

Als de zeespiegel sneller stijgt...

Resultaten van een Policy Hackathon naar knikpunten en mijlpalen bij adaptatie aan extreme zeespiegelstijging in Nederland



Deltares, maart 2017



Marjolijn Haasnoot, Laurens Bouwer en Jaap Kwadijk (redactie),
met bijdragen van Fedor Baart, Peter de Grave, Ida de Groot, Mindert de Vries, Gennadii Donchyts,
Dirk Eilander, Gilles Erkens, Gu Oude Essink, Peter Herman, Wim Kanning, Mandy Korff, Henk Kooi,
Nienke Kramer, Albert Oost, Ivo Pothof, Henriette Otter, Rutger van der Brugge, Maaike van Aalst,
Willem van Deursen, Rens van den Bergh, Ap van Dongeren, Femke Schasfoort, Ad van der Spek,
Bregje van Wesenbeeck, Hessel Winsemius (allen Deltares), Pieter Bloemen (staf Deltacommissaris).

1. Waarom nadenken over extreme en versnelde zeespiegelstijging?

In de hackathon die Deltares op 8 november 2016 organiseerde, is nagedacht over de gevolgen van extreme zeespiegelstijging voor Nederland, en mogelijke maatregelen om de gevolgen hiervan te beperken. De aanleiding is internationaal onderzoek dat aangeeft dat de wereldwijde zeespiegelstijging kan gaan versnellen. Dit is gebaseerd op recente kennis over de stabiliteit van ijskappen zoals Groenland en Antarctica. De zeespiegel zou in het jaar 2100, maar vooral ook daarna, veel hoger kunnen zijn dan tot nu toe werd aangenomen in projecties van IPCC AR5, en van het KNMI en de Deltacommissie. Een van deze studies¹ geeft mogelijke zeespiegelstanden van 2 meter in 2100, en uiteindelijk meer dan 20 meter in 2500. In 2018 zal het IPCC een nieuw rapport² publiceren over ijskappen en zeespiegels, waarin deze nieuwe kennis centraal staat.

De vraag is hoe de delta zich gaat ontwikkelen bij dergelijke zeespiegelstijgingen en of er maatregelen te bedenken zijn waarmee we hier kunnen blijven leven. De vervolgvraag is of de maatregelen die in Nederland worden gepland voldoende robuust dan wel adaptief zijn en dus nuttige voorlopers zijn die rekening houden met deze meer extreme scenario's. De scenario's voor het Deltaprogramma gaan uit van 85 cm (KNMI'14). Tot dus ver is voor nationale waterplannen maximaal 1.3 meter meegenomen³. Enkele studies⁴ hebben gekeken naar effecten en maatregelen van een meer extreme zeespiegelstijging (5 tot 6 meter), maar zij gaan echter uit van een veel langere periode waarop deze stijging plaatsvindt. Effecten en maatregelen voor zeespiegelstijging tot 20 meter zijn nog niet eerder onderzocht, niet in Nederland en waarschijnlijk ook niet daarbuiten.

Tijdig anticiperen op deze snellere zeespiegelstijging is van belang. De maatregelen zijn omvangrijk en hebben grote gevolgen voor de huidige inrichting van Nederland. Er is veel tijd nodig dergelijke grootschalige maatregelen te plannen en uit te voeren. Om tijdig te anticiperen zijn waarnemingen nodig om de risico's tijdig in beeld te hebben. Daarnaast moet uitvoering van maatregelen snel genoeg gebeuren om de Nederlandse delta te beschermen.

Waaraan het ontbreekt, is kennis over de gevolgen van versnelde zeespiegelstijging en mogelijke maatregelen. Die kennis is nodig voor het vertrouwen in Nederland als aantrekkelijke leefomgeving en vestigingslocatie. Onderbouwing van mogelijke gevolgen en maatregelen geeft vertrouwen dat Nederland goed beschermd blijft bij extreme zeespiegelstijging.

Dit document beschrijft de resultaten van een eendaagse werksessie en niet een langdurig en compleet onderzoek naar de effecten van versnelde en extreme zeespiegelstijging. De resultaten moeten daarom worden gezien als een eerste indicatie van wat er kan gebeuren.

2. De Policy Hackathon

In een policy hackathon probeert men - door het bijeenbrengen van experts in uiteenlopende disciplines - een beleidsvraag in korte tijd (in dit geval een dag) te beantwoorden. In deze hackathon hebben we gekeken naar knikpunten (grenzen) en mijlpalen (belangrijke gebeurtenissen) voor het waterbeheer van de Nederlandse delta bij een steeds verder en sneller stijgende zeespiegel. Zo'n

¹ De Conto, R., Pollard, D. (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531, 591-597.

² <https://www.ipcc.ch/report/srocc/>

³ Haasnoot, M. & Middelkoop, H. (2012). A history of futures: A review of scenario use in water policy studies in the Netherlands. *Environmental Science & Policy*, 19-20, 108-120.

⁴ Dit zijn: Dienst Getijdewateren 1986; Kwadijk et al. 2007; Olsthoorn et al. 2008.

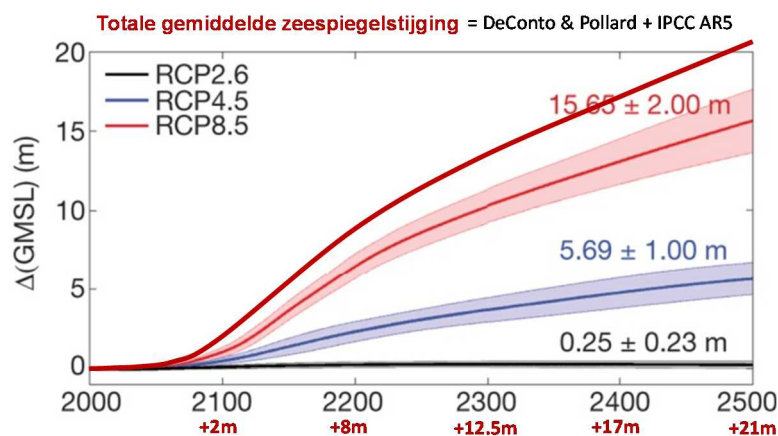
20 experts van Deltares met verschillende disciplines en ervaring kwamen 1 dag bij elkaar om zo veel mogelijk knikpunten en mijlpalen te verzamelen (Figuur 1). De volgende disciplines waren vertegenwoordigd: morfologie, hydraulica, fysische geografie, civiele techniek, ecologie, economie, en beleidsanalyse. Bij de zoektocht naar knikpunten en mijlpalen keken we zowel top-down als bottom-up door ons zelf de volgende vragen te stellen: 1) Wat gebeurt als de zeespiegel stijgt met x meter (top-down)?; en 2) Bij welke zeespiegelstijging komen we in de problemen en moeten we extra maatregelen nemen (bottom-up)? Hierbij is gekeken tot 20 meter zeespiegelstijging (zie Box 1). Het Deltaprogramma en de deltabeslissingen zoals gepresenteerd in het Deltaprogramma van 2015⁵ vormden het uitgangspunt van de hackathon. De focus lag daarom op de volgende vragen:

1. Wat zijn de gevolgen voor de stabiliteit van de Nederlandse delta?
2. Zijn er grenzen aan het pompen van water uit het IJsselmeer?
3. Zijn er grenzen aan zandsuppletie?
4. Zijn er grenzen aan het ophogen van de keringen?
5. Zijn er grenzen aan de grondwater influx die de delta kan hebben?
6. Zijn er grenzen aan het aanpassen van steden?

Voor het beantwoorden van de vragen hebben de experts in verschillende samenstellingen gebrainstormd en literatuur en modellen geraadpleegd. In eerste instantie lag de focus op de zoektocht naar verschillend e knikpunten (zie box 2). Omdat er geconstateerd werd dat er niet altijd een *knikpunt* kon worden aangewezen, maar er wel belangrijke gebeurtenissen plaatsvonden en/of adaptatiemaatregelen nodig waren, zijn ook deze mijlpalen verzameld. De bevindingen in de hackathon zijn vervolgens samengevat in dit document en een infographic dat aangeeft welke knikpunten en mijlpalen we tegen kunnen komen als de zeespiegel verder stijgt.

