

TNO PUBLIEK

**TNO-rapport****TNO 2022 R12744****DIS 3.1 Zuid-Holland lagen- en  
voxelmodellering**Geologische Dienst Nederland  
Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56

Datum	19 april 2023
Auteur(s)	Stam J.C. en Heerema C.
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	36
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Deltares
Projectnaam	DIS 2022 Zuid Holland
Projectnummer	060.51659

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

## Samenvatting

Het Delfstoffen Informatie Systeem (DIS) is een beleidsondersteunend model ontwikkeld door TNO en Deltares op initiatief van Rijkswaterstaat. Dit DIS geeft inzicht in het dieptebereik waarbinnen zand ligt, laat zien of er veen- dan wel kleilagen in de bodem zitten en toont hoeveel slib en schelpen in het zand zijn bijgemengd. DIS 3.1 offshore Zuid-Holland is na DIS 3.0 offshore Zeeland het tweede gebied dat tot stand is gekomen volgens de DIS 3 methodiek, waarbij een lagenmodel ten grondslag ligt aan het voxelmodel en de daaruit afgeleide winbaarheidsgrids. De resolutie van het voxelmodel is 200 x 200 x 0,5 m. Het voxelmodel is daarom vooral te gebruiken om inzicht te krijgen in regionale trends. Bij de ontwikkeling van DIS offshore Zuid-Holland zijn ten opzichten van DIS offshore Zeeland enkele belangrijke verbeteringen doorgevoerd. Tijdens de kartering zijn de opgedane inzichten direct verwerkt in de boorinterpretatie; hierdoor komen beide databronnen meer overeen en wordt de modelonzekerheid verkleind. De interpolatiemethodiek van de lagenmodellering is verder verfijnd om met name dunne stoorlagen optimaal in kaart te brengen. De storende imprint van de huidige bathymetrie in de dieper liggende laaggrenzen is weggefilterd, en vroeg-holocene afzettingen dunner dan 0,5 m zijn kunstmatig verdikt waardoor deze belangrijke stoorlaag niet uit het model verdwijnt waar de minimumdikte van één voxel niet wordt bereikt. De lithoklasse 'zand matig grof tot zeer grof' is opgesplitst in twee klassen: 'zand matig grof' en 'zand zeer grof'. De opbouw van het geologisch lagenmodel lijkt sterk op die van DIS offshore Zeeland en bestaat uit de hoofdeenheden Southern Bight, Formatie van Naaldwijk, Formatie van Nieuwkoop - Basisveen Laag en de gezamenlijke pleistocene afzettingen. Er zijn twee nieuwe modelleenheden geïntroduceerd; 1) Antropogene Ophogingen, 2) Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Zandvoort. De grootste impact van deze lagen is dat ze voorkomen dat het fijne materiaal behorend bij deze afzettingen in de omliggende eenheden gemodelleerd wordt en zo de winbaarheidseigenschappen daarvan ten onrechte verslechtert. Hiermee komt het totaal aantal lagen in het lagenmodel op zes. Voor de uit het voxelmodel afgeleide winbaarheidsgrids is één scenario (voormalige scenario B2: minimumdikte stoorlaag 0,5 m; lithologie klei, leem of veen) gekozen en is de winbaarheid voor meerdere dieptebereiken bepaald. DIS offshore Zuid-Holland is niet alleen modeltechnisch maar ook geologisch-inhoudelijk een verbetering ten opzichte van de voorgaande DIS-modellen. De geleerde lessen worden weer meegenomen in de modellering van het volgende gebied.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Methode .....</b>	<b>5</b>
2.1	Brongegevens.....	5
2.2	Lagenmodellering .....	10
2.3	Voxelmodellering .....	14
2.4	Winbaarheid.....	16
<b>3</b>	<b>Resultaten .....</b>	<b>17</b>
3.1	Lagenmodel .....	17
3.2	Voxelmodel .....	20
3.3	Winbaarheid.....	26
<b>4</b>	<b>Discussie .....</b>	<b>29</b>
4.1	Algemeen.....	29
4.2	Lagenmodel .....	29
4.3	Voxelmodel .....	30
4.4	Datadichtheid en kwaliteit.....	31
4.5	Implicaties voor de winbaarheidsgrids .....	32
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>36</b>

# 1 Inleiding

Het Delfstoffen Informatie Systeem (DIS), een beslissingsondersteunend instrument dat op initiatief van Rijkswaterstaat is ontwikkeld door Deltares en TNO, wordt in stappen verbeterd en uitgebreid. Dit DIS heeft als doel inzicht te bieden in het voorkomen van winbaar zand en belangrijke stoorlagen, alsmede in de kwaliteit van het winbare zand. Dit rapport beschrijft hoe het model voor de regio offshore Zuid-Holland tot stand is gekomen, en toont de belangrijkste kenmerken van de gemodelleerde ondergrond. Het is na de regio offshore Zeeland het tweede gebied dat volgens de DIS 3 methodiek, waarbij er een geologisch lagenmodel ten grondslag ligt aan het voxelmodel, is gemodelleerd. Deze methodiek moet zorgen voor een aanzienlijke kwaliteitsverbetering en een geologisch plausibeler model ten opzichte van DIS 2, wat kan worden doorvertaald naar een hogere betrouwbaarheid van de (zand) winbaarheidsgrids.

DIS 3.1 offshore Zuid-Holland bestaat uit een lagen- en een voxelmodel. Kustdwars strekt het model zich uit vanaf ~2 km uit de kust tot aan de zeewaartse begrenzing van de 12-mijlszone, verticaal vanaf het zeebodemoppervlak tot een diepte van 12 m daaronder. Het voxelmodel heeft een resolutie van 200 x 200 x 0,5 m (xyz) en bevat de volgende parameters: modeleenheid, lithoklasse (sedimenttype), slibklasse, schelpenklasse. Uit het voxelmodel zijn vervolgens diktegrids afgeleid aan de hand van verschillende winbaarheidsscenario's. De gebruikte methodiek bouwt voort op het protocol voor DIS 3.0 offshore Zeeland (Stam, 2020; Stam & Van Heteren, 2020), waarbij enkele verbeteringen zijn doorgevoerd. Dit rapport beschrijft de methodiek en presenteert de resultaten van DIS 3.1 voor offshore Zuid-Holland.

## 2 Methode

### 2.1 Brongegevens

#### 2.1.1 Bathymetrie

Voor de bathymetrie is een door Deltares in 2022 samengesteld grid gemaakt met een resolutie van 25 x 25 m. Het grid dat voor DIS offshore Zeeland (Stam, 2020) is gebruikt (bathy\_2019) is niet volledig gebiedsdekkend in het DIS offshore Zuid-Holland gebied. Alle hiaten zijn door Deltares gevuld met bestaande overlappende bathymetrische surveydata van de Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine en van Rijkswaterstaat.

#### 2.1.2 Zandwingebieden en stortlocaties

Voor de kust van Zuid-Holland liggen meerdere (voormalige) zandwingebieden. Sommige hiervan vormen nog altijd zeer diepe depressies, zoals de wingebieden voor Maasvlakte 2. Andere waren oorspronkelijk diep maar zijn (deels) volgestort (Verdiepte Loswal) of waren nooit dieper dan ongeveer 2 m, de huidige standaarddiepte voor zandwinning. Eveneens zijn er stortlocaties direct op de intacte natuurlijke zeebodem aanwezig. De vaargeul naar de haven van Rotterdam (Eurogeul) loopt dwars door de voor zandwinning gereserveerde kustlangse strook en is duidelijk zichtbaar in de bathymetrie als een lineaire diepte (Figuur 1 en Figuur 2). Deze geul wordt op diepte gehouden door regelmatige baggerwerkzaamheden. Zowel voor de zandwingebieden als voor de stortlocaties ligt de basis van het DIS-model 12 m onder de huidige (meest recent gemeten) zeebodem, conform de rest van het modelgebied.

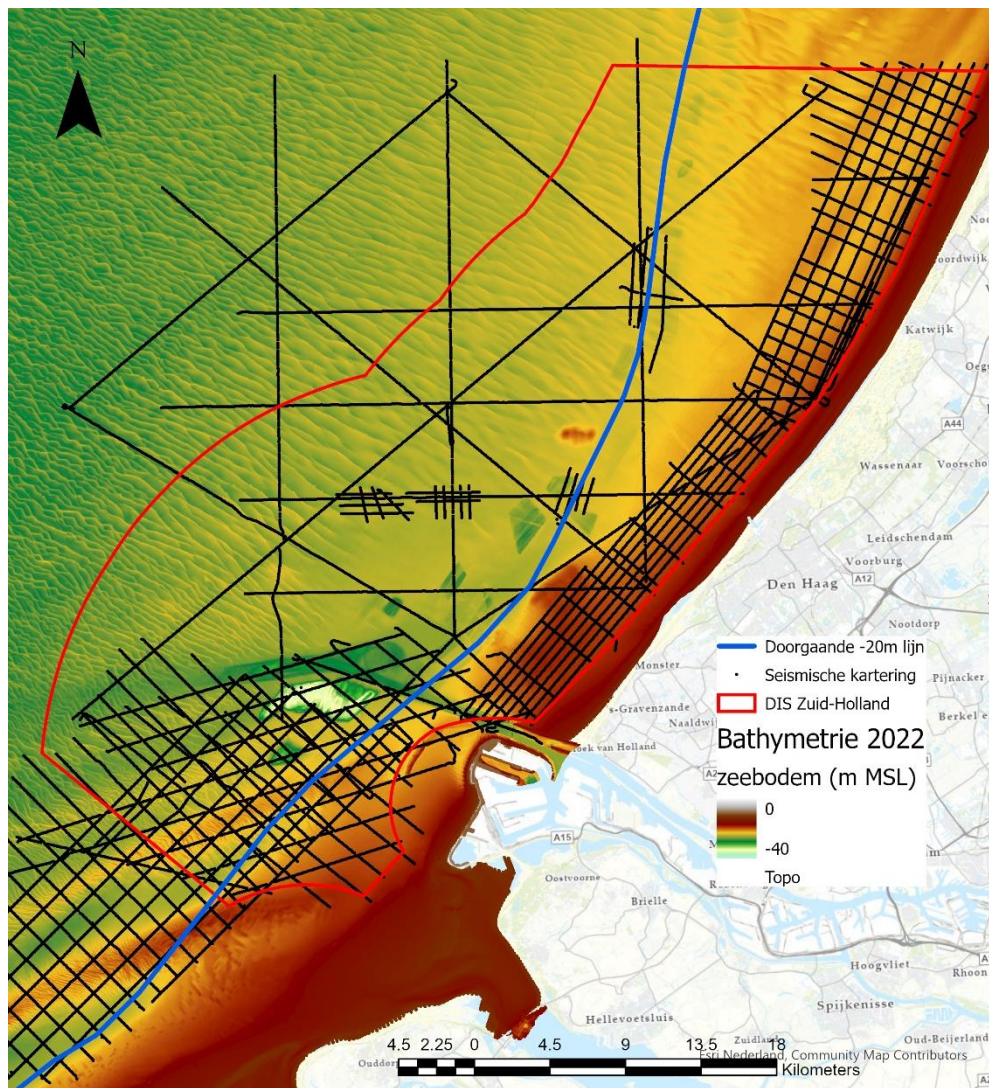
#### 2.1.3 Seismiek

In 2021 is door Deltares een groot aantal seismische lijnen geïnterpreteerd, afkomstig uit het gemeenschappelijk seismisch archief van Deltares en TNO. Dit grote archief is publiekelijk toegankelijk en op aanvraag per lijn of survey leverbaar. De ligging van de gebruikte seismische lijnen is weergegeven in Figuur 1. De spreiding van de seismische data is behoorlijk onevenwichtig, met een relatief hoge datadichtheid langs de kust (lijnafstand <1km) en zeer weinig data verder uit de kust (lijnafstand >5km). Ook de resolutie, het dieptebereik en de kwaliteit van de seismiek variëren sterk. Deze rapportage zal niet verder ingaan op de seismische kartering, enkel op het gebruik van de resultaten. De volgende seismisch gekarteerde eenheden en grenzen zijn gebruikt voor de lagenmodellering, te koppelen aan de Boven-Noordzee Groep (code NU, in de rest van dit rapport weggelaten) waaronder alle miocene tot hedendaagse afzettingen vallen:

- Southern Bight Formatie (SB) en Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Zandvoort (NAZA), beide als actieve zeebodemlaag gevormd en seismisch niet van elkaar te onderscheiden;
- basis van zandige afzettingen binnen de Formatie van Naaldwijk (NA), gemodelleerd als NA1 en te herkennen als de basis van een relatief transparante seismische eenheid;
- basis van de Formatie van Naaldwijk (NA), goed herkenbare scheiding met top Pleistoceen;

- Formatie van Nieuwkoop - Basisveen Laag (NIBA) en Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Wormer - Laag van Velsen (NAWOVE), de belangrijkste stoorlagen die aan de hand van seismiek kunnen worden gekarteerd.

Deze lagen zijn gekarteerd op basis van geologische differentiatie en herkenbaarheid in de seismische en boorgegevens. Een uitgebreide beschrijving en definitie van de lagen is te raadplegen op [www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator](http://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator) en in Rijdsijk et al. (2005).



