

Hand aan de Kraan methodiek in perspectief

Verkenning van de haalbaarheid van een zuiver
probabilistische gebruiksruijmtetoets

TNO 2024 R12239 – 28 november 2024

Hand aan de Kraan methodiek in perspectief

Verkenning van de haalbaarheid van een zuiver
probabilistische gebruiksruijmtetoets

Auteurs	J.A. Roholl, I.C. Kroon, B. Davids, M.P.D. Pluymaekers
Rubricering rapport	TNO Public
Aantal pagina's	45 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	geen
Opdrachtgever	Ministerie van Klimaat en Groene Groei
Projectnaam	EZK werkprogramma 2024
Projectnummer	060.58401

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Samenvatting

Recentelijk is de Hand aan de Kraan (HadK)-methodiek geëvalueerd door het Adviescollege Hand aan de kraan Waddenzee¹. Het Adviescollege beoordeelt de methodiek als effectief en geeft tegelijk een aantal aanbevelingen voor verbetering ervan. Naar aanleiding hiervan heeft het toenmalige Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, nu het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG), TNO gevraagd de haalbaarheid van de belangrijkste aanbeveling te onderzoeken; een zuiver probabilistische aanpak, waarin alle onzekerheden expliciet worden meegenomen.

Op basis van dit onderzoek bevelen we aan dat het zinvol is om, middels een stapsgewijze aanpak, over te gaan op een zuiver probabilistische gebruiksruimtetoets van de HadK-methodiek voor alle kombergingen in de Waddenzee.

Het belang van natuurwaarden is leidend in het Waddenzeegebied. Het uitgangspunt is, dat er - op basis van de best beschikbare informatie - wetenschappelijk gezien redelijkerwijs geen twijfel mag bestaan dat er geen aantasting optreedt van de natuurlijke kenmerken van de Waddenzee als gevolg van bodemdaling door (vergunde) economische activiteiten, zoals delfstofwinning. De huidige invulling van deze norm is het stellen van een randvoorwaarde aan de delfstofwinning: de bodemdaling door gas- of zoutwinning in combinatie met de relatieve zeespiegelstijging mag de (bewezen) natuurlijke draagkracht van het Waddenzee (het meegroeivermogen) niet overstijgen. In andere woorden, het verschil tussen meegroeivermogen en de relatieve zeespiegelstijging vormt de gebruiksruimte, die beschikbaar is voor bodemdaling door delfstofwinning. Om het naleven van deze randvoorwaarde te kunnen toetsen, rapporteren de exploitanten jaarlijks de door hun activiteiten veroorzaakte bodemdalingsbelasting.

Om te komen tot een zuiver probabilistische gebruiksruimtetoets maken we eerst voor elke variabele (meegroeivermogen, relatieve zeespiegelstijging en bodemdalingsbelasting) de onzekerheidsverdeling expliciet op grond van de huidige, wetenschappelijke inzichten. Hiermee bepalen we vervolgens de kansverdeling van de jaarlijkse gebruiksruimteoverschrijding. Met het oog op de praktische haalbaarheid passen we deze aanpak toe op de twee kombergingen (Pinkegat en Vlie), die sedimentologisch gezien het meest van elkaar verschillen.

Deze twee voorbeelden laten zien dat een probabilistische Hand aan de Kraan methodiek bruikbaar is. Op grond daarvan hebben we twee zuiver probabilistische beleidsalternatieven voor de huidige gebruiksruimtetoets uitgewerkt, die allebei expliciet rekening houden met de ontwikkeling van de relatieve zeespiegelstijging in relatie tot klimaatverandering. Voor toepassing van deze resultaten in een formele gebruiksruimtetoets is echter altijd een nadere uitwerking nodig.

Samengevat laat deze verkenning zien dat een zuiver probabilistische gebruiksruimtetoets praktisch haalbaar is en een aantal voordelen biedt ten opzichte van de huidige gebruiksruimtetoets.

¹ Adviescollege Hand aan de Kraan, 2021, De toekomst van Hand aan de Kraan, omgaan met onzekerheden.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	6
1.1 Leeswijzer	7
2 Beschrijving Hand aan de Kraan methodiek	8
2.1 Meegroeivermogen	9
2.2 Relatieve Zeespiegelstijging	10
2.3 Belasting	10
2.4 Toetsingsmethodiek.....	11
3 Onzekerheden in beeld	13
3.1 Meegroeivermogen	13
3.2 Zeespiegelstijging	17
3.3 Belasting	19
3.4 Conclusie.....	21
4 Haalbaarheid probabilistische aanpak	22
4.1 Prototype P-gebruiksruimtetoets.....	22
4.2 Twee voorbeelden: komberging Pinkegat en komberging Vlie	23
4.3 Huidige overschrijdingskans per komberging	32
4.4 Conclusie haalbaarheid.....	33
5 Alternatieven voor de gebruiksruimtetoets.....	34
5.1 Alternatief voorstel.....	34
5.2 Vergelijking met de huidige gebruiksruimtetoets	36
5.3 Inspelen op doorgaande zeespiegelstijging	36
6 Reflectie	38
Referenties	40
Begrippen	44
Ondertekening.....	45

1 Inleiding

Bij gebruik van de ondergrond, zoals delfstofwinning, is de afweging met andere maatschappelijke belangen van belang. In Natura 2000-gebieden, zoals het Waddenzeegebied ([Figuur 1](#)), zijn de natuurwaarden leidend conform de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn². Daarom wordt in dit gebied de door gas- of zoutwinning veroorzaakte bodemdaling begrensd volgens het zogenaamde ‘hand aan de kraan’-principe (verder HadK-methodiek; Rijksprojectbesluit en de bijbehorende Passende Beoordeling (Pb), 2006; Derde Nota Waddenzee, 2007; Kamerbrief, 2021). De onzekerheden wat betreft mogelijk versnelde zeespiegelstijging en morfologische daagkracht waren destijds van dien aard, dat bij de invulling van dit principe de overheid met een beroep op het voorzorgsbeginsel heeft afgeweken van een zuiver probabilistische aanpak bij het vaststellen van de toetsingsmethodiek. Deze is vervolgens toegepast in de vergunningverlening voor gas- en zoutwinning (gaswinning van onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen en zoutwinning Havenmond). Recentelijk is de HadK-methodiek geëvalueerd door het Adviescollege hand aan de kraan Waddenzee. Het Adviescollege beoordeelt de methodiek als effectief en geeft tegelijk een aantal aanbevelingen voor verbetering ervan (Adviescollege hand aan de Kraan Waddenzee, 2021).

Naar aanleiding hiervan heeft het toenmalige Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, nu het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) aan TNO-AGE het volgende gevraagd³:

- Onderzoek de haalbaarheid van een andere aanpak voor de hand aan de kraan-methode, waarin alle onzekerheden expliciet worden meegenomen (zoals in advies Adviescollege hand aan de kraan Waddenzee);
- Geef een onderbouwd voorstel voor een normstelling (acceptabele kans op overschrijding van het meegroeivermogen) waaraan de verbeterde aanpak getoetst kan worden;
- Reflecteer op de toegevoegde waarde van een dergelijke aanpak afgezet tegen de huidige werkwijze als het gaat om het beschermen van de natuurwaarden van de Waddenzee.

In dit rapport gaan we in op deze drie vragen.

² Verwerkt in De Omgevingswet (1 januari 2024)

³ EZK, 20-5-2022, Voorstel technische haalbaarheidsstudie verbetering Hand aan de Kraan-methodiek



Figuur 1: Het Nederlandse waddengebied wordt in het zuiden begrensd door het vasteland en in het noorden en westen door de Waddeneilanden. Het gebied is onderverdeeld in verschillende kombergingen (begrensd door dunne, blauwe lijnen). Een komberging is een gebied horend bij één zeegat dat wordt begrensd door vaste land, eilanden en door de wantijen van de aangrenzende kombergingsgebieden. De hand aan de kraan methodiek wordt op dit moment toegepast bij een aantal vergunningen voor gas- en zoutwinning, die betrekking hebben op vier kombergingen: Marsdiep, Pinkegat, Vlie en Zoutkamperlaag.

1.1 Leeswijzer

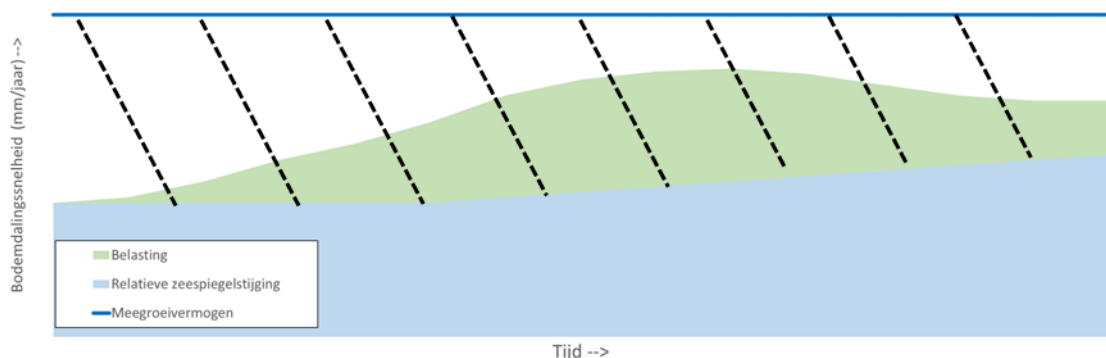
Daar een andere aanpak voor de HadK-methodiek, waarin alle onzekerheden expliciet worden meegenomen, zich zal richten op de uitwerking van een zuiver probabilistische aanpak, geven we eerst (Hoofdstuk 2) een meer algemene beschrijving van de huidige methode, inclusief de omgang met onzekerheden daarin. Daarna maken we per variabele (meegroeivermogen, zeespiegelstijging en belasting) de onzekerheidsverdeling expliciet op grond van de huidige wetenschappelijke inzichten (Hoofdstuk 3). Dit vormt de opmaat naar het antwoord op de eerste vraag naar de praktische haalbaarheid van een zuiver probabilistische aanpak (Hoofdstuk 4) en op de tweede vraag naar een onderbouwd voorstel om de gestelde Europese Vogel- en Habitatrichtlijn (van toepassing op Natura 2000 gebieden) te kunnen toetsen (Hoofdstuk 5). Vervolgens (Hoofdstuk 6) reflecteren we op de toegevoegde waarde van dit alternatieve voorstel (als het gaat om het beschermen van de natuurwaarden van de Waddenzee) vergeleken met de huidige werkwijze en komen we tot enkele aanbevelingen.

2 Beschrijving Hand aan de Kraan methodiek

In dit hoofdstuk geven we een beschrijving van de huidige methodiek en de omgang hierin met onzekerheden.

Het belang van natuurwaarden (behoud van vogelsoorten/aantallen en van de leefgebieden waar de vogels van afhankelijk zijn) is conform de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn leidend in het Waddenzeegebied. Met andere woorden, “er mag op basis van de best beschikbare informatie wetenschappelijk gezien redelijkerwijs geen twijfel bestaan dat er geen aantasting optreedt van de natuurlijke kenmerken van de Waddenzee als gevolg van bodemdaling door economische activiteiten” (Pb, 2006). Deze norm kan op verschillende manieren worden ingevuld.

De huidige invulling (Pb, 2006; MEZ, 2015) stelt bij vergunningverlening randvoorwaarden aan de delfstofwinning. De bodemdaling door gas of zoutwinning mag in combinatie met de relatieve zeespiegelstijging de (bewezen) natuurlijke morfologische draagkracht van het Waddenzee (het meegroeivermogen) niet overstijgen. De aanname is dat zolang het morfologische systeem van wadplaten en -geulen in stand blijft, de Natura 2000-habitats niet worden aangetast door de vergunde economische activiteit(en). Dat sluit overigens aantasting door andere oorzaken (andere menselijke activiteiten, exoten, vervuiling, effecten klimaatverandering etc.) niet uit (Waddenhuisberaad, 2016).



Figuur 2: Schematische illustratie van de huidige invulling van de Hand aan de Kraan methodiek. In lichtblauw de relatieve zeespiegelstijging (in mm/jaar), in lichtgroen de belasting door bodemdaling als gevolg van gas- of zoutwinning (in mm/jaar) en in donkerblauw de vastgestelde (onder-)grens van het meegroeivermogen (in mm/jaar). Het verschil tussen meegroeivermogen en zeespiegelstijging is de gebruiksruimte (aangegeven met gearceerde lijnen). Zolang op basis van de best beschikbare informatie de som van de relatieve zeespiegelstijgingssnelheid en de belasting door bodemdaling onder het meegroeivermogen blijft en de gebruiksruimte dus niet overschreden wordt, bestaat er wetenschappelijk gezien redelijkerwijs geen twijfel dat er geen aantasting optreedt van de natuurlijke kenmerken van de Waddenzee als gevolg van bodemdaling door de (vergunde) economische activiteiten.

In de Hand aan de Kraan methodiek worden de randvoorwaarden als volgt uitgewerkt op basis van drie parameters: het meegroeivermogen, de relatieve zeespiegelstijging en de belasting door bodemdaling door delfstofwinning (Figuur 2; Pb, 2006; De Waal et al, 2012). Voor het meegroeivermogen is uit voorzorgsbeginsel (redelijkerwijs geen twijfel) een

conservatieve lage waarde (ondergrens) van het meegroeivermogen per komberging gekozen. De ruimte die overblijft nadat de relatieve zeespiegelstijging is afgetrokken van het meegroeivermogen van een komberging is de ruimte die overblijft voor eventuele gas- en/of zoutwinning en wordt de gebruikruimte genoemd (weergegeven met gearceerde lijnen in [Figuur 2](#)).

Om het naleven van de randvoorwaarden (conform [Figuur 2](#)) te kunnen vaststellen, rapporteren de exploitanten jaarlijks de door hun activiteiten veroorzaakte belasting ten opzichte van de gebruikruimte (gebruikruimte toets) conform een Meet- en Regelprotocol (o.a. Frisia, 2023; NAM, 2023a). De Auditcommissie gaswinning onder de Waddenzee & Zoutwinning controleren en adviseren de Minister van KGG, die in geval van een (dreigende) overschrijding van de gebruikruimte kan besluiten de winning te beperken of te stoppen (Hand aan de Kraan). In dat kader voeren de exploitanten diverse monitoringsprogramma's uit in de Natura 2000-gebieden Waddenzee, de duinen van Ameland, Schiermonnikoog en het Lauwersmeer om de ontwikkeling van vogelpopulaties en wadplaatareaal te kunnen volgen (zie bijvoorbeeld Auditcommissie Gaswinning 2023 en referenties daarin; Auditcommissie Zoutwinning 2023 en referenties daarin). Wanneer er aanleiding is dat de natuurwaardes in geding komen, kan ook worden besloten om (deels) te stoppen met de productie.

In de volgende paragrafen gaan we dieper in op de drie variabelen en de toetsingsmethodiek.

2.1 Meegroeivermogen

Het meegroeivermogen is gedefinieerd als het natuurlijk vermogen van een kombergingsgebied (uitgedrukt in mm/jaar gemiddeld over het gehele oppervlak van de komberging) om de relatieve zeespiegelstijgingssnelheid, inclusief autonome daling, op de lange termijn (19-jaars gemiddelde) bij te houden, terwijl het geomorfologische evenwicht en de sedimentbalans in stand blijven (Pb, 2006). Dit 19-jaars gemiddelde houdt rekening met de systeemdynamiek als gevolg van de (dominante) nodale getijcyclus. Het geomorfologisch evenwicht is gedefinieerd als de duurzame aanwezigheid van sedimentatie- en erosieprocessen, waarbij de verschillende geomorfologische elementen van de Waddenzee, zoals geulen en platen met een verschillende diepteligging, binnen dezelfde variatiebreedte als de afgelopen 100 jaar in stand blijven.

