

Validatie van de potentiële opbrengst van Dynamic Tidal Power aan de Nederlandse kust



Validatie van de potentiële opbrengst van Dynamic Tidal Power aan de Nederlandse kust

Auteur(s)

Anton de Fockert (Deltares),
Theo van der Kaaij (Deltares),
Erik Schulte Fishedick (Witteveen+Bos),
Luuk Jordans (Witteveen+Bos),
Caroline Gautier (Deltares),
Freek Scheel (Deltares),
Sebastian Mestdagh (Deltares),
Yvonne Koldenhof (Marin),
Arne van der Hout (Deltares)

Validatie van de potentiële opbrengst van Dynamic Tidal Power aan de Nederlandse kust




Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken
Contactpersoon	Lisanne Brummelhuis / Marjolein van Splunder
Referenties	DGBI / 33857302
Trefwoorden	DTP, getijden energie, kosten, ecologie, waterveiligheid, sedimentatie, scheepvaart

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	28-03-2024
Projectnummer	11209585-000
Document ID	11209585-000-HYE-0004
Pagina's	97
Classificatie	
Status	definitief

	Auteur(s)	Review / advies
Hydrodynamica en energieopbrengst	Anton de Fockert (Deltares) Theo van der Kaaij (Deltares)	Bas van Vossen (Deltares)
Kosten	Erik Schulte Fishedick (Witteveen+Bos) Luuk Jordans (Witteveen+Bos)	Coen Kuiper (Witteveen+Bos) Daniel Dusseljee (Witteveen+Bos)
Waterveiligheid	Caroline Gautier (Deltares)	Jacco Groeneweg (Deltares)
Sediment en slib-transport	Freek Scheel (Deltares)	Arjen Luijendijk (Deltares) Bas van Maren (Deltares) Bas Huisman (Deltares)
Ecologie	Sebastiaan Mestdagh (Deltares)	Luca van Duren (Deltares) Erwin Winter (WUR)
Scheepvaart	Yvonne Koldenhof (Marin) Arne van der Hout (Deltares)	Hugo Ammerlaan (Marin)

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Anton de Fockert (Deltares) 	Bas van Vossen (Deltares) 	Remon Pot (Deltares) 

Samenvatting

Aanleiding

Stichting Dynamic Tidal Power (DTP) ziet veel potentie in getijdenenergie en wil getijdenenergie opwekken door een tientallen kilometers lange strekdam (DTP dam) haaks op de Nederlandse kust te plaatsen. Door de DTP dam ontstaat er een waterstandsverschil aan weerszijden van de dam. Het waterstandsverschil kan met in de DTP dam geplaatste turbines worden omgezet in elektriciteit. Door het plaatsen van vleugeldammen aan het eind van de dam kan het waterstandsverschil en daarmee te energieopbrengst nog verder worden vergroot.

In 2020 is een analyse uitgevoerd door TNO naar de potentie van elektriciteitsopwekking uit water (ref: TNO, 2020). TNO geeft in dit rapport aan dat potentie van een DTP dam groot is, maar dat er nog veel onzekerheid en onduidelijkheid bestaat rondom het DTP principe. In 2021 is de motie van de Kamerleden Grinwis en Stoffer om de potentiële opbrengst van DTP energiedammen te onderzoeken en valideren aangenomen (ref: Tweede kamer - 2021). In de motie wordt genoemd dat een DTP dam tot wel 50% van de Nederlandse elektriciteitsbehoefte op zou kunnen wekken. Naar aanleiding van deze motie heeft het ministerie van Economische Zaken Deltares gevraagd om onderzoek te doen naar de potentiële opbrengst van Dynamic Tidal Power aan de Nederlandse kust.

Omdat de invloed van een DTP dam lokale, maar ook grootschalige invloed kan hebben op stromingen, waterveiligheid, zandtransporten, ecologie en scheepvaart, is het van belang de effecten van deze manier van energieopwekking grondig te onderzoeken. Het doel van de huidige studie is daarom tweeledig:

- Het bepalen van de prijs per kilowattuur, door de energie opbrengst van de dam te berekenen en een inschatting te maken van de totale kosten van dam gedurende de levensduur.
- Inzicht geven in de impact van de constructie op de omgeving, met speciale aandacht voor ecologie, zandtransport, kustbescherming en scheepvaart.

Energieopbrengst

Om de energieopbrengst en de prijs per kilowattuur te bepalen is er een berekening gemaakt met een DTP dam op 2 locaties aan de Nederlandse kust. De locaties en vormen van de dam die in deze studie zijn beschouwd zijn door de Stichting DTP voorgedragen. De eerste dam ligt bij IJmuiden en staat loodrecht op de Nederlandse kust. Aan het eind van de dam zitten 2 vleugeldammen in de vorm van een "Y". De dam steekt hiermee tot zo'n 53 km uit de kustlijn. De DTP dam bij Maasvlakte 2 is in zuidwestelijke richting georiënteerd en komt daarmee zo'n 22 km uit de kustlijn te liggen.



De energieopbrengst is voor beide varianten van de DTP dam bepaald. Om de energieopbrengst te bepalen zijn er twee hydrodynamische modellen aan elkaar gekoppeld. De waterbeweging in de Noordzee is uitgerekend met het gevalideerde D-Hydro Dutch Continental Shelf model (DCSM) en de energieopbrengsten van de turbine zijn uitgerekend met behulp van WANDA. Door deze softwarepakketten aan elkaar te koppelen kan de energieopbrengst van de 1050 turbines in de dam nauwkeurig worden bijgehouden, terwijl de effecten van de doorstroming van de turbines op de waterbeweging in de Noordzee wordt meegenomen¹. In het ontwerp zijn visvriendelijke turbines van Pentair-Nijhuis meegenomen, die in beide richtingen energie kunnen genereren.

De hydrodynamische modellering laat zien dat de effecten van de DTP dammen merkbaar zijn in een groot deel van de Noordzee. In de Waddenzee, bedraagt het maximale waterstandsverschil meer dan 15 cm voor de IJmuiden variant en 5 cm voor de variant bij de 2^e Maasvlakte. Ook voor de Engelse kust, de monding van de Thames, en bij de kust van Denemarken heeft de DTP dam bij IJmuiden een merkbaar/meetbaar verschil in waterstand (tussen de 5 en 15 cm) tot gevolg. Dit heeft mede te maken met het verschuiven van het amfidromisch punt in de Noordzee.

De investeringskosten (CAPEX) en de instandhouding en operationele kosten (OPEX) zijn geraamd voor beide varianten van de DTP dam. Hierbij is het bestaande conceptontwerp dat door de Stichting DTP is aangeleverd gebruikt als uitgangspunt. Uit de technische evaluatie van het bestaande ontwerp, kwamen een aantal punten naar voren die vanuit waterbouwkundig oogpunt niet realistisch zijn. Deze punten zijn aangepast in een alternatief ontwerp met dezelfde kruinhoogte, maar met realistischere ontwerpdimensies ten aanzien van bijvoorbeeld taludhellingen, laagdiktes en breedtes. De kosten van dit aangepaste ontwerp zijn gebruikt om de elektriciteitskosten, kosten per kilowattuur, in deze studie te bepalen. Tweede orde kosten die ontstaan door aanleg van de DTP dam (denk aan extra bagger bezwaar, kustbescherming, natuurherstel, omvaarkosten, etc.) zijn niet meegenomen in deze studie. De studie bevat enkel de kosten van de dam zelf.

In de onderstaande tabel is weergegeven hoeveel energie er kan worden opgewekt met beide varianten van de DTP dammen. Daarnaast is de prijs per kilowattuur uitgerekend. Door onzekerheden in de kosten van de DTP dam kan de kostprijs zo'n 40% hoger of lager liggen dan de waarden zoals weergegeven in de onderstaande tabel.

	DTP IJmuiden	DTP Maasvlakte 2
Max. vermogen (MW)	3430	836
Energie opbrengst per jaar (mld kwh)	5.55	1.39
Percentage t.o.v. nationaal verbruik	4.6%	1.2%
CAPEX (mld euro)	36	33
OPEX voor 50 jaar (mld euro)	6.25	5.75
TCO (mld euro)	42.25	38.75
Prijs / kwh	€ 0.15	€ 0.56

De auteurs verwachten dat de totale energieopbrengst voor het DTP concept in de Noordzee niet veel te verhogen valt door andere turbines toe te passen. Een andere locatie zou eventueel

¹ Indien de doorstroming van de turbines niet wordt meegenomen in de modellering, dan leidt dit tot een groter verval over de DTP dam en daarmee tot een hogere energieopbrengst. In het geval van DTP IJmuiden zou de energieopbrengst 2.5 keer zo groot worden. Dit is onrealistisch, aangezien de dam door de turbines gedeeltelijk waterdoorlatend is.

hogere energieopbrengsten kunnen geven, maar dit is niet verder onderzocht in deze studie omdat deze locaties door de Stichting DTP als meest kansrijk zijn bestempeld.

Impact op de omgeving

De effecten de DTP dam op de omgeving zijn beschouwd door middel van expert reviews voor de volgende aspecten: waterveiligheid, sedimenttransport, ecologie en scheepvaart. De auteurs zijn zich er terdege van bewust dat deze onderwerpen niet alle aspecten omvatten van de impact die een DTP dam in de Noordzee kan hebben. De beschouwde aspecten geven een eerste indicatie van de belangrijkste te verwachten effecten op de omgeving.

Om de impact op de waterveiligheid te bepalen zijn een aantal indicatieve sommen uitgevoerd met stormen uit noordwestelijke en zuidwestelijke richting. Voor beide varianten van de DTP dam zijn de effecten vergelijkbaar: de DTP dam kan plaatselijk voor een hogere waterstand zorgen, maar de golfimpact is vaak wel minder door de beschuttende werking van de DTP dam. De beschutte werking is bij een loodrechte dam bij IJmuiden slechts in een beperkt gebied rondom de dam, omdat de golven om de dam heen kunnen draaien en zo toch de kust kunnen bereiken. Op basis van een eerste inschatting is het niet eenduidig te beoordelen of de kust plaatselijk moet worden versterkt om het huidige veiligheidsniveau te behouden.

Er is een kwalitatieve analyse uitgevoerd naar de effecten op het zand en slib transport in de Noordzee. Doordat de DTP dammen invloed hebben op de getijdenstroming en het golfklimaat in de kustzone verandert, treden er grote veranderingen op door de aanleg van een DTP dam. Door de dammen ontstaan lokale luwtezones en zones met verhoogde turbulentie. Daarnaast verminderen de DTP dammen het residuele (netto) transport van zand en slib richting de Waddenzee sterk. Het zandtransport langs de kust zal ervoor zorgen dat de kustlijn verandert. Dit leidt tot frequent extra kustonderhoud met verhoogde baggerinspanningen om zand te verplaatsen langs de Nederlandse kust. Daarnaast is er een significante slibvangst te verwachten in de luwtezones bij de DTP dam (met name bij Maasvlakte 2). Dit leidt tot een verhoogd slibgehalte op de bodem en verhoogde troebelheid (vooral bij stormen).

De aanleg en aanwezigheid van een DTP-dam in het Nederlandse deel van de Noordzee zal een significante ecologische impact hebben. De impact zal tot ver buiten het projectgebied van de DTP dam en buiten de landsgrenzen aantoonbaar zijn. Het is de inschatting dat de effecten van een DTP-dam zodanig groot zijn dat nationale wetgeving en verplichtingen aangegaan in internationale verdragen rondom natuurbehoud in het gedrang komen. De Waddenzee heeft hierbij bijzondere aandacht doordat deze in zowel Nederland, Duitsland als Denemarken beschermd wordt en de status heeft als UNESCO Werelderfgoed. Het wordt onwaarschijnlijk geacht dat de impact van de huidige ontwerpen op migratieroutes van vissen en zeezoogdieren, en het verwachte verlies van foerageergebied in de Waddenzee (door slib/zandhonger) acceptabel is onder Europese regelgeving. Vaststelling hiervan viel echter buiten de scope van de huidige studie.

Als laatste wordt de invloed van de DTP dam op de scheepvaart beschouwd. De voorgestelde opties van de DTP-dammen doorkruisen bestaande vaarroutes en Internationale Maritieme Organisatie (IMO) routemaatregelen. Dit betekent een grote aanpassing van het totale ingestelde scheepvaartsysteem binnen de Nederlandse Exclusieve Economische Zone. Het is niet bekend of alternatieve routing mogelijk is. De IJmuiden variant doorkruist een belangrijke koopvaardij scheeproutes die door 28000 schepen per jaar worden gebruikt en een aantal offshore windparken. Daarnaast reikt de invloed van de DTP dam verder dan het uiteinde van de dam, omdat de stroompatronen nabij de uiteinden van de dammen wijzigen. Dit kan leiden tot aanpassingen in manoeuvreergedrag. Door de plaatsing van een DTP dam bij IJmuiden, wordt de haveningang van IJmuiden/Amsterdam moeilijker te bereiken waarbij rekening gehouden moet worden met extra baggerwerkzaamheden. De optie Maasvlakte 2 doorkruist een ankergebied waar jaarlijks zo'n 3000 schepen liggen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	10
1.1	Achtergrond	10
1.2	Doelstelling	10
1.3	Aanpak	11
1.4	Rapportbeschrijving	12
2	Uitgangspunten	13
2.1	Locaties DTP dam	13
2.2	Turbines	14
2.3	Kosten	15
2.3.1	Generieke uitgangspunten	15
2.3.2	Uitgangspunten bestaande ontwerp	16
2.3.3	Uitgangspunten alternatieve ontwerp	16
3	Waterbeweging Noordzee	18
3.1	Algemeen	18
3.2	Toepasbaarheid model	19
3.3	Schematisatie aanpassingen	20
3.4	Berekeningsresultaten	22
3.4.1	Algemeen	22
3.4.2	Waterstanden, waterstandsverschillen en Turbinedebieten IJmuiden variant	22
3.4.3	Waterstanden, waterstandsverschillen en Turbinedebieten Maasvlakte variant	24
4	Potentiële energieopbrengst	27
4.1	WANDA model	27
4.2	Energieopbrengsten	28
5	Kosten	31
5.1	Bestaand conceptontwerp	31
5.1.1	Technische evaluatie	33
5.1.2	Materiaal volumes	34
5.1.3	Evaluatie kosten	35
5.1.3.1	Betonwerk	35
5.1.3.2	Installaties	36
5.1.3.3	Indirecte kosten en risicoreservering	37
5.1.3.4	Instandhoudingskosten	37
5.1.3.5	CAPEX en OPEX van de DTP dam, locatie IJmuiden	37
5.2	Alternatief ontwerp	38
5.2.1	Dimensies alternatief ontwerp	38
5.2.1.1	Volume en dimensies Xbloc	38

5.2.1.2	Breuksteen onder- en filterlaag	39
5.2.1.3	Teenconstructie	39
5.2.1.4	Kruinbreedte	39
5.2.1.5	Kruinhoogte	39
5.2.1.6	Onderwatertalud	40
5.2.1.7	Caissons	40
5.2.1.8	Bodembescherming	40
5.2.1.9	Alternatief ontwerp	40
5.2.2	Materiaal volumes alternatieve ontwerp	41
5.2.3	Evaluatie kosten	43
5.3	Conclusies en aanbevelingen	44
5.3.1	Conclusies	44
5.3.2	Einde levensduur	44
5.3.3	Onzekerheidsmarge	45
5.3.3.1	Aanbevelingen	45
6	Prijs per kilowattuur	46
6.1	Elektriciteitskosten per kilowattuur	46
6.2	Gevoeligheidsanalyse	46
7	Effect op waterveiligheid	48
7.1	Introductie	48
7.2	Modelberekeningen	48
7.2.1	Waterstanden	48
7.2.2	Golven	51
7.3	Interpretatie en conclusie	52
8	Effect op sedimenttransport	54
8.1	Achtergrond	54
8.2	Sedimenttransport en morfologie nabij de Nederlandse kust	54
8.2.1	Relevante hydro- en golfdynamica	54
8.2.2	Grootschalig zandtransport	55
8.2.3	Grootschalig slibtransport	57
8.3	Effecten van een DTP dam	58
8.3.1	Effecten op hydro- en golfdynamica	58
8.3.2	Effecten op zandtransport	59
8.3.3	Effecten op slibtransport	61
8.4	Discussie	62
8.5	Conclusies	62
9	Effect op ecologie	64
9.1	Inleiding: ecologie van de Nederlandse kustzone	64
9.2	Relevante wettelijke kaders	64
9.3	Impact in de waterkolom	65
9.3.1	Impact door gewijzigd slibtransport	66
9.3.2	Impact op plankton	66
9.3.2.1	Fytoplankton en primaire productie	66

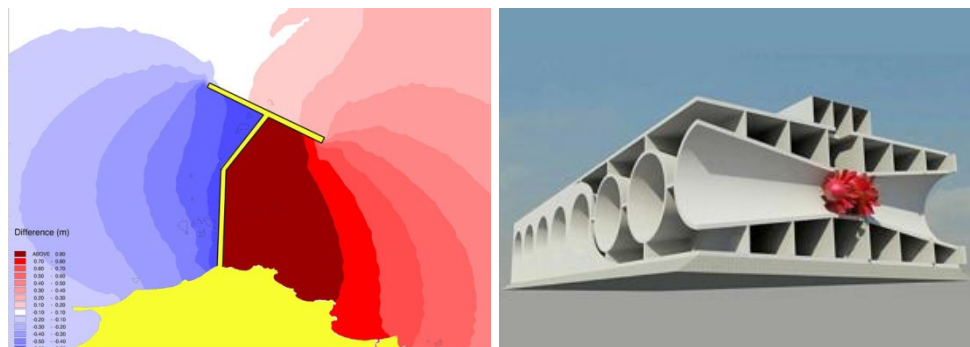
9.3.2.2	Zoöplankton en zoöbenthos (secundaire productie)	67
9.3.3	Impact van aangroei op de dam	67
9.4	Impact op bodemhabitats	68
9.4.1	Introductie van nieuw habitat	68
9.4.2	Habitatwijzigingen rondom de DTP-dam en op grote afstand	68
9.5	Impact op vissen, zeevogels en zeezoogdieren	69
9.5.1	Stand van de techniek	69
9.5.2	Mortaliteit en verwonding door getijdenturbines	69
9.5.3	Gedragwijzigingen	70
9.5.4	Verwachte soort-specifieke impact van een DTP dam in de Noordzee	71
9.5.4.1	Larventransport langs de kust	71
9.5.4.2	Vissen die migreren langs de kust	71
9.5.4.3	Vissen die migreren over lange afstand	74
9.5.4.4	Lokaal foeragerende vissen	74
9.5.4.5	Zeevogels	75
9.5.4.6	Zeezoogdieren	75
9.5.5	Potentiële mitigerende maatregelen	76
9.6	Conclusies	77
10	Effect op scheepvaart	78
10.1	Inleiding	78
10.2	Regelgeving - kader	79
10.2.1	IMO	79
10.2.2	UNCLOS - United Nations Convention on the Law of the Sea	80
10.2.3	Clearways – Mijnbouwwet	80
10.3	Scheepvaart in het kustgebied	80
10.3.1	Alternatieve routes binnen bestaande stelsel	84
10.4	Effect van veranderende stroompatronen	85
10.5	Observaties en aanbevelingen	86
10.5.1	Observaties/conclusies	86
10.5.2	Aanbevelingen	86
11	Referenties	88
A	Expert review DTP-dam en scheepvaart door MARIN	92
A.1	UNCLOS – Artikel 60	92
A.2	Ankergebied 4-east	94

1 Introductie

1.1 Achtergrond

Stichting Dynamic Tidal Power (DTP) wil getijdenenergie opwekken door een tientallen kilometers lange strekdam haaks op de Nederlandse kust te plaatsen, zie Figuur 1.1. Door de strekdam ontstaat er een niveau verschil tussen beide kanten van de strekdam. Dit niveauverschil kan met behulp van turbines omgezet worden in elektriciteit. Door het plaatsen van een T-stuk aan het eind van de dam kan het niveauverschil en dus de energieopbrengst toe nemen.

In 2020 is een analyse uitgevoerd door TNO naar de potentie van de opwek van elektriciteit uit water (ref: TNO, 2020). TNO geeft in dit rapport aan dat potentie van een DTP dam groot is, maar dat er nog veel onzekerheid en onduidelijkheid bestaat rondom het DTP principe. In 2021 hebben de Kamerleden Grinwis en Stoffer een motie ingediend (ref: Tweede kamer - 2021) waarin wordt beweerd dat een DTP dam tot wel 50% van de Nederlandse elektriciteit op zou kunnen wekken. Deze motie is aangenomen en heeft als doel onderzoek te ondersteunen naar de validatie en potentiële opbrengst van DTP energiedammen in zee. Deze motie vormt hiermee de basis voor deze studie.



Figuur 1.1: Geïnduceerd peilverschil, impressie van strekdam met turbines (Bron Stichting DTP).

Omdat de invloed van de strekdam lokale, maar ook grootschalige effecten kan hebben op stromingen, zandtransporten en ecologie, is het van belang dat de effecten van deze manier van energieopwekking grondig worden onderzocht om te kunnen bepalen of het een haalbaar concept is voor de Nederlandse kust.

1.2 Doelstelling

De huidige studie richt zich op de haalbaarheid van het concept DTP voor de Nederlandse kust door voor 2 locaties:

- De genivelleerde prijs per kilowattuur te bepalen, door de energie opbrengst van de dam te berekenen en een inschatting te maken van de totale kosten van dam gedurende de levensduur
- Inzicht te geven in de impact van de constructie op de omgeving, met speciale aandacht voor ecologie, zandtransport, kustbescherming en scheepvaart.

De inzichten uit deze studie dienen als input voor de politieke discussie over de haalbaarheid van het DTP concept als bron van duurzame energie voor de Nederlandse kust.

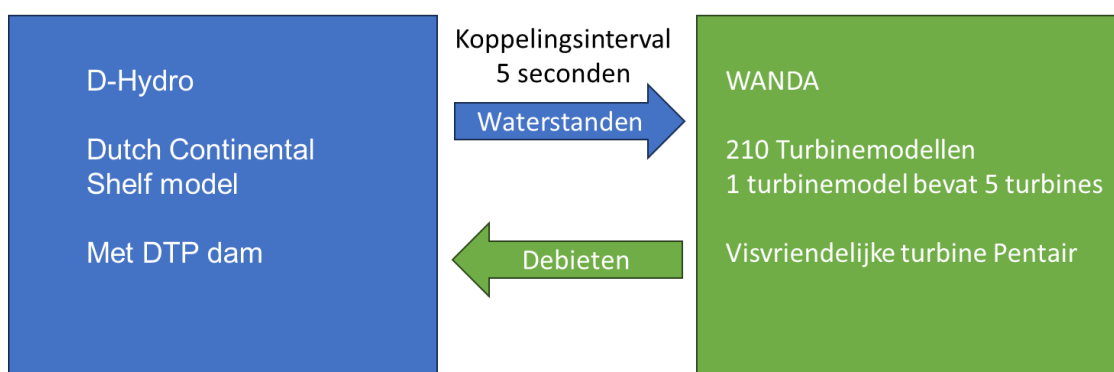
1.3 Aanpak

Om de haalbaarheid van het DTP concept te beoordelen, zijn er 2 locaties nader onderzocht: een dam loodrecht op de Nederlandse kust bij IJmuiden en een dam in zuidwestelijke richting bij de 2^e Maasvlakte. De locaties en het ontwerp van de DTP dam zijn voorgedragen door de Stichting DTP voor nader onderzoek omdat deze locaties als zeer interessant zijn beoordeeld.

N.B. Er zijn in het verleden meerdere partijen die gewerkt hebben aan het DTP concept. De eerste ontwikkelaars (Hulsbergen, Steijn) van het DTP concept hebben zich verenigd in de POWER groep. Daarnaast bestaat de Stichting DTP (Walraven, Hogeveen). Beide groepen hebben hun eigen visie over het ontwerp en locatie van een dam in de Noordzee. De POWER groep heeft aangegeven dat de Stichting DTP de uiteindelijke locatie en het ontwerp van de dam voor deze studie zal aanleveren. De locaties zijn daarom gespecificeerd door de Stichting DTP.

De ontwerpen die beoordeeld zijn in deze studie staan beschreven in Hoofdstuk 2. Het conceptontwerp dat de Stichting DTP heeft aangeleverd bestaat voornamelijk uit de civiele constructie. De Stichting DTP heeft hierbij geen gedetailleerde gegevens opgeleverd voor de energieopbrengsten van de turbines. Omdat de Stichting DTP heeft aangegeven gebruik te willen maken van visvriendelijke turbines is contact opgenomen met de turbinefabrikant Pentair-Fairbanks-Nijhuis (Pentair). Pentair heeft namelijk een visvriendelijke turbine ontworpen voor de POWER groep als onderdeel van het DTP-China project. Deze informatie is gebruikt om de energieopbrengsten van de DTP dam in de Noordzee te bepalen.

Om de energieopbrengsten van de DTP dam uit te rekenen is een koppeling gemaakt tussen het D-Hydro Dutch Continental Shelf model waar de stromingen in de Noordzee mee worden uitgerekend en het WANDA model waar de turbinespecificaties in worden beschreven. Deze modellen zijn met elkaar gekoppeld en iedere 5 seconden worden de waterstanden van D-Hydro aan WANDA door gegeven. WANDA maakt hiermee een berekening van de turbine opbrengsten en debieten en geeft de debieten weer terug aan D-Hydro om de waterstanden en de stromingen in de Noordzee mee uit te rekenen. In het ontwerp gaat de Stichting DTP uit van 1050 turbines met een breedte van 15 m per turbine. Omdat de waterstand niet veel varieert tussen 5 naast elkaar liggende turbines, zijn de turbines in groepen van 5 gemodelleerd. Dat betekent dat er 210 koppelingspunten zijn gemaakt.



De Stichting DTP heeft een kostenraming gemaakt voor de ontwerpen van de DTP dam. Hierbij hebben ze de kosten opgesplitst in elementen (denk aan turbines, elektriciteitssysteem, etc.), die gebruikt kunnen worden om een dam mee op te bouwen. Deze kostenberekening is geanalyseerd door kostenexperts van het adviesbureau Witteveen en Bos. Naar aanleiding van de analyse heeft Witteveen en Bos de kostenberekening aangescherpt op basis van ervaringen met grote waterbouwkundige constructies. Deze kosten zijn uiteindelijk meegenomen om de prijs per kilowattuur te berekenen.

Naast potentiële energieopbrengst heeft de DTP dam ook grootschalige invloed op de omgeving. De effecten van de dam op de omgeving moeten worden onderzocht in een milieueffectbeoordeling. Voor deze haalbaarheidsstudie zijn de effecten van een aantal belangrijke aspecten voor de DTP dam in beeld gebracht door middel van expert reviews. In deze reviews worden de effecten op waterveiligheid, het sedimenttransport, de ecologie en de scheepvaart beschouwd.

1.4 Rapportbeschrijving

In Hoofdstuk 2, worden de uitgangspunten van de studie beschreven. Deze zijn aangeleverd door Stichting DTP als input voor deze studie. De waterbeweging in de Noordzee dient als uitgangspunt voor deze studie en de effecten van de DTP dam op deze waterbeweging worden beschreven in Hoofdstuk 3. Daarna wordt ingegaan op de potentiële energieopbrengst in Hoofdstuk 4 voor 2 configuraties van de DTP dam in de Noordzee: een dam bij IJmuiden en een dam bij de Maasvlakte. De energieopbrengst is bepaald met behulp van gevalideerde numerieke stromingsmodellen die de getijdenvoortplanting in de Noordzee in detail beschrijven. In Hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de investeringskosten (CAPEX) en de onderhoudskosten (OPEX) van de dam met daarbij de analyse van Witteveen en Bos op de kostenberekening van de Stichting DTP. In hoofdstuk 6 wordt de informatie van de hoofdstukken 3 tot en met 5 gecombineerd om de kostprijs per kilowattuur uit te rekenen. In de hoofdstukken 7 tot en met 10, worden de expert reviews op belangrijke omgevingsaspecten beschreven, respectievelijk waterveiligheid, sedimenttransport, ecologie en scheepvaart. Deze beschrijvingen zijn vooral kwalitatief van aard.

2 Uitgangspunten

De uitgangspunten van de studie zijn aangeleverd door de Stichting DTP en de informatie over de turbines is aangeleverd door Pentair-Nijhuis. Deze uitgangspunten staan beschreven in het uitgangspuntenrapport (de Fockert, 2023). De belangrijkste informatie voor de studie: de locatie en de turbines zijn overgenomen in dit hoofdstuk.

2.1 Locaties DTP dam

Er zijn veel verschillende locaties om de DTP dam toe te passen. Er zijn reeds meerdere studies uitgevoerd naar potentiële locaties van een DTP dam in de Noordzee door zowel de POWER groep (Hulsbergen et al, 2005 en Hulsbergen et al, 2008) als de Stichting DTP (Talstra et al, 2020). Zo zijn er ideeën om de dam aan de kust vast te maken of een dam in de Noordzee waar je omheen kunt varen (Talstra et al, 2020). Verder zijn er ook ideeën om meerdere dammen aan de Nederlandse kust te plaatsen, om zo meer energie op te wekken. Uiteindelijk heeft de Stichting DTP de volgende 2 locaties aangewezen als meest kansrijke locaties voor de DTP dam (Figuur 2.1). In deze studie wordt uitgegaan van 1 DTP dam in de Noordzee (dus of de IJmuiden variant of de 2^e Maasvlakte variant).



Figuur 2.1: Locaties en vormen van de varianten voor de DTP dam: DTP dam bij IJmuiden (rood) en een DTP dam in zuidwestelijke richting vanaf de 2^e Maasvlakte (groen).

1. IJmuiden: haaks op de kustlijn

Bij deze variant is er een dichte dam die de landaansluiting vormt tot een diepte van NAP -18.5 m (dit is ongeveer 10km uit de kust), daarna is er 22km beschikbaar waar 1050 turbines in worden geplaatst. Aan het eind van de dam zijn 2 dichte

vleugeldammen gekoppeld om het getijdenverschil over de dam zo groot mogelijk te maken².

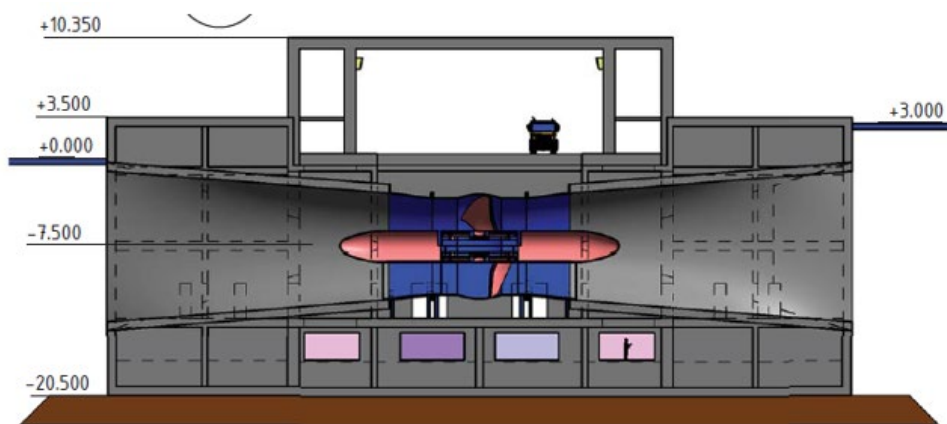
2. Maasvlakte 2: in zuidwestelijke richting

Bij deze variant wordt een dam onder een hoek in zuidwestelijke richting gebouwd vanaf de 2^e Maasvlakte. Er zitten geen vleugeldammen aan de hoofddam. Deze dam is 50km lang, waarbij ook de landaansluiting tot NAP -18.5m zo'n 10km lang is. Ook in deze dam zitten 1050 turbines.

Stichting DTP heeft aangegeven dat het aantal turbines verder geoptimaliseerd kan worden. Deze studie beschrijft een analyse naar 2 onafhankelijke dammen, waarbij geen verdere optimalisatie is uitgevoerd. Deltares gaat daarom in deze studie uit van 1050 turbines zoals aangegeven door de Stichting DTP.

2.2 Turbines

De Stichting DTP heeft aangegeven gebruik te willen maken van een visvriendelijke turbine van FishFlow Innovation. Deze turbine bestaat nog niet en de opbrengst van deze turbine is daarmee onduidelijk. Naast de visvriendelijke turbines van FishFlow Innovation, heeft ook Pentair-Fairbanks-Nijhuis een visvriendelijke turbine³ beschikbaar (ref: Nijhuis Pompen BV - 2014). Deze turbine is ontwikkeld als onderdeel van het DTP China project. De opbrengst van deze turbine is getest door Pentair in een afnametest, waardoor de vermogens van de turbines bekend zijn. De afname testen zijn uitgevoerd op een geschaalde turbine (schaal 1:16). Met de affiniteitsregels is het gedrag van deze turbine te verscalen naar prototype afmetingen. De vermogens van de turbines zijn gecorrigeerd voor zeewatercondities waar het water een hogere dichtheid heeft dan voor de geteste condities in zoet water. De visvriendelijkheid van deze turbine is getest in het Pro-Tide project door een onafhankelijk adviesbureau. Vanwege de beschikbare turbinekarakteristieken en vanwege de beschikbare rapportage over de visvriendelijkheid door een onafhankelijk adviesbureau, wordt voor dit project gebruik gemaakt van de Pentair-Nijhuis turbines.



Figuur 2.2: Doorsnede van de visvriendelijke turbine in het turbinehuis (zie Nijhuis Pompen BV - 2014)

De turbine heeft een turbinediameter van 8m en een instroomdiameter van 10m. De turbinekarakteristieken voor deze turbines zijn beschikbaar gesteld voor deze studie door Pentair-Nijhuis (ref: Nijhuis Pompen BV -2014). Er zitten geen regelkleppen in de turbines om de turbineoperatie mee te regelen of de turbines buiten bedrijf te stellen. Dat betekent dat bij een waterstandsverschil over de dam de turbines meteen in werking gaan. Pentair heeft

² N.B. de POWER groep gaat er vanuit dat het beter is om een T-vorm toe te passen dan een Y-vorm. De Y-vorm is uiteindelijk gebruikt op advies van de Stichting DTP.

³ <https://fairbanksnijhuis.pentair.com/en/products/bi-directional-turbine>

karacteristieken beschikbaar gesteld voor de turbine alleen, maar ook voor de turbine met de aanvoerkanalen en afvoerkanalen zoals te zien in Figuur 2.2.

De visvriendelijkheid van deze Pentair Nijhuis turbine is getest in het Pro-Tide project in 2015 door ATKB (Vriese et al, 2015). Hier is de geschaalde pomp in een testopstelling nabij de stuw in Maurik geplaatst waarbij het effect op snoekbaarzen, forel en paling is bepaald voor meerdere ontwerpen. De kans op sterfte van de snoekbaars was 6%, van de forel 1% en van de paling 0%, waarbij wordt opgemerkt dat dit vooral het geval was bij de hogere debieten en grotere vervallen (Q : $0.8\text{m}^3/\text{s}$ en dH : 0.8m). Bij lagere vervallen en debieten was de kans op sterfte nihil.

2.3 Kosten

De review van de kostenraming bestaat uit twee delen. In het eerste deel is het aangeleverde (bestaande) conceptontwerp van Stichting DTP geëvalueerd en zijn de materiaal volumes en bijbehorende kosten (voor locatie IJmuiden) bepaald (paragraaf 5.1). In het tweede deel is het alternatieve ontwerp van Witteveen+Bos toegelicht en zijn de volumes en kosten voor dit ontwerp bepaald voor de locaties IJmuiden en Maasvlakte 2 (paragraaf 3.2).

De uitgangspunten voor het bepalen van de volumes zijn te verdelen in:

- generieke uitgangspunten (van toepassing op het bestaande ontwerp én het alternatieve ontwerp);
- uitgangspunten bestaande ontwerp;
- uitgangspunten alternatieve ontwerp.

2.3.1 Generieke uitgangspunten

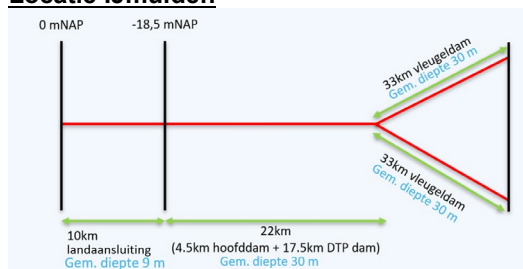
De volgende generieke uitgangspunten zijn toegepast in de review voor de kostenraming:

- voor de locaties zijn de lengtes voor de DTP dammen gehanteerd zoals weergegeven in tabel 5.2;
- gemiddelde diepte over de hoofdam en vleugeldam is NAP -30 m (beide locaties);
- gemiddelde diepte over de landaansluiting is NAP -9 m (beide locaties);
- de hydraulische condities in dit gebied zijn gebaseerd op ervaring van andere projecten binnen dit gebied. Gezien de huidige beperkte mate van detaillering van het project zijn er geen significante verschillen in de hydraulische belasting tussen de twee locaties. Daarom zijn voor beide DTP locaties dezelfde hydraulische belastingen aangehouden. Deze zijn:
 - levensduur van 100 jaar, zeespiegelstijging van +0,82 m op basis van KNMI 2023 scenario;
 - stormopzet van +5,2 m op basis van 1/10.000 jaar storm (Rijkswaterstaat, 2013)
 - zeespiegelstijging + stormopzet geeft een ontwerpwaterstand van NAP +6,02 m;
 - significante golfhoogte $H_{m0} = 9\text{ m}$;
 - gemiddelde golfperiode $T_m = 11\text{ sec}$.

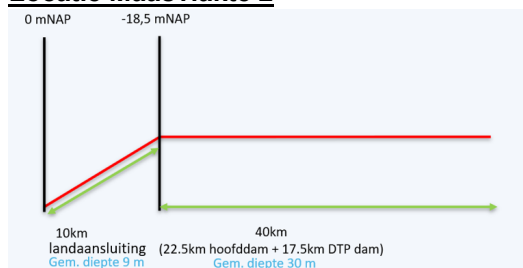
Tabel 2.1 Lengte verschillende dammen per locatie

Locatie	IJmuiden	Maasvlakte 2	Eenheid
landaansluiting, gem. diepte NAP -9 m	10,0	10,0	[km]
hoofdam, gem. diepte NAP -30 m	4,5	22,5	[km]
vleugeldam, gem. diepte NAP -30 m	66,0	-	[km]
DTP dam	17,5	17,5	[km]

Locatie IJmuiden



Locatie Maasvlakte 2



Figuur 2.1 Beschouwde afmetingen en dieptes van de dammen (niet op schaal)

2.3.2 Uitgangspunten bestaande ontwerp

De uitgangspunten voor het bepalen van de volumes van het bestaande ontwerp volgen uit een combinatie van tekeningen van Stichting DTP zoals weergegeven in het uitgangspunten rapport (de Fockert, 2023) en de berekeningen uitgevoerd door TNO (2020). Dit resulteert in de volgende set van uitgangspunten voor het bestaande ontwerp:

- voor het bestaande ontwerp zijn de hoogtes, laagdiktes en hellingen aangehouden zoals aangegeven in de aangeleverde dwarsdoorsnedes;
- drie soorten materialen zijn gebruikt in het ontwerp van de hoofddam en de vleugeldam, deze zijn in het ontwerp niet nader gespecificeerd. Deze review is uitgegaan van de volgende materialen:
 - kernmateriaal (van zand);
 - breuksteen (filter- en toplagen);
 - betonelementen (toplagen);
- aan beide zijden van de DTP dam is een bodembescherming aanwezig met een breedte van 500 m. Als uitgangspunt is gehanteerd dat deze bestaat uit granulair materiaal en een dikte heeft van 1 m;
- de laagdikte van het wegdek is niet aangegeven op de tekening. Voor de dikte van de hele verhardingsconstructie is 0,50 m aangehouden (0,30 m fundering en 0,20 m asfalt);
- de ontvangen documenten noemen dat er een landaansluiting aanwezig is. Dit betreft de dam tussen de aansluiting van de kust en de hoofddam met de turbines. Echter, in de materiaal volumes van het ontwerp van de DTP dam zijn de hoeveelheden van de landaansluiting niet meegenomen. Ten behoeve van de volumes voor het alternatieve ontwerp voor de landaansluiting is voor deze dam het vrijboord van de hoofddam aangehouden en de relatieve diepte van de teenconstructie (h_t/h) is constant gehouden. Waarin ' h_t ' de waterdiepte op de teen is en ' h ' de waterdiepte voor de teen.