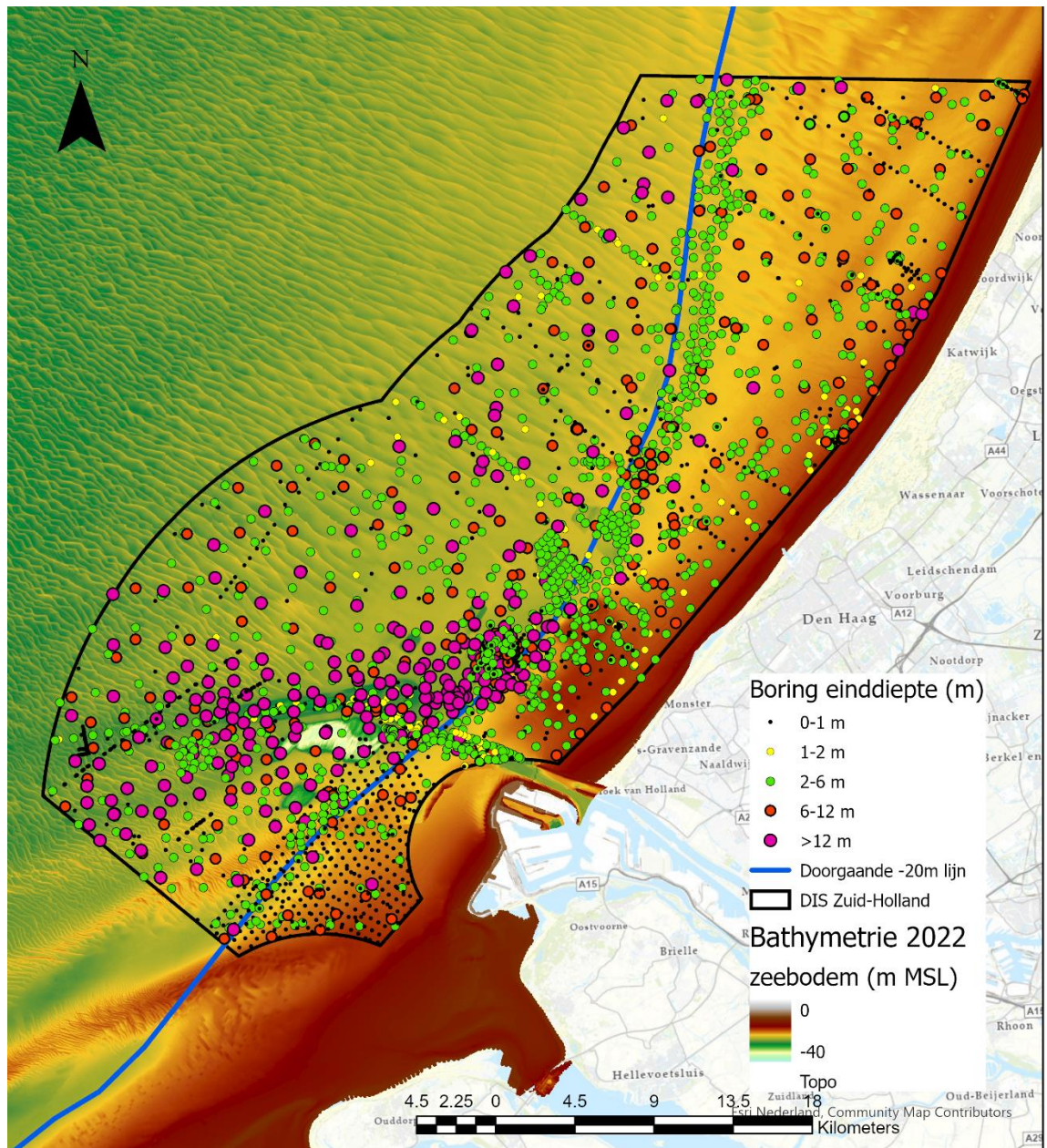
Figuur 1 Beschikbare seismische lijnen (zwart) voor DIS offshore Zuid-Holland.

#### 2.1.4 Boringen

Binnen het modelgebied offshore Zuid-Holland zijn 2992 boorpuntlocaties geregistreerd in de DINO database, waarvan er 1964 voorzien zijn van een lithologische beschrijving. De 1028 punten waarvoor geen beschrijving beschikbaar is, zijn vooral hapmonsters en die geven derhalve alleen informatie over het zeebodemoppervlak. Ze hebben weinig toegevoegde waarde voor het DIS. Boorlocaties waarbij de afwijking van de referentiehoogte in de DINO database (Mean Sea Level; gemiddeld zeeniveau, ca. NAP) ten opzichte van het door Deltares gegenereerde bathymetrische grid meer dan 5 m is en die niet in een zandwingebied

liggen, zijn niet gebruikt voor de modellering. (afweging tussen significantie en verlies aan datapunten). Zo'n groot verschil kan wijzen op latere erosie (natuurlijk of door zandwinning) of sedimentatie maar ook het gevolg zijn van fouten of meetonzekerheden. Alleen in het geval van zandwinning kan de oorzaak met zekerheid worden herleid. Deze controle leidde tot eliminatie van 68 boringen. Voor boringen met onbekende referentiehoogte is de bathymetrie gebruikt om de referentiehoogte te bepalen (voor meer uitleg zie Stam, 2020). In totaal zijn er dus 1896 boringen uit de DINO database gebruikt als input voor de modellering (Figuur 2). Hoewel de kwaliteit van de boringen kan verschillen, wordt aangenomen dat alle informatie correct is, tenzij deze aantoonbaar onjuist blijkt. Net als voor DIS offshore Zeeland is semiautomatisch gezocht naar vroeg-holocene intervallen in de boringen waaraan nog geen stratigrafisch label was toegekend. Ongeveer 70% van de beschreven intervallen heeft een handmatig toegekende lithostratigrafie. Van de overige 30% is ongeveer één zesde automatisch gelabeld, waarmee het totaalpercentage niet gelabelde boringen is gereduceerd tot 25%.





Figuur 2 Boringen beschikbaar voor DIS offshore Zuid-Holland, ingedeeld op basis van einddiepte.

Voor de lagenmodellering zijn de visuele laagbeschrijvingen gebruikt, voor de voxelmodellering zijn daar ook nog de korrelgroottebepalingen aan toegevoegd. Verschillen in beschrijf- en laboratoriumprotocollen door de tijd veroorzaken inconsistenties, maar filtering op datakwaliteit is voor dit data-arme gebied geen optie. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de booraantallen en -dichtheden voor het offshore Zuid-Holland modelgebied. Er zijn vooral weinig boringen met een dieptebereik  $>6$  m; juist deze boringen (veelal spoelboringen) hebben over het algemeen een relatief lage samplekwaliteit en verticale resolutie. Als gevolg hiervan nemen de datadichtheid en kwaliteit van de DIS-producten af met de diepte onder de zeebodem.

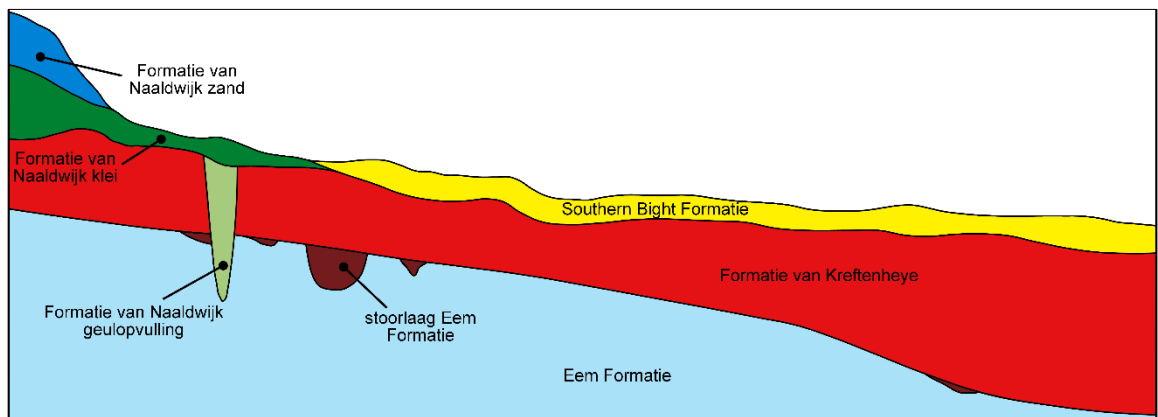


Tabel 1 Booraantallen geclassificeerd aan de hand van de einddiepte van de boring. Aan de hand van het totaal aantal boorpunten per dieptebereik zijn de boordichtheid per km<sup>2</sup> en Mm<sup>3</sup> bepaald. Het oppervlak van het DIS offshore Zuid-Holland gebied is 1296 km<sup>3</sup>.

<b>Dieptebereik</b>	<b>0-1m</b>	<b>1-2m</b>	<b>2-6m</b>	<b>6-12m</b>	<b>&gt;12m</b>
Aantal boringen met einddiepte gelegen in gestelde dieptebereik	283	73	1015	251	274
Percentage van totaal aantal boringen	15%	4%	54%	13%	14%
Totaal aantal boorpunten binnen dieptebereik	1896	1613	1540	525	274
Percentage boringen binnen dieptebereik	100%	85%	81%	28%	14%
Dichtheid boringen (boring/km <sup>2</sup> )	1,46	1,24	1,19	0,41	0,21
Modelvolume binnen interval (Mm <sup>3</sup> )	1296	1296	5183	7774	n.v.t.
Dichtheid boringen (boring/Mm <sup>3</sup> )	1,46	1,24	1,19	0,41	n.v.t.
Volume per boring (Mm <sup>3</sup> )	0,68	0,80	0,84	2,47	n.v.t.

### 2.1.5 Conceptueel model

Voor de seismische interpretatie en voor de modellering wordt er volgens een concept gewerkt. Dit concept geeft aan welke eenheden naar verwachting gekarteerd en gemodelleerd kunnen worden. Het conceptueel model (Figuur 3) voor offshore Zuid-Holland is door Deltares opgesteld ten tijde van de seismische interpretatie (2021) en is in lijn met het conceptueel model zoals dat is opgesteld voor DIS offshore Zeeland op basis van seismiek, boringen en literatuur (Stam, 2020). De belangrijkste toevoeging betreft Naaldwijk vooroverafzettingen (NAZA), kenmerkend voor een gesloten kust.



Figuur 3 Conceptueel model, haaks op de kust, volgens kartering Deltares in 2021. Dit is een schematisch profiel zonder schaal om de belangrijkste en karteerbare eenheden aan te geven.

## 2.2 Lagenmodellering

De onderverdeling van het model in lagen die samenhangende sedimenteigenschappen hebben is van essentieel belang voor de kwaliteit van het uiteindelijke voxelmodel van lithoklasse. Het lagenmodel is de belangrijkste sturende factor voor het voxelmodel. In het lagenmodel komen geologische data en kennis samen en zijn de geologische interpretaties van boringen en seismiek verrijkt tot een 3-dimensionaal beeld.

Het bathymetrisch grid met een fijne resolutie van 25 x 25 m is omgezet in een grid met een resolutie van 200 x 200 m, corresponderend met de resolutie van het lagenmodel en aansluitend bij DIS offshore Zeeland. De seismische interpretaties zijn met behulp van python algoritmes geresampled van datapunten (horizontale richting) op elke ~30 cm naar 100 cm om de bestandsgrootte werkbaar te houden. Voor het eindresultaat (en voxelmodel met 200 x 200 x 0,5 m voxels) is deze resolutie meer dan voldoende.

### 2.2.1 Eenheden

Op basis van seismiek, boringen, conceptueel model en datadichtheid is bepaald welke eenheden in het gebied lateraal continu genoeg zijn om succesvol gemodelleerd te kunnen worden. Voor DIS offshore Zuid-Holland zijn ten opzichte van DIS offshore Zeeland enkele modeleenheden toegevoegd die daar niet karteerbaar voorkomen: Antropogene Ophogingen (AAOP) en NAZA. In Tabel 2 staan de eenheden die in DIS offshore Zuid-Holland gemodelleerd zijn. De eenheden met eigenschappen die afwijken ten opzichte van DIS offshore Zeeland (Stam, 2020) zijn in de paragrafen daaronder nader toegelicht.

Tabel 2 Modeleenheden van het DIS offshore Zuid-Holland lagenmodel, met de brondata waarop de laagdefinities en verbreidingen gebaseerd zijn, de lithostratigrafische eenheden waaruit de modeleenheid bestaat, en de bijbehorende afzettingmilieus. Voor beschrijving van de lithostratigrafische eenheden zie: TNO (2013), Rijsdijk et al. (2005) en <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator>.

Nr	Modeleenheid	Brondata	Bijbehorende stratigrafische interpretaties en afzettingmilieus
1	Antropogeen (AAOP)	Openbare RWS data (verbreiding), bathymetrie Deltares (2022)	Antropogene afzettingen, zowel opgevulde zandwinputten als storten op de intacte natuurlijke zeebodem.
2	Southern Bight Formatie (SB)	Boorbeschrijvingen + seismiek	Hoogenergetisch open marien. Afzettingen zijn gevormd onder invloed van golven en getijstromen (Rijsdijk et al., 2005).
3	Naaldwijk Zandvoort (NAZA)	Boorbeschrijvingen + seismiek, bathymetrie Deltares (2022)	Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Zandvoort. Kustnabij marien: strandwallen (natstrand), strand en vooroever (TNO-GDN, 2023).
4	Naaldwijk 1 (NA1)	Boorbeschrijvingen + seismiek	Formatie van Naaldwijk (zandige facies in het bovenste deel van de NA-oppeenvolging, gevormd in of net zeewaarts van een getijbekken of estuarium door relatief sterke stroming).
5	Naaldwijk 2 (NA2)	Boorbeschrijvingen + seismiek	Formatie van Naaldwijk (kleiige facies gevormd in een getijbekken of estuarium door relatief zwakke stroming).
6	Naaldwijk 3 (NA3)	Boorbeschrijvingen + seismiek	Formatie van Naaldwijk (zandige facies in het onderste deel van de NA-oppeenvolging, gevormd in of net zeewaarts van een getijbekken of estuarium).
7	Vroeg Holoceen (VROEG_HL)	Boorbeschrijvingen + seismiek	Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Velsen (gevormd in een lagune of achter in een getijbekken). Formatie van Nieuwkoop - Basisveen Laag (gevormd in een kwelder of zoetwatermoeras). Formatie van Kreftenheye - Laag van Wijchen (gevormd in de overstromingsvlakte van een rivier).
8	Pleistoceen (PL)	Boorbeschrijvingen + Seismiek	Southern Bight Formatie – Buitenbanken Laagpakket (gevormd door omwerking van pleistoceen sediment op de ondiepe zeebodem en vooroever waarbij fijn materiaal wordt uitgespoeld en grof materiaal achterblijft). Alle eenheden van pleistocene ouderdom ( <a href="https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator">https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator</a> ).

