en dus een grote kans op dijkfalen hebben ten gevolge van 5 m zeespiegelstijging. Ook ver landinwaarts zijn de uiterwaarden langs de grote rivieren goeddeels permanent ondergelopen.

De Neogeografische kaart na 2 m zeespiegelstijging



Figuur 7. Kaart van Nederland in het scenario met 2 m zeespiegelstijging.

De Neogeografische kaart na 5 m zeespiegelstijging



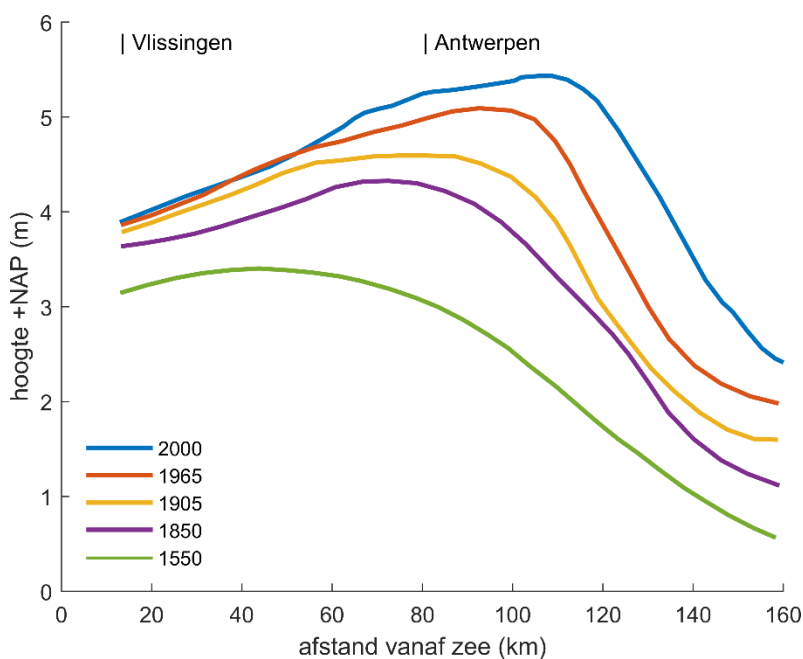
Figuur 8. Kaart van Nederland in het scenario met 5 m zeespiegelstijging. De grootste verschillen met de kaart voor het 2 m ZSS scenario zijn de verdwenen platen in de Wadden, Oosterschelde en Westerschelde en uiterwaarden in de rivieren, en het overspoelen en opschuiven van waddeneilanden.

3 Beschrijvingen en onderbouwingen per gebied

3.1 Zuid-Zeeland

Zee-trigger

In de Westerschelde bepaalt het zeeniveau mede de waterdiepte, zowel in de monding als ver landwaarts. Met een grotere waterdiepte is de bodemwrijving voor het getij kleiner en dringt de getijgolf sneller binnen. De getijamplitude neemt toe in landwaartse richting: bij Vlissingen is in de huidige toestand de stormvloedhoogte tenminste 3,70 m (<https://waterinfo.rws.nl>) en extreem hoogwater 4,10 m, maar bij Bath zijn stormvloedhoogte en extreem hoogwater 4,70 m en 5,35 m (Figuur 9). Het is niet waarschijnlijk dat het getij ook in deze mate zal zijn versterkt bij een hogere zeespiegel, maar de zeespiegelstijging telt op bij de hoogwaterstanden. Wel is het waarschijnlijk dat het baggervolume ten behoeve van toegang tot Antwerpen iets zal afnemen, ofschoon de geuldynamiek zal toenemen (van Dijk et al. 2021).



Figuur 9. Gemiddelde hoogwaterstand in de Westerschelde, en historische ontwikkeling daarin. Het linkerdeel van de grafiek is het deel tussen monding (Vlissingen) en de Nederlands-Belgische grens (Antwerpen). De toename van waterstanden in het verleden is veroorzaakt door landaanwinning en vaarwegverdieping, en slechts in zeer beperkte mate (enkele dm) door zeespiegelstijging (van der Spek 1997, Weisscher et al. in voorbereiding).

De ZSS van 2 m+NAP veroorzaakt een grotere kracht van de stroming op de oevers en dijken, met name rond de grens tussen Nederland en Vlaanderen. Dit zou bij falen van de oeververdediging kunnen leiden tot grootschalig uitbochten van de meanders van de Westerschelde (Cox et al., nog ongepubliceerde proeven in de Metronoom, Universiteit Utrecht). De toegenomen waterdiepte zal leiden tot import van zand, maar de snelheid van de zeespiegelstijging bepaalt in hoeverre de platen zullen meegroeien.. De rol van de huidige baggerstrategie bij de ophoging van de platen tot nu toe was groot, en een afgenomen baggerinspanning zou ertoe kunnen leiden dat het intergetijdengebied is afgenomen bij een ZSS van 2 m. In de kaart is het intergetijdengebied ongeveer de helft zo groot getekend. Het Verdrongen Land van Saeftinghe ligt als gevolg van de getijopzet van de laatste eeuwen (Figuur 9) nu ook al erg hoog. Voortgaande sedimentatie zal dit gebied ook bij 2 m ZSS nog wel boven water houden. Verziltig via kwel door de zeespiegelstijging (zie ook Figuur 5) heeft een groot effect op Walcheren en Zuid-Beveland. In Zeeuws-Vlaanderen valt de landinwaartse indringing relatief mee.

Een ZSS van 5 m+NAP zal, naast versterkte aanval op de oevers en dijken, leiden tot grootschalig verdrinken van het estuarium. Dit gebeurt dan ondanks dat er op zich veel sediment in de voordelta en het estuarium beschikbaar is: de snelheid van zeespiegelstijging die bij het 5 m+NAP scenario hoort is dermate hoog dat het systeem niet in staat is om tijdig voldoende zand het estuarium in te transporteren om de stijging te compenseren. De platen in de Westerschelde zijn dan grotendeels verdwenen. Ook het Land van Saeftinge verandert. Het intergetijdegebied en de kwelders worden kleiner. De kracht van de getijstrooming is bij hoge zeespiegel zodanig dat in de bochten van de rivier de dijken zwaar onder druk staan. Mogelijke gevolgen zijn:

1. Volledige overstroming: bij dijkdoorbraak en gebrek aan management inundeert een volledig stuk binnendijks gebied.
2. Gedeeltelijke overstroming: om de uitbochting van de Westerschelde de ruimte te geven worden meer binnenlands gelegen dijken versterkt op kritieke punten.
3. Zeedijken breken waarschijnlijk niet door, maar bij hoge waterstanden komt er water overheen. De diepst gelegen binnendijkse gebieden blijven nat.

Achterland-trigger

De toegenomen variatie in neerslag in het achterland kan leiden tot hogere pieken in zoetwaterdebiet vanuit Vlaanderen. De effecten op de waterstanden in de Westerschelde zijn verwaarloosbaar. De effecten op de dynamiek van slib zouden wel merkbaar kunnen zijn maar deze hangen ook af van de hoeveelheid slib die vanuit het achterland de rivier kan bereiken, en van baggeractiviteiten in de havens van Antwerpen.

Gebiedseigen trigger

In de laagst gelegen Zuid-Zeeuwse polders zal bij 2 m ZSS vernatting en verzilting optreden. Bij 5 m ZSS zal de verzilting toenemen. Mogelijk kan regenwater onvoldoende afgevoerd worden en treedt daarom vernatting op (of wordt daarvoor passief, autonoom gekozen om verzilting weer wat te temperen).

Consequenties voor andere gebieden

Nvt

3.2 Midden+Noord Zeeland

Zee-trigger

De Grevelingen is als gevolg van de aanleg van de deltawerken het grootste zoutwaterbekken van West Europa. Het peil wordt gestuurd middels de Brouwerssluis die het afgedamde estuarium verbindt met de Noordzee. Het peil mag fluctueren binnen een bandbreedte van -0,10 m NAP en -0,30 m NAP. Met een stijgende zeespiegel wordt dit steeds lastiger en zal de waterstand in de Grevelingen meestijgen met de zeespiegel. Voormalige intergetijde gebieden (platen en kwelders) die nu nog boven water liggen zullen dan onder water staan. Een 5 meter gestegen zeespiegel ligt rond het ontwerppeil van de dijken rondom de Grevelingen. Bij een steeds hoger wordende zeespiegel zal zeewater steeds vaker over de Grevelingendam slaan.

De Oosterschelde is een getijbekken waar de waterstand ongeveer overeenkomt met die op zee, tot de stormvloedkering wordt gesloten bij 3 m +NAP. Een normaal hoogwater komt tot 2.7 m +NAP, waar de ZSS bovenop zal tellen. Dit betekent dat de Oosterscheldekering bij 2 en bij 5 m ZSS vermoedelijk doorlopend gesloten zal zijn (Haasnoot et al., 2019). Het ontwerppeil van 5.5 m extreme waterstand zal rond de gemiddeld 2 m hogere zeespiegel zo'n eens in de 20 jaar overschreden worden en bij een zeespiegelstijging

van 5 m dus veel vaker. Onderlopen van de Oosterschelde bij stormvloed bij gestegen zeespiegel leidt tot gevaar voor dijkdoorbraak. Hoe dan ook zullen de zandbanken, slikken en schorren al bij 2 m ZSS geheel verdwijnen: deze zijn nu al aan het krimpen door de afgenomen getijslag na de aanleg van de kering.

In de lage gebieden om de Oosterschelde heen zal zoute kwel ontstaan. Midden en Noord-Zeeland krijgen veel last van verzilting door ZSS. Walcheren, Zuid-Beveland, Noord-Beveland, Schouwen-Duiveland en Tholen krijgen al bij 2 m ZSS toegenomen verzilting.

Achterland-trigger

Nvt

Gebiedseigen trigger

De platen, slikken en schorren in de Oosterschelde zijn aan het verdwijnen sinds de aanleg van de stormvloedkering. Deze trend wordt versterkt door zeespiegelstijging.

Consequenties voor andere gebieden

Nvt

3.3 Zuid-Holland-Zuid

Zee-trigger

Het Haringvliet heeft in de huidige situatie een beperkt getij door de Kier in de Haringvlietsluizen, en ontvangt het grootste deel van het rivierdebiet van de Rijn en de Maas. De waterstand in het Haringvliet wordt gecontroleerd door de Haringvlietsluizen, die bij stormvloed gesloten kunnen worden, maar ook verder open gezet kunnen worden om hoogwaters van de grote rivieren af te kunnen voeren. Bij een ZSS van 2 m zijn de sluisen bij een gelijkblijvend sluitpeil permanent gesloten. Voor de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas geldt een vergelijkbare situatie: de Maeslantkering kan worden gesloten bij stormvloed, maar stuwt dan het rivierwater op en is bij een stijging van 2 m permanent gesloten. Stormwater kan er echter ook overheen slaan. Bij een stijging van 2 m wordt het ontwerppeil vaker dan eens in de 20 jaar overschreden (Haasnoot et al 2019). Onder een gesloten kering vindt bij hoge rivierafvoeren opstuwung plaats en is de kans op overstroming vanuit de rivieren veel groter dan nu of bij een open kering.