Box1: Welke maximale zeespiegelstijging kunnen we verwachten?

Op basis van een nieuw model van het afkalven van Antarctica hebben Pollard en De Conto (2016) schattingen gemaakt van zeespiegelstijging tot het jaar 2500. Ze beschrijven hierin mechanismes die tot voor kort nog onvoldoende werden begrepen; de invloed van warme lucht en warm water op het drijvende ijs voor de kust van Antarctica, en de invloed hiervan op het afkalven van het landijs. Met het model verklaren ze waargenomen zeespiegelveranderingen uit het verleden, en geven ze een verwachting voor de toekomst op basis van verschillende atmosferische concentraties van broeikasgassen. Als deze schattingen worden vermeerderd met de hoogste schattingen van IPCC AR5 voor andere processen die bijdragen aan zeespiegelstijging (thermische expansie van het zeewater, gletsjers, en Groenland) kan de totale zeespiegelstijging in 2100 uitkomen op ca. 2 meter, 8 meter in 2200, en ca. 21 meter in 2500.



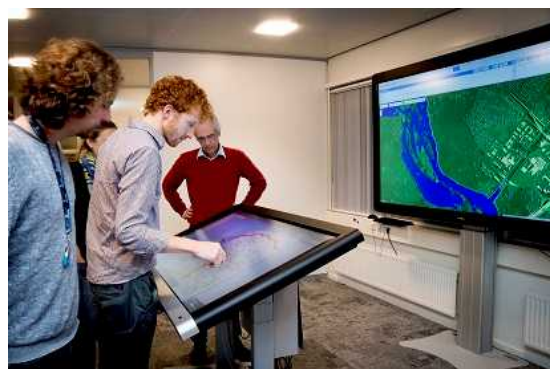
⁵ Deltaprogramma (2016) Deltaprogramma 2015, Werk aan de delta. <http://www.deltacommissaris.nl>

Box 2: Knikpunten en mijlpalen

Bij een knikpunt presteert het systeem onacceptabel en worden doelen niet gehaald. De beschrijving van een knikpunt wordt vaak gedaan in termen van omstandigheden. Bijvoorbeeld 'bij een zeespiegelstijging van 0.85 m zal de Maeslantkering naar verwachting zo vaak moeten sluiten dat de bereikbaarheid van Rotterdam in gevaar komt.' Er zijn verschillende redenen voor een knikpunt, namelijk:

- Economisch: kosten voor maatregel wegen niet op tegen de baten of er is niet genoeg geld.
- Technologisch: de techniek voor een maatregel is (nog) niet beschikbaar.
- Fysiek: een maatregel is fysiek niet mogelijk of veroorzaakt een grote verandering in geomorfologie.
- Maatschappelijk: er is geen draagvlak voor de situatie of een maatregel.
- Resources: er is onvoldoende materiaal of middelen (zoals zand, ruimte of energie).
- Natuur: er is onacceptabele schade voor natuur.
- Tijd: om maatregel te implementeren of aan te passen aan veranderende omstandigheden is onvoldoende.

De mijlpalen bestaan uit belangrijke gebeurtenissen, zoals een beschrijving van hoe een maatregel of de delta er dan uit komt te zien.



Figuur 1. Foto's van de policy hackathon in het ID-lab bij Deltares op 8 november 2016

3. Algemene conclusies

1. Technisch gezien lijken er geen knikpunten te zijn, met name wat betreft het versterken van keringen, afvoer van Rijn en Maas via pompen, en de kustverdediging, maar er zijn wel heel belangrijke beslissingen te nemen die grote maatschappelijke consequenties hebben.
2. Bij extreme zeespiegelstijging is Nederland een heel ander land. De gevolgen van meer dan 6 meter zeespiegelstijging voor Nederland zijn voor het eerst in de Hackathon schetsmatig in beeld gebracht. Bestaande beleidsstudies gaan uit van zeespiegelstijging van minder dan 1 meter, tussen 1 en 6 meter bestaan er drie studies.
3. Voor het waterbeheer in Nederland is nu ongeveer €4-5 miljard per jaar nodig. Ervan uitgaande dat het leeuwendeel besteed wordt aan het opvangen van verschillen in waterniveau zou een vijf keer zo grote zeespiegelstijging leiden tot een groei naar circa 3% van het BNP (€26 miljard/jaar).
4. Extreme zeespiegelstijging heeft tot gevolg dat Nederland verandert in een estuarium, tenzij de kust wordt afgesloten. De zeespiegelstijging heeft ook invloed op de stabiliteit van de splitsingspunten van de rivieren; het is aannemelijk dat er steeds meer water naar de IJssel gaat.
5. In principe is het mogelijk met pompen water van de IJssel te blijven uitslaan op de Waddenzee. Vanwege de veiligheid moeten de IJsselmeerdijken mogelijk worden opgehoogd voor het geval de pompen falen. In huidige studies wordt aangenomen dat afvoerdeling niet veranderd.
6. Of er voldoende zand is voor zandsuppletie aan de kust bij extreme zeespiegelstijging is onduidelijk, vanwege mogelijke concurrentie om zand, en ruimtegebruik op de Noordzee voor andere activiteiten.
7. Voor het versterken en ophogen van de primaire waterkeringen tot ca. 6 meter is orde €400 miljard nodig. Het is technisch mogelijk om de keringen te blijven versterken en ophogen, maar de keringen zullen zeer breed worden en lastiger in te passen.
8. De gevolgen van de zeespiegelstijging voor het grondwater zullen met name in de het gebied langs de kust en het open water merkbaar zijn.
9. Toename van de grondwaterstroming kan leiden tot opbarsting, die kans wordt mogelijk substantieel groter vanaf 4 meter zeespiegelstijging. Ook ontstaan er steeds meer problemen met de zoetwatervoorziening omdat dunne zoetwaterlenzen verdwijnen en mogelijkheden voor natuurlijke infiltratie in duingebieden sterk verminderen.
10. Het vestigingsklimaat in Nederland hangt sterk af van het vertrouwen dat Nederland veilig en bewoonbaar blijft. Het stedelijk waterbeheer zal zich ook moeten aanpassen aan de veranderingen van de drainagecapaciteit op het secundaire en primaire watersysteem, en de grondwaterinflux. Daarnaast moet er rekening worden gehouden met veranderingen in neerslagintensiteit.
11. De nieuwe scenario's laten een versnelde zeespiegelstijging zien in de tweede helft van deze eeuw. Dit lijkt ver weg, maar het vraagt transformatieve (grotere en koerswijzigende) maatregelen. Die kunnen consequenties kunnen hebben voor de korte termijn, omdat:
 - sommige opties slechts kort nuttig zijn en daarmee weinig relevant,
 - implementatie van deze maatregelen tijd kost, en
 - de transformatieve maatregelen daarmee eerder nodig zijn.Als voorbeeld: Er zijn 3150 km keringen. Het hoogwaterbeschermingsprogramma past ongeveer 25 km per jaar aan. In dat geval is voor de uitvoering 125 jaar nodig. Bij dubbele uitvoeringssnelheid duurt het nog steeds 62 jaar. Bij dergelijke snelheden zouden we eigenlijk dus nu al rekening moeten houden met de zeespiegelstijging van halverwege volgende eeuw,

of op z'n minst die van eind van de eeuw, indien de uitvoering versneld wordt. Bovendien komen dan transformatieve maatregelen in beeld, die nog eens extra tijd zullen kosten.

De vraag is of Nederland is ingericht om zich snel te kunnen aanpassen. Zijn onze huidige regels en wetgeving en participatieve aanpak wel in staat om tijdig te reageren en aan te passen?