In het Pb (2006) is voor de bepaling van het meegroeivermogen gekeken naar het zand leverend vermogen van de Noordzeekust, de transportcapaciteit van de zeegaten en het vermogen van de wadplaten om sediment te vangen. Hierin is met het oog op het voorzorgbeginsel, een voorzichtige, conservatieve benadering gekozen, waarbij wordt uitgegaan van de laagste schatting van het meegroeivermogen. Hiermee blijkt in de praktijk dat het vermogen van de wadplaten om sediment te vangen bepalend is voor de inschatting van het meegroeivermogen in het Pb 2006 (Oost et al., 1998; Pb, 2006). Het meegroeivermogen bepaald in Pb 2006 is dus géén verwachtingswaarde⁴, maar een ondergrens (Oost et al., 1998)

De in 2006 bepaalde ondergrens bedraagt 5 mm/jaar voor Zoutkamperlaag, 6 mm/jaar voor het Pinkegat en 3 mm/jaar voor Marsdiep/Vlie. In 2010 is het meegroeivermogen voor de grote kombergingen (o.a. Vlie en Marsdiep) in de westelijke Waddenzee geactualiseerd op grond van sedimentatiemetingen in de kombergingen in de westelijke Waddenzee en

⁴ Bij het bepalen van een verwachtingswaarde is in principe de hele onzekerheidsverdeling (in het bijzonder de vorm ervan en de onder- en de bovengrenzen) van belang, al kan dit vaak worden vereenvoudigd door aan te nemen dat er bijvoorbeeld sprake is van een normale of van een driehoeksverdeling (zie Hoofdstuk 4).

modelsimulaties (Cleveringa & Grasmeyer, 2010), waarmee het Meegroeivermogen voor zowel Marsdiep als Vlie is bijgesteld van 3 naar 5 mm/jaar (MEZ, 2015).

2.2 Relatieve Zeespiegelstijging

Vanwege het ontbreken van een gevalideerd model (KNMI, 2023) voor de zeespiegelstijging langs de Nederlandse (wadden)kust en omdat de voorspelling van de zeespiegelsnelheid onzekerder wordt naarmate verder in de toekomst gekeken wordt, is de bepaling van zeespiegelstijging binnen de HadK-methodiek opgeknipt in twee delen (Pb, 2006):

- › een beleidsscenario met een verwachtingswaarde voor een periode van 5 jaar vooruit, dat via extrapolatie wordt verkregen uit de datareeksen van de getijdenstations langs de Nederlandse kust en
- › een richtscenario voor de periode daarna, dat aansluit op de meest waarschijnlijke (naar de Nederlandse kust vertaalde) IPCC-projectie, waarin zeespiegelstijging door klimaatverandering is meegenomen.

Zeespiegelstanden langs de Nederlandse kust worden gemeten in een aantal getijdenstations. Deze metingen laten grote schommelingen zien in de tijd (veroorzaakt door natuurlijke variaties in getij, andere mechanismen en meetruis (o.a. Steffebauer et al., 2022; Deltares, 2023; Keizer et al., 2023), waardoor alleen uit meetreeksen over een lange periode (decennia of meer) een (veranderende) trend in de zeespiegelstijging kan worden afgeleid.

Het relatieve zeespiegelscenario wordt minimaal elke vijf jaar opnieuw vastgesteld (conform het Rijksprojectbesluit, 2006). Dit is gebeurd in 2011, 2016, 2021 (met terugwerkende kracht in 2023) en recentelijk in 2024. Sinds 2023 laat de overheid jaarlijks bekijken of nieuwe wetenschappelijke inzichten aanleiding geven tot eerdere actualisatie.

2.3 Belasting

De belasting is de verwachtingswaarde van het dalingsvolume door delfstofwinning over de oppervlakte van de komberging aan het begin van het kalenderjaar als (voortschrijdend) gemiddelde over een bepaalde tijdsperiode (Pb, 2006). Het meegroeivermogen zoals bepaald in Pb 2006 geldt op een tijdschaal van 19 jaar of langer. Gezien de grotere natuurlijke variabiliteit in het systeem is er destijds gekozen om voor de belasting uit voorzorgsbeginsel een korte middelingsperiode te nemen van 6 jaar. Dit om te voorkomen dat er in een periode van nature geringe sedimentatie en hoge zeestanden ook nog eens een grotere bodemdaling (passend binnen de 19 jaar) zou optreden (Pb 2006, p109).

De belasting wordt bepaald door middel van bodemdalingsprognoses gebaseerd op geomechanische modellen, die gekalibreerd zijn op hoogtemetingen. Deze metingen van de bodemdaling worden gedaan door waterpasmetingen op de eilanden en vasteland (hier in combinatie met InSAR), en een bijzonder netwerk van GPS-locaties in de Waddenzee (zie NAM, 2023b; Frisia, 2023b). Dit GPS-netwerk is geïnstalleerd op regelmatig droogvallende wadplaten in de betreffende kombergingen die bij de start van de monitoring worden geïnstalleerd.

2.4 Toetsingsmethodiek

De tijdsafhankelijke definitie van de belasting maakt het mogelijk om de toetsingsmethodiek op twee verschillende manieren te gebruiken. Allereerst als gebruiksruimtetoeets (**Kader 1**) om als overheid (of exploitant) vast te kunnen stellen of een voorgenomen productieprofiel in een winningsplan vooraf aan de gestelde norm voldoet. Deze toets hanteert een 6-jarige middeling (voortschrijdend gemiddelde, 3 jaar voor- en achteruit), zodat zoals hierboven beschreven staat uit voorzorgsbeginsel de mijnbouwproductie indien nodig tijdig kan worden bijgesteld; het meegroeivermogen betreft immers een 19-jarige middeling. Deze toets worden jaarlijks gerapporteerd conform een in het winningsplan opgenomen Meet- en Regelprotocol (bijvoorbeeld Frisia, 2023; NAM, 2024). De meegroeivermogenstoets kan worden gebruikt om achteraf met een 19-jarige middeling vast te stellen of daadwerkelijk aan de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn is voldaan (bijv. Van Thienen-Visser et al., 2015; TNO, 2015; TNO, 2016).

Kader 1 De gebruiksruimtetoeets en meegroeivermogen toets als invulling van het hand aan de kraan methodiek

In dit kader worden de gebruiksruimte toets (6 jaargemiddelde) en meegroeivermogen toets (19-jaarsgemiddelde) beschreven. De beschrijving is gebaseerd op het 'recept' gegeven in Pb, 2006, geactualiseerd met huidige invulling van de gebruiksruimte, op basis waarvan kan worden getoetst, of voorgenomen gaswinning kan worden toegestaan binnen de voorwaarden van de Vogel- en Habitatrichtlijn. Dit 'recept' is alleen project-specifiek in de zin dat het geldt voor de kombergingen waar de gebruiksruimte is bepaald: Pinkegat en Zoutkamperlaag in Pb, 2006 en voor kombergingen Vlie en Marsdiep bepaald in MEZ, 2015.

Meegroeivermogen per komberging

Het meegroeivermogen M wordt uitgedrukt in termen van de equivalente relatieve zeespiegelstijging:

Marsdiep:	$M = 5 \text{ mm/jaar}$
Pinkegat:	$M = 6 \text{ mm/jaar}$
Vlie:	$M = 5 \text{ mm/jaar}$
Zoutkamperlaag:	$M = 5 \text{ mm/jaar}$

Scenario snelheid relatieve zeespiegelstijging

Het gekozen scenario voor de snelheid van de relatieve zeespiegelstijging is gedefinieerd in twee perioden. Een beleidsscenario en een richtscenario, we laten hier de huidige invulling van beleids- en richt scenario zien.

Beleidsscenario 1 januari 2024- 1 januari 2029

$$Z(J) = Z(2010) + (J - 2010) * A_1$$

met: $Z(2010) = 2,9 \text{ mm/jaar}$ & $A_1 = 0,05 \text{ mm/jaar}^2$

De waarden voor $Z(J)$ gelden per 1 januari van het kalenderjaar J . A_1 representeert de versnelling van de zeespiegelstijging.

Richtscenario 1 januari 2029 – 2050

$$Z(J) = Z(2029) + (J - 2029) * A_2$$

met: $Z(2029) = 3,85 \text{ mm/jaar}$ & $A_2 = 0,140 \text{ mm/jaar}^2$

Gebruiksruimte

De gebruiksruimte G is gedefinieerd als het meegroeivermogen (M), verminderd met de belasting van dat meegroeivermogen door (autonome) relatieve zeespiegelstijging:

Marsdiep:	$G(J) = 5 - Z(J)$ mm/jaar
Pinkegat:	$G(J) = 6 - Z(J)$ mm/jaar
Vlie:	$G(J) = 5 - Z(J)$ mm/jaar
Zoutkamperlaag:	$G(J) = 5 - Z(J)$ mm/jaar

Criterium beoordeling inpassing bodemdaling t.g.v. gaswinning

De verwachting voor de bodemdalingssnelheid (S) gemiddeld over een kombergingsgebied, wordt gegeven in een tijdreeks op jaarbasis:

$$S(J) \text{ met } S(J) = J_{start}, \dots, J_{start+n}$$

J_{start} het kalenderjaar van productiestart en n geeft de lengte in jaren van de prognose aan sinds het kalenderjaar van productiestart. De elementen uit die reeks zijn jaargemiddelden, die worden toegewezen aan het midden van het betreffende kalenderjaar.

Toetsing: Gebruiksruimtetoets (6 jaargemiddelde)

Gedefinieerd wordt de belasting B als de bodemdalingssnelheid gemiddeld over een tijdvak van 6 jaren.

$$B(J) = \frac{[S(J-3) + S(J-2) + S(J-1) + S(J) + S(J+1) + S(J+2)]}{6}$$

De waarde voor $B(J)$ geldt aan het begin van het kalenderjaar J .

De eis voor inpasbaarheid van bodemdaling t.g.v. gaswinning in een gegeven komberging is dan:

$$B(J) < G(J)$$

Toetsing: Meegroeivermogenstoets (19-jaargemiddelde)

Gedefinieerd wordt de belasting B^{19} als de bodemdalingssnelheid gemiddeld over een tijdvak van 19 jaren.

$$B^{19}(J) = \frac{[S(J-8) + S(J-7) + \dots + S(J) + S(J+1) + \dots + S(J+8) + S(J+9)]}{19}$$

De waarde voor $B(J)$ geldt aan het begin van het kalenderjaar J .

De eis voor inpasbaarheid van bodemdaling t.g.v. gaswinning in een gegeven komberging is dan:

$$B^{19}(J) < G(J)$$

3 Onzekerheden in beeld

Als opmaat naar het beantwoorden van de eerste vraag (het onderzoeken van de haalbaarheid van een probabilistische aanpak voor de HadK-methodiek), maken we op grond van de huidige wetenschappelijke inzichten voor elke variabele (meegroeivermogen, zeespiegelstijging en belasting) de onzekerheidsverdeling expliciet.

3.1 Meegroeivermogen

Hoe een komberging zich morfologisch ontwikkelt onder invloed van de relatieve zeespiegelstijging wordt bepaald door de morfologische toestand⁵ van de komberging en de verhouding tussen relatieve zeespiegelstijging en kritische verdrinkingsnelheid van de komberging (Wang et al., 2021, Wang et al., 2018).

We kijken daarom eerst naar de inzichten t.a.v. de morfologische toestand van de kombergingen op grond van de waargenomen sedimentatie in de Waddenzee. Daarna behandelen we de huidige inzichten omtrent het meegroeivermogen in relatie tot onderzoek naar kritische verdrinkingsnelheden van de Waddenzee. Vervolgens vertalen we deze inzichten naar een onzekerheidsverdeling voor het meegroeivermogen.

3.1.1 Sedimentatiebalans en morfologische staat kombergingen

De sedimentbalans van het Nederlandse deel van de Waddenzee over de periode tussen 1927 en 2012 is positief (Wang et al., 2018 en Elias et al., 2012); het bruto sedimentvolume in de Waddenzee is toegenomen met circa 550 miljoen m³ (Elias et al., 2012). Gecorrigeerd voor zandwinning en baggeren (inclusief het storten van sediment) loopt dit volume op tot 650 miljoen m³. Dit volume compenseert ruim de zandhonger, die wordt veroorzaakt door de gestegen zeespiegelstijging in dezelfde periode (deze bedraagt ongeveer 280 miljoen m³). De grootste sedimentatie vond plaats in de kombergingen Marsdiep en Vlie (4,69 mm/jaar) en de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag (6,66 mm/jaar) (Elias et al., 2012) als gevolg van menselijke ingrepen (het afsluiten van respectievelijk de Zuiderzee en de Lauwerszee)⁶.

Binnen het sedimentaire systeem van de Waddenzee kan daarnaast onderscheid worden gemaakt tussen het sedimenttransport-gelimiteerde westelijke (de Marsdiep, Eierlandse gat en Vlie kombergingen) en het accommodatie-gelimiteerde⁷ oostelijke deel (Ameland, Pinkegat, Zoutkamperlaag en Groningse wad en Em kombergingen (zie [Figuur 1](#))). Hoewel er voldoende zand aanwezig is langs de kust en buitendelta's, is de netto import van sediment in het westelijke deel van de Waddenzee beperkend. Het westelijk deel is zogezegd ver van morfologisch evenwicht en is kwetsbaarder dan het oostelijk deel voor de gevolgen van zeespiegelstijging. Een verklaring daarvoor lijkt het ontoereikende sedimenttransporterend

⁵ Morfologisch evenwicht is de staat die een komberging zou bereiken op langdurige tijdschaal (decennia tot eeuwen) onder gelijke randvoorwaarden

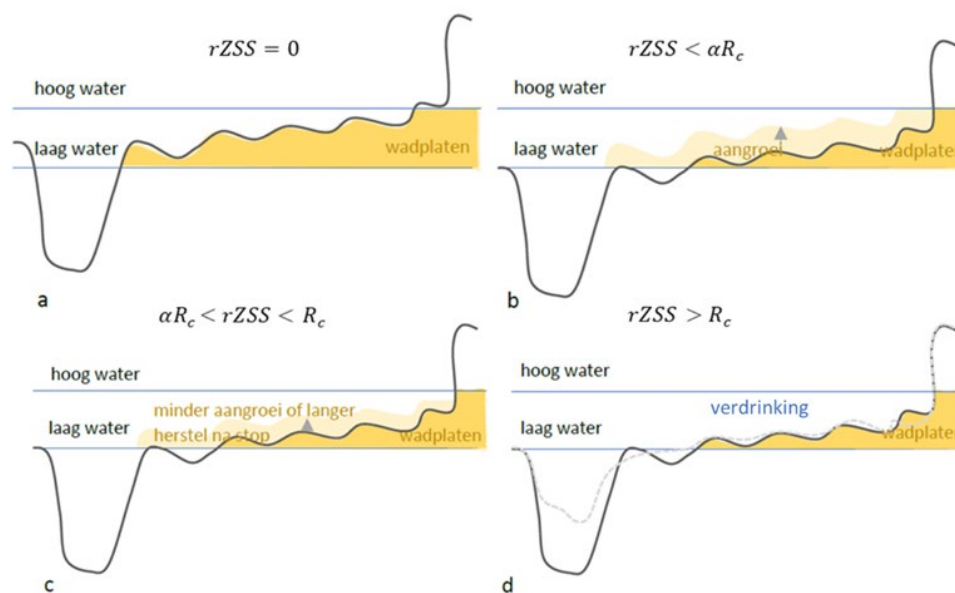
⁶ In kombergingen, waar geen grote ingrepen plaatsvonden, waren de sedimentatiesnelheden aanzienlijk lager (de sedimentatie in de komberging van het Amelandse zeegat bedroeg bijvoorbeeld 2,52 mm per jaar)

⁷ accommodatie-gelimiteerd wil zeggen, dat de beschikbare ruimte tussen zeebodem en zeespiegel limiteert hoeveel sediment kan worden afgezet. Een toename van accommodatieruimte (door stijging van de zeespiegel of bodemdaling) in een komberging wordt dan snel opgevuld door nieuw aangevoerd sediment.

vermogen van de zeegaten (Wang et al., 2018). De kombergingen in het oostelijk deel van de Waddenzee bevinden zich daarentegen dicht bij morfologisch evenwicht en zijn daardoor minder gevoelig voor de gevolgen van zeespiegelstijging.

3.1.2 Kritische verdrinkingssnelheid

Verdrinking wordt gedefinieerd als het op den duur verdwijnen van alle intergetijdengebieden in een komberging door het blijven toenemen van de gemiddelde waterdiepte met de tijd (Van Goor et al., 2003). De kritische snelheid voor verdrinking is dus per definitie hoger dan het meegroeivermogen.