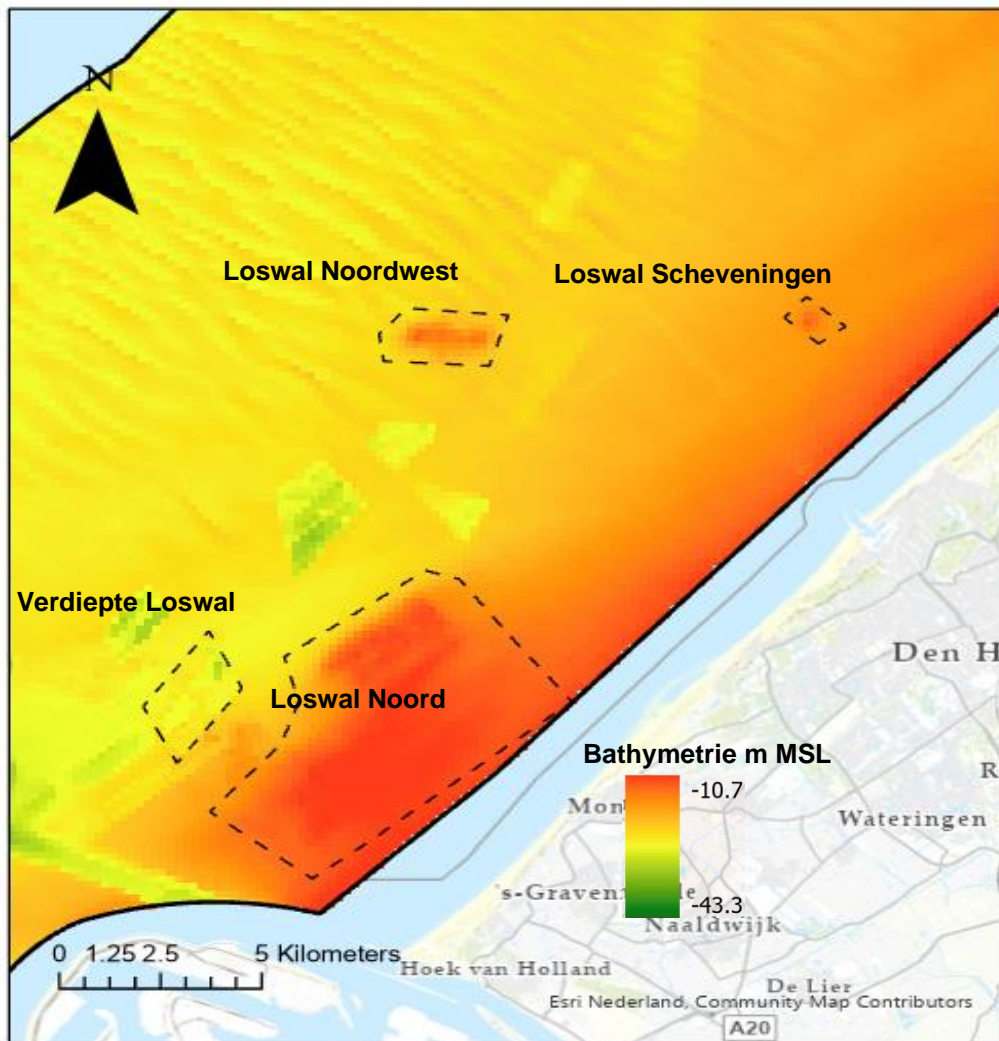
## 2.2.2 Verbreidingen

Op basis van de seismische interpretatie, boorinformatie en literatuur (Rieu et al., 2005; Hijma et al., 2010) zijn verbreidingen (laterale voorkomens) van de gemodelleerde eenheden afgebakend. Voor de eenheden waarbij het noodzakelijk was extra stappen te doen ten opzichte van de standaardmethodiek zoals gebruikt in DIS offshore Zeeland zijn deze in de volgende secties beschreven.

### 2.2.3 Antropogeen (AAOP)

Binnen de gebiedsbegrenzing zijn antropogene afzettingen geïdentificeerd in de Verdiepte Loswal, binnen Loswal Noord en Loswal Noordwest, en op Loswal Scheveningen (Figuur 4).

Dit antropogene materiaal, gebaggerd uit de Haven van Rotterdam, is voor het grootste deel slibrijk of kleilig. Het is geïdentificeerd in een groot aantal boorkernen die in het verleden zijn gestoken om het gedrag van de stortgebieden te monitoren. Om te zorgen dat deze boorintervallen niet worden meegeteld in natuurlijke geologische formaties is het essentieel om de stortlocaties ruimtelijk af te bakenen. Hiertoe is er een nieuwe modelleenheid in het ondergrondmodel geïmplementeerd: antropogeen - opgebracht materiaal (AAOP).



Figuur 4 Stortlocaties binnen het projectgebied (oplevergebied), weergegeven op bathymetrie. Zand in deze gebieden wordt als niet winbaar beschouwd.

De begrenzing van stortgebieden is bepaald aan de hand van polygonen van zandwingsgebieden (<https://data.overheid.nl/en/dataset/26602-wingsgebieden-op-de-noordzee>), literatuur en bathymetrie. Voor de storten die direct op de zeebodem liggen (Loswal Noord, Loswal Noordwest, en Loswal Scheveningen) is het oorspronkelijke, natuurlijke verloop van de zeebodem gereconstrueerd door interpolatie van dieptewaarden met een moving window. Deze geïnterpoleerde 'natuurlijke zeebodem' is genomen als de basis van de AAOP laag. Voor de Verdiepte Loswal konden digitale data met het exacte diepteverloop van de winning niet direct worden achterhaald. Uit monitoringrapportages en daarin opgenomen visualisaties

van bathymetrische opnamen is bekend dat de winputten maximaal ongeveer 10 m diep waren. Door de basis van AAOP op een arbitraire diepte van 20 m onder de zeebodem te leggen, worden het antropogene materiaal en daarmee de winbaarheidsgrids in zowel horizontale als verticale richting afgebakend.

#### 2.2.4 *Formatie van Naaldwijk (NA)*

De Formatie van Naaldwijk, een veelvoorkomende eenheid binnen DIS offshore Zuid-Holland, bevat stoorlagen die belangrijk zijn voor de zandwinning. Net zoals in DIS offshore Zeeland is NA opgedeeld in vier subeenheden: NA1, NA2, NA3 en VROEG\_HL (Tabel 2). Anders dan in DIS offshore Zeeland is in offshore Zuid-Holland ook NAZA gemodelleerd. De verdere opdeling van NA, conform het DIS offshore Zeeland gebied, is uitvoerig beschreven in Stam (2020). De Naaldwijk-geulopvullingen die seismisch gekarteerd zijn, worden bij het lagenmodel gebruikt ter bepaling van de basis Naaldwijk. De invulling ervan is conform classificatie aan de hand van de boringen. Hieronder is de opdeling voor de volledigheid kort samengevat, waarbij alleen facies die in het modelgebied voorkomen zijn toegelicht:

- NAZA: vooroeverafzettingen;
- NA1: zandige facies in het bovenste deel van eenheid NA;
- NA2: kleiige facies in eenheid NA (exclusief VROEG\_HL);
- NA3: zandige facies in het onderste deel van eenheid NA;
- VROEG\_HL: vroeg-holocene deel van NA (Laag van Velsen en mogelijk vroeg-holocene restgeulopvullingen).

#### 2.2.5 *Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Zandvoort (NAZA)*

In DIS offshore Zuid-Holland is onderscheid gemaakt tussen NAZA en SB. De vooroeverafzettingen van NAZA zijn anders van aard dan de open mariene SB afzettingen. Golfwerking op de zeebodem speelt een grote rol bij hun vorming. De overgang tussen deze eenheden, rond de golfbasis, verschuift met de tijd (onder invloed van getij en weersomstandigheden) en ligt dus niet op één vaste positie. Op seismiek is het verschil tussen NAZA en SB niet zichtbaar; daarom is de grens vooral op basis van de boorinterpretaties en de bathymetrie bepaald. De grens is zoveel mogelijk gelegd daar waar de helling van de zeebodem systematisch minder steil wordt, aan de voet van de vooroever. Het steilere kustnabije deel, onderdeel van het kustfundament, valt in het NAZA-bereik en het vlakkere deel in het SB-bereik.

#### 2.2.6 *Vroeg Holoceen (Vroeg\_HL)*

Vroeg-holocene afzettingen, een zeer belangrijke stoorlaag in de ondergrond, is beperkend voor zandwinning. De verbreiding hiervan is gebaseerd op boringen, seismiek en iteratieve modellering waarin aan de hand van expertkennis is toegewerkt naar een geologisch zo plausibel mogelijke reconstructie van lateraal bereik en laagdikte. De aard van het materiaal, stugge klei en veen, maakt deze stoorlaag ook winbaarheidsbeperkend als ze dunner dan 0,5 m is.

Om dit goed terug te laten komen in het voxelmodel en in de winbaarheidsgrids zijn enkele sturende ingrepen op de boringen en modelgrids verricht:

- boringen die eindigen in het vroeg Holoceen: bij de einddiepte van de boring (m onder zeebodem) is 0,5 m opgeteld zodat de eenheid hier minimaal 0,5 m dik is;
- daar waar de laagdikte in het lagenmodel tussen de 0,1 en 0,5 m kwam te liggen is een dikte opgelegd van 1 voxel (0,5 m) die ervoor zorgt dat deze eenheid niet verdwijnt waar de 0,5 m verticale resolutie van het model niet wordt bereikt.



### 2.2.7 *Paleogeen*

Ten opzichte van DIS offshore Zeeland is in DIS offshore Zuid-Holland geen Paleogeen gemodelleerd. Eenheden van deze ouderdom liggen hier beneden het dieptebereik van het model (12 m onder de zeebodem).

### 2.2.8 *Interpolatie*

De basissen van de modeleenheden 2 t/m 7 uit Tabel 2 zijn gemodelleerd met behulp van het geostatistische softwarepakket ISATIS.NEO®, ontwikkeld door Geovariances. De methodiek van DIS offshore Zeeland is, uitgangspunt van de modellering, is uitgebreid of aangepast waar dat noodzakelijk bleek uit de visuele inspectie van de modelresultaten om tot een acceptabel resultaat te komen. De workflow is hetzelfde gebleven. Voor iedere modeleenheid is de ruimtelijke correlatie gekwantificeerd in een variogram. De basis van iedere eenheid is berekend aan de hand van seismische en boorinformatie, met behulp van de interpolatietechniek 'ordinary kriging met residuen'. Daarbij is rekening gehouden met de omliggende datapunten en met de regionale trend over ca. 20 km. Ten opzichte van DIS offshore Zeeland voorkomt het meenemen van de regionale trend een imprint van de huidige bathymetrie, en vooral van bodemvormen zoals zandgolven en getijbanken, in de dieper liggende laaggrenzen. Op de volumeberekeningen heeft dit overigens weinig invloed.

Het laterale voorkomen van de eenheden is ingeperkt door oplegging van handmatig gekarteerde verbreidingen, waarbij een gemodelleerde eenheid niet buiten zo'n beperkt bereik mag voorkomen. Verspreide niet karteerbare restanten buiten een opgelegd bereik zijn weggefilterd.

De modellagen zijn onafhankelijk van elkaar berekend. Hierdoor kan het voorkomen dat eenheden verticaal overlappen. Om hiervoor te corrigeren zijn de dieptebereiken van de eenheden consistent gemaakt. Daar waar de basis van een eenheid ondieper ligt dan de basis van de bovenliggende eenheid is aangenomen dat de onderliggende eenheid daar niet voorkomt; deze werkwijze is geïllustreerd in Stam (2020). Deze laatste stap kan ervoor zorgen dat het gemodelleerde laterale voorkomen van een eenheid enigszins kleiner is dan de gekarteerde verbreiding van de eenheid.

## 2.3 **Voxelmodellering**

De voxelmodellering van DIS offshore Zuid-Holland maakt gebruik van de methodiek ontwikkeld voor DIS offshore Zeeland (Stam & Van Heteren, 2020) maar is op enkele punten aangepast. De belangrijkste punten alsmede de veranderingen worden hier toegelicht.

De methodiek, uitgebreid besproken in Stam & Van Heteren (2020) en in Stafleu et al. (2022), gebruikt een lagenmodel met een resolutie van 200 x 200 x 0,01 m om een voxelmodel van 200 x 200 x 0,5 m te genereren. Aan de hand van de top- en basisgrids van het lagenmodel is aan iedere voxel een lithostratigrafische modeleenheid toegekend. Het midden van een voxel bepaalt tot welke lithostratigrafische modeleenheid de betreffende cel behoort.

### 2.3.1 *Klasseindelingen*

Om een nog beter inzicht te krijgen in de samenstelling van het te winnen zand is lithoklasse 3 (*zand matig tot zeer grof, 210-420 µm*) uit DIS 2.1 en DIS offshore Zeeland nu onderverdeeld

in klassen 3 (*zand matig grof, 210-300  $\mu\text{m}$* ) en 4 (*zand zeer grof, 300-420  $\mu\text{m}$* ). Deze nieuwe indeling is weergegeven in Tabel 3. De indeling in slib- en schelpenklassen (Tabel 4) is niet aangepast ten opzichte van eerdere versies van het DIS.

Tabel 3 Lithoklassen in DIS 3.0 offshore Zuid-Holland.