2.3.3 Uitgangspunten alternatieve ontwerp

Er is een alternatief ontwerp gemaakt, omdat een aantal onderdelen vanuit waterbouwkundig oogpunt als niet realistisch werden beschouwd. Voor het alternatieve ontwerp zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

- het alternatieve ontwerp heeft dezelfde kruinhoogte als het bestaande ontwerp van de DTP dam;

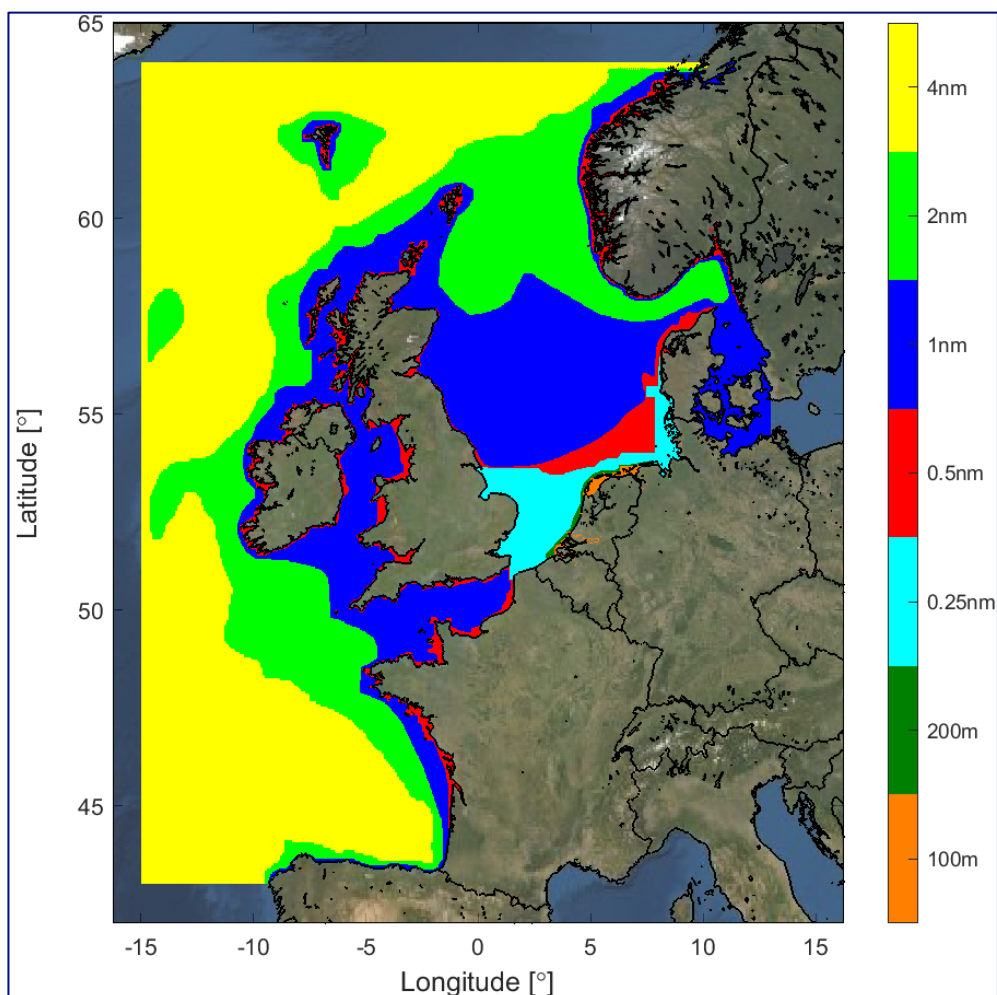
- de toplaag bestaat uit Xbloc rond de maatgevend hoogwaterlijn (locatie van de zwaarste golfaanval);
- de ontwerpdimensies zijn gebaseerd op de richtlijnen uit de Xbloc Manual (Delta Marine Consultants 2023);
- de breedte van het kruinelement en het wegdek op de kruin zijn gelijk aan bestaande ontwerp;
- de hoogte van het kruinelement is gelijk aan de laagdikte van het breuksteen onderlaag + de armour units, zodat praktisch een goede opsluiting gerealiseerd kan worden;
- breuksteensorteringen zijn niet nader gespecificeerd, maar voor de kosten is als uitgangspunt gehanteerd dat standaard sorteringen worden gebruikt conform de Rock Manual hoofdstuk 3 (CIRIA, CUR, CETMET – 2023);
- kernmateriaal van de dammen bestaat uit ongesorteerd granulair materiaal (zgn. quarry run).

3 Waterbeweging Noordzee

3.1 Algemeen

Een DTP dam produceert energie middels getijturbinen in de dam. Het turbinedebiet is een gevolg van de turbine afmeting en het type turbine in combinatie met de waterstandverschillen over de dam. Om de waterstandverschillen over een dam te kunnen schatten wordt in deze studie gebruik gemaakt van een gevalideerd waterbewegingsmodel van het gehele continentale plat. Het basismodel, het Dutch Continental Shelf model (DCSM), is uitgebreid beschreven in de Deltares rapportage (Zijl et al, 2022). De omvang van het model, in combinatie met de grootte van de rekencellen, wordt getoond in Figuur 3.1.

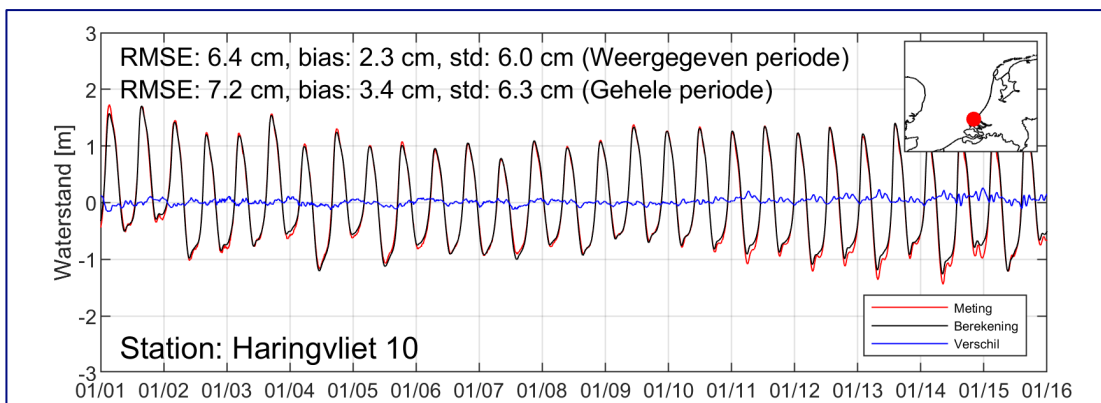
Het gebruikte rekenpakket is het bij Deltares ontwikkelde D-Hydro pakket. Hiermee kunnen waterstanden en stroomsnelheden worden uitgerekend gegeven een modelschematisatie waarmee een gebied wordt beschreven. Een globale beschrijving van het rekenpakket wordt verwezen naar: <https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/d-hydro-suite-2d3d>



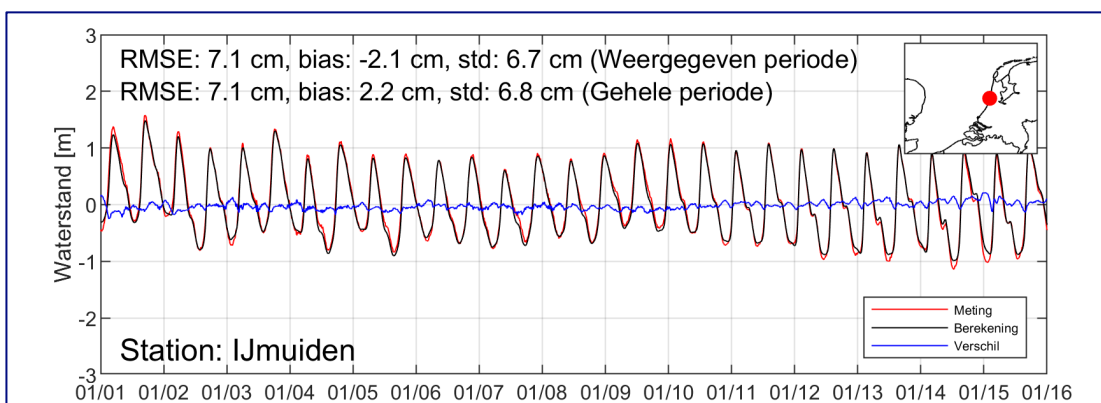
Figuur 3.1: Omvang en roostergrootte DCSM model (nm, nautical mile = 1853 m)

3.2 Toepasbaarheid model

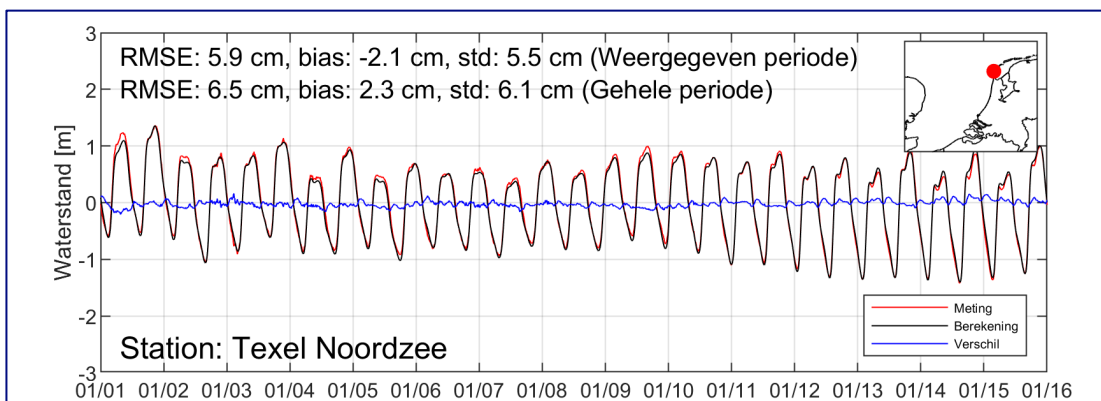
Voor de toepasbaarheid van het model is het noodzakelijk dat gemeten waterstanden, voornamelijk een gevolg van getij, luchtdruk en windopzet, goed worden gereproduceerd. De vergelijking tussen gemeten en berekende waterstanden, voor een 3-tal karakteristieke locaties langs de Nederlandse kust, wordt getoond in Figuur 3.2 - Figuur 3.4. De figuren laten zien dat waterstanden in de kustzone goed worden weergegeven door het model. Dit is niet beperkt tot de Nederlandse kustzone maar geldt in het gehele modeldomein, zie Zijl et al (2022).



Figuur 3.2: Vergelijking gemeten met berekende waterstanden, 1^e helft Januari 2013, meetlocatie HA10 (voor monding Haringvliet)



Figuur 3.3: Vergelijking gemeten met berekende waterstanden, 1^e helft Januari 2013, meetlocatie IJmuiden



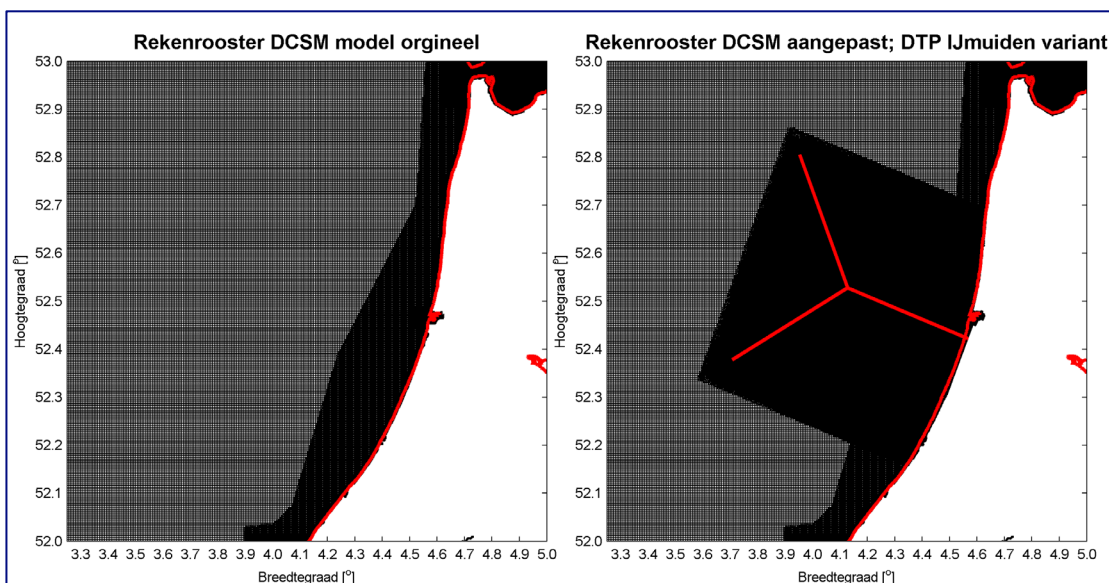
Figuur 3.4: Vergelijking gemeten met berekende waterstanden, 1^e helft Januari 2013, meetlocatie Texel

3.3 Schematisatie aanpassingen

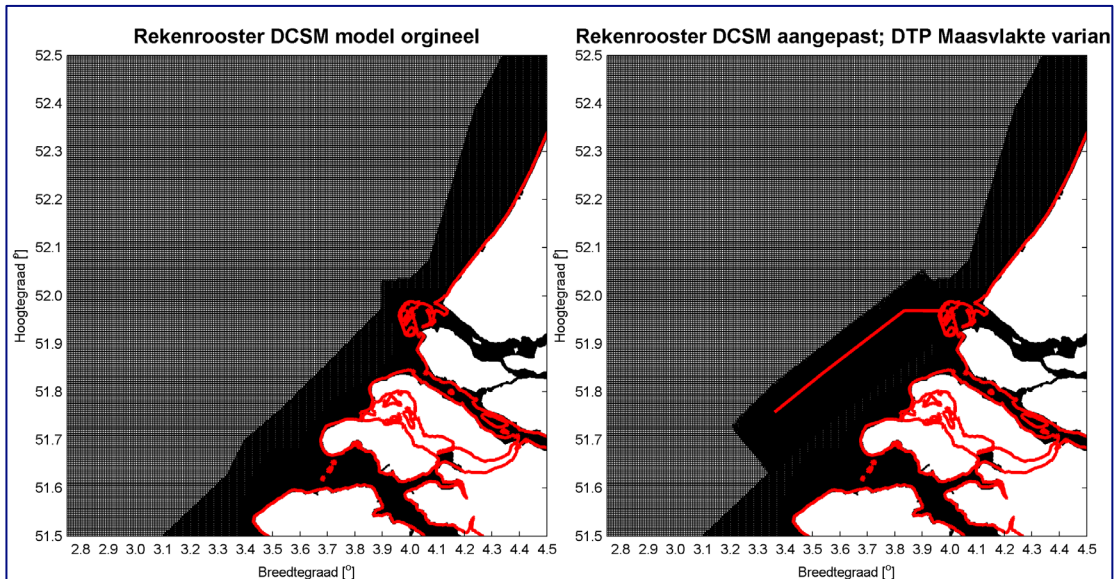
Ten behoeve van deze studie zijn 2 varianten van een DTP dam, IJmuiden variant en Maasvlakte variant, in de modelschematisatie opgenomen. Hiertoe zijn twee varianten gemaakt van het rekenrooster van het model. Aanpassingen aan het rekenrooster zijn noodzakelijk omdat in de oorspronkelijke modelschematisatie de oriëntatie van de rekencellen niet overeenstemt met de oriëntatie van de DTP dammen. Verder is de grootte van de rekencellen in de oorspronkelijke modelschematisatie niet toereikend om kleinschalige details in de waterbeweging in de nabijheid van de voorgestelde DTP dammen goed weer te geven.

Figuur 3.5 en Figuur 3.6 tonen zowel het rekenrooster van de oorspronkelijke modelschematisatie als de aangepaste rekenroosters voor zowel de IJmuiden als de Maasvlakte variant van de DTP dam. Ter plaatse van de dam(men) is de grootte van de rekencellen in de oorspronkelijke modelschematisatie ongeveer 400 m op zee en 100 m nabij de kust. In de aangepaste modelschematisaties is de grootte van de rekencellen 75 m langs de gehele dam, zie Figuur 3.8.

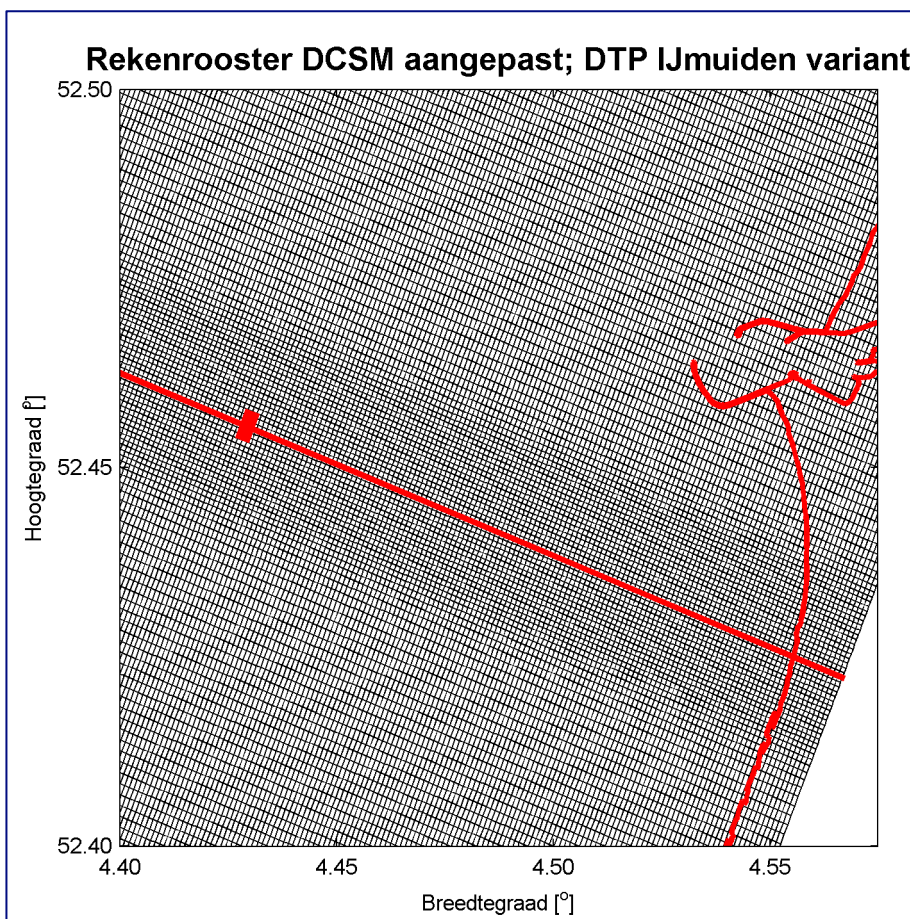
De dam(men) worden in de schematisatie opgenomen als niet doorlatende constructies (vergelijkbaar met kribben in een rivier of havendammen rond een havenmondning). Ter plaatse van de turbines worden turbinedebieten in het model gebracht door lozings- en onttrekkingspunten. Ter plaatse van de hoge waterstand wordt water onttrokken en dezelfde hoeveelheid wordt geloosd ter plaatse van de lage waterstand. De grootte van het debiet wordt door het WANDA turbine model, zie hoofdstuk 4.1, bepaald op basis van de waterstanden aan beide zijden van de DTP dam. In de berekende waterstanden is dus het effect van de turbinedebieten verdisconteerd.



Figuur 3.5: Rekenrooster/netwerk originele modelschematisatie en aangepaste schematisatie; IJmuiden variant



Figuur 3.6: Rekenrooster/netwerk originele modelschematisatie en aangepaste schematisatie; Maasvlakte variant



Figuur 3.7: Detail rekenrooster/netwerk aangepaste schematisatie; IJmuiden variant

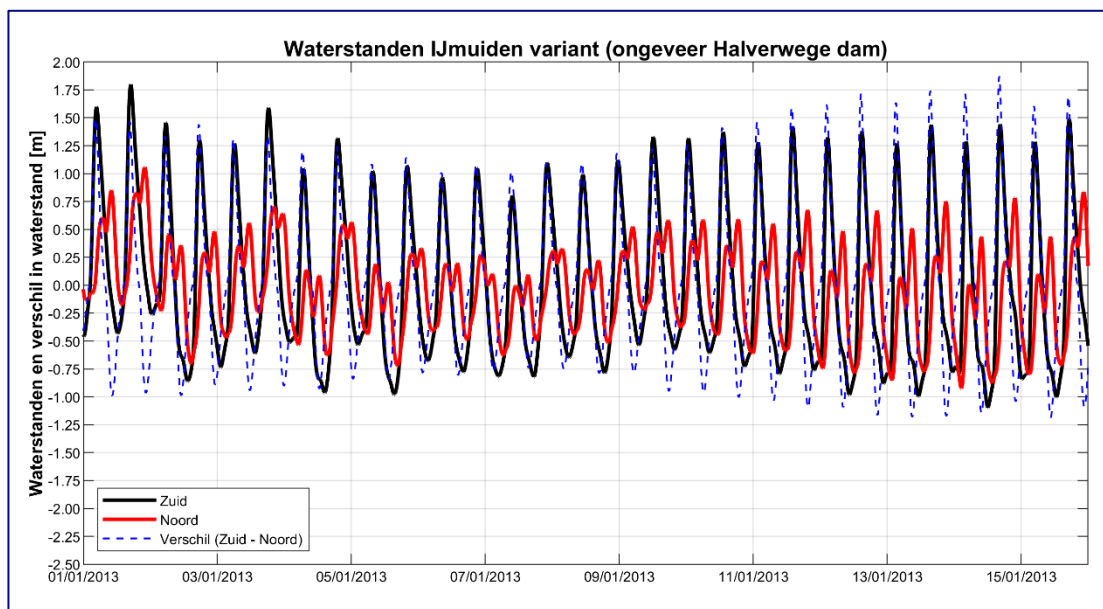
3.4 Berekeningsresultaten

3.4.1 Algemeen

Met het model is de periode van 1 Januari 2013 tot 30 Januari 2013 12:00 hr gesimuleerd. De duur van deze simulatieperiode, 29.5 dagen, stemt precies overeen met 2 springtij/doodtij cycli. De gemiddelde getijslag, het verschil tussen het hoogwater en het daaropvolgende laagwater, voor de simulatie periode is bijna identiek aan de gemiddelde getijslag voor het gehele jaar 2013, respectievelijk 1.644 m tegen 1.636 m (ter plaatse van meetlocatie Scheveningen). Dit betekent dat de energieopbrengst van een DTP dam bepaald voor een simulatie duur van 29.5 dagen kunnen worden geëxtrapoleerd naar de energieopbrengst per jaar (of meerdere jaren).

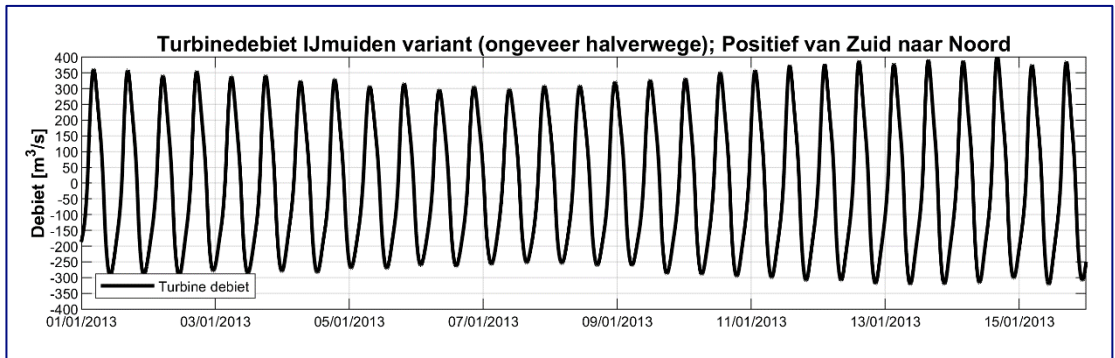
3.4.2 Waterstanden, waterstandsverschillen en Turbinedebieten IJmuiden variant

De berekende waterstanden ten noorden en zuiden van de dam, de waterstandsverschillen en de turbinedebieten worden getoond in Figuur 3.8 en Figuur 3.9. Voor een springtij, bijvoorbeeld rond 14 Januari 2013, varieert het waterstandverschil tussen de 1.5 en -1.25 meter. Tijdens doortij, bijvoorbeeld rond 8 januari 2013, is het waterstandverschil kleiner, tussen de + 1 m en -0.75 m. De uit de waterstandsverschillen volgende turbinedebieten⁴, bepaald met het WANDA Turbinemodel zoals beschreven in paragraaf 4.1, laten ook een springtij/doodtij variatie zien maar minder geprononceerd als de variatie in waterstandsverschillen. Dit heeft te maken met de vorm van de turbinekarakteristiek.



Figuur 3.8: Waterstanden en waterstandsverschillen IJmuiden variant.

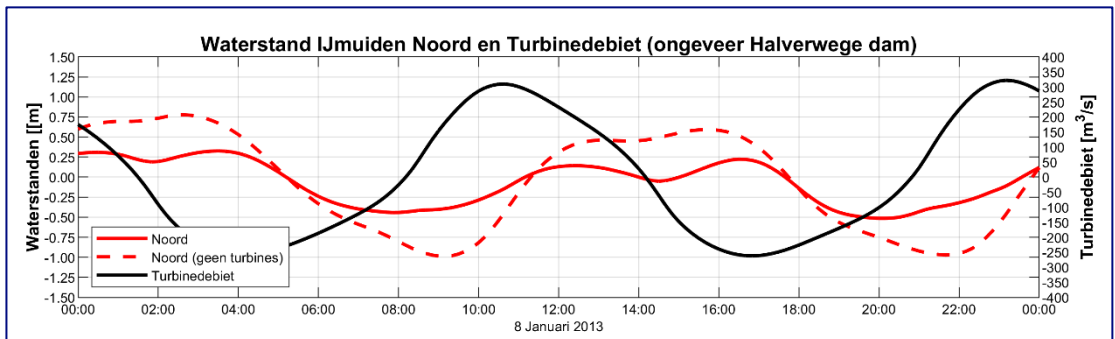
⁴ In het model wordt tussen 210 rekencellen aan beide zijden van de dam debiet uitgewisseld. Elk van deze 210 inlaat-uitlaat connecties representeert vijf turbines waarmee in totaal 1050 turbines zijn geschematiseerd. Het debiet per turbine wordt door WANDA uitgerekend op basis van het waterstandsverschil tussen het inlaat- en uitlaatpunt.



Figuur 3.9: Berekend turbinedebiet (1 turbine) ongeveer halverwege DTP dam.

Figuur 3.10 toont de berekende waterstanden noordelijk van de DTP dam met en zonder turbinedebieten in combinatie met de turbinedebieten. De figuur laat zien dat de turbinedebieten een grote impact, een afvlakkend effect, hebben op de waterstanden. Voor een inschatting van de waterstandverschillen moet dus het turbinedebiet worden meegenomen waarmee een sterk gekoppeld systeem ontstaat. De waterstandverschillen resulteren in turbinedebieten maar de turbinedebieten zelf beïnvloeden weer de waterstanden en daarmee de waterstandverschillen.

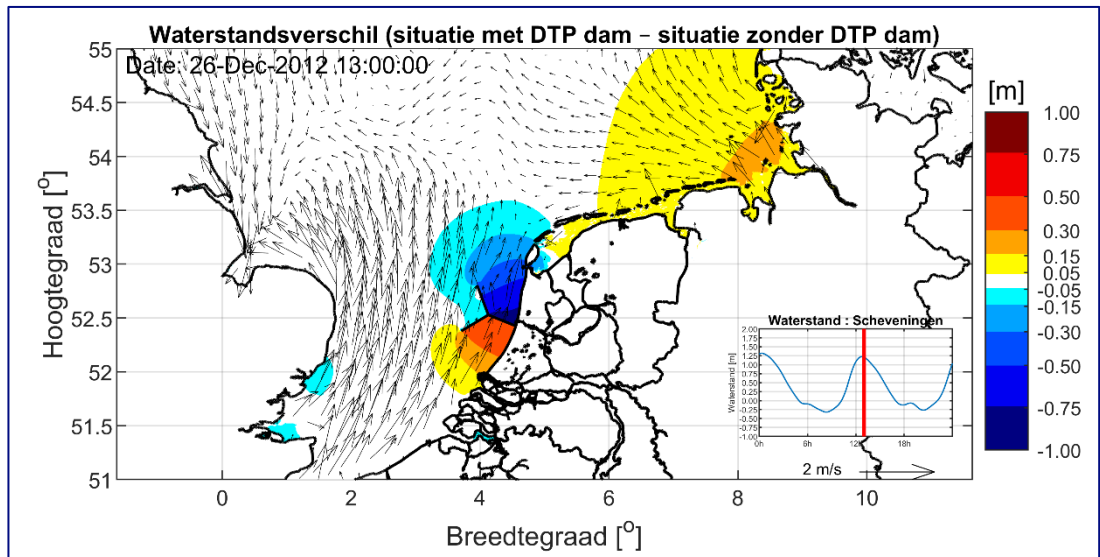
Wat opvalt aan de berekende waterstanden noordelijk van de DTP dam is het verloop dat duidelijk anders is dan het voor de Nederlandse kustzone karakteristieke getijverloop met één geprononceerd hoogwater en één laagwater. In plaats van één hoogwater is een dubbeltopping hoogwater ontstaan. De eerste hoogwatertop noordelijk van de DTP dam wordt veroorzaakt door de dam zelf maar wordt versterkt door het van zuid naar noord gerichte turbinedebiet ten tijde van de eerste top. De tweede top wordt veroorzaakt door het getij maar afgezwakt door het van noord naar zuid gerichte turbinedebiet. Het resultaat is 2 toppen met een vergelijkbare hoogte.



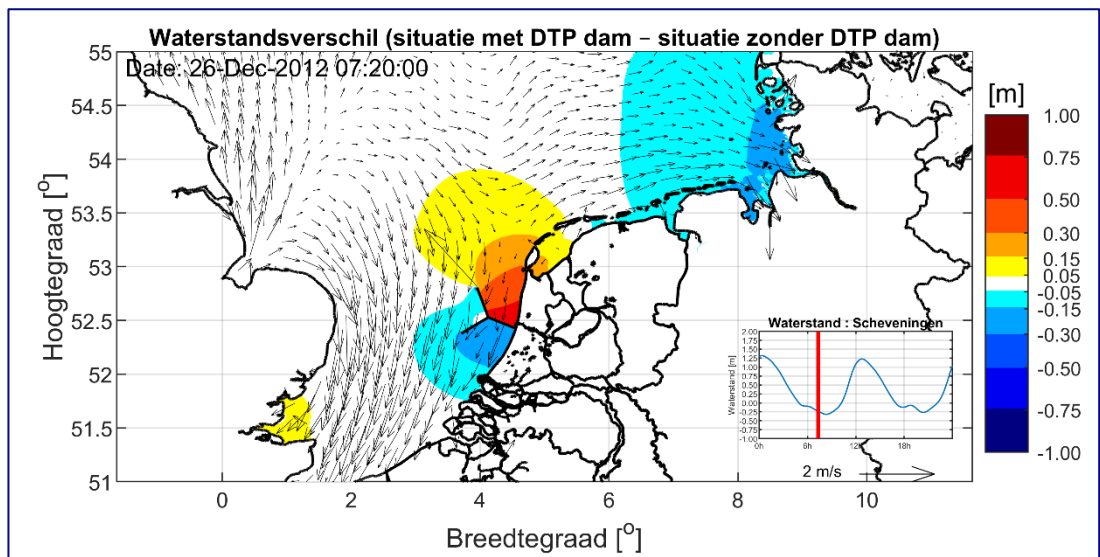
Figuur 3.10: Waterstanden Noord ongeveer halverwege dam, met en zonder turbines, in combinatie met turbinedebiet, 8 Januari 2013

De impact van de DTP dam, het verschil tussen de berekende waterstand met en zonder DTP dam, wordt getoond in Figuur 3.11 en Figuur 3.12. Lokaal, ter plaats van de DTP dam, is de impact van de DTP dam het grootst ten tijde van respectievelijk Hoogwater en iets voor Laagwater. Het effect van de DTP dam bedraagt ter plaatse van de dam meer dan 50 cm.

Naast het lokale effect wordt in een groot deel van de Noordzee de impact van de dam gemerkt. In de Waddenzee, bedraagt het maximale waterstandsverschil meer dan 15 cm. Zelfs voor de Engelse kust, de monding van de Thames, en ter plaatse van Denemarken heeft de DTP dam een merkbaar/meetbaar verschil in waterstand tot gevolg. Dit heeft mede te maken met het verschuiven van het amfidromisch punt in de Noordzee.



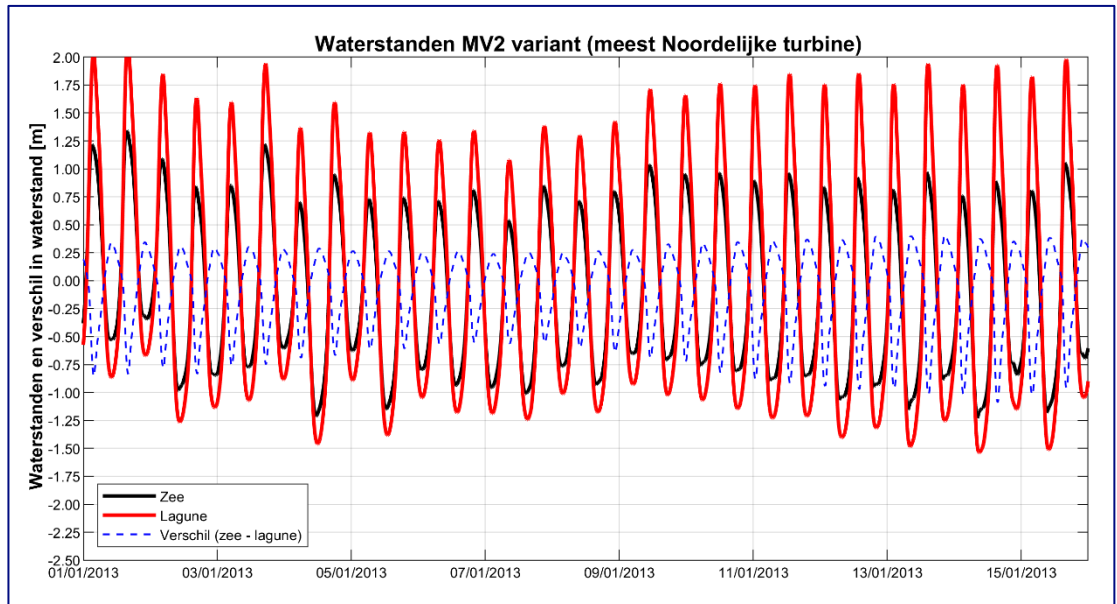
Figuur 3.11: Effect van de IJmuiden variant DTP dam, op waterstanden tijdens hoogwater



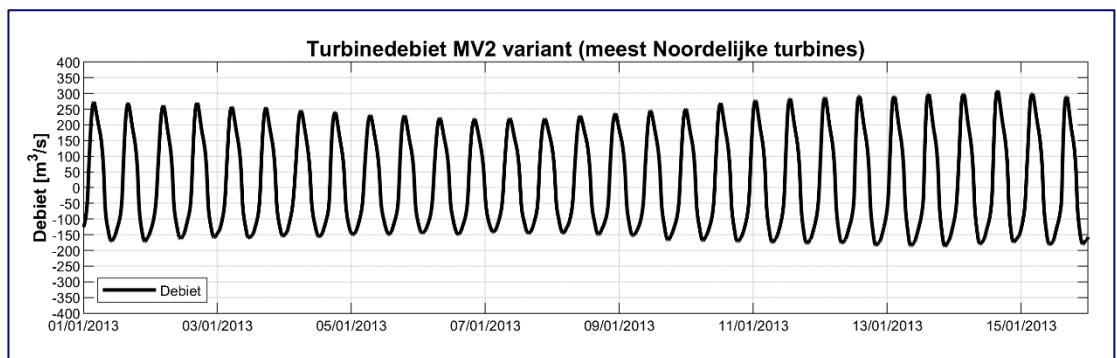
Figuur 3.12: Effect van de IJmuiden DTP dam, op waterstanden tijdens laagwater

3.4.3 Waterstanden, waterstandsverschillen en Turbinedebieten Maasvlakte variant

De berekende waterstanden aan de zeezijde van de door de DTP gevormde lagune en de waterstanden in de lagune in combinatie met de uit de waterstanden volgende waterstandsverschillen worden getoond in Figuur 3.13. Het betreft de meest noordelijke turbine waar de waterstandsverschillen het grootste zijn. Voor springtij, bijvoorbeeld rond 14 Januari 2013, varieert het waterstandverschil tussen de 0.6 en -1.0 meter. Tijdens doortij, bijvoorbeeld rond 8 januari 2013, is het waterstandverschil kleiner, tussen de + 0.25 m en -0.5 meter. De berekende waterstandsverschillen zijn dus aanmerkelijk kleiner dan voor DTP variant IJmuiden. Dit vertaalt zich in kleinere turbinedebieten, zie Figuur 3.14, en daarmee minder energieopbrengst.



Figuur 3.13: Waterstanden en waterstandsverschillen Maasvlakte variant. Meest Noordelijke turbine

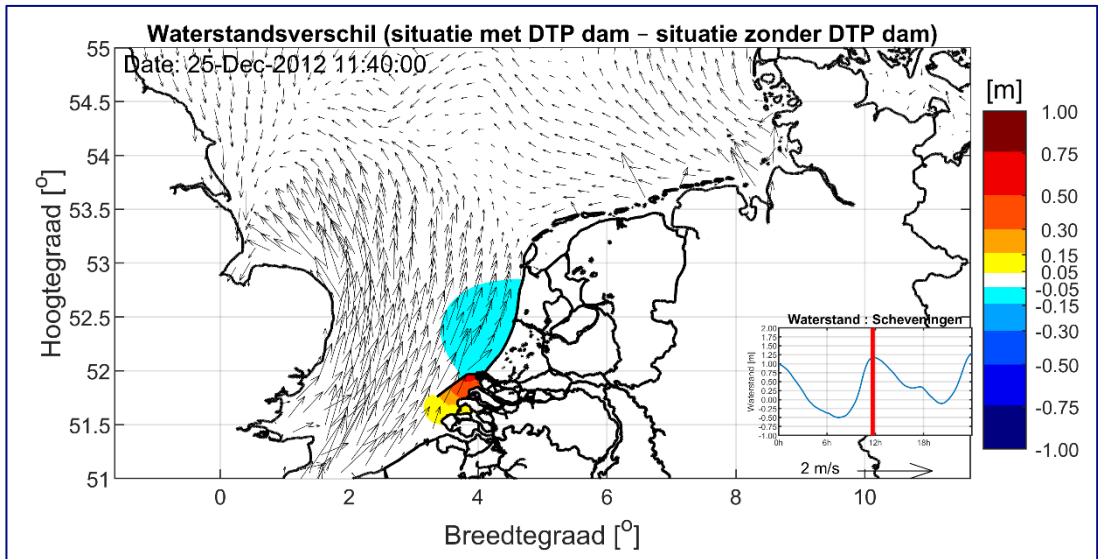


Figuur 3.14: Turbinedebieten meest Noordelijke turbines

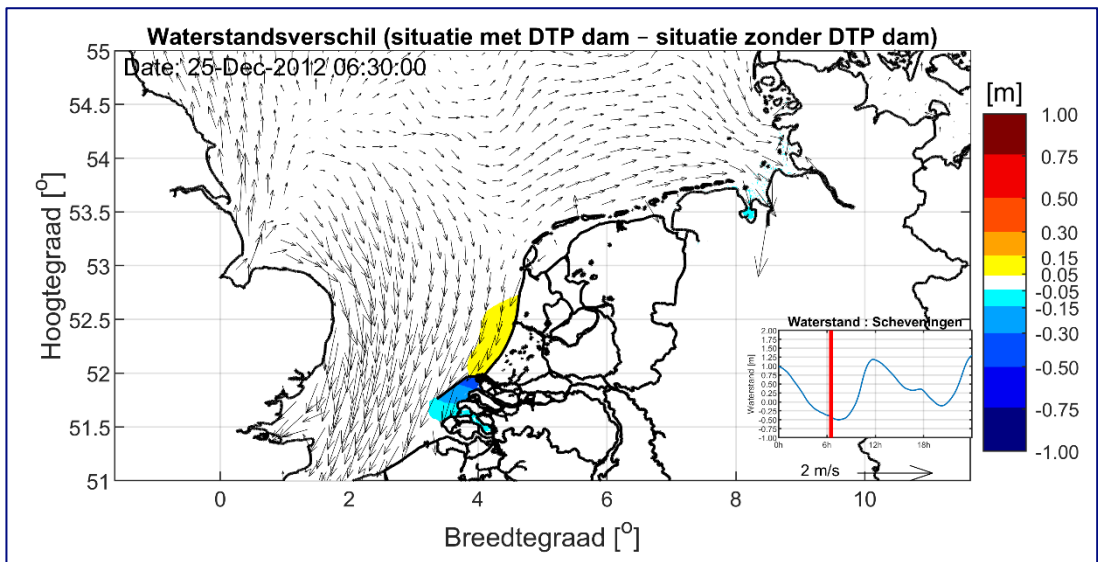
De impact van de DTP dam, het verschil tussen de berekende waterstand met en zonder dam, wordt getoond in Figuur 3.15 en Figuur 3.16. Lokaal, ter plaats van de DTP dam, is de impact van de DTP dam het grootst ten tijde van respectievelijk hoogwater en iets voor laagwater. Het effect van de DTP dam bedraagt ter plaatse van de dam ongeveer 50 cm. Dit betreft vooral de waterstanden in de door de DTP gevormde lagune. De waterstanden aan de zeezijde van de Lagune worden veel minder beïnvloed door de DTP dam.