Figuur 3: Conceptueel model van de invloed van de relatieve zeespiegelstijging op een komberging, naar Adviescollege Hand aan de Kraan, 2021; Wang en Van der Spek, 2021a) Evenwicht met relatieve zeespiegelstijging is nul. De gemiddelde waterdiepte h in komberging is gelijk aan de evenwichtsdiepte h_e . b) relatieve zeespiegelstijging snelheid is onder een bepaalde waarde α van de kritische grens van verdrinking R_c en er ontstaat een nieuw dynamisch evenwicht zonder (significante) afname wadplaatareaal c) relatieve zeespiegelstijging snelheid is boven een bepaalde waarde α van de kritische grens van verdrinking R_c , maar onder de kritische grens van verdrinking R_c : er ontstaat een nieuw dynamisch evenwicht met afname wadplaatareaal. Meegroeivermogen wordt overschreden. d) relatieve zeespiegelstijging snelheid is groter dan de kritische grens van verdrinking en over lange tijdperiodes verdrinkt de komberging uiteindelijk.

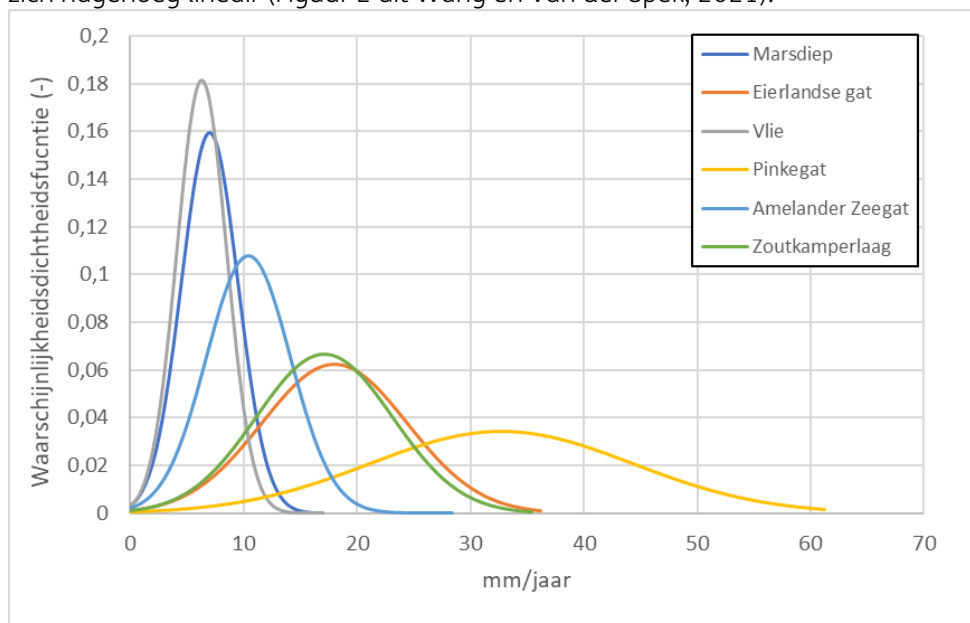
Figuur 3 illustreert schematisch de stadia tussen een kombergingssysteem in evenwicht en een uiteindelijk verdrinkend systeem door relatieve zeespiegelstijging (Wang et al., 2017; Wang en Van der Spek, 2021). Als er (over langere tijd genomen) geen relatieve zeespiegelstijging of -daling plaatsvindt, komt het systeem in morfologische evenwicht; er is dan geen netto sedimentuitwisseling en de waterdiepte in de komberging blijft ongeveer constant (**Figuur 3a**). Een relatieve zeespiegelstijging heeft tot gevolg dat de waterdiepte in de komberging toeneemt met als netto sedimentimport en extra sedimentatie tot gevolg. Onder de kritische verdrinkingssnelheid leidt dit op den duur tot een nieuw dynamisch evenwicht. Afhankelijk van de hoogte van de relatieve zeespiegelstijging ten opzichte van de kritische snelheid voor verdrinking verandert hierbij de waterdiepte niet significant (voor verdere uitleg zie de volgende paragraaf) en is de sedimentimport afdoende zodat de wadplaten meegroeien met de relatieve zeespiegelstijging (**Figuur 3b**). In dit geval is het systeem onder de grens van het meegroeivermogen. Wanneer de zeespiegel verder toeneemt, stijgt de waterdiepte verder en neemt op een gegeven moment de

sedimentimport onvoldoende toe. Dit uit zich morfologisch door afname van het wadplaatareaal en toename van de geulomvang, met andere woorden het meegroeivermogen wordt dan overschreden (**Figuur 3c**). Wanneer de relatieve zeespiegelstijging verder toeneemt tot uiteindelijk boven de kritische verdrinkingsnelheid, dan is het bereiken van een dynamisch evenwicht niet meer mogelijk, waardoor de komberging uiteindelijk verdrinkt (**Figuur 3d**).

3.1.2.1 Kritische verdrinkingsnelheid en kombergingsoppervlak

De kritische verdrinkingsnelheid kan worden berekend op basis van empirische relaties met een (semi)-empirisch morfodynamisch model van de dynamiek van zeegaten en kombergingen (Aggregated Scale Morphological Interaction between Tidal basin and Adjacent coast ASMITA) (zie ook Stive et al., 1998, Stive en Wang, 2003 en Van Goor et al., 2003). Gebruikmakend van ASMITA-modelering berekent Wang et al. (2018) voor elk van de kombergingen in de Nederlandse Waddenzee de kritische verdrinkingsnelheid door alle relevante modelparameters als stochastische variabelen te beschouwen (**Figuur 4**). De modelresultaten tonen een duidelijke correlatie tussen de kritische verdrinkingsnelheid en kombergingsgrootte, waarbij Vlie en Marsdiep een lagere verwachtingswaarde voor de R_c hebben (vergeleken met bijvoorbeeld Pinkegat). Vlie en Marsdiep zijn daarmee gevoeliger voor verdrinking.

De ASMITA-modelering laat ook zien dat vanaf een bepaalde snelheid van relatieve zeespiegelstijging het systeem zich niet meer lineair gedraagt (Wang et al., 2017; Wang en Van der Spek, 2021). De niet-lineariteit betekent fysisch gezien dat er een maximum is aan de hoeveelheid sediment die naar een komberging kan worden getransporteerd. Wanneer het systeem zich niet-lineair gedraagt, betekent het dat er nog wel een nieuw evenwicht kan ontstaan, maar dat dit gepaard gaat met een significante verandering van waterdiepte. Met andere woorden, wanneer het systeem zich niet-lineair gedraagt, wordt het meegroeivermogen aangetast. Deze overgang wordt schematisch geïllustreerd in **Figuur 3b** en **Figuur 3c**. Tot ongeveer 40% van de kritische verdrinkingsnelheid gedraagt het systeem zich nagenoeg lineair (Figuur 2 uit Wang en Van der Spek, 2021).



Figuur 4: Probabilistische kansverdeling van de kritische verdrinkingsnelheden voor de kombergingen in de Waddenzee, op basis van Wang et al., 2018.

3.1.3 Vertaling van kritische verdrinkingsnelheid naar meegroeivermogen

Hoe een komberging ontwikkelt onder invloed van de relatieve zeespiegelstijging hangt af van de morfologische toestand van de komberging (ten opzichte van het morfologisch evenwicht) en de verhouding tussen relatieve zeespiegelstijging en kritische verdrinkingsnelheid van de komberging. Dit kan worden uitgedrukt als (Wang et al., 2018; Wang en Van der Spek, 2021):

Vergelijking 1: $M = \alpha R_c$

Waarbij M het meegroeivermogen (mm/jaar) is, α een fractie afhankelijk van de morfologische toestand van de komberging en R_c de kritische verdrinkingsnelheid (mm/jaar).

Gebaseerd op het gegeven dat tot ongeveer 40% van de kritische verdrinkingsnelheid het systeem zich lineair gedraagt, kan een waarde van 0,4 voor α in de relatie tussen R_c en M worden afgeleid als een bovengrens voor het meegroeivermogen, voor die kombergingsgebieden, die in of dichtbij morfologisch evenwicht zijn (Wang en Van der Spek, 2021). In dit bereik immers gedraagt het systeem zoals in [Figuur 3b](#) en zal een stijging van de waterdiepte door relatieve zeespiegelstijging gecompenseerd worden door meer sedimentatie.

Voor de kombergingen, die zich ver van morfologisch evenwicht bevinden geldt, dat de sedimentatiesnelheid niet of nauwelijks afhangt van de relatieve zeespiegelstijging (zie hierboven en geïllustreerd in [Figuur 3c](#)); daar vindt nu al dichtbij maximale sedimentimport en sedimentatie plaats, inclusief (langzaam en geleidelijk) verlies van wadplaatareaal en uitbreiding van de geulomvang. Dit betekent dat zo lang de relatieve zeespiegelstijging onder de kritische snelheid voor verdrinking blijft er weinig verandert en zal er geen toegenomen negatief effect zijn. Voor deze kombergingen is een waarde van ongeveer 1 voor α passend (Wang en Van der Spek, 2021).

3.1.4 Naar een verdeling voor meegroeivermogen

Op basis van de morfologische staat en de relatie gegeven in [Vergelijking 1](#) kan er een inschatting gemaakt worden voor de onzekerheidsverdeling van het meegroeivermogen van de kombergingen in de Waddenzee. Het ligt voor de hand om voor de ondergrens van de verdeling de huidige sedimentatiesnelheid te nemen als (harde) grens. Immers dit is de minimale bewezen sedimentatie snelheid, zeker voor de kombergingen waar de sedimentatie gelimiteerd wordt door de accommodatie ruimte. Een inschatting van rest de verdeling (bijv. de verwachtingswaarde) kan dan op basis van [Vergelijking 1](#) worden bepaald met een waarde voor α op basis van de morfologische staat en R_c op basis van Wang et al., 2018 (zie [Figuur 4](#)).

3.1.5 Aandachtspunten

De relatie die gegeven is door Wang en van der Spek (2021) en hierboven uitgewerkt is, is een stap naar een gedegen onzekerheidsverdeling voor het meegroeivermogen. Er is echter meer onderzoek nodig om de onzekerheden in de verdeling te verkleinen, met name het bovenste bereik van de verdeling (zie ook Wang en Van der Spek, 2021).

Verder zijn er aanwijzingen dat het meegroeivermogen mogelijk kan veranderen als gevolg van zeespiegelstijging (bijvoorbeeld Lodder et al., 2019). Daarnaast kan een verandering in suppletieregime van de Nederlandse kust eventueel het meegroeivermogen beïnvloeden. Het meegroeivermogen wordt bepaald over de gehele komberging en maakt geen onderscheid tussen zand en slib. De sedimentbalans voor zand is betrouwbaarder dan die voor slib. Dit is vooral relevant voor de westelijke kombergingen, die meer slib bevatten (Wang et al, 2018.). Een positief zandbudget is in overeenstemming met observaties (van Dobben et al, 2022), dat delen van het waddengebied, zoals de kwelders, eerder last hebben van opslibbing dan dat er sprake is afnemend wadplaatareaal. In de kwelders kan dat gepaard gaan met een geleidelijke afname van de fourageerfunctie en biodiversiteit.

3.2 Zeespiegelstijging

Hier gaan we eerst in op het beleidsscenario van de zeespiegelstijging. Daarna behandelen we het richtscenario van de zeespiegelstijging en de aansluiting daartussen. Tot slot vertalen we de opgedane inzichten naar een onzekerheidsverdeling.

3.2.1 Het beleidsscenario

Zonder een gevalideerd prognosemodel, dat de observaties van de getijdemeetstations langs de Nederlandse kust afdoend kan verklaren, blijven we voor verwachtingen op de korte termijn (ca. 5 jaar vooruit) aangewezen op extrapolatie vanuit de getijdemeetstation-datareeksen (conform Pb, 2006). In 2006 kon uit de toen beschikbare data een gemiddelde snelheid van zeespiegelstijging afgeleid worden. Tegelijk kon, binnen de waargenomen 1-sigma bandbreedte, een eenparige versnelling van de zeespiegelstijging (zoals afgeleid uit waarnemingen op kuststations wereldwijd, Church en White, 2006) worden uitgesloten noch worden aangetoond. Destijds is pragmatisch gekozen om deze eenparige versnelling als verwachtingswaarde te verwerken in het beleidsscenario. Door toepassing van een andere methodiek voor data-analyse is sinds vorig jaar voor het eerst uit meetgegevens aannemelijk dat ook langs de Nederlandse kust de zeespiegel sinds de jaren 60-70 van de vorige eeuw versneld stijgt en wel met een versnelling van ca. 0,025 mm/jaar² (Keizer et al., 2023, Figuur 4a). Deze waarde ligt dichtbij de in 2006 gehanteerde waarde van 0,018 mm/jaar² (Church en White, 2006).

Ook is voor het eerst voorgesteld om de lange termijn windeffecten te gebruiken als voorspellende variabele om de onzekerheid in de zeespiegelstijging mee te reduceren (Keizer et al., 2023). Om uit een datareeks van zeespiegelstanden langs de Nederlandse kust de snelheid van de veranderende zeespiegel te kunnen afleiden, is het noodzakelijk om te corrigeren voor korte en middellange termijn (cyclische) variaties. Correctie voor de korte termijn (jaarlijkse) variatie in windopzet wordt bijvoorbeeld al sinds 2018 toegepast in de Zeespiegelmonitor (Deltares, 2019) als een vorm van ruisonderdrukking van de meetreeksen. Ruisonderdrukking sluit aan bij de toetsingsmethodiek, waarin ook gebruikt wordt gemaakt van voortschrijdende gemiddelden (zie Hoofdstuk 2).

Waar de correcties voor de korte-termijnvariati es resulteren in een wat kleinere bandbreedte rond de trend (Baart et al., 2019), resulteert toepassing van de langjarige windopzetcorrectie juist in een systematische, lange termijn verschuiving van die trend (Keizer et al., 2023). Eén van de onderliggende aannames is, dat dergelijke windinvloed enkel kan worden toegeschreven aan natuurlijke variabiliteit (en dan in de toekomst zou kunnen omdraaien) en niet gerelateerd is aan door de mens veroorzaakte veranderingen in windpatronen. De vastgestelde omvang van het effect ($\sim 0,15$ mm/jaar) is volgens Keizer e.a. (2023) klein genoeg om zeespiegelextrapolaties over meerdere decennia (tot 2100) mogelijk te maken: een snelheid van 2,8 mm/jaar (voor het jaar 2000) en met versnelling van 0,05 mm/jaar². Dat beide extrapolaties zoveel uiteenlopen, komt onder meer omdat met de gebruikte analysemethode de zeespiegelstijging na het jaar 2000 niet met zekerheid kan worden vastgesteld (Keizer et al., 2023). Er is dus meer onderzoek nodig om beter te begrijpen welke fysische processen de verschillen in lokale zeespiegelsnelheden veroorzaken (Keizer et al., 2023; Adviescommissie, 2024).

Voor de extrapolatie tot 1 januari 2029 geldt juist, dat de lange termijn windeffecten alleen relevant kunnen zijn als ze op die korte termijn zouden gaan veranderen. Dat kan op grond van het bovenstaande niet worden uitgesloten, maar wij zien daarin ook geen aanleiding om als verwachting aan te nemen dat dit op deze korte tijdschaal zal gaan gebeuren; het is waarschijnlijker, dat de zeespiegel langs de Nederlandse kust gedurende deze vijfjarige periode zal blijven versnellen, zoals het doet sinds de jaren 60-70 van de vorige eeuw (Keizer et al., 2023, Figuur 4a). Daarbij kan het opnemen van een eventuele, langjarige invloed door verandering in de windopzet worden geïnterpreteerd als een extra voorzorg en dat druist in tegen de manier, waarop binnen de Hand aan de Kraan methodiek invulling wordt gegeven aan het voorzorgsbeginsel in de toetsingsmethodiek (namelijk niet via de zeespiegelstijging maar via het meegroeivermogen, zie Hoofdstuk 2).

In dit onderzoek definiëren we daarom het beleidsscenario als volgt: extrapolatie tot 1 januari 2029 van de verwachtingswaarde conform Keizer et al. (2023; Figuur 4a). Concreet komt dit neer op een lineaire versnelling van 3.02 mm/jaar in 2024 tot 3.11 mm/jaar in 2029. De gerapporteerde onzekerheden/vari  tie rond de mediane waarden is overgenomen uit de analyse van Keizer et al. (2023). Het recent door de overheid vastgestelde beleidsscenario (conform Adviescommissie, 2024) nemen we mee in onze gevoeligheidsanalyse.

3.2.2 Het richtscenario

Uitgangspunt voor het richtscenario is (conform Adviescommissie, 2024) het SSP2-4.5 klimaatsscenario met een waarde van 6,8 mm/jaar in 2050 (KNMI, 2023). De mediane stijgingssnelheid op basis van deze klimaatprojectie in 2029 bedraagt 5,8 mm/jaar. Vanwege een significante, systematische discrepantie tussen dit scenario en de observaties van de getijdenmeetstations langs de Nederlandse kust (KNMI, 2023) is de aansluiting in 2029 tussen het beleidsscenario en het richtscenario problematisch.