Bij 2 m ZSS neemt de verzilting op de Zuid-Hollandse eilanden sterk toe, en komen grote delen van het buitendijks gebied bijna permanent onder water te staan, waaronder de Biesbosch en een deel van Dordrecht. De Rijn en Maas voeren nog maar weinig sediment aan (Cox et al. 2021), wat grotendeels terecht komt in de Biesbosch. Die hoeveelheden zijn er onvoldoende om de ZSS bij te houden.

Bij 5 m ZSS zou de Maeslantkering bij sluiting dagelijks worden overspoeld. Permanente sluiting is onmogelijk omdat het debiet van Rijn en Maas naar zee moet worden afgevoerd. Doorbraak van dijken rond bijvoorbeeld Maassluis is waarschijnlijk, waardoor het havengebied van Rotterdam en het laaggelegen gebied rond Delft overstromen.

Achterland-trigger

Het Haringvliet ontvangt een deel van het zoetwater van de Rijn en Maas, dat bij hoogwater opstuwt vanaf zeeniveau. Als de Haringvlietsluizen bij 2 m ZSS en meer gesloten blijven, moet het rivierwater elders naar zee. Als sluisen open blijven, lopen Tiengemeten en andere buitendijkse gebieden onder water.

Gebiedseigen trigger

De Oude Maas en Dordtse Kil zijn onderhevig aan beddingerosie door het verschil in getijslag tussen de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet, en door gebrek aan sedimenttoevoer na de verdiepingen van vaarwegen. Bij deze condities is erosie een zelfversterkend proces: naarmate deze riviertakken verdiepen, zal er nog meer stroming doorheen gaan (Cox et al. 2021). Bij een ZSS van 2 m is deze diepte toegenomen, en, gezien de sterk erosieve trend, is het denkbaar dat de getijstroming door de Oude Maas en Dordtse Kil daardoor nog fors toenemen, wat verdere uitschuring van deze takken kan veroorzaken.

De benedenrivieren en de Nieuwe Waterweg vangen het sediment van de Rijn op, en ofschoon dit iets zal toenemen met grotere hoogwaters, is het baggerbezwaar veel groter. De sedimentatie in het gebied hangt daarom vooral van menselijk handelen af (Cox et al. 2021).

Rondom Maassluis en tot het zuidpunt van Den Haag vindt doorgaande verzilting plaats.

Consequenties voor andere gebieden

Met de verdiepte Nieuwe Waterweg ten behoeve van de haven van Rotterdam is het denkbaar dat het getij verder landwaarts zal doordringen in de benedenrivieren bij een ZSS van 2 m of meer.

De mogelijke doorbraak bij Maassluis heeft grote impact op de Hollandse Kust en de Randstad.

3.4 Hollandse Kust en Randstad

Zee-trigger

De zeedijken staan zwaar onder druk, maar de Noordzeekust zelf is door de hoge duinen veilig. Bij gelijkblijvende volumina aan zandsuppleties zal niet het volledige brede kustfundament in stand gehouden kunnen worden, maar de combinatie van suppleties en het grote aanwezige volume aan duinzand maken dat de veiligheid bij de duinenkust niet in het geding is. Wel zal bij storm in veel grotere mate strand- en duinafslag optreden, die dan weer hersteld moeten worden. Mogelijk treedt *wash-over* op in de 'kerven' die zijn aangelegd om zand door de wind landwaarts te laten verplaatsen. Bij 5 m ZSS kan bij extreme storm een zeedijk overstromen of zelfs doorbreken; bij een dijkdoorbraak bij Maassluis zal een deel van de Randstad overstromen: een gebied ruwweg van Naaldwijk tot Gouda en van Rotterdam tot Rijswijk.

Als gevolg van zeespiegelstijging neemt de ruimte voor de zoetwaterbel onder het duingebied af. Onder de zoetwaterbel door, versterkt de zoute kwelstroom door richting het lagere poldergebied achter de duinen (Figuur 5). Bij 2m ZSS treedt verzilting op achter de duinen, waaronder in de bollenstreek. Bij 5m ZSS ontstaat ook binnen de duinen verzilting, en vindt dit achter de duinen op grote schaal plaats.

Voor de droogmakerijen en diepe polders in Noord- en Zuid-Holland, waaronder sterk verstedelijkte dieper poldergebieden, hebben zeespiegelstijging en klimaatverandering aanzienlijke effecten, ondanks hun verschillen in grootte, bodemligging, ondergrond, bijdrage van de kwelstroom, interne bergingscapaciteit en gemaalcapaciteit. In de huidige situatie is ongeveer 70-75% van het inkomende water in de polders neerslagwater, de bijdrage van kwel is 10-20% (Dik et al., 2005; Boekel et al., 2013). De kweldruk zal toenemen, waarbij het kwelwater in toenemende mate zouter wordt. Dit zal ook de waterkwaliteit in het omliggende boezemsysteem steeds verder zal belasten. Daarnaast zal op de laagste plekken met de slapste deklaagopbouw, de grond opbarsten en daarmee op nieuwe plekken in sloten zout kwelwater introduceren. Zulke opbarsting is steeds lastiger tegen te gaan. Het doorspoelen van de polders met water ingelaten uit de Hollandse IJssel vergt als tegenmaatregel steeds grotere volumes water, die steeds lastiger in te laten zijn omdat er ook zoutindringing in de Hollandse IJssel is (Figuur 5; Delsman, 2021).

De grootste veranderingen worden door de neerslagtoename als gevolg van klimaatverandering veroorzaakt. De hogere winterneerslag, en vooral de toename in extreme (dagelijkse of 10-daagse) neerslagsommen zullen niet meer met de bestaande bergingscapaciteit opgevangen kunnen worden. De gemaalcapaciteit is onvoldoende om jaarlijks langdurige inundaties en hoge grondwaterstanden te kunnen voorkomen. Ook het boezemsysteem heeft onvoldoende capaciteit om in dergelijke perioden het uit de polders gemalen water af te voeren; de hogere rivierstanden beperken bovendien op hun beurt weer de spuicapaciteit van het boezemwater. Bij 2 m zeespiegelstijging en een beperkte klimaatverandering zullen inundaties en kwel het grootste deel van het jaar nog in de hand gehouden kunnen worden, maar in de laagste delen zal dit al tot verdrassing gaan leiden. Een verdere zeespiegelstijging en klimaatverandering betekenen dat in de polders structureel perioden met te hoge grondwaterstanden en inundaties optreden, waardoor het huidige landgebruik (landbouw, stedelijk gebied) niet meer te handhaven is, en de polders zonder verdere maatregelen verdrassen tot moerasgebieden met een sterke brakwater kwel.

Achterland-trigger

Water om de polders door te spoelen in de zomer, en zo de kwel tegen te gaan moet vanuit de rivieren komen via het IJsselmeer. Door de lager wordende zomerafvoer van de rivieren is hiervoor steeds minder water beschikbaar, waardoor de zoutbelasting in het gebied in de zomer steeds groter wordt.

Gebiedseigen trigger

Grote delen van dit gebied hebben te maken met verzilting die het gevolg zijn van autonome processen. Dit komt vooral voor in de droogmakerijen en is het resultaat van eeuwenlang ontwateren van meren en het ontwikkelen van polders, waardoor dieper en zouter grondwater naar boven is komen vloeien (Oude Essink et al., 2010). In combinatie met bodemdaling en ZSS zorgt dit voor meer verzilting dan kan worden tegengehouden met spoelen met zoet water.

Consequenties voor andere gebieden

Nvt

3.5 Utrechtse Vecht en Hollands-Utrechts veenweidegebied

Zee-trigger

Bij 2 m ZSS zijn de uiterwaarden volledig onderwater gelopen door het verhoogde rivierpeil in de Hollandse IJssel, Lek en Waal. Het gebied aan de noordoever van de Waal tot aan Gorinchem is onderhevig aan verzilting. Zie Hollandse Kust en Randstad voor opmerkingen over zoutindringing in de Hollandse IJssel.

Bij 5 m ZSS breidt de verzilting verder landinwaarts uit naar de Lek tot voorbij Nieuwegein. Ook een groot deel van de Alblasserwaard krijgt hiermee te maken. De uiterwaarden staan permanent onder water in het hele gebied. Door hoge druk op de dijken is een inundatie van de Krimpenerwaard mogelijk, waardoor Nieuwegein onder water zou komen te staan.

Achterland-trigger

Zie 'Centraal rivierengebied' voor de uiterwaarden van Lek en Waal. Het debiet van de Vecht is redelijk constant en ontkoppeld van de grote rivieren. Haar achterland is het grondwatersysteem van de Utrechtse Heuvelrug.

Gebiedseigen trigger

De droogmakerijen bij Bodegraven, Mijdrecht en Nederhorst den Berg tonen doorgaande verzilting door autonome oorzaken (Figuur 5). Ook bij Weesp komt dit type verzilting voor. Extreme neerslag kan afhankelijk van de pompcapaciteit tot meer drassigheid leiden. Autonome ontwikkelingen zoals het tegen willen gaan van verdere bodemdaling en broeikasgasuitstoot uit de veenweide-polders zijn in de kaarten geacht aan verdrassing bij te dragen.

Consequenties voor andere gebieden

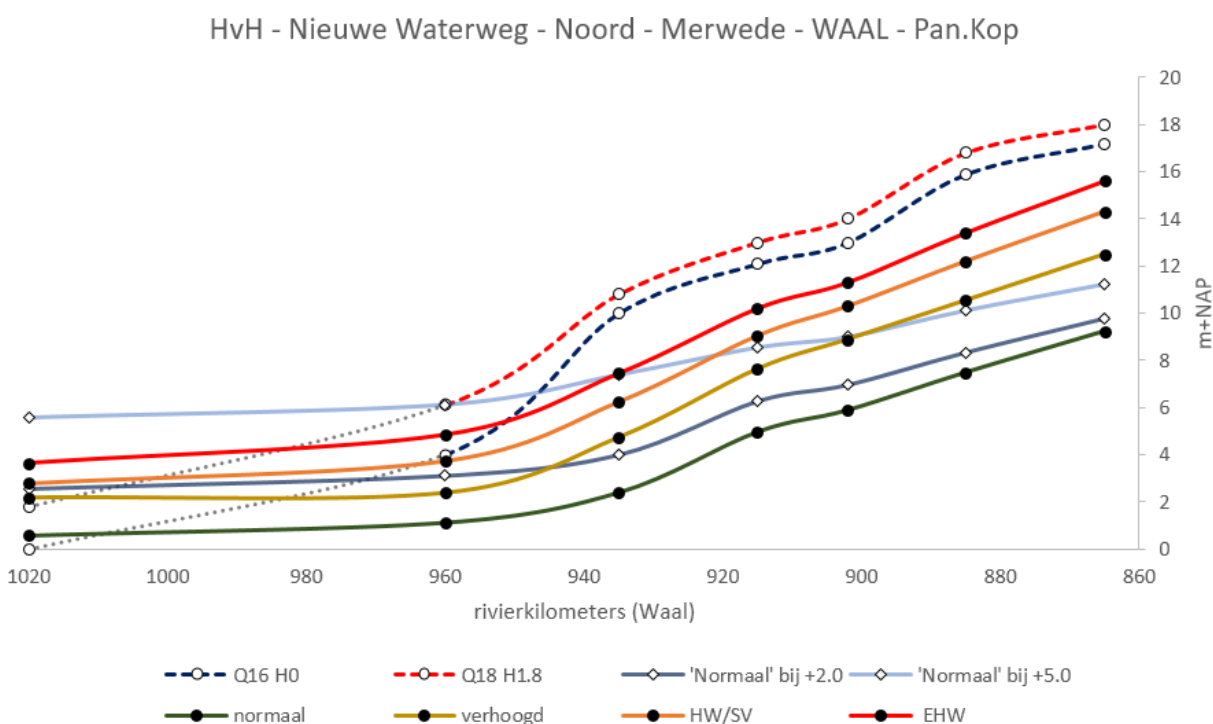
De verzilting in de Lek en Waal trekken door dit gebied verder naar het Centraal rivierengebied. Bij 5 m ZSS zijn de ondergelopen uiterwaarden naar het oosten uitgebreid.