In de Waddenzee, nabij Denemarken en voor de Engelse kust is de impact van de DTP dam minder dan 5 cm en daarmee kleiner dan bij de IJmuiden variant.

Samengevat is de variant Maasvlakte 2 minder effectief dan de IJmuiden variant, kleinere waterstandsverschillen, kleinere turbinedebieten en dus een kleinere energie opbrengst. De impact van DTP variant Maasvlakte op het getijdensysteem Noordzee is kleiner dan van de IJmuiden variant.



Figuur 3.15: Effect van DTP Maasvlakte variant, op waterstanden tijdens hoogwater



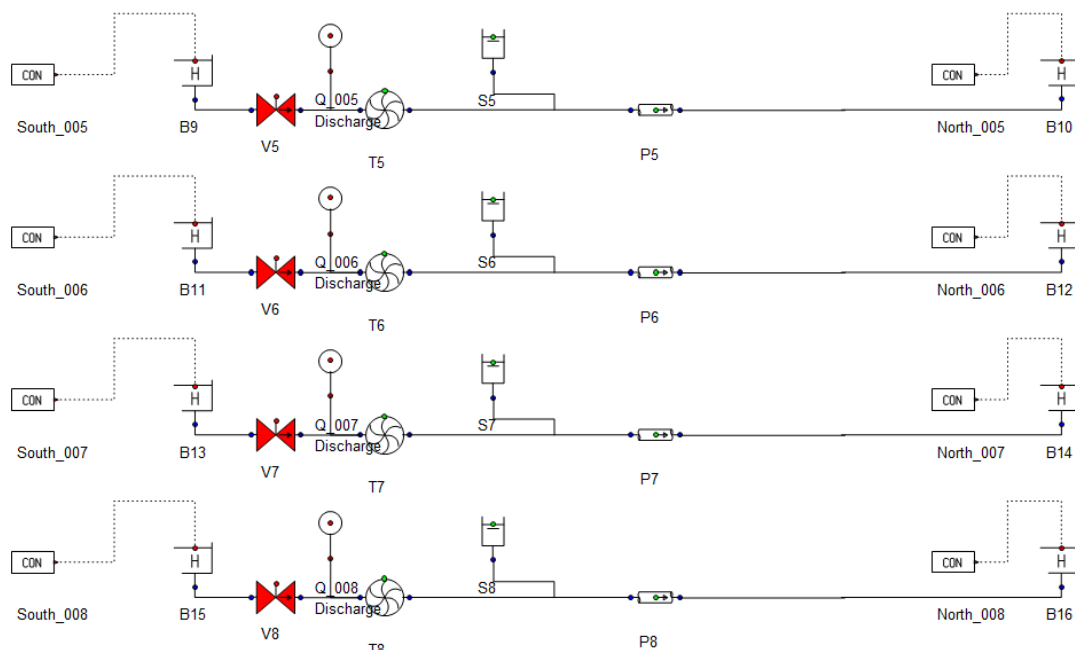
Figuur 3.16: Effect van DTP Maasvlakte variant, op waterstanden tijdens laagwater

4 Potentiële energieopbrengst

Zoals hiervoor beschreven is de potentiële energieopbrengst van een DTP dam in de Noordzee bepaald met behulp van een gekoppeld D-Hydro – WANDA model, waarbij WANDA gebruikt wordt om de energieopbrengst te bepalen met behulp van de turbinekarakteristieken. Door deze modellen aan elkaar te koppelen zijn effecten op de omgeving en de energieopbrengsten gelijktijdig berekend. Deze methode is eerder door Deltares toegepast om de effecten van meerdere getijdenlagunes in Bristol Channel te bepalen.

4.1 WANDA model

Met behulp van de WANDA software⁵ is een WANDA model gemaakt waarin de turbine specificaties worden beschreven. Het WANDA model is gekoppeld met het D-Hydro model op 210 koppelingslocaties. De berekende waterstanden uit het D-Hydro model worden doorgegeven aan WANDA. Iedere 5 seconden wordt er dan door WANDA een debiet per turbine uitgerekend en wordt per koppelingslocatie het debiet per vijf turbines teruggegeven aan D-Hydro. Een klein deel van het WANDA model is weergegeven in Figuur 4.1. In het WANDA model zijn verschillende componenten beschikbaar.



Figuur 4.1: Schematisatie van een deel van het WANDA model (turbine 4 tot en met turbine 8). Voor alle 210 koppelingslocaties is een onafhankelijke schematisatie gemaakt.

De CON-componenten schrijven de waterstanden berekend door D-Hydro aan de noord en zuid kant van de DTP dam voor. De H-componenten beschrijven de waterstanden (in dit geval zijn die dus gelijk aan de waarden van de CON-componenten). Er zit een klep (V-componenten) in het model die na 2 dagen inspeeltijd van het model open gaat. Deze klep zorgt voor een rustig inspeel gedrag van beide modellen. De turbine (T-component) rekent met behulp van de turbine karakteristieken de debieten uit die worden doorgegeven aan de sensor erboven (zie bv: Q_004 Discharge), welke de debieten weer teruggeeft aan D-Hydro. Verder

⁵ <https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/wanda>

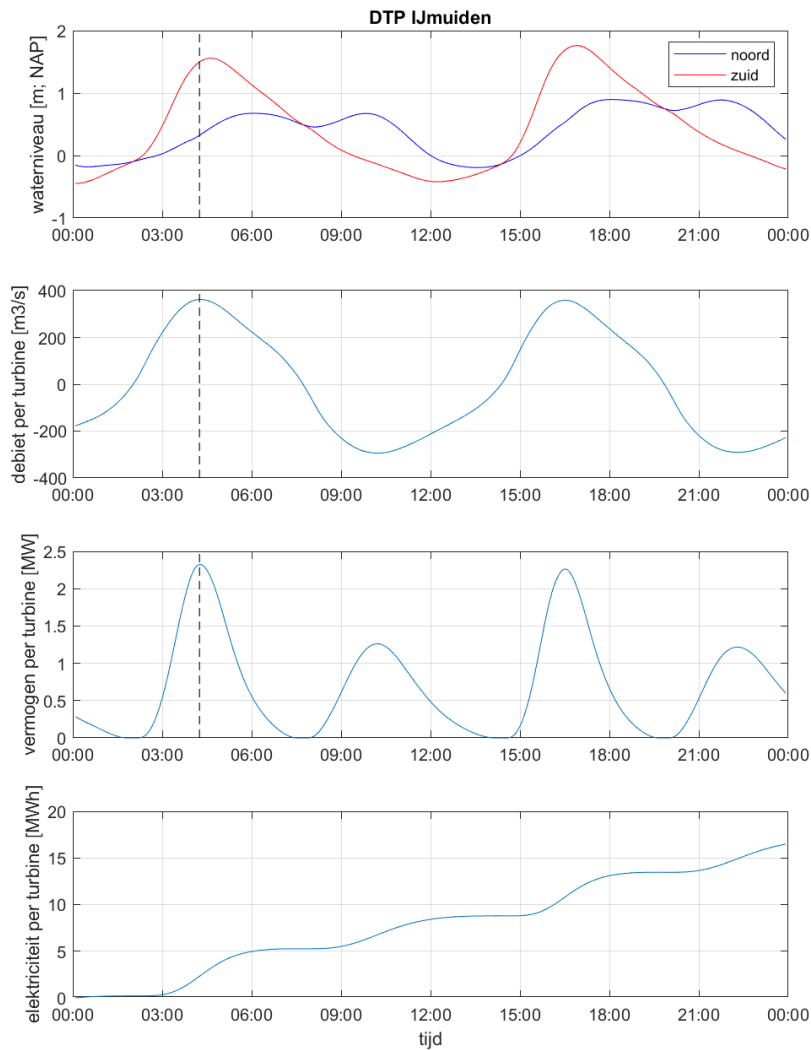
zitten er nog een buffertank (S-component) in het model dat ervoor zorgt dat kleine drukfluctuaties niet leidt tot instabiliteiten in het model en een pijp (P-component) die het inlaat- en uitlaatverlies van de turbine beschrijft afhankelijk van het debiet.

De turbinekarakteristieken zoals voorgeschreven door Nijhuis Pompen (2014), geeft de turbine karakteristiek (Q-H-P) weer van het deel in de turbine. De efficiëntie van de turbine is zo rond de 80%, maar door verliezen in de aan/afvoerkanalen komt de systeem efficiëntie uit op 56%. Hierin zijn de instroom en uitstroomverliezen van het open water naar de aan/afvoerkanalen nog niet zijn meegenomen. Dit verlies is daarom opgenomen in het WANDA model (in de pijp component). We gaan in deze studie uit van een zeer gestroomlijnde vormgeving van de turbine aan de inlaatzijde. Daarom wordt het inlaatverlies verwaarloosbaar geacht. Voor het uitlaat wordt een verlies coëfficiënt (ξ) van 1 gehanteerd op basis van Idelchik (2007). Deze verliescoëfficiënt wordt veroorzaakt door de afremming van het water. Het water wordt in de turbine versneld tot zo'n 10 m/s bij het turbineblad. Deze snelheid reduceert tot zo'n 3 m/s bij de uitstroom in zee. Bij de uitstroom moet het water verder afremmen tot het de stroomsnelheid van de omgeving bereikt. Hierdoor gaat de totale snelheidshoogte verloren ($\xi=1$). Bij laag verval turbines (zoals de turbines in de DTP dam) kan het energieverlies oplopen tot zo'n 24% van het beschikbare verval.

4.2 Energieopbrengsten

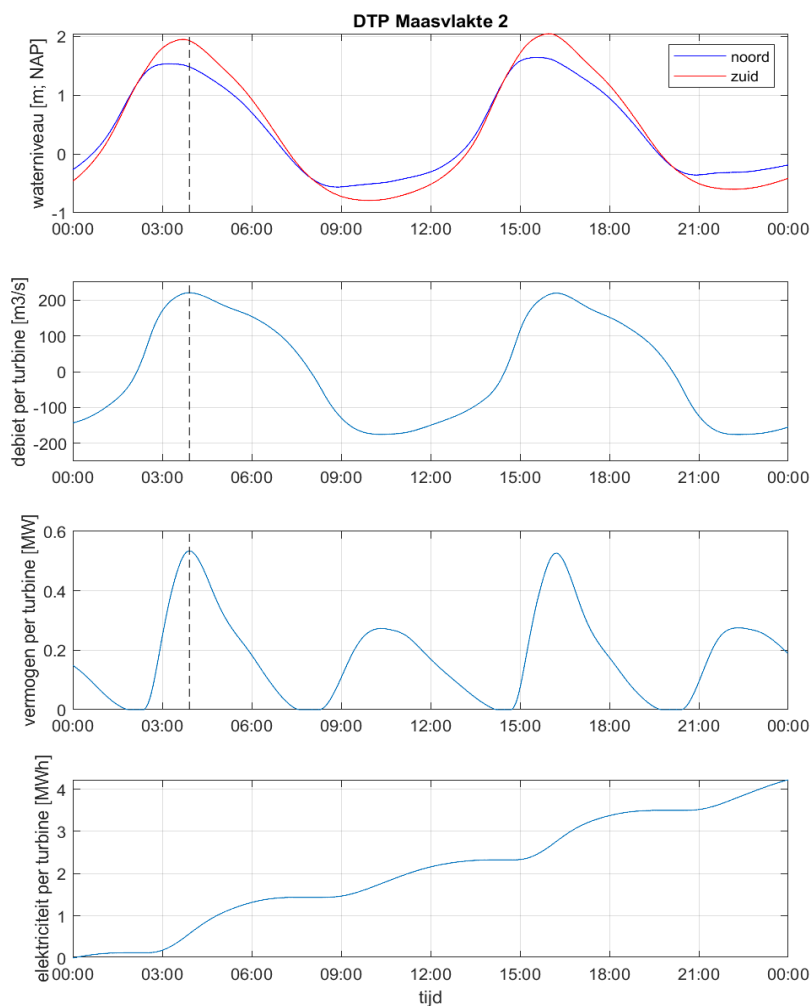
Voor beide locaties van de DTP dam is de energieopbrengst van de DTP dam bepaald. De gekoppelde simulaties hebben voor 2 spring-doodtij cycli gedraaid. De uitkomsten zijn verder opgeschaald naar de energieopbrengst per jaar (zie paragraaf 3.4.1). In de onderstaande figuren (Figuur 4.2 en Figuur 4.3) zijn de waterstandsverschillen, de debieten en de vermogens weergegeven voor 1 turbine in het midden van de dam.

In Figuur 4.2 zijn de vermogens en energieopbrengsten gedurende een dag te zien voor de DTP dam bij IJmuiden. In deze figuur is te zien dat de energieopbrengst stagneert op het moment dat de waterstanden aan beide zijden van de dam gelijk zijn. Het maximale vermogen op deze dag wordt net iets voor hoog water aan de zuidkant van de dam gehaald (zie verticale stippellijn in de figuur).



Figuur 4.2: Waterstanden, debieten, vermogens en energieopbrengsten per turbine voor een turbine midden in de DTP dam voor de variant IJmuiden.

In Figuur 4.3 zijn de vermogens en energieopbrengsten gedurende een dag te zien voor DTP Maasvlakte 2. In deze figuur is te zien dat beide hoog en laag water momenten op vrijwel hetzelfde moment plaatsvinden. Hierdoor ontstaat er weinig verval over de DTP dam waardoor de debieten en energieopbrengsten door de dam beperkt blijven voor deze variant. Het maximale vermogen op deze dag wordt net iets na hoog water aan de zuidkant van de dam gehaald (zie verticale stippellijn in de figuur).



Figuur 4.3: Waterstanden, debieten, vermogens en energieopbrengsten per turbine voor een turbine midden in de DTP dam voor de variant Maasvlakte 2.

De totale energieopbrengst van de dam met 1050 turbines is weergegeven in Tabel 4-1. In deze tabel is te zien dat de energieopbrengst van de DTP dam bij IJmuiden bijna zo'n 4 keer zo hoog is als bij de 2^e Maasvlakte. De opgewekte elektriciteit van de DTP IJmuiden variant is zo'n 4.5% van de totale Nederlandse elektriciteitsbehoefte, welke geschat is op 120 miljard kilowattuur (bron: CBS). Het is belangrijk om op te merken dat de opwek sterk in de tijd fluctueert. Piekvermogens worden elke dag op een ander tijdstip gegenereerd en zijn verschillend in hoogte, afhankelijk van de fase van het getij. Door de voorspelbaarheid van het getij zijn deze fluctuaties in opgewekt vermogen door Stichting DTP in de tijd vooraf te berekenen.

Tabel 4-1: energieopbrengst per jaar voor de varianten DTP IJmuiden en DTP Maasvlakte 2. De vermogens zijn de maximale vermogens voor alle turbines gecombineerd.

	DTP IJmuiden	DTP Maasvlakte 2
Max. vermogen (MW)	3430	836
Energie opbrengst per jaar (mld kwh)	5.55	1.39
Percentage t.o.v. nationaal verbruik	4.6%	1.2%

5 Kosten

Het hoofdstuk over de kosten is geschreven door adviesbureau Witteveen + Bos. Hierbij is een review uitgevoerd op het bestaande conceptontwerp (paragraaf 5.1). Uit deze review van het bestaande ontwerp kwamen een aantal punten naar voren die vanuit waterbouwkundig oogpunt niet realistisch zijn. Door deze punten te corrigeren is er een alternatief ontwerp gemaakt (zie paragraaf 5.2). De kosten voor dit alternatieve ontwerp zijn ook beschreven in dit hoofdstuk.

5.1 Bestaand conceptontwerp

Het bestaande ontwerp maakt onderscheid in de hoofddam, vleugeldam en de DTP dam. Het bestaande ontwerp van de verschillende dammen is getoond in tabel 5.1. De tekeningen geven een vertekend beeld, omdat de hoogtes (verticaal) en breedtes (horizontaal) anders geschaald zijn. Daarom is op basis van de aangegeven maten het bestaande ontwerp in werkelijke verhoudingen weergegeven (waarbij horizontaal en verticaal dezelfde schaal wordt gebruikt). Het correct geschaalde ontwerp is getoond in de rechter kolom van tabel 5.1. Daarnaast wordt in het uitgangspunten document van Deltares (de Fockert, 2023) ook een landaansluiting genoemd, hier is geen bestaand ontwerp van beschikbaar.

In tabel 5.2 is aangegeven over welke lengte welk type dam representatief is, voor de locaties IJmuiden en Maasvlakte 2. Voor de landaansluiting (tussen de kust en NAP -18,5 m) is door Stichting DTP geen ontwerp gemaakt. De landaansluiting heeft een lengte van circa 10 km. Voor de landaansluiting is als basis het ontwerp van de hoofddam genomen. De kosten van de landaansluiting zijn niet meegenomen in de evaluatie van de kosten van het bestaande ontwerp. Er is wel een indicatie gegeven van de benodigde materiaalvolumes. Het vrijboord blijft gelijk en de relatieve diepte van de teenconstructie is gelijk aan $h_t/h = 0,5$. Waarbij h_t de waterdiepte is op de teen en h de waterdiepte voor de teen. Dit resulteert in het volgende ontwerp voor de landaansluiting. De hoogte van de landaansluiting is 24 m, van NAP -9,0 m tot NAP +15,0 m.

Tabel 5.1 Bestaande ontwerp

Type dam	Bestaande ontwerp (hor. en vert. anders verschaald)	Bestaande ontwerp (hor. en vert. gelijk verschaald), deze dient gespiegeld te worden
hoofddam (gem. diepte NAP -30 m)		
vleugeldam (gem. diepte NAP -30 m)		
DTP dam (gem. diepte NAP -30 m)		
landaansluiting (gem. diepte NAP -9,0 m)	geen bestaand ontwerp	

Tabel 5.2 Lengte verschillende dammen per locatie

Locatie	IJmuiden	Maasvlakte 2	Eenheid
landaansluiting, gem. diepte NAP -9 m	10,0	10,0	[km]
hoofddam, gem. diepte NAP -30 m	4,5	22,5	[km]
vleugeldam, gem. diepte NAP -30 m	66,0	-	[km]
DTP dam	17,5	17,5	[km]

5.1.1 Technische evaluatie

Op basis van de tekeningen van het bestaande ontwerp zijn er een aantal bevindingen. De bevindingen zijn in tabelvorm gepresenteerd, waar per bevinding is aangegeven op welk type dam deze van toepassing is.

Tabel 5.3 Bevindingen per type dam

Bevinding	Omschrijving	Van toepassing op
1	De schetsen geven hoogtes aan. Het is lastig te bepalen vanaf welk referentievlak deze hoogtes genomen zijn. Deze memo geeft een inschatting op basis van NAP hoogtes (zie Paragraaf 2.3.1 'Generieke uitgangspunten').	hoofddam, vleugeldam, DTP dam
2	In het bestaande ontwerp is geen profiel aanwezig voor de landaansluiting welke loopt tot de NAP -18,5 m diepte contour. Deze dam heeft een lengte van circa 10 km. De dam wordt wel beschreven in het rapport van Deltares [de Fockert, 2023], maar de materiaal volumes zijn niet meegenomen in de kostenraming. Daardoor mist de materiaal hoeveelheid over een afstand van 10 km.	landaansluiting
3	De doorsnede lijkt visueel goed te kloppen. Echter, wanneer de figuur geschaald wordt op basis van de gepresenteerde horizontale en verticale afmetingen dan ontstaan onrealistisch steile hellingen. In de rechterkolom van tabel 5.1 is het bestaande ontwerp correct geschaald op basis van de afstanden en hoogtes. De gepresenteerde horizontale en verticale afmetingen lijken niet te kloppen.	hoofddam en vleugeldam
4	In het ontwerp is een steile helling gehanteerd voor breuksteen op het talud tussen de bodem en +11 m. De helling is hier V:H is 1:0,73. Een helling van 1:1,5 is gebruikelijker voor rubble mound dammen.	hoofddam en vleugeldam
5	In het ontwerp is voor de betonelementen op het talud een steile helling V:H is 1:0,76 gebruikt. Een helling van 3:4 tot 1:1,5 is gebruikelijker voor betonelementen.	hoofddam, vleugeldam en landaansluiting
6	Het gebruikte kernmateriaal lijkt met zand uitgevoerd, echter onder water aanbrengen en afwerken van zand kan niet steiler dan circa 1:10. De gehanteerde helling is daarom te optimistisch ingeschat wat resulteert in (veel) te kleine materiaal volumes.	hoofddam, vleugeldam en landaansluiting
7	De kruinhoogte voor de vleugeldam lijkt laag. Het vrijboord tijdens ontwerpcondities is 2 m (ofwel een relatieve vrijboord van $R_c/H_s \sim 0.2$). Dit geeft een significant risico op de stabiliteit van de kruin en het binnentalud.	vleugeldam
8	Het bestaande ontwerp heeft een brede berm die relatief diep ligt ($h_t/H_s \sim 1,8$), welke door de diepe ligging ten opzichte de ontwerpwaterstand een beperkte invloed heeft op de stabiliteit en benodigde kruinhoogte van de dam tijdens stormcondities.	hoofddam, vleugeldam en landaansluiting
9)	De breuksteen fundatieberm voor de turbines lijkt smal omdat deze gelijk aansluit op de onderrand van het caisson. Praktisch gezien zal de bermbreedte groter moeten zijn voor een veilige afzinkinstallatie.	DTP dam
10	Het materiaal dat gebruikt is voor de breuksteen fundatie ter plaatse van de turbines is niet gespecificeerd. Gebruikelijk is dat dit met kleinere fracties gebeurt, zodat dit vlak kan worden afgewerkt. Deze vlakke afwerking is essentieel voor gelijkmatige nauwkeurige plaatsing van de caissons voor de turbines.	DTP dam
11	De breuksteen fundatie is niet afgedekt met een breuksteen toplaag als bescherming tegen stromingsbelasting als gevolg van de stroming door de turbines.	DTP dam
12	De laagdikte van de betonelementen lijkt klein voor de verwachte golfcondities.	hoofddam, vleugeldam en landaansluiting
13	De hoeveelheid/laagdikte van de onder- en filterlagen van breuksteen lijkt klein. Meerdere lagen breuksteen benodigd in verband met de te vervullen filterfunctie.	hoofddam, vleugeldam en landaansluiting

5.1.2 Materiaal volumes

Op basis van het geschaalde dwarsprofiel en de afstanden voor de verschillende dammen, zoals aangegeven in tabel 5.2, zijn de materiaal volumes bepaald voor beide locaties (IJmuiden en Maasvlakte 2). In het totale materiaalvolume van het bestaande ontwerp blijkt de landaansluiting (10 km) niet meegenomen, omdat deze door Stichting DTP ook niet is beschouwd. Een inschatting van het materiaal volume voor de landaansluiting is wel gepresenteerd in tabel 5.4 en tabel 5.5.

Om een vergelijk te maken tussen het bestaande ontwerp en het alternatieve ontwerp, is de afstand waarover armour units worden toegepast gepresenteerd, omdat het type armour unit niet bekend is in het bestaande ontwerp. In het bestaande ontwerp is bij de locatie Maasvlakte 2 geen vleugeldam aanwezig.

Tabel 5.4 Materiaal volumes IJmuiden bestaand ontwerp

Materiaal	Hoofddam	Vleugeldam	DTP dam	Land-aansluiting	Totaal (exclusief landaansluiting)	Eenheid
kernmateriaal (zand)	17.986.500	193.617.600	-	12.211.400	211.604.100	[m ³]
breuksteen	1.661.400	23.034.000	-	2.283.400	24.695.400	[m ³]
armour units lengte waarover deze aanwezig zijn	323.100	3.550.800	-	474.000	3.873.900	[m ¹]
kruinelement	108.000	-	-	240.000	108.000	[m ³]
weg	18.000	-	-	40.000	18.000	[m ³]
bodembescherming DTP dam	-	-	17.500.000	-	17.500.000	[m ³]
fundatie granulair materiaal DTP dam	-	-	23.187.500	-	23.187.500	[m ³]
toplaag fundatie DTP dam	-	-	0	-	-	[m ³]

Tabel 5.5 Materiaal volumes Maasvlakte 2 bestaand ontwerp

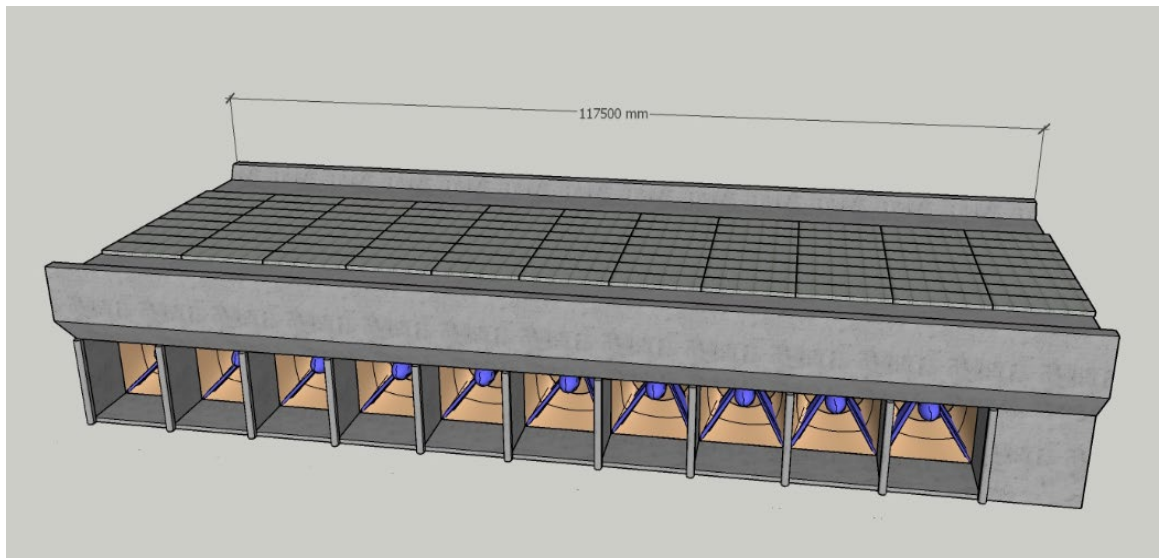
Materiaal	Hoofddam	Vleugeldam	DTP dam	Land-aansluiting	Totaal (exclusief landaansluiting)	Eenheid
kernmateriaal (zand)	89.932.500	-	-	12.211.400	89.932.500	[m ³]
breuksteen	8.307.000	-	-	2.283.400	8.307.000	[m ³]
armour units lengte waarover deze aanwezig zijn	1.615.500	-	-	474.000	1.615.500	[m ¹]
kruinelement	540.000	-	-	240.000	540.000	[m ³]
weg	90.000	-	-	40.000	90.000	[m ³]
bodembescherming DTP dam	-	-	17.500.000	-	17.500.000	[m ³]
fundatie granulaire materiaal DTP dam	-	-	23.187.500	-	23.187.500	[m ³]
toplaag fundatie DTP dam	-	-	-	-	-	[m ³]

5.1.3 Evaluatie kosten

Op basis van de hierboven genoemde uitgangspunten en volumes zijn de CAPEX (kapitaaluitgaven) en OPEX (instandhoudings- en operationele kosten) van de DTP dam (locatie IJmuiden) hieronder ingeschat.

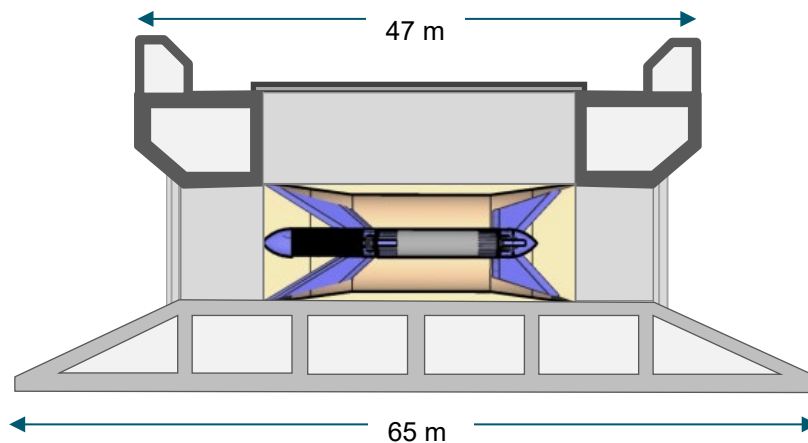
5.1.3.1 Betonwerk

Uitgegaan wordt van een caisson van 47 m breed, net als de bovenzijde (conform de schets in figuur 5.1).



Figuur 5.1 3D model van turbines in caisson

In de raming van Stichting DTP is de voet verbreed tot 65 m, conform de schets in figuur 5.2.



Figuur 5.2 Schets van caisson met verbrede voet

Voor de vloeren en dek is gerekend met 2,0 m. Mogelijk dat de (diktes van de vloeren van) caissons nog geoptimaliseerd kunnen worden. Er wordt met 12 tussenwanden gerekend in de caissons, dus 13 stuks doorstroomopeningen. Witteveen+Bos heeft er 10 (zoals in bovenstaande 3D schets in figuur 5.1).

De getallen in de aangeleverde rekensheet zijn niet altijd eenduidig. Om het bestaande ontwerp toch te beoordelen heeft Witteveen+Bos voor sommige posten zoals de Tower en de Substations een aanname gemaakt voor het ontwerp, zodat daarmee verder gerekend kan worden.

Inclusief deze en de overige (kleinere) verschillen rekent Witteveen+Bos met circa 25 % tot 35 % minder beton in de caissons. Er wordt een gemiddelde eenheidsprijs voor vloer, wanden en dek gerekend van EUR 500,-/m³. Ondanks de grote hoeveelheden lijkt deze eenheidsprijs té optimistisch. In totaal raamt Witteveen+Bos de caissons (inclusief transport en afzinken) 15 tot 20 % duurder.

5.1.3.2 Installaties

In de raming van Stichting DTP wordt gerekend met M€ 1,7 per turbine (maal 1.050 stuks). Deze kosten worden vermeerderd met 25 % indirecte kosten en 51 % risicoreserveringen. Hiermee komen de totale kosten per turbine op M€ 3,21 per stuk. In de raming van Witteveen+Bos zijn de kosten gesplitst in de kosten voor transporteren en plaatsing en de levering zelf. Hierdoor worden er geen indirecte kosten en risicoreservering gerekend over de directe levering (van circa M€ 1,9). De totale kosten per turbine komen daardoor met M€ 2,30 iets lager uit.

De kosten voor elektrotechniek zijn grof geverifieerd. De eenheidsprijzen voor transformatoren en kabelwerk zijn gelijkgesteld. Onduidelijk is waarom er een factor van 50 % wordt gerekend voor de 250 kV trafo en voor de 500 kV trafo. De 30 kV en 250 kV trafo's worden vermenigvuldigd met het aantal caissons. Bij de 500 kV trafo en het kabelwerk lijkt het aantal van 5 caissons niet juist te zijn berekend (deze vermenigvuldiging wordt wel toegepast bij het betonwerk). Onduidelijk is waarom er 5 stuks 500 kV caissons zijn met maar 0,5 stuks trafo.

De kabelkokers worden benaderd als 6 m³/m en komen met een eenheidsprijs van EUR 500,-/m³ op EUR 3.000,-/m. Onduidelijk is waarom in de raming deze eenheidsprijs wordt gedeeld door 2. Er is 15 km aan 500 kV transportkabel gerekend. Onduidelijk is hoe deze lengte bepaald is. Veronderstelling: de turbines liggen op de helft van de 22 km hoofddam (=11 km)

plus 4 km aansluiting op land. Bij een variatie in damlengte of andere projectlocatie dient deze lengte opnieuw beschouwd te worden.

In de berekening 'DTP bto' wordt bij de control-/saferoom gerekend met 40x hotel inrichting à k€ 100. In de cost breakdown worden de eenheidsprijzen opgeteld en niet het totaal (factor 40 te laag). Bij de overige posten in dit hoofdstuk (safehouse en control system) gaat dit goed omdat deze maar 1x voorkomen. Effect is op het totaal verwaarloosbaar (k€ 100 in plaats van M€ 4), maar dat is het risico van wijzigingen bij miljarden projecten.

Onder de werktuigbouwkundige installaties zijn signaleringen opgenomen voor scheepvaart. Deze post (EUR 500,--/m) wordt gerekend over de lengte van de hoofdham van 22 km. Geadviseerd wordt deze ook over de lengte van de vleugels van 2 x 33 km te rekenen. Immers dienen ook deze aanzienlijke lange dammen voor scheepvaart zichtbaar te zijn.

5.1.3.3 Indirecte kosten en risicoreservering

Er wordt met 25 % algemene kosten en winst en risico (WRAK) gerekend. Voor reguliere projecten in de weg- en waterbouw wordt dit percentage als hoog beschouwd en is daarom in onze ogen ook niet passend bij een project van deze orde. Er is een percentage van 13 % gehanteerd (8,0 % voor algemene kosten, 3,0 % voor winst en 2,0 % voor risico).

Het prijspeil van de raming van Stichting DTP wordt niet expliciet genoemd. Omdat de datum van de ontwerpnotitie 1 juni 2023 is, wordt verondersteld dat het prijspeil actueel (Q2-2023) zou zijn. Toekomstige loon- en prijsstijgingen worden niet expliciet genoemd. Het is belangrijk bij budgetten rekening te houden met de inflatie/indexatie. In de post 'Unforeseen' van 51 % blijkt een regel 'indexatie' te zitten van 1,5 % per jaar voor 10 jaar. Het wordt afgeraden indexatie te scharen onder onvoorzien. Het zijn eerder voorziene dan onvoorzien kosten. Bovendien lijkt een gemiddelde van 1,5 % per jaar aan de lage kant en een periode van 10 jaar voor voorbereiding + realisatie ook te kort (totaal is dat circa 16 %). Bij een langjarig gemiddelde van 2,8 %⁶ en het zwaartepunt van het kasritme (gemiddelde) ligt op 15 jaar, dan zou deze reservering naar schatting 40 % zijn. Er wordt benadrukt dat de raming van het bestaande ontwerp prijspeil heden betreft. Er is dus geen rekening gehouden met toekomstige loon- en prijsstijgingen.

5.1.3.4 Instandhoudingskosten

In de raming van Stichting DTP zijn enkel voorzieningen opgenomen voor het onderhouden van het object, niet het onderhouden van de dam gedurende de levensduur. Wij schatten op basis van een levensduur van 50 jaar en een vervanging van de turbines halverwege de levensduur dat de instandhoudingskosten van de dammen, het betonwerk en de turbines tussen de 0,2 en 0,5 % per jaar van de investeringskosten kunnen liggen.

5.1.3.5 CAPEX en OPEX van de DTP dam, locatie IJmuiden

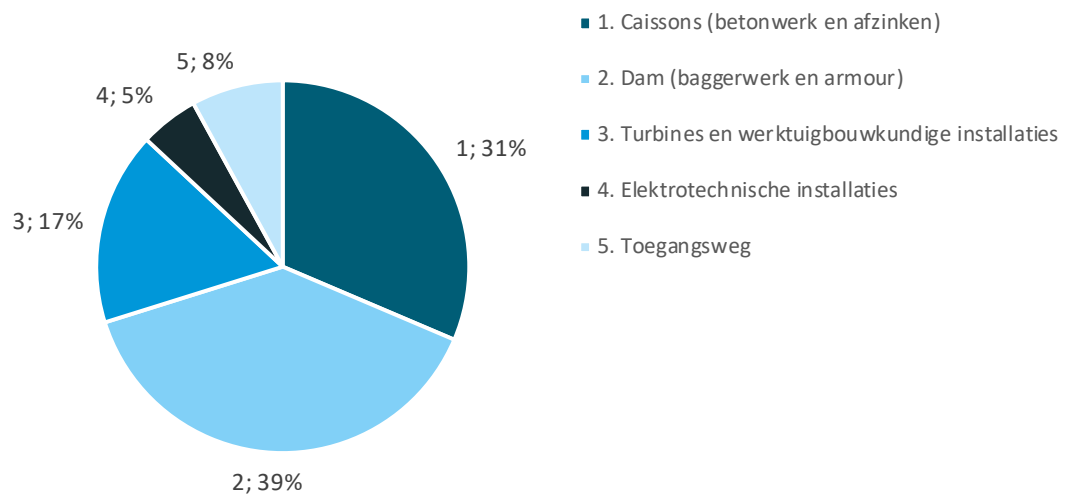
Op basis van de genoemde uitgangspunten en volumes en aangeleverde kostenraming zijn de CAPEX (kapitaaluitgaven) en OPEX (instandhoudings- en operationele kosten) van de DTP dam als volgt ingeschat, voor locatie IJmuiden:

- CAPEX: EUR 28 miljard, dus grofweg tussen EUR 20-40 miljard rekening houdend met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval). Deze zijn opgebouwd als weergegeven in Figuur 5.3;
- OPEX: tussen 0,2 en 0,5 % per jaar van de investeringskosten, grofweg tussen EUR 60-140 miljoen per jaar⁷.

⁶ CBS Grond-, weg- en waterbouw (GWW); inputprijsindex 2015=100, 4291 Waterbouwkundige werken en bouw (2013-2023).

⁷ Waarbij nog geen rekening gehouden met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval).

Opgemerkt dient te worden dat de kosten voor de landaansluiting niet zijn opgenomen in deze kosten. Een extra damlengte van 10 km, vergelijkbaar aan de vleugeldam zou een kostenverhoging betekenen van circa EUR 1,3 miljard.



Figuur 5.3 Ratio in de beoordeelde kostenraming van de DTP dam locatie IJmuiden (EUR 26,2 miljard)

5.2 Alternatief ontwerp

Naar aanleiding van de bevindingen uit de technische evaluatie van het bestaande ontwerp, zie paragraaf 0, is een alternatief ontwerp uitgewerkt door Witteveen+Bos. De resultaten van het alternatieve ontwerp kunnen tevens gebruikt worden als bandbreedte van de resultaten. In het alternatieve ontwerp wordt dezelfde kruinhoogte aangehouden als in het bestaande ontwerp, maar er worden realistischere ontwerpdimensies gehanteerd ten aanzien van bijvoorbeeld taludhellingen, laagdiktes en breedtes.

Voor het alternatieve ontwerp zijn de CAPEX en OPEX voor zowel IJmuiden als Maasvlakte 2 uitgewerkt.

5.2.1 Dimensies alternatief ontwerp

Voor het alternatieve ontwerp is als uitgangspunt een armour layer van Xbloc genomen. Op basis van dit uitgangspunt zijn ook andere ontwerpaspecten zoals de breuksteen onderlagen, teenconstructie, kruinbreedte en kruinhoogte bepaald. De ontwerpaspecten zijn gebaseerd op richtlijnen en vuistregels, de dimensies zijn hieronder kort toegelicht.

5.2.1.1 Volume en dimensies Xbloc

De dimensies van het Xbloc in het alternatieve ontwerp zijn gebaseerd op een ontwerp golfhoogte van 9 m. Tabel 5.1 uit (Delta Marine Consultants, 2023) geeft dimensies voor Xbloc bij verschillende significante golfhoogtes. Een opsomming van de belangrijkste parameters voor Xbloc is gegeven in tabel 5.6 voor een significante ontwerp golfhoogte van 9 m.

Tabel 5.6 Dimensies Xbloc bij ontwerpgolffhoogte van 9 m

Volume	Unit height	Thickness armour layer	Packing density	Concrete volume	Placement distance up-slope	Minimum M ₅₀ rock underlayer	Maximum M ₅₀ rock underlayer
V	D	h	N		D _y		
[m ³]	[m]	[m]	[1/100 m ²]	[m ³ /m ²]	[m]	[t]	[t]
16	3,63	3,5	9,1	1,46	2,29	2,56	6,40

De toplaag van Xbloc wordt geplaatst onder een helling van 3:4 (V:H).

5.2.1.2 Breuksteen onder- en filterlaag

Tussen het kernmateriaal van de dam en de Xbloc toplaag zijn twee breuksteen lagen voorzien. Een onderlaag onder Xbloc's is benodigd voor de plaatsing van het Xbloc. Tussen de breuksteen onderlaag onder het Xbloc en het kernmateriaal is nog een breuksteen filterlaag nodig om uitspoeling te voorkomen. Voor de onderlaag wordt een laagdikte van 2,4 m gehanteerd, voor de filterlaag een laagdikte van 0,8 m.

Tabel 5.7 Laagdiktes breuksteen

	Onderlaag	Filterlaag
	[m]	[m]
laagdikte	2,4	0,8

5.2.1.3 Teenconstructie

Een teenconstructie is benodigd om de Xbloc's op het talud te ondersteunen. Een teenconstructie ligt op een diepte van tenminste $h_t/h=0,5$ bij de ontwerpcondities. Bij een bodemdiepte van NAP -30 m en een waterstand van NAP +6 m bij stormcondities, ligt de teenconstructie op een hoogte van NAP -18 m voor de hoofdam en vleugeldam. Voor de landaansluiting ligt de teenconstructie op NAP -7,5 m, vanwege de kleinere waterdiepte.