Om toch rekenschap te kunnen geven van het SSP2-4.5 klimaatsscenario gebruiken we een lineaire versnelling van 3.11 mm/jaar in 2029 tot 6.8 mm/jaar in 2050. Dit resulteert in een kunstmatige knik in 2029, die de niet passende aansluiting tussen het beleids- en richtscenario illustreert (inclusief de bijbehorende en in omvang onbekende overschatting van de zeespiegelstijging in het eerste deel van het richtscenario).

De bijhorende onzekerheid (5-95%) rond de mediane waarden in 2050 ligt tussen 5,0 en 10,8 mm/jaar. Deze onzekerheidsbandbreedte wordt eveneens lineair geïnterpoleerd tussen de waarden uit het beleidsscenario en het jaar 2050.

3.2.3 Aandachtspunten

De vastgestelde omvang van het lange termijneffect ($\sim 0,15$ mm/jaar) is volgens Keizer et al. (2023) klein genoeg om twee (hoekpunt)extrapolaties over meerdere decades (tot 2100) mogelijk te maken; één extrapolatie met een constante snelheid van 2,8 mm/jaar (vastgesteld voor het jaar 2000) en een tweede extrapolatie met een versnelling van $0,05$ mm/jaar². Dat deze twee extrapolaties zoveel uiteenlopen, komt onder meer omdat met de gebruikte analysemethode de zeespiegelstijging na het jaar 2000 niet met zekerheid kan worden vastgesteld. Er is dus meer onderzoek nodig om beter te begrijpen welke fysische processen de verschillen in lokale, relatieve zeespiegelsnelheden veroorzaken (Keizer et al., 2023; Adviescommissie, 2024).

Ook de aansluiting tussen het beleidsscenario en het richtscenario én het verloop van de zeespiegelstijging tussen dit aansluitpunt en het IPCC ijkpunt (het jaar 2050) zijn punten van aandacht. Onderzoek is allereerst nodig om te begrijpen waar de discrepantie tussen de IPCC modellering en de geobserveerde zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust door wordt veroorzaakt. Het wegnemen van deze discrepantie als volgende stap kan in potentie de onzekerheid rondom de zeespiegelstijging in belangrijke mate reduceren (en dat belang strekt verder dan alleen de huidige vraagstelling).

3.3 Belasting

Onder de Waddenzee wordt zowel gas als zout gewonnen. De fysische processen, die bodemdaling kunnen veroorzaken, verschillen tussen beide type winning. Daarom behandelen we de belasting door gaswinning en zoutwinning apart van elkaar.

3.3.1 Gaswinning

Op dit moment wordt uit verschillende gasvelden (o.a. Ameland, Nes en Moddergat) onder de Waddenzee gas gewonnen vanuit locaties op het vaste land.

Door de productie van gas neemt (over het algemeen) de poriëndruk in het reservoirgesteente af en kan de waterdruk in om- en onderliggende aquifers (waterhoudende lagen) dalen. Deze drukdaling leidt tot een toename van de spanning op het reservoirgesteente, waardoor het reservoirgesteente compacteert (volumeverandering). Dit volumeverlies wordt gepropageerd naar maaiveld en uit zich daar als een platte brede bodemdalingskom. De kom beslaat daarbij een groter oppervlak dan bijbehorende het gasveld.

De belangrijkste onzekerheden in prognoses voor bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee zijn het al dan niet optreden van na-ijlende bodemdaling (Hettinga et al., 2002, en zoals bijvoorbeeld is waargenomen bij het Ameland veld, zie NAM, 2015) of drukdaling in de omliggende, watervoerende lagen (NAM, 2017; NAM, 2021). Dergelijke onzekerheden kunnen (deels) worden verkleind door laboratoriumexperimenten uit te voeren op (analoge) gesteentemonsters onder zo gelijk mogelijke omstandigheden als in de ondergrond (bijv. Hol et al., 2018; Pijnenburg et al., 2019) en door de prognoses te kalibreren met bodemdalingsmetingen (TNO, 2017; Fokker et al., 2018).

Voor de bodemdalingsprognoses voor gaswinning in de Waddenzee gebruikt de NAM een methode die ontwikkeld en beschreven is in het LTS-II (Long Term Subsidence) project (NAM,

2017; TNO,2017). In deze methodiek worden alle onzekerheden in de bodemdalingsprognose doorgerekend op het effect op bodemdaling en geconfronteerd met de metingen. Dit resulteert in grote hoeveelheid modellen (een ensemble) met een spreiding aan uitkomsten. Aan die modelrealisaties, waarvan de voorspellingen beter passen bij de metingen, wordt een groter gewicht toegekend. Met dat aangepaste gewicht worden vervolgens ook de toekomstverwachting berekend en de effecten van de verschillende scenario's voor bodemdaling. Met het op deze wijze verdisconteren van onzekerheden voldoet de huidige generatie probabilistische modellen (en in het bijzonder de LTS-II methodiek) aan de laatste wetenschappelijke inzichten (Adviescollege, 2021).

3.3.2 Zoutwinning

Zoutwinning van onder de Waddenzee wordt door middel van oplosmijnbouw (via gedeveerde putten vanaf landlocaties) nabij Havenmond gewonnen uit 's werelds diepste cavernes (2.5-3 km). Bij oplosmijnbouw wordt zoet water in een zoutlaag in de ondergrond geïnjecteerd, waardoor er lokaal zout oplost. Hierdoor ontstaat er geleidelijk een holruimte, die met verzadigde pekkel is gevuld. Deze pekkel kan vervolgens worden geproduceerd en bovengronds worden verwerkt. De wijze van winning en de geologische context is vergelijkbaar met de nabijgelegen Barradeel cavernes, die recent zijn ingesloten.

Steenzout heeft als eigenschap, dat het zich onder de verhoogde druk en temperatuur in de ondergrond enigszins vloeibaar gedraagt (kruipgedrag). In de holruimtes is de pekeldruk lager dan de spanning in het omringende zout. Door het drukverschil vloeit het zout langzaam richting de laagste druk, waardoor de holruimte in volume afneemt; de wanden van de caverne bewegen daarbij naar binnen (convergentie). Dit volumeverlies vertaalt zich (net als bij gaswinning) naar het oppervlak en uit zich in een vlakke bodemdalingskom. Hoe dieper het zout wordt geproduceerd, hoe sneller het zout kan vloeien (door de hogere drukgradiënt en temperatuur), en dus hoe meer/sneller de uiteindelijke bodemdaling.

De belangrijkste onzekerheid in de bodemdalingsprognoses door zoutwinning is de kruipsnelheid van het steenzout in de ondergrond. De kruipsnelheid kan door middel van laboratoriumexperimenten worden bepaald, maar door (de combinatie van) praktische beperkingen van experimentele methoden en natuurlijke variatie in de eigenschappen van steenzout bestaat er een relatief grote onzekerheid over de mate van zoutkruip onder verschillende ondergrondse omstandigheden (SRMI, 2021; Hunfeld et al., 2022). Een andere mogelijkheid om deze onzekerheid te verminderen is om het gedrag van de caverne, het omliggende zout, en de boven-/ondergelegen gesteentelagen in één geïntegreerd, numeriek model te modelleren (Breunese et al., 2003; Hunfeld et al., 2022; Baumann et al., 2022).

Bij het bepalen van de belasting is het totale bodemdalingsvolume belangrijk en niet de daling van het diepste punt van de schotel. Dat leidt tot een aanzienlijke vermindering in de onzekerheid in het bepalen van de belasting ten opzichte van de onzekerheid in de vorm van de bodemdalingskom en diepste punt. Dit komt omdat het convergentievolume een beter te bepalen parameter is en de vertaling van convergentievolume naar (de vorm van) de bodemdalingskom geen rol speelt in het bepalen van de belasting. Verder is er bij zoutwinning in tegenstelling tot gaswinning geen drukcommunicatie met omliggende aquifers en hoeft er dan ook geen rekening gehouden te worden met eventuele compactie en bodemdaling als gevolg daarvan. Een ander verschil met gaswinning is, dat de eventuele na-ijling afhangt van de gekozen wijze van abandonnering.

3.3.3 Aandachtspunten

Bij gaswinning zijn de belangrijkste aandachtspunten eventuele na-ijlende bodemdaling of drukdaling in de watervoerende lagen. Bij de zoutwinning is voor de belasting minder onzekerheid en is voornamelijk de gekozen wijze van abandonnering een onzekere factor.

3.4 Conclusie

Voor elk van de drie variabelen (meegroeivermogen, zeespiegelstijging en belasting) kan op grond van de huidige kennis een onzekerheidsverdeling gekwantificeerd. Dit in tegenstelling tot het PB 2006 waarin voor bijvoorbeeld het meegroeivermogen enkel een ondergrens te bepalen was. Dit biedt perspectief om een probabilistische Hand aan de Kraan methodiek uit te werken. Met betrekking tot de kwantificering van de onzekerheidsverdeling moet worden geconcludeerd dat de kwaliteit van de onderbouwing uiteenloopt per parameter. Het is daarom van belang bij eventuele implementatie van probabilistische Hand aan de Kraan methodiek project specifiek de onzekerheden per parameter te onderzoeken en te toetsen.

4 Haalbaarheid probabilistische aanpak

In dit hoofdstuk onderzoeken we de praktische haalbaarheid van een zuiver probabilistische aanpak voor de invulling van het Hand aan de Kraan methodiek. Deze aanpak sluit goed aan bij de uitgangspunten en afwegingen gemaakt voor de Pb 2006. Waar de huidige gebruiksruijmtetoets ([Kader 1](#)) gebaseerd is op de binaire jaarlijkse overschrijding van de gebruiksruijmt (met het voorzorgsbeginsel in het meegroeivermogen), staat in een zuiver probabilistische aanpak de (jaarlijkse) overschrijdingskans van de gebruiksruijmt centraal. Om deze te bepalen hebben we een prototype probabilistische gebruiksruijmtetoets (P-gebruiksruijmtetoets) ontwikkelt. Met het oog op de praktische haalbaarheid passen we dit prototype vervolgens toe op twee verschillende type kombergingen (een kleine komberging in het oostelijke deel en een grote komberging in het westelijke deel van de Waddenzee), waarbij we de onzekerheidsverdelingen baseren op de inzichten uit Hoofdstuk 3. We merken op, dat dit prototype pas als een gebruiksruijmtetoets toets kan worden ingezet als bevoegd gezag heeft besloten, welke overschrijdingskans of een afgeleide daarvan acceptabel is binnen de gestelde norm (“er mag op basis van de best beschikbare informatie wetenschappelijk gezien redelijkerwijs geen twijfel bestaan dat er geen aantasting optreedt van de natuurlijke kenmerken van de Waddenzee als gevolg van bodemdaling door economische activiteiten”, Pb, 2006). Dit kan op verschillende manieren worden ingevuld en behandelen we in Hoofdstuk 5.

4.1 Prototype P-gebruiksruijmtetoets

Voor de uitwerking van probabilistische aanpak zijn we geïnteresseerd in de kansverdeling van de (jaarlijkse) overschrijding van de gebruiksruijmt:

Vergelijking 2: $T = M - rZSS - B$

M is het meegroeivermogen (in mm/jaar), $rZSS$ is de relatieve zeespiegelstijging (in mm/jaar) en B is de door mijnbouwactiviteiten veroorzaakte belasting in de komberging (mm/jaar). $M - rZSS$ is gelijk aan de gebruiksruijmt G (conform [Kader 1](#) en [Figuur 2](#)). We nemen voor dit voorbeeld aan, dat alle variabelen onafhankelijk zijn van elkaar.

De kansverdeling T is een soort lakmoesproef voor eventuele aantasting van de natuurwaarden. Wanneer $T > 0$, dan is het meegroeivermogen afdoende om de relatieve zeespiegelstijging en de belasting bij te benen en kan geen aantasting van de natuurwaarde optreden; als $T < 0$, dan kan op den duur aantasting van de natuurwaardes optreden. Dit stoelt op hetzelfde principe als waarvan uit gegaan is in het Pb 2006, enkel in plaats van een deterministische grens waaronder de gebruiksruijmt mag komen, volgt nu een verdeling van deze gebruiksruijmt.

Eén van de manieren om dergelijke kansverdelingen uit rekenen is door ze numeriek te benaderen door middel van het herhalen van een deterministische berekening met net wat

andere invoerwaardes, waarbij de invoerwaardes gevarieerd worden door ze willekeurig uit een kansverdeling (zoals in [Figuur 4](#)) te trekken (z.g. Monte Carlo analyse). Kansverdelingen zijn in specifieke gevallen wiskundig zo te beschrijven dat ze ook kunnen worden opgelost door numerieke integratie. Die rechtstreekse aanpak heeft als voordeel, dat de nauwkeurigheid van het resultaat niet bepaald wordt door het aantal trekkingen, maar de discretisatie van de kansverdelingsfuncties.

We hebben bij het uitwerken van het prototype ervoor gekozen om deze rechtstreekse aanpak te gebruiken, aangezien we hiermee snel de uitwerking van verschillende modelinvoer en gevoeligheid van de verschillende parameters kunnen analyseren. Het doel is immers om de voor en eventuele nadelen van de keuze voor een probabilistische Hand aan de Kraan methodiek te illustreren. In een mogelijke toepassing in beleidsdomein kan het uitwerken van [Vergelijking 2](#) desgewenst op een andere manier worden ingevuld (bijvoorbeeld door Monte Carlo-analyse).

Het prototype hebben we als volgt opgezet. De gebruiker geeft via een Excel template per tijdseenheid (bijvoorbeeld per jaar) de gewenste verdelingsfunctie van het meegroeivermogen, zeespiegelstijging en belasting. De verdelingsfunctie wordt gedefinieerd door het type verdeling met bijhorende parameters. In principe zijn de meeste continue verdelingen ondersteund, maar beperken wij ons in deze verkenning tot de (getrunceerde) normaalverdeling en (dubbele) driehoeksverdeling. We hebben ons beperkt tot deze verdelingen om de volgende reden. Voor met name relatieve zeespiegelstijging en in mindere mate het meegroeivermogen is er onduidelijkheid over de vorm van de verdeling, maar is er een redelijk beeld van de mediane waarde. Daarnaast is de ondergrens van het meegroeivermogen begrensd door observaties en zijn we in zijn algemeenheid niet geïnteresseerd in de extreme waarden van de boven- en ondergrens van de verdelingen. De (dubbele) driehoeksverdeling is een gangbaar gebruikte verdeling in vergelijkbare situaties (bijv. Lutgert et al., 2005) en doet recht aan de zowel de kwaliteit van de invoergegevens als het gebruiksdoel van onze analyse.

De (jaarlijkse) overschrijdingskansverdeling (met en zonder belasting) van de gebruikruimte is bepaald (cf. [Vergelijking 2](#)) doormiddel van een rekenmodule op basis van de invoergegevens, met inachtneming van alle onzekerheden. Het resultaat kan via de module worden gevisualiseerd en/of worden geëxporteerd naar Excel. De rekentijd van deze analyse is beperkt tot een aantal seconden op een reguliere laptop.

4.2 Twee voorbeelden: komberging Pinkegat en komberging Vlie

Om te onderzoeken in hoeverre een zuiver probabilistische aanpak praktisch haalbaar is, passen we ons prototype toe op twee kombergingen (Pinkegat en Vlie, zie [Figuur 1](#), die verschillen qua grootte en qua morfologische staat (transport- versus accommodatie-gelimiteerd, zie Hoofdstuk 3). De komberging Pinkegat is een voorbeeld van een relatief kleine komberging, die zich dicht bij morfologisch evenwicht bevindt (Wang et al, 2018). Daarentegen is Vlie een voorbeeld van een grote komberging, die ver afzit van het morfologische evenwicht met name door het afsluiten van de Zuiderzee door de Afsluitdijk.