3.6 Centraal rivierengebied

Voor het rivierengebied zijn huidige dijkhoogte en -sterkte per dijkkring ingericht op toelaatbare faalkansen die zijn gespecificeerd volgens de risicobenadering. In het bepalen van de faalkansen zijn meerdere mechanismen meegenomen, waaronder overstroming (dijk te laag), macro-instabiliteit (dijk te zwak) en *piping* (dijkondergrond te doorlatend), die alle gerelateerd zijn aan waterhoogte en duur daarvan tijdens hoge rivierafvoeren. Uitgaande van gelijkblijvende dijksterkte (situatie 2020-2050; het volledig op sterkte brengen is voor een aantal trajecten nog in uitvoering), zullen bij hogere waterstanden en onder omstandigheden waarin langdurig water tegen de dijk staat de faalkansen toenemen.

Zee-trigger

Om in te schatten tot waar en in welke mate langs de rivieren de invloed van zeespiegelstijging merkbaar gaat zijn in de waterstanden zijn voor de Waal de waterstanden van waterinfo.rws.nl geplot en vergeleken met de modelberekeningen van Straatsma et al. (2019) voor maatgevend hoogwater met en zonder zeespiegelstijging (waarbij getij en stormopzet zijn verwaarloosd).

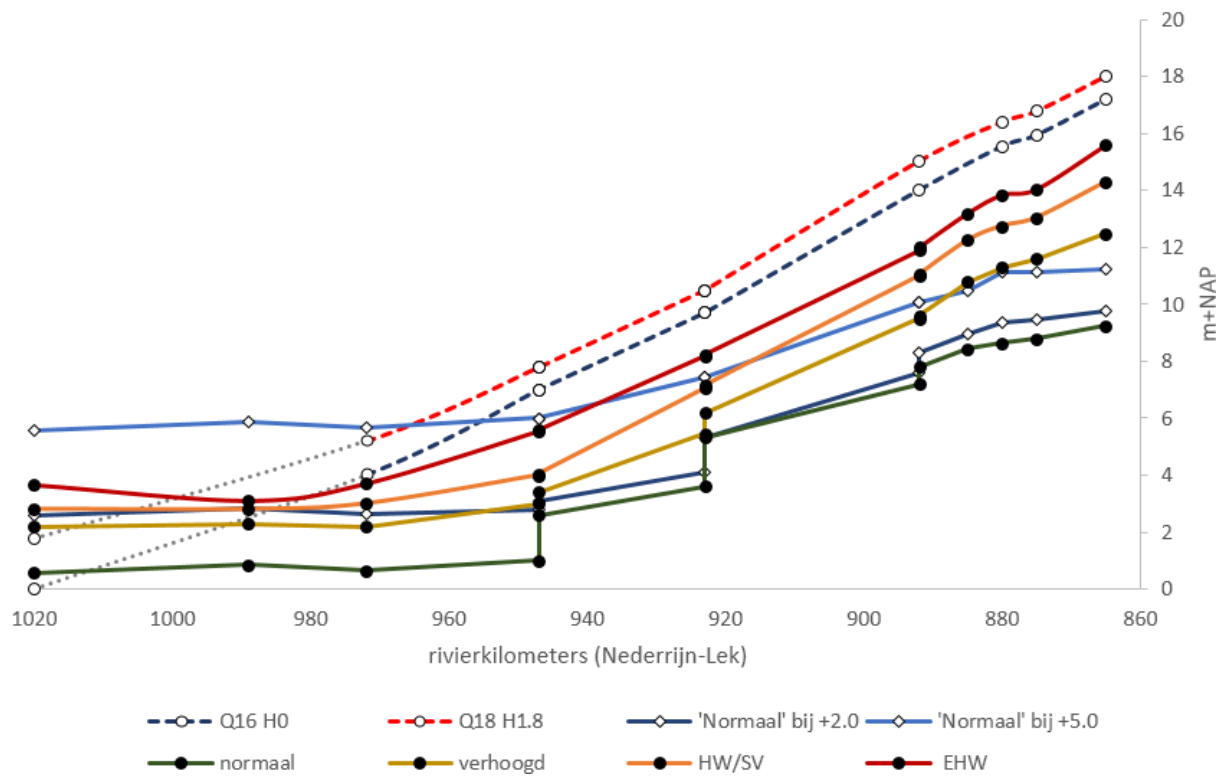


Figuur 10. Waterstanden van de Waal-Nieuwe Waterweg van Pannerden tot Hoek van Holland gebaseerd op <https://waterinfo.rws.nl> en op de modelberekeningen voor maatgevend debiet (Q16=16000 of Q18=18000 m³/s) van Straatsma et al. (2019), welke geen rekening hielden met waterstandsvariaties op zee maar wel een zeespiegelstijging (H1.8=1.8 m ZSS). Q16 HO: 16000 m³/s debiet bij Lobith bij de huidige zeespiegel, Q18 H1.8: 18000 m³/s debiet bij 1.8 m hogere zeespiegel, beide uit Straatsma. De legenda volgt verder waterinfo.rws.nl in het geven van waterstanden bij normale condities, verhoogde, hoogwater (HW/SV) en extreem hoogwater (EHW) standen. In blauw zijn de waterstanden (verhanglijnen) getoond voor nieuwe 'normalen' bij +2 m ZSS en +5 m ZSS .

De vergelijking laat zien dat de zeespiegelstijging ook landinwaarts tot enige waterstandsverhoging reikt. Tot ca. 80 km landinwaarts is de opzet bij normale waterstanden in de rivier vergelijkbaar met die op open zee (2 resp. 5 meter), verder oostelijk dempt de opzet (Figuren 10, 11 en 12). Bij een ZSS van 2 m+NAP zijn in de benedenrivieren effecten van vrijwel permanent volledig onderwater staan van de uiterwaarden te verwachten: wat nu als 'verhoogd' beschouwd wordt, is dan het 'normaal'. Bij een ZSS van 5 m+NAP staan benedenstroomse de uiterwaarden zeer diep onder water. Wat nu de 'Extreem Hoogwater' stand is (EHW), is daar dan 'normaal'. Alleen in het uiterste oosten van het Rivierengebied en in het Limburgse traject van het Maasdal, ligt het nieuwe normaal dan nog beneden wat nu als 'verhoogd' beschouwd wordt (Figuren 10, 11 en 12). Daar staan de uiterwaarden dus niet wezenlijk vaker onderwater. In het centrale rivierengebied staan de uiterwaarden bij een ZSS van 5 m+NAP wel semi-permanent onderwater..

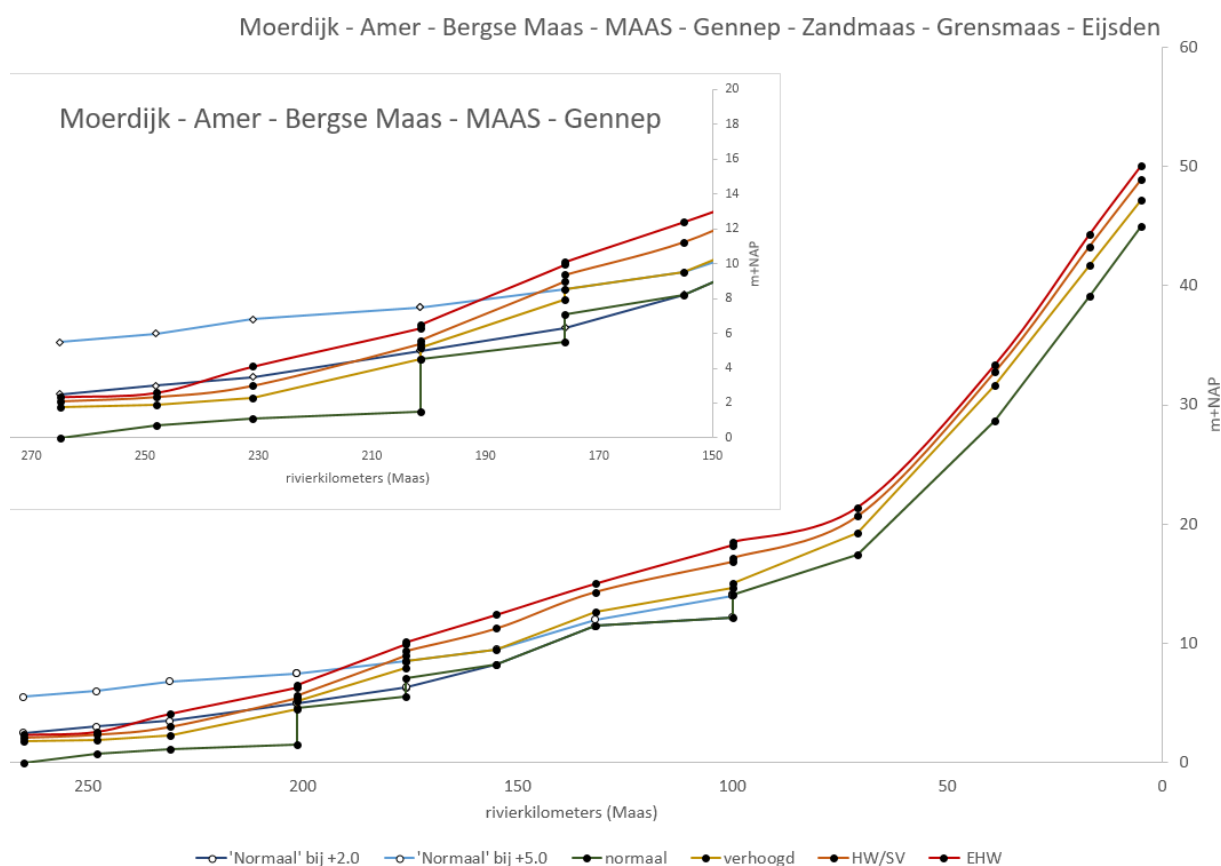
Behalve veranderingen van typische waterstanden, zullen er ook morfologische effecten optreden in de rivierbedding. Bij gestegen zeespiegel dempt het rivierverhang in het gebied, en verschuift het knikpunt in de verhanglijnen stroomopwaarts. Dit knikpunt is te beschouwen als het punt van regime overgang van rivier naar getijderivier. In de Waal/Merwede (Figuur 10) verschuift het bij 2 m ZSS ongeveer 20 km oostwaarts. Bij 5 m ZSS neemt het verhang in vrijwel het hele rivierengebied sterk af, en ligt het knikpunt voor de Rijn nabij Lobith. Door de verhangafname zal de Waal het beddingzand minder ver stroomafwaarts mee kunnen voeren. Een deel van het fijne sedimenttransport in de Rijn zal daardoor de benedendelta (Zuid-Holland-Zuid) niet meer bereiken, maar in en langs de Merwedees en beneden Waal worden afgezet.