1: zand fijn (63-105 $\mu\text{m}$ )
2: zand matig fijn (105-210 $\mu\text{m}$ )
3: zand matig grof (210-300 $\mu\text{m}$ )
4: zand zeer grof (300-420 $\mu\text{m}$ )
5: zand uiterst grof (420-2000 $\mu\text{m}$ )
6. zand (korrelgrootte onbekend; in voxelmodellering buiten beschouwing gelaten)
7: klei (klei, leem, gyttja, bagger, slurrie)
8: veen (veen, detritus)
9: schelpen ( $\geq 30\%$ schelpen)

Tabel 4 Slib- en schelpenklasseindeling

Slibklasse	Schelpenklasse
1: (0- $\leq 2\%$ slib)	1: geen schelpen (0%)
2: (>2- $\leq 4\%$ slib)	2: spoor schelpen (>0- $\leq 1\%$ )
3: (>4- $\leq 10\%$ slib)	3: weinig schelpen (>1- $\leq 10\%$ )
4: (>10% slib)	4: veel schelpen (>10- $< 30\%$ )
	5: schelpgehalte onbekend (?%)

Om litho-, slib- en schelpenklasse aan de boorintervallen toe te wijzen, zijn eerst de visuele boorbeschrijvingen samengevoegd met de korrelgroottemetingen. Dit is zo gedaan dat de kleinst mogelijke intervallen zijn onderscheiden. Na deze stap zijn intervallen dikker dan 1 voxel (0,5 m) opgedeeld in intervallen van maximaal 0,5 m. Vervolgens zijn al de beschrijffintervallen voorzien van de modelstratigrafie volgend uit de lagenmodellering.

Per lithostratigrafische modeleenheid is vervolgens de globale statistische verdeling van de zand-, slib- en schelpenklassen berekend. De globale verhoudingen zijn ook gebruikt om de proporties van de klassen en de verhouding zand versus niet-zand binnen het voxelmodel vast te stellen (Stam & Van Heteren, 2020).

### 2.3.2 Simulaties

De geostatistische correlatie (variogram en neighborhood, waarbuiten omliggende punten geen invloed hebben op de voorspelde waarde) is per modeleenheid bepaald. Er was voor DIS offshore Zuid-Holland geen reden om af te wijken van de reeds bepaalde variogrammen van de eenheden uit DIS offshore Zeeland. De geologische formaties die aanwezig zijn in

beide gebieden kennen veel overlap en de ruimtelijke patronen die uit de seismiek zijn afgeleid lijken sterk op elkaar. Voor NAZA zijn wel nieuwe variogrammen bepaald; deze vertonen sterke gelijkenis met die van SB.

Voor AAOP is geen litho, slib of schelpenklasse bepaald. Omdat deze veelal slibrijke eenheid niet gewonnen zal worden, is het voor het DIS onnodig om de samenstelling te bepalen aan de hand van boringen die deels voor en deels na de stort kunnen zijn gezet.

Er is voor DIS offshore Zuid-Holland wederom gebruik gemaakt van de in de voorgaande DIS-versies toegepaste Sequential Indicator Simulation modelleertechniek. In de uitvoering van de simulaties is echter wel een aanpassing gedaan. In eerdere versies van het DIS werden 10 simulaties uitgevoerd voor *zand vs niet-zand* en vervolgens voor elk van die simulaties nog 10 simulaties voor de lithoklasse, resulterend in 100 even waarschijnlijke realisaties. Voor DIS offshore Zuid-Holland zijn eerst 100 simulaties *zand vs niet-zand* gedaan en is er vervolgens voor elk van die 100 realisaties 1 simulatie met de lithoklassebepaling gedaan. Deze methodiek is reeds toegepast in de recente versies van GeoTOP (Stafleu et al., 2022) en geeft een realistischer beeld van de ondergrond dan de eerdere aanpak.

Voor de slib- en schelpenklasse zijn 10 simulaties uitgevoerd, overeenkomstig de methodiek voor DIS offshore Zeeland en DIS 2. De slib- en schelpenklassemodellen zijn oorspronkelijk ontwikkeld als toevoeging aan het lithoklassemodel om meerdere winbaarheidsscenario's te kunnen doorrekenen. Bij de bepaling van de B2-winbaarheid spelen de slib- en schelpenklassemodellen geen rol. Als dat ook in de toekomst het enige gehanteerde scenario blijft, heeft een meer tijd vergende uitgebreide modellering weinig toegevoegde waarde.

Voor het bepalen van de meest waarschijnlijke klasse uit de simulaties is gebruik gemaakt van het Soares Algoritme (Stafleu et al., 2022). Dit houdt in dat de globale proporties van de modeleenheden gebruikt zijn als sturing bij de totale verdeling van de meest waarschijnlijke lithoklasse.

## 2.4 Winbaarheid

Aan de hand van de aldus bepaalde meest waarschijnlijke litho-, slib- en schelpenklasse is de winbaarheid voor iedere voxel bepaald. Om redenen van éénduidigheid en efficiëntie is het aantal te berekenen winbaarheidsscenario's voor DIS offshore Zuid-Holland gereduceerd ten opzichte van die in DIS 2.0 en DIS 3.0 offshore Zeeland. Het scenario dat nog berekend wordt is overeenkomstig het oorspronkelijk gedefinieerde B2-scenario: minimumdikte van de stoorlaag 0,5 m; lithologie klei, leem of veen. Ook het onderscheid tussen 0-1 en 0-4 zand is niet langer gemaakt. In Tabel 5 staan de volledige specificaties van het winbaarheidsscenario. Voor de al eerder gehanteerde maximale winddieptes van 2 m, 6 m en 12 m is berekend hoeveel zand er in totaal beschikbaar is en hoeveel per specifieke zandklasse, alsmede voor enkele samengestelde klassen (bijvoorbeeld matig fijn - matig grof zand). Aan de hand van de slib- en schelpenklassemodellen zijn ook de gemiddelde slib- en schelpenpercentages over de winddiepte berekend. De berekende waarden zijn omgezet tot grids die in GIS software te bekijken zijn.

Tabel 5 Specificaties van het toegepaste winbaarheidsscenario.

Stoorlaagdefinitie	Lithoklasse 7,8
Stoorlaagdikte	0,5 m

Stoorlaag-eenheid	AAOP
-------------------	------

## 3 Resultaten

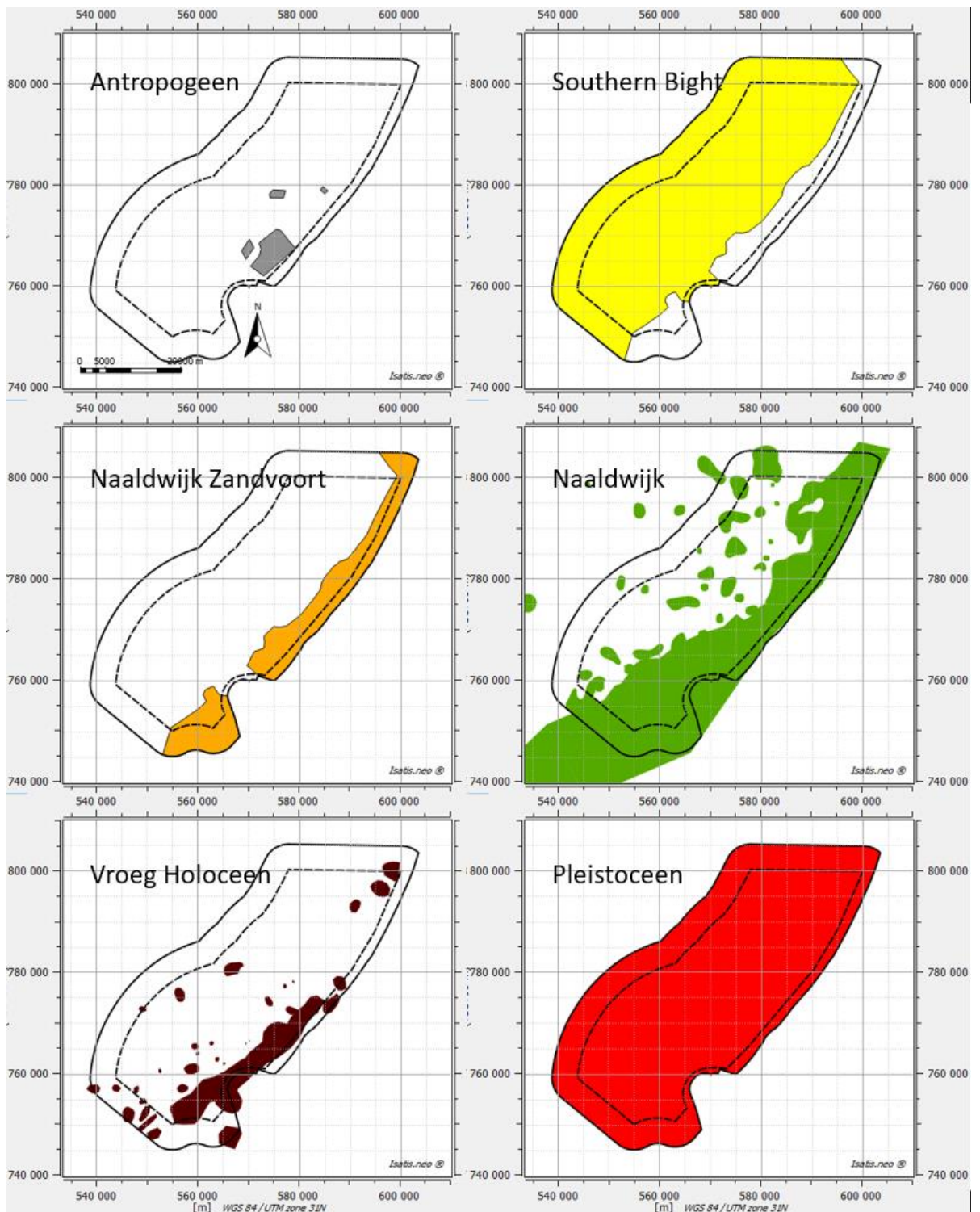
Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de lagenmodellering en voxelmodellering, alsmede de resulterende winbaarheidsgrids. Van elke modelleenheid zijn de top-, basis-, en diktegrids uitgeleverd. Het 3D voxelmodel is uitgeleverd als een csv-bestand en bevat als attributen de toegewezen modelleenheid, de meest waarschijnlijke litho-, slib- en schelpenklassen, en de kans per lithoklasse.

### 3.1 Lagenmodel

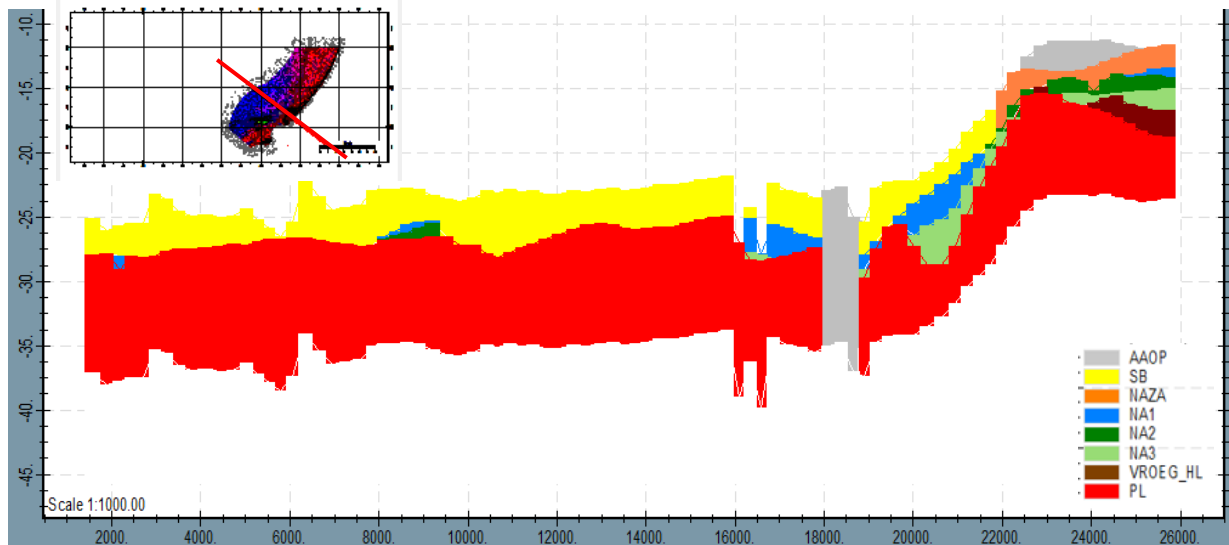
De verbreidingen die zijn gebruikt voor de lagenmodellering zijn weergegeven in Figuur 5; de kaartjes geven een goed beeld van het voorkomen van de verschillende eenheden. Zoals beschreven in de methodiek is het mogelijk dat een eenheid niet overal binnen de hier getoonde verbreiding voorkomt.

De diktes, dieptes en onderlinge relaties tussen de modelleenheden is goed te zien in doorsnedes haaks op (Figuur 6) en parallel aan (Figuur 7) de kust. De Verdiepte Loswal en andere stortlocaties zijn duidelijk zichtbaar (AAOP). De overgang tussen SB en NAZA is gemodelleerd als een verticale grens en in het 3D beeld van Figuur 8 is zichtbaar dat NAZA beperkt is tot het steilere deel van de kust nabije zeebodem: de vooroever. In met name Figuur 7 is ook duidelijk het insnijden van NA in PL en VROEG\_HL goed te zien. De NA-geulopvullingen behoren voornamelijk tot de zandige NA3 facies. Eenheid VROEG\_HL is juist niet erosief van karakter en in het lagenmodel dan ook voornamelijk vlak aan basis en top. Wel kan deze eenheid dikker zijn als het gaat om een restgeulinvulling in een eerder gevormde depressie. Een hellende basis kan ook afzetting op bijvoorbeeld donken weerspiegelen.