Aansluitend bij de functie van een gebruikruimtetoets toets in vergunningverleningstrajecten richten we ons op de periode tussen 2020 tot 2050, waarbij we de overschrijdingskans berekenen op grond van de onzekerheidsverdelingen van de drie

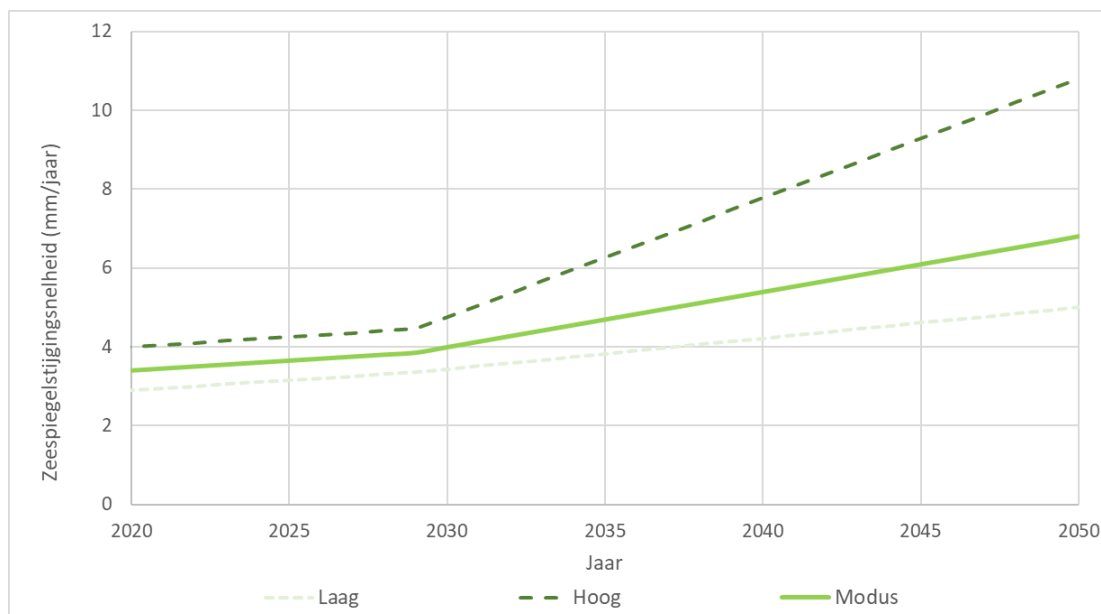
hoofdvariabelen. Deze baseren we op de inzichten uit Hoofdstuk 3 en werken we waar nodig in meer detail uit.

4.2.1 Relatieve zeespiegelstijging

We bespreken eerst het meegroeivermogen en de relatieve zeespiegelstijging in relatie tot de gebruiksruimte. Pas daarna gaan we in op het effect van de belasting. De gebruikte onzekerheidsverdeling van de relatieve zeespiegelstijging (Figuur 5 en Tabel 1) is opgebouwd uit een eigen invulling van het beleidsscenario en een richtscenario (conform Hoofdstuk 3), waarbij we gebruik maken van een dubbele driehoeksverdeling. Het recent door de overheid vastgestelde beleids- en richtscenario nemen we mee als alternatief (zie paragraaf 4.2.5), hierbij gebruiken we ook een dubbele driehoeksverdeling. We gebruiken dit type driehoeksverdeling omdat voor met name het richtscenario enkel een P5-P50-P95 bekend is. In een dubbele driehoeksverdeling is in tegenstelling tot normale driehoeksverdeling de modus gelijk aan de mediaan en doet dus beter recht aan de verdeling in het richtscenario.

Tabel 1: Inputparameters voor de dubbele driehoeksverdeling van zeespiegelscenario gebruikt voor de voorbeelden. Hierbij is j jaar en a de ondergrens, c de modus en b de bovengrens van de dubbele driehoeksverdeling.

Ondergrens	Modus	Bovengrens
2020-2029: $c(j)=2,120 \text{ mm/jaar} + (j-2020) * 0,0170 \text{ mm/jaar}^2$	2020-2029: $c(j)=2,950 \text{ mm/jaar} + (j-2020) * 0,0160 \text{ mm/jaar}^2$	2020-2029: $b(j)=3,730 \text{ mm/jaar} + (j-2020) * 0,0160 \text{ mm/jaar}^2$
2029-2050: $c(j)=2,290 \text{ mm/jaar} + (j-2029) * 0,123 \text{ mm/jaar}^2$	2029-2050: $c(j)=3,110 \text{ mm/jaar} + (j-2029) * 0,168 \text{ mm/jaar}^2$	2029-2050: $b(j)=3,930 \text{ mm/jaar} + (j-2029) * 0,312^* \text{ mm/jaar}^2$



Figuur 5: De onzekerheidsverdeling van de relatieve zeespiegelstijging voor de periode 2020- 2050, uitgesplitst naar ondergrens (licht gestippelde lijn), modus (dikke lijn) en bovengrens (donker gestippelde lijn).

4.2.2 Meegroeivermogen

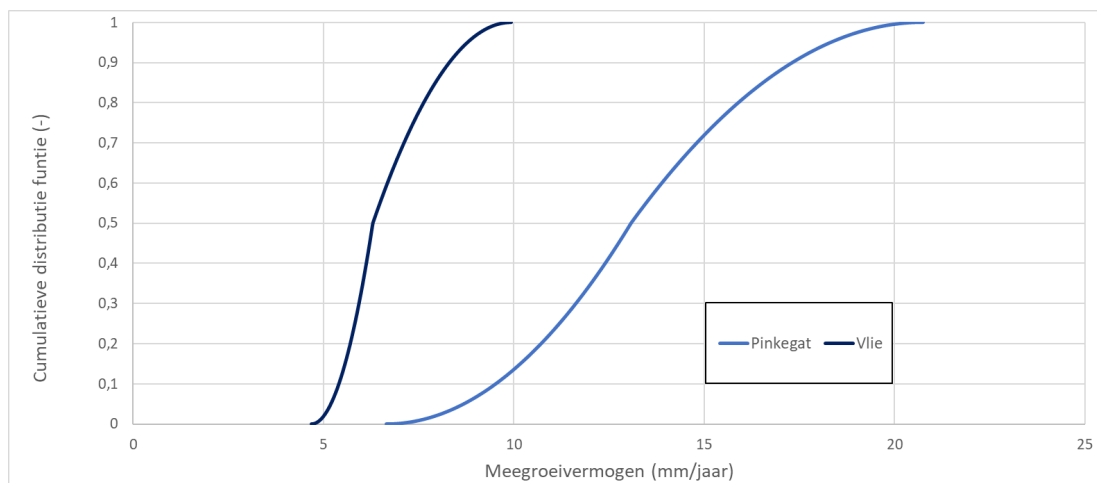
Voor het meegroeivermogen gebruiken we een dubbele driehoeksverdeling aangezien we een goede inschatting van de ondergrens van de verdeling en de modus maar minder inzicht in de vorm verdeling en dan met name de bovenkant van de verdeling. We maken onderscheid in de keuze voor de vertaling van kritische verdrinkingsnelheid naar meegroeivermogen op basis van morfologisch evenwicht van de komberging (3.1.3).

De komberging Pinkegat is dicht bij morfologisch evenwicht (Hoofdstuk 3) en daarom nemen we een waarde voor α van 0,4 in [Vergelijking 1](#) (op voorstel van Wang et al., 2018 en Wang en Van der Spek, 2021, zie Hoofdstuk 3). Om verdeling van de R_c die dan volgt uit Vergelijking 1 te vertalen naar een dubbele driehoeksverdeling nemen we voor de modus van het meegroeivermogen de verwachtingswaarde van de R_c ([Figuur 4](#)) en voor de bovengrens de P95 van de R_c . Dit geeft een waarde 13,1 mm/jaar voor de modus en 20,7 mm/jaar voor de bovengrens. Voor de ondergrens baseren we ons op de geobserveerde sedimentatiesnelheid van 6,7 mm/jaar uit Elias, 2012 ([Tabel 2](#)). Hiermee komen we tot een cumulatieve kansverdeling voor het meegroeivermogen van de komberging Pinkegat ([Figuur 6](#)).

De komberging Vlie bevindt zich ver van het morfologische evenwicht (Hoofdstuk 3) en daarom nemen we een waarde voor α van 1 in [Vergelijking 1](#). Om verdeling van de R_c die dan volgt uit Vergelijking 1 te vertalen naar een dubbele driehoeksverdeling nemen we voor de modus van het meegroeivermogen een waarde van ongeveer 1 R_c aan (op voorstel van Wang en Van der Spek, 2021, zie Hoofdstuk 3) en voor de bovengrens P95 van de R_c . Voor de ondergrens baseren we ons op de geobserveerde sedimentatiesnelheid van 4,7 mm/jaar uit Elias, 2012 ([Tabel 2](#)). Hiermee komen we tot een cumulatieve kansverdeling voor het meegroeivermogen van de komberging Vlie ([Figuur 6](#)).

Tabel 2: Inputparameters voor de dubbele driehoeksverdeling van het meegroeivermogen voor kombergingen Pinkegat en Vlie

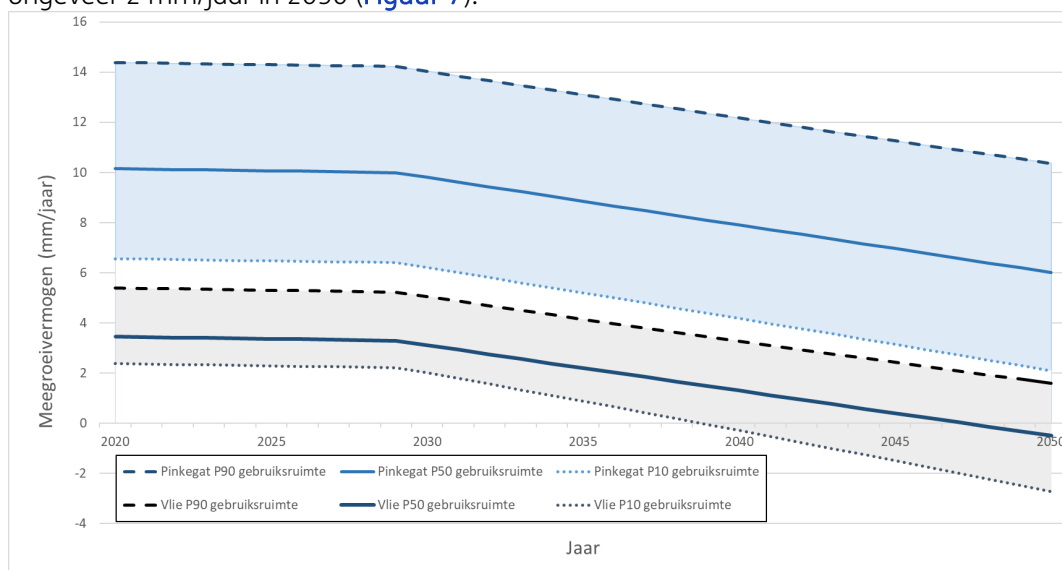
Komberging	Ondergrens	Modus	Bovengrens
Pinkegat	6,7 mm/jaar	13,1 mm/jaar	20,7 mm/jaar
Vlie	4,7 mm/jaar	6,3 mm/jaar	9,9 mm/jaar



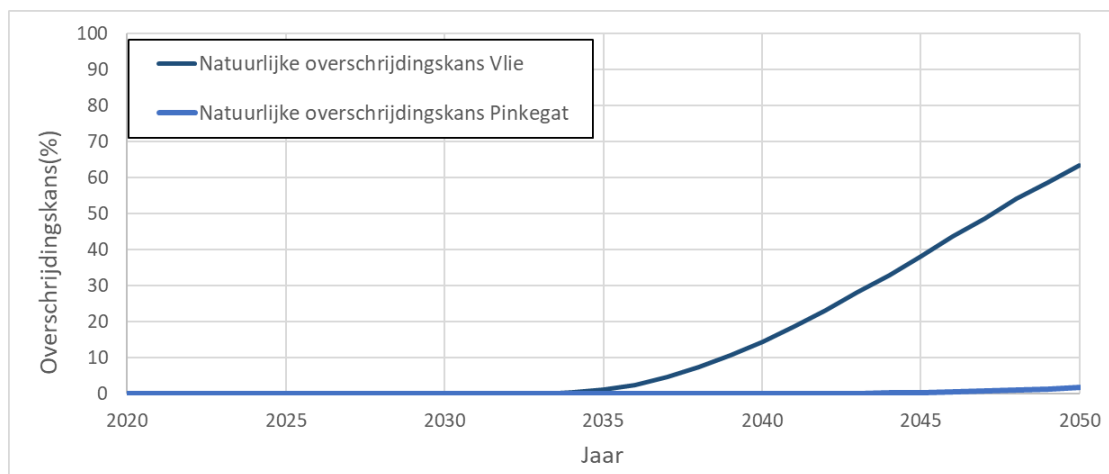
Figuur 6: Cumulatieve distributiefunctie van het meegroeivermogen van de komberging Pinkegat (in lichtblauw) en komberging Vlie in donkerblauw.

4.2.3 Gebruiksruimte en overschrijdingskans

We berekenen met behulp van ons prototype en bovengenoemde verdelingen ([Tabel 1](#) en [Tabel 2](#)) zowel de gebruiksruimte verdeling $G(M - rZSS)$ ([Figuur 7](#)) en de jaarlijkse overschrijdingskans T ([Figuur 8](#)) van deze verdeling voor beide kombergingen. Als we de gebruiksruimte in Vlie vergelijken met die in Pinkegat ([Figuur 7](#)), vallen twee dingen op. In periode 2020 tot 2029 ligt de P50 op ruim 3 en ongeveer 10 mm/jaar voor respectievelijk Vlie en Pinkegat. Belangrijker is dat de P10 gebruiksruimte van Vlie rond 2040 negatief wordt en de P50 enkele jaren later. Dit is ook te zien in [Figuur 8](#) waar de (jaarlijkse) overschrijdingskans vanaf ongeveer 2033 stijgt van verwaarloosbaar (<1%) naar ongeveer 60% in 2050. Dit is in groot contrast met Pinkegat, waar de jaarlijkse overschrijdingskans verwaarloosbaar is tot ongeveer 2045, waarna deze stijgt naar ongeveer 2% in 2050. Daarnaast is de P10 gebruiksruimte over de gehele periode positief, maar wel dalend tot ongeveer 2 mm/jaar in 2050 ([Figuur 7](#)).



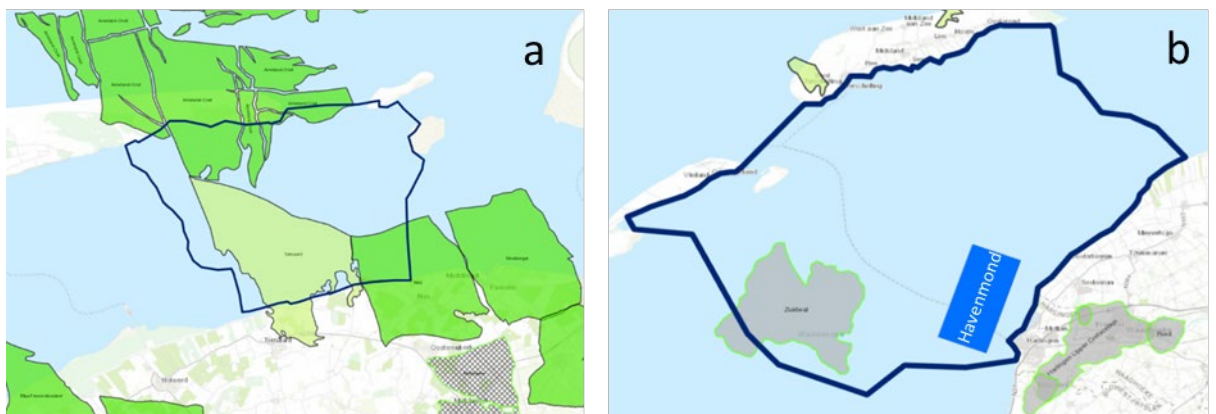
Figuur 7: Gebruiksruimteverdeling (P90-P50-P10) zonder belasting. De verdeling toont de doorwerking van de invoerverdeling van de relatieve zeespiegelstijging (uit [Tabel 1](#) en [Figuur 5](#), inclusief de (kunstmatige) knik bij de overgang van het beleids- naar het richtscenario. In lichtblauw de verdeling (P10-P90) van de komberging Pinkegat en lichtgrijs (P10-P90) van de komberging Vlie.



Figuur 8: Natuurlijke overschrijdingskans van de gebruikruimte ($rZSS > M$) zonder belasting door delfstoffenwinning op basis van verdelingen uit [Tabel 1](#) en [Tabel 2](#) voor kombergingen Pinkegat (lichtblauw) en Vlie (donkerblauw).

4.2.4 Invloed belasting

We bespreken nu de additionele invloed van belasting door delfstoffenwinning op de gebruikruimte en overschrijdingskans voor de twee voorbeelden.