De teenconstructie bestaat uit breuksteen en heeft laagdikte van 2,4 m, gelijk aan de laagdikte van de onderlaag van de Xbloc's. De teenconstructie heeft een lengte van 8 m.

5.2.1.4 Kruinbreedte

Bepalend voor de kruinbreedte is de aanwezigheid van een kruinelement en hoe de Xbloc's hierop aan sluiten. Om met Xbloc's aan te sluiten op het kruinelement (bij de landaansluiting en hoofdam) is een horizontale breedte van 1,64 maal de hoogte van het Xbloc benodigd. Hier is een breedte van 6 m voor gehanteerd in het alternatieve ontwerp.

De ontwerprichtlijn voor Xbloc schrijft voor dat voor de situatie zonder kruinelement (bij de vleugeldam) een breedte van tenminste 2,28 maal de hoogte van het Xbloc (D) benodigd is. Hier is een breedte van 8,4 m voor gehanteerd.

5.2.1.5 Kruinhoogte

De kruinhoogte wordt bepaald door de toegestane golfoverslag. Het golfoverslagdebiet is bepaald met de Overtopping Neural Network van Deltares (van Gent et al, 2007). Voor de ruwheidsreductiefactor wordt een waarde van 0,44 gehanteerd, welke hoort bij Xbloc (Delta Marine Consultants, 2023). In de overslagsommen worden de ontwerpcondities gehanteerd, zoals genoemd in de generieke uitgangspunten.

Het golfoverslagdebiet is voor het bestaande ontwerp en het alternatieve ontwerp van de hoofddam zeer vergelijkbaar overslagdebiet (circa 7-10 l/s/m). Voor de vleugeldam is geen overslagdebiet bepaald door het geringe vrijboard.

5.2.1.6 Onderwatertalud

Het kernmateriaal van de landaansluiting, de hoofddam en de vleugeldam wordt afgedekt met een breuksteen laag om erosie te voorkomen. Een typische helling voor een breuksteen talud op een granulaire kern ('quarry run') is 1:1,5 (V:H). Ook het fundatiemateriaal (granulair materiaal 'quarry run') van de DTP dam dient voorzien te worden van een breuksteen toplaag. De breuksteen toplaag heeft een laagdikte van 0,8 m.

5.2.1.7 Caissons

Het ontwerp van de caissons met turbines is in het alternatief ontwerp gelijk aan het bestaande ontwerp.

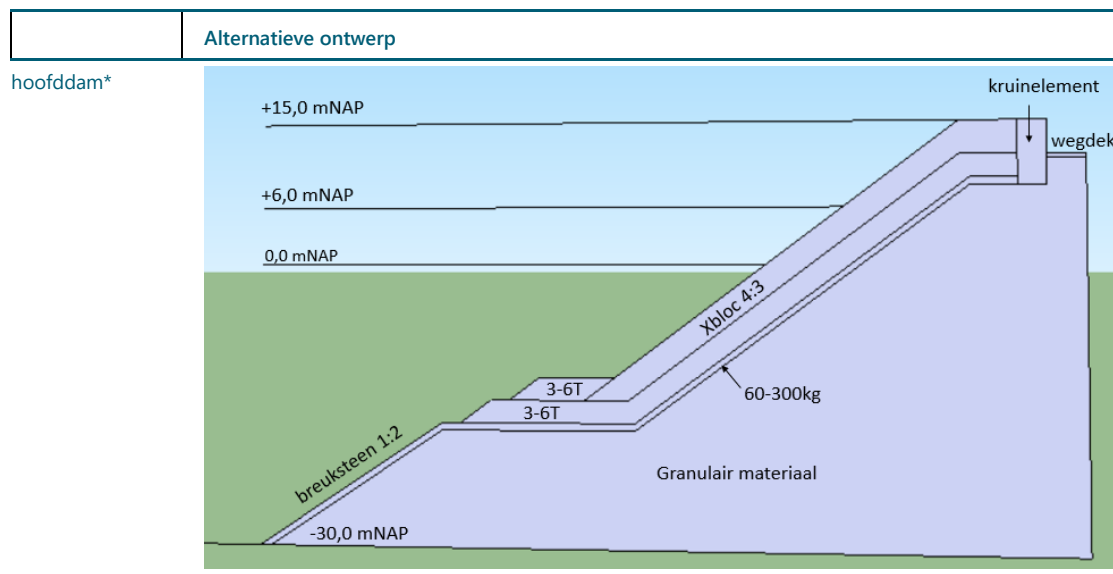
5.2.1.8 Bodembescherming

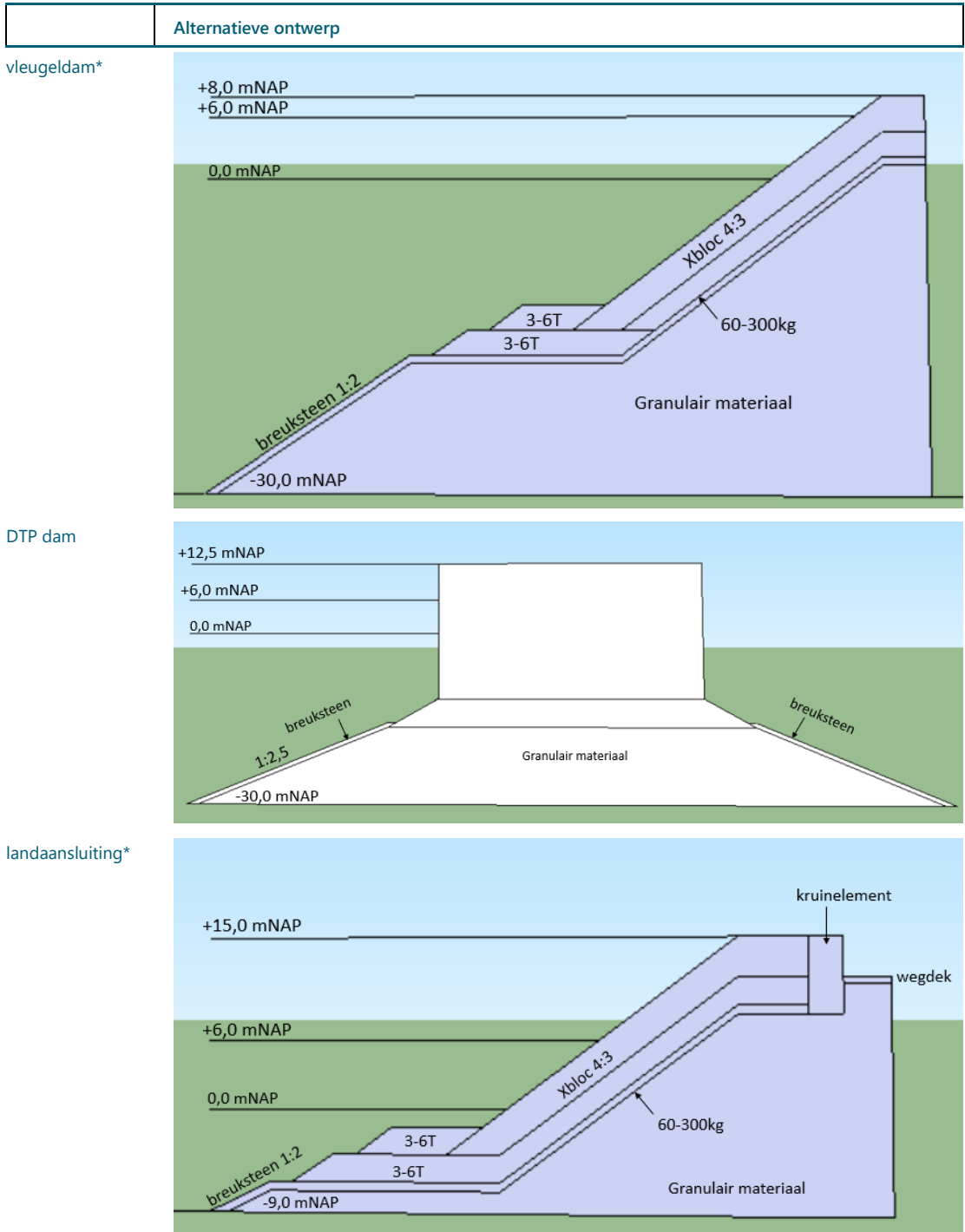
Voor het vergelijk is een bodembescherming toegepast met dezelfde afmetingen als in het bestaande ontwerp. De bodembescherming is aanwezig over een breedte van 500 m aan beide zijden van de DTP dam. Voor de bodembescherming is een laagdikte van 1,0 m aangehouden.

5.2.1.9 Alternatief ontwerp

Bovenstaande ontwerpaspecten resulteren uiteindelijk in het volgende alternatieve ontwerp voor de verschillende dammen.

Tabel 5.8 Alternatieve ontwerp voor de verschillende dammen





* toont slechts de helft van de dam, deze dient gespiegeld te worden.

5.2.2 Materiaal volumes alternatieve ontwerp

Tabel 5.9 toont de benodigde volumes voor het alternatieve ontwerp voor de locatie IJmuiden.

Tabel 5.9 Materiaal volumes alternatieve ontwerp IJmuiden

Materiaal	Hoofddam	Vleugeldam	DTP dam	Land-aansluiting	Totaal (exclusief landaansluiting)	Eenheid
kernmateriaal (quarry run)	15.507.900	138.309.600	-	9.527.600	153.817.500	[m ³]
breuksteen	2.186.280	24.328.920	-	3.272.000	26.515.200	[m ³]
armour units lengte waarover deze aanwezig zijn	442.800	4.708.440	-	633.600	5.151.240	[m ¹]
aantal armour units	39.852	423.760	-	57.024	463.612	[stuks]
beton volume armour units	646.488	6.874.322	-	925.056	7.520.810	[m ³]
kruinelement	180.900	-	-	402.000	180.900	[m ³]
weg	18.000	-	-	40.000	18.000	[m ³]
bodembescherming DTP dam	-	-	17.500.000	-	17.500.000	[m ³]
fundatie granulair materiaal DTP dam	-	-	23.191.000	-	23.191.000	[m ³]
toplaag fundatie DTP dam	-	-	959.000	-	959.000	[m ³]

In het bestaande ontwerp is bij de locatie Maasvlakte 2 geen vleugeldam aanwezig. Tabel 5.10 toont de benodigde volumes voor het alternatieve ontwerp voor de locatie bij Maasvlakte 2.

Tabel 5.10 Materiaal volumes alternatieve ontwerp Maasvlakte 2

Materiaal	Hoofddam	Vleugeldam	DTP dam	Land-aansluiting	Totaal (exclusief landaansluiting)	Eenheid
kernmateriaal (quarry run)	77.539.500	-	-	9.527.600	77.539.500	[m ³]
breuksteen	10.931.400	-	-	3.272.000	10.931.400	[m ³]
armour units lengte waarover deze aanwezig zijn	2.214.000	-	-	633.600	2.214.000	[m ¹]
aantal armour units	199.260	-	-	57.024	199.260	[stuk]
beton volume armour units	3.232.440	-	-	925.056	3.232.440	[m ³]
kruienelement	904.500	-	-	402.000	904.500	[m ³]
weg	90.000	-	-	40.000	90.000	[m ³]
bodembescherming DTP	-	-	17.500.000	-	17.500.000	[m ³]
fundatie granulaire materiaal DTP dam	-	-	23.191.000	-	23.191.000	[m ³]
toplaag fundatie DTP dam	-	-	959.000	-	959.000	[m ³]

5.2.3 Evaluatie kosten

Op basis van de genoemde uitgangspunten en berekende volumes zijn de CAPEX (kapitaaluitgaven) en OPEX (instandhoudings- en operationele kosten) voor 50 jaar van alternatief 1 van de DTP dam voor locatie IJmuiden en Maasvlakte 2 als volgt ingeschat:

- CAPEX alternatief 1, locatie IJmuiden: EUR 36 miljard, dus grofweg tussen EUR 25-55 miljard rekening houdend met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval);
- CAPEX alternatief 1, locatie Maasvlakte 2: EUR 33 miljard, dus grofweg tussen EUR 23-50 miljard rekening houdend met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval);
- OPEX: tussen 0,2 en 0,5 % per jaar van de investeringskosten, grofweg tussen EUR 70-180 miljoen per jaar⁸ voor IJmuiden en tussen EUR 65-165 miljoen per jaar voor Maasvlakte 2. In deze periode worden 1x de mechanische- en elektrotechnische onderdelen van de turbines vervangen (jaar n+25).

⁸ Waarbij nog geen rekening gehouden met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval).

5.3 Conclusies en aanbevelingen

5.3.1 Conclusies

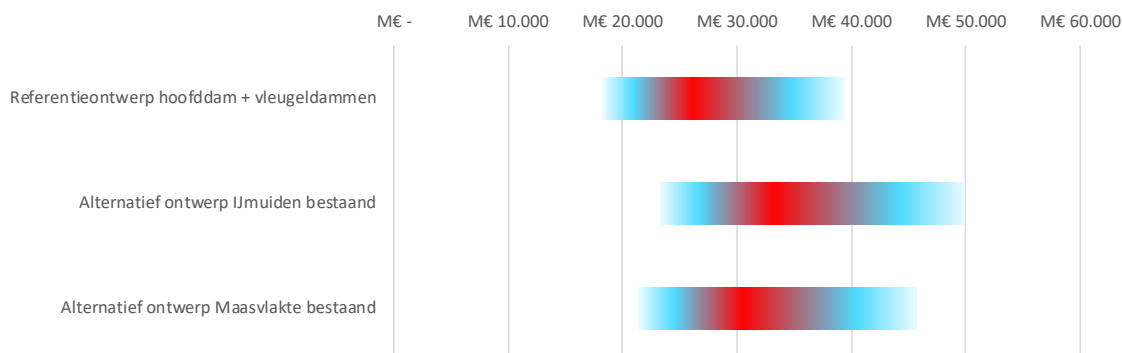
Op basis van de genoemde uitgangspunten en volumes en aangeleverde kostenraming zijn de CAPEX (kapitaaluitgaven) en OPEX (instandhoudings- en operationele kosten) van de DTP dam (**bestaande ontwerp**) voor locatie IJmuiden als volgt:

- CAPEX: EUR 28 miljard, dus grofweg tussen EUR 20-40 miljard rekening houdend met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval);
- OPEX: tussen 0,2 en 0,5 % per jaar van de investeringskosten, dus grofweg tussen EUR 60-140 miljoen per jaar.

Op basis van een technische evaluatie blijkt dat er veel opmerkingen zijn op het bestaande ontwerp (en gehanteerde volumes). Daartoe is een realistischer, **alternatief ontwerp** gemaakt. De CAPEX en OPEX van dit alternatief van de DTP dam worden ongeveer 30% hoger ingeschat:

- CAPEX alternatief 1, locatie IJmuiden: EUR 36 miljard, dus grofweg tussen EUR 25-55 miljard rekening houdend met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval);
- CAPEX alternatief 1, locatie Maasvlakte 2: EUR 33 miljard, dus grofweg tussen EUR 23-50 miljard rekening houdend met de variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval);
- OPEX: tussen 0,2 en 0,5 % per jaar van de investeringskosten, grofweg tussen EUR 70-180 miljoen per jaar voor IJmuiden en tussen EUR 65-165 miljoen per jaar voor Maasvlakte 2.

Figuur 5.4 geeft een visueel overzicht van de ingeschatte CAPEX.



Figuur 5.4 Investeringskosten, exclusief omzetbelasting

5.3.2 Einde levensduur

DTP heeft een kustlijn veranderende invloed. Het is daarmee ook de vraag wat er na 50 jaar met de constructie gaat gebeuren. Er zijn verschillende mogelijkheden voor de constructie: de dam kan worden verwijderd⁹, de dam met materialen kunnen voor een andere waterbouwkundige constructie worden gebruikt, de dam kan een upgrade krijgen waarbij de levensduur verlengd met nog eens 50 jaar gebruikt, etc. Al met al is het complex om te zien wat er in de toekomst met een DTP dam gebeurt (ontmantelen zoals met offshore windpalen is niet zo eenvoudig met een DTP dam). De restwaarde van de DTP dam bij einde levensduur

⁹ Indien ervoor wordt gekozen om de dam naar 50 jaar te verwijderen, dan is de impact op de omgeving van dezelfde orde als bij de introductie van de dam. Na verwijderen van de dam treedt er wederom kustmorfologisch gedrag met mogelijke invloed op de waterveiligheid. Daarnaast zijn er nieuwe scheepvaartroutes ontwikkeld welke mogelijk weer aangepast moeten worden.

is onbekend. Omdat het ver in de toekomst ligt en omdat er verschillende mogelijkheden zijn voor het omgaan met de dam bij einde levensduur, hebben we er voor gekozen om uit te gaan van een restwaarde van 0.

5.3.3 Onzekerheidsmarge

Er zijn in deze fase grote risico's en onzekerheden, er is daarom sprake van een grote bandbreedte, de variatiecoëfficiënt is naar schatting $\pm 40\%$ (bij een 70 % betrouwbaarheidsinterval). Projecten van deze omvang dienen internationaal te worden beschouwd. De benodigde capaciteit (en vooral grondstoffen) zijn dermate omvangrijk dat dit een beslag zou leggen op heel veel marktpartijen voor een hele lange periode. De wijze van fasering, aanbesteden en projectopdeling zullen van invloed zijn op de indirecte (tijdgebonden kosten) en engineeringkosten.

5.3.3.1 Aanbevelingen

Op basis van de technische evaluatie blijkt ook dat er nog optimalisatieruimte zit in het bestaande ontwerp. Een hoger toelaatbaar overslagdebiet voor de dam lijkt realistisch, bijvoorbeeld 50 l/s/m. Dit resulteert in een (fors) lagere kruinhoogte voor de landaansluiting, hoofdam en de vleugeldam dan in het bestaande ontwerp. In een vervolgfase zou de impact hiervan op de CAPEX (en OPEX) kunnen worden bepaald.

6 Prijs per kilowattuur

In de voorgaande hoofdstukken zijn de effecten van de DTP dam op de waterbeweging (Hoofdstuk 2.3), de energieopbrengsten (Hoofdstuk 4) en de kosten van de DTP dam bepaald (Hoofdstuk 5). Om de kosten van energie van de DTP dam te kunnen vergelijken met kosten van andere duurzaam opgewekte energie is de prijs per kilowattuur berekend voor beide varianten van de DTP dam.

6.1 Elektriciteitskosten per kilowattuur

Om de genivelleerde elektriciteitskosten per kilowattuur te bepalen is de TCO (total cost of ownership) gedeeld door de opgewekte elektriciteit zoals beschreven in paragraaf 4.2. De kosten voor de DTP dam zijn bepaald in Hoofdstuk 5. Hierbij zijn de kosten van het alternatieve ontwerp gebruikt om tot de kosten per kilowattuur te komen, omdat uit de technische evaluatie (paragraaf 5.1.1) bleek dat er een aantal ontwerpaanpassingen nodig waren om tot een realistisch ontwerp te komen.

De kosten voor de DTP dam zijn bepaald voor een levensduur van 50 jaar. Witteveen + Bos geeft aan dat op basis van ervaringen met waterbouwkundige constructies, er na 50 jaar operatie groot (levensverlengend) onderhoud vereist is met toenemende operationele kosten. Daarnaast zijn de hydraulische randvoorwaarden nog zeer onbetrouwbaar voor langere periode.

De genivelleerde kosten per kilowattuur voor beide varianten zijn weergegeven in Tabel 6.1. Stichting DTP heeft aangegeven dat er voor de variant bij IJmuiden een valmeer is voorzien tussen de vleugeldammen. Door de energie in een valmeer op te slaan reduceert de energieopbrengst verder. Een valmeer wordt namelijk leeggepompt op het moment van energieoverschot en er wordt water ingelaten door turbines op het moment van energieschaarste. Dit zou de energieopbrengst per jaar met zo'n 20-25% reduceren door rendementsverliezen in de pomp-turbine cyclus. Hierdoor zou de prijs per kilowattuur verder stijgen met zo'n 30-35%.

Tabel 6.1: Vermogens en prijs per kilowattuur voor de doorgerekende varianten DTP IJmuiden en DTP Maasvlakte 2. In deze tabel is het nationale elektriciteitsverbruik bepaald op 120 mld kwh (bron: CBS).

	DTP IJmuiden	DTP Maasvlakte 2
Max. vermogen (MW)	3430	836
Energie opbrengst per jaar (mld kwh)	5.55	1.39
Percentage t.o.v. nationaal verbruik	4.6%	1.2%
CAPEX (mld euro)	36	33
OPEX voor 50 jaar (mld euro)	6.25	5.75
TCO (mld euro)	42.25	38.75
Prijs / kwh	€ 0.15	€ 0.56

6.2 Gevoeligheidsanalyse

Witteveen + Bos heeft in hun analyse rekening gehouden met een variatiecoëfficiënt van $\pm 40\%$ (zie hoofdstuk 5.3). In Tabel 6.2 hebben de prijs per kilowattuur uitgerekend door rekening te houden met de variatie in de kosten. Hiermee komen de kosten per kilowattuur voor de

IJmuiden variant tussen de 9 en 21 cent per kilowattuur, terwijl dit tussen de 38 en 84 cent per kilowattuur is voor de Maasvlakte 2 variant.

Tabel 6.2: Gevoeligheid in de prijs per kilowattuur rekening houdend met de variatie van 40% in de kosten van de DTP dam.

	DTP IJmuiden		DTP Maasvlakte 2	
	bovengrens	ondergrens	bovengrens	ondergrens
CAPEX (mld euro)	22	50	23	50
OPEX 50 jaar (mld euro)	3.5	9	3.25	8.25
TCO (mld euro)	25.5	59	26.25	58.25
Prijs / kwh	€ 0.09	€ 0.21	€ 0.38	€ 0.84

7 Effect op waterveiligheid

7.1 Introductie

De duinen en dijken langs de Nederlandse kust beschermen het achterland tegen overstromingen vanuit zee. Bij zeldzaam hoge waterstanden en golven kan door golfaanval, duinafslag en golfoverslag over de dijken de veiligheid in het gedrang komen. Van nature varieert de overstromingskans achter waterkeringen sterk. In de eerste landelijk beoordelingsronde (LBO-1) is voor de meeste dijk- en duintrajecten een beoordelingsoordeel gerapporteerd van categorie A (tot 1/100.000 per jaar).

Indien een dam geplaatst wordt kan het water niet vrij langs de kust stromen en zal de waterstand aan de ene kant verhogen en aan de andere kant verlagen ten opzichte van een situatie zonder dam. Doordat de stromingsrichting door het getij twee maal daags wisselt, wisselt ook de kant waar de waterstand verhoogt of verlaagt. Daarnaast zorgt de wind voor opstuwing, die met dam mogelijk anders kan uitpakken dan zonder. Aan de hand van modelberekeningen laten we zien wat de orde van grootte is van de invloed die de dam op de waterstand heeft.

Met betrekking tot golven zal de DTP-dam voornamelijk een verlagend effect hebben, ofwel een verhoging van de veiligheid. Aan de lijzijde biedt de dam immers beschutting tegen hoge golven. Ook voor golven zijn modelberekeningen uitgevoerd om een heel globaal idee te geven van het invloedsgebied van de dam.

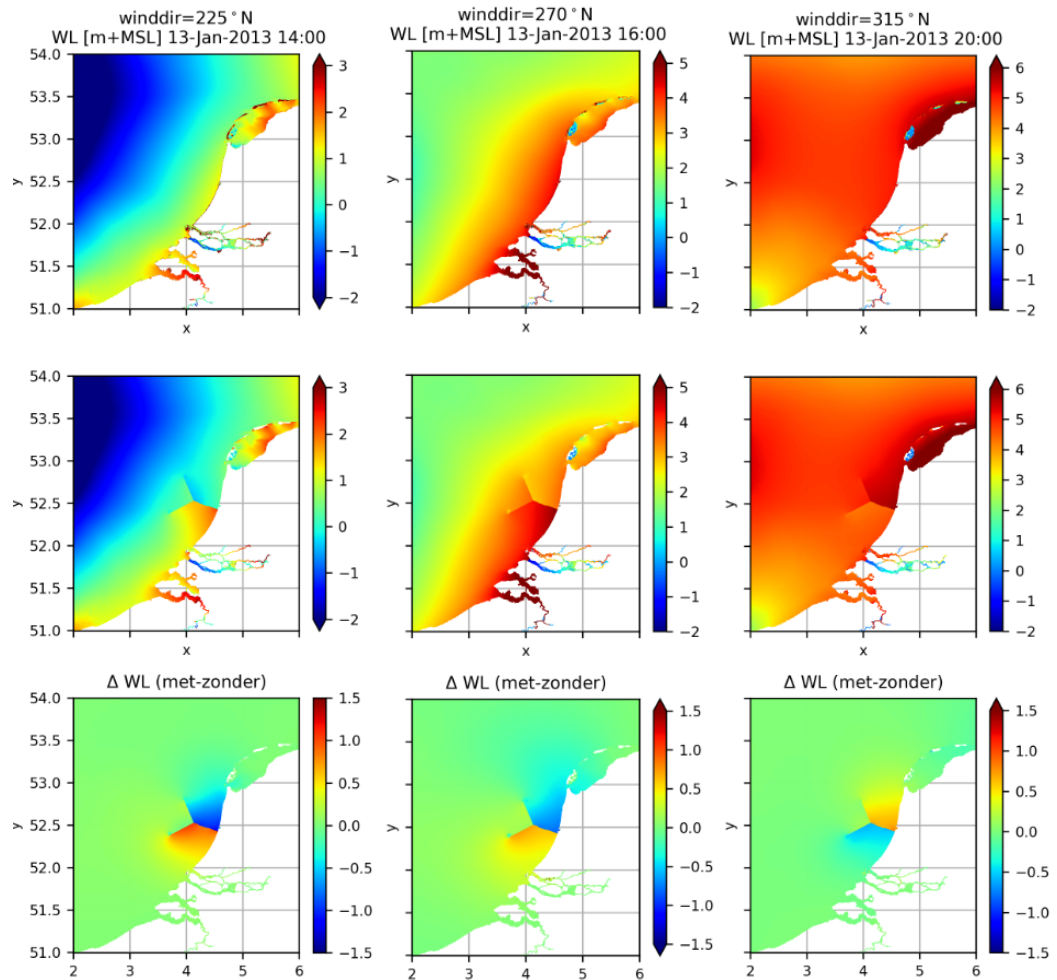
De volgende stormcondities illustreren een storm die zou kunnen optreden bij de gerapporteerde faalkans van de relevante dijktrajecten:

- Windrichting: ~NW
- Windsnelheid: ~ 32 m/s
- Waterstand: ~NAP+5 m
- Golfhoogte (Hs): ~8 m

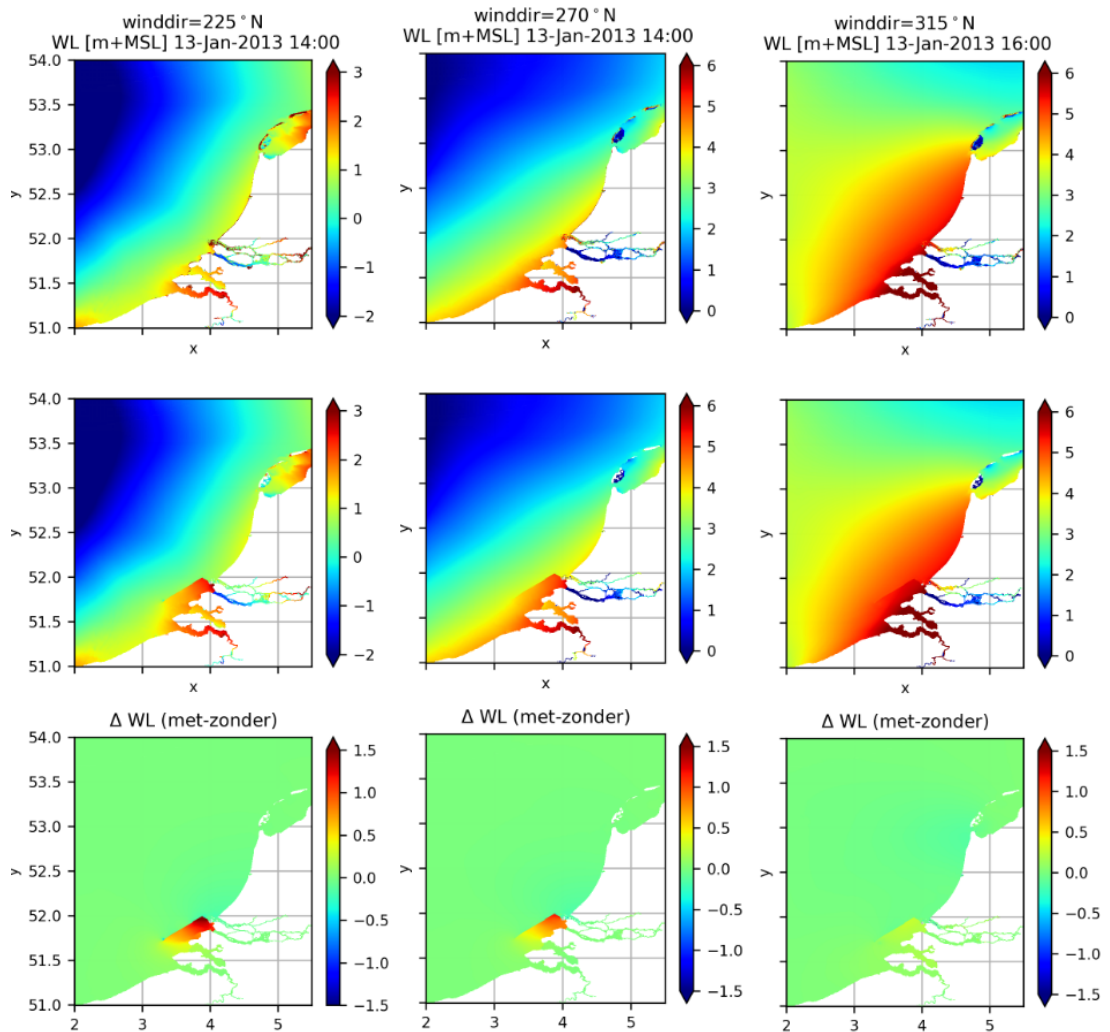
7.2 Modelberekeningen

7.2.1 Waterstanden

We beschouwen drie fictieve uniforme stormen met een maximale windsnelheid van 33.7 m/s (11-12 Bft) uit respectievelijk zuidwest, west en noordwest, in combinatie met een springtij en berekenen de waterstanden die in plaats en tijd zullen variëren. We doen dit voor drie damconfiguraties te weten (1) zonder dam, (2) een dam bij IJmuiden en (3) een dam bij de Maasvlakte. De dam is geschematiseerd met 1050 turbines waar het water doorheen kan stromen. Het stormverloop is als een zogenaamd trapezium met een basisduur van 48 uur geschematiseerd (de wind neemt in 18 uur toe van 0 m/s naar het maximum, houdt dan 12 uur aan en neemt vervolgens in 18 uur weer af tot 0 m/s).



Figuur 7.1: Effect van DTP-dam bij IJmuiden op extreme waterstanden tijdens storm uit Zuidwest (links), West (midden) en Noordwest (rechts). Boven: waterstand zonder dam; midden: met dam; onder: verschil [m] in waterstand tussen situatie met en zonder dam



Figuur 7.2: Effect van DTP-dam bij de Maasvlakte op extreme waterstanden tijdens storm uit Zuidwest (links), West (midden) en Noordwest (rechts). Boven: waterstand zonder dam; midden: met dam; onder: verschil [m] in waterstand tussen situatie met en zonder dam

Figuur 7.1 toont per storm voor een relevant moment de invloed van de dam op de waterstand. Deze resultaten dienen slechts als globale orde van grootte te worden gezien. Het hangt sterk af van het getij op het beschouwde moment of lokaal de waterstand verhoogt of verlaagt. Omdat de waterstand door zowel het stormverloop als het getij wordt beïnvloed, speelt ook de precieze samenloop van die twee een rol. In dit geval hebben we daar één keuze in gemaakt en niet gevarieerd in starttijd van de storm ten opzichte van het getij. Een andere keuze daarin kan tot iets andere resultaten leiden. De beschouwde momenten in bovenstaande figuur zijn momenten waarop het waterstandsverschil met en zonder dam groot is. Het zijn niet per se de momenten met maximale waterstanden.

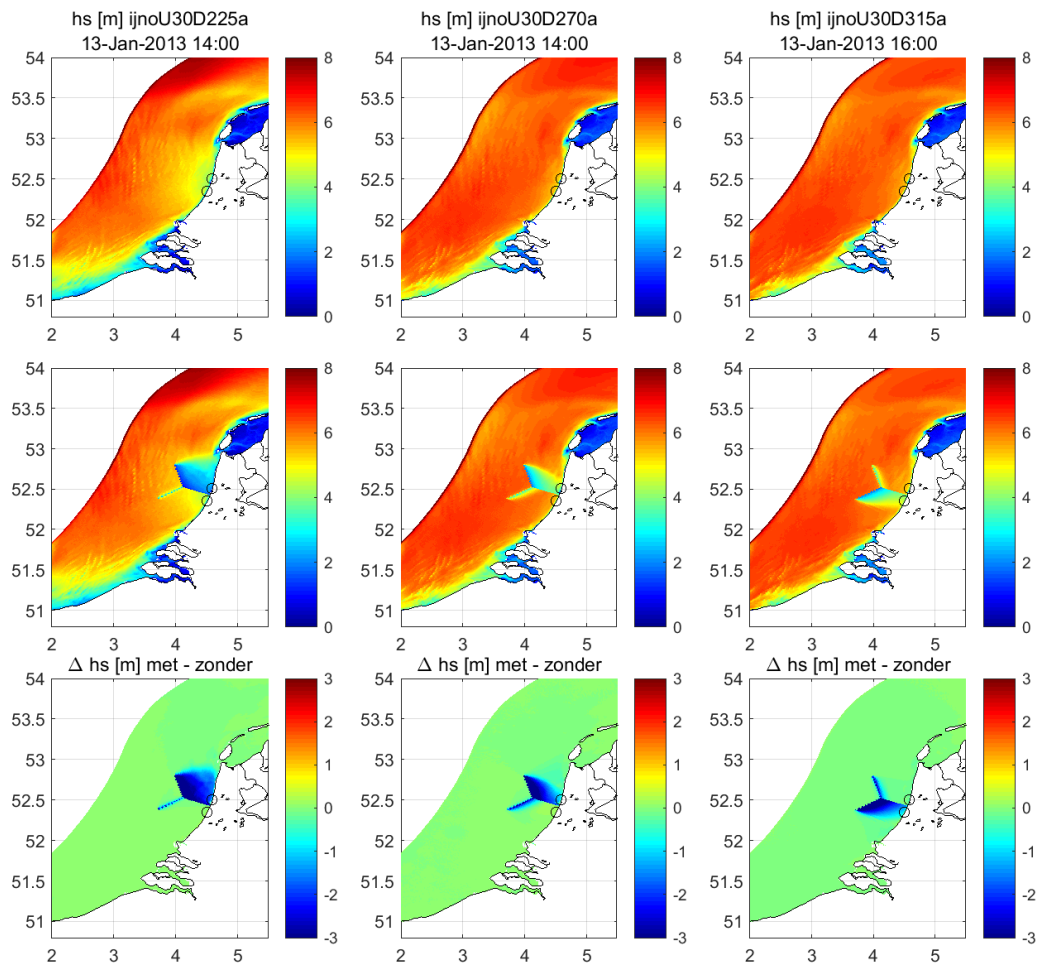
Grofweg zien we bij de IJmuiden-dam een toename van de maximale waterstand met ongeveer 0.5 - 1 meter ten opzichte van de situatie zonder dam. Het invloedsgebied reikt min of meer tot de landsgrenzen.

Voor de situatie met wind uit NW – min of meer representatief voor waterveiligheid – bedraagt de toename in maximale waterstand ten gevolge van de dam ongeveer 0.4 m. Deze verhoging treedt op nabij de dam, en geldt zowel voor de IJmuidenvariant als voor de Maasvlakte variant.

Indien de dam bij de Maasvlakte zou komen te liggen dan is het lokale effect op de waterstanden over het algemeen groter dan bij de IJmuidenvariant, maar het invloedsgebied is kleiner.

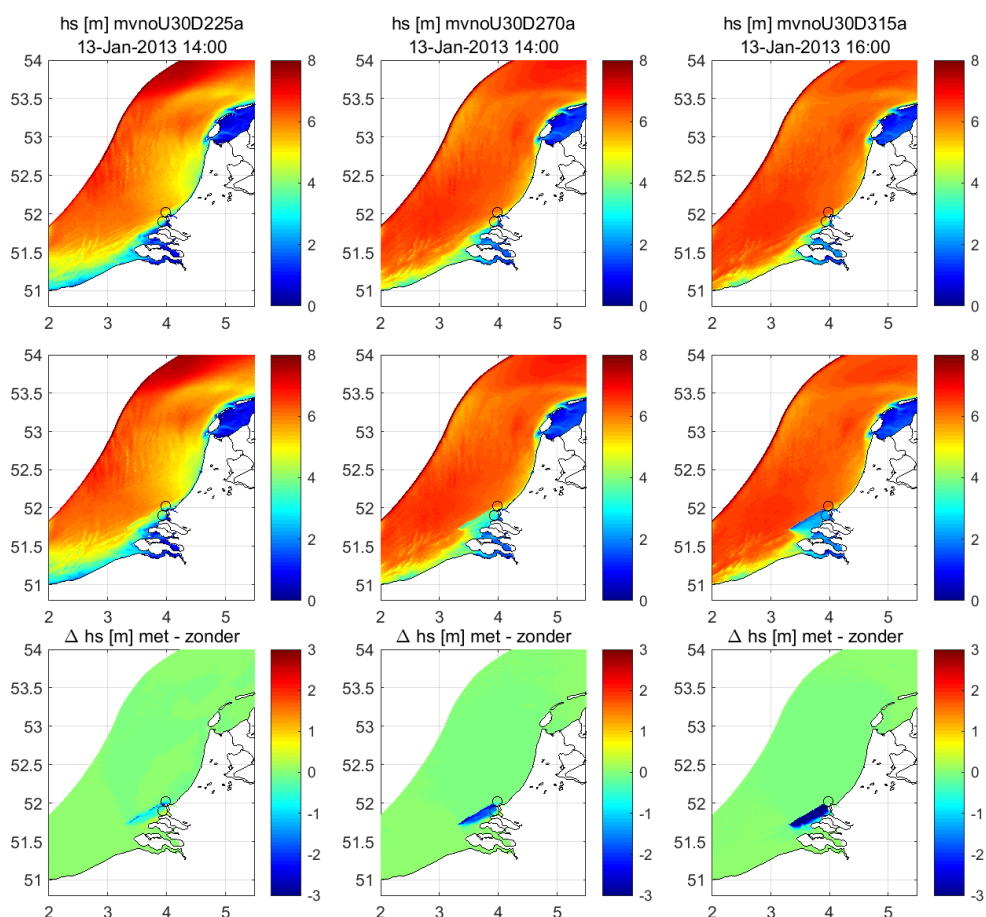
7.2.2 Golven

Ook voor de golven zijn simulaties gemaakt, voor dezelfde drie damconfiguraties (geen dam, dam bij IJmuiden, dam bij de Maasvlakte). De dam is als niet-doorlatend voor de golven geschematiseerd. Het betreft stationaire berekeningen met een wind van 30 m/s uit respectievelijk het zuidwesten, westen en noordwesten. In deze golfsimulaties gebruiken we een relevant waterstandsveld met hoge waterstand uit eerder genoemde waterstandsberekeningen als invoer.



Figuur 7.3: Effect van DTP-dam bij IJmuiden op extreme golven tijdens storm uit Zuidwest (links), West (midden) en Noordwest (rechts). Boven: significante golfhoogte zonder dam; midden: met dam; onder: verschil [m] in golfhoogte tussen situatie met en zonder dam. Bolletjes zijn uitvoerlocaties.

Het schaduwgebied waar de golven beperkt worden door de aanwezigheid van de dam, is beperkt. Door richtingsspreiding buigen de golven enigszins om de constructie heen. Ook ontstaan nieuwe golven door de lokale wind achter de dam, weliswaar met lagere golfhoogtes. De kustlangse afstand waarover de IJmuiden dam de golven aanzienlijk reduceert is voor een NW storm orde 20 km.



Figuur 7.4: Effect van DTP-dam bij de Maasvlakte op extreme golven tijdens storm uit Zuidwest (links), West (midden) en Noordwest (rechts). Boven: significante golfhoogte zonder dam; midden: met dam; onder: verschil [m] in golfhoogte tussen situatie met en zonder dam. Bolletjes zijn uitvoerlocaties.