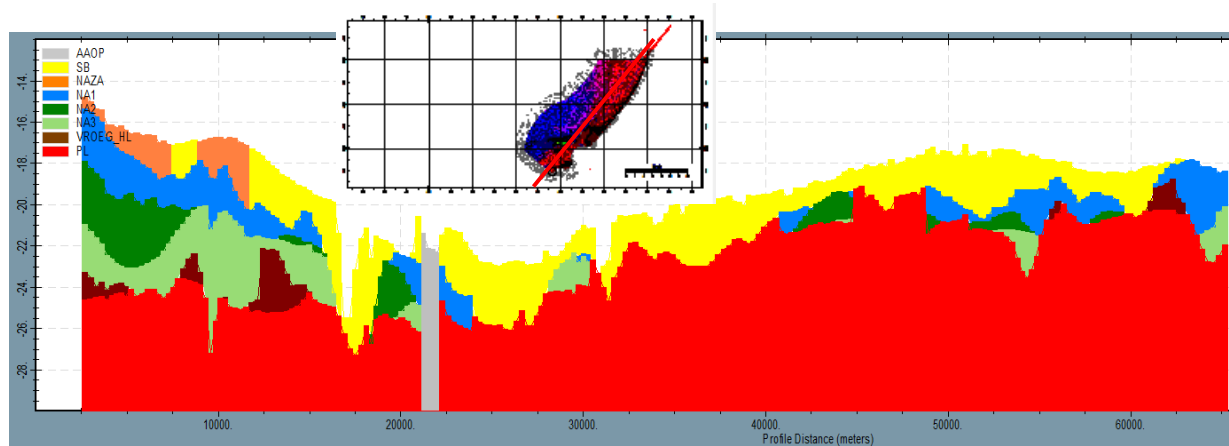




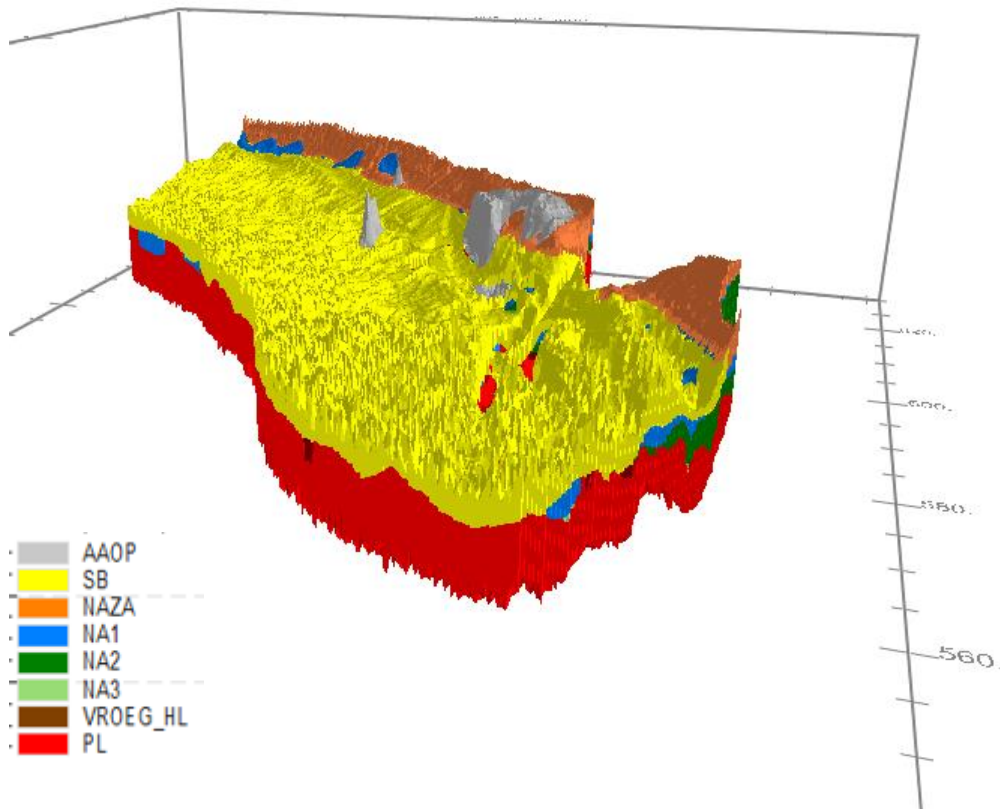
Figuur 5 Overzicht van de verbreidingen van de lithostratigrafische eenheden aanwezig in het projectgebied. De doorgetrokken lijn geeft de grens van het rekegebied aan. De stippellijn daarbinnen begrenst het oplevergebied.



Figuur 6 Dwarsdoorsnede lagenmodel, ongeveer haaks op de kust (noordwest-zuidoost). Goed zichtbaar zijn de winput voor Maasvlakte 2 die reikt tot in PL (km 16), en zowel een verdiepte (km 18) als oppevlakkige (km 24) loswal.



Figuur 7 Langsdoorsnede lagenmodel, ongeveer parallel aan de kust (zuidwest-noordoost). De moeilijk te modelleren grens tussen SB en NAZA is hier onnatuurlijk steil; de afwisseling of geleidelijke laterale overgang tussen deze eenheden kan nog niet foutloos in het model worden gevat. De geulopvullingen van NA, te zien als steile insnijdingen in het pleistocene oppervlak, lijken door verticale overdrijving rechtopstaande randen te hebben. In werkelijkheid gaat het om een flauwe helling; enkele meters reliëf binnen de laterale voxelgrootte van 200 m.

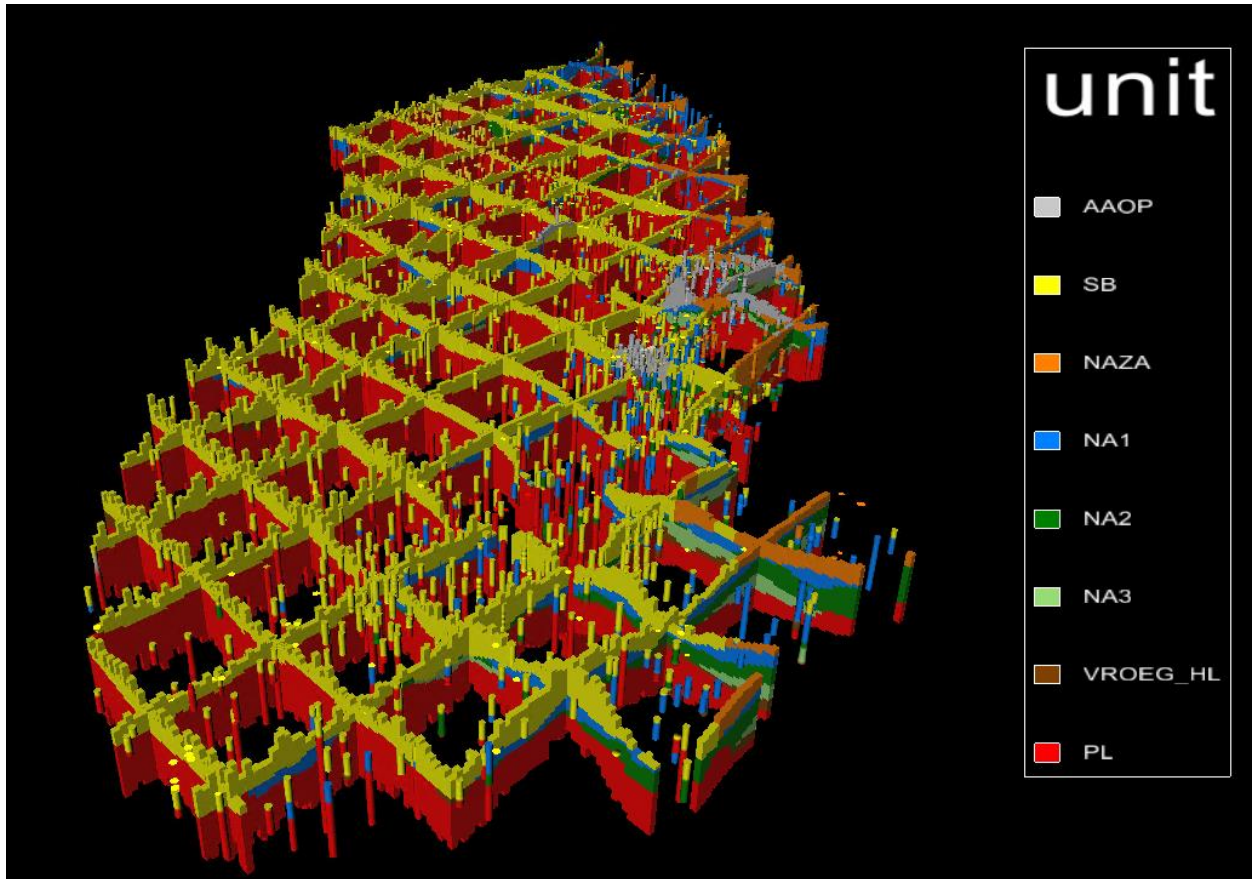


Figuur 8 3D model DIS offshore Zuid-Holland in iMOD, (kijkrichting is noordwest, verticale overdrijving 100). Te zien zijn: antropogene storten en loswallen, lokaal aan de zeebodem (AAOP); het Pleistoceen dat overal de basis van het model vormt (PL); elkaar aansnijdende en onderliggende lagen (VROEG\_HL en PL) eroderende facies van de Formatie van Naaldwijk (NA1, NA2, NA3); en de wijdverbreide Southern Bight Formatie (SB) die kustwaarts overgaat in de Formatie van Naaldwijk - Laagpakket van Zandvoort (NAZA). De totale dikte van het model in de figuur is 12 m.

### 3.2 Voxelmodel

Het naar de resolutie van het voxelmodel omgezette lagenmodel is in Figuur 9 te zien. Het verlies van verticale resolutie ten opzichte van het lagenmodel is vooral in het gemodelleerde zeebodemoppervlak duidelijk. In het vensterdiagram is het verschil tussen de complexe opeenvolging langs de kust en het eenvoudigere offshore deel goed zichtbaar. In dieper water verder uit de kust ontbreken de kustafzettingen vrijwel volledig.

Eén van de voornaamste sturende invloeden van het geologische lagenmodel op het voxelmodel is de ruimtelijk variërende verhouding van litho-, slib- en schelpenklassen tussen de modeleenheden. Deze zijn weergegeven in Figuur 10 en in Tabel 6 en Tabel 7.



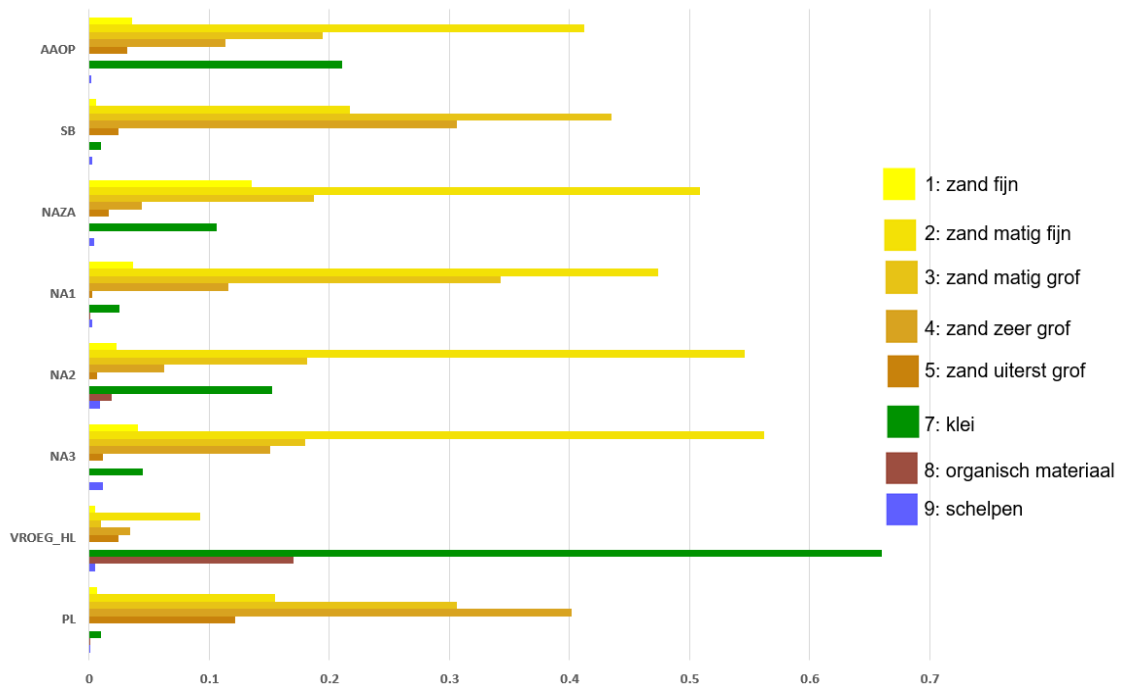
Figuur 9 Lagenmodel weergegeven in voxels (kijkrichting noordoost), door middel van dwarsprofielen in een vensterdiagram (om de 2 km). De boorstaafjes zijn gekleurd volgens de toegekende modelstratigrafie en de verticale overdrijving is 200x.

### 3.2.1 Lithoklasse

Uit Figuur 10 wordt direct duidelijk dat de geologische onderverdeling van grote toegevoegde waarde is. Onder andere de volgende observaties kunnen gemaakt worden:

- AAOP: Ondanks het kleine voorkomen is toevoeging van de antropogene eenheid relevant. De boringen geven aan dat deze eenheid een relatief sterk kleiig/slibhoudend karakter heeft waarbij meer dan 20% van de intervallen uit klei bestaat. Zonder deze eenheid zou het model de storende lithoklassen (7 en 8) over de andere eenheden verdelen.
- SB en NAZA: SB bestaat voornamelijk uit door (residuaire) getijstroming omgewerkt sediment, veelal van pleistocene oorsprong, door migratie van grootschalige zeebodenvormen. NAZA bestaat uit vooroeverafzettingen die de afgelopen 1000 jaar tijdens de terugtrekking en verstelling van de Nederlandse kust zijn gevormd. Ze zijn relatief rijk aan fijn materiaal dat door de grote rivieren de zee instroomt en dicht langs de kust noordwaarts wordt getransporteerd. Dit komt duidelijk terug in de lithoklasseverdeling. NAZA bevat minder winbaar zand dan SB.
- NA: Zoals ook al in DIS offshore Zeeland is opgemerkt, is de onderverdeling van eenheid NA in NA1, NA2 en NA3 vooral van meerwaarde omdat NA2 een relatief kleiig karakter kent.