Figuur 9: (a) Ligging van de producerende velden (in groen) en de aangevraagde winning Ternaard (in lichtgroen) ten opzichte van de komberging Pinkegat (blauwe contour) en (b) Ligging van het zoutwinningsgebied Havenmond (blauw) en de (uitgeproduceerde) gasvelden (grijs) ten opzichte van de komberging Vlie (blauwe contour).

Belasting Pinkegat

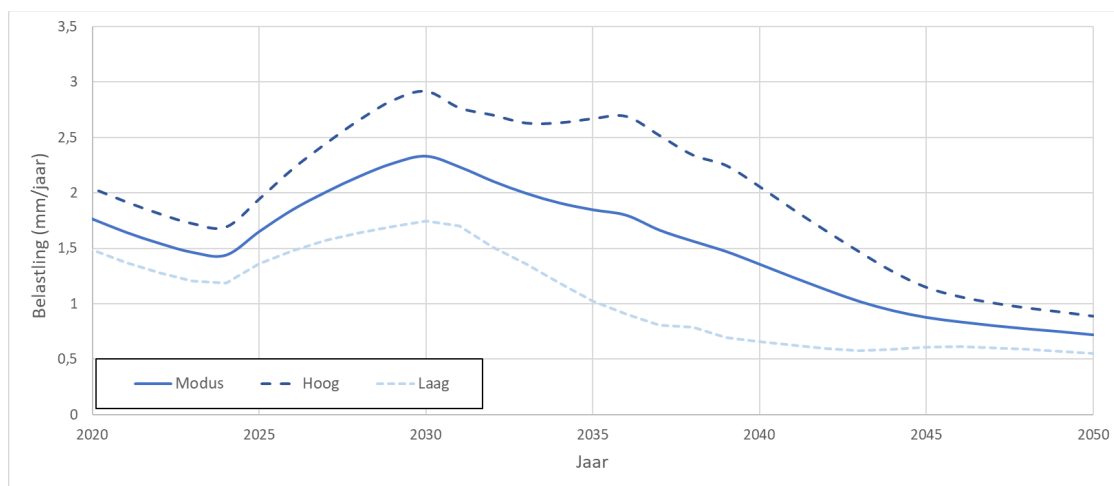
Op dit moment heeft de gaswinning uit verschillende voorkomens (Ameland, Nes en Moddergat) invloed op de bodemdaling en belasting over Pinkegat ([Figuur 9a](#)). Daarnaast loopt er een aanvraag om uit het voorkomen Ternaard te gaan produceren. We hebben zowel de belasting door de al producerende velden als de mogelijke winning uit het voorkomen Ternaard gecombineerd tot één driehoeksverdeling voor de belasting over Pinkegat. We gebruiken een driehoeksverdeling omdat dit naar ons inzicht goed de onzekerheid van de gehele verdeling van de belasting representeert.

De onzekerheidsverdeling van de belasting door de al producerende velden hebben we overgenomen uit een geomechanische modelering van de exploitant (met een

modelensemble dat is gekalibreerd aan geodetische metingen naar LTS-2 methodiek) voor de bodemdalingsprognose (NAM, 2023a). We nemen voor de verwachtingswaarde het midden scenario uit deze prognose. We nemen aan dat het laag en hoog scenario elk binnen twee standaarddeviaties ligt.

In relatie tot het lopende vergunningstraject Ternaard (NAM, 2019) nemen we voor dit voorbeeld aan dat de productie in 2026 van start zal gaan conform het midden-productieprofiel in de aanvraag. In onze eigen bodemdalingsberekeningen zijn we uitgegaan van verschillende parametersets rekening houdend met de geomechanische onzekerheid (compactie- en zoutgedrag) en met onzekerheid in het reservoirgedrag. In totaal bereken we van achttien prognoses een verwachtingswaarde en standaarddeviatie.

Deze twee normaalverdelingen zijn vervolgens vertaald naar een driehoeksverdeling die per jaar varieert en hiermee de belasting over Pinkegat berekend (Figuur 10 en Tabel 3). Met het prototype en deze invoerparameters hebben we opnieuw de overschrijdingskans berekend voor Pinkegat, nu met de invloed van belasting (Figuur 12a).



Figuur 10: De totale verwachte belasting (driehoeksverdeling) over komberging Pinkegat (zes-jaar-gemiddelde in mm/jaar) zoals gebruikt in dit voorbeeld. Merk op, dat de middeling in de tijd een uitsmerend effect heeft, wat ook het geval is in huidige methodiek. Daardoor is de belasting door bodemdaling als gevolg van de (hypothetische) gasproductie Ternaard vanaf 2026 al zichtbaar in 2024 (twee jaar voor start productie).

Tabel 3: Inputparameters voor de driehoeksverdeling van het belasting (zes-jaar-gemiddelde in mm/jaar) voor komberging Pinkegat, gelijk aan **Figuur 10**: De totale verwachte belasting (driehoeksverdeling) over komberging Pinkegat (zes-jaar-gemiddelde in mm/jaar) zoals gebruikt in dit voorbeeld. Merk op, dat de middeling in de tijd een uitsmerend effect heeft, wat ook het geval is in huidige methodiek. Daardoor is de belasting door bodemdaling als gevolg van de (hypothetische) gasproductie Ternaard vanaf 2026 al zichtbaar in 2024 (twee jaar voor start productie).

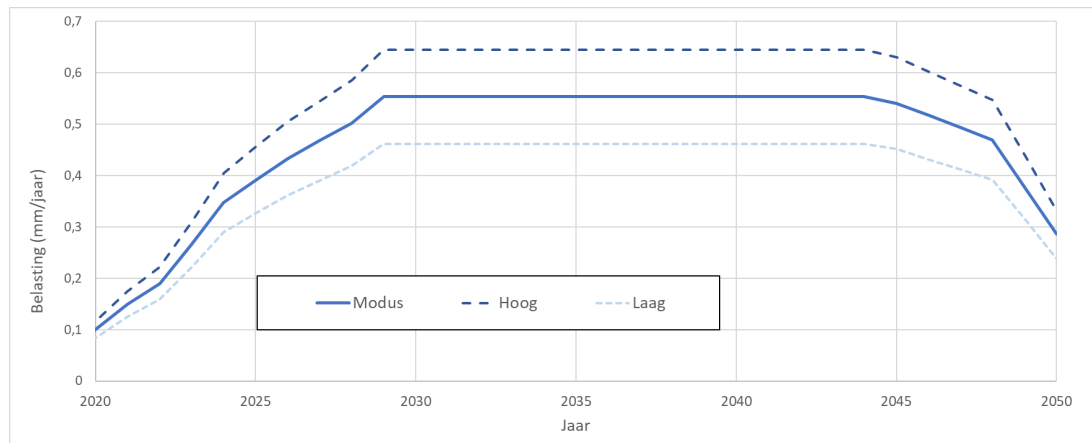
Jaar	Ondergrens	Modus	Bovengrens	Jaar	Ondergrens	Modus	Bovengrens
2020	2,16	1,9	1,65	2037	2,48	1,93	1,38
2021	2,19	1,93	1,67	2038	2,33	1,81	1,28
2022	2,22	1,95	1,68	2039	2,21	1,7	1,2
2023	2,23	1,95	1,67	2040	2,1	1,61	1,12
2024	2,22	1,93	1,64	2041	2,01	1,53	1,05
2025	2,25	1,94	1,64	2042	1,94	1,46	0,99
2026	2,26	1,93	1,61	2043	1,86	1,4	0,93
2027	2,26	1,92	1,58	2044	1,72	1,29	0,86
2028	2,29	1,92	1,56	2045	1,6	1,21	0,81
2029	2,33	1,94	1,55	2046	1,5	1,13	0,76
2030	2,37	1,95	1,53	2047	1,37	1,04	0,7
2031	2,42	1,97	1,52	2048	1,24	0,94	0,65
2032	2,46	1,98	1,5	2049	1,11	0,85	0,6
2033	2,5	1,99	1,48	2050	0,99	0,76	0,54
2034	2,51	1,98	1,46				

Belasting Vlie

Op dit moment wordt er van onder de komberging Vlie zout gewonnen uit de vergunning Havenmond (sinds 2021) en in het verleden is er gas gewonnen uit het voorkomen Zuidwal (tussen 1988 en 2020) (**Figuur 9b**). De belasting in de komberging Vlie wordt voor het overgrote deel veroorzaakt door zoutwinning uit Havenmond (Frisia, 2021; winningsplan Havenmond, 2020). Er is een beperkte na-ijling van de bodemdaling door gaswinning uit Zuidwal (Vermilion, 2024). De invloed van de belasting is verwaarloosbaar op het resultaat en daarom niet expliciet meegenomen in de analyse.

Voor de jaren 2020 t/m 2023 nemen we de belasting over zoals gerapporteerd door de exploitant (Frisia, 2021). Voor de toekomstige belasting hebben we eigen berekeningen gedaan, uitgaande van de door de exploitant gegeven zoutproductieprofielen (Frisia, 2015). Hierbij is de productiestart verschoven naar de werkelijke start van productie (in 2021). We nemen daarbij aan, dat het totale komvolume binnen de komberging van Vlie valt en (dus) bijdraagt aan de belasting. Dit is een lichte overschatting, aangezien ongeveer 10% van de dalingskom zich op land of in de komberging Marsdiep bevindt. Ook gaat dit productiescenario uit van zoutproductie uit vier putten, terwijl er op dit moment zout wordt gewonnen uit een put. Daarmee is dit scenario een overschatting van het daadwerkelijke zoutvolume dat in deze periode wordt geproduceerd en (dus ook) van de bijbehorende belasting. Voor de onzekerheidsverdeling nemen we een onzekerheidsmarge van ongeveer 15 % boven en onder de verwachte belasting op basis van Frisia, 2021 en illustreren we in **Figuur 11** en **Tabel 4**. Deze relatief kleine onzekerheid is gebaseerd op het feit dat Frisia van plan is een vast volume te produceren per put en dat dit volume met vrij veel zekerheid te

bepalen is. Daarnaast is de onzekerheid relatief klein ten opzichte van de onzekerheid voor de belasting voor gaswinning aangezien de berekening van het dalingsvolume bij zoutwinning minder onzeker is (zie Hoofdstuk 3).



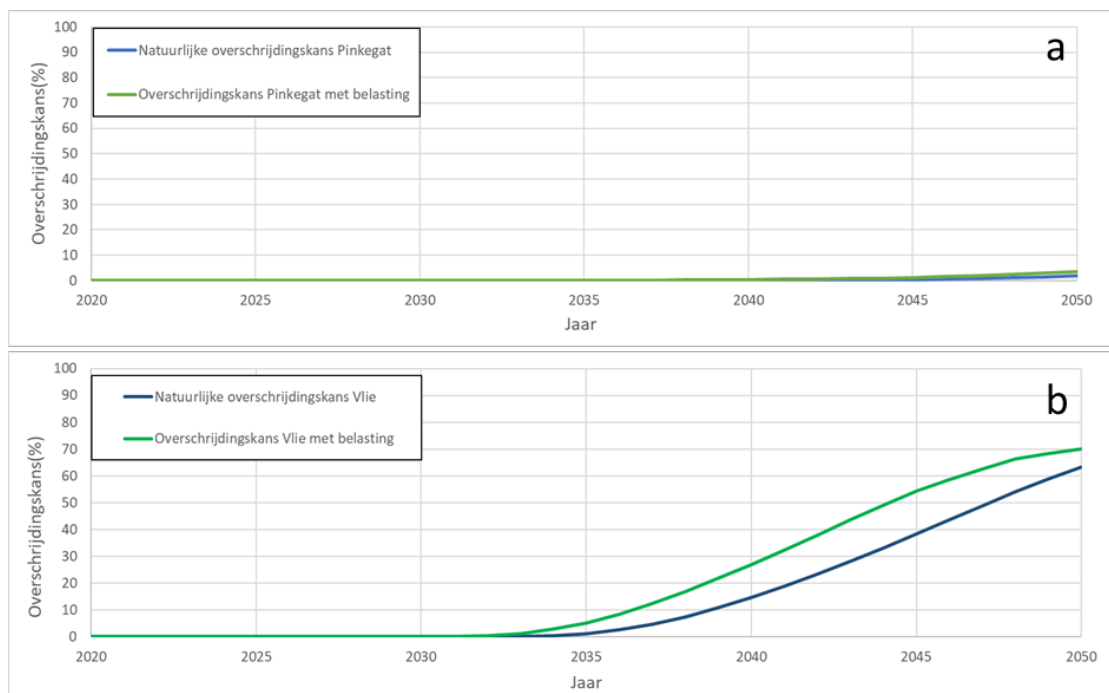
Figuur 11: De verwachte belasting over komberging (driehoeksverdeling) Vlie (zes-jaar-gemiddelde in mm/jaar) zoals gebruikt in dit voorbeeld.

Tabel 4: Inputparameters voor de driehoeksverdeling van de belasting (zes-jaar-gemiddelde in mm/jaar) voor komberging Vlie, gelijk **Figuur 11**.

Jaar	Ondergrens	Modus	Bovengrens	Jaar	Ondergrens	Modus	Bovengrens
2020	0,23	0,2	0,17	2037	0,64	0,55	0,46
2021	0,27	0,23	0,19	2038	0,64	0,55	0,46
2022	0,3	0,26	0,22	2039	0,64	0,55	0,46
2023	0,34	0,29	0,24	2040	0,64	0,55	0,46
2024	0,37	0,32	0,26	2041	0,63	0,54	0,45
2025	0,4	0,35	0,29	2042	0,62	0,53	0,45
2026	0,44	0,37	0,31	2043	0,61	0,53	0,44
2027	0,47	0,4	0,34	2044	0,58	0,5	0,42
2028	0,5	0,43	0,36	2045	0,55	0,47	0,39
2029	0,54	0,46	0,39	2046	0,51	0,44	0,37
2030	0,57	0,49	0,41	2047	0,48	0,41	0,34
2031	0,58	0,5	0,42	2048	0,44	0,38	0,32
2032	0,6	0,52	0,43	2049	0,41	0,35	0,29
2033	0,61	0,53	0,44	2050	0,38	0,32	0,27
2034	0,63	0,54	0,45				

Overschrijdingskans met belasting

Voor de komberging Pinkegat geldt dat de overschrijdingskans met belasting verwaarloosbaar (<1%) is tot ongeveer 2035 en vanaf dat moment tot licht stijgt tot ongeveer 4% in 2050, iets hoger dan de overschrijdingskans zonder belasting (Figuur 12a). Deze resultaten laten zien dat voor komberging Pinkegat voornamelijk de relatieve zeespiegelstijging invloed heeft op eventuele overschrijding van het meegroeivermogen. De overschrijdingskans zonder en met belasting voor de komberging Vlie is tot ongeveer 2035 verwaarloosbaar en stijgt naar ruim 60% respectievelijk 70% overschrijdingskans (Figuur 12b). Gedurende deze periode leidt de gebruikte belasting tot een circa 5-15% hogere overschrijdingskans.

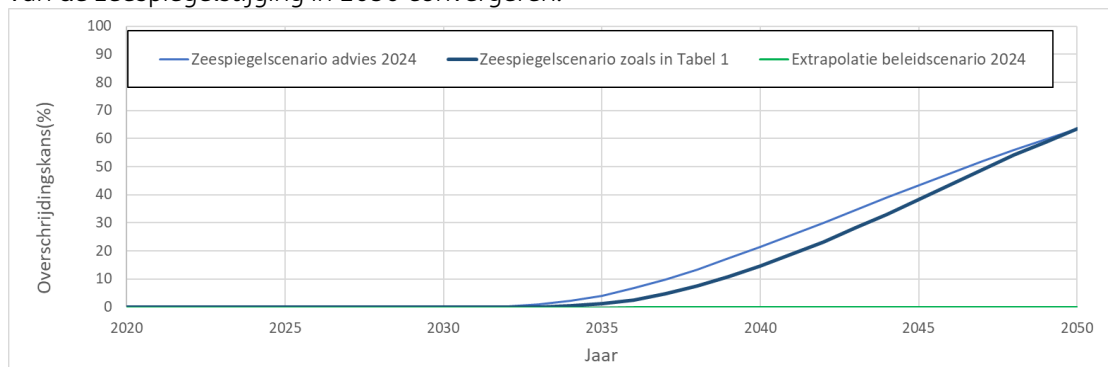


Figuur 12: Natuurlijke overschrijdingskans van de gebruiksruijmt (relatieve zeespiegelstijging > Meegroeivermogen) zonder belasting (blauw) en met belasting (groen) door delfstoffenwinning conform [Figuur 10](#) en [Figuur 11](#) in (a) de komberging Pinkegat en (b) de komberging Vlie.