Voor de Maasvlakte variant zijn de lokale effecten min of meer vergelijkbaar als bij IJmuiden. Als de DTP-dam bij de Maasvlakte zou komen te liggen dan zijn de maximale golven in de luwte van de dam meer dan twee meter lager dan de situatie zonder dam, vooral bij wind uit het noordwesten (zie Figuur 7.4). Vlak aan de kust is het effect kleiner omdat de golven achter de dam weer aangroeien en omdat golven enigszins om de dam heen buigen. Nergens resulteert de dam in verhoging van de golven.

7.3 Interpretatie en conclusie

Door het aanleggen van een grote dam loodrecht op de kust bij IJmuiden neemt de dreiging van een overstroming toe. Volgens een eerste beschouwing nemen de maximale waterstanden nabij de kust met ongeveer 0.5 - 1 m toe. We kunnen echter niet uitsluiten dat de toename bij andere varianten van storm en getij orde 1 - 2 m zal zijn. Daar zijn de huidige duinen en dijken mogelijk niet tegen bestand. Bij hogere waterstanden zal meer duinafslag tot zelfs duindoorkraak kunnen optreden. Dit geldt zowel voor het gebied ten noorden als ten zuiden van een dergelijke dam.

De dam zorgt wel voor reductie van de golfhoogtes maar dat is over een heel beperkt gebied want een groot deel van de golven buigt deels om de dam heen en bereikt dan toch de kust.

Op basis van deze beperkte analyse is niet aan te geven of - om het huidige waterveiligheidsniveau te handhaven - dijkverzwaringen langs een deel van de Nederlandse kust nodig zijn en/of extra zand om de duinen te verhogen.

We verwachten dat het effect van een grote dam op waterveiligheid niet te verwaarlozen is omdat de waterstanden lokaal toenemen. Middels een meer gedetailleerde studie zou uitgezocht moeten worden wat het kwantitatief betekent voor de waterveiligheid. Het zou dan òf om een acceptatie van een lager veiligheidsniveau gaan (onrealistisch) òf om aanpassingen in de dijken en duinen (inclusief stormvloedkeringen) langs de Nederlandse kust om aan de huidige normen te voldoen. Zaken om nader uit te zoeken zijn:

- Nadere detaillering van effect op waterstanden en golven door meer windrichtingen te beschouwen realistischere windvelden.
- Beschikbaarheid zand
- Effect van duinaanpassing op o.a. natuur, cultuurhistorie en leefomgeving
- Effect van dijkverzwaring op o.a. natuur, cultuurhistorie en leefomgeving
- Effect van aanpassingen kunstwerken (sluizen etc) op o.a. natuur, cultuurhistorie en leefomgeving
- Ruimtebeslag (eigendom) dijkverzwaring
- Wettelijk veiligheidsniveau

Overigens betreft waterveiligheid het risico op overstroming. Zwemveiligheid en recreatie is buiten beschouwing gelaten.

8 Effect op sedimenttransport

Als gevolg van het plaatsen van een DTP dam zijn effecten op sedimenttransport en morfologie in de (nabije) omgeving van de ingreep te verwachten. In dit hoofdstuk worden deze effecten geëvalueerd op basis van een algemeen systeembegrip in termen van relevante hydrodynamica, golfdynamiek, sedimenttransport en morfologie, en de te verwachten veranderingen daarop, als gevolg van de plaatsing van een DTP dam. Gezien het type evaluatie (op basis van een expert interpretatie) beperken we ons tot een kwalitatieve evaluatie van grootschalige effecten, waarbij details en kwantificering buiten beschouwing blijven.

Paragraaf 8.1 beschrijft een korte achtergrond voor het onderwerp van dit hoofdstuk. In Paragraaf 8.2 wordt een uiteenzetting van het huidige sedimenttransport en grootschalig morfologisch systeem van de Nederlandse kust gegeven, inclusief relevante hydro- en golfdynamica. Te verwachten effecten van een DTP dam op dit grootschalige systeem (wederom inclusief relevante hydro- en golfdynamica) worden vervolgens beschreven in Paragraaf 8.3. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een korte reflectie/discussie (Paragraaf 8.4), alsook conclusies (Paragraaf 8.5).

8.1 Achtergrond

Natuurlijke dynamische processen zoals hydrodynamica (m.n. stroming) en golfdynamiek zijn in staat sediment op de zeebodem te mobiliseren en te transporteren, als gevolg van de schuifspanningen die ze uitoefenen op de zeebodem. De mate en wijze van sedimenttransport is echter ook sterk afhankelijk van het soort sediment dat beschikbaar is op de zeebodem (en de eigenschappen daarvan), waarbij een onderscheid gemaakt kan worden tussen niet-cohesief (zandig) en cohesief (slibrijk, kleiig, i.e., modderig) sediment.

In het geval van een ruimtelijke variatie in transportpatronen van het sediment resulteren deze processen in morfologische veranderingen (veranderingen van het zeebodenniveau, kustlijnposities, strandhoogtes, etc.) alsook mogelijke geofysische veranderingen (de samenstelling van sedimentdeeltjes) nabij het bodemoppervlak. Deze veranderingen beïnvloeden op hun beurt weer de hydrodynamica en golfdynamiek. Daar waar systemen door menselijke ingrepen worden aangepast, is een impact te verwachten op (een combinatie van) bovenstaande aspecten. Dit hoofdstuk beschouwt deze aspecten, in het licht van een DTP dam.

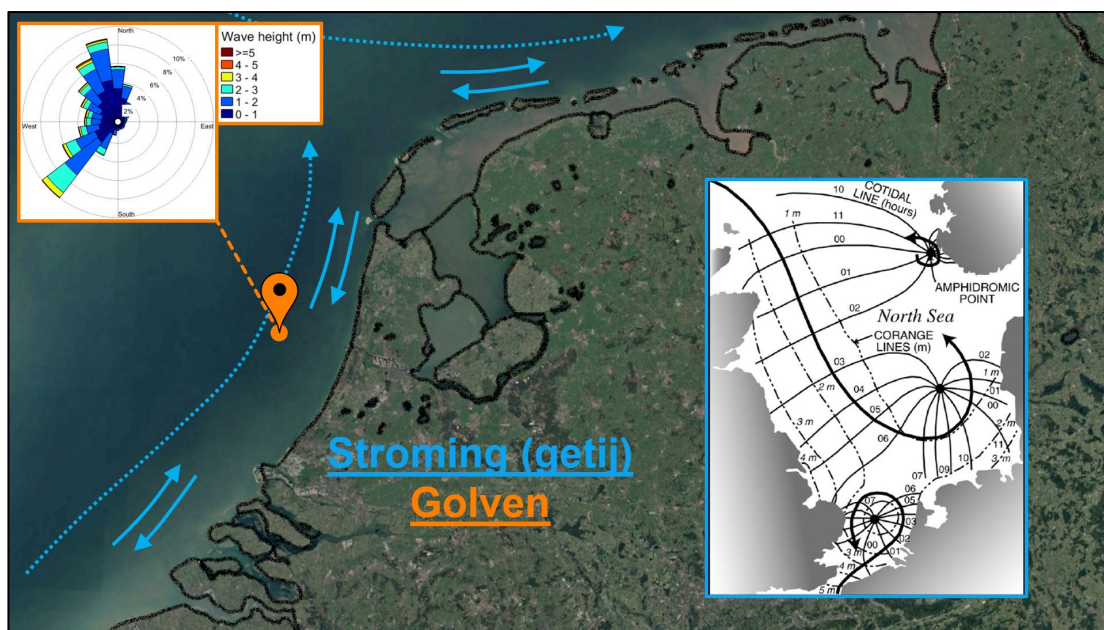
8.2 Sedimenttransport en morfologie nabij de Nederlandse kust

In de gebieden langs de Nederlandse kust spelen zowel stroming (m.n. getij-, maar ook wind- en dichtheid-geïnduceerd) als golven een belangrijke rol voor het sedimenttransport (zie Figuur 8.1). Daarbij kan tevens een onderscheid worden gemaakt tussen fijn sediment (slib, klei) en zand. Hoewel niet volledig exclusief, wordt fijn sediment met name getransporteerd door stroming, en zand voornamelijk door golven nabij de kust, alsook stroming dieper in zee.

8.2.1 Relevante hydro- en golfdynamica

De getijgolf langs de Hollandse kust plant zich van zuid naar noord voort, waarbij deze richting het oosten afbuigt nabij de Waddenzee (zie ook het rechter paneel in Figuur 8.1). De langs de Hollandse kust zuid- en noordwaarts gerichte eb- en vloedstromen (blauwe pijlen in Figuur 8.1) kenmerken zich door maximale stroomsnelheden (tijdens springtij) van typisch 0.6 tot 0.7 m/s (Rijkswaterstaat, 1993), waarbij een noordwaarts gerichte residuele stroming van ongeveer 5

cm/s kenmerkend is (gestippelde blauwe lijnen in Figuur 8.1), als gevolg van diverse processen als dominante wind patronen, Stokes drift en de zoetwaterpluim komende vanuit de Rijn. Het golfklimaat langs de Nederlandse kust kenmerkt zich door significante golfhoogtes die zich voornamelijk in klassen tussen grofweg 0.5 en 2.0 meter bevinden (zie linkerpaneel in Figuur 8.1), en vrijwel volledig door lokale windvelden gegenereerd zijn (i.e., deining is veelal irrelevant). Een duidelijke focus van golfenergie komende uit de sectoren zuidwest (ZW) en noordnoordwest (NNW) is tevens noemenswaardig, waarbij opgemerkt kan worden dat stormen ook typisch gelinkt zijn aan deze golfsectoren, met significante golfhoogtes tot boven 5 m.



Figuur 8.1 Schematisch overzicht van de belangrijkste hydro- en golfdynamica relevant voor sedimenttransport en morfologie langs de Nederlandse kust. Betreffende getijstrooming (blauwe pijlen, en rechter paneel met een weergave van de getijgolf in de Noordzee, Kvale - 2006) incl. residuele strooming (blauw gestippelde pijlen), alsook typische golfcondities, weergegeven in het oranje paneel (links, o.b.v. Wijnberg 2002) voor meetplatform IJmuiden.

8.2.2 Grootschalig zandtransport

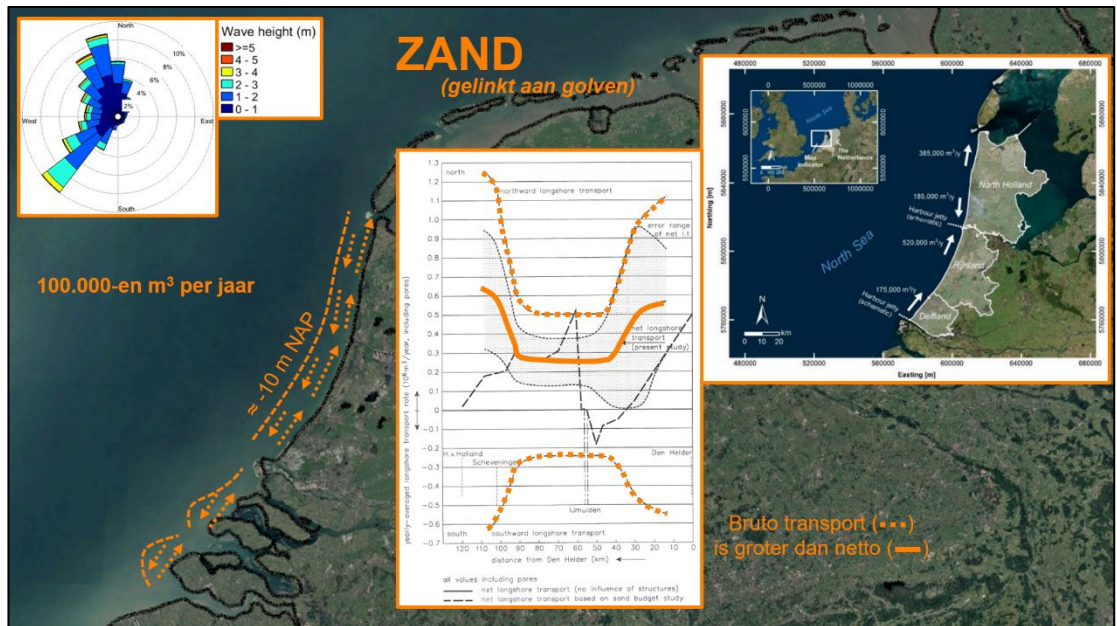
Het zandtransport langs de Hollandse kust kan onderverdeeld worden in golfgedreven transport wat dichtbij de kust plaatsvindt en getij-gedreven transport op de diepere vooroever.

Golfgedreven langstransport speelt zich af in de actieve zone (een strook met breedte van ongeveer 1 a 2 km) lopende van grofweg -10 m NAP¹⁰ tot ongeveer de duinvoet. Het golfgedreven langstransport in deze zone is voornamelijk een gevolg van de dissipatie van scheef (t.o.v. haaks op de kustlijn) inkomende golfenergie in de brandingszone.

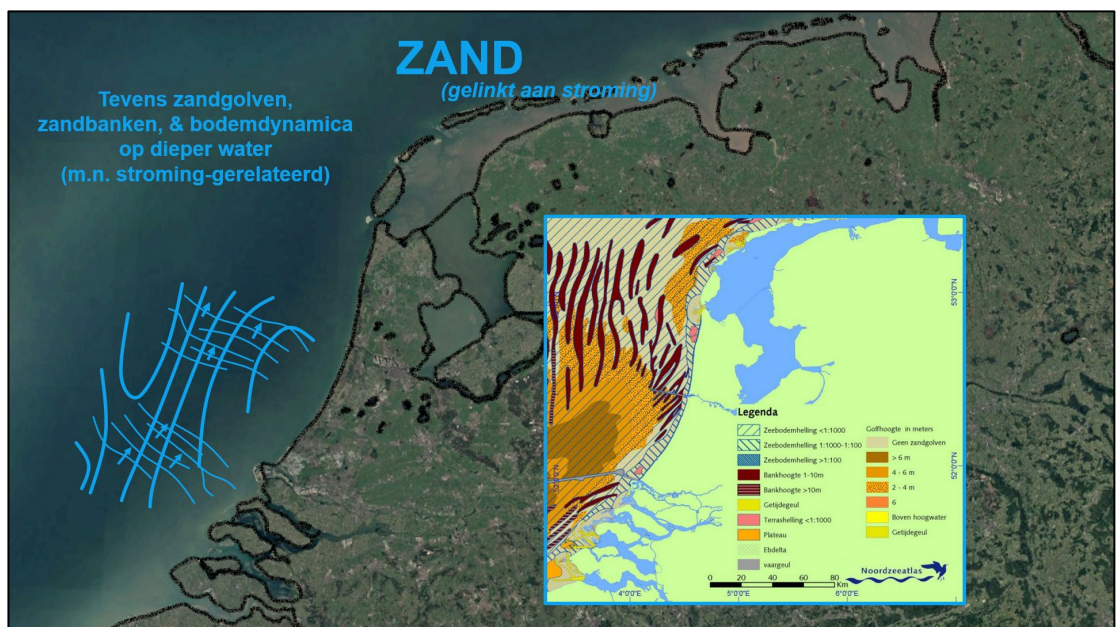
Als gevolg van de verschillende oriëntaties van inkomende golven door de tijd varieert dit golfgedreven langstransport langs de Hollandse kust. Grofweg zal het sedimenttransport noordwaarts gericht zijn tijdens golven uit zuidwestelijke sectoren, terwijl dit zuidelijk is voor golven uit bijvoorbeeld de sector NNW (zie de oranje pijlen op de overzichtskaart in Figuur 8.2). De som van deze bruto transporten resulteert in een netto transport dat typisch noordwaarts gericht is, en langs de Hollandse kust varieert van grofweg 200.000 tot 600.000 m³ per jaar (van Rijn 1995, zie ook de middelste en rechter paneel in Figuur 8.2).

¹⁰ Diverse studie beschrijven waarden variërend van ongeveer -8 tot -12 m NAP.

We merken op dat ook offshore (verder in de Noordzee, op grotere dieptes) zandtransport plaatsvindt. Waar het zandtransport in de actieve zone langs de Nederlandse kust voornamelijk golfgedreven is, speelt op deze dieptes (getij)stroming een dominante rol op het zandtransport. Systemen van megaribbels, zandgolven en zandbanken (hoewel deze laatste veelal laag-dynamisch zijn) laten zien dat ook op grotere dieptes zandtransport plaatsvindt. Dit aspect is schematisch weergegeven in Figuur 8.3.



Figuur 8.2 Schematisch overzicht van de belangrijkste bijdrage aan zandtransport langs de Nederlandse kust, betreffende langstransport gedreven door golven (linker paneel, zie ook Figuur 8.1) in de actieve zone. Bruto transporten (oranje stippellijn in het middelste paneel, op basis van ref van Rijn 1995) naar het noorden en zuiden resulteert in een netto transport (oranje lijn) in de orde van enkele 100.000-en m^3 per jaar richting het noorden. Berekende netto transporten langs de Hollandse kust zijn weergegeven in het rechterpaneel (Giardino et al, 2019).

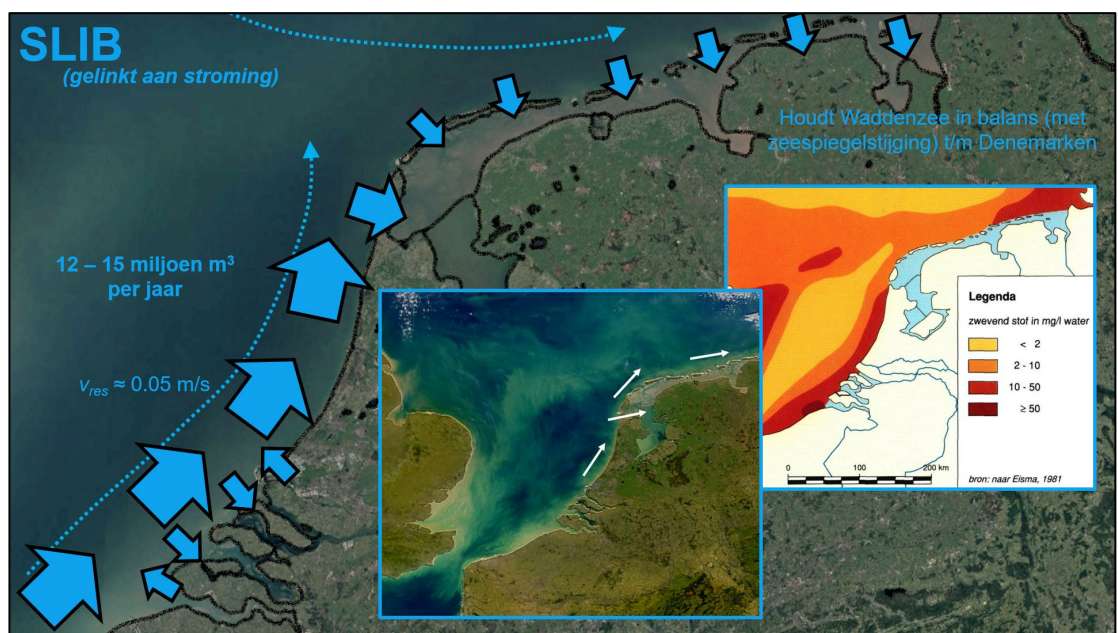


Figuur 8.3 Schematische weergave van offshore zandtransport als gevolg van voornamelijk (getij)stroming, in bodemvormen van diverse schalen (megaribbels, zandgolven, banken, etc.). Het paneel geeft een kaart weer waarin de aanwezigheid van banken en zandgolven wordt weergegeven (o.b.v. de Noordzeaatlas).

8.2.3 Grootschalig slibtransport

Als gevolg van een noordwaarts gerichte residuele (getij)stroming en voldoende agitatie van de zeebodem (in de vorm van bodemschuifspanning) als gevolg van stroming en golfactiviteit wordt ongeveer 12 tot 15 miljoen m³ fijn sediment (m.n. slib, o.b.v. Oost et al - 2021) langs de Nederlandse kust in suspensie getransporteerd.¹¹ (zie Figuur 8.4). De aanwas van dit materiaal naar de Nederlandse wateren vindt voornamelijk plaats vanuit het Nauw van Calais (middels kliferosie) en diverse riviersystemen in de Belgische, Franse en Engelse wateren. De bijdrage van fijn sediment door de Rijn-Maas-Scheldedelta aan dit netto transport is een orde kleiner dan het mariene langstransport en vergelijkbaar met de hoeveelheid slib welke in de Zuidwestelijke delta wordt afgezet. De influx van zoet water vanuit de Rijn heeft via dichtheid-gedreven (i.e., zoet-zout gradiënt geïnduceerde) stromingen een belangrijke rol in het vasthouden en Noordwaarts transporteren van slib langs de Hollandse kust.

Het noordwaarts slibtransport langs de Nederlandse kust wordt door de diverse importerende zeegaten van de Waddenzee ingevangen, en draagt zo bij aan de slibbalans in de volledige Waddenzee (tot en met Denemarken). De aanwas van fijn sediment is in lijn met de huidige mate van zeespiegelstijging, welke ongeveer 2 mm per jaar bedraagt.



Figuur 8.4 Schematisch overzicht van de belangrijkste netto slibtransporten (blauwe pijlen) langs de Nederlandse kust, betreffende sedimenttransport in suspensie, gedreven door (residuele) stromingen (gestippelde pijlen). Gezien de geringe valsnelheden (typisch < 1 mm/s) en kritische schuifspanningen (typisch < 0.2 Pa.) kan dit tot dieptes van enkele 10-tallen meters plaatsvinden. Het middelste paneel toont een satellietbeeld waarop suspensief (fijn) sediment goed zichtbaar is, het vertoont tevens veel gelijkenis met de patronen in het rechterpaneel, waarin de gemiddelde concentratie van fijn sediment in de waterkolom is weergegeven (typisch variërend van zo'n 5 tot 20 mg/L in de eerste 10-tallen kilometers vanaf de Nederlandse kust, waarbij een sterke verticale gradiënt kenmerkend is).

¹¹ Deze orde van grootte (12 – 15 miljoen m³ per jaar) is gemakkelijk na te rekenen door een dragende waterbreedte van ongeveer 20 km haaks op de kustlijn aan te nemen met een gemiddelde diepte van grofweg 20 m. Bij een residuele stroming van 5 cm/s, een aangenomen droge dichtheid van ongeveer 500 kg/m³ en een typische diepte-gemiddelde concentratie van 10 mg/L bedraagt het slibtransport ongeveer 12.5 miljoen m³ per jaar.

8.3 Effecten van een DTP dam

In deze paragraaf worden de te verwachten effecten van een DTP dam op het huidige sedimenttransport en grootschalig morfologisch systeem van de Nederlandse kust uiteengezet. Ter bevordering van beknoptheid visualiseren we voor deze evaluatie de effecten van de twee individuele DTP-opties (zoals weergegeven in Figuur 2.1) gezamenlijk, maar waarbij de effecten per individuele DTP-optie beschouwd (en indien nodig separaat beschreven) zijn.

Gezien de sterke relevante link met hydro- en golfdynamica, start dit hoofdstuk in Paragraaf 8.3.1 met de relevante effecten van een DTP dam op deze aspecten, gevolgd door effecten op zand- en slibtransport in de opvolgende paragrafen (8.2.2 en 8.2.3, respectievelijk).

8.3.1 Effecten op hydro- en golfdynamica

De belangrijkste te verwachten effecten op de hydro- en golfdynamica zijn visueel uiteengezet in Figuur 8.5, met een onderscheid voor effecten op hydrodynamica (m.n. (getij)stroming, in het linkerpaneel) en golfdynamica (rechterpaneel). Hieronder worden deze effecten verder uiteengezet.

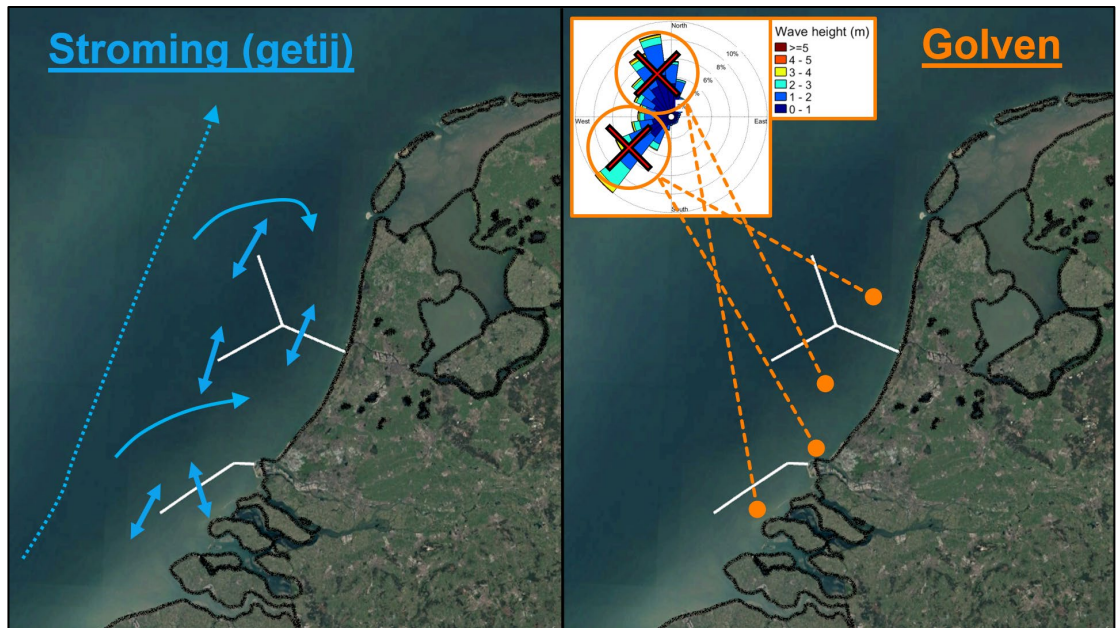
Als gevolg van een DTP dam is, ondanks de vele openingen t.b.v. de turbines, te verwachten dat de eerder ongestoorde getijgolf een significante blokkade zal ondervinden. Als gevolg van de blokkade van de getijgolf zullen de voornaamste getijstromingen (inclusief residuele stroming) zich verder offshore van een DTP dam verplaatsen, en daar naar verwachting ook in magnitude afnemen, gezien de grotere dieptes ter plaatse. Dicht bij de aansluiting van de DTP dam op de Nederlandse kust ontstaan zodoende schaduwzones, waar een significante reductie in (getij)stroomsnelheden te verwachten is. In deze zones zal de in- en uitstroom van water (als gevolg van waterstandsvariatie) naar verwachting een toenemende kust-haakse oriëntatie bevatten (vooral in de gebieden ten noorden van de DTP dam), waar dit in de huidige situatie veelal kust-langs is, in lijn met de huidige ongestoorde voortplanting van de getijgolf.

Zoals hierboven beschreven is te verwachten dat de huidige getijgolf en bijbehorende stroomsnelheden niet in staat zijn zich ongestoord door de turbineopeningen van DTP dam voort te planten. Er zal zodoende een waterstandsverhang ontstaan tussen de weerszijden van de DTP dam (zoals de intentie van het DTP-concept). Met name aan de uitstroomzijde zal een sterke turbulente stroming ontstaan bij de (turbine)openingen van de DTP dam, zoals ook kenmerkend voor bijvoorbeeld een geopende Oosterscheldekering. Daarnaast is tevens een significante toename van getijstroming te verwachten nabij de zeewaartse uiteinden van de DTP-concepten. Dit is een gevolg van stromingscontractie nabij deze uiteinden, waar diverse stromingslijnen samenkomen. Dergelijke veranderingen kunnen tevens effect hebben op scheepvaart, zoals geëvalueerd in Hoofdstuk 10.

De DTP dam zal ook de subtiele residuele stromingen in de kustzone verstoren, door invloed op de huidige effecten van dominante wind patronen, Stokes drift en de zoetwaterpluim komende vanuit de Rijn. De huidige residuele kustlangse stroming is belangrijk voor het transport van nutriënten vanuit de Rijn-Maas monding Noordwaarts, met name richting de Waddenzee. Dit transport zal sterk verminderd worden, en kan leiden tot een reductie in de aanvoer van nutriënten naar de Waddenzee. Daarnaast zal een (gedeeltelijke) blokkade van de stroming mogelijk significante negatieve effecten op verversing, waterkwaliteit en de nutriëntencyclus hebben.

Inkomende golfenergie ondervindt een blokkade door de DTP dam. Ter plaatse van zowel de reguliere DTP-damconstructie alsook de turbineopeningen zal de blokkering van golfenergie (vrijwel) volledig zijn. Zoals ook schematisch weergegeven in het rechterpaneel van Figuur 8.5, zullen golven uit zuid tot westelijke sectoren de gebieden ten noorden van de beide DTP-

concepten niet kunnen bereiken, terwijl dit voor golven met een noord tot westelijke origine geldt voor de gebieden ten zuiden van de beide DTP-concepten. Als gevolg hiervan is een significant effect op de golfklimaten langs de Nederlandse kust te verwachten, met een sterke relatieve (maar niet absolute) toename van dominantie van golven uit zuidwestelijke sectoren ten zuiden van de DTP dam, en een noordnoordwestelijke dominantie ten noorden van de DTP dam.



Figuur 8.5 Overzicht van de belangrijkste effecten van de DTP dam op hydro- en golfdynamica, relevant voor sedimenttransport en morfologie, met in het linkerpaneel effecten op stroming (getij) en rechts op golfdynamica.

Tenslotte is als gevolg van de DTP dam gedurende stormen een amplificatie in grootschalige windgedreven stormopzet mogelijk, gezien het 'trechtereffect' gelinkt aan het ontwerp van de DTP dam. Stormopzet is een belangrijke variabele in het bepalen van de kustveiligheid van het duinsysteem. Stormen uit het noorden zijn over het algemeen maatgevend voor de waterstandsoopzet. Dit zal daarom vooral voor het gebied direct noordelijk van de DTP dam relevant zijn.

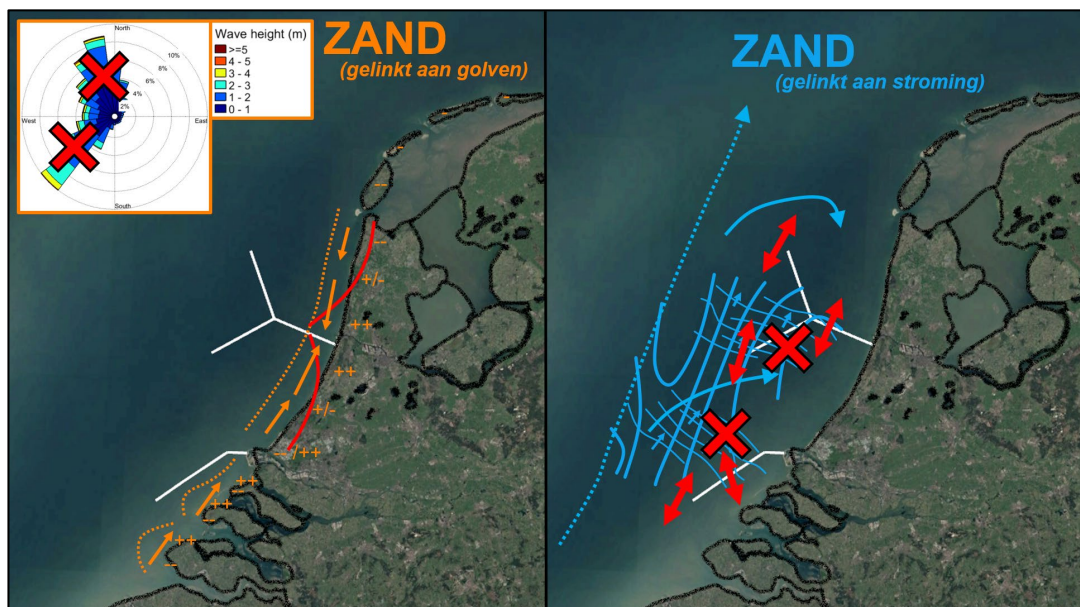
8.3.2 Effecten op zandtransport

Langs de Nederlandse kust is een zeer significant effect van de DTP dam te verwachten op het golfgedreven langstransport van zand. Zoals beschreven in Paragraaf 8.3.1 is een blokkade van een groot deel van de inkomende golfenergie te verwachten als gevolg van de DTP dam. Dit zorgt ervoor dat langstransporten ten noorden van de DTP dam zuidelijk gericht zullen zijn, en ten zuiden van de DTP dam noordelijk gericht zijn (i.e. langstransport in de richting van de aanlanding van de DTP dam), zoals weergegeven in Figuur 8.6. De netto transporten zullen naar verwachting ongeveer gelijk zijn aan de huidige bruto transporten, waardoor een significante toename van netto langstransport te verwachten is, met name ten zuiden van de DTP-ingrepen.

Voor het DTP-alternatief met aanlanding bij IJmuiden zal de kustlijn de neiging hebben om zich op lange-termijn (decennia tot eeuwen) te ontwikkelen richting de door de rode lijn in het linkerpaneel van Figuur 8.6 weergegeven situatie (niet naar schaal, en tijdsgebonden). Om dit te compenseren zal frequent zand verplaatst (bijvoorbeeld gebaggerd) dienen te worden van de aanzandingszones naar de erosieve zones. Op de lange termijn zal tevens een toenemende zandhonger ter plaatse van de Waddeneilanden te verwachten zijn, in vergelijking tot de situatie zonder DTP dam.

In het geval van een DTP dam met aanlanding aan Maasvlakte II is de invloed voornamelijk ten zuiden van de DTP dam te verwachten, mede gezien de setting van de Rotterdamse haven en diens Noorderdam (hier vindt veelal geen langtransport plaats). Ten zuiden van de DTP dam is een sterk toenemend netto noordwaarts gericht zandtransport te verwachten, waarbij de diverse (schier)eilanden in de Zeeuwse delta onderhevig zullen zijn aan erosieve trends in de zuidelijke delen van de zeewaartse stranden (zie ook als '—' weergegeven in Figuur 8.6), en aanzanding in de noordelijke delen ('++'). Dit effect zal vooral groot zijn voor de noordkust van Walcheren en de westkust van Schouwen. Voor dit DTP-alternatief zal frequent zand verplaatst dienen te worden van de aanzandingszones naar de erosieve zones, indien de effecten gemitigeerd dienen te worden. Specifiek zal op Walcheren waarschijnlijk extra aanvoer van sediment nodig zijn, omdat sediment bij Noord-Beveland richting de geul wordt afgevoerd, en daarom niet makkelijk herbruikbaar is. De invloed op de andere kustsecties is beperkter. De golven aan de zuidwestzijde van Walcheren zullen namelijk niet wezenlijk worden beïnvloed. Op de stranden van Goeree, Voorne en de zuidelijke Maasvlakte zullen de golfcondities dusdanig verminderd zijn dat sedimenttransporten aanzienlijk af zullen nemen, waardoor vooral verslibbing op het strand hier een aandachtspunt zal zijn.

Verder offshore zijn als gevolg van de significante veranderingen in getijgolfpropagatie tevens enkele effecten van de DTP dam te verwachten op het zandtransport. Zo zal de dynamiek in diverse velden van bestaande megaribbels en zandgolven verminderen (rode kruisen in rechter paneel van Figuur 8.6), terwijl op andere locaties karakteristieken van deze bodemvormen (zoals grootte, oriëntatie, migratiesnelheid) kunnen veranderen. Bovendien kunnen bodemvormen ontstaan in gebieden waar deze momenteel niet voorkomen. Ter plaatste van locaties waar een toename in stroomsnelheden (contractie) en/of turbulentie te verwachten is (rode pijlen in rechter paneel van Figuur 8.6) is ontgroning/erosie te verwachten. Dit gaat veelal samen met een (beperkte) verandering in de typische korrelgrootte-/verdeling van het resterende sediment op de zeebodem in deze gebieden. Ter plaatste van de zeewaartse einden van de DTP dam kunnen de te ontwikkelen depressiezones significant zijn in omvang (orde vierkante kilometers). Het geërodeerde veelal zandige materiaal zal zich voornamelijk afzetten in zones direct aansluitend op de erosieve zones. Beide effecten zoals hierboven beschreven kunnen funderingen en bodembescherming van bestaande activa aantasten of doen falen.



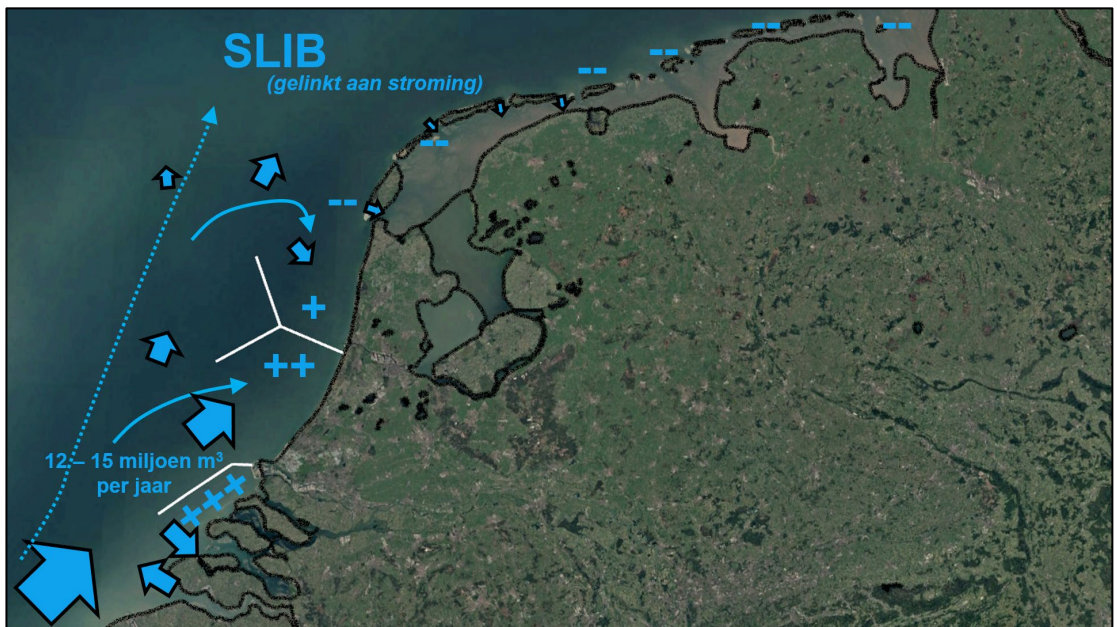
Figuur 8.6 Overzicht van de belangrijkste effecten van een DTP dam op zandtransport en morfologie, met in het linkerpaneel een stigmatisatie van de effecten op langtransport en kustlijnverandering (gelinkt aan golven), en in het rechterpaneel de effecten verder offshore in de Noordzee (door veranderingen in stromingspatronen).

8.3.3 Effecten op slibtransport

Als gevolg van de aanleg van de DTP dam wordt het natuurlijke transportsysteem van slib significant verstoord. De schaduwzones die ontstaan rondom de DTP dam (en met name de zones ten zuiden van de DTP dam) werken als een effectieve slibvang, gezien de beperkte te verwachten stroomsnelheden in deze gebieden (zie aangegeven door de '+' iconen in Figuur 8.7). Hierbij is er een belangrijk verschil tussen de Noordelijke en Zuidelijke DTP-variant. De binnenzijde van de Zuidelijke variant vormt een zeer efficiënte sedimentinvang doordat de DTP dam als een wantij gaat fungeren, waar het sediment door getij naartoe wordt getransporteerd. Opwoeling van slib door golven zal met het huidige DTP ontwerp zeer beperkt zijn. Daarnaast is het aanbod van slib hoog vanwege de nabijheid van het troebelheidsmaximum rondom de haven van Zeebrugge. Het effect van de Noordelijke DTP dam is lastiger te voorspellen. Ook deze DTP dam gaat mogelijk als een wantij fungeren, maar in tegenstelling tot de Zuidelijke variant kan dit materiaal wel door golven opgewoeld worden. Wel wordt ook hier aanslibbing verwacht, meer aan de Zuidzijde dan aan de Noordzijde vanwege het Noordwaarts transport van slib in de kustzone.

Als gevolg van de invang is een sterke toename van fijn sediment (modder) te verwachten in de bovenste laag van het (huidig zandige) zeebodemsubstraat. Niet alleen kan deze wijziging in geofysische eigenschappen van de zeebodem verstrekende gevolgen hebben voor de ecologische activiteit en eigenschappen, het kan tevens tot zeer troebel water leiden (zeker na momenten van omwoeling door stormen), met gevolgen voor lichtinval, waterkwaliteit en esthetica. Op de zeer lange termijn kunnen in de meest luwe zones (bijvoorbeeld achter de knikken in het huidige DTP-ontwerp), waar resuspensie beperkt is, modderplaten ontstaan, zoals kenmerkend voor de Waddenzee.

Het in de luwtezones ingevangen slib wordt onttrokken uit het huidige dynamische systeem, waarbij een significant deel van het slib dat in de huidige situatie getransporteerd wordt naar de Waddenzee niet langer deze gebieden zal bereiken. Als gevolg van dit effect zal een relatieve slibhonger in de volledige Waddenzee kunnen ontstaan, zeker in combinatie met een verwacht toekomstig slibtekort dat te verwachten is als gevolg van de toekomstige toename in mate van zeespiegelstijging. Naast morfologische effecten zal de afnemende aanwas van slib effect hebben op ecologische en waterkwaliteitsaspecten van de Waddenzee.



Figuur 8.7 Overzicht van de belangrijkste effecten van een DTP dam op slibtransport en morfologie, waarbij zones met aanslibbing weergegeven zijn door '+' en zones met een afname aan beschikbaar slib door '-'.

8.4 Discussie

In de voorgaande paragrafen is een grootschalige en kwalitatieve uiteenzetting van de te verwachten effecten van twee DTP-varianten langs de Nederlandse kust op het gebied van sedimenttransport en morfologie uiteengezet, op basis van een expertinterpretatie in relatie tot een grootschalig systeembegrip. Lokale details en effecten kunnen sterk variëren tussen verschillende DTP-varianten, maar zijn – zoals eerder uiteengezet in het begin van dit hoofdstuk – geen onderdeel van deze studie. Wel plaatsen we de kanttekening dat indien er voor een andere DTP-locatie/-variant gekozen wordt langs de Nederlandse kust of direct offshore daarvan, er vergelijkbare grootschalige effecten mogen worden verwacht. Los daarvan blijft een kwantitatieve en gedetailleerde impact studie sterk aan te bevelen zodra een eventuele verdere uitwerking van het uiteindelijke DTP ontwerp beschikbaar is.

De analyses die zijn uitgevoerd in deze studie ten aanzien van de effecten op de morfologie zijn conceptueel van aard. Het is duidelijk dat de morfologische effecten van een DTP dam zeer groot zijn. Deze effecten en kosten om nadelige effecten te mitigeren moeten niet worden onderschat. Hierbij wordt opgemerkt dat morfologische effecten zeer lang doorwerken en zich afspelen op een tijdschaal van eeuwen. Deze les hebben we geleerd door de grote waterbouwkundige werken zoals de Deltawerken en de Afsluitdijk. Ondanks dat deze reeds 50 tot 100 jaar bestaan is de kust zich nog steeds aan het aanpassen aan die ingrepen.

8.5 Conclusies

In dit hoofdstuk is een grootschalige kwalitatieve evaluatie beschreven van de effecten van de DTP dam op sedimenttransport en morfologie. Gezien de relevantie van specifieke hydro- en golfdynamica is tevens een beschrijving gegeven van de veranderingen op deze aspecten, als gevolg van de DTP dam. De conclusies omtrent hoofdeffecten van de DTP dam laten zich als volgt beschrijven:

- Effecten van de DTP dam op:
 - Hydrodynamica (m.n. (getij)stroming)
 - Verplaatsing van getijgolf richting offshore
 - Ontstaan van laagdynamische luwtezones nabij de DTP dam
 - Beïnvloeding van residuele langsstromen
 - Toenemende turbulentie en stroomsnelheden nabij turbines en offshore uiteinden van DTP-dammen
 - Golfdynamica
 - Ontstaan van laagdynamische luwtezones nabij de DTP dam
 - Blokkering van specifieke richtingssectoren ten noorden en zuiden van de DTP dam
 - Sedimenttransport en morfologie
 - Zand
 - Langstransport van zand richting de aanlanding van de DTP dam
 - Netto langstransport neemt toe tot ongeveer de grootte van de bruto transporten door golven uit de zuidelijke of noordelijke richtingssectoren.
 - Relatieve zandhonger richting Waddenzee zal mogelijk toenemen voor een DTP-variant IJmuiden
 - Frequent additioneel kustonderhoud (verplaatsen van zand d.m.v. baggerwerkzaamheden)
 - Vermindering of verandering van bestaande velden van offshore megaribbels en zandgolven in de gebieden rondom de DTP dam, dan wel het mogelijk ontstaan van nieuwe velden.

- Ontgroning/erosie in gebieden naast DTP-turbines en nabij de offshore uiteinden van DTP-dammen (als gevolg van toename in stroming en turbulentie)
- Slib
 - Significante slibvangst in luwtezones nabij de DTP dam (met name de Zuidelijke variant).
 - Verandering van het oppervlakkige zeebodemsubstraat naar slibrijk materiaal in luwtezones nabij de DTP dam
 - Toenemende troebelheid van waterkolom in luwtezones nabij de DTP dam, in het bijzonder na stormen
 - Significante beperking van slibaanvoer naar Waddenzee (toenemende slibhonger)

Een verdere kwantificatie van de effecten is mogelijk door middel van een gedetailleerde impactstudie. De huidige studie heeft tot doel een algeheel en beschrijvend overzicht te bieden van de te verwachten effecten als gevolg van de aanleg van een DTP dam.

9 Effect op ecologie

De ecologische effecten van de DTP dam zijn beschreven door Deltares. De Wageningen Universiteit heeft hier kennis en ervaringen aan toegevoegd op het gebied van impact op vissen, zeevogels en zeezoogdieren (paragraaf 9.5).

9.1 Inleiding: ecologie van de Nederlandse kustzone

De Nederlandse kustzone is een ondiep en grotendeels zandig deel van de Noordzee, met een zeebodem die bestaat er uit een variatie van zandbanken en -golven. De kustlijn wordt vormgegeven door een lange strook zandstranden langs de Hollandse kust en door de Waddenzee en de estuaria en baaien van de delta. Vooral deze laatste gebieden hebben een belangrijke kraamkamerfunctie voor onder meer opgroeiende vissoorten. De Waddenzee, een gebied erkend door UNESCO als Werelderfgoed, staat in directe verbinding met de Noordzee en is voor veel parameters afhankelijk van processen in de Noordzeekustzone.

Voor de ecologie van de Nederlandse kustzone zijn een aantal parameters cruciaal. Zoals hierboven aangehaald is er een variatie in habitats op de zeebodem en langs de kust, afhankelijk van lokale verschillen in de sedimentsamenstelling van de bodem, mobiliteit van het bodemsediment en de saliniteit van het zeewater. Deze factoren worden in belangrijke mate beïnvloed door de stroming en het getij en door de instroom van zoet water door de grote rivieren. Stroming en getij zijn daarnaast ook belangrijk voor het transport van plankton, waaronder larven, en voor de aan- en afvoer van nutriënten. Daarnaast zorgt de stroming ook voor de sedimentdynamiek en dus het transport van slib en zand vanuit het Nauw van Calais en het uiterste zuiden van de Noordzee langs de kust richting de Waddenzee en Duitse Bocht. Nutriënten en zwevend sediment bepalen de primaire productie in de bovenste delen van de waterkolom, waar licht doordringt en algen aan fotosynthese kunnen doen. Deze primaire productie vormt de basis van het voedselweb en biedt mogelijkheden voor secundaire productie (de groei van zoöplankton en benthos). Onder meer omwille van de dominante stromingen langs de kust en door de aanwezigheid van belangrijke paai- en kraamkamergebieden, is de Nederlandse kustzone ook een belangrijke schakel in de migratieroutes van vissen en zeezoogdieren. Daarnaast zijn de delta en de Waddenzee voor trekvogels een belangrijke stopplaats tijdens hun migraties, waar ze zich voeden met grote hoeveelheden bodemdieren.

9.2 Relevante wettelijke kaders

De aanleg van een DTP dam moet rekening houden met een reeks nationale en internationale regelgeving die betrekking hebben tot natuurbescherming in de Nederlandse kustzone en bij uitbreiding in de volledige Noordzee. Concreet gaat het om vier Europese richtlijnen (de Kaderrichtlijn Mariene Strategie – KRM, de Kaderrichtlijn Water – KRW en de Habitat- en Vogelrichtlijn), de Waterwet, de Wet Natuurbescherming en het Noordzeeakkoord. Verder moet ook rekening gehouden worden met de bijzondere status van de internationale Waddenzee, die door UNESCO als werelderfgoed is erkend in Nederland, Duitsland en Denemarken.

De KRM beoogt een schone en gezonde zee voor alle lidstaten van de Europese Unie. Voor Nederland houdt dit in dat een nationale Mariene Strategie werd opgesteld, waarin gestreefd wordt naar een goede milieutoestand van de Noordzee en Waddenzee. Dit gebeurt aan de hand van 11 descriptoren, waarbij vanuit een ecosysteemperspectief vooral biodiversiteit, voedselwebben en de integriteit van de zeebodem cruciaal zijn. Belangrijk is dat Nederland

erover waakt dat er zich geen (verdere) achteruitgang voordoet op de descriptor en dat in dit geval actie ondernomen wordt.

De KRW is gelijkwaardig aan de KRM, maar is van toepassing op de kwaliteit van het oppervlakte- en grondwater in de Europese Unie. Voor Nederland is de KRW uitgewerkt in vier verschillende stroomgebiedbeheerplannen, waarvan met name het plan voor de Rijn en dat voor de Eems van belang zijn voor de Waddenzee. Voor de delta gaat het vooral om de plannen voor de Schelde en Maas. Ook voor de KRW is het uiteindelijke doel een goede ecologische toestand van de betreffende wateren en wordt Nederland verondersteld over die toestand te waken in de verschillende stroomgebieden.

Natura 2000 is een netwerk van natuurgebieden dat zich uitstrekt over de gehele Europese Unie en waarin de bescherming bepaald wordt door enerzijds de Habitat- en anderzijds de Vogelrichtlijn. Deze richtlijnen leggen een verplichte bescherming op voor welbepaalde habitats en soorten en in het geval van de Vogelrichtlijn specifiek voor vogelsoorten. De Waddenzee valt volledig binnen het Natura 2000-netwerk, terwijl op de Noordzee nog zeven bijkomende Natura 2000-gebieden liggen (Doggersbank, Klaverbank, Friese Front, Noordzeekustzone, Bruine Bank, Voordelta, Vlake van de Raan). Een reeks doelsoorten en -habitats genieten de hoogste bescherming in deze gebieden en moeten volgens de richtlijnen op zo'n manier beschermd worden dat verstoring door menselijke activiteiten gestopt of minstens verminderd wordt. Nederland heeft de doelstellingen van de Habitat- en Vogelrichtlijn opgenomen in de Wet Natuurbescherming.

De Waterwet bepaalt hoe het oppervlakte- en grondwater in Nederland beheerd wordt en heeft onder meer betrekking tot de Noordzee en de Waddenzee. Ook hier is een verbetering van de waterkwaliteit een belangrijk streefdoel. Vanaf 1 januari 2024 gaat deze wet op in de Omgevingswet, samen met een reeks andere wetten die betrekking hebben op de leefomgeving.

Het Noordzeeakkoord schept een kader voor de toekomstige ontwikkeling van menselijke activiteiten op de Noordzee en voorziet daarin ook de bescherming van natuurgebieden die onder eerder genoemde wettelijke kaders vallen. Het Akkoord streeft een duurzaam gebruik van de Noordzee tot 2030 en verder na.

Uiteindelijk moet ook rekening gehouden worden met de bijzondere status van de Waddenzee, die door UNESCO als werelderfgoed is erkend vanwege haar 'Uitzonderlijke Universele Waarde'. Een erkenning als werelderfgoed houdt weliswaar geen wettelijke verplichtingen in, maar gaat gepaard met een zeker prestige en internationale druk om het gebied van verstoring te vrijwaren en te behouden voor de toekomstige generaties.

De wetgeving in Nederland gaat uit van behoud en bescherming van wat er is, of terugkrijgen van wat er geweest is: dus bescherming van hoe het natuurlijke systeem eruit hoort te zien. Een DTP dam gaat het systeem zeer fundamenteel veranderen. Er zullen mogelijk op bepaalde plaatsen nieuwe ecologische gemeenschappen ontstaan, maar het zijn Habitats die daar van nature niet thuis horen, zelfs al zijn het gemeenschappen met een hoge biodiversiteit. Dus wordt dat door de wet niet aangemerkt als 'positief'.

9.3 Impact in de waterkolom

Een kilometerslange dam in de Noordzee, op welke locatie dan ook, heeft onvermijdelijk een impact op de waterbewegingen van de omgeving en bijgevolg ook op het transport van sediment en plankton. De residuele stroming in de zuidoostelijke Noordzee loopt van zuid naar noord langs de kust en bepaalt daarmee, naast het transport van slib, ook de verspreiding van een meerderheid van alle soorten die in dit deel van de zee voorkomen.

9.3.1 Impact door gewijzigd slibtransport

Zoals in het hoofdstuk over sedimenttransport aangehaald, is het slib dat langs de kusten van de zuidoostelijke Noordzee getransporteerd wordt afkomstig van enerzijds voorbij het Nauw van Calais en de Vlaamse Banken en anderzijds de grote rivieren. Het wordt met de stroming noordwaarts getransporteerd en vormt daar onder andere in de Waddenzee de dominante bron van sediment. Slib is ecologisch belangrijk, omdat het een cruciale invloed heeft op de structuur van habitats, zowel in de waterkolom (troebelheid) als op de bodem en langs de kust (sedimentafzettingen). Elke wijziging in het transport en de daaruit volgende distributie van slib kan daarom een verregaande impact hebben op de ecologie van de waterkolom, de zeebodem en de kustgebieden.

Een DTP-dam zal zonder meer gevolgen hebben voor de waterbewegingen in de Noordzee en bijgevolg ook voor het slibtransport. De stroming en getijslag worden in een groot deel van de zee beïnvloed en deze impact kan tot ver buiten de Nederlandse grenzen reiken. Vooral in de internationale Waddenzee kunnen deze wijzigingen een significant effect hebben. De aangroei van getijdenplaten in de Waddenzee is momenteel hoger dan de lokale zeespiegelstijging en houdt verband met sedimentaanvoer door het getij en resuspensie door de golven (Wang et al., 2018). Verstoringen in dit evenwicht kunnen het verschil betekenen tussen de fragiele status-quo en het 'verdrinken' van de Waddenzee. De internationaal beschermde status van de Waddenzee en haar erkenning als uniek Werelderfgoed maken een grootschalig project als een DTP dam moeilijk realiseerbaar. Dit geldt overigens even goed voor andere kwetsbare gebieden in of langs de Noordzee. Vooral de gebieden stroomafwaarts van de dam lopen een groot risico op slibtekorten. Dit kan met name wijzigingen veroorzaken in de bodemsamenstelling in het beschermde natuurgebied van de Noordzeekustzone en verder in Duitse en Deense wateren. In de Waddenzee zorgt het verdwijnen van getijdengebied voor het wegvallen van essentieel habitat voor foeragerende vogels of rustende zeehonden. Daarnaast zijn die gebieden ook voor de bescherming van de kustlijn belangrijk en vormt hun afkalven dus een mogelijk veiligheidsrisico voor inwoners en ecosystemen van de achterliggende kustgebieden.

9.3.2 Impact op plankton

Het plankton omvat alle organismen die voor hun voortbeweging van de stroming afhankelijk zijn en dus niet zelfstandig tegen de stroom in kunnen zwemmen. Het vormt een belangrijke basis van het voedselweb en omvat een grote meerderheid van alle soorten zeeleven in de Noordzee, minstens tijdens een deel van hun levensloop. Binnen het plankton wordt doorgaans het fytoplankton onderscheiden van het zoöplankton, waarbij het eerste slaat op zwevende (meestal microscopisch kleine) algen en het laatste op een hele reeks dieren, gaande van kwallen of kleine kreeftachtigen tot larven van vissen of bodemdieren. Aangezien al het plankton voor hun voortbeweging over grote afstand afhankelijk is van de waterbewegingen, kan de aanleg van een DTP-dam grote gevolgen hebben voor hun ruimtelijke verspreiding en daarmee op de connectiviteit van verschillende soorten. Dit geldt met name voor soorten met sessiele adulte populaties die voor hun verspreiding afhankelijk zijn van planktonische larvale stadia.

9.3.2.1 Fytoplankton en primaire productie

Wijzigingen in de waterbewegingen en het sedimenttransport in de zuidelijke Noordzee hebben vrijwel zeker een impact op de verspreiding van het fytoplankton en de primaire productie. Over de gehele Noordzee gezien is de primaire productie (de groei van fytoplankton) het hoogst in het zuiden en in het bijzonder langs de kusten (Holt et al., 2016). Voor groei heeft fytoplankton nutriënten en licht nodig, twee factoren die door wijzigingen in de waterbewegingen beïnvloed kunnen worden. Licht is afhankelijk van de diepte waarop het plankton zich bevindt en van de troebelheid van het water. Dit laatste hangt dan weer af van de hoeveelheid zwevend materiaal (waaronder sediment) in de waterkolom. In hoofdstuk 8 is de impact van een DTP dam op

sedimenttransport al besproken. Omwille van het potentiële effect op de primaire productie is zwevend sediment in de waterkolom echter minstens even belangrijk. Ook het transport van nutriënten langs de kust, in belangrijke mate aangevoerd via de rivieren, kan door het plaatsen van een dam (deels) onderbroken worden. Een onderbreking van het natuurlijke transport van sediment en nutriënten langs de kust kan tot grote verschuivingen leiden in het ruimtelijke voorkomen van de belangrijkste planktonbloei. Omdat de dam slib afvangt uit de waterkolom, kunnen ten zuiden (stroomopwaarts) ervan pieken in troebelheid voorkomen, wat de primaire productie kan belemmeren. Een algenbloei kan zich dan concentreren in de zones achter (ten noorden van) de dam, waar een verminderde troebelheid voorkomt. Deze wijzigingen middenin de belangrijkste zone voor primaire productie in de Noordzee kunnen dan verder via het voedselweb ingrijpende gevolgen hebben voor het hele ecosysteem.

9.3.2.2 Zoöplankton en zoëbenthos (secundaire productie)

Tot het zoöplankton behoren alle dieren die passief met de stroom mee bewegen. Dit gaat over soorten die (bijna) hun volledige levensloop als plankton doorbrengen, zoals veel kleine kreeftachtigen, of andere die slechts een deel van hun leven tot het plankton behoren. In deze laatste groep horen bijvoorbeeld de kwallen, maar vooral ook larven van een grote groep zeedieren, gaande van bodemdieren tot vissen. Het meeste zoöplankton voedt zich met fytoplankton en hangt voor hun groei en ruimtelijke verspreiding dus sterk af van de primaire productie. De aanleg van een DTP-dam kan leiden tot veranderingen in de ruimtelijke patronen van primaire en als gevolg ook van secundaire productie, maar evengoed in het transport van larven langsheen de kust. Dit kan onder meer voor problemen zorgen in de Waddenzee, waar larven vanuit de Noordzee aangevoerd worden. Moksnes et al. (2014) toonden alvast aan dat larven van de gewone strandkrab (*Carcinus maenas*) in de Waddenzee de noordelijkste exemplaren vormen van een populatie die zuidwaarts tot in het Kanaal reikt. Gezien de residuele stroomrichting in dit deel van de Noordzee is een dergelijke verspreiding voor veel andere soorten niet ondenkbaar. Een DTP-dam onderbreekt deze ruimtelijke verspreiding en kan leiden tot een verminderde toevoer naar de Waddenzee, die op deze manier zwaar ecologisch verstoord wordt. Niet alleen zou een verminderde toevoer van vissenlarven ervoor zorgen dat de Waddenzee haar kraamkamerfunctie (deels) verliest, ook zouden larven van bodemdieren de zee minder of niet meer bereiken. Deze dieren onderhouden de biogeochemische balans van het sediment en reguleren daarmee de leefbaarheid van het bodemhabitat voor andere soorten en de opslag van onder andere CO₂ (Beck & Brumsack, 2012; Thomas et al., 2009). Daarnaast vormen bodemdieren zowat de belangrijkste voedselbron voor juveniele of volwassen vissen en voor veel soorten trekvogels, voor wie de Waddenzee een van de belangrijkste stopplaatsen is op hun migratieroutes.

De Noordzeekustzone heeft verschillende locaties met ondiepe endobenthische schelpdierbanken (m.n. *Spisula subtruncata* en *Ensis* sp.) (Troost et al., 2017). Deze schelpdierpopulaties zijn van groot belang voor veel zeevogels, waaronder soorten met instandhoudingsdoelstellingen onder Natura 2000, zoals de zwarte zee-eend (*Melanitta nigra*) en de roodkeelduiker (*Gavia stellata*). Deze schelpdierbanken zullen zeer sterk beïnvloed worden door een DTP-dam, enerzijds vanwege de impact op het habitat en anderzijds vanwege de impact op primaire productie (het voedsel voor schelpdieren) en het transport en overleving van de schelpdierlarven. In eerdere studies voor de MER zandwinning is reeds vast komen te staan dat een zeer beperkte mate van vertroebeling sterk negatieve consequenties kan hebben op deze banken (Van Duren et al., 2017).

9.3.3 Impact van aangroei op de dam

Naast het onderbreken van natuurlijke transportprocessen moet ook rekening gehouden worden met een mogelijke opvang van nutriënten en plankton door de dam zelf. Een kilometerslange dam zal onvermijdelijk leiden tot de aangroei van grote hoeveelheden zeewier en epifauna, zoals mossels of oesters, die voor hun voedselvoorziening afhankelijk zijn van

nutriënten, zwevend stof en plankton in de waterkolom. Hoe groot de impact van een massale onttrekking van deze voedingsstoffen uit het systeem zou zijn, is niet zeker, maar leidt logischerwijze tot een vermindering stroomafwaarts van de dam. Gezien de schaal van het project kan dit gevolgen hebben in grote delen van de Noordzee en opnieuw in het bijzonder in de Waddenzee. Bij het DTP-scenario zuidwestwaarts vanaf de Maasvlakte kan dit ook in de delta meespelen. Daar kan het afvangen van grote hoeveelheden voedingsstoffen problemen opleveren voor bijvoorbeeld de schelpdierenkweek in de Oosterschelde.

9.4 Impact op bodemhabitats

De impact van een DTP dam op mariene habitats kan opgedeeld worden in enerzijds een impact op bestaande habitats en anderzijds het introduceren van nieuw habitat. Beiden zijn van belang voor de ecologie van de Noordzee.

9.4.1 Introductie van nieuw habitat

De fysieke structuur van de DTP-dam is ecologisch relevant, want inhoud dat er een grote hoeveelheid hard substraat toegevoegd wordt in een ecosysteem waar zandige en slibrijke habitats van nature domineren. Dit kan kansen bieden voor de groei van ecologisch en economisch belangrijke soorten zoals oesters, mossels of zeewier, die voor hun vestiging een harde ondergrond nodig hebben. Uit het voorbeeld van onder meer de offshore windparken blijkt dat het aanbrengen van hard substraat gepaard gaat met een aangroei van epifauna dat zonder de aanleg van die structuren nauwelijks houvast zou vinden in dit deel van de Noordzee (De Mesel et al., 2015; Negro et al., 2020). Een belangrijk nadeel, het afvangen van grote hoeveelheden voedingsstoffen uit de waterkolom door een massale aangroei van epifauna op de kilometerslange dijk, werd hierboven reeds besproken.

Naast epifauna kunnen ook meer mobiele soorten, zoals vissen of kreeften aangetrokken worden tot het nieuwe habitat dat met de DTP-dam ter beschikking wordt gesteld. Deze dieren maken gebruik van de vele gaten en spleten, waar ze beschutting voor predatie vinden. Het is echter niet onwaarschijnlijk dat het gebruikte materiaal sterk verschilt van het weinige natuurlijke harde substraat in de omgeving en dat de dam dus gemeenschappen aantrekt die in soortensamenstelling of dichtheid verschillen van wat er van nature voorkomt (Bulleri & Chapman, 2010).

De DTP-dam kan ook een groot oppervlak ter beschikking stellen voor de vestiging van ongewenste invasieve exoten (Zaiko et al., 2007). De dam zou op deze manier een 'stepping stone' vormen, wat betekent dat soorten zich via deze tussenstap eenvoudiger kunnen verspreiden dan zonder de aanwezigheid van de dam het geval zou zijn. De Europese Unie heeft verordeningen uitgevaardigd ter voorkoming van de verspreiding van invasieve exoten en legt de lidstaten op hiertegen actie te ondernemen. Gezien de schaal van het project wordt het waarschijnlijk echter moeilijk of onmogelijk om deze gevolgen volledig te vermijden. De vestiging van invasieve exoten is overigens niet enkel een risico bij de aanwezigheid van de dam, maar evenzeer tijdens de aanleg, wanneer constructievaartuigen met hun eventuele aangroei gedurende een lange tijd voor de kust liggen. Dit risico geldt echter niet uitsluitend voor een DTP dam, maar voor alle offshore activiteiten die momenteel of in de toekomst uitgevoerd worden.

9.4.2 Habitatwijzigingen rondom de DTP-dam en op grote afstand

Naast het introduceren van hard substraat zal een DTP-dam ook een impact hebben op de samenstelling en de dynamiek van sediment over een groot deel van de Nederlandse Noordzee. Dit zal rechtstreekse gevolgen hebben voor biota van zacht substraat, zoals eerder genoemde endobenthische schelpdierbanken langs de Nederlandse kust.

De aanleg van een grote dam in de Nederlandse kustzone gaat onvermijdelijk gepaard met de wijziging van natuurlijke habitats in de omgeving. Door lokale veranderingen in de waterbewegingen en daarmee gepaard gaand sedimenttransport zal de sediment-samenstelling rondom de dam wijzigen, met veranderingen in de soorten bodemdieren en vissen die dit habitat bewonen tot gevolg (Bulleri & Chapman, 2010). Daarnaast kunnen wijzigingen in het sedimenttransport er ook voor zorgen dat de getijdengebieden in de Waddenzee onder druk komen te staan, bovenop de te verwachten problemen door zeespiegelstijging. Ook de zandstranden langs de Hollandse kust worden naar verwachting door deze wijzigingen aangetast, met op sommige plaatsen een mogelijke transformatie naar fijner sediment en een habitat dat meer op de huidige Waddenzee gaat gelijken (zie hoofdstuk 8). In hoeverre de ecologische functie van de Waddenzee als voedselvoorraad voor trekvogels of als kraamkamer voor vissen daarmee vervangen kan worden, is onzeker, maar een dergelijke transitie kan lang duren en in tussentijd veel schade opleveren. Bovendien is het schaalverschil aanzienlijk: de Waddenzee bestrijkt een gebied van honderden kilometers lang en geniet, zoals eerder aangehaald, in drie landen bescherming als natuurgebied onder verschillende Europese richtlijnen, met daarnaast ook een erkenning door UNESCO als Werelderfgoed.

9.5 Impact op vissen, zeevogels en zeezoogdieren

Vissen en zeezoogdieren behoren tot de meest mobiele dieren in de Noordzee en omvatten een reeks soorten die in mindere of meerdere mate beschermd zijn. De impact op deze soorten hangt sterk af van in welke mate ze interageren met enerzijds de fysieke structuur van de dam zelf of anderzijds de turbines.

9.5.1 Stand van de techniek

De impact van een DTP dam op vissen en zeezoogdieren kan opgedeeld worden in een potentiële impact op mortaliteit – door direct of indirect contact met de turbines – of op gedragsverandering, wanneer de dieren de dam en/of de turbines gaan vermijden. Vooral de impact op mortaliteit is sterk afhankelijk van de technische specificaties en operationele uitvoering van de getijdenturbines. Volledig visvriendelijke turbines, die geen invloed hebben op de mortaliteit van vissen, bestaan momenteel (nog) niet. Tests uitgevoerd met een schaalmodel van de turbines van het bedrijf Pentair Fairbanks Nijhuis die gebruikt worden in de waterkrachtcentrale bij Maurik wijzen op een geringe mortaliteit en verwonding van vissen na passage tot 6% bij snoekbaars (*Sander lucioperca*), 1% bij regenboogforel (*Oncorhynchus mykiss*) en 0% bij paling (*Anguilla anguilla*). Bij een lager stroomdebiet (0,70 m³/s in plaats van 0,80 m³/s) namen zowel de mortaliteit als de verwonding bij alle geteste soorten af. Voor paling bleef de mortaliteit onveranderd op 0% (Vriese, 2015).

Een probleem bij het testen van de effecten van getijdenturbines op mortaliteit en verwonding bij vissen is het opschalen. De resultaten van experimenten, zoals het hierboven beschreven experiment met de turbines van Pentair Fairbanks Nijhuis, kunnen niet eenvoudigweg opgeschaald worden naar grotere turbines, zoals die bij de DTP dam zouden worden gebruikt. Verschillende parameters, waaronder de voor mortaliteit van vissen cruciale “tip speed” (de snelheid in m/s van de uiteinden van de rotorbladen), wijzigen bij het opschalen, waardoor experimentele resultaten niet noodzakelijk accurate voorspellingen zijn. Resultaten moeten dus steeds met de nodige kritische blik benaderd worden of met modellen worden verkend (Peraza et al, 2023).

9.5.2 Mortaliteit en verwonding door getijdenturbines

De meest dramatische potentiële impact van getijdenturbines op individuele vissen is een verhoogde mortaliteit en verwonding. Mortaliteit en verwonding worden bepaald door de interactie van vissen of zeezoogdieren met de fysieke structuur van de turbine of met drukverschillen, turbulentie en cavitatie veroorzaakt door de rotatiebewegingen (Čada, 1997).

Fatale verwondingen kunnen leiden tot een uitgestelde mortaliteit, die aanvankelijk niet werd waargenomen. Voor Stichting DTP is vooralsnog geen concreet ontwerp van de turbines bekend, maar pogingen om de mortaliteit te doen dalen moeten dus rekening houden met factoren in het ontwerp en de plaatsing van de turbines die de directe en indirecte interacties tussen vis en turbine zoveel mogelijk beperken.

Risicofactoren bij potentiële collisies met de turbine zijn onder meer de vorm en oriëntatie van de rotorbladen en de rotatiesnelheid (Yang et al., 2018). De kans op collisie kan enerzijds verlaagd worden door ervoor te zorgen dat het contactoppervlak tussen vis en turbine verkleind wordt. Dit kan bijvoorbeeld door het aantal rotorbladen te beperken of hun voorrand te verkleinen. Anderzijds kan een nauwe aansluiting van de rotorbladen tegen de turbinerand verhinderen dat vissen tussen de rotor en de rand terechtkomen en zo al dan niet fatale verwondingen oplopen. Daarnaast speelt ook de tipsnelheid (in m/s) van de turbine een rol. Een bepalende factor voor het determineren van de mortaliteitsgraad van dieren bij passage door een turbine is de “tip speed”, oftewel de rotatiesnelheid van de uiteinden van de rotorbladen. De kans op collisie verschilt van soort tot soort, maar alvast voor vissen in de zalmfamilie wordt een tip speed van ongeveer 5 m/s gehanteerd als aanvaardbare bovengrens. Het schaalmodel van de turbines van Pentair Fairbanks Nijhuis (zie “1. Stand van de techniek”) had een diameter van 0,5 m en rotatiesnelheid van 245 rpm, tegenover 8 m en 14 rpm voor de eigenlijke turbine. Daarmee komen zowel het schaalmodel (tip speed van 6,4 m/s) als de eigenlijke turbine (6,4 m/s) net boven die bovengrens uit. Bij opschaling moet bovendien rekening gehouden worden met een grotere diameter en dus ook een toegenomen tip speed bij een gelijk aantal rotaties per minuut. Mortaliteit en verwonding kunnen ook beïnvloed worden door eventuele gedragsveranderingen die door de bewegingen van de turbine worden veroorzaakt. Als vissen als reactie op de rotorbewegingen actief of passief van het centrum naar de rand van de turbine bewegen, lopen ze een hoger risico op al dan niet fatale verwonding. De omgekeerde beweging zou het risico daarentegen verkleinen. Vroege levensstadia zijn doorgaans minder mobiel dan adulte vissen en zijn niet altijd in staat deze bewegingen te maken, maar de botsingskans is ook weer veel geringer. Proeven bij waterkrachtturbines in rivieren op de overlevingskans van larven en juvenielen van verschillende vissoorten (Schweizer et al., 2012) tonen aan dat mortaliteit sterk kan afhangen van het levensstadium. De delicate larven zijn daarbij gevoeliger voor direct of indirect contact met de turbine dan latere juveniele stadia, die vaak in staat blijken de turbine te ontwijken. Schweizer et al. (2012) concluderen dat mortaliteit, althans bij waterkrachtcentrales in rivieren, lijkt af te hangen van de structuur van de turbines, de snelheid waarmee vissen de turbine benaderen, de vissoort en het levensstadium. Bij de keuze voor een bepaald type getijdenturbine zal onder meer met deze overwegingen rekening gehouden moeten worden om de mortaliteit bij vissen tot een minimum te beperken.

9.5.3 Gedragswijzigingen

Naast mortaliteit en verwonding kunnen getijdenturbines ook gedragswijzigingen veroorzaken, wanneer getroffen soorten merkbaar reageren op de aanwezigheid of de fysieke impact van de getijdenturbines en bijhorende DTP dam. Omdat grootschalige getijdencentrales wereldwijd nog amper in gebruik zijn, is er weinig literatuur over hun impact op het gedrag van vissen en zeezoogdieren beschikbaar. In hun studie over de impact van de getijdencentrale in het estuarium van La Rance (Bretagne, Frankrijk) op het migratiegedrag van paling (*A. anguilla*) konden Trancart et al. (2022) aantonen dat slechts een derde van alle onderzochte palingen hun natuurlijke migratie vanuit het estuarium naar de zee konden voltooien. Tot vijf kilometer stroomopwaarts van de dam konden wijzigingen in het migratiegedrag van de palingen worden waargenomen, vermoedelijk omwille van het lawaai van de getijdencentrale en de verstoring van de natuurlijke getijslag. Ook studies met losstaande getijdenturbines wijzen op een zekere mate van vermijdingsgedrag wanneer vissen in de buurt van de turbines komen (Bevelhimer et al., 2017; Viehman & Zydlewski, 2014).

Het gedrag van vissen in de buurt van de dam en/of de turbines is niet enkel afhankelijk van de soort, maar ook van het levensstadium van de vis. Als larve zijn vissen vrijwel volledig afhankelijk van de stromingsrichting voor hun voortbeweging en hebben ze weinig keuzevrijheid om alternatieve migratieroutes te kiezen. Juvenile en zeker adulte vissen kunnen gemakkelijker zelfstandig turbines vermijden, maar kunnen daarna nog steeds in hun migratiebewegingen verhinderd worden door de aanwezigheid van een dam. De verwachte impact door de bouw en aanwezigheid van een DTP dam voor de Nederlandse kust op specifieke soorten en soortengroepen wordt hieronder uitgelicht.

9.5.4 Verwachte soort-specifieke impact van een DTP dam in de Noordzee

Zoals hierboven aangehaald is de impact van een grootschalig infrastructuurproject zoals de DTP dam in het Nederlandse deel van de Noordzee niet voor alle vissoorten gelijk. We maken hier een onderscheid tussen verschillende groepen, gegroepeerd volgens verschillen in de verwachte impact van de dam.

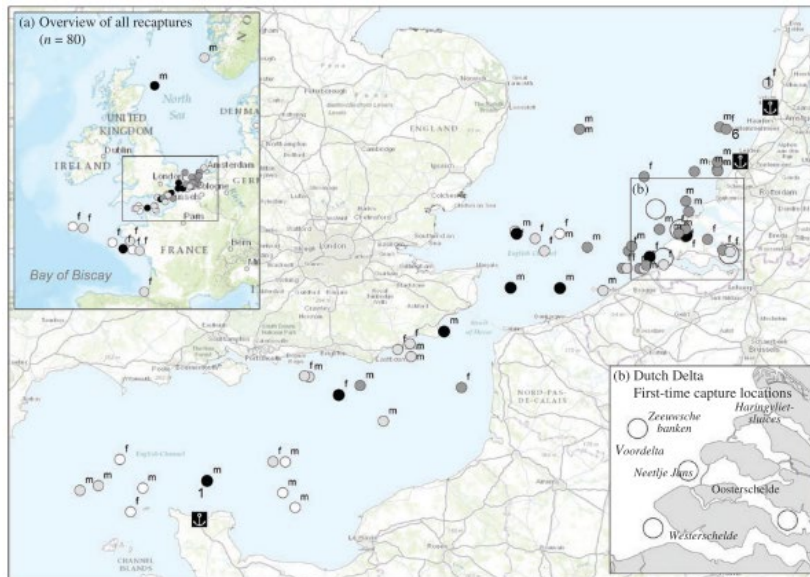
9.5.4.1 Larventransport langs de kust

Voor veel vissoorten in de Noordzee hebben de zuidwestelijke delta en de Waddenzee een belangrijke kraamkamerfunctie. Het is dus van belang dat juveniele vissen en larven deze kraamkamers zonder al te veel hinder kunnen bereiken en er later opnieuw uit kunnen wegtrekken. Aangezien deze vroege levensstadia in grote mate van de stroming afhankelijk zijn, hangt de impact van een DTP dam op larventransport hoofdzakelijk af van de impact die het heeft op de waterbewegingen van de zuidelijke Noordzee. Ook het succes waarmee de larven en juvenielen doorheen de getidenturbines komen, speelt een grote rol en hangt, zoals eerder is aangehaald, af van een reeks parameters in de keuze voor een bepaalde turbine.

9.5.4.2 Vissen die migreren langs de kust

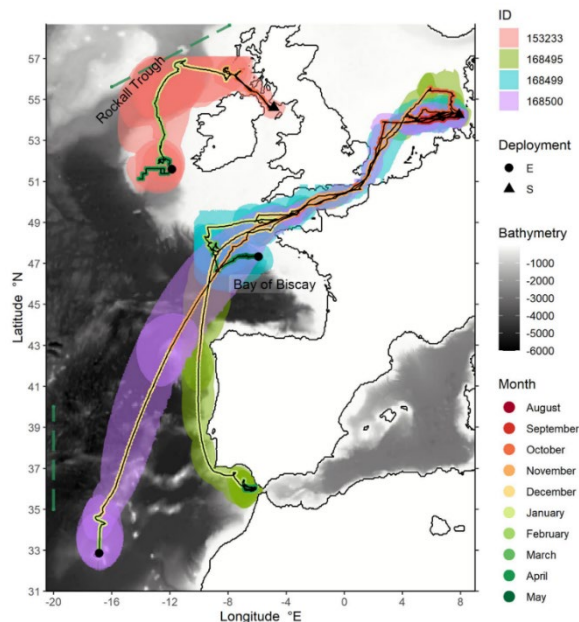
Heel wat vissoorten migreren gedurende hun levensloop langs de Nederlandse kust en zouden daarmee potentieel in aanraking kunnen komen met een eventuele DTP-constructie. Voor deze soorten kan een DTP dam een onoverkoombare barrière vormen. Voorbeelden die in dit rapport worden uitgelicht zijn de gevlekte gladde haai (*Mustelus asterias*), ruwe haai (*Galeorhinus galeus*) en zeebaars (*Dicentrarchus labrax*), drie soorten met migratiepatronen die een groot deel van de Europese kusten beslaat.

De gevlekte gladde haai leeft nabij de zeebodem in relatief ondiep water en komt voor langs de kusten van de Middellandse Zee en de noordoostelijke Atlantische Oceaan van Schotland tot Marokko en in de Noordzee. De Nederlandse kust maakt deel uit van de migratieroute tussen de zuidelijke Noordzee in de zomer en het Kanaal en de Golf van Biskaje in de winter (Figuur 9.1). De aanwezigheid van een DTP dam kan deze migratie verstoren, in het bijzonder indien gekozen wordt voor het alternatief voor de Maasvlakte. De Oosterschelde werd door Brevé et al. (2016) genoemd als waarschijnlijke kraamkamer voor gevlekte gladde haai, wat de hele regio van de Zeeuwse delta extra gevoelig maakt voor het soort grootschalige verstoring die een DTP dam hier zou veroorzaken, vooral als er rekening mee gehouden wordt dat jonge individuen vaak minder goed turbines kunnen ontwijken dan adulte exemplaren.



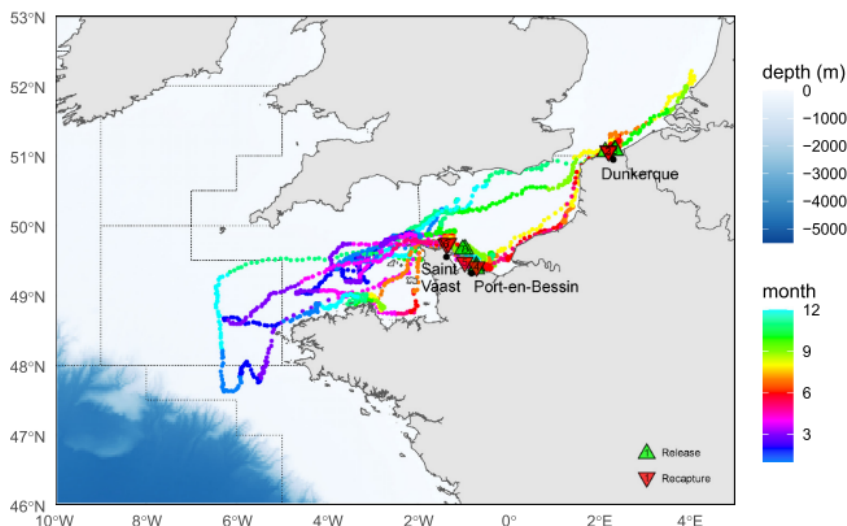
Figuur 9.1 Locaties waar gevlekte gladde haai werd gevangen in de periode 2011-2014 na eerder getagd te zijn met een zender. De kleur binnen de cirkels wijst op de periode in het jaar waarin de haai werd gevangen; wit: januari-maart, lichtgrijs: april-juni, donkergrijs: juli-september, zwart: oktober-december. Afbeelding overgenomen uit Brevé et al. (2016).