12. Om transformatieve maatregelen mogelijk te maken en snel te kunnen handelen bij een 'window of opportunity', is het goed als er plannen klaar liggen. Daarom is het van belang om studies naar de gevolgen van zeespiegelstijging en mogelijke maatregelen te blijven doen. Dit blijkt ook uit het verleden (bijv. het Deltaplan in de jaren '50). Voorbereidende maatregelen, zoals reservering van ruimte, kunnen helpen om opties voor maatregelen open te houden.
13. Het is nuttig om tijdig signalen te hebben over de noodzaak tot transformatieve adaptatie. Daarvoor is een signaleringssysteem – een set van indicatoren die gemonitord wordt - nodig.
14. Mogelijke vragen voor vervolgonderzoek zijn:
 - Hoe snel en hoeveel neemt het risico toe?
 - Hoe snel moeten we zijn om tijdig te anticiperen?
 - Hoe ziet een signaleringssysteem er uit en kan dit tijdige, betrouwbare en overtuigende informatie aanleveren voor adaptatie?

Daarnaast zien we voor vervolg onderzoek onder meer: uitzoeken wat de gevolgen van extreme zeespiegelstijging zijn voor de groepsrisico's bij de huidige adaptatie. De kans op grote aantallen slachtoffers wordt mogelijk groter wanneer de zeespiegel versneld stijgt waardoor er grotere waterdieptes kunnen ontstaan en stijgsnelheden toenemen. Als dat onacceptabel is, dan zou dit meegenomen moeten worden in de normering (misschien nu al?). In samenhang hiermee is de vraag: hoe verhouden extreme zeespiegelscenario's zich tot de hydraulische randvoorwaarden die nu worden aangenomen in het uitvoeringstraject van dijkversterkingen (ontwerpinstrumentarium)?

De volgende hoofdstukken beschrijven de gevonden knikpunten en mijlpalen in meer detail. Een samenvatting is gevisualiseerd in de infographic in de bijlage.

4. Wat zijn de gevolgen voor de stabiliteit van de Nederlandse delta?

Bij zeespiegelstijging tot 2 meter kan het beheer van het huidige systeem van kust en rivieren, met aanpassingen, nog mee. Bij stijgingen van 2 tot 6 meter zijn drastische ingrepen nodig om Nederland bewoonbaar te houden. In dat geval gaat de delta er echt anders uit zien, maar kunnen we er nog blijven wonen. De gevolgen van nog grotere stijgingen zijn nauwelijks meer voorstelbaar of voorspelbaar.

De ontwikkeling van het kustfundament van Nederland wordt bepaald door de sedimentbeschikbaarheid in de Noordzee en is niet gerelateerd aan de sedimentaanvoer via de Rijn en de Maas. Het kust profiel zal steiler gaan worden. Op sommige plaatsen gaat dit voor meer afslag zorgen, maar niet overal.

Bij 50 cm zeespiegelstijging zijn al de eerste problemen te verwachten. Kustplaatsen gaan uitsteken in zee ten opzichte van het eroderende duin en worden daarmee kapen. Alleen met grotere suppleties is dit nog tegen te gaan. De vraag is dan of de basiskustlijn nog te handhaven is en wanneer we de strategie gaan opgeven.

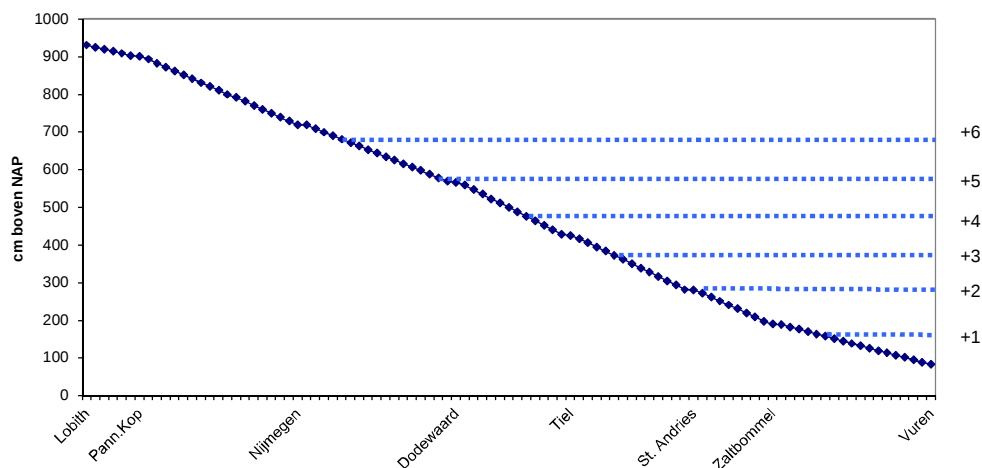
Bij 2 meter zeespiegelstijging, verplaatst de kust zich ongeveer 100 meter land inwaarts. Dit zal lokaal grote consequenties hebben, zeker waar het kustfundament nu al smal is, bij de zwakke

schakels bijvoorbeeld), maar het land inwaarts verplaatsen van de kust lijkt voor de stabiliteit van de delta en Nederland als geheel geen knippunt te zijn.

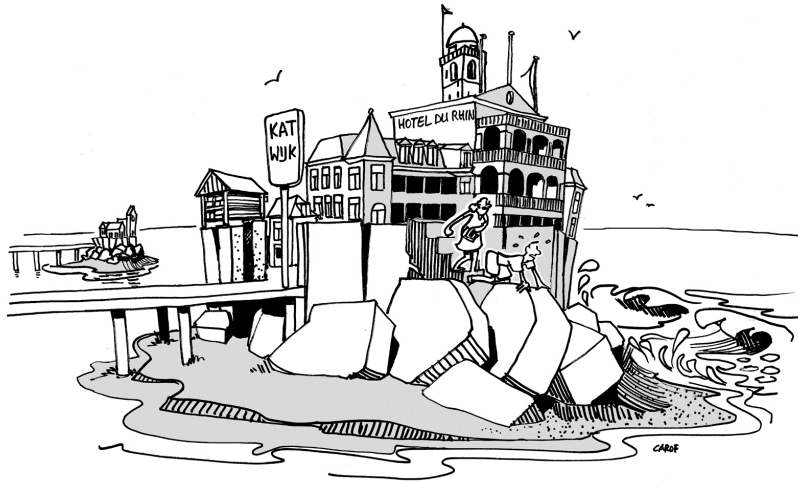
Bij zeer extreme zeespiegelstijgingen kan de ankerfunctie van Texel in gevaar komen. De Hoge Berg op Texel ligt op 15 meter boven NAP. Bij grotere zeespiegelstijging wordt Texel overspoeld en kan het kustfundament naar binnenslaan en een nieuwe natuurlijke positie innemen op de lijn België – Gaasterland. Ook zal het verhang van de rivieren minder worden, en rivieren kunnen zicht makkelijker gaan verleggen. Bij zeespiegelstijgingen tussen de 6-7 meter kan het gehele Nederlandse rivierengebied worden beschouwd als een estuarium. Waterstanden op zee zullen voelbaar gaan worden tot aan Nijmegen (zie Figuur 2).

Zeespiegelstijging heeft consequenties voor het de stabiliteit van de splitsingspunten en daarmee voor de belasting op de keringen. Voor de splitsingspunten geldt dat deze van nature al niet stabiel zijn, er is een sterk niet-lineair gedrag. Het vastleggen van de water/sediment verdeling op splitsingspunten zal bij extreme zeespiegelstijgingen moeilijker worden (Figuur 3). Zolang de westelijke riviertakken een open verbinding naar zee hebben en de Gelderse IJssel uitmondt in het afgesloten IJsselmeer, neemt het gradiëntvoordeel van de Gelderse IJssel toe waardoor de afvoerverdeling kan veranderen.