4.2.5 Gevoeligheidsanalyse

We hebben een verkennende gevoeligheidsanalyse gedaan om de invloed van de verschillende parameters en keuze voor de gehele onzekerheidsverdeling per parameter in te schatten. Hieruit blijkt dat de resultaten minder gevoelig zijn voor (de onzekerheid van) de belasting en meer voor (de onzekerheid in) de andere twee parameters, met name de relatieve zeespiegelstijging. De invloed van het meegroeivermogen op overschrijdingskans wordt al geïllustreerd in [Figuur 12](#): Natuurlijke overschrijdingskans van de gebruiksruijmt (relatieve zeespiegelstijging > Meegroeivermogen) zonder belasting (blauw) en met belasting (groen) door delfstoffenwinning conform [Figuur 10](#) en [Figuur 11](#) in (a) de komberging Pinkegat en (b) de komberging Vlie. Hier is te zien dat bij een gelijk zeespiegel scenario er een veel hogere overschrijdingskans van het meegroeivermogen is in de komberging Vlie in vergelijking met Pinkegat, ondanks dat daar (in absolute termen) een veel lagere belasting plaatsvindt.

We illustreren dit verder voor respectievelijk de invloed van het de relatieve zeespiegelstijging en de belasting. In **Figuur 13** tonen we de overschrijdingskans voor komberging Vlie voor drie verschillende zeespiegelscenario's. Dit illustreert dat overschrijdingskans in de toekomst zeer gevoelig is voor het verwachte zeespiegelscenario. In een scenario waar de versnelling uit het beleidsscenario wordt geëxtrapoleerd is de overschrijdingskans verwaarloosbaar over de gehele periode tot aan 2050. In de twee andere scenario's (het huidige richtscenario en richtscenario uit **Tabel 1**) is er een significante overschrijdingskans oplopend tot ongeveer 60% in 2050. Er is overigens een beperkt verschil tussen deze twee scenario's aangezien ze beiden naar een gelijke snelheid van de zeespiegelstijging in 2050 convergeren.



Figuur 13: Natuurlijke overschrijdingskans van de gebruiksruijmt (relatieve zeespiegelstijging > Meegroeivermogen) zonder belasting voor komberging Vlie op basis van verdeling uit **Tabel 2** en verschillende zeespiegelscenario's. In groen een extrapolatie van het huidige beleidsscenario, in donkerblauw het zeespiegelscenario gebruikt in de voorbeelden gegeven in **Tabel 1** en in lichtblauw het huidige beleids- en richtscenario.

4.3 Huidige overschrijdingskans per komberging

In de huidige normstelling is er een verschillend meegroeivermogen per komberging vastgelegd. De analyse in dit hoofdstuk illustreert dat deze aanpak resulteert in een verschillende toegestane overschrijdingskans voor elke komberging. Een vergelijk van de verdelingen voor het meegroeivermogen uit **Tabel 2** met het deterministische meegroeivermogen per komberging in de huidige gebruiksruijmtetoets illustreert dat eveneens.

In de komberging Pinkegat ligt deze waarde zelfs buiten de verdeling, aangezien de in 2006 vastgestelde ondergrens van het meegroeivermogen van 6 mm/jaar lager is dan de inmiddels daadwerkelijke waargenomen sedimentatiesnelheid (Elias et al., 2012, zie Hoofdstuk 3). Ook voor het genoemde meegroeivermogen van 3 mm/jaar in Pb, 2006 voor Vlie valt de overschrijdingskans feitelijk buiten de verdeling (vergelijkbaar met de komberging Pinkegat). Hiermee kan worden geconcludeerd dat de toenmalige ingeschatte meegroeivermogens voor de kombergingen in het Pb, 2006 zeer conservatief zijn ingeschat. In 2010 is het meegroeivermogen voor de grote kombergingen (o.a. Vlie en Marsdiep) in de westelijke Waddenzee geactualiseerd op grond van sedimentatiemetingen in de kombergingen in de westelijke Waddenzee en modelsimulaties (Cleveringa & Grasmeijer, 2010), waarmee het Meegroeivermogen voor zowel Marsdiep als Vlie is bijgesteld van 3 naar 5 mm/jaar (MEZ, 2015). Dit vigerende meegroeivermogen van 5 mm/jaar komt overeen met een overschrijdingskans van ongeveer 20%. Dit laat zien dat een vertaling van de huidige normstelling van gebruiksruijmtetoetsen voor verschillende komberging resulteert in verschillende toegestane overschrijdingskans. Ook plaatst dit de door het Adviescollege (2021) geuite twijfels of het meegroeivermogen in Vlie voldoende conservatief is ingeschat in perspectief.

4.4 Conclusie haalbaarheid

De toepassing van het prototype P-gebruiksruimtetoets op de kombergingen Pinkegat en Vlie laat zien dat het uitrekenen van een (jaarlijkse) overschrijdingskans van de gebruiksruimte voor een komberging in de Nederlandse Waddenzee praktisch gezien haalbaar is, en tot een bruikbaar resultaat leidt.

Uit een verkennende gevoeligheidsanalyse van de invoerparameters en -verdelingen komt naar voren dat de resultaten minder gevoelig zijn voor de onzekerheid in de belasting. Afhankelijk van type/omvang van de komberging zijn de uitkomsten juist wel gevoelig voor de onzekerheid in het meegroeivermogen en de relatieve zeespiegelstijging. Voor deze twee variabelen is periodieke actualisatie een goede manier om te borgen dat nieuwe inzichten tijdig kunnen worden meegenomen (Adviescollege, 2021). Dat betekent ook dat meer onderzoek naar de (in Hoofdstuk 3 genoemde) onzekerheidsverdeling van het meegroeivermogen en de relatieve zeespiegelstijging van meerwaarde is. Concreet zou dit gericht moeten zijn op het verkleinen van de onzekerheden in met name de bovengrens van het meegroeivermogen. Daarnaast is aandacht voor het richtscenario van de relatieve zeespiegelstijging gewenst, met in het bijzonder de aansluiting op het beleidsscenario (kunstmatige knik).

5 Alternatieven voor de gebruiksruimtetoets

In het vorige hoofdstuk hebben we laten zien dat een probabilistische aanpak van de Hand aan de Kraan haalbaar is en technisch gezien tot een bruikbaar resultaat leidt. Hier gaan we in op een onderbouwd voorstel voor een verbeterde aanpak van de toetsingsmethodiek. Daarbij is ons uitgangspunt, dat de gestelde norm (“er mag op basis van de best beschikbare informatie wetenschappelijk gezien redelijkerwijs geen twijfel bestaan dat er geen aantasting optreedt van de natuurlijke kenmerken van de Waddenzee als gevolg van bodemdaling door economische activiteiten”, Pb, 2006) in stand blijft. De huidige toetsingsmethodiek (Hoofdstuk 2) toetst de norm via de meegroeivermogen- en de gebruiksruimtetoets ([Kader 1](#)), waarbij vooral die laatste toets van praktische betekenis is bij vergunningverlening. Daarom richten we ons in dit hoofdstuk op alternatieven voor de gebruiksruimtetoets. Deze zijn in principe eveneens van toepassing op de meegroeivermogenstoets.

5.1 Alternatief voorstel

In de huidige toets (Kader 1) worden de onzekerheden samengebond in vaste waarden, waardoor ze niet (voor het meegroeivermogen) of impliciet (voor zeespiegelstijging en belasting) worden meegenomen. Daardoor geeft toepassing van de toets op lange termijn onvoldoende mogelijkheden om met de onzekerheden - in het bijzonder de verwachte, doorgaande zeespiegelstijging door klimaatverandering - om te gaan (Adviescollege, 2021). Wij zien twee mogelijkheden om tot een wetenschappelijke onderbouwd, alternatief voorstel te komen, namelijk op basis van:

- › de jaarlijkse overschrijdingskans, waarbij de afgeleide norm wordt uitgedrukt als een te accepteren p-waarde (zoals gebruikelijk bij het toetsen van een wetenschappelijke hypothese);
- › een vervroegd moment van overschrijding, waarbij de afgeleide norm wordt uitgedrukt als een te accepteren tijdsduur.

Beide alternatieven nemen de (jaarlijkse) overschrijdingskans van de gebruiksruimte per komberging of een afgeleide daarvan als uitgangspunt ([Figuur 12](#)). Verder geven beide alternatieven ruimte voor de (eenmalige) toepassing van het voorzorgsbeginsel (bij vaststelling van de grenswaarde), nemen ze de onzekerheden expliciet mee en bieden ze de mogelijkheid voor periodieke actualisatie. Hieronder lichten we beide mogelijkheden toe.

5.1.1 Alternatief één: jaarlijkse overschrijdingskans

Om de jaarlijkse overschrijdingskans van de gebruiksruimte per komberging (Hoofdstuk 4) om te zetten naar een eenduidige toets dient bevoegd gezag een te accepteren overschrijdingskans (p-waarde) vast te stellen. Deze grenswaarde geeft dan invulling aan de in de wet gehanteerde uitdrukking “redelijkerwijs geen twijfel”. De vraag is welke p-waarde het best aansluit bij deze uitdrukking. Een p-waarde van 5% lijkt hiervoor een passend uitgangspunt. De uitdrukkingen “zeer onwaarschijnlijk” of “bijna onmogelijk” (Willems et al., 2020) hangen samen met een 5% waarschijnlijkheid. Dit sluit aan bij de in de wetenschap

veel gebruikte p-waarde van 5%, die gebruikt wordt bij het beoordelen of een afwijking als significant moet worden beschouwd of niet (Fisher, 1958), die als hulpmiddel kan worden ingezet om het besluitvormingsproces te vereenvoudigen.

5.1.2 Alternatief twee: vervroegde overschrijding

Uitgaande van een versnelde zeespiegelstijging (Hoofdstuk 4) komt er ongeacht de belasting door delfstoffenwinning een moment, waarop de gebruiksruimte overschreden wordt. Het eventuele effect van die belasting kan dus uitgedrukt worden als een vroegere overschrijding van de gebruiksruimte. Om een vervroegd moment van overschrijding om te zetten naar een eenduidige toets dient bevoegd gezag invulling te geven aan de in de wet gehanteerde uitdrukking “redelijkerwijs geen twijfel” door een vaste grenswaarde te hanteren. Deze grenswaarde is opgebouwd uit twee elementen.

Het eerste element is een tijdsduur. In de huidige gebruiksruimtetoets ([Kader 1](#)) is er, met het oog op het voorzorgsbeginsel, voor gekozen om de overschrijding van de gebruiksruimte niet over de gehele 19-jarige nodale cyclus, maar over een kortere periode te beoordelen. Binnen deze periode (een derde van de nodale cyclus) mag een mijnbouwbedrijf niet meer dan het evenredige deel van de beschikbare gebruiksruimte benutten, zodat ook als van nature (dus buiten menselijke invloed) een periode van verscheidene jaren van geringe sedimentatie en hoge zeespiegelstanden optreedt, de oppervlakte van habitattypen, slaap- en foerageerplaatsen in stand blijft (Pb, 2006, p108 en p109). Daarbij is toen expliciet rekening gehouden met een vervroegde overschrijding van de gebruiksruimte van enkele jaren (Pb, 2006, p30). Het is daarmee in lijn om een vergelijkbare periode (zoals een derde van de nodale cyclus) te kiezen als tijdsduur.

Het tweede element betreft de confrontatie van deze tijdsduur met de overschrijdingskansverdeling ([Figuur 11](#)). In lijn met de huidige gebruiksruimtetoets stellen we voor om de verwachtingswaarde van deze verdeling te gebruiken; zolang de verwachtingswaarde voor vervroeging korter is dan de gekozen tijdsduur wordt voldaan aan de norm “redelijkerwijs geen twijfel”.

5.2 Vergelijking met de huidige gebruiksruimtetoets

Door de resultaten van de alternatieve gebruiksruimtetoetsen voor de kombergingen Pinkegat en Vlie te vergelijken met de huidige toets ([Kader 1](#)) voor dezelfde periode en met dezelfde invoerparameters (voor zover de verschillende alternatieven daar gebruik van maken) verkrijgen we een goed beeld van de impact van een eventuele herziening ([Tabel 5](#)).

Tabel 5: Vergelijking van de toetsingsresultaten tussen de huidige gebruiksruimtetoets (volgens Kader 1, zie Pb, 2006) en de beide alternatieven voor de periode 2020-2050. De toetsen zijn uitgevoerd voor de kombergingen Pinkegat en Vlie met de aannames en parameters uit Hoofdstuk 3 en 4. Voor een compleet beeld tonen we ook het resultaat van de huidige gebruiksruimtetoets (volgens Kader 1), waarbij de ondergrens van het meegroeivermogen is herzien op grond van de huidige, wetenschappelijke inzichten (zie Hoofdstuk 3).

Periode 2020-2050	Pinkegat	Vlie
Gebruiksruimtetoets 2006 met vigerende ondergrens meegroeivermogen	Overschrijding van de gebruiks-ruimte vanaf het jaar 2044	Overschrijding van de gebruiksruimte vanaf het jaar 2037
Alternatief 1	Jaarlijkse overschrijdingskans blijft onder de 5%	Jaarlijkse overschrijdingskans groter dan 5% vanaf het jaar 2034 (zonder belasting vanaf het jaar 2037)
Alternatief 2	Verwachtingswaarde van de vervroegde overschrijdingskansverdeling blijft onder een derde van nodale cyclus	Verwachtingswaarde van de vervroegde overschrijdingskansverdeling blijft onder een derde van nodale cyclus
Gebruiksruimtetoets 2006 met herziene ondergrens meegroeivermogen	Geen overschrijding van de gebruiksruimte	Overschrijding van de gebruiksruimte vanaf het jaar 2037

5.3 Inspelen op doorgaande zeespiegelstijging

Zowel de huidige toets als beide alternatieven houden expliciet rekening met de ontwikkeling van de relatieve zeespiegelstijging in relatie tot klimaatverandering (Hoofdstuk 4), wat sinds de jaren zestig van de vorige eeuw resulteert in een eenparige versnelling langs de Nederlandse kust (Keijzer et al., 2023). Wel gaan ze alle drie anders om met het effect hiervan op de gebruiksruimte. Bij de huidige toets wordt “redelijkerwijs geen twijfel” vertaald naar de jaarlijks beschikbare hoeveelheid gebruiksruimte. Hiermee is inmiddels bijna twintig jaar ervaring opgebouwd (Adviescollege, 2021).

In alternatief één wordt “redelijkerwijs geen twijfel” vertaald naar de jaarlijkse overschrijdingskans. Dit heeft als voordeel ten opzichte van de huidige methodiek, dat er een eenduidige grenswaarde kan worden gehanteerd voor alle kombergingen in de Nederlandse Waddenzee. Dit is nu niet het geval (zie ook Hoofdstuk 4). In alternatief twee kantelt het perspectief naar in hoeverre de belasting überhaupt een rol speelt bij de (op termijn onvermijdelijke) aantasting van de natuurwaarden door de verwachte, doorgaande zeespiegelstijging. De formulering “redelijkerwijs geen twijfel” wordt hier vertaald in termen van een vervroegd moment van overschrijding van de gebruiksruimte. Dit sluit aan bij de veranderende verhouding tussen de belasting en relatieve zeespiegelstijging door de

verwachte, doorgaande zeespiegelstijging in het algemeen en bij transport-gelimiteerde kombergingen in het bijzonder ([Tabel 5](#)). Ook met dit alternatief kan er een eenduidige grenswaarde worden gehanteerd voor alle kombergingen in de Nederlandse Waddenzee. Daarnaast geeft alternatief twee ook concrete handvatten om invulling te geven aan de aanbeveling van SodM (2021) om specifiek voor na-ijlende bodemdaling door delfstofwinning een toetsingskader te creëren.

6 Reflectie

In dit laatste hoofdstuk reflecteren we, in het kader van het beschermen van de natuurwaarden van de Waddenzee, op de toegevoegde waarde van een zuiver probabilistische aanpak, afgezet tegen de huidige gebruiksruintetoets. Middels een overzicht van de voor- en nadelen van een zuiver probabilistische aanpak ten opzichte van de huidige gebruiksruintetoets maken we inzichtelijk wat ons voorkeursalternatief is. Op grond van deze reflectie komen we vervolgens tot enkele aanbevelingen.