HvH - Nieuwe Waterweg - LEK - NEDERRIJN - Pannerdense Kop



Figuur 11. Waterstanden van de Nederrijn-Lek van Pannerden tot Hoek van Holland gebaseerd op <https://waterinfo.rws.nl> en op een omrekening van de modelberekeningen voor maatgevend debiet (Q16=16000 of Q18=18000 m³/s) van Straatsma et al. (2019: voor de Waal, zoals in Figuur 10). De verticale delen in de normale waterstand-lijn zijn de locaties van de drie stuwen in de Nederrijn-Lek. Legenda als in Figuur 10.

Doordat grote delen van de uiterwaarden permanent onder water staan, zal hier eerder en vaker sediment afgezet worden. Met name bij 5 m ZSS zullen grote delen van uiterwaarden min of meer continu meestromen (onder geringer verhang dan tijdens hoogwaters in de huidige tijd). Er vindt dan dus permanent aanvoer van sediment naar de uiterwaard plaats. Omdat de stroomsnelheid boven de uiterwaarden flink lager is dan in de rivier, zal hier langdurig sedimentatie optreden. Vanwege de lage sedimentconcentratie in de Rijn bij lage rivierafvoer zal dit niet tot snelle ophoging van het bodemniveau van de uiterwaarden leiden. Niettemin zullen nevengeulen dichtslibben en ontstaan alom sedimentatiepatronen zoals die nu op beperkte schaal in de Kleine Noordwaard te vinden zijn (Verschelling et al., 2018).



Figuur 12. Waterstanden van de Maas van Eijsden tot Moerdijk gebaseerd op <https://waterinfo.rws.nl> en op een omrekening van de modelberekeningen voor maatgevend debiet ($Q_{16}=16000$ of $Q_{18}=18000$ m³/s) van Straatsma et al. (2019: voor de Waal, zoals in Figuur 10). De verticale delen in de normale waterstandlijn zijn de locaties van de drie stuwen in de Maas.

Bij lage rivierafvoer en gestegen zeespiegel dringt de zouttong uit de Nieuwe Maas verder de benedenrivieren binnen: Hollandse IJssel, Lek, Noord, Merwede. Omdat door de zeespiegelstijging de rivierstanden ook bij lage rivierafvoer hoger staan dan het achterland, ontstaat er zoute kwel naar de rivierpolders net achter de dijken (Figuur 5). In de Merwede-Waal dringt dit het minst ver binnen vanwege de grote rivierafvoer. Ten noorden en ten zuiden langs Hollandse IJssel en Lek, respectievelijk de Maas is de indringing verder landinwaarts. Bij 5 m ZSS is dat langs de Maas tot aan Rossum, ruim 80 km landinwaarts.

Achterland-trigger

Hogere debieten tijdens piekafvoeren leiden tot hogere extreme rivierwaterstanden bovenop de al door zeespiegelstijging gestegen 'normale' rivierstanden. Opstuwung bij +2 m ZSS via de Waal, Nederrijn en IJssel

zorgen bij Lobith tijdens hoge rivierafvoer voor een opzet van ca 0.8 m (dijkkleur: oranje), en bij +5 m ZSS meer dan een meter (dijkkleur: rood). Dit betekent dat de rivierstand die door huidige rivierdijken nog net gekeerd wordt vaker zal optreden dan in de huidige risicobepaling is aangenomen, en dat de waterstanden bij maatgevende afvoer hoge hoger worden (Spurna Weiland et al. 2015). De Zee-trigger en Achterland-trigger tellen dus bij elkaar op in zowel het +2 m als het +5 m scenario.

Klimaatverandering leidt ook tot lagere rivierafvoeren vanuit het achterland in de zomer. Dit leidt samen met de zee-trigger tot de hierboven genoemde verdere indringing van zout water vanuit zee. Ook voor de Maas geldt dat hogere debieten als gevolg van intensievere buien verwacht worden, maar dit is hier niet als iets apart van de Rijn uitgewerkt – ook omdat de focus van de kaarten op Laag Nederland is gelegd.

Gebiedseigen trigger

De bodemligging rond de splitsingspunten van de rivieren (Pannerdensche Kop, IJsselkop en Kop van de Oude Wiel in de Merwedese) is aan autonome verandering onderhevig. Weliswaar is deze langzaam, maar deze instabiliteit kan de afvoerverdeling veranderen zoals dat in het verleden ook al gebeurde. Met name in de oostelijke splitsingspunten is instabiliteit denkbaar door het mobiliseren van de grove grindlagen in de bovenmonden van het Pannerdens Kanaal en de IJssel tijdens grote hoogwaters. Autonoom riviergedrag is verder beschreven in Kleinhans et al. (2013).

Consequenties voor andere gebieden

Bij inundatie door dijkkvalen van een laaggelegen gebied is niet te verwachten dat een rivier een nieuwe loop gaat volgen (avulsie), omdat het water aan de benedenzijde van een ondergelopen polder niet weg kan. Er kan dan dus geen stroombaan ontstaan met voldoende kracht om een nieuwe bedding uit te schuren. Bovendien veroorzaakt de opstuwing in de rivier bij gestegen zeespiegel een sterke afname van de stroomkracht van het rivierwater. Het is wel denkbaar dat er achter de instroompunten zandwaaiers ('overslagen') ontstaan in de geïnundeerde polders, in kleiner formaat dan welke bijvoorbeeld in de Biesbosch is ontstaan na de St. Elisabethvloed in 1421-1424.

Onder invloed van zeespiegelstijging hebben de toegenomen waterstanden en extreme hoogwaters op de grote rivieren effecten over grote afstanden. Gemakshalve kan worden gesteld dat bij 2 m ZSS de rivieren over meer dan de helft van hun loop door Nederland tot hogere waterstanden en bijbehorende kweldruk en risico's op dijkkvalen leiden, en bij 5 m ZSS over hun volledige lengte in Nederland.

De afvoerverdeling 'bij Lobith' (Pannerdense Kop, evt. Rijnstrangen als groene rivier, IJsselkop, bij extreem hoogwater ook Oude IJsseldal als groene rivier) bepaalt de verdeling van rivier-overstromingsrisico tussen West Nederland en Midden Nederland. Dit is in de huidige situatie al zo, bij +2 m zijn de veranderingen nog subtiel, bij +5 m potentieel groot, omdat de afvoerverdeling hoofdzakelijk wordt bepaald door de opstuwing vanuit de benedenstroomse takken, welke bij 5 m ZSS goeddeels bepaald is door de zee. Dit beïnvloedt een groot aantal westelijke en noordwestelijke gebieden, namelijk het Centraal Rivierengebied, het Centraal Veenweidegebied, de Zuid Holland Randstad, de Zuid-Hollandse estuaria, het IJsselmeer, de Flevopolders, het Overijssels-Fries veengebied, het Markermeer, Amsterdam (deel Randstad) en het Waterlanddeel veenweidegebied.

Indirect kan 5 m ZSS de waterstanden langs de IJssel en in het IJsselmeergebied wel beïnvloeden. De zeespiegel staat in directe verbinding met de Waal, welke bij voldoende opstuwing de debietverdeling op de oostelijke splitsingspunten van de Rijn kan veranderen. Naar verwachting zal dan meer water door de IJssel stromen. Er is geen effect te verwachten van het IJsselmeerpeil, als dat lager wordt gehouden dan de zee, omdat de beperkte opstuwing op de IJssel niet tot aan het splitsingspunt bij Arnhem reikt.

3.7 Flevoland, Markermeer en IJ

Zee-trigger

Het IJsselmeerpeil zal de zeespiegelstijging zo veel mogelijk volgen, zodat de afsluitdijk op de huidige wijze gebruikt kan blijven worden om overtollig water te spuien. Vanwege de recente aangebrachte pompcapaciteit in de Afsluitdijk voor de huidige condities, hoeft ze de zeespiegelstijging niet volledig te volgen. Wordt ze lager gehouden dan zal dit bij 2m ZSS alleen bij hoge rivierafvoeren af en toe tot hoge waterstanden leiden. Een en ander leidt bij 2 m ZSS maar beperkt tot toegenomen risico is op dijkfalen van Flevoland, bij 5 m ZSS zijn die risico's wel flink toegenomen.

Het Markermeerpeil wordt in de scenario's aanzienlijk lager worden gehouden, zodat de waterstand vanaf de Waddenzee en IJsselmeer trapsgewijs lager komt in eerst het Markermeer/IJmeer, en dan de polders van Flevoland en Noord Holland, en de grachten van Amsterdam. Dit is gunstig voor de bescherming van Amsterdam.

Bij 5 m ZSS kan de dijk van Flevoland bij stormopzet overlopen en kan Flevoland onder water komen te staan. De waterstanden in het Markermeer/IJmeer zullen ook hoger liggen, wat tot dras en plas in de polders rondom kan leiden.

Achterland-trigger

Zie IJsselmeer.

Gebiedseigen trigger

In beide polders van Flevoland komt verzilting door autonome processen grootschalig voor.