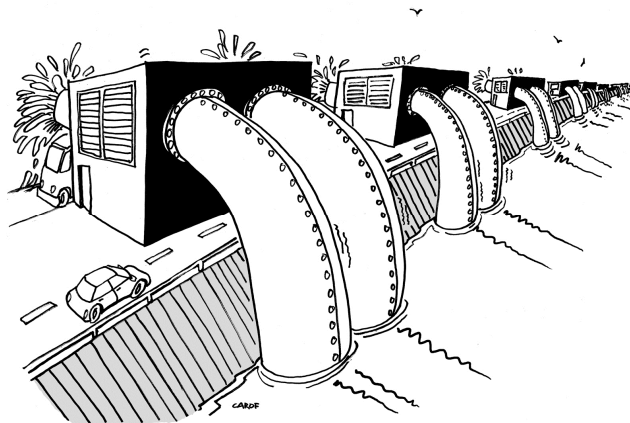
Naast extreme zeespiegelstijging daalt de bodem ook. Vooral in het gebied tussen Woerden en de strandwallen in het westen, omdat hier veel veen voorkomt. De zandaanvoer via de Rijn heeft in de afgelopen 1000-jaren niet verder dan Woerden gereikt. (zie ook hierboven). In dit gebied moeten we rekening houden met bodemdaling van maximaal 3 tot 4 meter. Met doorgaande bodemdaling en steeds vaker en langer voorkomen van hogere rivierwaterstanden worden de te keren watermassa's langs de rivieren in laaggelegen West-Nederland steeds groter. De vraag is hoe lang dit haalbaar is. Zou de natuurlijke ontwikkeling leidend zijn, is de meest voor de hand liggende toekomstige Rijnloop een hoofdloop door het IJsseldal naar het IJssel meer, en misschien een tweede loop door de Gelderse Vallei richting IJsselmeer. Doorgaande bodemdaling zorgt ook voor steeds meer hoogteverschil tussen de boezemsystemen en de polders. Bij extreme zeespiegelstijging zal het boezemwaterniveau ook stijgen, waardoor dit verschil nog meer toeneemt. Bij grotere hoogteverschillen moeten meer kades worden opgeworpen en als het hoogteverschil 2 meter is moet de kade als een dijk beheerd worden. Dit betekent een toename van de lengte aan secundaire keringen.



Figuur 2 Getij invloed op de Waal bij verschillende zeespiegelstanden (+1 tot +6 meter).



Figuur 3 Kustplaatsen worden kapen. Onder: de splitsingspunten van de rivieren zijn van nature al niet stabiel zijn, er is een sterk niet-lineair gedrag. Het vastleggen van de water-/sedimentverdeling op splitsingspunten zal bij extreme zeespiegelstijgingen moeilijker worden (© Beeldleveranciers-Carof).



Figuur 4 Technologisch is het mogelijk met hele grote pompen langs de Afsluitdijk het water uit het IJsselmeer te spuien (©Beeldleveranciers-Carof).

5. Zijn er grenzen aan het pompen van water uit het IJsselmeer?

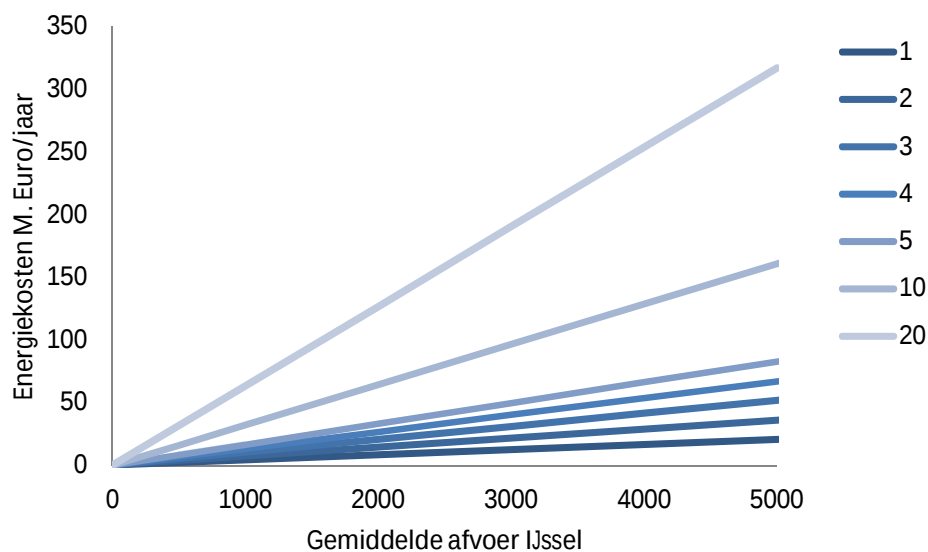
Bij het beantwoorden van de vraag of er grenzen zijn aan het pompen van water uit het IJsselmeer is in eerste instantie gekeken naar wat er gebeurt als zich piekafvoeren voordoen en wat de benodigde pompcapaciteit dan is.

Er lijkt geen technologisch knippunt voor het maken van een grote pomp (Figuur 4). De capaciteit van de grootste pompen die er bestaan in de wereld is rond de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ met een opvoerhoogte van 60m (aankosten 436 Miljoen euro).

Ook een resources knippunt vanwege beperkte hoeveelheid ruimte is niet aanwezig. De Afsluitdijk is voldoende lang om pompen neer te zetten met een grote capaciteit. Er is ongeveer 0.3 - 0.5 m nodig per m^3/s . Om de maximale afvoer van de Rijn te verwerken is 6 tot 10 km nodig voor $18000 \text{ m}^3/\text{s}$. Ook voor windmolens is voldoende ruimte (8 nodig per m opvoerhoogte). Het pompen van water uit

het IJsselmeer gaat wel steeds meer energie kosten bij een grotere zeespiegelstijging en een toenemende rivierafvoer. Bij een zeewaterstand van 1 meter bedragen de kosten zo'n €2 miljoen/jaar (uitgaande van een gemiddeld IJsseldebiet van 500 m³/s). De benodigde piekenergie is dan ongeveer 175 tot 315 MW voor een afvoer van 10000 m³/s tot 18000 m³/s. Bij verder gaande zeespiegelstijging neemt dit toe tot bijvoorbeeld 675 tot 1215 MW bij 5 m.

Figuur 5 geeft de relatie tussen de jaarlijkse energiekosten, de gemiddelde afvoer van de IJssel en de zeewaterstand in de termen van opvoerhoogte. De opvoerhoogte is het verschil tussen de waterstand in het IJsselmeer en de zeewaterstand. Ter vergelijking: de Eemscentrale produceert 1560 MW dus ook de energievoorziening voor het blijven pompen bij een veel hogere zeewaterstand lijkt geen probleem.

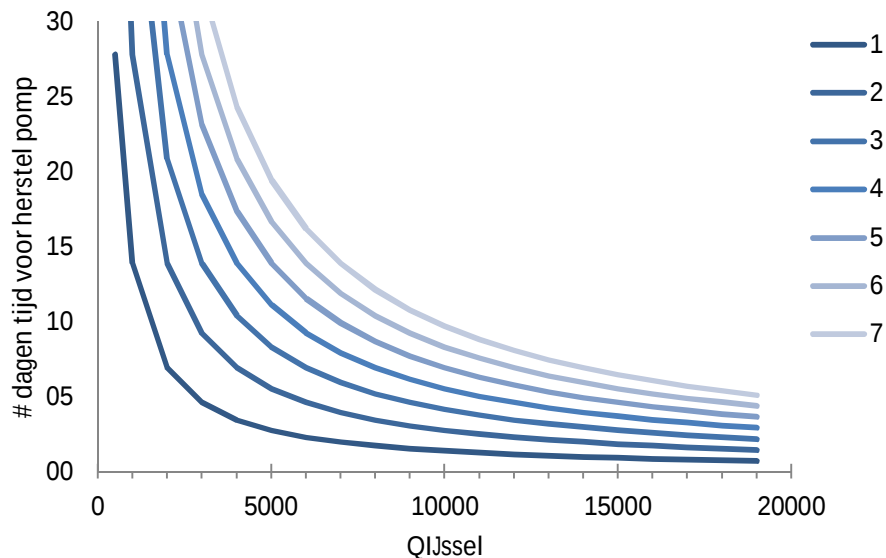


Figuur 5 Relatie tussen de energiekosten per jaar en de gemiddelde afvoer van de IJssel (m³/s) voor verschillen opvoerhoogten (1,2,3,... 20 m). De opvoerhoogte is het verschil tussen de waterstand in het IJsselmeer en de zeewaterstand.

Als de pompen om een of andere reden niet gebruikt kunnen worden (aanslag, technisch mankement, geen energie toevoer), dan loopt het IJsselmeer langzaam vol. Of er een probleem ontstaat, hangt af van de buffercapaciteit binnen de bestaande dijken. Figuur 6 geeft aan hoeveel dagen er beschikbaar zijn voordat de dijken overstromen voor verschillende afvoeren op de IJssel en bij verschillende extra dijkhoogtes. Op dit moment heeft het IJsselmeer ongeveer 1 meter aan buffer en stroomt er ongeveer 1/9 van de afvoer van de Rijn bij Lobith door de IJssel. De gemiddelde afvoer van de IJssel is ongeveer 360 m³/s. Naarmate de zeespiegel stijgt is het waarschijnlijker dat er meer water door de IJssel gaat stromen (zie stuk over stabiliteit van de delta). Ook zal er met een toenemende klimaatverandering meer rivierwater via de Rijn ons land binnen komen en daarmee ook via de IJssel naar het IJsselmeer stromen. Bij een IJsselaflow van 500 m³/s is er een buffer van 1 m is er ongeveer 28 dagen de tijd om de pompen weer werkend te krijgen. Bij een afvoer van 1000 m³/s is dit 14 dagen voor een buffer van 1 meter, 25 voor 2 meter en 50 voor 4 meter. Voor 5000 m³/s en een buffer van 1 m is dit slechts 2.5 dag.

Het risico van falen van de pompen zou als onacceptabel kunnen worden gevonden en daarmee zou dit een maatschappelijk knippunt kunnen zijn. Dit kan een reden zijn om naast het installeren van pompen toch ook te investeren in dijken om voldoende hersteltijd te hebben voor het geval de

pompen uitvallen. Een andere mogelijkheid is het installeren van reservepompen. Er zal gedacht moeten worden aan de verhouding 1 extra pomp per 5 pompen.



Figuur 6 Aantal dagen dat pompen mogen uitvallen voordat overstromingen plaatsvinden bij verschillende afvoeren op de IJssel (m³/s) en verschillende extra dijkhoogtes langs het IJsselmeer (1 tot 7 meter).

6. Zijn er grenzen aan zandsuppletie?

Van de 4 tot 5 miljard euro die jaarlijks nodig is voor het Nederlandse waterbeheer gaat ca. 85 miljoen €/jaar naar suppleties. Voor een zeespiegelstijging van 4 meter per eeuw is 160 miljoen m³ zand/jaar nodig voor 4000 km² kustoppervlak. Dat is ongeveer 13 maal de huidige hoeveelheid en zou betekenen dat er ongeveer 1,1 miljard €/jaar naar suppleties gaan.

Het aantal in te zetten schepen kan een beperking zijn voor het suppleren van voldoende zand. Om 4 meter zeespiegelstijging per eeuw bij te houden zouden dan ongeveer 30 sleep-hoppers van gemiddelde grootte continue 1 vracht per dag moeten leveren (Figuur 7). Of het mogelijk is om dit op te voeren naar tot 6 meter per eeuw, zal ook afhangen van de wereldwijde concurrentie die kan ontstaan om schepen en dus de Hopper-beschikbaarheid.

Vanuit maatschappelijk oogpunt kan er een knippunt ontstaan door kosten voor suppleren. Dit kan leiden tot: beperken inspanningen door rationaliseren (sommige gebieden laten gaan?); kosten baten-analyse; landwaarts laten verschuiven van eilanden; kleiner oppervlak onderhouden; aanpassen basiskustlijn, en meer gradienten toestaan).

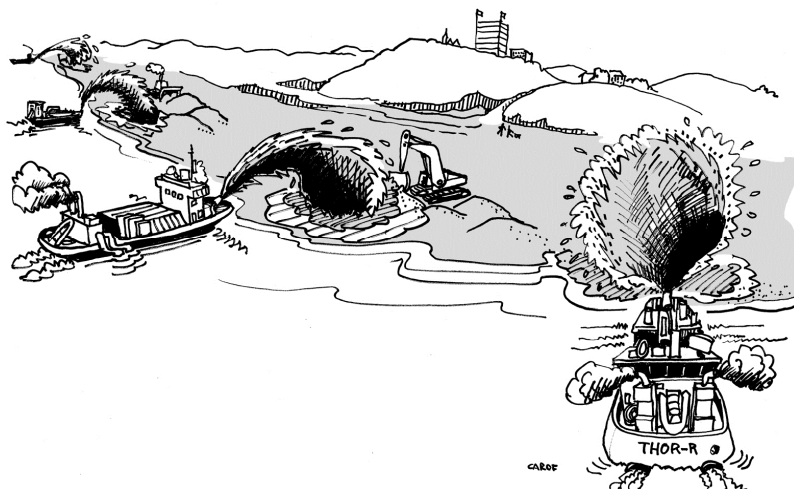
Er is hiervoor voldoende zand in de zone met meer dan 20 meter diepte en 12 mijl vanuit de kust. Of dat geschikt is qua samenstelling en korrelgrootte is onbekend. In de toekomst is er wellicht concurrentie met commerciële zandwinning. Voor suppletie minder geschikt zand kan gebruikt worden als ophoogmateriaal en er kunnen alternatieven worden ontwikkeld voor zandverbruik in constructies. Zand is wereldwijd belangrijke grondstof voor bouwen (met name voor cementproductie) en er is een snel groeiende vraag. Als meer delta's ophogen als strategie zullen kiezen, wordt de vraag zelfs heel erg groot. Andere functies van de Noordzee (bv. visserij, pijplijnen) beperken de ruimte voor zandwinning. De vraag is of er wel voldoende ruimte gereserveerd is om de zandwinning te kunnen uitbreiden. Dit wordt momenteel geïnventariseerd.

Een beperking als gevolg van tijd voor het implementeren of aanpassen van de suppleties lijkt geen belangrijk knikpunt op te leveren. Binnen 10 jaar na begin zal versnelde zeespiegelstijging te zien zijn in het watersignaal (Figuur 8). Een goed signaleringssysteem zal deze tijdigheid nog verder verbeteren. Een dergelijk monitoringplan zou kunnen bestaan uit een combinatie van indicatoren, zoals het afsmelten van de ijskappen, zeespiegelstijging, wateroverlast en overstroming. Van belang hierbij is dat suppleren primair gestuurd wordt door kustafslag: als deze toeneemt zal vrij snel een bijstelling kunnen volgen van de suppletiehoeveelheden.

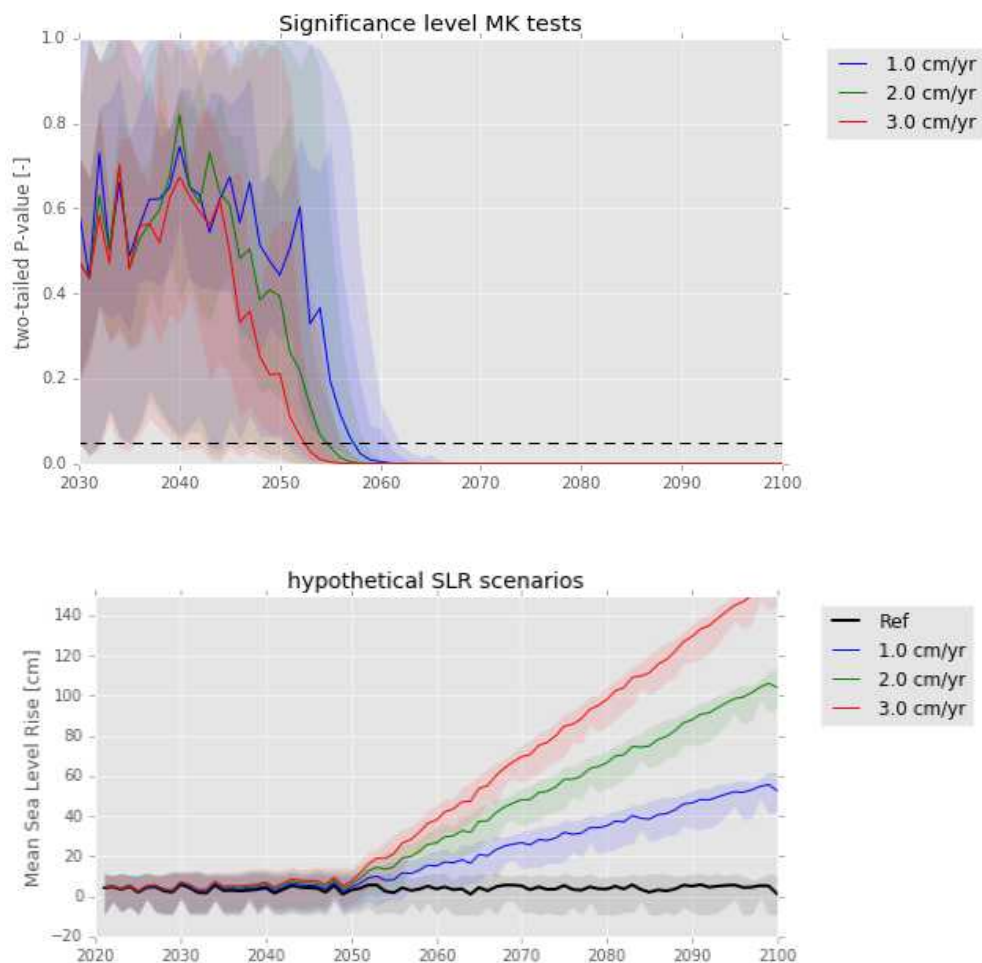
Tijd speelt wel een rol bij het herstellen van de kust na een storm. Als stormen snel achter elkaar komen is er nog niet voldoende herstel van afslag mogelijk. Hersteltijd varieert van 2 maanden tot 2 jaar en is o.a. afhankelijk van beschikbaarheid zand op strand en in brandingszone.

Het meegroeien van de Waddenzeebodem wordt begrensd door het de aanvoercapaciteit van sediment. Hierdoor kan de Waddenzee een toename van de zeespiegelstijging niet bijhouden, maar de kritische snelheid van zeespiegelstijging is onduidelijk, mogelijk tussen 1 en 2 m stijging per eeuw.

Voor de Hollandse kust dieper dan -10 m zijn geen grote effecten te verwachten tot 5 m zeespiegelstijging (golven buiten beschouwing laten). De ecologische effecten van zandwinnen en suppleren zijn nog niet meegenomen.



Figuur 7 Bij een zeespiegelstijging van 4 meter per eeuw liggen er 30 sleep-hoppers van gemiddelde grootte vol continue 1 vracht per dag te leveren (©Beeldleveranciers-Carof).

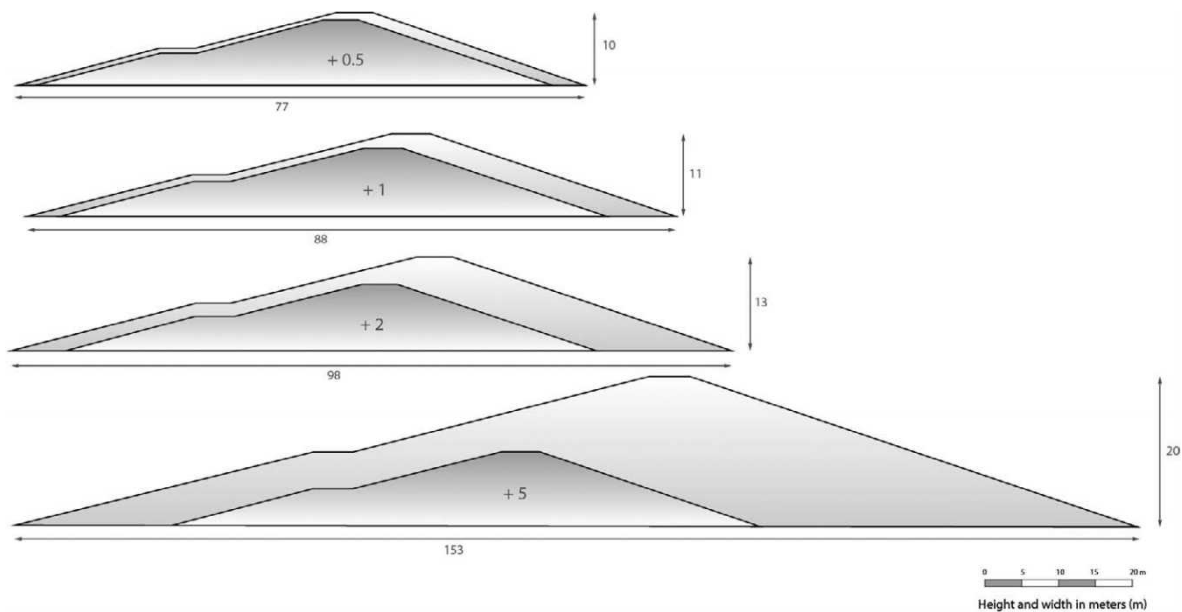


Figuur 8 Zeespiegelstijgingsscenario's op basis van De Conto & Pollard (2016) (onder) en het moment waarop er een signaal zichtbaar wordt (boven).

7. Zijn er grenzen aan het ophogen van de primaire waterkeringen?

Het is mogelijk dijken en andere waterkeringen te blijven verhogen en versterken, en hier is dus geen technisch knikpunt. Er worden in andere landen aarden dammen gebouwd van vele tientallen meters hoog. Ook zijn er rivierdijken in bijvoorbeeld de VS en China die veel hoger zijn dan de Nederlandse rivierdijken. Het ruimtebeslag is wel groot. Een kering van 20 meter hoog heeft een breedte nodig van ca. 150 meter (zie Figuur 9).

Of de kosten en risico's maatschappelijk acceptabel zijn is een afweging door de maatschappij. Ook worden er in toenemende mate problemen verwacht, bijvoorbeeld omdat er steeds meer opbarsting van de deklaag ontstaat. Verder zijn er enkele aandachtspunten bij het ophogen van de waterkeringen. Allereerst is er een toenemende complexiteit van de oplossingen, door de hogere vervallen, die mogelijk andere en complexere maatregelen vergen. Bijvoorbeeld filter constructies die zeer gangbaar zijn bij hoge aarden dammen. In de kostenschattingen voor keringen is dit verdisconteerd door per verhogingsstap 30% extrakosten mee te nemen.



Figuur 9 Dimensionering van keringen tot 20 meter hoogte (uit: Jonkman et al. 2013 in *Journal of Coastal Research*, 29(5) 1212-1226).

De bouwsnelheid is ook een aandachtspunt. Er liggen rond de 3150 km aan primaire keringen (dijken) in Nederland. Als deze versterkt moeten worden in een ronde van 50 jaar, vraagt dit $3150\text{ km} / 50 \text{ jaar} = \text{ca. } 65 \text{ km/jaar}$ aan versterkingen, dus maximaal orde 100 km/jaar. Dit is meer dan de huidige orde van 25 km/jaar. Ook zijn de aanpassingen per ronde groter dan in de huidige ronde van het hoogwaterbeschermingsprogramma. Gezien de grote spreiding over Nederland hoeven projecten elkaar niet in de weg te zitten. Wel is er waarschijnlijk extra capaciteit in de weg- en waterbouwsector nodig.

Voor de kostenschatting worden verschillende scenario's beschouwd, onafhankelijk van het tempo van de verhoging. Per scenario worden de kosten voor versterken van dijken en kunstwerken ingeschat (Tabel 1):

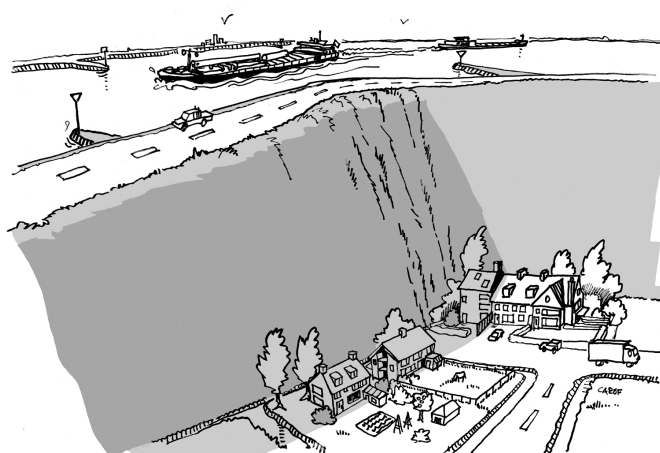
- Verhoging 0-2 m buitenwaterstand (zee en/of rivier): Bestaande watersysteem handhaven; 3150 km dijk; zeeluis+spuisluis IJmuiden; Haringvlietstuizen; Open nieuwe waterweg; zoutlekbeperkende maatregelen.
- Verhoging 2-4 m buitenwaterstand (zee en/of rivier): Bestaande watersysteem handhaven; als vorige, maar met extra maatregelen om dijkbebouwing te ontzien.
- Verhoging 4-6 m buitenwaterstand (zee en/of rivier): Bestaande watersysteem handhaven met als alternatief het afsluiten van de riviermondingen met zee; of juist alle verbindingen open.

Er staat in Nederland vooral in het benedenrivierengebied veel lintbebouwing langs de dijken. Dit zorgt bij nu al bij dijkverhogingen voor publieke weerstand en extra kosten. Door kostbare damwanden toe te passen kunnen de gevolgen voor de bebouwing worden beperkt. Verder zijn de meeste rivierdijken nu rond de 5 meter hoog. In de meest extreme beschouwde zeespiegelstijging (6 meter) verdubbelt dit. Dit zal ook heel geleidelijk gaan. Of dit maatschappelijk acceptabel is, zal vooral afhangen van de inpassingen, de tijdschalen waarop dit plaatsvindt en niet in de laatste plaats van de publieke perceptie van de noodzaak.

Tabel 1 Geschatte totale kosten (in miljarden Euro's) voor ophogen keringen tot maximaal 6 meter.

	B 0-2	B 2-4	B 4-6	Gesloten 4-6	Open 4-6
Dijken	80 milj	180 milj	350 milj	110 milj	500 milj
Kunstwerken	10 milj	15 milj	18 milj	20 milj	Regio's
Zoutlek overig	1 milj	1.5 milj	1.8 milj	2 milj	++++
Landbouw	-	--	---	-	Niet meer mogelijk verlies 1.6% BNP, 2% WG voedselzekerheid
Scheepvaart	0	0	-	verlies 3.3% BNP Rotterdam, 150.000 arbeidsplaatsen	+
Natuur	-	--	---	--- vooral waterkwaliteitsprobleem	Ander systeem
Drinkwater	-	-	---	-	Drinkwatervoorziening niet mogelijk
Industrie/energie	0	-	--	-	--
Totaal	91 milj	196.5 milj	369.8 milj	132 milj	500 milj

De frequentie waarmee hoge zeewaterstanden bij stormopzet gaan optreden wordt hoger. Het sluitingscriterium voor de Maeslantkering is een stormopzet van 3m, en dit komt nu gemiddeld eens per 10 jaar voor. Bij het ontwerp van de Maeslantkering is rekening gehouden met een maximale zeespiegelstijging van 50 cm. Wat voor het onderhoud van vermoedelijk groter belang is dat de kans op opeenvolgende hoge waterstanden ook toe zal nemen. Nu wordt de stormarme zomerperiode gebruikt voor onderhoud. Zeespiegelstijging betekent dat ook in de zomerperiode kritische waterstanden kunnen worden bereikt. Dat betekent dat het onderhoud geïntensiveerd zou moeten worden.



Figuur 10 Er is geen technische grens aan het ophogen van de denken. Wel kost het steeds meer ruimte en is de vraag of 'het leven in een kuil' maatschappelijk acceptabel is (©Beeldleveranciers-Carof).

8. Zijn er grenzen aan de grondwaterstroming die de delta kan hebben?

Een hogere zeewaterstand zorgt voor een toename van de kwel vanuit het grondwater, tot een toename van de stijghoogte (meer opwaartse grondwaterdruk), tot een toename van de zoutbelasting vanuit het grondwater en tot een andere verdeling tussen zoet- en zoutwater. Bij een stijgende zeespiegel nemen de kwel en druk direct toe, extra verzilting kan vele tientallen tot honderden jaren duren. De bestaande zoetwaterlens verdwijnt na 100-en jaren. Dit is een proces dat nu al gaande is en verloopt sneller bij groter peilverschil.

Op den duur kan grondwater hogere chlorideconcentraties krijgen en uiteindelijk brak tot zelfs zout worden. Het zoete grondwater is belangrijk voor drinkwater, landbouw en de huidige natuur.

Het is niet zo dat de ondergrond van geheel laag Nederland volledig zout wordt of dat er veel meer kwel zal gaan optreden, zelfs niet op zeer lange termijn bij zeer grote zeespiegelstijging (>10m). De invloed blijft beperkt tot maximaal 10-15 kilometer vanaf de kustlijn/open water landinwaarts. Zo zal het geen probleem zijn voor steden als Gouda of Utrecht.

In de invloedssfeer tot 15 kilometer vanaf het open water zijn er wel gevolgen. Steden als Den Haag, Rotterdam, Amsterdam krijgen wel te maken met serieuze grondwateroverlast.

Diepe grote zoetwaterlenzen die voor Hollandse drinkwatervoorziening zorgen (Dunea, Waternet, PWN) kunnen een zeespiegelstijging tot 5 a 7 meter aan, zolang het maaiveld maar een grondwaterstandsopbolling toestaat. Alle middelgrote zoetwaterlenzen (tot ~60-80m dik: eilanden, Friesland, Groningen, Kop van Noord-Holland, omgeving Hoek van Holland, Katwijk) verdwijnen bij ongeveer 4 meter.

De kwel neemt niet zodanig toe dat we er op waterschapsniveau een veel grote gemaalcapaciteit voor moeten reserveren.

De zoutbelasting van de ondergrond neemt factoren toe (2-10, afhankelijk van de grootte en snelheid van de zeespiegelstijging). In sommige polders zoals de Haarlemmermeer zelfs factoren als meer zoute wellen door opbarsten deklaag.

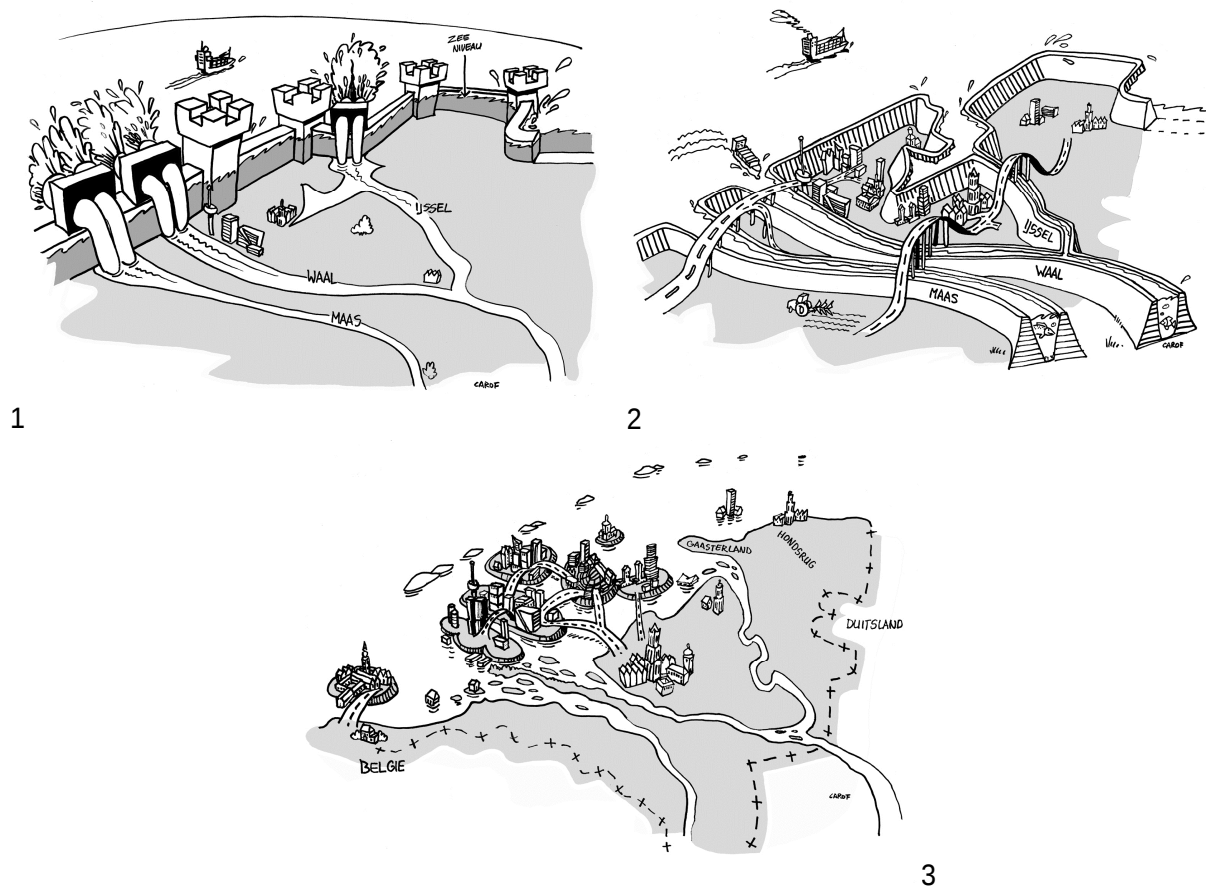
9. Zijn er grenzen aan het aanpassen van steden?

Een van de vragen die behandeld is tijdens de hackathon, is of en wanneer de steden in West-Nederland mogelijk verlaten zouden gaan worden. Daartoe zijn internationale voorbeelden gezocht. Op basis daarvan is de conclusie dat grote overstromingen er toe kunnen leiden dat een stedelijk gebied verlaten wordt, of niet iedereen terugkeert na een ramp, en dat dit waarschijnlijker is in een economisch krimpgebied, en bij een grotere zeespiegelstijging omdat de omvang van de ramp dan groter is. Na een ramp lijken bedrijven vaak terug te komen op andere dan de oorspronkelijke locaties (bijvoorbeeld Christchurch en na tsunami in Zuidoost Azië). Dit kan gevolgen hebben voor het vestigingsklimaat voor bedrijven in laag Nederland, net als een gebrek aan vertrouwen dat de delta op de lange termijn ook bij een snellere zeespiegelstijging veilig blijft. Na een ramp kan er een enorme waardedaling zijn van woningen en gestegen verzekeringspremies. Wanneer er dan echt een knikpunt plaatsvindt, is inkomensafhankelijk en zal per individu verschillen.

Een toename van de zeespiegelstijging in combinatie met het verhogen en versterken van waterkeringen zorgt voor een toename van de kweldruk. Mogelijk moet anders gebouwd gaan worden en kunnen plannen voor ondergronds bouwen in de problemen komen. RWZI's (droogweerafvoer) gaan mogelijk slechter functioneren en er is beheer nodig van kanaalpeilen (overstort/pompen). Door intensievere buien zal meer berging en pompcapaciteit nodig zijn. Of en bij welke zeespiegelstijging dan een knippunt plaats vindt is zeer locatie-specifiek en kon tijdens hackathon nog niet worden ingeschat.

Om te blijven wonen in de delta zijn in hoofdlijnen drie opties mogelijk (zie Figuur 11):

- 1) De hele delta beschermen als een fort en de rivieren uit de delta pompen;
- 2) De polders beschermen met daartussen hele diepe rivieren;
- 3) De delta ophogen, als geheel of verschillende terpen die met elkaar verbonden zijn.



Figuur 11 Drie opties om te blijven wonen in de Nederlandse delta bij extreme zeespiegelstijging: 1) delta beschermen als een fort en de rivieren uit de delta pompen; 2) De polders beschermen met daartussen hele diepe rivieren; 3) De delta ophogen, als geheel of verschillende terpen die met elkaar verbonden zijn (©Beeldleveranciers-Carof).

Box 3. Wat is een policy hackathon, en wat zijn de voordelen?

Het woord 'hackathon' (samengesteld uit 'hacken' en 'marathon') roept misschien beelden op van groepjes computer hackers die samen hun programmeerkrachten inzetten met soms goede, soms kwade bedoelingen. Maar tegenwoordig lijken hackathons een geaccepteerd concept. Het fenomeen krijgt vaste voet aan grond in het bedrijfsleven, onderwijs en daarbuiten. Wat het probleem ook is, een hackathon kan een goede aanvulling op oude favorieten zoals brainstorms. Dat komt omdat ideeën niet alleen worden bedacht, maar ook worden uitgewerkt en uitgerekend als kant -en-klare code worden gepresenteerd. En dat maakt het aantrekkelijk, het is meer dan een idee dat nog moet worden uitgewerkt.

Een policy hackathon is een creatieve snelkookpan waarin wordt geprobeerd - door het bijeenbrengen van experts van uiteenlopende disciplines – een beleidsvraag in korte tijd te beantwoorden. Met alle parate kennis en toegang tot interne en externe databronnen is Deltares natuurlijk dé plek om zo'n hackathon te organiseren. Het voordeel van een hackathon is dat in relatief korte tijd en met beperkte middelen een probleem kan worden geduid, oplossingen in eerste aanzet uitgewerkt, en vervolgvragen en kennislacunes in beeld kunnen worden gebracht. Deze aanpak kan worden herhaald en op verschillende probleemgebieden in het beheer van water, infrastructuur en ondergrond worden toegepast.

Afgelopen herfst organiseerden we dan ook een zogenoemde 'policy hackathon'. Aanleiding hiervoor was de uitkomst van een internationaal onderzoek dat aangeeft dat de wereldwijde zeespiegelstijging flink kan gaan versnellen. De zeespiegel zou in het jaar 2100, maar vooral ook daarna, veel hoger kunnen zijn dan tot nu toe werd aangenomen in projecties van. En dat roept vragen op: zijn er grenzen aan de klimaatadaptatie in de Delta's (en specifiek in de Nederlandse delta)? Met welke omslagpunten en belangrijke gebeurtenissen kunnen we te maken krijgen als de zeespiegel stijgt? Naast antwoorden op deze vragen werd ook verkend waar de kennis nu nog tekort schiet, en welke onderwerpen voor vervolgonderzoek in aanmerking komen.