6.1.1 Voor- en nadelen van een zuiver probabilistische gebruiksruintetoets

De overgang naar een zuiver probabilistische aanpak, door herziening van de gebruiksruintetoets, biedt meerdere voordelen, ongeacht de keuze voor alternatieve gebruiksruintetoets (paragraaf 5.31). Deze voordelen tonen we in [Tabel 6](#). In de huidige gebruiksruintetoets verschilt de toegestane overschrijdingskans per komberging (Hoofdstuk 4), terwijl bij een zuiver probabilistische aanpak een eenduidige grenswaarde kan worden gebruikt voor alle kombergingen langs de Nederlandse waddenkust. Conform de aanbeveling van het Adviescollege (2021) kunnen de onzekerheden expliciet meegenomen worden, waardoor naar verwachting de transparantie over die onzekerheden en de ontwikkeling daarin zal verbeteren. Verder is het goed om te realiseren dat herziening van de aanpak brengt voor bevoegd gezag een aantal (vooral) praktische en communicatieve uitdagingen met zich mee. Deze zijn eveneens in [Tabel 6](#) opgenomen.

Tabel 6: Overzicht van voor- en nadelen van een zuiver probabilistische aanpak van de gebruiksruintetoets vergeleken met de huidige werkwijze.

Voordelen	Nadelen
Gestelde norm uit de Pb 2006 (redelijkerwijs geen twijfel etc.) blijft intact	Onbekend in hoeverre het actualiseren van bestaande vergunningen bij implementatie nodig zal zijn
Eenduidige grenswaarde voor alle kombergingen	De grenswaarde en type dient opnieuw te worden vastgesteld
Onzekerheden en voortschrijdend inzicht daarin kunnen expliciet worden meegenomen (inclusief worst case scenario's), ook bij actualisaties	Periodieke actualisatie van meer variabelen (naast belasting en relatieve zeespiegelstijging, ook meegroeivermogen) kan leiden tot extra tussentijdse herzieningen
Biedt een toetsingskader voor daling door na-ijling of belasting bij doorgaande zeespiegelstijging door klimaatverandering	Bij alternatief twee krijgt het richtscenario een andere status (als onderdeel van de norm); de bijbehorende aandachtspunten gaan daardoor zwaarder wegen
Verbeterde transparantie over de ontwikkeling in de mate van onzekerheid van de drie afzonderlijke variabelen (meegroeivermogen, relatieve zeespiegelstijging & belasting)	Alle drie de toetsingsmethodieken zijn complex en notoir lastig uit te leggen aan belanghebbenden, dit geldt zeker bij een overgang van de ene naar de andere toets

6.1.2 Voorkeursalternatief en terugvalopties

Van de twee besproken alternatieve gebruiksräume toetsen in paragraaf 5.31 is alternatief twee (vervroegde overschrijdingskans) het TNO voorkeursalternatief, omdat het inspeelt op het effect van de verwachte, doorgaande zeespiegelstijging op de natuurwaarden in de Waddenzee (zie paragraaf 5.3).

Mochten, voor bevoegd gezag, de praktische en communicatieve uitdagingen onoverkomelijk blijken bij de implementatie van een zuiver probabilistische aanpak, dan zien wij twee mogelijkheden om de huidige gebruiksräume toets zo aan te passen, dat een deel van de voordelen alsnog gerealiseerd kan worden. De eerste optie is het op deterministische wijze toepassen van alternatief twee: de vervroegde overschrijdingstermijn van de gebruiksräume door de belasting (in lijn met de Pb 2006, p30). De tweede en eenvoudigste terugvaloptie is het meenemen van (de ondergrens van) het meegroeivermogen in de periodieke actualisatie van de relatieve zeespiegelstijging.

Per alternatief en terugvaloptie verschillen de (detail)stappen, die nodig zijn voor de beleidsuitvoering. Het inzichtelijk maken hiervan valt buiten de reikwijdte van deze verkenning, deze keuze ligt bij het bevoegd gezag.

6.1.3 Aanbevelingen

TNO-AGE beveelt KGG aan om in te zetten op een zuiver probabilistische gebruiksräume toets voor alle kombergingen in de Waddenzee.

Als gedurende het proces van beleidsaanpassing zou blijken, dat er sprake is van grote praktische en communicatieve uitdagingen, dan kan bevoegd gezag kiezen voor een terugvaloptie, zodat een deel van de voordelen alsnog gerealiseerd kan worden.

Daarnaast geven we de volgende aanbevelingen in overweging:

- › Blijf jaarlijks bekijken of nieuwe wetenschappelijke inzichten aanleiding geven tot vervroegde actualisatie. Zo ja, actualiseer de drie variabelen dan gelijktijdig en in samenhang; let bij actualisatie zowel op een technische correcte uitvoering van de risicoanalyse (onderweg geen extra voorzorgen inbouwen) als op de randvoorwaarden in het besluitvormingsproces (Emmerling en Rooders, 2020).
- › Overweeg een overgangperiode in te voeren om nieuw opgedane inzichten zorgvuldig te kunnen vertalen naar de hand aan de kraan-methodiek (en daarmee iteratieproblemen bij opeenvolgende actualisaties te minimaliseren) en (conform SodM, 2021) de mijnbouwbedrijven een wat langere periode van zekerheid te verschaffen.
- › Zet onderzoek in gang naar de belangrijkste onzekerheden, namelijk (1) onzekerheden in de verdeling en met name in het bovenste bereik van het meegroeivermogen, inclusief de aanwijzingen dat het meegroeivermogen mogelijk kan veranderen als gevolg van zeespiegelstijging, en (2) het richtscenario. Houdt daarbij voor zover relevant rekening met de invloed van menselijke ingrepen in de Waddenzee (bijvoorbeeld suppletie, bedijking, de aanleg van havens etc.).

Referenties

Adviescollege Hand aan de Kraan, 2021, De toekomst van Hand aan de Kraan, omgaan met onzekerheden.

Adviescommissie, 2024: Advies beleids- en richtscenario relatieve zeespiegelstijging Waddenzee 2024-2050.

Auditcommissie Gaswinning 2023, projectnummer 3731, Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2022.

Auditcommissie Zoutwinning 2023, projectnummer 3746, Zoutwinning Waddenzee, Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2022.

Breunese, J.N., van Eijs, R.M.H.E., de Meer, S. & Kroon, I.C., 2003. Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution mining. The Barradeel Case. Solution Mining Research Institute (SMRI) Meeting, 5–8 October 2003, Chester, UK.

Church, J. A., and N. J. White (2006), A 20th century acceleration in global sea-level rise, Geophys. Res. Lett., 33, L01602.

Cleveringa, J. & Grasmeyer, B., 2010. Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijbekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee. Arcadis rapport A2062R3r5.

de Waal, J.A., Roest, J.P.A., Fokker, P.A., Kroon, I.C., Breunese, J.N. Muntendam-Bos, A.G., Oost, A.P. & van Wirdum, G., 2012. The effective subsidence capacity concept: How to assure that subsidence in the Wadden Sea remains within defined limits? Netherlands Journal of Geosciences 91(3), 385 - 399.

Deltares, 2023, Zeespiegelmonitor 2022, 11209266-000-ZKS-0001.

Derde nota Waddenzee, 2007. <https://www.waddenzee.nl/overheid/waddenzeebeleid/derde-nota-waddenzee/>

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. & de Ronde, J.G., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geoscience 91(3), 293–310.

Emmerling, T. en Rooders, D. 7 Strategies for Better Group Decision-Making, Harvard Business Review <https://hbr.org/2020/09/7-strategies-for-better-group-decision-making>).

EZK, 20-5-2022, Voorstel technische haalbaarheidsstudie verbetering Hand aan de Kraan-methodiek

Fokker P.A., van Leijen, F.J., Orlic B, van der Marel H., Hanssen R.F., 2018, Subsidence in the Dutch Wadden Sea. Netherlands Journal of Geosciences; 97(3):129-181.

Fisher, R.A., 1958, Statistical Methods for Research Workers. Hafner, New York.

- Frisia, 2012. Technische Bijlage bij Meet- en regelprotocol zoutwinning 'Havenmond' v.3.2.
- Frisia, 2022. Beheerscyclus meet- en regelprotocol Havenmond over het jaar 2021 v.1.0.
- Frisia, 2023. Beheerscyclus meet- en regelprotocol Havenmond over het jaar 2022 v.1.0.
- Frisia, 2023b. Meetplan Havenmond, 2024.
- Geertsma, J., 1973. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs. *Journal of Petroleum technology*, 25(06), 734-744.
- Geertsma, J. and van Opstal, G., 1973. A Numerical Technique for Predicting Subsidence Above Compacting Reservoirs, Based on the Nucleus of Strain Concept. *Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen.*, 28, pp. 63-78.
- Hagoort, J., 1988. *Fundamentals of gas reservoir engineering*. Elsevier.
- Hol, S., van der Linden, A., Bierman, S. et al., 2018. Rock Physical Controls on Production-induced Compaction in the Groningen Field. *Sci Rep* 8, 7156.
- Hettema, M., E. Papamichos, and P. M. T. M. Schutjens, 2002. Subsidence delay: field observations and analysis. *Oil & Gas Science and Technology* 57.5: 443-458.
- Kamerbrief, 2021. Kamerstuk 29684, nr. 218, Gas- en zoutwinning Waddenzee: evaluatie hand aan de kraan-principe en actualisatie relatieve zeespiegelstijgingsscenario's.
- Keizer, I., Le Bars, D., de Valk, C., Jüling, A., van de Wal, R., and Drijfhout, S., 2023. The acceleration of sea-level rise along the coast of the Netherlands started in the 1960s, *Ocean Sci.*, 19, 991-1007.
- KNMI, 2023. KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.
- Lodder, Q., Wang, Z., Elias, E., van der Spek, A., de Looff, H. & Townend, I., 2019. Future response of the Wadden Sea tidal basins to relative sea-level rise - An aggregated modelling approach. *Water* 2019, 11, 2198.
- Lutgert, J., Mijnlief H., Breunese, J. 2005, Predicting gas production from future gas discoveries in the Netherlands: quantity, location, timing, quality. In: Dore, A. G. & Vining, B. A. (eds) *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives—Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, 77-84. q Petroleum Geology Conferences Ltd. Published by the Geological Society, London.
- Marketos, G., C. J. Spiers, and R. Govers., 2016. Impact of rock salt creep law choice on subsidence calculations for hydrocarbon reservoirs overlain by evaporite caprocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121.6: 4249-4267.
- Ministerie van Economische Zaken, 2015. Instemmingsbesluit winningsplan zoutwinning Havenmond, kenmerk DGETM/EM/13005869
- NAM, 2017. EP201703202079 , Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study.
- NAM, 2019. Winingsplan Ternaard.

NAM, 2023a. EP202303212588, Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2022.

NAM, 2023b. EP202310202203, Meetplan Waddenzee 2024.

NAM, 2024. EP202402225793, Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2023.

Oost, A.P., Ens, B.J., Brinkman, A.G., Dijkema, K.S., Eysink, W.D., Beukema, J.J., Gussinklo, H.J., Verboom, B.M.J. & Verburgh, J.J., 1998. Integrale bodemdalingstudie Waddenzee. Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen. 372 pp.

Passende Beoordeling 2006: Gaswinning binnen randvoorwaarden. Passende beoordeling van het Rijksprojectbesluit over de aardgaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, 20 januari 2006.

Pijnenburg, R. P. J., B. A. Verberne, S. J. T. Hangx, and C. J. Spiers, 2019. Inelastic Deformation of the Slochteren Sandstone: Stress-Strain Relations and Implications for Induced Seismicity in the Groningen Gas Field, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5), 5254-5282.

Rijksprojectbesluit Gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, deel 1 en 2, 2006.

SodM, 2021. De effectiviteit van “Hand aan de kraan” bij het beoordelen van mogelijke gevolgen van mijnbouw rond de Waddenzee.

Steffelbauer, D. B., Riva, R.E.M., Timmermans J.S., Kwakkel, J.H., Bakker, M., 2022. Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea, *Environ. Res. Lett.* 17 074002.

Stive, M.J.F. & Wang, Z.B., 2003. Morphodynamic modelling of tidal basins and coastal inlets. In: C. Lakkhan (red.), *Advances in Coastal Modelling*, Elsevier Sciences, p. 367-392.

TNO, 2017. Ensemble-based Subsidence Interpretation and Prediction ESIP: Technical Reference Manual. TNO report-R11278.

TNO, 2015. Meegroeivermogenstoets Waddenzee, TNO rapport R10885.

TNO, 2016. Gaswinning en zoutwinning in de komberging Vlie TNO rapport R11298.

van Dobben, H.F., de Groot, A.V. & Bakker, J.P., 2022. Salt Marsh Accretion With and Without Deep Soil Subsidence as a Proxy for Sea-Level Rise. *Estuaries and Coasts* 45, 1562–1582.

Van Opstal, 1974. The effect of base-rock rigidity due to reservoir compaction, *Adv. in Rock Mech.*, 3, 1103-1111.

van Goor, M.A., Zitman, T.J., Wang, Z.B. & Stive, M.J.F., 2003. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202(3-4), 211-227.

Van Thienen-Visser, K., Breunese, J.N. & Muntendam-Bos, A.G., 2015. Subsidence due to gas production in the Wadden Sea: how to ensure no harm will be done to nature. 49th US Rock

Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. Paper No. ARMA 2015-098.

Waddenhuisberaad, 2016. Opzet en resultaten van het Waddenhuisberaad.

Wang, Z.B., Cleveringa, J. & Oost, A., 2017. Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruiksruimte. Deltares rapport 1230937-000-ZKS-0005.

Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A., Lodder, Q.J. , 2018. Sedimentbudget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100, Netherlands Journal of Geosciences 97-3.

Wang, Z.B. & van der Spek, A., 2021. Meegroeivermogen en kritische zeespiegelstijgingsnelheid voor verdrinking in de Nederlandse Waddenzee, Deltares rapport 11206346-002-BGS-0002.

Vermilion Energy Netherlands B.V., 2024. Bodemdaling Statusrapport 2024 - Drenthe Overijssel Friesland

Willems, S., Albers, C. and Smeets, I., 2020. Variability in the interpretation of probability phrases used in Dutch news articles — a risk for miscommunication JCOM 19(02), A03.

Begrippen

Bodemdaling

Daling van de bodem als gevolg van samendrukking van de gasvoerende laag door de gaswinning (drukdaling). Bodemdaling treedt ook op door autonome effecten in de diepe ondergrond en door bijvoorbeeld onttrekking van grondwater.

Compactie

Samendrukking: hier gebruikt voor het samendrukken van het gasvoerende reservoirgesteente ten gevolge van de drukkaling door gasonttrekking.

Gebruiksruimte

Het verschil tussen het meegroeivermogen van een kombergingsgebied en de relatieve zeespiegelstijging. Dit verschil is de ruimte die te gebruiken is (na middeling over 6 jaar; voortschrijdend gemiddeld, symmetrisch) voor menselijke activiteiten, die zandhonger genereren. Zoals bijvoorbeeld bodemdaling veroorzaakt door gaswinning.

Geomorfologisch evenwicht (m.b.t. de Waddenzee):

De duurzame aanwezigheid van sedimentatie- en erosieprocessen, waarbij de verschillende geomorfologische elementen, zoals geulen en platen met een verschillende diepteligging, binnen dezelfde variatiebreedte als de afgelopen 100 jaar in stand blijven.

Kombergingsgebied

Het stroomgebied behorende bij één zeegat, begrensd door de dijk of kwelder of supragetijde zandplaat aan de vastelandzijde en eilandzijde en door de wantijen van de aangrenzende kombergingsgebieden. Als gevolg van de getijdenwisselingen van de Noordzee stromen de kombergingsgebieden tijdens vloed vol tot hoogwater, waarna dit getijdewater er weer uitloopt tijdens eb tot laagwater.

Meegroeivermogen (van een kombergingsgebied)

Het natuurlijke vermogen van een kombergingsgebied, uitgedrukt in mm/jaar over het hele gebied, om de relatieve zeespiegelstijging op lange termijn bij te houden terwijl het geomorfologisch evenwicht en de sediment balans in stand blijven.

Relatieve zeespiegelstijging

De som van de stijgsnelheid van de zeespiegel en de daalsnelheid van de ondergrond, waarbij geen rekening is gehouden met erosie en sedimentatie.

Rpb

Afkorting Rijksprojectbesluit.

Ondertekening

TNO › Energy & Materials Transition › Utrecht, 28 november 2024



N. H. Zornig
Research Manager



J.A. Roholl
Auteur

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl