

Toekomst Afsluitdijk

antwoorden op vijf onderzoeksvragen

ir. B. van Vossen
C.M. Swinkels M.Sc
dr. B.G.H.M. Wichman
dr. L.M. Dionisio Pires
dr.ir. G.A.M. van Meurs

1201757-000

Titel
Toekomst Afsluitdijk

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat Waterdienst

Project
1201757-000

Kenmerk
1201757-000-GEO-0017-
jvm

Pagina's
139

Trefwoorden
Toekomst Afsluitdijk, Verkenning, Onderzoeksvragen

Samenvatting
Een viertal visies zijn opgesteld door private partijen over de toekomst van de Afsluitdijk. Vervolgens heeft Rijkswaterstaat een tweetal overheidsreferenties opgesteld.

Verschillende onderzoeksvragen over de visies en de referenties zijn naar voren gekomen. Een vijftal vragen is door Rijkswaterstaat voorgelegd aan Deltares. De vragen hebben betrekking op de Blue Energy Centrale opgenomen in alle vier de private visies, een getijdenbekken opgenomen in één visie, een valmeer eveneens opgenomen in één visie, de benodigde schaalgrootte van natuurontwikkeling opgenomen in alle vier de private visies en het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse op de beide overheidsreferenties.

Als eerste hoofdstuk is een uitgebreide samenvatting opgenomen.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf Review	Paraaf Goedkeuring	Paraaf
01	maart 2010	ir. B. van Vossen	drs. R.F. de Graaff		
		dr. B.G.H.M. Wichman	Ing. J.W.M. Lambert		
		C.M. Swinkels M.Sc	ir. R.J. de Jong		
		dr. L.M. Dionisio Pires	drs. H. Duel		
		dr. B.G.H.M. Wichman	ing. A.P.C. Rozing		
		dr.ir. G.A.M. van Meurs		ing. M. Hutteman	

Status
definitief

Inhoud

Samenvatting	v
Locatie Blue Energy Centrale (BEC)	v
Geotechnische haalbaarheid Valmeer	vi
Review van een Getijdenbekken	vii
Schaalgrootte van ecologische verbeteringen	vii
Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties	viii
1 Inleiding	1
1.1 Algemeen	1
1.2 Vijf Onderzoeksvragen	2
2 Vier visies van consortia en twee overheidsreferenties	5
2.1 Monument in Balans: betonnen stormschild en ontwikkeling van koppen	6
2.2 Natuurlijk Afsluitdijk: zeewering en natuurlijk	7
2.3 WaddenWerken: kwelders in de Waddenzee	8
2.4 WATERmachine: overslagdijk en binnenmeer	9
2.5 Basisreferentie	9
2.6 2100-Robuust	10
3 Aanpak onderzoeksvragen	11
3.1 Locatie Blue Energy Centrale	11
3.2 Geotechnische haalbaarheid Valmeer	12
3.3 Review van een getijdenbekken	13
3.4 Schaalgrootte van ecologische verbeteringen	13
3.5 Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties	14
4 Resultaten en bevindingen	15
4.1 Locatie Blue Energy Centrale (BEC)	15
4.1.1 Inpassing BEC in huidige situatie	15
4.1.2 BEC in visie Monument in Balans	22
4.1.3 BEC in visie Natuurlijk Afsluitdijk	26
4.1.4 BEC in visie WaddenWerken	30
4.1.5 BEC in visie WATERmachine	35
4.2 Geotechnische haalbaarheid valmeer	39
4.2.1 Uitgangspunten valmeer	39
4.2.2 Ontwerp, aanleg en onderhoud van de ringdijk	42
4.2.3 Ontwerp en aanleg van de cementbentonietwand	43
4.2.4 Duurzaamheid / levensduur van de constructie	43
4.3 Review van een getijdenbekken	44
4.3.1 Waterstand in het IJsselmeer	44
4.3.2 Waterstand en getijslag op de Waddenzee	45
4.3.3 Waterstand en getijslag op vloedkom en tussenmeer	46
4.3.4 Pompen door de getijdencentrale	47
4.3.5 Rendement van de pompturbines	48
4.3.6 Energieopbrengst en energieconsumptie van pompturbines in basisplan	50
4.3.7 Energieopbrengst en energieconsumptie van pompturbines in varianten	52
4.4 Schaalgrootte van ecologische verbeteringen	52

4.4.1	Criteria	53
4.4.2	Grootte van de voorgestelde natuurgebieden	53
4.4.3	Beoordeling van visies	54
4.5	Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties	57
4.5.1	Uitgangspunten	57
4.5.2	Bevindingen en resultaten	64
5	Conclusies en Aanbevelingen	71
5.1	Locatie Blue Energy Centrale	71
5.2	Geotechnische haalbaarheid valmeer	74
5.3	Review van een getijdenbekken	75
5.4	Schaalgrootte van ecologische verbeteringen	77
5.5	Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties	79
	Referenties	81
	Bijlage 1 Locatie Blue Energy Centrale (BEC)	83
B1.	Blue Energy technieken	83
B1.1	Pressure Retarded Osmosis (PRO)	83
B1.2	Reversed Electro Dialysis (RED)	84
B2.	Geïdentificeerde efficiëntie aspecten	85
B3.	Geïdentificeerde Impact aspecten	88
B4.	Expert sessies	90
	Bijlage 2 Geotechnische haalbaarheid valmeer	91
	Bijlage 2A Berekeningen	92
	Bijlage 2B	93
	Bijlage 3 Review van een Getijdenbekken	94
	Bijlage 4 Schaalgrootte ecologische verbetering	95
	Bijlage 5 Gevoeligheidsanalyse overheidsreferentie	96
	Bijlage 5A	97
	Bijlage 5B	98
	Bijlage 5C	99
	Bijlage 5D	100
	Bijlage 5E	101
	Bijlage 5F	102
	Bijlage 5G	103
	Bijlage 5H	104

Bijlage 5I	105
Bijlage 5J	106
Bijlage 5K	107
Bijlage 5L	108
Bijlage 5M	109
Bijlage 6 Betrokkenen bij het project	110

Samenvatting

Een viertal visies is opgesteld door private partijen over de toekomst van de Afsluitdijk. Vervolgens heeft Rijkswaterstaat een tweetal overheidsreferenties opgesteld.

Verschillende onderzoeksvragen over de visies en de referenties zijn naar voren gekomen. Een vijftal vragen is door Rijkswaterstaat voorgelegd aan Deltares. De vragen hebben betrekking op de Blue Energy Centrale opgenomen in alle vier de private visies, een getijdenbekken opgenomen in één visie, een valmeer eveneens opgenomen in één visie, de benodigde schaalgrootte van natuurontwikkeling opgenomen in alle vier de private visies en het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse op de beide overheidsreferenties.

Locatie Blue Energy Centrale (BEC)

In alle vier de visies is een BEC opgenomen om uit menging van zoet en zout water energie op te wekken. In de visie van Monument in Balans is de exacte locatie nog open gelaten en kan afgestemd worden op lokale omstandigheden. In de visies Natuurlijk Afsluitdijk en WATERmachine is de BEC nadrukkelijk verbonden met de locatie Breezanddijk. In de visie WaddenWerken is de locatie van een BEC verbonden met Den Oever.