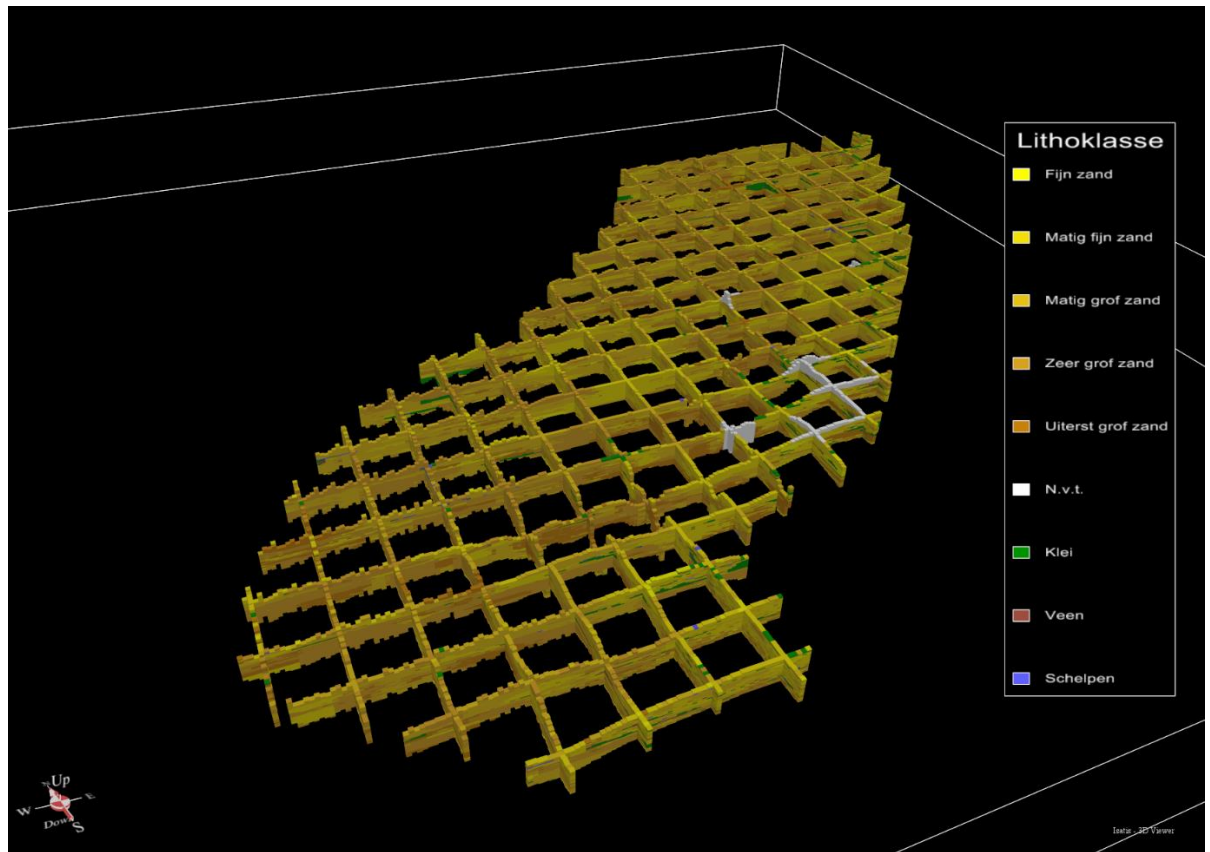
- VROEG\_HL: De vroeg-holocene afzettingen bestaan voor meer dan 75% procent uit niet-zand. Het is de belangrijkste natuurlijke stoorlaag in het projectgebied.



Figuur 10 Globale verhouding van de lithoklassen per modelleenheid. Het relatieve aandeel van de lithoklassen staat op de X as en de modelleenheden op de y-as

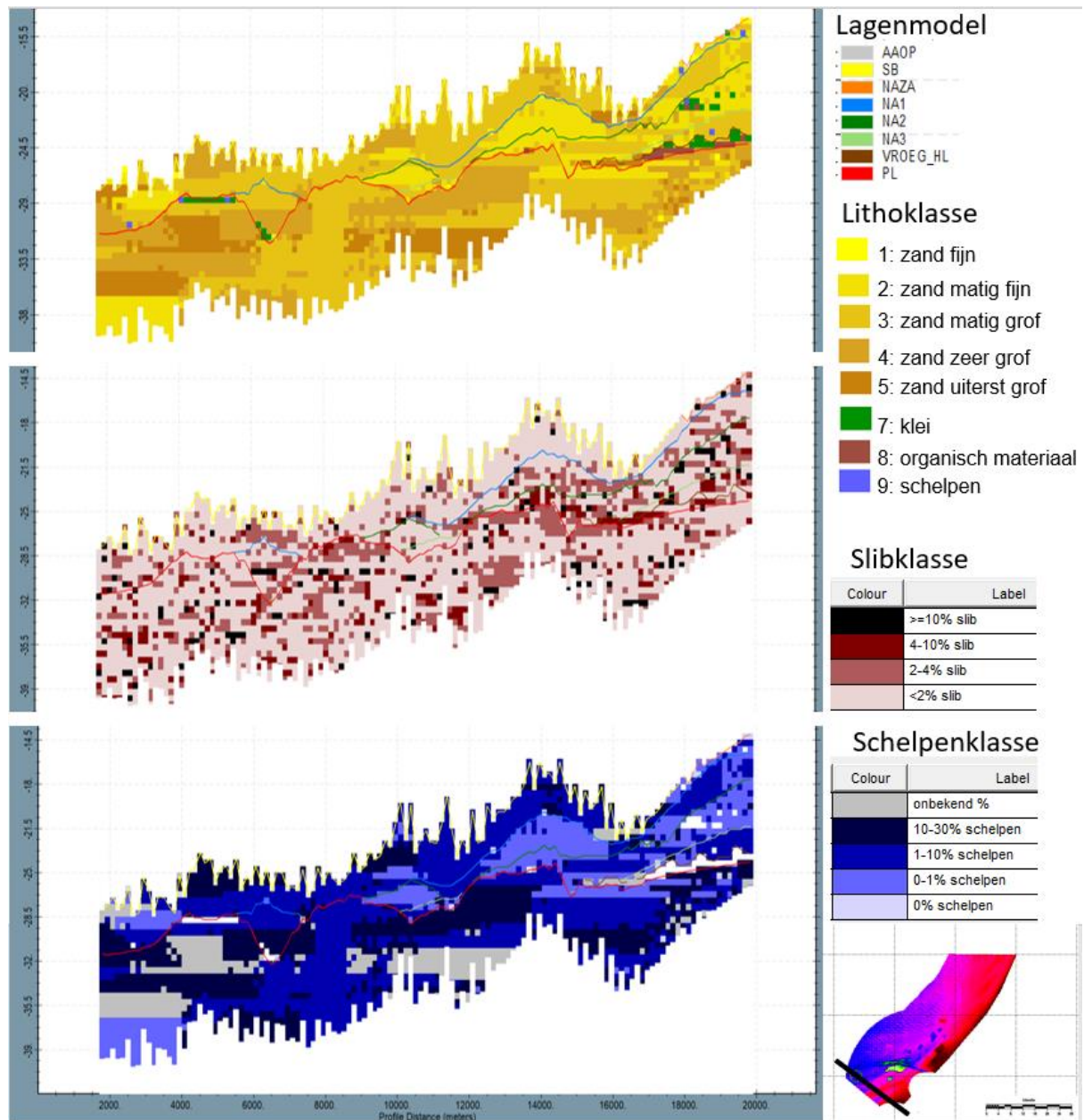


In Figuur 11 is de meest waarschijnlijke lithoklasse weergegeven. De meeste stoorlagen bevinden zich dichtbij de kust, maar ook verder offshore zijn in het Pleistoceen wat stoorlagen aanwezig.



Figuur 11 Vensterdiagram van de meest waarschijnlijke lithoklasse. Verticale overdrijving is 100x en de het model toont de ondergrond tot 12 m onder de zeebodem.

In Figuur 12 is de relatie tussen de meest waarschijnlijke litho-, slib- en schelpenklasse en het lagenmodel weergegeven. Klei en veen komen vooral voor in VROEG\_HL maar ook binnen NA2 en aan de top van PL. De lithoklasse laat over het algemeen een beeld zien dat de verdeling uit Figuur 10 onderstreept.



Figuur 12 Doorsnede door het voxelmodel, haaks op de kust. De meest waarschijnlijke lithoklasse (boven), meest waarschijnlijke slibklasse (midden), en meest waarschijnlijke schelpenklasse (onder) zijn weergegeven samen met de laagvlakken uit het lagenmodel. Omdat de datadichtheid te laag is om kleinschalige niet-horizontale sedimentologische elementen in de ondergrond te herkennen, is bij alle interpolaties het horizontale vlak gebruikt en bijvoorbeeld niet de onregelmatige zeebodembasis of geolopvullingsbasis.

### 3.2.2 Slibklasse

In de verhoudingen van de hoeveelheid slib (Tabel 6) valt op dat het zand in AAOP het meest slibrijk is, een weerspiegeling van het hoge slibgehalte van gebaggerd materiaal. Verder is NAZA aanmerkelijk slibrijker dan SB. Van de zandige intervallen (17%) binnen VROEG\_HL bevat ruim 40% meer dan 4% slib. Dit onderstreept dat ook de zanden binnen deze eenheid minder geschikt zijn voor winning.

Tabel 6 Globale verhoudingen van de slibklassen per modeleenheid.

Modeleenheid	1 (0-2% slib)	2 (2-4% slib)	3 (4-10% slib)	4 (>10% slib)
AAOP	39,2%	8,6%	16,9%	35,3%
SB	85,3%	11,8%	1,9%	1,1%
NAZA	58,2%	20,6%	13,5%	7,8%
NA1	64,4%	29,9%	4,7%	0,9%
NA2	61,0%	24,0%	9,3%	5,7%
NA3	67,4%	16,3%	12,2%	4,1%
VROEG_HL	40,9%	14,6%	39,1%	5,5%
PL	89,7%	5,9%	3,4%	1,0%

Het model van de meest waarschijnlijke slibklasse is slechts bedoeld als visuele aanvulling op het lithoklassemodel voor de winbaarheidsberekeningen, omdat eventuele aanwezigheid van de fijne fractie in lithoklassen 1-5 niet wordt weergegeven. Het ruizige slibklassebeeld is niet meer dan een geostatistische verdeling (conform Tabel 6) die nauwelijks door boringen wordt gestuurd. De datadichtheid is te laag om deze slechts in een kwart van de boorbeschrijvingen vermelde bijmenging realistisch te modelleren.

### 3.2.3 Schelpenklasse

De mariene SB-afzettingen bevatten samen met NA3 het meeste schelpmateriaal, onder andere als gevolg van sorteerprocessen tijdens omwerking van zand door golven en getij.

Tabel 7 Globale verhoudingen van de schelpenklassen per modeleenheid.

Modeleenheid	1 geen schelpen (0%)	2 spoor schelpen (0-1%)	3 weinig schelpen (1-10%)	4 veel schelpen (10-30%)	5 schelpen onbekend (%)
AAOP	0,0%	54,9%	26,4%	1,5%	17,2%
SB	0,0%	31,6%	52,3%	12,2%	3,9%
NAZA	0,0%	43,7%	26,7%	7,3%	22,3%
NA1	0,0%	43,5%	42,3%	9,8%	4,5%
NA2	0,9%	55,2%	31,0%	6,8%	6,2%
NA3	0,0%	52,8%	24,3%	13,9%	9,0%
VROEG_HL	1,9%	55,6%	20,4%	5,6%	16,7%
PL	0,2%	50,8%	40,7%	6,3%	2,0%

Het algemene beeld dat rondom boringen met 'veel schelpen (10-30%)' zones als zodanig gemodelleerd worden, en dat verder 'spoor' en 'weinig' schelpen het beeld bepalen, heeft geen werkelijkheidswaarde. Ook voor het schelpenklassemodel geldt dan ook dat deze samen met het lithoklassemodel bekeken moet worden, en niet van invloed is op de winbaarheidsberekening.

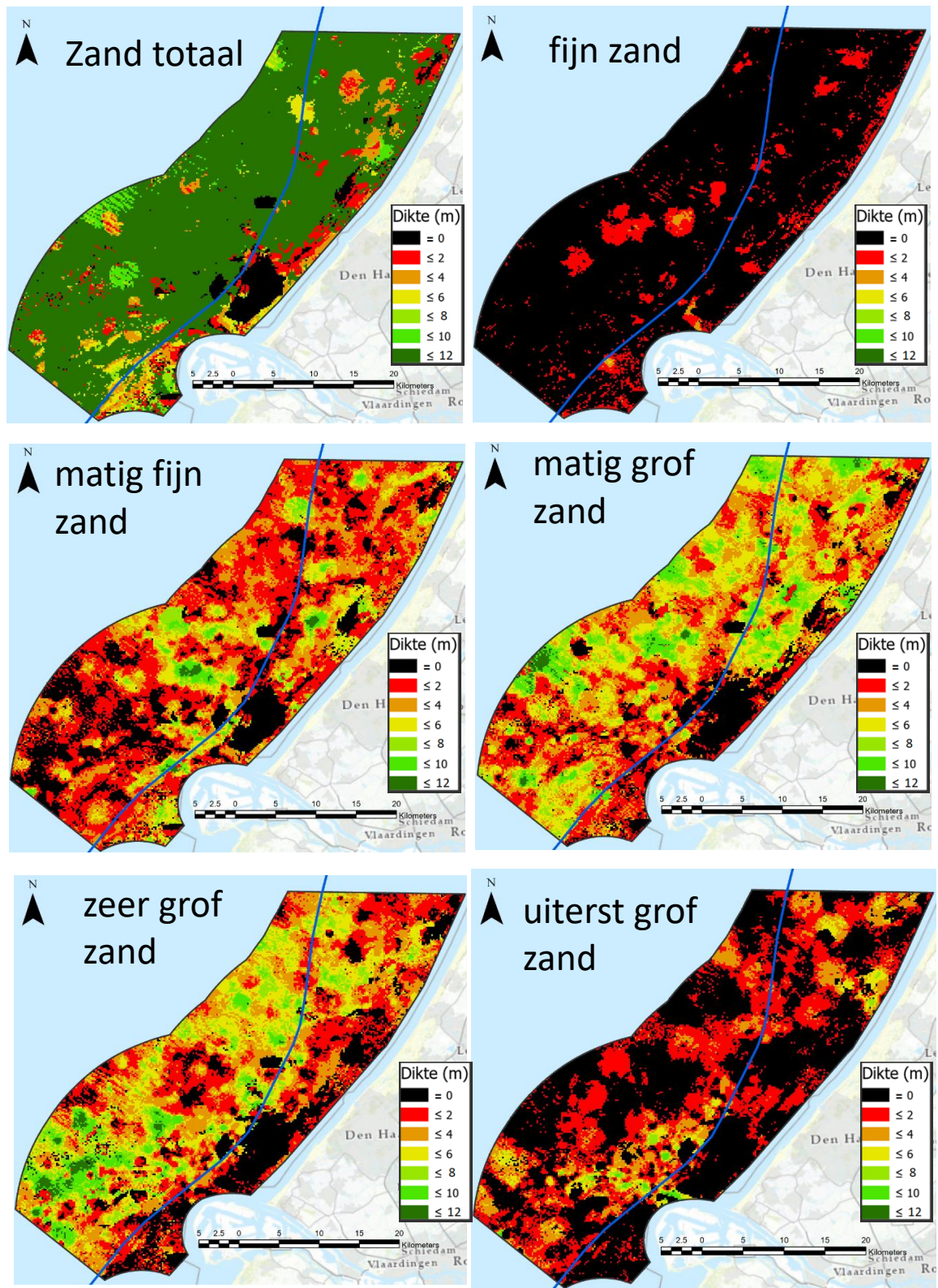
### 3.3 Winbaarheid

De uit het voxelmodel afgeleide winbaarheidsgrids (Figuur 13) geven een duidelijk regionaal kaartbeeld van het zandvoorkomen per klasse over het gebied voor de gekozen winddiepte van 12 m. De dikste winbare lagen zeer en uiterst grof zand kunnen met name verder offshore gevonden worden, waar relatief grof PL dicht onder de zeebodem aanwezig is. Kustnabije afzettingen gevormd in getjebekkens en op de vooroever zijn over het algemeen fijner dan de open mariene en vooral fluviaatiele (pleistocene) afzettingen, en bevatten bovendien meer en dikkere stoorlagen.

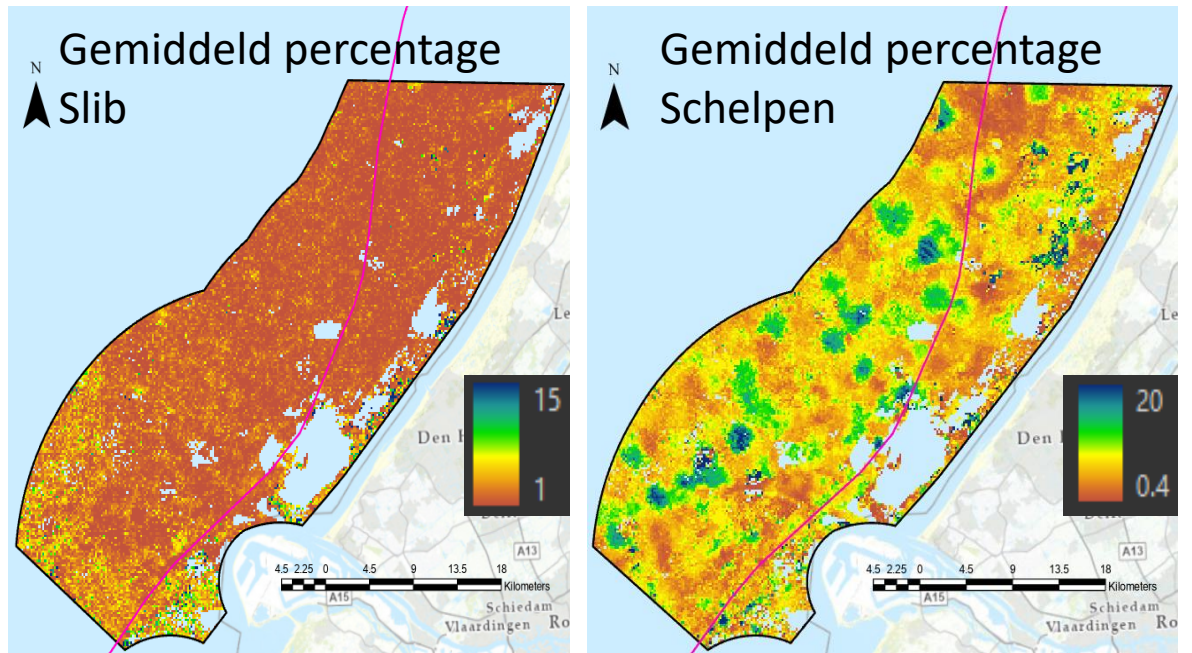
Rondom de Rijn-Maasmonding is de winbare laag zeer en uiterst grof zand 5-10 m dikker dan in de rest van het gebied. In de rest van het gebied lijkt het winbare zand voornamelijk tot de matig grove categorie te behoren, met ogenschijnlijk willekeurig verspreid wat matig fijne en zeer grove zones.

Hoewel slechts op enkele tientallen datapunten gebaseerd, blijkt dat het zuidelijke deel van het gebied en ook een smalle kustnabije strook enkele procenten meer slib bevat dan het noordelijke deel van het gebied (Figuur 14). Dit beeld toont de meerwaarde van de slibmodellering. Het gemiddelde schelpenpercentage laat geen verklaarbare patronen zien en kan over korte afstanden sterk verschillen. De schelpenpercentages zijn niet meegenomen in de winbaarheidsbepalingen.





Figuur 13 Zanddiktekaarten (in meters) voor de verschillende zandklassen bij een maximale winddiepte van 12 m en een stoorlaag van klei, leem en/of veen met een minimale dikte van 0,5 m. Antropogene afzettingen hebben een winddikte van 0 m. In blauw is de doorgaande -20 m waterdieptelijn weergegeven.



Figuur 14 Dieptegemiddelde percentages slib en schelpen in het winbare zand (totaal) bij een maximale winddiepte van 12 m. In violet is de doorgaande -20 m waterdieptelijijn weergegeven.

## 4 Discussie

### 4.1 Algemeen

Toevoeging van de AAOP en NAZA modeleenheden zorgt voor een voor winbaarheidsberekeningen betere afbakening van lithoklassen 7 en 8 over het modelgebied. Gebieden waar stort van gebaggerd materiaal heeft plaatsgevonden, kunnen nu eenvoudig worden uitgesloten in winbaarheidsbepalingen. De fijnere, relatief slibrijke NAZA-zanden zijn nu goed gescheiden van de grovere en slibarmere PL- en SB-zanden. De vernieuwde lithoklassemodellering resulteert daarmee in een meer realistische en natuurgetrouwe ruimtelijke verdeling van de lithoklassen dan voorheen mogelijk was. Daarnaast maakt de splitsing van lithoklasse 3 (*zand matig tot zeer grof, 210-420  $\mu\text{m}$* ) uit voorgaande DIS-modellen in klassen 3 (*zand matig grof, 210-300  $\mu\text{m}$* ) en 4 (*zand zeer grof, 300-420  $\mu\text{m}$* ) een gevarieerder gebruik van het DIS mogelijk. Het DIS-model blijft, zoals elk model, een versimpeling van de werkelijkheid; dat is de kracht ervan maar vraagt direct ook om een kritische blik door experts en gebruikers.

### 4.2 Lagenmodel

In het DIS-lagenmodel zitten enkele in het oog springende imperfecties; deze worden hieronder kort uiteengezet.

De verbreiding van NAZA is gekarteerd op basis van bathymetrische diepteligging (NAZA ondiepst), bathymetrische helling (NAZA steilt) en de gemodelleerde dikte van SB/NAZA (overgang bij voorkeur waar beide eenheden dun zijn). Op basis van deze criteria is de grens tussen de twee eenheden lokaal lastig te bepalen en kan deze komen te liggen op een onnatuurlijk ogende plek zoals bijvoorbeeld te zien in Figuur 7. Daarnaast vormt NAZA zoals gedefinieerd in het DIS-model, een louter oppervlakkige eenheid die de tegenhanger vormt van de open mariene SB, slechts een deel van NAZA zoals geologisch gedefinieerd. Deze bredere eenheid bestaat uit een oud deel dat tijdens de uitbouw van de Nederlandse kust is gevormd, duizenden jaren geleden, en een jonger deel dat deels tijdens de meer recente versteiling van de kust is ontstaan. Het oudere deel bestaat grotendeels uit NA1 en 2 die in het model omwille van de toepassing ter ondersteuning van de zandwinstrategie als afzonderlijke facies zijn gedefinieerd.

De aangepaste modellering van het VROEG\_HL zorgt ervoor dat deze eenheid ook als deze slechts 0,1 m dik is toch wordt gezien als stoorlaag. Deze belangrijke aanpassing en verbetering ten opzichte van DIS offshore Zeeland zorgt ervoor dat geoarcheologisch waardevolle lagen niet worden verstoord. Enkele delen van VROEG\_HL komen voor als relatief dikke pakketten die lijken te zijn ingesneden in het onderliggende PL. Geologisch gezien kan zo'n insnijding een restgeul zijn, maar dit is veelal niet zo. Het honoreren van boordata kan tot gevolg hebben dat de dikte van VROEG\_HL over korte afstand van 1-2 m naar 0 m gaat. Hoewel dit er niet erg geologisch uitziet, heeft het de voorkeur gekregen boven ander oplossingen die niet overeenkomstig de boordata zijn.

De gemodelleerde pleistocene opeenvolging bestaat uit verschillende lithostratigrafische eenheden die allemaal zijn samengenomen in PL. De fluviatiele, eolische en mariene afzettingen van deze ouderdom hebben elk hun eigen sedimenteigenschappen en dus potentiële toepassingen. Hademenos et al. (2018) laten zien dat de onzekerheid van een voxelmodel afneemt door een gedetailleerder lagenmodel. Daarom is een verdere uitsplitsing,



hoewel complex en tijdrovend, toch wenselijk. Met name in het zeewaartse deel is het onderscheid zonder aanvullende boor- en seismische gegevens moeilijk te maken.

### 4.3 Voxelmanmodel

#### 4.3.1 Lithoklasse

De lithoklassemodellering is aangepast ten opzichte van de eerdere versies van het DIS. De toegepaste 100x1 methodiek en de extra lithoklasse geven een natuurgetrouwer beeld. Er is minder versnippering van de stoorlagen waarneembaar. De gesplitste lithoklasse blijkt ook op basis van de globale proporties (Figuur 10) een waardevolle toevoeging aan het DIS. Ook in de winbaarheidsgrids (Figuur 13) is een duidelijk verschillende verdeling tussen matig grof en zeer grof zand waarneembaar.

#### 4.3.2 Slibklasse

De huidige gekozen definitie van winbaarheid bepaalt dat slibgehalte niet wordt meegenomen als stoorlaagindicator. Dit betekent dat het slibklassemodel niet van invloed is op de winbaarheidsgrids. Er kan echter in de toekomst met een winbaarheidsscenario gerekend worden waarbij slibgehalte wel van invloed is. De gemodelleerde hogere slibgehaltenes in het zuiden en langs de landwaartse rand van het modelgebied geven aan dat een dergelijk scenario zeker toegevoegde waarde heeft. Het is daarbij goed om te realiseren dat de lage datadichtheid van slibklassegegevens leidt tot weinig correlatie tussen de bestaande boringen. In de boorbeschrijvingen is slib vaak niet beschreven, wat kan betekenen dat het a) niet aanwezig is, b) niet waargenomen is, c) niet bemonsterd is, of d) niet genoteerd is. Voor de slibmodellering gaan we momenteel uit van optie d. Voor de diepere boringen (>6 m) is het slibgehalte veelal onderschat, ook als het wel nauwkeurig beschreven of gemeten is. Bij de meeste spoelboringen verdwijnt namelijk een groot deel van de fijne fractie in het opgeboorde sediment met het spoelwater overboord. Om een beter beeld te krijgen van de werkelijke hoeveelheden slib kunnen we extra onderzoek doen om bijvoorbeeld de hoeveelheid slib alleen te bepalen aan de hand van de gestoken boringen. Deze proporties kunnen we per gekarakteriseerde eenheid dan ook gebruiken voor de spoelboringen. Nadeel is dat het aantal steekboringen in dieper gelegen eenheden beperkt is; de hieruit afgeleide slibonderschatting zal vooral indicatief zijn.

#### 4.3.3 Schelpenklasse

De schelpenklassemodellering geeft een beeld waarop het lijkt alsof er relatief dikke (~2 m) lagen met veel schelpen (10-30%) zijn. Een belangrijke factor daarbij is de kwaliteit van de boringen, monsters en beschrijvingen alsmede de datadichtheid. Voor bijvoorbeeld spoelboringen die per meter interval beschreven zijn, is het aannemelijk dat de hoeveelheid schelpen lager ligt dan beschreven, onder andere door oververtegenwoordiging van de grove schelpenrijke fractie, of dat er dunne vrijwel zuivere schelpenlagen in situ in het interval aanwezig waren maar dat deze en het verstoorde monster gemiddeld worden over de gehele meter. Waar deze spoelboringen domineren, vooral nabij de vaargeul naar de haven en ver uit de kust, is het patroon van dikke schelphoudende lagen het sterkst. In werkelijkheid kunnen deze lagen dus wat dunner zijn. Voor de zandwinning is deze onnauwkeurige weergave echter niet van invloed omdat schelpenrijke en schelpenarme lagen daarbij worden gemengd. Er is

geen urgente reden om de huidige methodiek aan te passen omdat de hoeveelheid schelpen momenteel geen rol speelt bij bepaling van de winbaarheidsgrids.

#### 4.4 Datadichtheid en kwaliteit

Ten grondslag aan het lagenmodel liggen de stratigrafische boorinterpretatie en de seismische interpretatie. De kwaliteit van het model wordt, in volgorde van belang, voornamelijk bepaald door onderstaande factoren:

- datadichtheid,
- datakwaliteit,
- mate van overeenstemming tussen de databronnen.

Uit de dataverdeling van de boringen en seismiek van Figuur 1 en Figuur 2 is duidelijk af te leiden dat er sterke verschillen in datadichtheid zijn. De kwaliteit en betrouwbaarheid van het model nemen gemiddeld gesproken af met de diepte en met de afstand tot de kust. De grootste winst in modelkwaliteit is te behalen door het verhogen van de datadichtheid waar deze op dit moment het laagst is. Dit kan op twee manieren:

- inwinnen nieuwe data in data-arme deelgebieden,
- verrijken en gebruiken van alle bestaande data.

Onder het eerste punt zou gestreefd moeten worden naar een seismisch grid van 2 x 2 km en een op basis van deze seismiek geplande set boringen die op interessante delen van seismische lijnen en bij voorkeur op lijnenkruisingen liggen. Een indicatieve gemiddelde datadichtheid voor deze boringen die als ground-truthing bij de interpretatie van seismiek kunnen worden gebruikt, is 1 per 16 km<sup>2</sup>. Op basis van de datadichte gebieden nabij de kust is ingeschat dat een dergelijke datadichtheid een voldoende informatieve kartering van de ruimtelijke patronen van de stoorlagen op zou moeten leveren.

Onder het tweede punt vallen het lithostratigrafisch labelen en naar facies indelen van alle boorbeschrijvingen in DINO, het digitaliseren van analoge gegevens in het archief van TNO-GDN die nog extra inzicht kunnen geven, en het beschrijven van monsters uit ongeopende verpakkingen in het Kernhuis van TNO-GDN.

De datakwaliteit is variabel; in het DIS wordt gekeken naar afwijkingen in verticale positie ten opzichte van de bathymetrie, in laagovergang ten opzichte van de seismische interpretatie, en in lithoklasse ten opzichte van de omliggende boringen. De punten die te veel afwijken worden niet meegenomen bij de modellering. In de huidige berekeningen van het DIS wordt geen rekening gehouden met overige onzekerheden als gevolg van de variabele datakwaliteit. Kint et al. (2020) hebben voorgesteld om boringen te voorzien van kwaliteitslabels en hier bij vervolgmmodellering rekening mee te houden. Dit zou bijvoorbeeld voor de locatiebepaling en boormethode van toegevoegde waarde kunnen zijn. In het modelgebied is de datadichtheid echter dermate laag dat eliminatie van minder betrouwbare data meer nadelen dan voordelen heeft.

Om de mate van overeenstemming tussen de databronnen seismiek en boorbeschrijvingen te verhogen is het aan te raden alle niet gelabelde boringen al tijdens de kartering te voorzien van een stratigrafisch en facieslabel. Dit kan handmatig of semiautomatisch gebeuren aan de hand van lithologische kenmerken, en dient voortdurend te worden gespiegeld aan ruimtelijke informatie uit seismiek.

#### 4.5 Implicaties voor de winbaarheidsgrids

In het doorgerekende scenario (voormalig B2) spelen slibklasse en schelpenklasse geen rol. De daaraan gerelateerde onzekerheden zijn in de berekening van de winbaarheidsgrids dan ook niet van invloed. Als voor scenario C wordt gekozen, hebben zowel de onderschatting van het slibgehalte als de vrijwel willekeurige verdeling van slibhoudende voxels in de modelruimte een negatieve invloed op de betrouwbaarheid van de winbaarheidsgrids. In dit scenario moet cumulatief minimaal 1 m sediment (2 voxels dik) met  $\geq 4\%$  slib aanwezig zijn om als stoorlaag aangemerkt te worden. De top van de tweede matig sterk tot sterk slibhoudende voxel, de basis van het winbare zand, vertoont niet het verwachte subhorizontale patroon maar een door ruis gedomineerd zeer onregelmatig vlak. Een aan de hand daarvan gedefinieerd extractieplan zou in de praktijk onuitvoerbaar zijn.

Voor de in scenario B2 belangrijke lithoklasse is na de gemaakte optimalisatieslag ten opzichte van DIS offshore Zeeland hoofdzakelijk de datadichtheid nog een factor die de betrouwbaarheid van het winbaarheidsgrid beïnvloedt. Lokaal vertegenwoordigt een enkel datapunt tot wel 15 miljoen m<sup>3</sup> sediment. Om het juiste zand te kunnen winnen, is de grootste verbetering te verwachten van nieuwe seismische en boorcampagnes die zijn gericht op data-arme gebieden. Daarnaast is aanvulling van ontbrekende slibgehalten in bestaande boorbeschrijvingen van groot belang, en kan tegelijkertijd naar alternatieve benaderingen worden gezocht om qua slibgehalte risicovolle gebieden in kaart te brengen.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

Ondanks een overwegend lage dichtheid van boringen en seismiek is voor modelgebied offshore Zuid-Holland een lagenmodel gemaakt dat de ruimtelijke verbreiding van lithostratigrafische eenheden op grote schaal (van land naar zee 5-25 km<sup>2</sup>) werkelijkheidsgetrouw weergeeft. De belangrijkste aandachtspunten bij verdere optimalisering zijn precisering van het onderscheid tussen in elkaar uitwiggende kustnabije NAZA en zeewaartse SB, en nadere opdeling van PL. Ten opzichte van DIS 3.0 voor offshore Zeeland is naast toevoeging van twee daar niet onderscheiden eenheden vooral de modellering van het vroeg Holoceen verbeterd en kon de schijnbare invloed van zeebodemreliëf op onderliggende lagen worden weggefilterd.

Het aan de hand van dit lagenmodel gegenereerde voxelmodel voor drie attributen (lithoklasse, slibklasse, schelpenklasse) heeft zowel pluspunten ten opzichte van DIS 3.0 voor offshore Zeeland (een natuurgetrouwer beeld door de toegepaste 100x1 methodiek en opsplitsing van een breed gedefinieerde lithoklasse) als bekende tekortkomingen (ruizige verdeling van slibklasse die alleen dieptegemiddeld van waarde is, onderschatting van slibgehalte in database).

Uit het tweede modelgebied van DIS 3.0 zijn weer een aantal belangrijke lessen getrokken die voor de volgende gebieden een verbetering opleveren zodat winbare volumes en bijbehorende zandkwaliteit beter kunnen worden toegespitst op het diverse eindgebruik. Voor goede besluitvorming bij een groeiende zandvraag zijn modelresolutie en systeembegrip onontbeerlijk. Daarvoor moeten in volgorde van impact de volgende stappen worden gezet:

- Voor data-arme gebieden extra data inwinnen (seismiek of seismiek met boringen). Indicatieve aanbevelingen zijn een seismisch grid van minimaal 2 x 2 km en één voor ground-truthing van de seismiek geschikte boring per 16 km<sup>2</sup>. Hiermee verbetert het oplossende vermogen van het model in de data-arme gebieden van ongeveer 15 miljoen m<sup>3</sup> naar 2 miljoen m<sup>3</sup> (2 km x 2 km x 0,5 m).
- Onderzoeken of de slibklasseverdeling en -modellering aangepast kunnen worden om de extreem lage datadichtheid minder te laten doorwerken in het voxelmodel. Kunnen alle boorintervallen voorzien worden van een slibklasse en moet de boormethodiek meegenomen worden bij de bepaling van de slibklasse van die boring? Dit kan getest worden voor het volgende DIS-modelgebied. Vervolgens kan er onderzocht worden of de slibklasse juist wel in het gekozen winbaarheidsscenario moet worden verwerkt, en op welke manier.
- Onderzoeken of de modeleenheid PL verder onder te verdelen valt. Deze bevat nu sterk van elkaar verschillende fluviatiele, mariene, kust- en eolische afzettingen. Zeker als het ambitieniveau voor passend zand wordt verhoogd en attributen als afronding en mineralogische samenstelling belangrijker worden, is een dergelijke onderverdeling van toegevoegde waarde. Dit kan door een pilotstudie uit te voeren in een deelgebiedje waarvoor voldoende data beschikbaar is.
- Alle bestaande boorbeschrijvingen van een lithostratigrafische interpretatie voorzien om zo de datadichtheid voor de lagenmodellering te vergroten.
- Het DIS van extra informatie voorzien door onderzoek te doen naar aanvullende eigenschappen van de eenheden uit het lagenmodel, zoals het grindpercentage, de hoekigheid en het kalkgehalte van het sediment. De toegevoegde waarde hiervan kan getest worden voor het volgende DIS-modelgebied.

- Nog verder integreren van de kartering en de modellering, om een betere afstemming tussen de verschillende databronnen te krijgen en vooral om seismische interpretaties te kunnen herzien.
- Onderzoeken of aanvullende bestaande databronnen als 3D exploratieseismiek gebruikt kunnen worden om het volume aan beschikbare data te vergroten. Door middel van een inventarisatie kan worden gekeken of bestaande 3D data voor het volgende te onderzoeken DIS-gebied kwalitatief goed en dus bruikbaar is. In andere gebieden van de Noordzee geeft 3D seismiek voor olie en gas inzicht in het lateraal voorkomen van pleistocene en holocene geulen met een afwijkende lithologie (mogelijke stoorlagen).

Tussentijdse aanpassingen in het modelleerprotocol, van deelgebied tot deelgebied, zijn dusdanig waardevol dat niet moet worden gewacht tot de gehele winzone van Cadzand tot Schiermonnikoog in DIS 3.0 is verwerkt. Resulterende inconsistenties tussen gemodelleerde gebieden betreffen vooral verbeterde ruimtelijke resolutie en betrouwbaarheid, niet de classificatie van de ondergrond zelf.

Tot slot is het van belang om de het lagen- en voxelmodel toegankelijker en makkelijker vindbaar te maken voor gebruikers, door bijvoorbeeld aan te sluiten bij de ondergrondmodellen op DINOloket (<https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>).

## 6 Referenties

Hademenos V, Stafleu J, Missiaen T, Kint L, Van Lancker VRM, 2018. 3D subsurface characterisation of the Belgian Continental Shelf: a new voxel modelling approach. *Netherlands Journal of Geosciences* 98, e1. <https://doi.org/10.1017/njg.2018.18>.

Hendriks E, Schuurman F, 2017, Modelling alternatieve loswal locaties, Deltares/royal Haskoning DHV, rapport 1230860-000-ZKS-0008  
<https://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/127633780/1230860-000-ZKS-0008-r-Modelling%20alternatieve%20loswal%20locaties.pdf?version=2&modificationDate=1509612901748&api=v2>.

Hijma MP, van der Spek AJF, van Heteren S., 2010. Development of a mid-Holocene estuarine basin, Rhine–Meuse mouth area, offshore the Netherlands. *Marine Geology* 271: 198-211.

Kint L., Hademenos V., De Mol R., Stafleu J., van Heteren S., Van Lancker V., 2020. Uncertainty assessment applied to marine subsurface datasets 2020-09. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 54: p. 13.

Stafleu J, Stam JC, Menkovic A, Koster K, de Bruijn R, Hummelman HJ, Heerema C, van de Ven TJM, Dabekaussen W, Kiden P, Busschers F, 2022. Totstandkomingsrapport GeoTOP – aanvullingen bij versie v1.5. TNO-rapport R12127, <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid:6b89d962-1128-4ef8-a9b7-2b8fc8e8a245>.

Rieu R, van Heteren S, van der Spek AJF, de Boer PL, 2005. Development and preservation of a mid-Holocene tidal-channel network offshore the western Netherlands. *Journal of Sedimentary Research* 75: 413-423.

Rijsdijk K, Passchier S, Weerts HJT, Laban C. van Leeuwen RJW, Ebbing J, 2005. Revised Upper Cenozoic stratigraphy of the Dutch sector of the North Sea Basin: towards an integrated lithostratigraphic, seismostratigraphic and allostratigraphic approach. *Netherlands Journal of Geosciences* 84. 10.1017/S0016774600023015.

Stam JC, 2020. DIS Zeeland Lagenmodellering, TNO-notitie 060.39381-02iv 100329120.

Stam JC, van Heteren S, 2020. DIS Zeeland Lagenmodellering, TNO-notitie 060.39381-02iv 100329120.

TNO-GDN, 2023. Southern Bight Formatie. In: Stratigrafische Nomenclator van Nederland, TNO – Geologische Dienst Nederland. Geraadpleegd op 17-01-2023 op <http://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/southern-bight-formatie>.

## 7 Ondertekening

Naam en paraaf tweede lezer

Dr. S. van Heteren

Ondertekening

Autorisatie vrijgave

J.C. Stam MSc  
Auteur

Drs. D. Maljers  
Research Manager Geomodellling