De ruwe haai leeft wereldwijd in gematigde zeeën, waaronder langs een groot deel van de Europese kusten. De soort is vooral door overbevissing ernstig bedreigd (“critically endangered”), hoewel de Noordoost-Atlantische subpopulatie tegenwoordig als min of meer stabiel wordt beschouwd (Walker et al., 2020). Ook deze soort migreert langs de Nederlandse kust, van de zuidelijke Noordzee in de zomer via het Kanaal naar de open Atlantische Oceaan in de winter (Figuur 9.2). Er zijn sterke aanwijzingen (vrijwel uitsluitend volwassen vrouwtjes en jonge ruwe haaitjes) dat de Zeeuwse delta ook voor deze soort een belangrijke kraamkamerfunctie heeft, gezien het belang van estuaria en ondiepe baaien voor de voortplanting in andere (niet-Europese) subpopulaties (Bovcon et al., 2018; McMillan et al., 2019). Beide scenario’s met een DTP dam zouden voor ruwe haai problematisch kunnen zijn, aangezien ze een potentiële barrière zijn voor de migratie langs de kust en van en naar mogelijke kraamkamergebieden. Zowel ruwe als gevlekte gladde haai zijn daarenboven langlevende soorten met een late geslachtsrijpheid, waardoor ze extra gevoelig zijn voor verstoringen in hun leefmilieu.



Figuur 9.2 : Vermoedelijke migratiepatronen van vier ruwe haaien die tussen 2015 en 2020 een zender meekregen voor de kusten van Duitsland en Schotland. Afbeelding overgenomen uit Schaber et al. (2022).

De zeebaars leeft in de noordoostelijke Atlantische Oceaan, van Noorwegen tot Senegal en in de Middellandse en Zwarte Zee. Bij de laatste schatting door de International Union for the Conservation of Nature (IUCN) werd bepaald dat de beschermingsstatus van de soort als veilig ("least concern") kon beschouwd worden (Freyhof & Kottelat, 2008), maar intussen zijn er aanwijzingen voor een sterke achteruitgang van de populatie (De Pontual et al., 2023). Zeebaarzen migreren langs de kust en doen daarbij ook de Nederlandse kust aan (Figuur 9.3). Het is voor de soort belangrijk dat eieren en larven hun weg vinden naar veilige habitats in estuaria na in kustgebieden afgezet te zijn. Juveniele zeebaars gebruiken daarvoor op zijn minst het estuarium van de Schelde en de Waddenzee (Cardoso et al., 2015; Hampel et al., 2005). Gezien het commerciële belang van de soort in de Europese visserij is het niet wenselijk dat populaties verder aangetast worden. Beide scenario's met een DTP dam kunnen een belangrijke invloed hebben op de migratiepatronen van zeebaars langs de Nederlandse kust en naar de Waddenzee. Bovendien bestaat het risico dat juveniele zeebaars de kraamkamers niet meer of minder goed bereikt.

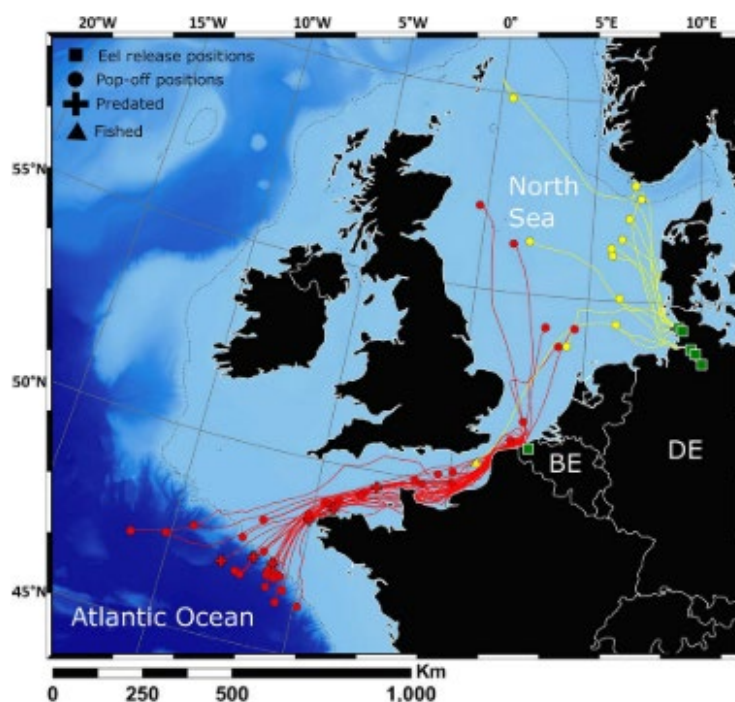


Figuur 9.3 : Gereconstrueerde migratiepatronen van zeven zeebaarzen die tussen 2014 en 2016 een zender meekregen voor de Franse kust. Afbeelding overgenomen uit De Pontual et al. (2023).

9.5.4.3 Vissen die migreren over lange afstand

Vissen die over lange afstand migreren en daarbij de Nederlandse kusten aandoen, zijn voornamelijk soorten die in rivieren opgroeien, naar de oceaan migreren en naar de rivieren terugkeren om te paaien (zoals o.a. zalm *Salmo salar*, steur *Acipenser sturio*, rivierprik *lampetra fluviatilis*, zeeprik *Petromyzon marina*, fint *Alosa fallax*, elft *Alosa alosa* en zeeforel *Salmo trutta*.) of soorten waarbij dit andersom verloopt (zoals paling *A. anguilla*). Belangrijk voor deze soorten is een vrije doorgang van hun paaigronden naar de gebieden waar ze het grootste deel van hun leven doorbrengen. In Nederland zijn de drie genoemde soorten zeldzaam en sterk bedreigd. Barrières die hun natuurlijke migratiegedrag onderbreken of verstoren zijn dus onwenselijk, vooral gezien de Europese bescherming onder de Habitatrictlijn van zalm en steur.

Welke invloed een DTP dam zal hebben op het migratiegedrag van trekvis is onduidelijk, maar potentieel significant. Waar migratie van en naar de Zeeuwse delta voorkomt, zal dit mogelijk gehinderd worden door het scenario zuidwestwaarts vanaf de Maasvlakte. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn voor paling, waarvan bekend is dat de soort onder meer migreert van en naar het Schelde-estuarium (Verhelst et al., 2018). Een DTP-scenario voor IJmuiden kan bovendien als barrière optreden bij de migratie van paling langsheen de Nederlandse kust op hun weg van en naar de paaigronden in de Sargassozee, in het westen van de Atlantische Oceaan (Figuur 9.4).



Figuur 9.4 : Gereconstrueerde migratieroutes van 54 palingen die tussen 2011 en 2020 met een zender zijn uitgerust en vrijgelaten in België en Duitsland. Afbeelding overgenomen uit Verhelst et al. (2022).

9.5.4.4 Lokaal foeragerende vissen

Voor vissoorten die lokaal voor de Nederlandse kust foerageren, maar niet langs de kust of over lange afstand migreren, is de verwachte impact van een DTP dam waarschijnlijk eerder beperkt. Deze soorten, waartoe bijvoorbeeld veel commercieel belangrijke platvissen gerekend kunnen worden, leggen doorgaans geen lange afstanden af en worden dus ook niet snel gehinderd door barrières. Tong en schol kunnen echter wel flinke afstanden afleggen gedurende seizoenmigratie. De DTP dam zou hier invloed op kunnen hebben.

Mogelijk zorgen de dammen wel voor het opsplitsen en genetisch isoleren van populaties en is er een invloed op het transport van prooi-soorten (plankton, inclusief larven van bodemdieren of andere vissen) langs de kust.

9.5.4.5 Zeevogels

De impact van een DTP dam op zeevogels ligt op het eerste zicht minder voor de hand dan voor vissen, maar kan ook significant zijn. Heel wat vogels worden op Europees niveau beschermd onder de regulaties van de Vogelrichtlijn. Niet zozeer de fysieke structuur van de dam is voor hen van belang (afgezien van een mogelijke toename in nestgelegenheid), maar vooral de indirecte gevolgen op hun voedselbronnen. Eerder werd al aangehaald dat vogels die zich voeden met bodemdieren (in getijdengebieden of in schelpenbanken) getroffen kunnen worden. Als schelpenbanken zouden verdwijnen, maar ook als de banken zich naar dieper water en dus buiten het bereik van duikende vogels verplaatsen, trekken deze laatsten er weg en verdwijnen ze mogelijk uit dit deel van de Noordzee.

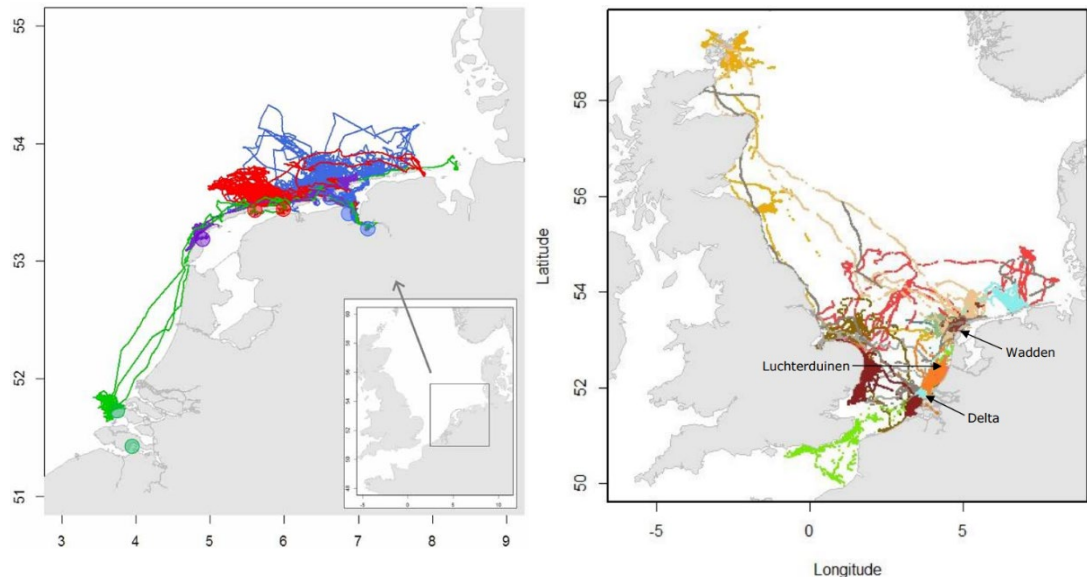
Hetzelfde geldt voor visetende vogels, die te maken zullen krijgen met een gewijzigde verspreiding van hun prooi-soorten. Aangezien vogels voornamelijk visuele predatoren zijn, kan hun vangstsucces ook aangetast worden in zones waar de troebelheid van het water verhoogd wordt. Wat hiervan de precieze gevolgen zullen zijn voor de verspreiding van de betreffende vogelsoorten is niet bekend, maar gezien de beschermingsstatus van veel soorten is voorzichtigheid ook hier geboden. Er is een aanzienlijke kans dat een verschuiving of verdwijning van soorten zal resulteren in het niet kunnen behalen van internationaal afgesproken natuurdoelstellingen i.v.m. soortenbehoud.

9.5.4.6 Zeezoogdieren

Voor de Nederlandse kust komen drie soorten zeezoogdieren voor die vrijwel permanent aanwezig zijn. Het gaat om de bruinvis (*Phocoena phocoena*), gewone zeehond (*Phoca vitulina*) en grijze zeehond (*Halichoerus grypus*). Het effect van getijdencentrales op deze soorten werd bestudeerd in het kader van de plaatsing van een getijdencentrale in de Oosterscheldekering in 2015 (Leopold & Scholl, 2019). Dit onderzoek kon geen significant effect aantonen van het plaatsen van de getijdenturbines op de aanwezigheid of sterfte van de drie soorten zeezoogdieren. De dieren konden dus zonder al te veel problemen de Oosterschelde in en uit zwemmen en liepen daarbij doorgaans geen schade op. Het betreft echter een beperkte dataset tot slechts enkele jaren na de plaatsing van de turbines, waardoor langetermijneffecten niet bestudeerd konden worden. Een recentere rapportage is niet beschikbaar.

De opzet van een DTP dam verschilt van de Oosterscheldekering doordat de dam slechts aan één kant zou aansluiten op het vasteland. Het is onbekend of zeezoogdieren de DTP-turbines als een even kleine barrière zouden inschatten als de getijdenturbines in de Oosterscheldekering, of dat ze eventueel tijd en energie zouden spenderen aan het omzeilen van de dammen. Voor zeehonden zijn studies uitgevoerd naar hun natuurlijke migratiegedrag langs de Nederlandse kusten, waarin is aangetoond dat het kustgebied uitvoerig wordt gebruikt (Figuur 9.5). Beide voorgestelde scenario's van een DTP dam kunnen hierbij een obstakel vormen.

Over de precieze bewegingen van bruinvissen is minder bekend dan over die van zeehonden. De soort maakt gebruik van de volledige Noordzee, maar verkiest over het algemeen de noordelijke en westelijke delen (Gilles et al., 2016). Indien er een barrièrewerking optreedt zou het DTP-scenario zuidwestwaarts vanaf de Maasvlakte een mogelijke barrière kunnen vormen voor bruinvissen van en naar de Oosterschelde.



Figuur 9.5 : Bewegingen van zeehonden. Links: Bewegingen van vrouwelijke gewone zeehonden die tussen 2007 en 2016 een zender meekregen op verschillende plaatsen langs de Nederlandse kust. Afbeelding overgenomen uit Brasseur (2017). Rechts: Bewegingen van 20 grijze zeehonden die in 2014 een zender meekregen in de Waddenzee en de delta. Afbeelding overgenomen uit Aarts et al. (2018).

9.5.5 Potentiële mitigerende maatregelen

Een aantal maatregelen kunnen worden bedacht om de verwachte impact van een DTP dam op vissen of zeezoogdieren zoveel mogelijk te beperken. Idealiter pakken mitigerende maatregelen twee problemen tegelijk aan: het tegengaan van de barrièrewerking en het reduceren van mortaliteit.

De meest eenvoudige oplossing voor de verwachte problemen is het stilleggen van turbines. Dit kan enerzijds door permanent en altemnerend slechts een deel van de turbines te laten draaien, of door alle turbines tijdens bepaalde cruciale periodes stil te leggen. Wanneer dan precies de meest ideale periodes zijn, is moeilijk vast te leggen, want niet noodzakelijk hetzelfde voor verschillende vissoorten. Zoals hierboven in figuren 1 t.e.m. 3 duidelijk wordt weergegeven, zijn de late zomer en herfst de belangrijkste periodes voor migratie van haaien en zeebaars langs de Nederlands kust. De aankomst van de eerste palingen in de Noordzee kan echter al in het voorjaar optreden, terwijl ze in het najaar opnieuw naar zee migreren (ICES, 2020).

Om de doorgang door de DTP-dam te bevorderen, kan ook aan passages, eventueel in de vorm van sluisen, worden gedacht. Een belangrijke bedenking hierbij is echter dat hiermee verondersteld wordt dat de doelsoorten de passage daadwerkelijk gebruiken. Omdat er geen constructies bekend zijn op een schaal vergelijkbaar met een DTP dam, is het moeilijk om hier een realistische inschatting over te kunnen geven. Het voorbeeld van de Afsluitdijk bewijst alvast dat trekvisen sluisen in een lange dam kunnen vinden en passeren (Bij De Vaate et al., 2003), maar de getijdencentrale op de Franse rivier La Rance, waar sluisen zijn ingebouwd maar palingen nauwelijks doorheen migreren (Trancart et al., 2022), toont aan dat de aanwezigheid van passages niet noodzakelijk leidt tot een succesvolle oversteek.

9.6 Conclusies

De aanleg en aanwezigheid van een DTP-dam in het Nederlandse deel van de Noordzee zal onherroepelijk een grote ecologische impact hebben. Rekening houdend met de schaal van het project worden over grote afstand, tot ver buiten het projectgebied en zelfs buiten de Nederlandse grenzen, zowat alle onderdelen van het ecosysteem beïnvloed. Het project gaat zo goed als zeker in tegen nationale wetgeving voor natuurbehoud en tegen internationale verplichtingen die door de Europese Unie aan Nederland worden opgelegd, met schade in verschillende natuurgebieden. In het bijzonder moet dan aandacht besteed worden aan de Waddenzee, die zowel in Nederland als in Duitsland en Denemarken beschermd wordt en daarbovenop erkenning geniet door UNESCO als Werelderfgoed. Grote wijzigingen aan het ecosysteem van de Waddenzee raken aan de bescherming die het gebied nationaal en internationaal geniet. Aangemerkt moet worden dat de impact van een DTP-dam zo fundamenteel is dat deze niet gemakkelijk is te mitigeren.

Een aantal gevolgen van de aanwezigheid van een DTP-dam zijn onbekend en/of moeilijk in te schatten. Zo is het bijvoorbeeld niet duidelijk wat het precieze effect zou zijn van de dam met getijdenturbines op migratiepatronen van vissen en zeezoogdieren. De strikte Europese bescherming van soorten als de steur en de bruinvis noopt echter tot voorzichtigheid. Ook voor trekvogels, beschermd onder de Europese Vogelrichtlijn, is het onzeker in welke mate het verlies van foerageergebied in de Waddenzee gecompenseerd kan worden door eventueel nieuw habitat in de omgeving van de dam.

Uiteraard moeten deze ecologische bezwaren afgewogen worden ten opzichte van de voordelen die de dam zou bieden voor wat betreft de nationale energievoorziening.

10 Effect op scheepvaart

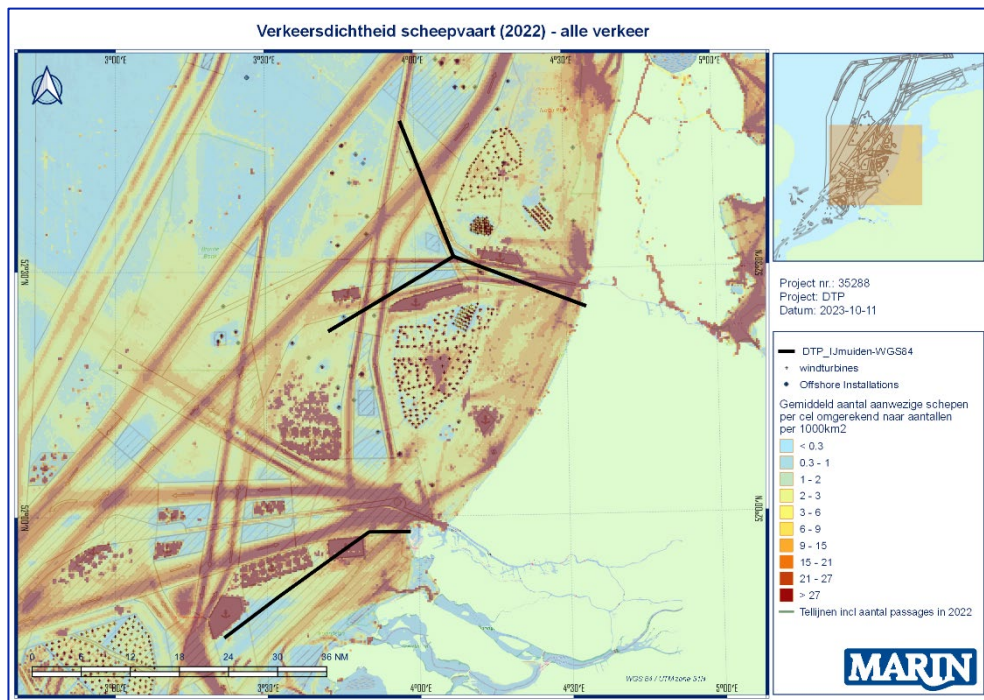
De effecten van de DTP dam op de scheepvaart zoals beschreven in dit hoofdstuk zijn onderzocht door het kennisinstituut MARIN. De effecten van de Hydrodynamica op de scheepvaart (paragraaf 10.4) zijn beschreven door Deltares.

10.1 Inleiding

Voor het beschrijven van de effecten op de scheepvaart zijn enkele kaarten aangemaakt waarin de scheepvaart is weergegeven inclusief de twee voorgestelde mogelijke locaties, zodat de effecten goed zichtbaar zijn. Aan de hand van deze kaarten en enkele wettelijke kaders is een expert review gegeven van de twee locaties. Ook wordt kort in gegaan op de aspecten waarmee rekening gehouden dient te worden bij de keuze van een eventuele alternatieve locatie.

De effecten op de scheepvaart en andere gebruikers van de Noordzee zijn complex en raken veel "partijen". Deze analyse bevat slechts een eerste beschouwing en is zeker nog niet uitputtend, voor de werkelijk gedetailleerde effecten op bijvoorbeeld de scheepvaartveiligheid zal een uitgebreider onderzoek nodig zijn.

Het doel van de expert review is om kort te beschrijven wat de verwachte effecten zijn op de scheepvaart van de voorgestelde locaties voor de DTP-dam. En een overzicht geven van welke zaken rond scheepvaart rekening mee moet worden gehouden bij de keuze van eventuele andere locaties.



Figuur 10.1 Mogelijke onderzochte locaties van de dam inclusief de dichtheid van het scheepvaartverkeer in 2022.

10.2 Regelgeving - kader

Voor de scheepvaart zijn een aantal (inter)nationale organisaties en wetten relevant in relatie tot de bouw van een offshore dam binnen de Nederlandse Territoriale wateren (TTW) en de aansluitende Exclusieve Economische Zone (EEZ). Deze vormen de basis voor de inrichting van de Noordzee en de scheepvaartroutes.

10.2.1 IMO

De Internationale Maritieme Organisatie (IMO) is een organisatie die op internationaal niveau afspraken bewerkstelligt met als doel scheepvaart zo veilig en milieuvriendelijk mogelijk te maken. De IMO is een gespecialiseerde organisatie van de Verenigde Naties en werd in 1948 opgericht en in 1958 ingesteld.

Een van de taken van het IMO is het vaststellen van zogenaamde “routeringsmaatregelen” voor de scheepvaart, hierbij kan men denken aan vaststellen van verkeersscheidingsstelsels (Traffic Separation Schemes [COLREGs Rule 10]). De toepassing van routeringsmaatregelen voor de zeescheepvaart is internationaal vastgesteld in het Internationale Verdrag ter bescherming van mensenlevens op zee (SOLAS 1974, Chapter V)).

Het doel van routing van schepen was oorspronkelijk vooral gericht op het voorkómen van aanvaringen, maar is in de loop van de tijd geëvolueerd tot (ook) een ordeningsinstrument voor ruimtelijke planning op zee, waarbij een vlotte en veilige afwikkeling van het scheepvaartverkeer en de bescherming van het mariene milieu centraal staan. (<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/kst-28816-1.html>)

Deze verkeersscheidingsstelsels bestaan veelal uit zones voor het scheiden van scheepvaartverkeersstromen (separatiezones) en vooraf vastgestelde vaarrichtingen. Ook zijn “ Pre-cautionary-area”, “Area-to-be-avoided” en “ No-anchoring-zones” onderdeel van deze routeringsmaatregelen. Deze maatregelen zijn weergegeven op de nautische kaart die schepen aan boord gebruiken.

De verschillende toe te passen routeringsmaatregelen en de daarbij voorgeschreven randvoorwaarden en procedures zijn uitgewerkt in de zogenaamde Algemene beginselen voor de routing van schepen (IMO Resolutie A.572(14)).

Wanneer een land deze maatregelen wil invoeren binnen de EEZ, moet hiervoor toestemming gevraagd worden van de IMO. Hiervoor moet een uitgebreide FSA (Formal Safety Assessment) studie worden uitgevoerd om aan te tonen dat de voorgestelde maatregelen noodzakelijk zijn om de veiligheid van de scheepvaart te garanderen. Het proces van het verkrijgen van deze toestemming, inclusief alle voorbereidende werkzaamheden kan enkele maanden tot jaren in beslag nemen.

Beide voorgestelde opties kruisen één of meerdere bestaande IMO-routeringen binnen de Nederlandse EEZ.

Bij het zoeken naar eventuele alternatieve locaties van de dam, moet dus rekening gehouden worden met de bestaande IMO-routing op de Nederlandse EEZ. Eventuele aanpassingen hiervan moet gedaan worden vanuit het Ministerie van I&W, in nauwe samenwerking met RWS, Kustwacht en de verschillende Nederlandse Havens (in dit geval: Amsterdam, Rotterdam, Westerschelde-havens)

10.2.2 UNCLOS - United Nations Convention on the Law of the Sea

Het Verdrag van de Verenigde Naties inzake het recht van de zee (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS) of VN-zeerechtverdrag is een internationale multilaterale overeenkomst waarbij ruim 160 staten en de Europese Unie partij zijn, die werd afgesloten binnen het organisatorische raamwerk van de Verenigde Naties. De afspraken opgenomen in het verdrag zijn de meest recente ontwikkeling in het internationale zeerecht. Het verdrag maakte het mede mogelijk om wereldwijd het gebruik van natuurlijke hulpbronnen en het voorkomen van milieuverontreiniging juridisch te regelen, alsmede vrede op volle zee te bewaren.

Binnen dit verdrag is een artikel opgenomen over het bouwen van kunstmatige eilanden binnen de Economische Exclusieve Zone (EEZ) van een land. Het gaat hierbij om artikel 60 (zie Bijlage A.1). In punt 7 van artikel 60 staat:

7. Artificial islands, installations and structures and the safety zones around them may not be established where interference may be caused to the use of recognized sea lanes essential to international navigation.

Dit betekent doorgaande internationale scheepvaartroutes niet geblokkeerd mogen worden door kunstmatige bouwwerken binnen de EEZ.

Een van de beide opties die nu beschreven zijn in de uitgangspunten van het onderzoek blokkeren wel degelijk een belangrijke doorgaande route over het Nederlandse deel van de Noordzee.

Bij het zoeken naar eventuele alternatieve locaties van de dam, moet dus rekening gehouden worden met UNCLOS artikel 60.7.

10.2.3 Clearways – Mijnbouwwet

Naast de IMO-routeringsmaatregelen zijn er ook nationaal bepaalde gebieden aangegeven die voor scheepvaart “vrij gehouden” moeten worden; de zogeheten “clearways”:

“Een clearway is een obstakelvrije zone ten behoeve van de scheepvaart die als restrictiegebied wordt vastgelegd in de Mijnbouwregeling.”

<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/kst-35325-8.html>

Een van de beide opties die nu beschreven zijn in de uitgangspunten van het onderzoek kruisen een clearway. Bij het zoeken naar eventuele alternatieve locaties van de dam, moet dus rekening gehouden worden met bestaande in de mijnbouwwet gedefinieerde clearways.

10.3 Scheepvaart in het kustgebied

Voor het beschouwen van de effecten op de huidige bestaande scheepvaartverkeersstromen zijn enkele kaarten aangemaakt. In Figuur 10.2 is de verkeersdichtheid weergegeven van zogenaamde “route gebonden” schepen; dit zijn koopvaardij schepen die tussen havens varen. Deze schepen maken gebruik van de IMO-routeringsmaatregelen op het zuidelijke deel van de Noordzee. Naast de dichtheid is ook het aantal schepen dat een bepaalde lijn passeert weergegeven per jaar en per vaarrichting.

De beoogde optie bij IJmuiden doorkruist verschillende bestaande scheepvaartroutes. Het meest noordelijke deel doorkruist een van de hoofdvaartroutes op de Noordzee, waarover per jaar bijna 18.000 schepen passeren in noordelijke richting. Het zuidelijke deel van de “IJmuiden”-optie doorkruist het verkeersscheidingsstelsel met een noord en zuidgaande baan, met jaarlijks ruim 10.000 passages per jaar (totaal beide richting).

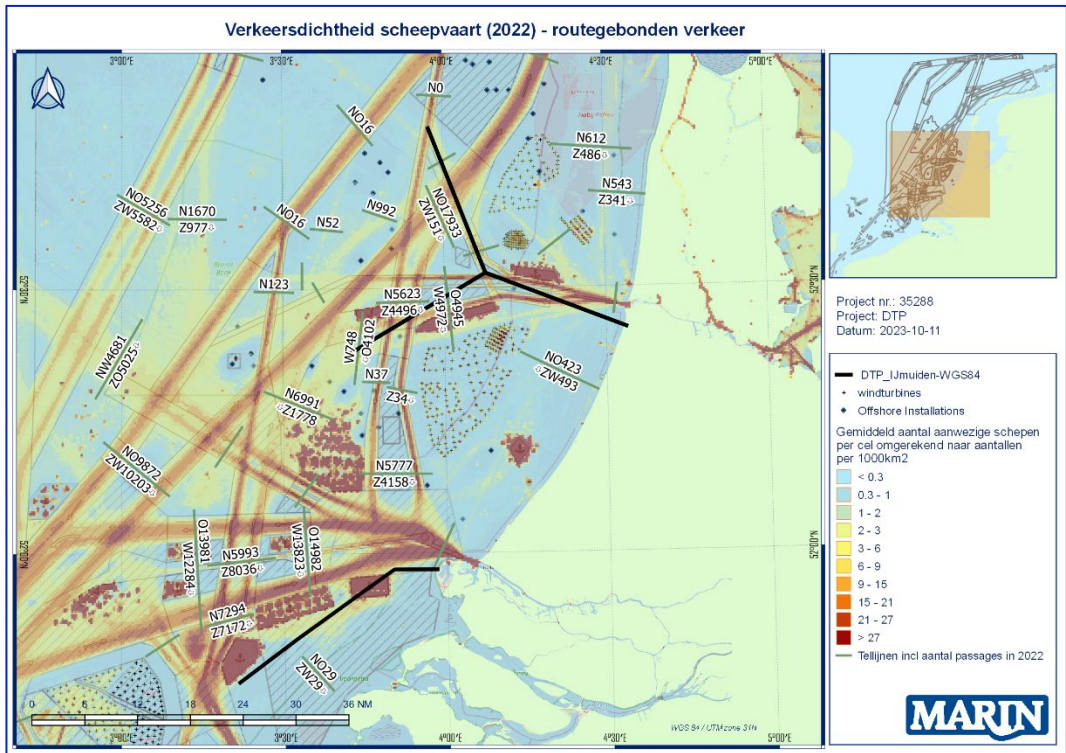
In Figuur 10.3 zijn de tracks (gevaren banen) van alle koopvaardij schepen weergegeven in de maanden mei en oktober. De groene tracks zijn vrachtschepen, de paarse/roze tracks zijn tankers en de blauwe zijn passagiersschepen. De kaart laat duidelijk de verschillende routes op de Noordzee zien en ook waar deze de beoogde locaties van de dam kruisen.

Naast de koopvaardijscheepvaart is er ook veel zogeheten niet route gebonden verkeer; dit is scheepvaart met een bestemming op zee (werkvaart, visserij en recreatievaart). In Figuur 10.4 zijn op de eerste rij de dichtheidskaarten van zowel het route gebonden (links) als het niet route gebonden (rechts) verkeer weergegeven. Duidelijk zichtbaar is dat het niet route gebonden verkeer zich dicht bij de kust bevindt en dus waarschijnlijk meer overlast zal ervaren van de dam, aangezien dit verkeer er ver omheen moet varen. Ook wordt de kuststrook gebruikt door hulpdiensten, zoals de Kustwacht en KNRM. Een eventuele opening in de dam zou voor deze kleinere scheepvaart een oplossing kunnen zijn, mits deze opening vrij en voldoende breed is. Voor de bouw van windparken langs de doorgaande vaarweg is hiervoor het “Afwegingskader” opgesteld. Hierbij wordt aangegeven dat de afstand tussen de rand van de vaarweg en de turbine (inclusief de 500m veiligheidszone), 2NM moet zijn. Dit betekent dat een eventuele opening van de dam bij de doorgaande routes ook zeker deze extra veiligheidsruimte zou moeten bevatten, dus boven op de breedte van de vaarweg zelf.

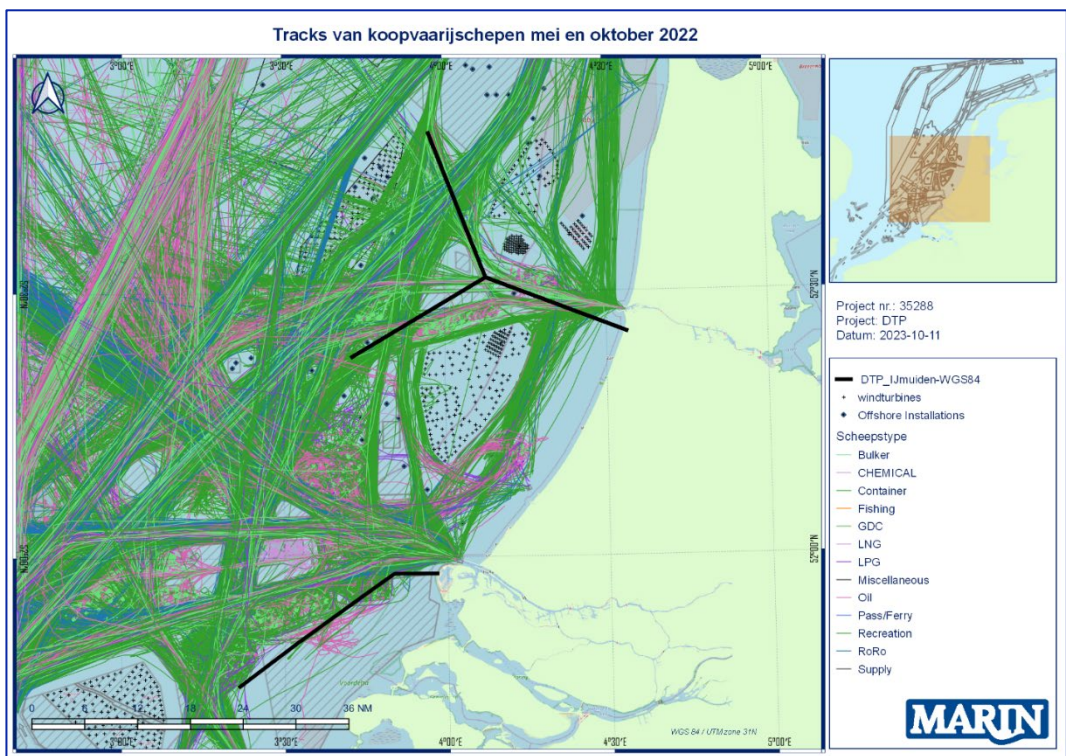
Naast de dichtheidskaarten zijn in Figuur 10.4 ook de tracks kaarten van de verschillende categorieën en gebieden naast elkaar gezet.

De optie rond IJmuiden doorkruist niet alleen een aantal grote internationale doorgaande scheepvaartroutes, maar bemoeilijkt ook een vrije toegang tot de haven van IJmuiden en Amsterdam, zeker in combinatie met de reeds gebouwde wind parken Hollandse Kust Zuid en Hollandse Kust Noord. Met name de doorkruising van de diepwateroute naar/van IJmuiden (IJ-geul) heeft grote gevolgen daar deze geen alternatief heeft.

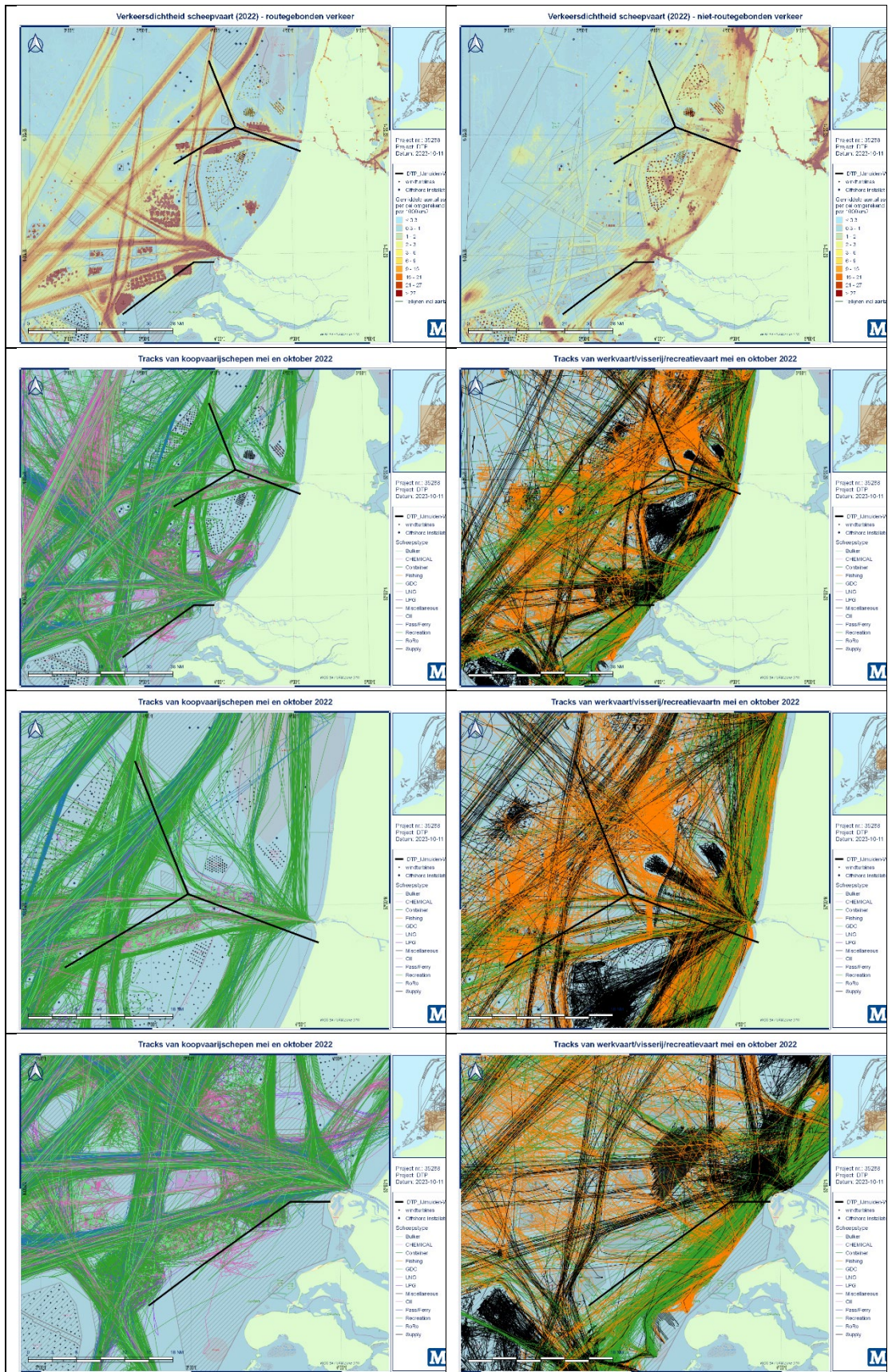
De optie bij de Maasvlakte vormt met name een obstakel voor de kustvaart parallel aan de kust, veelal visserij en recreatievaart. Ook doorkruist de beoogde locatie van de dam ankergebied 4-east. In 2021 zijn binnen het gebied 3644 schepen waargenomen die geankerd hebben in dit gebied, voornamelijk kleinere (gas)tankers. Voor deze schepen zal een andere locatie gezocht moeten worden in het aanloop gebied van Rotterdam. Verder ligt de dam aan de zuidkant van twee andere ankergebieden (gebied 4-west en Schouwenbank). Door de ligging van de dam is het voor de schepen niet meer mogelijk het ankergebied via de zuid kant te benaderen of weg te varen. (zie kaarten Bijlage A.2) Hierdoor zullen ze andere routes door het ankergebied moeten zoeken.



Figuur 10.2 Verkeersdichtheid - route gebonden verkeer – 2022



Figuur 10.3 Tracks van koopvaardijshipschepen (mei en oktober 2022) in het zuidelijke deel van de Noordzee



Figuur 10.4 Verschillende kaarten waarin de dichtheid en tracks van scheepvaart in 2022 zijn weergegeven.

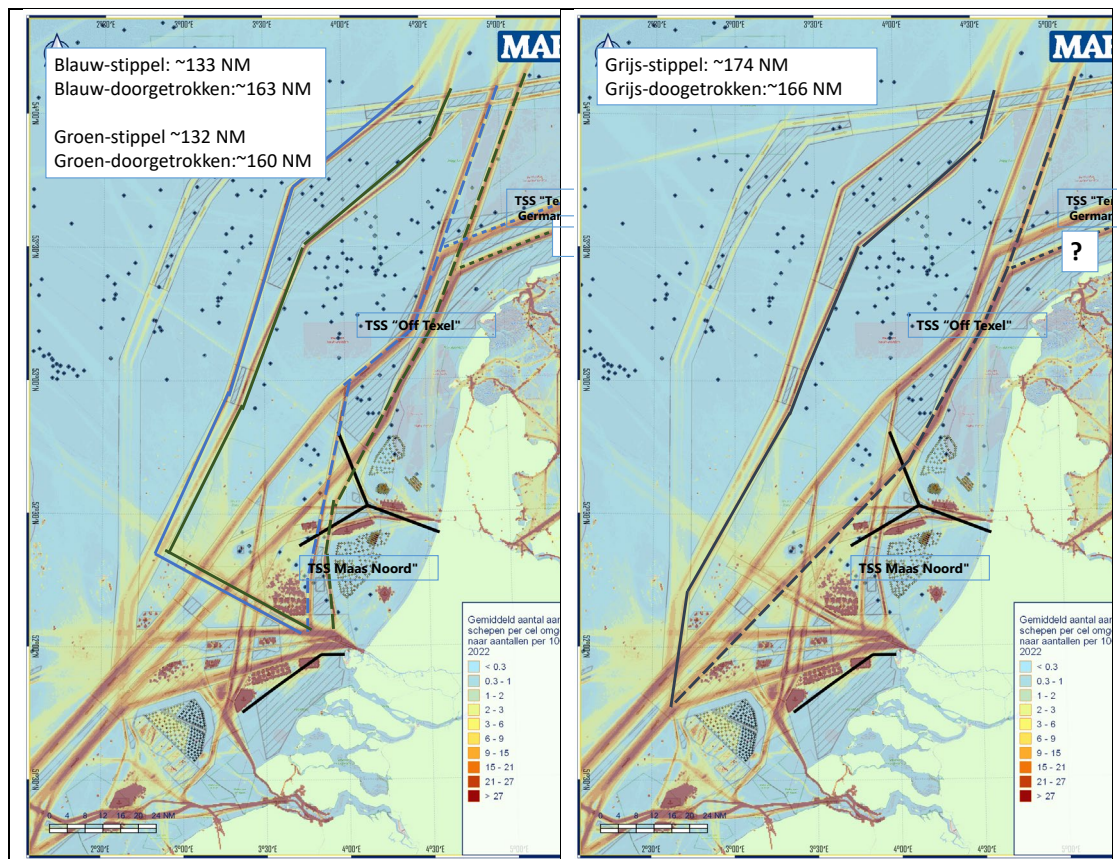
10.3.1 Alternatieve routes binnen bestaande stelsel

Een korte analyse is uitgevoerd naar mogelijke alternatieve routes binnen het bestaande scheepvaart stelsel. In Figuur 10.5 is een aanzet gegeven. Echter het kiezen van een alternatieve route is sterk afhankelijk van de herkomst en de bestemming van een schip. Voor een echte uitspraak naar de mogelijkheid van alternatieve routes is meer detailonderzoek nodig, waarbij ook gekeken wordt naar andere toekomstige ontwikkelingen, zowel ruimtelijke ontwikkelingen als ontwikkelingen binnen de scheepvaart.

In de linker kaart van Figuur 10.5 is een mogelijke alternatieve route aangegeven voor de “afsluiting” van het Maas Noord stelsel. Voor de aangegeven routes betekend dit zeker 30NM omvaren. Per jaar varen ongeveer 10.000 schepen deze route, dus dat betekend zeker 300.000NM extra.

In de rechterkaart kaart van Figuur 10.5 is een mogelijk alternatief gegeven voor schepen die in noordelijke richting de Hollandse Kust passeren (ruim 18.000 per jaar alleen in noordelijke richting). De alternatieve route lijkt niet veel langer in afstand.

Echter bij beide alternatieven moet worden opgemerkt dat voor de schepen die de zuidelijke routes (dunne stippel lijn) boven de Waddeneilanden moeten nemen er eigenlijk geen goed alternatief is. Over deze zuidelijke routes varen per jaar ruim 20.000 schepen (totaal beide richtingen).



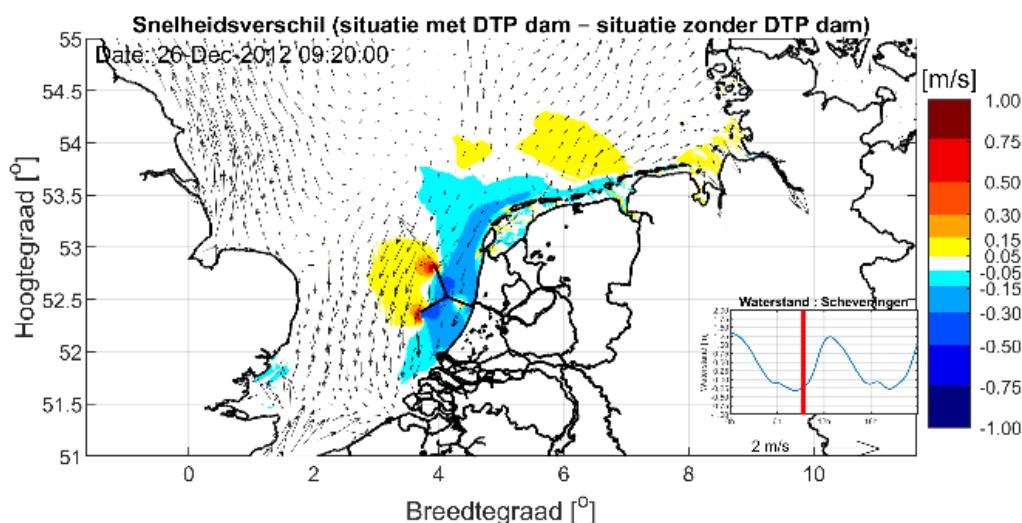
Figuur 10.5 Mogelijke alternatieve routes

10.4 Effect van veranderende stroompatronen

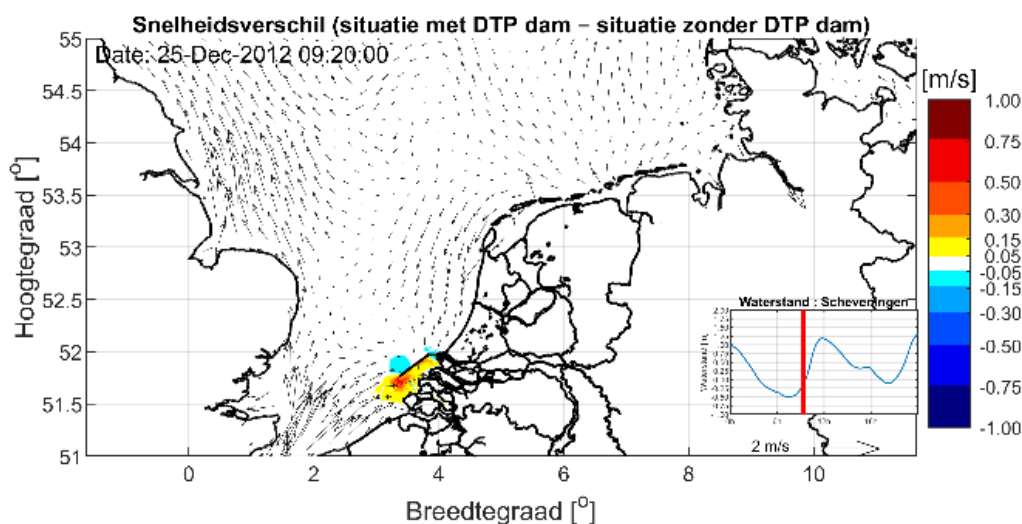
Een aandachtspunt voor nautische veiligheid is hoe het stroompatronen rondom de dam zullen veranderen door de aanwezigheid van de dam. Voor het manoeuvreren van schepen is het onwenselijk als er snelle, onverwachte veranderingen in de stroming – zowel in richting als in grootte – optreden in de vaarbaan van het schip. Dit betreft zowel veranderingen in de ruimte als veranderingen in de tijd. Sterke gradiënten in de stroming kunnen er voor zorgen dat een schip (onbedoeld) van koers verandert en daarmee meer ruimte nodig heeft dan een schip dat in een uniform stroomveld vaart. Het is vanzelfsprekend dat grote stroomsnelheidsveranderingen hierbij een grotere invloed op het vaargedrag van schepen hebben dan lage stroomsnelhedenvariëaties. Daarnaast zal een dwarsseepse stroomverandering een grotere invloed hebben op de benodigde padbreedte van een varend schip dan een verandering in langsrichting. En hoewel in open water gradiënten in het stroomveld minder kritisch zullen zijn dan in beperkt vaarwater, zoals bijvoorbeeld in de aanloop naar een haven, dient het wel aanbeveling om het effect van de veranderde stroomvelden op het vaargedrag van de schepen in de (eventueel verlegde) vaarroutes nauwkeurig te onderzoeken door manoeuvreersimulaties.

Figuur 10.6 en Figuur 10.7 laten zien dat de invloed van beide opties van de dam tot een significante aanpassing van het stroomveld zal leiden, met veranderingen van meer dan 0.5 m/s voor een gebied van enkele (tientallen) kilometers rondom de uiteindes van de dammen. De stromingssimulaties laten zien dat de gradiënten in het stroomveld door de dammen toenemen in het gebied van de huidige scheepvaartroutes ten opzichte van de huidige situatie zonder dam. Het invloedsgebied van de dammen op het manoeuvreergedrag schepen is daarmee groter dan puur de fysieke afmetingen van dammen zelf, en hiermee dient voldoende rekening gehouden te worden met eventuele verlegging van de scheepvaartroutes.

Naast de directe invloed van het veranderde stroomveld op schepen, hebben de veranderingen van het stroomveld ook een effect op sedimentatie van vaarroutes. De morfologische aspecten zijn uitgebreid beschreven in Hoofdstuk 8. Hierbij wordt opgemerkt dat de locatie van elk van beide dammen momenteel gekozen is nabij een ingang van een grote haven, Amsterdam voor de noordelijke optie en Rotterdam voor de zuidelijke. Indien er grote veranderingen in sedimentatie te verwachten zijn bij de voet van de dam, dan kan dit directe invloed hebben op de toegankelijkheid van elk van deze havens of leiden tot een significant grotere baggeropgave om deze havens toegankelijk te houden. Het dient aanbeveling om verder te kwantificeren hoe groot deze effecten zijn.



Figuur 10.6: Verandering in stroomsnelheden nabij de DTP dam bij IJmuiden.



Figuur 10.7: Verandering in stroomsnelheden nabij de DTP dam bij Maasvlakte 2.

10.5 Observaties en aanbevelingen

10.5.1 Observaties/conclusies

- De voorgestelde opties voor de DTP-dam kruisen bestaande vaarroutes en IMO-routeringsmaatregelen, deze zouden dus moeten worden aangepast, dit betekent een grotere aanpassing van het totale ingestelde scheepvaart systeem binnen de Nederlandse EEZ, dit proces zal in samenspraak met verschillende ministeries en instanties tot stand moeten komen en zal jaren in beslag nemen. Het is niet bekend of alternatieve routing mogelijk is binnen de huidige en toekomstige ruimtelijke ordening van de Noordzee.
- 28.000 koopvaardij schepen passeren jaarlijks de routes die doorkruist worden door “IJmuiden” optie
- Door de combinatie van de bestaande offshore wind parken (Hollandse Kust Zuid en Hollandse Kust Noord en de “ IJmuiden” -optie van de DTP dam is de haveningang van IJmuiden/Amsterdam zeer lastig te bereiken.
- De voorgestelde optie “ Maasvlakte” doorkruist een ankergebied (Anker gebied 4-east), in dit gebied liggen jaarlijks rond de 3000 schepen, veelal kleinere (gas)tankers. Deze schepen kunnen hier niet meer liggen wanneer de voorgestelde optie “ Maasvlakte” gebouwd zou worden. Binnen de huidige situatie is er weinig tot geen plaats meer voor alternatieve ankergebieden.
- De stroompatronen rondom de uiteinden van de DTP-dammen veranderen in een gebied van enkele (tientallen) kilometers. Hier moet rekening mee worden gehouden in het manoeuvreergedrag van schepen.
- Extra baggerbezwaar is voorzien om de havens van Amsterdam (in geval van de DTP IJmuiden dam) en mogelijk Rotterdam (in geval van de Maasvlakte 2 dam) toegankelijk te houden.

10.5.2 Aanbevelingen

Bij het zoeken naar alternatieve locaties van de dam dienen met de volgende zaken rekening gehouden worden, vanuit een scheepvaart perspectief:

- Huidige vaarroutes en IMO-routeringsmaatregelen op het Nederlandse deel van de EEZ
- Huidige ligging van de clearways

- Artikel 60.7 van UNCLOS, die aangeeft dat er binnen de EEZ geen kunstmatige eilanden gebouwd mogen worden die internationale doorgaande scheepvaartroutes blokkeren
- Ligging van de huidige ankergebieden in de aanloop gebieden van de Nederlandse Havens. Een doorkruising van een ankergebied betekent dat het gebied niet meer beschikbaar is en dat er een alternatieve locatie voor deze schepen gezocht moet worden binnen het aanloop gebied van de haven.
- Een sluis of opening in de dam zou een oplossing kunnen zijn voor het kustverkeer, hierbij gaat het om kleinere schepen, die langs de kust varen; visserij, recreatievaart. Echter voor de grotere doorgaande vaart zal een opening in de dam voldoende wijd moeten zijn om een veilige doorgang te garanderen. Dit heeft grote implicaties voor het ontwerp, maar ook voor de energieopbrengst van de DTP dam. Voor de bouw van windparken langs de doorgaande vaarweg is hier voor het “ Afwegingskader” opgesteld. Hierbij wordt aangegeven dat de afstand tussen de rand van de vaarweg en de turbine (inclusief de 500m veiligheidszone), 2NM moet zijn. Dit betekent dat een eventuele opening van de dam bij de doorgaande routes ook zeker deze extra veiligheidsruimte zou moeten bevatten, dus boven op de breedte van de vaarweg zelf. Echter een sluis kan ook enige vertraging veroorzaken en dus hinder op van het internationale verkeer. Dat kan weer een reden zijn beroep te doen op UNCLOS.
- Voor verdere uitwerking van eventuele alternatieve locaties moet overleg plaats vinden met de verschillende ministeries en organisaties zoals de Kustwacht, RWS, het ministerie van I&W en andere beroeps- en belangenverenigingen op de Noordzee, bijvoorbeeld het SAN (Scheepvaart Adviesgroep Noordzee).
- Indien de plannen verder uitgewerkt zijn, dient een meer uitgebreider onderzoek naar de effecten voor de veiligheid van de scheepvaart worden uitgevoerd, bijvoorbeeld een Formal Safety Assessment in lijn met de voorschriften van de IMO.

11 Referenties

- Aarts, G., Brasseur, S., & Kirkwood, R. (2018). *Behavioural response of grey seals to pile-driving*. Wageningen, Wageningen Marine Research (University & Research centre), Wageningen Marine Research report C006/18. 54 pp. <https://doi.org/10.18174/466039>
- Beck, M., & Brumsack, H. J. (2012). Biogeochemical cycles in sediment and water column of the Wadden Sea: The example Spiekeroog Island in a regional context. *Ocean and Coastal Management*, 68, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.05.026>
- Bevelhimer, M., Scherelis, C., Colby, J., & Adonizio, M. A. (2017). Hydroacoustic assessment of behavioral responses by fish passing near an operating tidal turbine in the east river, New York. *Transactions of the American Fisheries Society*, 146(5), 1028–1042. <https://doi.org/10.1080/00028487.2017.1339637>
- Bij De Vaate, A., Breukelaar, A. W., Vriese, T., De Laak, G., & Dijkers, C. (2003). Sea trout migration in the Rhine delta. *Journal of Fish Biology*, 63(4), 892–908. <https://doi.org/10.1046/j.1095-8649.2003.00198.x>
- Bovcon, N. D., Cochia, P. D., Navoa, X., Ledesma, P., Caille, G. M., & Baigun, C. R. M. (2018). First report on a pupping area of the tope shark *Galeorhinus galeus* (Carcharhiniformes, Triakidae) in the south-west Atlantic. *Journal of Fish Biology*, 93(6), 1229–1232. <https://doi.org/10.1111/jfb.13781>
- Brasseur, S. M. J. M. (2017). *Seals in motion : how movements drive population development of harbour seals and grey seals in the North Sea*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands. 176 pp. <https://doi.org/10.18174/418009>
- Brevé, N. W. P., Winter, H. V., Van Overzee, H. M. J., Farrell, E. D., & Walker, P. A. (2016). Seasonal migration of the starry smooth-hound shark *Mustelus asterias* as revealed from tag-recapture data of an angler-led tagging programme. *Journal of Fish Biology*, 89(2), 1158–1177. <https://doi.org/10.1111/jfb.12994>
- Bulleri, F., & Chapman, M. G. (2010). The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments. *Journal of Applied Ecology*, 47, 26–35. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01751.x>
- Čada, G. F. (1997). Shaken, not stirred: The recipe for a fish-friendly turbine. *Proceedings of the International Conference on Hydropower – Waterpower*, 1, 374–382.
- Cardoso, J. F. M. F., Freitas, V., Quilez, I., Jouta, J., Witte, J. IJ., & Van Der Veer, H. W. (2015). The European sea bass *Dicentrarchus labrax* in the Dutch Wadden Sea: From visitor to resident species. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 95(4), 839–850. <https://doi.org/10.1017/S0025315414001714>
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007): The Rock Manual, the use of rock in hydraulic engineering, (inclusief errata).
- De Fockert (2023), Uitgangspunten voor studie: Validatie van de potentiële opbrengst van Dynamic Tidal Power, Deltares rapport 11209585-000-HYE-0003
- De Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B., & Degraer, S. (2015). Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia*, 756(1), 37–50. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1>
- De Pontual, H., Heerah, K., Goossens, J., Garren, F., Martin, S., Le Ru, L., Le Roy, D., & Woillez, M. (2023). Seasonal migration, site fidelity, and population structure of European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *ICES Journal of Marine Science*, 80(6), 1606–1618. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad087>
- Delta Marine Consultants (2023). Xbloc & Xblocpluc design guidelines 2023.
- Freyhof, J., & Kottelat, M. (2008). *Dicentrarchus labrax*. *The IUCN Red List of Threatened Species*, 2008, e.T135606A4159287. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T135606A4159287.en>

- Giardino, A., Diamantidou, E., Pearson, S., Santinelli, G. & Heijer, C. (2019). A Regional Application of Bayesian Modeling for Coastal Erosion and Sand Nourishment Management. *Water*, 11, 61. <https://doi.org/10.3390/w11010061>
- Gilles, A., Viquerat, S., Becker, E. A., Forney, K. A., Geelhoed, S. C. V., Haelters, J., Nabe-Nielsen, J., Scheidat, M., Siebert, U., Sveegaard, S., Van Beest, F. M., Van Bemmelen, R., & Aarts, G. (2016). Seasonal habitat-based density models for a marine top predator, the harbor porpoise, in a dynamic environment. *Ecosphere*, 7(6). <https://doi.org/10.1002/ecs2.1367>
- Hampel, H., Cattrijsse, A., & Elliott, M. (2005). Feeding habits of young predatory fishes in marsh creeks situated along the salinity gradient of the Schelde estuary, Belgium and The Netherlands. *Helgoland Marine Research*, 59, 151–162. <https://doi.org/10.1007/s10152-004-0214-2>
- Holt, J., Schrum, C., Cannaby, H., Daewel, U., Allen, I., Artioli, Y., Bopp, L., Butenschon, M., Fach, B. A., Harle, J., Pushpadas, D., Salihoglu, B., & Wakelin, S. (2016). Potential impacts of climate change on the primary production of regional seas: A comparative analysis of five European seas. *Progress in Oceanography*, 140, 91–115. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.11.004>
- Hulsbergen, K., Steijn, R., & Banning, G. (2008). Dynamic Tidal Power (DTP)-A new approach to exploit tides. 2nd International Conference on Ocean Energy (ICOE 2008), p.p. 1–10. Brest, France
- Hulbergen K., Steijn R.C., Hassan R., Klopman G., Hurdle D., (2005), Dynamic Tidal Power (DTP), 6th European Wave and Tidal Conference, Glasgow, UK
- ICES. (2020). Workshop on the temporal migration patterns of European eel (WKEELMIGRATION). *ICES Scientific Reports*, 2(25), 109pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.5993>
- Idelchik (2007), Handbook of Hydraulic Resistance, 4th revised and augmented edition, Begell house, Inc. ISBN: 978-1-56700-251-5
- Jabado, R. W., Ellis, J. R., McCully, S., Dulvy, N. K., Farrell, E. D., Mancusi, C., & Derrick, D. (2021). *Mustelus asterias*. *The IUCN Red List of Threatened Species, 2021*, e.T39357A124405496. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T39357A124405496.en>
- Kvale, E.P. (2006). The origin of neap-spring tidal cycles. *Elsevier Marine Geology* 235 (2006) 5 – 18, Dec. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.10.001>
- Leopold, M., & Scholl, M. (2019). *Monitoring getijdenturbines Oosterscheldekering: Jaarrapportage 2018*. Wageningen Marine Research, Wageningen UR (University & Research centre), Wageningen Marine Research rapport C010/19, 58 pp. + bijlage. <https://doi.org/10.18174/470409>
- McMillan, M. N., Huveneers, C., Semmens, J. M., & Gillanders, B. M. (2019). Partial female migration and cool-water migration pathways in an overfished shark. *ICES Journal of Marine Science*, 76(4), 1083–1093. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy181>
- Moksnes, P. O., Corell, H., Tryman, K., Hordoir, R., & Jonsson, P. R. (2014). Larval behavior and dispersal mechanisms in shore crab larvae (*Carcinus maenas*): Local adaptations to different tidal environments? *Limnology and Oceanography*, 59(2), 588–602. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.2.0588>
- Negro, V., Del Campo, J. M., Frades, J. L., Antón, M. M., Esteban, M. D., López-Gutiérrez, J. S., & Soukissian, T. (2020). Impact of Offshore Wind Farms on Marine Ecosystems, Pelagic Species and Fishing. *Journal of Coastal Research*, 95, 118–122. <https://doi.org/10.2112/S195-023.1>
- Nijhuis Pompen BV (2014), Performance testing of a Bi-Directional Turbine, vertrouwelijk rapport
- Oost, A., Colina Alonso, A., Esselink, P., Wang, Z.B., van Kessel, T., and van Maren, B. (2021). Where Mud Matters. Wadden Academie report 2021-02, 154 p., ISBN 978-94-90289-57-7. <https://www.waddenacademie.nl/organisatie/publicatie-lijst/publicatie-detail/where-mud-matters>

- Peraza, J. I., & Horne, J. K. (2023). Quantifying conditional probabilities of fish-turbine encounters and impacts. *Frontiers in Marine Science* 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1270428>
- Rijkswaterstaat, (1993). Two-dimensional horizontal coastal flow model. Rapport GWAO 93.123X, Den Haag.
- Rijkswaterstaat (2013). Kenmerkende waarden getijdgebied 2011. Definitief 22 juli 2013. https://www.deltaexpertise.nl/images/9/9b/Kenmerkende_waarden_getijdgebied_2011_tcm21-97249.pdf.pdf
- Schaber, M., Gastauer, S., Cisewski, B., Hielscher, N., Janke, M., Peña, M., Sakinan, S., & Thorburn, J. (2022). Extensive oceanic mesopelagic habitat use of a migratory continental shark species. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05989-z>
- Schweizer, P. E., Čada, G. F., & Bevelhimer, M. S. (2012). Laboratory Experiments on the Effects of Blade Strike from Hydrokinetic Energy Technologies on Larval and Juvenile Freshwater Fishes. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 31 pp. <http://www.osti.gov/contact.html>
- Talstra H., Pak, T., (2020), Dynamic Tidal Power (DTP): a review of a promising technique for harvesting sustainable energy at sea, Svasek Hydraulics report ref: 2037/U20232/A/HTAL, status draft
- Thomas, H., Schiettecatte, L.-S., Suykens, K., Koné, Y. J. M., Shadwick, E. H., Prowe, A. E. F., Bozec, Y., De Baar, H. J. W., & Borges, A. V. (2009). Enhanced ocean carbon storage from anaerobic alkalinity generation in coastal sediments. *Biogeosciences*, 6, 267–274. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/bg-6-267-2009>
- TNO (2020a), Stroom uit water – onderzoek potentieel elektriciteitsopwekking uit water ten behoeve van de Verkenning Elektriciteit uit water, TNO ref: TNO 2020 P11977
- TNO (2020b). Estimation DTP NL TNO report 21 GW v1. Excel calculation sheet.
- Trancart, T., Teichert, N., Lamoureux, J., Gharnit, E., Acou, A., De Oliveira, E., Roy, R., & Feunteun, E. (2022). A possible strong impact of tidal power plant on silver eels' migration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 278, 108116. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108116>
- Troost, K., Perdon, K. J., van Zwol, J., Jol, J., & van Asch, M. (2017). *Schelpdierbestanden in de Nederlandse kustzone in 2017*. CVO rapport: 17.014, Wageningen Marine Research, IJmuiden. <https://doi.org/10.18174/423592>
- Tweede Kamer (2021), Kabinetsaanpak Klimaatbeleid 0 motie van de leden Grinwis en Stoffer, Ref: 32813, nr 793, ISSN 0921-7371
- Van Duren, L. A., Van Kessel, T., Troost, T. A., Blauw, A. N., Kramer, L., Van Gils, J. A., Craeymeersch, J. A. M., & Herman, P. M. J. (2017). *Scenariostudies ter ondersteuning van de MER Zandwinning 2018-2027*. 1230888-000-ZKS-0018, Deltares, Delft.
- Van Gent, M.R.A., H.F.P. van den Boogaard, B. Pozueta and J.R. Medina (2007), Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures, Elsevier, Coastal Engineering, Vol.54, pp. 586-593. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.12.001>
- Van Rijn, L.C. (1995), Sand budget and coastline changes of the central coast of Holland between Den Helder and Hoek van Holland, period 1964-2040. Delft Hydraulics report H2129.
- Verhelst, P., Bruneel, S., Reubens, J., Coeck, J., Goethals, P., Oldoni, D., Moens, T., & Mouton, A. (2018). Selective tidal stream transport in silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) – Migration behaviour in a dynamic estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 213, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.08.025>
- Verhelst, P., Reubens, J., Coeck, J., Moens, T., Simon, J., Van Wichelen, J., Westerberg, H., Wysujack, K., & Righton, D. (2022). Mapping silver eel migration routes in the North Sea. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04052-7>
- Viehman, H. A., & Zydlewski, G. B. (2014). Fish Interactions with a Commercial-Scale Tidal Energy Device in the Natural Environment. *Estuaries and Coasts*, 38(1), 241–252. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9767-8>

- Vriese F.T., van Berkel J. (2015), Evaluation of Fish Injury and Mortality Associated with scale models of the Pentair Fairbanks Nijhuis Modified Bulb turbine and the Water2Energy Cross Flow turbine, ProTide, ATKB report 20140961/rap02
- Walker, T. I., Rigby, C. L., Pacoureaux, N., Ellis, J., Kulka, D. W., Chiaramonte, G. E., & Herman, K. E. (2020). *Galeorhinus galeus*. *The IUCN Red List of Threatened Species, 2020*, e.T39352A2907336. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T39352A2907336.en>
- Wang, Z. B., Elias, E. P. L., Van Der Spek, A. J. F., & Lodder, Q. J. (2018). Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: Impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97(3), 183–214. <https://doi.org/10.1017/njg.2018.8>
- Wijnberg, M. (2002), Environmental controls on decadal morphologic behaviour of the Holland coast. *Marine Geology*, Volume 189, Issues 3–4, 2002, Pages 227-247, [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00480-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00480-2) .
- Yang, C., Hou, S., Zheng, Y., Zhang, Y., & Luo, H. (2018). A Review of Research on the Design of Fish-Friendly Hydraulic Turbines. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 20(3), 96–101. <https://doi.org/10.15302/j-sscae-2018.03.014>
- Zaiko, A., Olenin, S., Daunys, D., & Nalepa, T. (2007). Vulnerability of benthic habitats to the aquatic invasive species. *Biological Invasions*, 9(6), 703–714. <https://doi.org/10.1007/s10530-006-9070-0>
- Zijl, F., Groenenboom, J., Laan, S., & Zijlker, T. (2022). DCSM-FM 100m: a sixth-generation model for the NW European Shelf : 2022. Delft: Deltares, https://publications.deltares.nl/11208054_004_0002.pdf

A Expert review DTP-dam en scheepvaart door MARIN

A.1 UNCLOS – Artikel 60

Bron: https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf

Article60

Artificial islands, installations and structures in the exclusive economic zone

1. In the exclusive economic zone, the coastal State shall have the exclusive right to construct and to authorize and regulate the construction, operation and use of:

- (a) artificial islands;
- (b) installations and structures for the purposes provided for in article 56 and other economic purposes;
- (c) installations and structures which may interfere with the exercise of the rights of the coastal State in the zone.

2. The coastal State shall have exclusive jurisdiction over such artificial islands, installations and structures, including jurisdiction with regard to customs, fiscal, health, safety and immigration laws and regulations.

3. Due notice must be given of the construction of such artificial islands, installations or structures, and permanent means for giving warning of their presence must be maintained. Any installations or structures which are abandoned or disused shall be removed to ensure safety of navigation, taking into account any generally accepted international standards established in this regard by the competent international organization. Such removal shall also have due regard to fishing, the protection of the marine environment and the rights and duties of other States. Appropriate publicity shall be given to the depth, position and dimensions of any installations or structures not entirely removed.

4. The coastal State may, where necessary, establish reasonable safety zones around such artificial islands, installations and structures in which it may take appropriate measures to ensure the safety both of navigation and of the artificial islands, installations and structures.

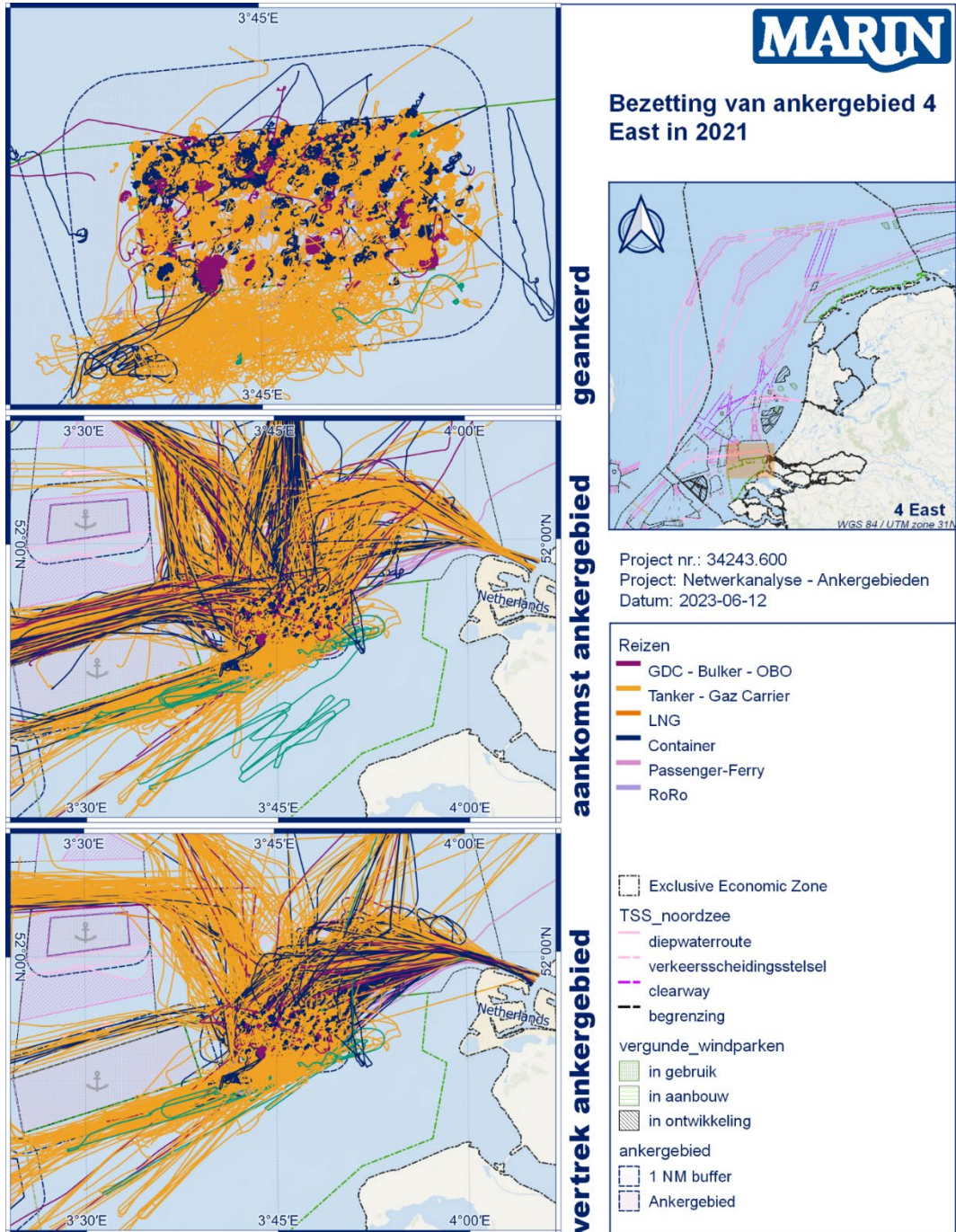
5. The breadth of the safety zones shall be determined by the coastal State, taking into account applicable international standards. Such zones shall be designed to ensure that they are reasonably related to the nature and function of the artificial islands, installations or structures, and shall not exceed a distance of 500 metres around them, measured from each point of their outer edge, except as authorized by generally accepted international standards or as recommended by the competent international organization. Due notice shall be given of the extent of safety zones.

6. All ships must respect these safety zones and shall comply with generally accepted international standards regarding navigation in the vicinity of artificial islands, installations, structures and safety zones.

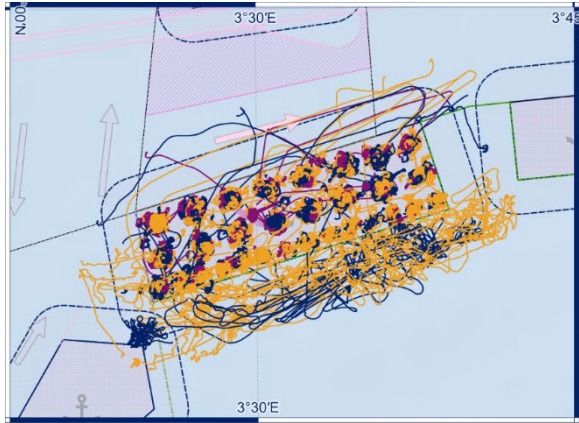
7. Artificial islands, installations and structures and the safety zones around them may not be established where interference may be caused to the use of recognized sea lanes essential to international navigation.

8. Artificial islands, installations and structures do not possess the status of islands. They have no territorial sea of their own, and their presence does not affect the delimitation of the territorial sea, the exclusive economic zone or the continental shelf.

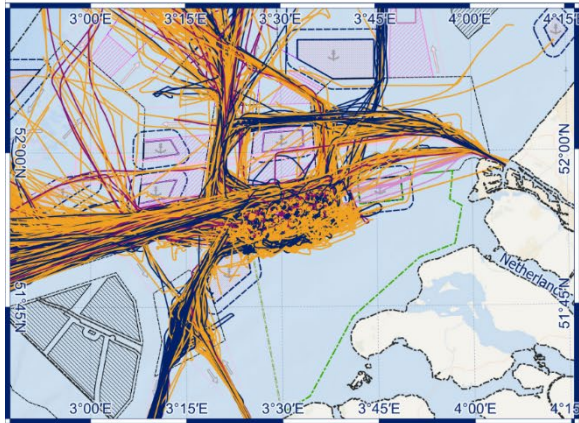
A.2 Ankergebied 4-east



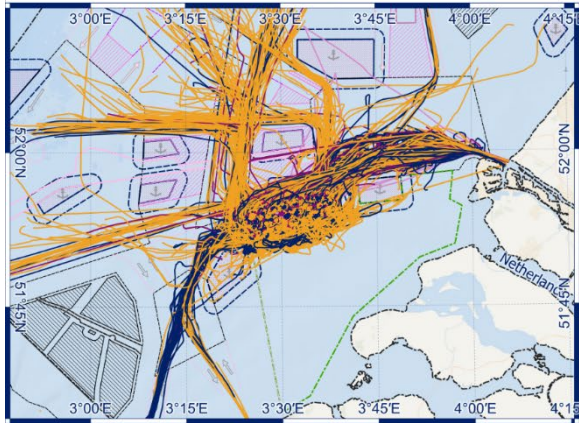
Bezetting van ankergebied 4 West in 2021



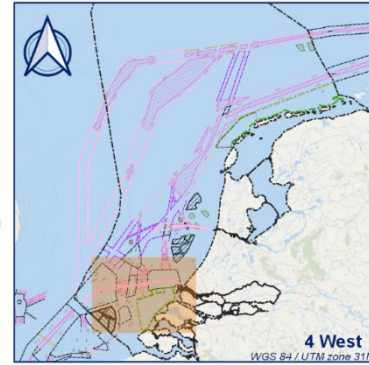
geankerd



aankomst ankergebied



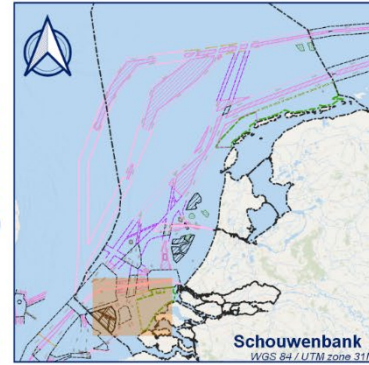
vertrek ankergebied



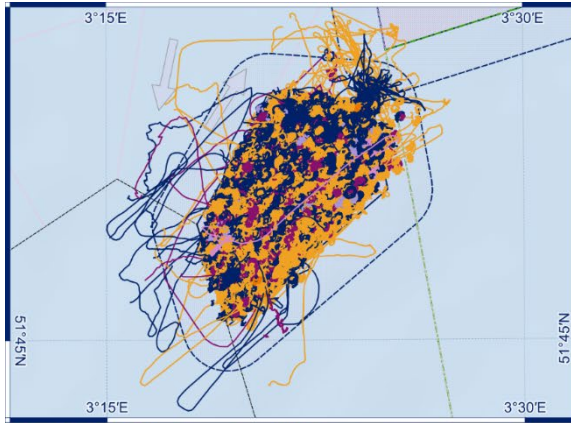
Project nr.: 34243.600
 Project: Netwerkanalyse - Ankergebieden
 Datum: 2023-06-12

- Reizen**
- GDC - Bulker - OBO
 - Tanker - Gaz Carrier
 - LNG
 - Container
 - Passenger-Ferry
 - RoRo
- gebied**
- Exclusive Economic Zone
 - TSS_noordzee
 - diepwaterroute
 - verkeersscheidingsstelsel
 - clearway
 - begrenzing
- vergunde_windparken**
- in gebruik
 - in aanbouw
 - in ontwikkeling
- ankergebied**
- 1 NM buffer
 - Ankergebied

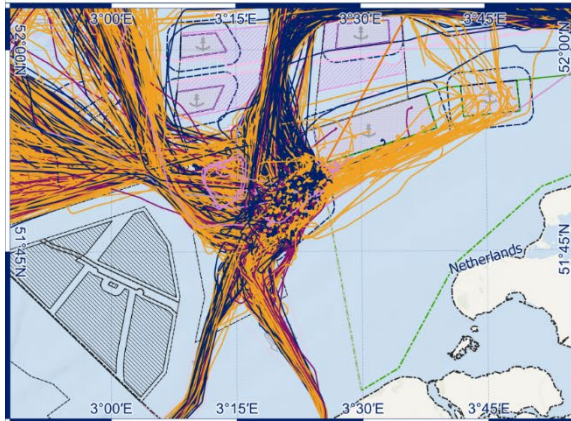
Bezetting van ankergebied Schouwenbank in 2021



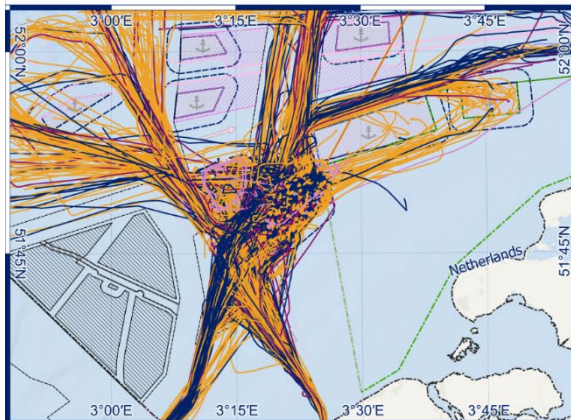
Project nr.: 34243.600
Project: Netwerkanalyse - Ankergebieden
Datum: 2023-06-12



geankerd



aankomst ankergebied



vertrek ankergebied

- Reizen
- GDC - Bulker - OBO
 - Tanker - Gaz Carrier
 - LNG
 - Container
 - Passenger-Ferry
 - RoRo

- Exclusive Economic Zone
- TSS_noordzee
- diepwaterroute
- verkeersscheidingsstelsel
- clearway
- begrenzing
- vergunde_windparken
- in gebruik
- in aanbouw
- in ontwikkeling
- ankergebied
- 1 NM buffer
- Ankergebied

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

Deltares

www.deltares.nl