Consequenties voor andere gebieden

Nvt

3.8 IJsseldal en Liemers

Zee-trigger

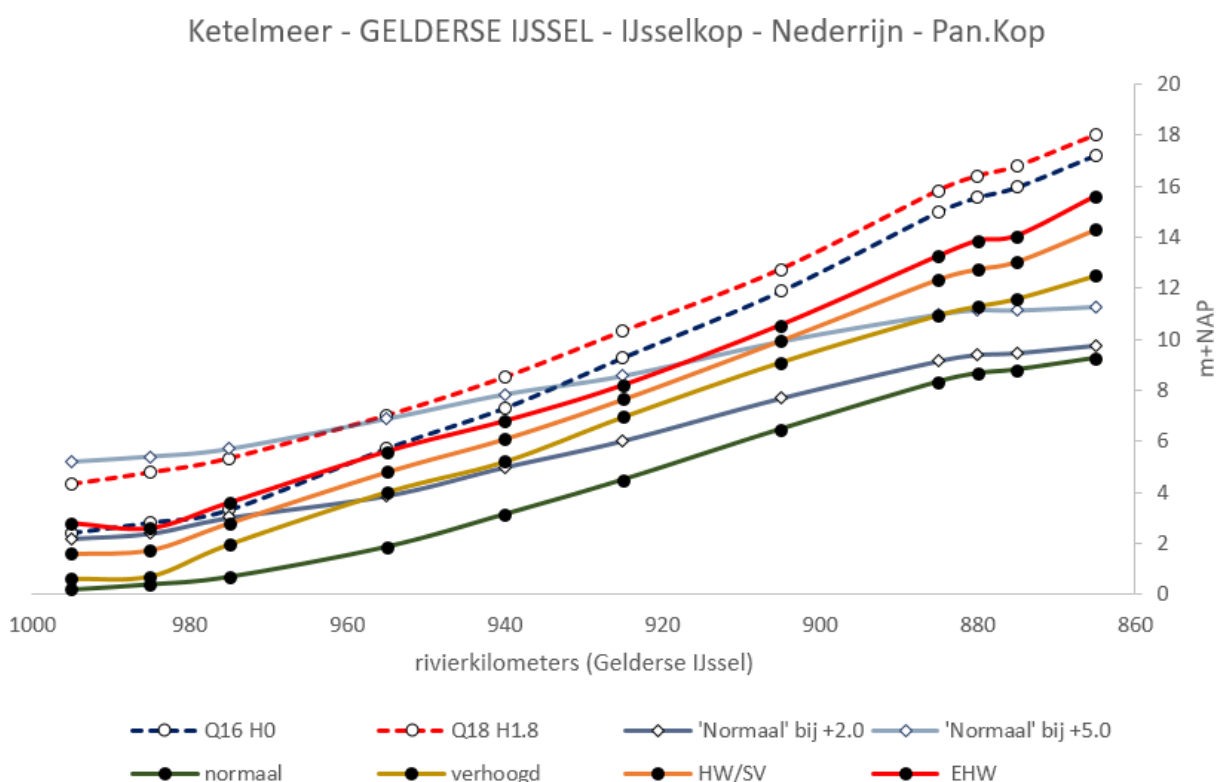
Niet zozeer het zeeniveau, maar het peil dat in het IJsselmeer gehandhaafd wordt, is direct bepalend. Het IJsselmeer blijft zoet. Zoutindringing speelt in de Gelderse IJssel daarom geen rol. Het IJsselmeerpeil is in de kaarten op +2 en +5 m gehouden (gelijk aan de zeespiegel). Bij +5 m blijven Kampen en Zwolle (meetstations met huidig EHW 2.6 en 3.6 m NAP) niet meer droog met huidige dijken (dijkkleur: donkerrood). Bij +2 m ZSS keren ze nog net wel, maar is de kans op doorbraak verhoogd: de waterstand is permanent wat nu als reguliere hoogwatersituatie wordt beschouwd, en een 1/10 jaar terugkerend hoogwater leidt tot situaties die in de huidige situatie als 'extreem hoogwater' worden gezien (dijkkleur: rood).

De uiterwaarden staan bij 2 m ZSS tot aan Deventer permanent onder water, en bij 5 m ZSS tot aan Westervoort. Dan overstroomt ook de IJsseldelta en het gebied rond Kampen. De Overijsselse Vecht stuwt op tot voorbij Zwolle bij 2 m ZSS en tot voorbij Ommen bij 5 m ZSS, waarmee grote delen van de uiterwaarden permanent onder water gaan.

De verhoging van de waterstand in het IJsselmeer heeft een grootschalig stroomopwaarts effect door opstuwing ('backwater effect') bij maatgevende afvoer (Figuur 13). Bij +2 m komt dat effect >1.0 m tot aan Doesburg (dijkkleur: rood) en >0.5 tot aan de Pannerdense Kop/Lobith (dijkkleur: oranje). Preciezere

schattingen vergen hydrodynamische modellering; de grove schattingen in deze publicatie zijn gebaseerd op een kruisvergelijking van de berekeningen van het opstuwingseffect met gestegen zeespiegel in Straatsma et al. (2019) met waterstanden in de Waal en IJssel in de huidige situatie (<https://waterinfo.rws.nl>), en de aanname van dat de IJssel in EHW-situaties zo'n 15-25% van de Rijnafvoer voert (zie Gebiedseigen trigger). De Groene Rivieren die in RvR kader zijn aangelegd (Veessen-Wapenveld; Kampen-Reevediep) worden regelmatig gebruikt.

Bij +5 meter reikt het opstuwingseffect met meer dan +1.0 m tot stroomopwaarts van de grens (dijkkleur: rood). Dit scenario kan beperkt ontweken worden door het IJsselmeerpeil lager te houden (zie 3.8). In dat geval blijft er in de Liemers wel het indringingseffect via Nederrijn en Waal (zie 3.6) en in dat geval treedt herverdeling van Rijnwater op. De afvoer van de IJssel neemt wat toe, en de bij 5m ZSS met 40% afgenomen pomp-spuicapaciteit (zie 3.9) over de afsluitdijk reduceert dan verder.



Figuur 13. Waterstanden van de IJssel van Pannerden tot IJsselmeer gebaseerd op <https://waterinfo.rws.nl> en op een omrekening van de modelberekeningen voor maatgevend debiet (Q16=16000 of Q18=18000 m³/s) van Straatsma et al. (2019) voor de Waal. Zie centraal riviergebied.

Achterland-trigger

Naar verwachting zal klimaatverandering wat vaker afvoeren >10000 m³/s bij Lobith genereren dan in de referentiesituatie van de 20^{ste} eeuw (Sperna Weiland et al. 2015). De kans op het incidenteel daadwerkelijk optreden van maatgevende afvoeren wordt dan groter.

De landinwaartse doorwerking van zeespiegelstijging op het waterpeil in de rivieren vergroot de rivieroverstromingsrisico's in de Liemers. Opstuwung bij +2 m ZSS via de Waal, Nederrijn en IJssel zorgen bij Lobith tijdens hoge rivierafvoer voor een opzet van ca 0.8 m (dijkkleur: oranje). Bij +5 m wordt dat meer dan een meter (dijkkleur: rood). Dit betekent dat de rivierstand die door huidige rivierdijken nog net gekeerd wordt niet langer die behorend bij de maatgevende afvoer maar bij lagere afvoeren met een

hogere kans. De Zee-trigger en Achterland-trigger tellen dus bij elkaar op in zowel het +2 m als het +5 m scenario (dijkkleur Liemers: oranje, resp. rood).

Gebiedseigen trigger

Bij extreem hoog water in de Rijn zou het Oude IJsseldal als Groene Rivier kunnen gaan functioneren. In dat geval wordt de afvoerverdeling van Rijn tussen West Nederland (Waal en Nederrijn, Rijnmond+Haringvliet) en Midden Nederland (IJsseldal, IJsselmeer) een andere dan bedoeld tijdens 20^{ste} eeuwse hoogwaters en in het 21^{ste} eeuwse Ruimte voor de Rivier-ontwerp, en ook een andere dan het 1/9 deel dat de IJssel bij normale afvoer verwerkt. Tijdens extreem hoogwatersituaties zou de IJssel bedoeld of onbedoeld wellicht 15-25% van de Rijnafvoer kunnen voeren (Sperna Weiland et al. 2015).

De ruimtelijke reserveringen die in het kader van Ruimte voor de Rivier in het IJsseldal zijn gemaakt 'voor toekomstige 18000 m³/s veiligheidsniveaus', zullen ook van nut blijken voor inpassing van aan +2 tot +5 m zeespiegelverandering gerelateerde waterstandsverhogingen.

Consequenties voor andere gebieden/connectiviteit

Zie onder 3.6 Centraal Rivierengebied en 3.9 IJsselmeer.

3.9 Wieringermeer, IJsselmeer, Markermeer

Zee-trigger

Het IJsselmeerpeil zal de zeespiegelstijging zo veel mogelijk volgen, zodat de afsluitdijk op de huidige wijze gebruikt kan blijven worden om overtollig water te spuien. Vanwege de recente aangebrachte pompcapaciteit in de Afsluitdijk voor de huidige condities, hoeft ze de zeespiegelstijging niet volledig te volgen. Hierdoor is er een beperkte toename in risico op dijkkfalen van Flevoland, maar dit wordt wel steeds groter bij een toenemende zeespiegel. Het Markermeer kan nog lager worden gehouden (zie 3.7).

Door de frequentere overslag met zout water bij 5 m ZSS en kwel vanuit de Waddenzee zal het IJsselmeerwater in een grotere zone achter de afsluitdijk brak worden. In de poldergebieden langs de randen van het IJsselmeer ontstaat een grote kwel stroom, die in nabij de Afsluitdijk zouter wordt, met name bij een ZSS van 5 meter. In de kwelzones ontstaan moerassen.

Achterland-trigger

Hoogwaters op de IJssel en lokale extreme neerslag kunnen het peil van het IJsselmeer tijdelijk doen stijgen, vooral bij gestegen zeespiegel en een lager IJsselmeerpeil.

Gebiedseigen trigger

Voor het waterbeheer in de IJsselmeerpolders veranderen drie randvoorwaarden: In de eerste plaats stijgt het IJsselmeerpeil, waardoor de kweldruk en -stroom toeneemt, en de gemalen een groter hoogteverschil moeten overbruggen en dus wat aan capaciteit zullen inboeten. Ten tweede zijn dit de toenames in de winterneerslag en die van de extreme neerslag (10-daagse sommen). Tenslotte is na 2050 nog steeds enige (orde enkele decimeters) bodemdaling te verwachten; de snelle huidige bodemdaling als gevolg van rijping sinds de droogmakerij is tegen die tijd afgenomen.

Consequenties voor de IJsselmeerpolders

De gevolgen voor de IJsselmeerpolders hangen direct samen met hun waterbalans. In de huidige waterbalans is het aandeel van neerslag ongeveer 65-75% en van kwel ongeveer 20% en in de totale jaarlijkse hoeveelheid binnenkomend water (Immerzeel et al, 2006; Waterschap Zuiderzeeland, 2006;

Boekel et al., 2014). De drainage is afgestemd op een genormeerde drooglegging (voldoende diepe grondwaterstand i.v.m. landbouwschade) en inundatie. Tijdens perioden van extreme neerslag moet een deel van het neerslagwater tijdelijk binnen het watersysteem geborgen worden. In de huidige situatie treedt dit niettemin af en toe op in gebieden met lokaal grote kwelstroom, die ver van de gemalen liggen, en waar de sinds de drooglegging nog steeds voortschrijdende bodemdaling het grootst is.

Als ruwe inschatting zouden we kunnen aannemen dat de gemaalcapaciteit evenredig afneemt met het hoogteverschil dat overbrugd moet worden (nu: ca. 5 m), en dat ook bij hoge IJsselmeerpeilen de gemalen nog kunnen functioneren. Bij een meter IJsselmeerpeil stijging komt dat neer op een capaciteitsverlies van ongeveer 15%, en bij 3-5 m stijging in de orde van 40%. De kwelstroom zal ook toenemen, maar kan ook met een afgenomen gemaalcapaciteit nog afgevoerd worden. Bij een voortgaande zoutindringing (vooral bij de Wieringermeer) zal de kwelstroom zouter worden. De neerslagtoename gaat een direct effect krijgen. De hogere extreme neerslagen kunnen met het huidige drainagesysteem en gemalen niet meer snel afgevoerd worden. Ook de bergingscapaciteit van het watersysteem is hier niet op berekend. Vooral in de wintermaanden zullen in de polders vaak en langdurig (weken) perioden met te hoge grondwaterpeilen en inundatie optreden. Ook in de zomer bij steeds vaker optredende extreme neerslag zal dit periodiek gebeuren. Dit wordt nog versterkt door de verdere bodemdaling. Gevolg is dat deze gebieden niet meer geschikt zijn voor de landbouw en gaan verdrassen, waarbij in de Wieringermeerpolder gebieden met brakwatermoeras ontstaan.

Tot slot voldoen de Polderdijken bij hogere IJsselmeerstanden niet meer aan de veiligheidsnormen, waardoor de kans op falen groter is, vooral bij 5 m ZSS. Na een eventuele inundatie zou het met de huidige gemaalcapaciteit meer dan een jaar duren voordat de polder weer drooggemalen is. Het is aannemelijk dat dat dan ook niet meer gebeurt en de polders dan water blijven.

Consequenties voor andere gebieden

De gestegen waterstand van het IJsselmeer heeft verstrekkende gevolgen voor de dijkveiligheid en kweldruk van de omringende gebieden, en door opstuwing van rivierwater voor een lang bovenstrooms traject van de Gelderse IJssel en Overijsselse Vecht (zie 3.8).

3.10 Waddenzee en -eilanden West

Zee-trigger

De Noordzeekusten van de Waddeneilanden, de ebdelta's en de Waddenzeebekkens zijn communicerende systemen. De westelijke Waddenzee is tamelijk diep in vergelijking met de oostelijke Waddenzee, wat mede komt omdat het veel grotere systemen met de gehele Zuiderzee als bekken waren in het late Holoceen. Zeespiegelstijging veroorzaakt een groter kombergingsvolume, wat leidt de neiging tot import van zand en slib in de Waddenzee. Via de geulen komt dit op de littorale (dagelijks droogvallende) gebieden terecht. Deze gebieden zijn ecologisch van groot belang voor onder meer trekvogels. Dit sediment komt waarschijnlijk van de ebdelta's en de waddenkusten. Ook de zandige staarten van de eilanden zijn mogelijke bronnen van zand, en zullen kleiner worden en verdwijnen bij hogere zeespiegelstanden. Bij gelijkblijvende kustsuppleties zou dit bij alle eilanden behalve Texel, waar de dijken meer zijn versterkt, tot kusterosie en landwaartse migratie kunnen leiden.

Schattingen met een eenvoudig model suggereren dat import en sedimentatie in de westelijke Waddenzee een stijging van slechts 5-10 mm/jaar, of 0.5-1 m per eeuw, bij zou kunnen houden (Wang et al. 2018). Het is echter onzeker of het geïmporteerde sediment voldoende snel op de platen achterin de bekkens terecht

komen: bij diepe of snel verdrinkende getijbekkens ontstaat een vloeddelta waar het meeste sediment terecht komt, terwijl verder landwaarts en op de wantijen tussen de getijbekkens weinig zand en het beschikbare slib niet tot voldoende sedimentatie leiden. Of de sedimentatie op de schorren de stijgingssnelheid kan bijhouden is daarmee ook onzekerder, omdat de aanval van golven en stroming op de kust toeneemt als de littorale (intergetijden) gebieden verdwijnen. De hoogste gebieden zoals Griend, zeker waar er pre-Holocene harde sedimenten onder liggen, blijven wel bestaan.

Bij een ZSS van 5 m is de stijgingssnelheid zo hoog dat de littorale gebieden en de schorren verdwijnen, en de eilanden door overspoeling bij storm sneller landwaarts migreren. De migratiesnelheid is niet goed te voorspellen en is globaal geschetst in de kaart. De dijken van de waddeneilanden worden, behalve op Texel, aangenomen niet op deltahoogte te zijn.

Achterland-trigger

Er vindt enige zoetwatertoevoer plaats naar de westelijke Wadden vanuit het IJsselmeer, maar dit is gering ten opzichte van het getijdebiet door met name het zeegat van Texel.

Gebiedseigen trigger

Als de stormfrequentie en –duur groter wordt, vermindert dit de sedimentatie op de platen en vergroot het de stroming en doorvoer van zand en slib over de wantijen naar het oosten. Dit zou de neiging tot langzaam verdrinken kunnen versterken.

Consequenties voor andere gebieden

In het Fries-Groningse kleigebied treedt toegenomen verzilting op.

Als bij snellere verdrinking het zand in vloeddelta's komt te liggen en de wantijen dieper worden, zal rond de wantijen slib kunnen worden ingevangen dat niet verder in oostelijke richting (Oostelijke Waddenzee, Eems-Dollard en Duitse Waddenzee) wordt getransporteerd, wat daar de aangroei van kwelders kan verminderen.

3.11 Waddenzee en -eilanden Oost

Zee-trigger

In vergelijking met de westelijke Waddenzee is de oostelijke ondieper, is er meer sediment beschikbaar, en wordt er meer toegevoerd als de zeespiegel stijgt. Modelleringsuggereert dat de oostelijke Waddenzee door sedimentatie minder areaal intergetijdengebied verliest dan de westelijke bij een hoge zeespiegelstijgingssnelheid van 17 mm/jaar, maar wel dieper wordt (Huismans et al. 2022). De reactie van intergetijdengebieden op de snelheid van zeespiegelstijging is nog niet goed bekend, maar het is waarschijnlijk dat, bij een ZSS van 2 m, de litorale gebieden en schorren blijven bestaan, ofschoon de kleinere eilanden iets landwaarts kunnen migreren. Bij een ZSS van 5 m zal het litorale gebied verdwijnen en zullen de eilanden landwaarts migreren.

Achterland-trigger

De zoetwatertoevoer is verwaarloosbaar.

Gebiedseigen trigger

Net als in de westelijke Waddenzee, maar in mindere mate, zal de sedimentatie op platen verminderen met toegenomen stormfrequentie en –duur. Bij 2 m ZSS neemt het intergetijdengebied wellicht af, maar bij 5 m ZSS verdwijnt het, en verdwijnen ook de kwelders.

Consequenties voor andere gebieden

Aan de noordkust veroorzaakt de ZSS verzilting. De verdieping van de Waddenzee en het verdwijnen van de kwelders leiden tot toegenomen golfaanval op de dijken aan de noordkust, waardoor de kans op overspoeling of doorbraak en inundatie toeneemt.

3.12 Eems-Dollard

Zee-trigger

De Eems-Dollard is een estuarium in de oostelijke Waddenzee, waarvan het karakter en gedrag zowel aspecten heeft van de Wadden als van een estuarium als de Westerschelde. De vorm en ontwikkeling is mede bepaald door harde lagen in de ondergrond, welke ook erosie in de geulen zullen beperken. In de afgelopen eeuwen is het bekken door natuurlijke sedimentatie gevuld, welke snelheid meer dan voldoende is om een ZSS van 1 m per eeuw bij te houden (Pierik et al. 2019). De harde lagen hebben mede de ontwikkeling van de Wester-Eems en de afsluiting van de Ooster-Eems veroorzaakt, maar bij 2 m ZSS, en zeker bij 5 m ZSS, wordt de oostelijke tak weer actief. De consequenties voor het estuarium landwaarts van de Eemshaven zijn, behalve verlies van littoraal gebied, onduidelijk.

Achterland-trigger

De Eems-Dollard heeft een hogere slibconcentratie dan wenselijk wordt geacht voor de ecosysteemkwaliteit. Een deel van het slib komt uit de Ems rivier in Duitsland, waar hypertroefbelemmeringen heersen, maar een ander deel komt mogelijk uit de Waddenzee en de Noordzee. Het is echter niet duidelijk of de hoge concentratie ook tot versnelde sedimentatie zou kunnen leiden bij zeespiegelstijging (van Maren et al. 2019). Bij een ZSS van 2 m wordt enig verlies van plaatareaal verwacht en bij 5 m ZSS is te verwachten dat het buitendijkse gebied geheel onder water komt te staan.

Gebiedseigen trigger

Verzilting en kwel zijn al gaande in dit gebied en worden mede door droogte verergerd. Bij gestegen zeespiegel zullen de kweldruk en verzilting toenemen.

Consequenties voor andere gebieden

Rond Delfzijl ligt een laaggelegen gebied dat, in tegenstelling tot het gebied ten westen van de Dollard, niet in de afgelopen eeuwen is opgeslibd. Het is waarschijnlijk dat dit onder water komt te staan.

3.13 Fries-Groningse klei

Zee-trigger

Bij 2 m ZSS verergerd verzilting van dit gebied. Bij 5 m ZSS verdrinken de kwelders en platen in de Waddenzee, wat toegenomen golfaanval en faalkans voor de zeedijken betekent. Zie de oostelijke Wadden.

Achterland-trigger

Nvt

Gebiedseigen trigger

In het Fries gedeelte onder Leeuwarden vindt al verzilting plaats door autonome processen (Oude Essink et al. 2010, Delsman 2021). Het gedeelte tussen Groningen en Delfzijl is ook onderhevig aan kwel en

verzilting, welke zullen toenemen bij zeespiegelstijging. Tevens vindt voortgaande bodemdaling plaats door gaswinning of als na-ijlende reactie op een eventueel afgenomen gaswinning.

Consequenties voor andere gebieden

Nvt

3.14 Fries en Overijssels veengebied

Zee-trigger

Een klein gedeelte ten westen van Sneek is onderhevig aan verzilting, wat versterkt zal worden door ZSS. De toename van (extreme) neerslaghoeveelheden zal steeds grotere problemen opleveren om dit water te bergen en tijdig af te voeren. Hierdoor zullen grondwaterpeilen stijgen, en het gebied vernatten.

Achterland-trigger

Nvt

Gebiedseigen trigger

De grootschalige kwel in het veengebied, van Zwolle tot Leeuwarden, zal toenemen met de zeespiegelstijging en de waterstand in het IJsselmeer.

Consequenties voor andere gebieden

Nvt

4 Reflectie

4.1 Nederland, een landschap met verleden

Doel van deze studie was het verkennen van de natuurlijke ontwikkeling en gedrag van het Nederlandse laagland bij een verdere, hoge zeespiegelstijging en klimaatverandering onder de aanname van een passief waterbeheer (huidige maatregelen zonder aanpassing). De inzichten uit dit beeld kunnen helpen bij het formuleren van oplossingsrichtingen die dit natuurlijke gedrag zou willen volgen. We concluderen uit deze verkenning dat deze toekomstsituatie geen analoog heeft in het verleden:

1. We zitten in een door menselijk handelen overgeërfd en nog steeds sterk beïnvloed laagland; het land is bedijkt, ontwaterd, afgegraven, de laagste delen zijn ingepolderd, het gebied is ingericht voor intensief economisch gebruik door ontwatering, peilbeheer, gestuurde waterverdeling over de rivieren, verdiepte, gebaggerde en vastgelegde rivierbedding, en verdiepte vaargeulen in de estuaria en Waddenzee. De inrichting, dimensionering en beheer ervan zijn daarbij afgestemd op de mogelijkheden van het klimaat in het recente verleden.
2. De huidige klimaatverandering en voorspelde zeespiegelstijging zijn sneller en hoger dan die in de afgelopen millennia waarin de lage delen van Nederland gevormd zijn. Daar waar natuurlijke sedimentatie en landspiegelstijging plaatsvindt, is het twijfelachtig of deze de zeespiegelstijging bij gaat houden, en grote (ingedijkte) gebieden zitten door de bodemdaling uit het verleden ruimschoots voorbij het kantelpunt voor natuurlijke landspiegelstijging.

4.2 Veranderende omstandigheden door klimaatverandering

De combinatie hiervan, zonder aanpassing in beheersmaatregelen, levert nieuwe landschappen op in de delta, welke zijn weergegeven in de Neogeografische kaarten als nieuwe legenda-eenheden ten opzichte van de Paleogeografische kaarten van Vos. De landschappelijke veranderingen in de toekomst zullen worden gedreven door:

- I. Hogere buitenwaterstanden langs de kust (en een snelle stijging hiervan), met hogere extreme (stormvloed) waterstanden;
- II. Hogere gemiddelde en extreme rivierstanden door opstuwing (backwater-effect) vanuit zee in combinatie met hogere piekafvoeren vanuit het stroomgebied;
- III. Een toegenomen kwelstroom in de laagste delen van de delta, die steeds meer brak / zout wordt;
- IV. Een toename in winterneerslag en perioden met hoge neerslagintensiteiten, zie met de huidige drainage en gemaalcapaciteit in grote delen van het jaar niet meer verwerkt kan worden.

4.3 Verwachte veranderingen van het Nederlandse landschap bij passief beheer

Bij een passieve waterbeheerstrategie (huidige beheersmaatregelen zonder aanpassing) en klimaatverandering, schatten we in dat op hoofdlijnen de volgende min of meer geleidelijke veranderingen optreden:

- In de Zuidwestelijke delta zal het oppervlak aan intergetijdengebied en platen afnemen en zullen de schorren en slikken de snelheid van zeespiegelstijging niet kunnen bijhouden en verdrinken.
- De getijwerking in de Westerschelde en benedenrivieren zal groter worden, evenals de (vaar)geuldynamiek.

- Door de hogere zeespiegel zullen de dijken en dammen in de ZW delta vaker overstromen door zeewater, zonder dat dat direct tot doorbraak leidt; maar mede als gevolg van geulverdieping of geulverplaatsing de kans op doorbraak onder stormvloed omstandigheden toenemen. In de Westerschelde kan na een doorbraak natuurlijke sedimentatie leiden tot landspiegelstijging, en meegroeien met de zeespiegelstijging, mits deze niet te snel gaat.
- Bij de Rijn-Maasmonding zullen de keringen zeer vaak dicht gaan en ontstaat opstuwning van de waterstanden in de rivieren. Mogelijk dringen, mede door de verdiepingen uit het verleden, toegenomen stormvloedwaterstanden verder landinwaarts door.
- Bij hogere zeespiegel in de Rijn-Maasmonding en afwezig of gedempt getij in het Haringvliet zal de uitschuring in de kortsluitgeulen (Spui, Oude Maas, Nieuwe Maas) toenemen.
- Het duinengebied van de Hollandse kust zal in stand blijven, door de grote voorraad zand die hierin is opgeslagen, zij het dat het kustfundament ervoor kleiner wordt. De zoetwaterbellen in de duingebieden worden kleiner. Bij grote stormen kunnen kerven ontstaan in het duin, potentieel wash-overs, die vervolgens weer met zand worden aangevuld.
- Grote delen van Zeeland, laag Holland (met name de voormalige droogmakerijen) en het Fries-Groningse kustgebied zullen veranderen in drasgebieden met brak kwelwater. Deze gaan fungeren als natuurlijke berging voor neerslagoverschot. Ook in het Vecht- een veenweidegebieden, die ook onder invloed van hogere rivierstanden staan neemt verdrassing toe.
- In het centrale rivierengebied komen de uiterwaarden van west naar oost in toenemende mate, en uiteindelijk permanent, onder water te staan, en veranderen in moerassen. Achter de rivierdijken ontstaan door de grotere kwel eveneens drasgebieden.
- De rivierdijken voldoen niet meer aan de veiligheidsnorm, en lopen grotere kans op falen. Als de afvoerverdeling bij de splitsingspunten tevens verandert, kan dit per riviertak verschillend uitpakken. In grote delen van het rivierengebied en Holland is het risico op overstroming groter. Dit heeft geen direct landschappelijk gevolg, totdat een dijk faalt. Het is denkbaar dat een deel van een dan geïnundeerd gebied 'opgegeven' wordt voor her-ingebruikname, en moeras wordt. We zien geen aanleiding om te denken dat er nieuwe riviertakken ontstaan, vanwege hogere delen die obstructie vormen voor de benodigde doorstroming van rivierwater voor erosie. Mogelijk ontstaan wel Biesbosch-achtige zandwaaiers. Wel kunnen door falen van dijken gaten ontstaan, die opgevuld worden met water en met de tijd sediment.
- Het IJsselmeer krijgt een hoger peil, wat zich stapsgewijs in mindere mate doorzet in Markermeer en randmeren. In de gebieden rond het IJsselmeer en in de IJsselmeerpolders leiden te hoge grondwaterstanden en tijdelijke inundaties in grote delen van het jaar tot de vorming van drasland dat ongeschikt is voor landbouw.
- De Waddenzee zal bij een snelle zeespiegelstijging verdrinken: platen, buitendijkse gebieden en schorren verdwijnen, en de Waddeneilanden zullen niet meer te beschermen zijn en geleidelijk richting de kust gaan migreren. De Fries-Groningse waddenkust komt in toenemende mate onder druk van hogere zeespiegelstand en golfaanval.

Bovengenoemde veranderingen treden geleidelijk op, en worden min of meer gecontroleerd en gestuurd door beheersmaatregelen, zelfs al worden die niet aan de veranderende omstandigheden aangepast. Daarnaast kunnen er *'shocks'* ontstaan die het verloop van de ontwikkeling drastisch veranderen. Deze zullen optreden bij falen van een waterkering, waarvan de consequenties voor het beschermde gebied niet alleen *abrupt of groot kunnen zijn, maar ook onomkeerbaar* worden:

- Zeeland: bij doorbraak ontstaan kolkgraten zoals bij de ramp in 1953 gebeurde, en loopt een deel van het gebied onder, afhankelijk van de huidige compartimentering. Zonder dijkherstel zal het ondergelopen gebied functioneren als komberging, waarin mogelijk sediment accumuleert, maar welke mogelijk ook tot uitschuring van zeewaartse geulen leidt. Het gebied verandert in zoutwater natuur.
- Hollandse polders: als er een dijkdoorbraak optreedt vanuit het Rijnmondgebied zal het gebied getrapt en vertraagd door de huidige compartimentering vollopen, en mogelijk resulteren in de doomsituatie van een diepe, brakke lagune. Droogmakerijen gaan niet wellicht direct overstromen vanwege hun ringdijk, maar als de primaire waterkering in het Rijnmondgebied breekt, gaat het niet meer lukken om ze leeg te pompen. Daarnaast kan er voor de droogmakerijen in geval ze bij een calamiteit vollopen het besluit voorliggen om te stoppen met leegmalen omdat dat economisch niet haalbaar is, waarna grote meren blijven bestaan.
- Rivierengebied: bij inundatie door dijkbalen van een laaggelegen gebied is niet te verwachten dat een rivier een nieuwe loop gaat volgen (avulsie), omdat het water aan de benedenzijde van een ondergelopen polder niet weg kan, en er dus geen stroombaan kan ontstaan met voldoende kracht om een nieuwe bedding uit te schuren. Bovendien veroorzaakt de opstuwning in de rivier bij gestegen zeespiegel een sterke afname van de stroomkracht van het rivierwater. Het is wel denkbaar dat er achter de instroompunten zandwaaiers ('overslagen') ontstaan in de geïnundeerde polders, in kleiner formaat dan welke bijvoorbeeld in de Biesbosch is ontstaan na de St. Elisabethvloed in 1421-1424. Aannemelijk is dat het ondergelopen gebied extensiever gebruikt gaat worden, of als bergingsgebied gaat functioneren.
- Fries-Groningse kust: Bij doorbraak van de Wadenzeedijk zal de zone met kwelders landinwaarts opschuiven. Dan veranderen de drassige gebieden in opdringende kwelderzones, die snel kunnen opslibben.
- IJsselmeerpolders: Als hun dijken doorbreken lopen deze vol met vele meters water; als het economisch gezien niet meer haalbaar is om ze weer leeg te pompen, blijven het meren.

4.4 Consequenties voor oplossingsrichtingen voor adaptatie

Voor de oplossingsrichtingen kunnen de ingeschatte gevolgen van zeespiegelstijging gekoppeld aan klimaatverandering het volgende betekenen:

- Grote arealen van laag Nederland worden dras/moeras. In veel gebieden liggen de nieuwe moerassen veel lager ten opzichte van de zeespiegel dan de natuurlijke delta-moerassen in de periode voordat de mens deze ontgon of ging afgraven. Daardoor ontstaat op termijn een keuze in hoeverre we alle polders die dras/moeras worden droog willen blijven malen als zij niet meer voor landbouw geschikt zijn. Mogelijk zijn er vormen te vinden waarin polders geleidelijk minder bemalen worden met een natuur die een stijgend polderpeil bij kan houden en weer tot opbouw van met organische materiaal leidt, maar bij snelle zeespiegelstijging is dat zeker niet haalbaar.
- Om het stedelijk gebied te ontzien en omdat overtollig water met het huidige boezemsysteem niet meer voldoende afgevoerd kan worden, zullen binnen laag Nederland grote gebieden voor waterberging ingericht moeten worden. Dit zou gecombineerd kunnen worden met poldergebied dat teruggegeven wordt aan natuur. In algemene zin betekent dit dat het onvermijdelijk wordt om voor deze gebieden adaptatiestrategieën te ontwikkelen die gericht zijn op veranderd landgebruik en accommodatie van water, deels omdat het lokaal onvermijdelijk is, deels om water te kunnen bufferen voor te beschermen stedelijke en industriële zones binnen het gebied.

- Langs de zandkust en bij de Dollard is nog voldoende sediment (zand resp. slib) aanwezig om duinvoet, en delen van platen en schorren op te hogen. Maar bij 5 m ZSS zal dit lastig worden door de bijbehorende hoge snelheid van zeespiegelstijging. De rivieren voeren onvoldoende sediment mee om hiermee verlies aan deltahoogte te compenseren, zelfs op kleine schaal.
- Langs de benedenrivieren is vergroting van de bergings- en afvoercapaciteit ('Ruimte voor Rivieren') niet langer effectief voor hoogwaterbescherming vanwege de opstuwung van de rivierstanden vanuit zee. Dit zal steeds verder stroomopwaarts gaan gelden. In het Rijn-Maas mondingsgebied zullen adaptatiestrategieën voor zeespiegelstijging niet alleen rekening moeten houden met tijdelijke berging van rivierwater bij hoge rivierafvoer, maar ook met opstuwungseffecten stroomopwaarts, veranderingen in de sedimentbalans en morfologische reacties van de riviertakken, waarschijnlijk tot aan de splitsingspunten aan toe. Daarmee worden de benedenrivieren geleidelijk estuaria, en de bovenrivieren getijrivieren.
- Bij het IJsselmeer en Markermeer valt te denken aan strategieën waarbij vanuit een hoge zeespiegelstand stapsgewijs lagere waterstanden gehandhaafd kunnen worden ter bescherming van de noordelijke Randstad, maar hiermee zullen problemen die voortkomen uit kwel en extreme neerslag niet verholpen zijn.
- Het van falen van een primaire waterkering kan ertoe leiden dat een gebied niet meer hersteld wordt met de oorspronkelijke functie, maar permanent gaat fungeren als natuurgebied of waterbuffer. Ontwikkelen van storylines voor de tweede laag in hoogwaterbescherming is van belang om inzicht te verschaffen in de mate van fysieke en socio-economische veerkracht van gebieden en het doen van investeringen in overstromingsgevoelige gebieden.
- Het voorkomen van de grootschalige, en daarmee ingrijpende veranderingen die zeespiegelstijging en klimaatverandering in de delta zullen veroorzaken, vereisen, voor zover mogelijk, grootschalige en ingrijpende keuzes in de ruimtelijke inrichting, permanente integrale aandacht, acceptatie van een leidende rol van het water bij de inrichting, en nieuwe investeringen in waterbeheer.
- De grootschalige veranderingen die bij huidige inrichting en beheer te verwachten zijn, laten zien dat klimaatmitigatie in overeenstemming met het Akkoord van Parijs van levensbelang is voor Nederland.

Literatuur

Boekel, E.M.P.M. van, J. Roelsma, H.T.L. Massop, H.M. Mulder, P.C. Jansen, L.V. Renaud & R.F.A. Hendriks (2013). Achtergrondconcentraties in het oppervlaktewater van HHNK; Deelrapport 2: Analyse achtergrondconcentraties voor stikstof en fosfor op basis van water- en nutriëntenbalansen voor de Schermer-Noord. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2475.2.

Boekel, E.M.P.M. van, J. Roelsma, H.T.L. Massop, H.M. Mulder, L.V. Renaud & R.F.A. Hendriks, 2014. Achtergrondconcentraties in het oppervlaktewater van HHNK; Deelrapport 33: Analyse achtergrondconcentraties voor stikstof en fosfor op basis van water- en nutriëntenbalansen voor deelgebied Wieringermeer Oost. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2475.33.

Cox, J.R., F.E. Dunn, J.H. Nienhuis, M. van der Perk, and M.G. Kleinmans (2021). Climate change and human influences on sediment fluxes and the sediment budget of an urban delta: the example of the lower Rhine–Meuse delta distributary network. *Anthropocene Coasts* 4(1), 251-280.
<https://doi.org/10.1139/anc-2021-0003>

De Bruijn, K. and Klijn, F. (2009), Risky places in the Netherlands: a first approximation for floods. *Journal of Flood Risk Management*, 2: 58-67. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01022.x>

Delsman, J.R., 2021. Totstandkoming verziltingsrisicokaart Op Waterbasis. Deltares memo 11206870-011.

Delsman, J.R., Oude Essink, G.H.P., Huizer, S., Bootsma, H., Mulder, T., Zitman, P., Romero Verastegui, B., 2020. Actualisatie zout in het NHI - Toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model, Deltares rapport 11205261-003-BGS-0001. Utrecht.

Deltares 2021. Inventarisatie van huidige kennis voor adaptatie aan zeespiegelstijging en het mogelijke ruimtebeslag op de lange termijn.
https://www.zwdelta.nl/sites/all/files/default/publicaties/20200210_inventarisatie_zuidwestelijke_delta.pdf

Dik, P.E., J.G. Kroes, A.A.M.F.R. Smit & A.A. Veldhuizen (2005). Onderbouwing wateropgave Haarlemmermeerpolder; Modelbouw, kalibratie en scenarioanalyse. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 1183.

Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Haas, de, T., Pierik, H. J., Spek, van der, A. J. F., Cohen, K. M., Maanen, van, B., & Kleinmans, M. G. (2018). Holocene evolution of tidal systems in The Netherlands: Effects of rivers, coastal boundary conditions, eco-engineering species, inherited relief and human interference. *Earth-Science Reviews*, 177, 139-163.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.006>

Haasnoot, M., Bouwer, L., Diermanse, F., Kwadijk, J., Spek, van der, A., Oude Essink, G., Delsman, J., Weiler, J., Mens, M., ter Maat, J., Huismans, Y., Sloff, K., Mosselman, E. (2018). Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning. Delft: Deltares. <https://www.deltares.nl/nl/publication/mogelijke-gevolgen-van-versnelde-zeespiegelstijging-voor-het-deltaprogramma-een-verkenning/>

Huismans, Y., Spek, van der, A., Lodder, Q., Zijlstra, R., Elias, E., & Wang, Z. B. (2022). Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: Spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise. *Ocean & Coastal Management*, 216, 105969. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105969>

Immerzeel, W., Graafstal, H.G. & Loeve, R. (2006). Evaluatie wateraanvoer in de Noordoostpolder. FutureWater, Wageningen.

Kleinhans, M. G., Klijn, F., Cohen, K. M., & Middelkoop, H. (2013). Wat wil de rivier zelf eigenlijk?. Deltares Report, (1207829-000-VEB-0024), 1-50. https://publications.deltares.nl/1207829_000b.pdf

KNMI, 2015: KNMI '14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp.

KNMI 2021: KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt, 72 pp.

Koster, K., Stafleu, J., Vos, P. C., & Meulen, van der, M. J. (2020). Can we elevate the subsiding coastal plain of the Netherlands with controlled sedimentation? *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 767-773.

Leuven, J., Pierik, H., van der Vegt, M., Bouma, T., and Kleinhans, M. 2019. Sea-level-rise-induced threats depend on the size of tide-influenced estuaries worldwide. *Nat. Clim. Change* 9: 986–992. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-019-0608-4>

Oude Essink, G. H. P., van Baaren, E. S., and de Louw, P. G. B. (2010), Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resources Research*, 46, W00F04, <https://doi.org/10.1029/2009WR008719>

Pierik, H.J., F.S. Busschers, M.G. Kleinhans (2019) De rol van resistente lagen in de historische morfologische ontwikkeling van het Eems-Dollard estuarium vanaf de 19e eeuw, Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie, rapport i.o. Rijkswaterstaat WVL ten behoeve van het ED2050 programma; in druk in *The Depositional Record*: Pierik et al. (2022) Depth-limiting resistant layers restrict dimensions and positions of estuarine channels and bars

Sperna Weiland, F., Hegnauer, M., Bouaziz, L. and J. Beersma. (2015) Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. https://publications.deltares.nl/1220042_000.pdf

Straatsma, M. W., Fliervoet, J. M., Kabout, J. A. H., Baart, F., and Kleinhans, M. G. 2019. Towards multi-objective optimization of large-scale fluvial landscaping measures, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1167–1187, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1167-2019>.

Van der Perk, M., Sutari, C. A. T., & Middelkoop, H. (2019). Examination of the declining trend in suspended sediment loads in the Rhine River in the period 1952-2016. 73-74. Poster session presented at NCR Days 2019, Utrecht, Netherlands. <https://ncr-web.org/publications/land-of-rivers-ncr-days-2019-book-of-abstracts/>

van der Spek, A. (1997). Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of palaeo-tides in the Schelde estuary. *Marine Geology* 141, 71–90.

van Dijk, Wout M., Jana R. Cox, Jasper R.F.W. Leuven, Jelmer Cleveringa, Marcel Taal, Matthew R. Hiatt, Willem Sonke, Kevin Verbeek, Bettina Speckmann, and Maarten G. Kleinhans 2021. The vulnerability of tidal flats and multi-channel estuaries to dredging and disposal. *Anthropocene Coasts*. 4(1): 36-60. <https://doi.org/10.1139/anc-2020-0006>.

Van Maren, B., R. Schrijvershof, J. Vroom (2019). Hydromorfologische ontwikkeling Eems-Dollard. Optimalisatie morfologisch model en voorspelling autonome ontwikkeling Eems-estuarium ihkv ED2050. Deltares <https://eemsdollard2050.nl/wp-content/uploads/2020/03/Onderzoeksrapport-Hydromorfologische-ontwikkeling-Eems-Dollard.pdf>

Verschelling, E., van der Perk, M., & Middelkoop, H. (2018). The impact of climate change on the morphology of a tidal freshwater wetland affected by tides, discharge, and wind. *River Research and Applications*, 34(6), <https://doi.org/10.1002/rra.3282>.

Vos, P., Bungenstock, F. (2013). Abriss der Landschafts- und Küstenentwicklung / Schets van de ontwikkeling van het kustlandschap. In Kegler, J. F., Nieuwhof, A., Nowak-Klimscha, K., & Reimann, H. (Eds.) (2013). *Land der Entdeckungen. Die Archäologie des friesischen Küstenraums/Land van Ontdekkingen. De archeologie van het Friese kustgebied* (pp. 60-69). Ostfriesische Landschaft.

Vos, P., Bazelmans, J., Van der Meulen, M., Weerts, H. (2011). Atlas van Nederland in het Holoceen: landschap en bewoning vanaf de laatste ijstijd tot nu. Prometheus. 96 pp. 1^e druk. Vos, P., Bazelmans, J., Van der Meulen, M., Weerts, H. (2018). Atlas van Nederland in het Holoceen: landschap en bewoning vanaf de laatste ijstijd tot nu. Prometheus. 96 pp. 11^e herziene druk.

Wang, Z. B., Elias, E. P., van der Spek, A. J., & Lodder, Q. J. (2018). Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97(3), 183-214. <https://doi.org/10.1017/njg.2018.8>

Waterschap Zuiderzeeland (2006). Watersysteembeheer - Jaar Rapportage 2007-2008. Waterschap Zuiderzeeland, Lelystad.