De evaluatie van mogelijke locaties van een BEC is gedaan op basis van beschikbare informatie en expert kennis. Gestart is met de huidige situatie rond de Afsluitdijk. Gekeken is naar de hydrodynamische, de morfologische en de ecologische processen in de omgeving en naar de functionele aspecten verbonden aan de Afsluitdijk zoals het spuiregime. Vervolgens is gekeken naar de veranderingen die opgenomen zijn in de vier visies. In twee expert sessies zijn de belangrijkste aspecten onderscheiden die aan de keuze voor een locatie ten grondslag liggen en zijn de verschillende locaties binnen de vier visies met elkaar vergeleken.

Bij de omvang van een BEC is onderscheid gemaakt in drie verschillende types: een pilot BEC met een vermogen van 0,05 MW, een kleine BEC met een vermogen van 20 MW en een grote BEC met een vermogen van 200 MW.

Uit efficiëntie overwegingen zijn de belangrijkste aspecten: het zoutgehalte bij het innamepunt van zoutwater, het slibgehalte bij de inname punten voor zoet en zout water en het onderhoudsbaggerwerk bij inname punten. De belangrijkste aspecten als het gaat over de gevolgen van een BEC voor de omgeving, zijn de morfologische en de ecologische effecten in de Waddenzee.

In de huidige situatie is de locatie Kornwerderzand het minst geschikt op basis van de aspecten zoutgehalte en slibgehalte. Dit geldt voor alle drie de BEC types. Verder is er op alle drie de locaties een groter risico voor recirculatie naarmate een BEC groter wordt uitgevoerd. De inname en lozingspunten moeten daarom voldoende ver uiteen worden gelegd. Bij de afweging tussen de locaties Den Oever en Breezanddijk zijn de zout- en slibgehalten ook erg belangrijk. Bij de locatie Den Oever zal het zoute water via een pijpleiding uit het Marsdiep moeten worden gehaald vanwege het regelmatige spuien van zoet water. Brakwater kan via de spuigemaal worden geloosd.

Als in een toekomstige situatie bij Den Oever minder gespuid gaat worden, zal de westelijke Waddenzee zouter worden. Dat is gunstig voor een BEC (visie Monument in Balans en visie WaddenWerken). De visie WaddenWerken is niet geschikt voor een grote BEC omdat het

debiet aan brakwater te groot wordt om Brakbaai morfologisch en ecologisch volgens de visie in te richten.

Buiten de optimalisatievraag wat betreft de locatie van de BEC zoals behandeld in dit rapport, adviseert Deltares een nader onderzoek naar de haalbaarheid van een BEC op de Afsluitdijk.

Geotechnische haalbaarheid Valmeer

De visie van Natuurlijk Afsluitdijk bevat een onderdeel energieopslag door de aanleg van een zogenaamd valmeer. Een deel van het IJsselmeer (grootte 7 km² en diepte 20 m) wordt van een ringdijk voorzien. In het valmeer kan het waterpeil sterk variëren. Bij de constructie van een valmeer is een wand opgenomen bestaande uit cementbentoniet. De wand is voorzien in de ringdijk en wordt geplaatst tot een diepte van NAP - 40m.

Gegevens zijn verzameld betreffende de geologische gesteldheid van de ondergrond ter plaatse van het zoekgebied is verzameld. Daarbij is gebruik gemaakt van boringen en sonderingen. De risico's, verbonden aan de realisatie van een valmeer binnen het zoekgebied van de locatie, zijn vervolgens in kaart gebracht middels expert sessies.

Een belangrijke eis voor de locatie van een valmeer is de aanwezigheid van een continue kleilaag aan de onderzijde van het meer. Een dergelijke kleilaag remt de toe- en afstroming van water door de bodem en draagt direct bij aan het rendement. Helaas zijn onvoldoende gegevens over de opbouw van de ondergrond beschikbaar om een betrouwbare uitspraak te doen over de continuïteit van de kleilaag. Geologische expertise geeft aan dat het niet mogelijk is om met enige zekerheid uitspraken te doen over het voorkomen, de dikte en de eigenschappen van de kleilagen in de ondergrond van het zoekgebied van het valmeer op diepten tussen ongeveer NAP – 20 m tot NAP – 40 m. Bij een gedeeltelijk ontbreken van de kleilaag is het concept van een valmeer niet uitvoerbaar.

Als een dergelijke kleilaag in de ondergrond van het valmeer aanwezig is, kunnen er indicatieve waarden worden gehanteerd voor de geohydrologische eigenschappen van deze kleilaag. De bijdrage van kwel via de ondergrond aan de verandering van het waterpeil in het valmeer wordt dan geschat op 5 à 10 mm per dag. De bijdrage van horizontale toestroming via de wand van cementbentoniet wordt lager geschat dan de bijdrage via kwel door de kleilaag.

Andere risico's verbonden aan de aanleg van een valmeer zijn het opbarsten van kleilagen, zettingsvloeiingen en eventuele afschuiving van het talud. Opbarsten van kleilagen in de ondergrond van het valmeer treedt op als het gewicht van de lagen geringer is dan het drukverschil van het (grond)water. Een zettingsvloeiing kan plaatsvinden onder invloed van fluctuerende waterstanden in het valmeer. Drukopbouw in het grondwater en het vervolgens weer uitstromen van grondwater kan namelijk leiden tot zandtransport. Als het talud te steil is en water sijpelt boven de waterstand in het valmeer vanuit de ondergrond naar buiten dan kan dat leiden tot afschuiving van het talud.

De voorziene hoogte van de ringdijk, zijnde vijf meter, wordt voldoende hoog geschat. Het consortium Natuurlijk Afsluitdijk heeft geen informatie gegeven ten aanzien van te hanteren taludhellingen van de dijk en de ontgraving, en ook geen informatie over eventuele bekleding van deze taluds. Indicatieve waarden zijn aangegeven die hiervoor gehanteerd kunnen worden, zodat het valmeer met ringdijk stabiel blijft, ook bij de uitvoering.

Op andere locaties is het mogelijk gebleken om een wand van cementbentoniet tot een diepte van NAP-40m te plaatsen. Wel dient gekeken te worden naar het effect van zout op de stabiliteit van een mengsel van cementbentoniet in de aanlegfase van de wand. Na aanleg van de wand dienen eventueel voorzieningen te worden getroffen om uitdroging van (het bovenste deel van) de wand aan de binnenzijde van het valmeer tegen te gaan. De noodzaak voor het gebruik van HDPE-folie, zoals aangegeven door het consortium Natuurlijk Afsluitdijk, is in deze studie niet aangetoond.

Review van een Getijdenbekken

In de visie WATERmachine van het consortium Afsluitdijk 2100 (AD21) is een getijdenbekken opgenomen waar getijdenenergie gewonnen wordt. Door Deltares is een review gehouden van de getijdencentrale in de vorm van enkele expert sessies. Hierbij zijn de onderdelen getijden-hydrodynamiek en lage-druk turbines uitgebreid ter sprake gekomen.

Gebaseerd op de getijslag en de afmetingen van de turbines is het debiet, dat door de turbines kan stromen, geanalyseerd. Dit laat zien dat het debiet, gehanteerd door het consortium, ongeveer 80% te hoog is aangenomen. Deze constatering werkt direct door in de berekening van de energieopbrengst. Gelet op de overschatting van het debiet is de energieopbrengst in 2020 waarschijnlijk lager dan de berekende 21 GWh, mogelijk slechts 12 GWh. Een vergelijkbare reductie in energieopbrengst zal in de overige jaren eveneens van toepassing zijn.

Een verdere verlaging van de energieopbrengst ontstaat wanneer voor de zeespiegelstijging het W+ scenario wordt gehanteerd in plaats van het scenario van AD21. Bij het W+ scenario zet de zeespiegelstijging eerder in, waardoor er minder gespuid kan worden bij Den Oever en er eerder water moet worden verpompt bij Kornwerderzand. De energieproductie van de getijdencentrale zal dan vermoedelijk over de gehele beschouwde periode tot 2100 waarschijnlijk flink lager uitvallen dan aangenomen door AD21 en het energieverbruik zal tegelijkertijd waarschijnlijk flink hoger uitvallen.

Grote onzekerheid zit er in de rendementen die AD21 hanteert. Het is onduidelijk welke aspecten meegenomen worden in de genoemde pomp- en turbinerendementen. Al met al lijkt het systeemrendement aan de optimistische kant te zijn gekozen, resulterend in een overschatting in de raming van de energieproductie van de getijdencentrale. Tegelijkertijd wordt het energieverbruik van de pompen daarmee onderschat.

AD21 gaat bij het plan uit van 40 pompturbines en een rekenverval van 0,75 m. Met een maximaal debiet per turbine van 27,5 m³/s en een rendement van 65% bedraagt het vermogen van de getijdencentrale dan 5 MW. In de genoemde 8 MW door AD21 is ten onrechte het rendement niet meegenomen.

Schaalgrootte van ecologische verbeteringen

In alle vier de visies is sprake van plannen voor versterking van de natuur. De vraag is welke schaalgrootte nodig is om een significante verbetering van de ecologie te krijgen ter plaatse van de Afsluitdijk. Bij het zoeken naar het antwoord is gebruik gemaakt van aanwezig kennis tijdens een sessie met experts. Tijdens deze sessie is een set criteria opgesteld waarmee de vier visies vervolgens zijn geëvalueerd. Bij de evaluatie is primair gekeken naar de schaalgrootte voor het versterken van de ecologische kwaliteit op de overgang Waddenzee - IJsselmeer. De schaalgrootte is vergeleken met de bestaande ecologische kwaliteit.

Begonnen is met het vaststellen van criteria waarmee een beoordeling kan plaatsvinden. In de expert sessie zijn de volgende criteria vastgesteld: Natura 2000, de Kaderrichtlijn Water, de winst of verlies aan natuurontwikkeling of aan natuurlijk gebied, de natuurlijkheid van een zoet-zout overgang en eventueel het leren van projecten uit het verleden.

Drie van de vier visies stellen arealen en ontwikkelingen voor die qua schaalgrootte significante ecologische verbeteringen kunnen opleveren. Deze drie visies zijn: Natuurlijk Afsluitdijk, WATERmachine en Waddenwerken. Monument in balans stelt ook gebieden voor die normaliter groot genoeg zijn voor significante verbeteringen gericht op ecologie, maar in deze visie worden veel ontwikkelingen gepland in al bestaande natuurgebieden (die dus al heel waardevol zijn). Daardoor bestaat er de kans dat er geen of weinig significante ecologische verbeteringen zullen plaatsvinden.

Van de drie visies Natuurlijk Afsluitdijk, WATERmachine en Waddenwerken is vervolgens gekeken in hoeverre een visie positief of negatief scoort op de verschillende criteria.

Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd op de variant '2100-Robuust' van de overheidsreferenties. Onderzocht is de gevoeligheid voor variatie van de veiligheidsnorm en van de toegepaste hydraulische randvoorwaarden. De aangeleverde randvoorwaarden hebben een beperkte nauwkeurigheid. Voor deze verkennende fase zijn ze goed genoeg.

Bij een bermbreedte van maximaal 10 meter en een toelaatbaar overslag debiet van 10 l/s/m, is het doorgaans mogelijk een dijkhoogte te berekenen die kleiner of gelijk is aan 11 m + NAP meter. Dat geldt ook voor de normfrequentie van 1 keer per 50.000 jaar. Een binnentalud met een helling van 1:3 lijkt voorsnog haalbaar. Er zijn echter risico's, zoals aangegeven in deze studie, die nader moeten worden onderzocht. Taludverflauwing naar 1:4 is een mogelijke oplossing. Daarvoor zal echter ruimte moeten worden gereserveerd.

In een voorgaande studie bij de oude randvoorwaarden was voor profiel I een dijkhoogte berekend van 9,89 m, bij een breedte voor de buitenberm van 10 m voor een planperiode tot 2100. Met de nieuwe randvoorwaarden is de uitkomst 0,2 m lager dan de kruinhoogte van 10,1 m met een 10 m brede berm voor het zelfde profiel.

Qua dijkhoogte is dijksectie 3 tussen kilometer paal 12 en kilometerpaal 20 het meest ongunstig. Voor planperiode tot 2100 en een breedte van de buitenberm van 10 m, is daar de vereiste kruinhoogte 10,3 m, bij een overslagdebiet van 10 l/s/m. Als uitgegaan wordt van een kortere planperiode, namelijk tot 2050, dan kan worden volstaan met een breedte voor de buitenberm van 5 à 6 m.

Ook is gekeken naar de gevoeligheid van een verandering van normfrequentie op de uitkomsten. Een overschrijdingsfrequentie van 1/1.430 geeft een smallere buitenberm; namelijk van 5 tot 7 m in plaats van 10 m. Bij een overschrijdingsfrequentie van 1/50.000 dient de dijk 1 m hoger te worden; hoogte van de dijk 11,1 m voor dijksectie 3.

Het moeilijke punt in de beschouwing van de risico's is dat voorsnog eisen ontbreken voor het toetsen op macrostabiliteit. Dit wordt veroorzaakt door de grote onzekerheid over de mate waarin infiltratie optreedt, zowel via de grondlagen onder de dijk, als via de taluds en de bermen. Volstaan is met een kwalitatieve beoordeling met behulp van een gevoeligheidsanalyse.

Over de grondopbouw en de grondeigenschappen van de dijk is te weinig bekend om in deze fase al tijdsafhankelijke berekeningen uit te voeren naar de grondwaterstroming. Bij de berekening naar het faalmechanisme met het grootste risico, macrostabiliteit, zijn daarom nogal grove aannamen gedaan. Het blijkt dat, indien de freatische lijn veel hoger wordt dan het lineaire verloop tussen de waterstand in de Waddenzee en de waterstand in het IJsselmeer, het mechanisme microstabiliteit het inleidende mechanisme is. Infiltratie vormt dus een groot risico. Het risico van infiltratie kan worden verminderd door het binnentalud verder te verflauwen.

Bij een overslagdebiet van 10 l/s/m is de dijk wel met aanvullende maatregelen erosiebestendig te maken, bijvoorbeeld door het toepassen van een versterkte grasmat of van een open steenbekleding.

1 Inleiding

1.1 Algemeen

RWS Waterdienst heeft Deltares opdracht gegeven (5 januari 2010, kenmerk RWS/WD-2010/11) om vijf onderzoeksvragen te beantwoorden. De onderzoeksvragen zijn verbonden aan het project Verkenning Toekomst Afsluitdijk (zaaknummer 31034472/4500156948) en naar voren gekomen in de eindrapportage Dijk en Meer (Rijkswaterstaat et al., 2009). De werkzaamheden vallen onder de voorwaarden van de raamovereenkomst (WD-4924) betreffende "Specialistische Adviezen van de Stichting Deltares ten behoeve van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat".

Aanleiding

De Afsluitdijk voldoet niet meer aan de eisen van deze tijd en is afgekeurd. Leeftijd, slijtage, verhoogde veiligheidsnormen en de gevolgen van de verwachte klimaatverandering maken herstel en opwaardering noodzakelijk. In een verkenning is onderzocht of naast versterking van de dijk, en dus verbetering van de waterveiligheid, ook meerwaarde kan ontstaan voor andere ambities. De conclusie van de verkenning is dat er meerwaarde kan worden gehaald. Voorwaarde is wel dat de uitvoering 'haalbaar' en 'betaalbaar' moet zijn.

In de verkenning is toegewerkt naar vier uitgewerkte visies. Door Rijkswaterstaat zijn vervolgens twee overheidsreferenties opgesteld en toegevoegd aan de vier visies. Als onderdeel van de beoordeling is een Kentallen Kosten Baten Analyse (KKBA) uitgevoerd van de vier visies en de twee overheidreferenties. In het boekje Dijk en Meer Eindrapportage verkenning Toekomst Afsluitdijk (Rijkswaterstaat et al., 2009) zijn de bevindingen kort en bondig gerapporteerd.

Tijdens de eerste beoordeling van de vier visies en twee overheidsreferenties zijn verschillende onderzoeksvragen geformuleerd. Aan Deltares is gevraagd werkzaamheden te verrichten die leiden tot antwoorden op een vijftal onderzoeksvragen. De onderzoeksvragen zijn relevant in relatie tot het vervolgtraject van MKBA en plan-MER. De vragen zijn opgesteld door RWS. Kort samengevat luiden ze:

1. Onderzoek naar de locatie van een eventuele 'Blue Energy' centrale.
2. Onderzoek naar de geotechnische haalbaarheid van een zogenaamd valmeer.
3. Uitvoeren van een review van een voorgesteld getijdenbekken.
4. Onderzoek naar schaalgrootte van verbeteringen die op ecologie gericht zijn.
5. Gevoeligheidsanalyse van dijkprofiel van overheidsreferentie.

Doel

Doel is het beantwoorden van vijf onderzoeksvragen op basis van beschikbare (expert)kennis. Het rapport Dijk en Meer (Rijkswaterstaat et al., 2009), inclusief de rapporten die op de bijbehorende CD staan, is beschouwd als basisinformatie voor de onderzoeksvragen.

Leeswijzer

De resultaten zijn gepresenteerd in dit rapport. Dit rapport bestaat uit een samenvatting van de vier visies en de twee overheidsreferenties (Hoofdstuk 2), de aanpak van en uitgangspunten bij de onderzoeksvragen (Hoofdstuk 3), de resultaten en bevindingen (Hoofdstuk 4) en de conclusies en aanbevelingen (Hoofdstuk 5). In de bijlage wordt

aanvullende informatie gegeven over de beantwoording van de onderzoeksvragen (Bijlage 1 tot en met Bijlage 5).

1.2 Vijf Onderzoeksvragen

Onderzoeksvraag: locatie Blue Energy Centrale

1. Wat is de meest optimale locatie voor een Blue Energy centrale rond de Afsluitdijk.

- a Breng optimale locaties in beeld vanuit het oogpunt van:
 - Hydraulische aspecten (waterdieptes, stromingen, recirculatie, etc.),
 - Dichtheidsverschillen (zoet-zout)
 - Effecten op morfologie, ecologie, dwz minimale verstoring flora en fauna

Voer het locatieonderzoek uit voor:

- i. De huidige configuratie van de Afsluitdijk en bodemliggingen in de Waddenzee.
- ii. De configuraties uit de 4 visies
- iii. Diverse veronderstelde formaten voor een centrale (pilot, 0,05 MW, 'klein' 20 MW en 'groot' 200 MW formaat).
- b Hoe is voor de voorgestelde locaties de interactie van een Blue Energy-centrale met het bestaande spui-beheer (Den Oever, Kornwerderzand én ESA¹). Levert een Blue Energy centrale daarbij een positieve of negatieve bijdrage op het waterkwantiteitsbeheer.
- c Hoe is de relatie tussen het effect op waterkwaliteit (brakwaterafvoer in plaats van zoet water) met die van energieopbrengst.

Onderzoeksvraag: geotechnische haalbaarheid valmeer

2. Geef een inzicht in de technische haalbaarheid van een valmeer op de door consortium 'Natuurlijk Afsluitdijk' voorziene locatie.

- d Is de locatie geschikt (ondergrond; geotechnische aspecten).
- e Is de stabiliteit van het voorgestelde dijklichaam om het valmeer gegarandeerd.
- f Is de vanuit exploitatiebaarheid van het valmeer gewenste waterdichte afsluiting van dijklichaam en bodem te realiseren. In geval van ongeschiktheid, geef aan welke aanvullende maatregelen genomen moeten worden om technische haalbaarheid wél te realiseren.

(Herkomst vraag, Advies Adviescommissie Afsluitdijk, april 2009)

Onderzoeksvraag: review van een getijdenbekken

3. Geef een review op de Visie van het consortium AD21 ten aanzien van het onderdeel 'getijdenbekken'. Is de veronderstelde hoeveelheid in- en uitstroming – en de daaraan gekoppelde energieopbrengst middels turbines – realistisch. Voer de review uit voor beide varianten: de oorspronkelijke AD21-visie en de visie waarin ESA is ingepast.

Onderzoeksvraag: schaalgrootte van ecologische verbeteringen

4. Onderzoek – gegeven de vier visies - welke schaalgrootte noodzakelijk is om een significante ecologische verbetering van de overgang Waddenzee - IJsselmeer te bereiken. (zijn voorgestelde gebieden / ontwikkelingen onnodig groot, of zijn ze zo klein dat ze geen of verwaarloosbare toegevoegde waarde hebben)

(Herkomst vraag, Advies Adviescommissie Afsluitdijk, april 2009)

Onderzoeksvraag: gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties

5. Voer een gevoeligheidsanalyse uit van de overheidsreferentie van de variant "2100-Robuust", bij variatie van de veiligheidsnorm / toegepaste randvoorwaarden:

1. ESA staat voor extra spuicapaciteit op de Afsluitdijk.

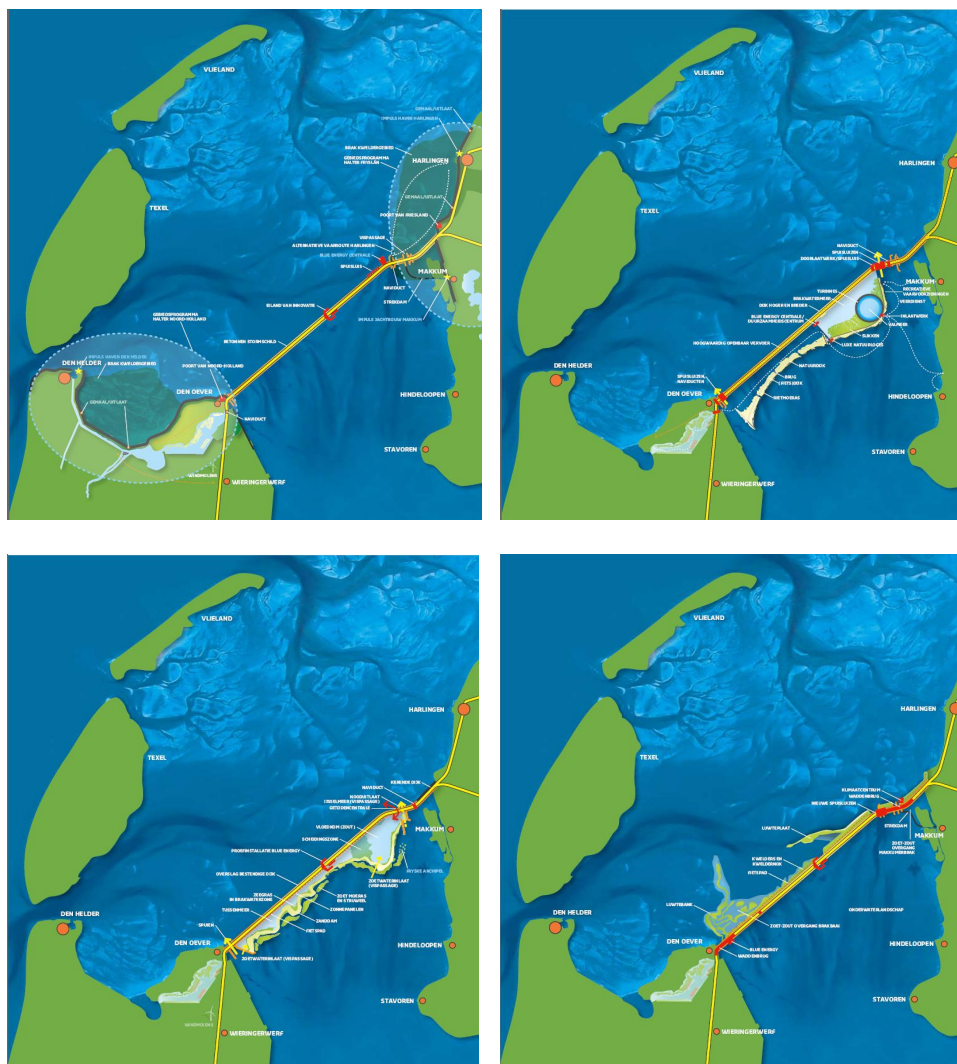
- a Onderzoek de benodigde dijkafmetingen voor zowel een hogere als lagere veiligheidsnorm dan de nu vigerende 1/10.000 (bandbreedte van 1/1.430 tot 1/50.000 zie toelichting).
- b Maak gebruik van een recente update van hydraulische randvoorwaarden (waterstands -en golfinformatie) en geef de gevoeligheid aan ten opzichte van de eerder gebruikte randvoorwaarden.
- c Geef tevens de gevoeligheid aan voor benodigde dijkafmetingen bij variatie van randvoorwaarden over de lengte van de Afsluitdijk.
- d Onderzoek de benodigde dijkafmetingen voor zowel een planperiode van 50 als 100 jaar

Toelichting bij de subvragen:

- a Bepaling van benodigd dwarsprofiel bij andere dan de nu vigerende veiligheidsnorm (1/10.000) voor de Afsluitdijk. Bepaling dwarsprofiel bij zowel een lagere norm (1/1.430; de 'oude' veiligheidsnorm van vóór de Wet op de Waterkering) als een hogere norm (1/50.000; mogelijke verzwaring van normen, zoals aangegeven in advies van de Commissie Veerman). Het toe te passen overslagcriterium is 10 l/s/m.
- b Tot dusverre is ten behoeve van dwarsprofielbepaling gebruik gemaakt van ontwerprandvoorwaarden die waren bepaald voor het Extra Spuicapaciteit Afsluitdijk (ESA); d.w.z. op 1 locatie, namelijk de 'knik'. In de verkenning Toekomst Afsluitdijk is deze als representatief verondersteld voor de gehele Afsluitdijk. Recent is een update van basisgegevens – waterstanden, golven - voor de westelijke Waddenzee beschikbaar gekomen (Waterdienst, november 2009; opmerking: deze zijn niet formeel vastgesteld). Een volgende update en formele vaststelling wordt verwacht in 2011). Ten behoeve van dit gevoeligheidsonderzoek dienen ontwerprandvoorwaarden voor 5 locaties langs de Afsluitdijk- die door de opdrachtgever worden opgesteld – te worden geverifieerd.(locaties overeenkomstig het Hydraulisch Randvoorwaardenboek).
- c Bepaal het benodigde dwarsprofiel voor 5 representatieve locaties, gelijkmatig verdeeld over de lengte van de Afsluitdijk op basis van de hierboven genoemde ontwerprandvoorwaarden.
- d Bepaal het benodigde dwarsprofiel voor de twee planperiodes voor alleen de zwaarst aangevallen locatie; bij een normfrequentie van 1/10.000 en een overslagdebiet van 10 l/s/m.

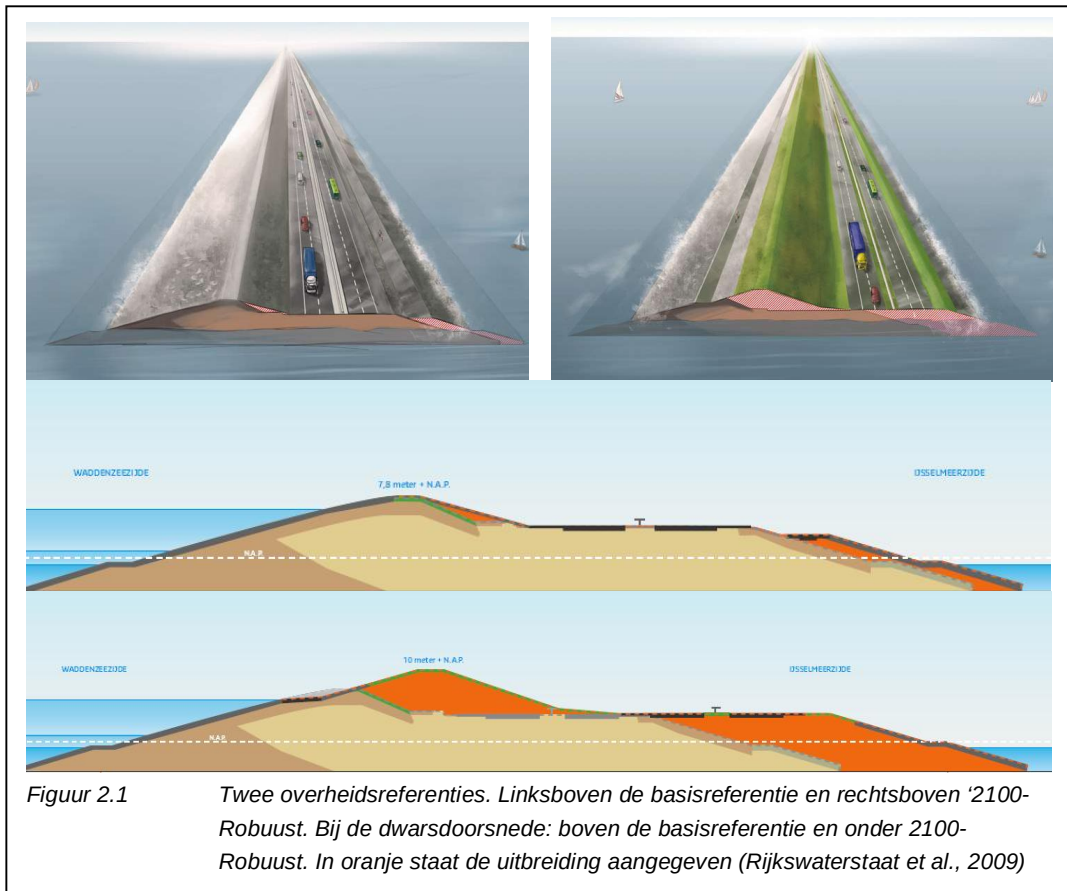
2 Vier visies van consortia en twee overheidsreferenties

Vier visies zijn opgesteld over de wijze waarop de Afsluitdijk in de toekomst ontwikkeld kan worden (Figuur 2.1). Iedere visie is opgesteld door een consortium bestaande uit private partijen. Aanvullend op de plannen van de consortia, heeft de overheid twee referenties ontworpen voor herstel en opwaardering van de Afsluitdijk (Figuur 2.2). Beide overheidsreferenties voorzien in het versterken van de dijk en het vergroten van de spuicapaciteit om te voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. In (Rijkswaterstaat et al., 2009) zijn de vier visies en twee overheidsreferenties beoordeeld en gerapporteerd. Onderstaande tekst is ontleend aan (Rijkswaterstaat et al., 2009).



Figuur 2.1

De vier visies van links naar rechts en boven naar beneden: Monument in Balans, Natuurlijk Afsluitdijk, WATERmachine en WaddenWerken. (Rijkswaterstaat et al., 2009)



De volgende paragrafen geven een korte uiteenzetting van de zes visies. De tekst is ontleend aan (Rijkswaterstaat et al., 2009). In iedere visie wordt ingegaan op de elementen 'verbeteren van de veiligheid' en 'meerwaarde voor ambities'. Bij het element 'meerwaarde voor ambities' wordt onderscheid gemaakt in 'natuur en recreatie', 'duurzame energie', 'mobiliteit' en 'icoonfunctie en landmark'. De aspecten in de beschrijving waar in de onderzoeksvragen op wordt ingegaan staan **vetgedrukt**. Tevens is apart nog ingegaan op de aspecten die van belang zijn voor de beantwoording van de vraag over ecologische schaalgrootte.

2.1 Monument in Balans: betonnen stormschild en ontwikkeling van koppen

Deelnemers aan het consortium zijn Oranjewoud, GD Architecten, Noordpeil landschap en stedenbouw, en CE Delft.

Verbeteren van de veiligheid

- Een 'stormschild', een boogvormige betonnen wand langs de hele lengte van de dijk, als beveiliging tegen de stijgende Waddenzee;
- Nieuwe, veiligere, spuisluis in de 'knik' ten westen van Kornwerderzand voor extra spuicapaciteit;
- Spuisluizen Den Oever en Kornwerderzand versterkt;
- Schutsluizen Den Oever en Kornwerderzand versterkt.

Meerwaarde voor ambities

- Natuur en recreatie:
 - Versterkte identiteit eilandlandschap van Wieringen.
 - Watersportcentra en buitendijkse recreatievoorzieningen aan de Friese kust.

- **estuariën landschap tussen Makkum en Harlingen;**
- **brakwaterzone tussen Kornwerderzand en Makkum;**
- **spuisluizen Den Oever en Kornwerderzand ingezet voor het creëren van brakke zones;**
- **schutsluis Kornwerderzand ingezet als vispassage met brakke zone;**
- fietspad op de kruin van de dijk achter het stormschild;
- opname Afsluitdijk in Unesco Dijkenroute.
- Duurzame energie:
 - eiland van innovatie bij Breezanddijk voor proefopstellingen;
 - zonnepanelen langs de zuidzijde van de dijk;
 - **blue energy centrale bij Kornwerderzand;**
 - windmolenpark in de Wieringermeer;
 - enkele windmolens bij de provinciepoorten.
- Mobiliteit:
 - ontwikkeling havens Den Helder en Harlingen;
 - naviduct bij Kornwerderzand met veel ruimere dimensies voor de scheepvaart;
 - bestaande schutsluis Den Oever gereserveerd voor recreatievaart buiten de spitsuren van het wegverkeer;
 - optie voor een toekomstige dijkverbreding aan de IJsselmeerzijde, met ruimte voor hoogwaardig openbaar vervoer en recreatie ('plint van de 21^e eeuw');
 - naviduct op vasteland voor ontsluiting toekomstig Wieringerrandmeer;
- Icoonfunctie en landmark:
 - voortbouwen op strakke, sobere lijnen;
 - zicht op IJsselmeer én Waddenzee;
 - demonstratieproject waterbouwkunde;
 - eigen identiteit entrees van Noord-Holland en Friesland;
 - duurzaamheidscentrum op het eiland van innovatie.

2.2 Natuurlijk Afsluitdijk: zeewering en natuurdijk

Deelnemers aan het consortium zijn Royal Haskoning, Lievense, Van Oord, Rabobank, BAM, Eneco en Wubbo Ockels BV.

Verbeteren van de veiligheid

- Bestaande dijk wordt verhoogd, verbreed en geschikt voor beperkte golfoverslag;
- Nieuwe, veiligere, spuisluis in de 'knik' ten westen van Kornwerderzand met grotere spuicapaciteit;
- Spuisluis Kornwerderzand buiten gebruik, spuisluis Den Oever versterkt;
- Schutsluizen Den Oever en Kornwerderzand vervangen door naviducten;
- Pompen van valmeer en blue energy centrale leveren aanvullende capaciteit voor waterafvoer via doorlaatwerk.

Meerwaarde voor ambities

- Natuur en recreatie:
 - tweede 'natuurdijk' in IJsselmeer parallel aan bestaande dijk (eerst oostelijk deel, na 2025 ook westelijk deel);
 - **ondieptes en moerasgebieden tussen natuurdijk en bestaande dijk;**
 - **brak watermeer tussen oostelijk deel natuurdijk en bestaande dijk;**
 - **lozen van brak water in plaats van zoet water op Waddenzee;**
 - fiets- en wandelpaden op natuurdijk en aan de Waddenzee;
 - ruimte en voorzieningen voor recreatie bij natuurdijk;
 - natuur corridor Noord-Holland – Friesland;

- Duurzame energie:
 - **blue energy centrale;**
 - **valmeer voor tijdelijke energieopslag en inzetbaar als extra waterberging;**
 - vliegers en / of windmolens langs de dijk;
 - zonnepanelen langs de zuidzijde van de dijk;
- Mobiliteit:
 - autosnelweg verplaatst en volgens huidige ontwerpeisen ingericht, onder meer met bredere rijstroken;
 - naviduct bij Kornwerderzand met ruimere dimensies voor de scheepvaart;
 - naviduct bij Den Oever voor gecombineerde ontsluiting van Waddenzee en Wieringerrandmeer;
 - ruimte voor superbuis of ander hoogwaardig openbaar vervoer aan IJsselmeerzijde op verbrede dijk;
 - nieuwe, luwe vaarroute tussen westelijk deel van de natuurdijk en bestaande dijk;
- Icoonfunctie en landmark:
 - **demonstratieproject bouwen met de natuur;**
 - **combinatie duurzaam waterbeheer en duurzame energie met valmeer;**
 - duurzame energieopslag en bezoekerscentrum bij valmeer;
 - nieuwe vorm hoogwaardig openbaar vervoer (superbuis).

2.3 WaddenWerken: kwelders in de Waddenzee

Deelnemers aan het consortium zijn DHV, Imares en het bureau Alle Hesper.

Verbeteren van de veiligheid

- **Aanleg en natuurlijke aanwas van kweldergebied voor de dijk aan Waddenzeezijde;**
- **Luwtebanken bij Den Oever en Kornwerderzand;**
- Nieuwe, veiligere, spuisluis in de knik ten westen van Kornwerderzand voor extra spuicapaciteit;
- Spuisluizen Den Oever en Kornwerderzand versterkt;
- Schutsluizen Den Oever en Kornwerderzand versterkt.

Meerwaarde voor ambities

- Natuur en recreatie:
 - **natuurgebied (kwelders) in de Waddenzee;**
 - **dynamisch onderwater landschap in het IJsselmeer als resultaat van zandwinning voor de kwelderwerken;**
 - minder zoetwater schokken in de Waddenzee door luwtebanken in combinatie met spuistrategie;
 - zoet-zout overgangen met getijdeninvloed bij Den Oever en met stabiele brakke situatie bij Friese kust;
 - vispassages bij alle spuisluizen;
 - fiets- en wandelpaden in kweldergebied.
- Duurzame energie:
 - (pilots voor) **blue energy centrale bij Den Oever;**
 - **pilots getijdenenergie**, windenergie en energie uit algenbiomassa;
- Mobiliteit:
 - hoge waddenbruggen over sluizencomplexen Den Oever en Kornwerderzand.
- Icoonfunctie en landmark:
 - **demonstratieproject bouwen met de natuur;**

- klimaatcentrum, congrescentrum en projectexpositie;
- Waddenbruggen met vergezicht en poortmarkeringen;
- handhaven van de Afsluitdijk in de huidige vorm.

2.4 WATERmachine: overslagdijk en binnenmeer

Deelnemers aan het consortium zijn Arcadis, Dredging International, Nuon en H+N+S Landschapsarchitecten en Alkyon.

Verbeteren van de veiligheid

- bestaande dijk beperkt verhoogd en tot 2065 geschikt voor zeer grote hoeveelheid golfoverslag;
- zanddam in IJsselmeer parallel aan bestaande dijk met binnenmeer voor opvang overslaand zout water;
- spuisluis Kornwerderzand versterkt en uitgebreid met pompen voor extra afvoercapaciteit, spuisluis Den Oever versterkt;
- schutsluis Den Oever versterkt, schutsluis Kornwerderzand vervangen door naviduct.

Meerwaarde voor ambities

- Natuur en recreatie:
 - ***natuurgebied tussen bestaande dijk en zanddam;***
 - ***tussenmeer met droogvallende platen tussen bestaande dijk en zanddam;***
 - eilandenarchipel met fiets- en wandelpaden in het IJsselmeer ten zuiden van de zanddam ('Fryske Archipel');
 - ***getijdenwerking in tussenmeer bij Kornwerderzand;***
 - ***vispassages en zoetwater inlaten in de zanddam;***
 - woningen en strandhuisjes aan de Friese kust;
 - zilte teelt in tussenmeer met droogvallende platen;
 - ***lozen van brak in plaats van zoet water bij Kornwerderzand;***
 - ***zoet-zout overgangen;***
 - diepe putten in het IJsselmeer.
- Duurzame energie:
 - ***blue energy centrale;***
 - watermachine (getijdenenergie) levert tot 2050 ook bij incidenteel pompen op jaarbasis netto energie op;
 - zonnepanelen langs de Afsluitdijk;
 - concentratiegebied windenergie Wieringermeer.
- Mobiliteit:
 - naviduct bij Kornwerderzand met ruimere dimensies voor de scheepvaart;
 - nieuwe, beschutte vaarroute voor kleine boten tussen Noord-Holland en Friesland;
- Icoonfunctie en landmark:
 - ***demonstratieproject bouwen met de natuur;***
 - demonstratieproject getijdenenergie in combinatie met pompen;
 - nieuw woon- en recreatiegebied aan de Friese kust;
 - duurzaamheidscentrum.

2.5 Basisreferentie

In de basisreferentie worden de benodigde veiligheidsverbeteringen van zeewering en waterbeheer uitgevoerd tegen zo laag mogelijke kosten.

Verbeteren veiligheid

- de volledige dijk overslagbestendig maken met steenachtig materiaal (verwachte doeltreffendheid tot 2050);
- de hoogte van de dijk blijft onveranderd, bij extreme stormen zal er zeer veel water over de dijk slaan;
- het binnentalud van de dijk is verflauwd zodat de stabiliteit weer aan de eisen voldoet. Het huidige fietspad in verband daarmee verplaatst.
- spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand versterkt (verwachte levensduur tot 2050);
- extra spuisluis, in de knik ten westen Kornwerderzand voor een gezamenlijke spuicapaciteit van 10.000 m³ per seconde;
- schutsluizen bij Kornwerderzand versterkt (verwachte levensduur tot 2050). Bestaande schutsluis bij Den Oever extra beveiligd met een waterkering (keersluis) voor het buitenhoofd van de schutsluis;
- Na 2050 nieuwe sluizencomplexen en verbeterde overslagbestendigheid van de dijk.

Meerwaarde voor ambities

- Geen. Verplaatsen van het fietspad betekent verminderde toegankelijkheid voor beheer en onderhoud van de dijk aan de Waddenzijde.

2.6 2100-Robuust

De benodigde veiligheidsverbeteringen van zeewering en waterbeheer worden in de overheidsreferentie '2100-Robuust' zo robuust mogelijk uitgevoerd.

Verbeteren van de veiligheid

- ***de dijk wordt verhoogd tot een kruinhoogte van ongeveer 10 meter + NAP;***
- ***de dijk wordt verbreed met ongeveer 25 meter aan de IJsselmeerzijde en een extra berm met een onderhoudspad en fietspad van tenminste vijf meter aan Waddenzeezijde;***
- ***de dijk wordt geschikt gemaakt voor beperkte golfoverslag van tien tot dertig liter per seconde per strekkende meter;***
- de aanleg van nieuwe, veiligere spuisluizen, in de knik ten westen van Kornwerderzand en ten oosten van de huidige spuisluis in Den Oever, met een gezamenlijke spuicapaciteit van 10.000 m³ per seconde. Oude spuisluis Den Oever wordt opgeheven. Oude spuisluis Kornwerderzand wordt eventueel gehandhaafd en (in dat geval versterkt) ingezet als vispassage;
- Bestaande schutsluizen bij Kornwerderzand en Den Oever worden extra beveiligd met een waterkering (keersluis) bij de voorhavens aan de Waddenzeezijde van de draaibruggen. De sluizen zelf worden vervangen door nieuwe.

Meerwaarde voor ambities

- Natuur en recreatie:
 - fietspad met zicht op de Waddenzeezijde.
- Mobiliteit:
 - autosnelweg A7 wordt verschoven en volgens huidige ontwerpeisen ingericht, onder meer met bredere rijstroken.

3 Aanpak onderzoeksvragen

Centraal bij het beantwoorden van de vijf onderzoeksvragen heeft gestaan het verzamelen van beschikbare kennis over het betreffende onderwerp. De vorm waarin het gebeurde verschilde van onderzoeksvraag tot onderzoeksvraag. Informatie is ontsloten en kennis is via expert sessies beschikbaar gemaakt. In onderstaande paragrafen staat een overzicht van de gehanteerde aanpak voor de vijf onderzoeksvragen.

3.1 Locatie Blue Energy Centrale

In alle vier de visies is sprake van een Blue Energy Centrale (BEC) om uit de menging van zoet- en zoutwater energie op te wekken. Bij het beantwoorden van de vragen over de locatie van een BEC is vooral gebruik gemaakt van huidige beschikbare kennis en inzichten. In een tweetal expertsessies is een eerste inzicht gegenereerd betreffende de voor- en nadelen van de verschillende configuraties voor een BEC. De werkzaamheden vallen in een zestal onderdelen uiteen.

Gevolgte aanpak

De evaluatie van de mogelijke locaties voor de BEC is gedaan op basis van beschikbare informatie en expert kennis. Er zijn geen gedetailleerde studies uitgevoerd. De studie is in de volgende stappen uitgevoerd:

Als eerste is er gekeken naar de huidige situatie rond de Afsluitdijk. Er is daarbij geconcentreerd op hydrodynamische, morfologische en ecologische processen in de omgeving, en op relevante functionele aspecten van de Afsluitdijk, zoals het spuien van overtollig zoet water. Deze analyse bestond uit een interpretatie van bestaande data en rapporten, en gesprekken met Deltares specialisten. De verzamelde informatie is gebruikt als input in de expert sessies in de laatste stap van de gevolgde aanpak. Ofschoon er zeer veel hoogwaardige informatie beschikbaar is in Nederland bij verschillende instituten en overheden, is deze informatie slechts in beperkte mate ontsloten. Bijgevolg is de analyse in dit rapport vooral kwalitatief.

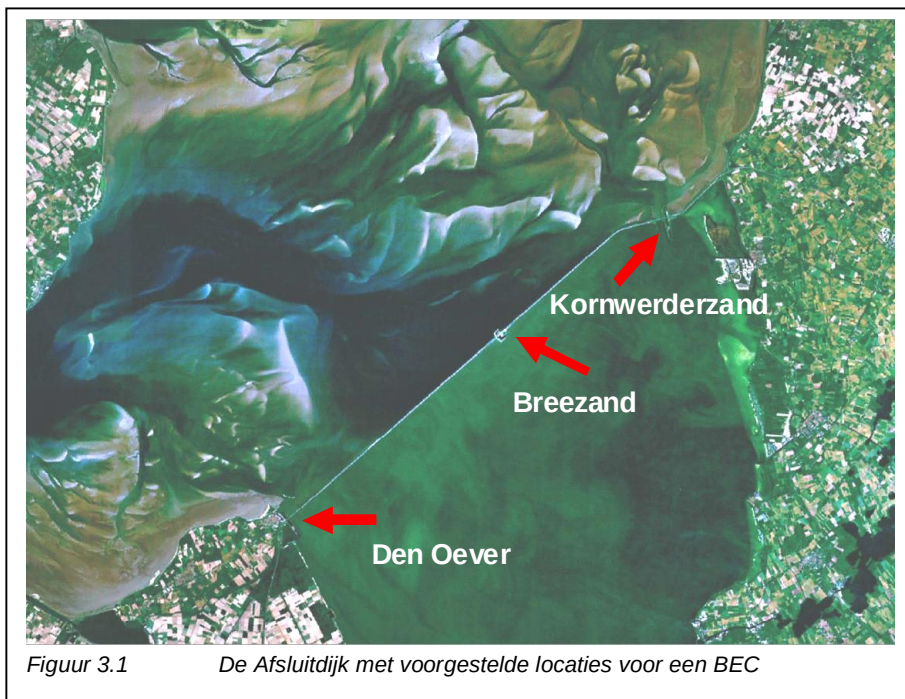
Daarna is gekeken welke functionele en geometrische veranderingen gepland en voorzien zijn in de vier visies, zoals installeren van een extra spui en het aanpassen van het spuibeleid. Vervolgens zijn er aspecten benoemd die van belang zouden kunnen zijn bij de optimalisatie van de locatie voor de BEC. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen aspecten vanuit efficiëntie en aspecten vanuit impact naar de omgeving van een BEC. Vervolgens is een beoordeling uitgevoerd in de vorm van een expert sessie. Dat is gedaan voor een BEC binnen de huidige situatie van het watersysteem IJsselmeer en Waddenzee, en voor de vier visies waar een BEC is opgenomen in de plannen.

Uitgangspunt

Per visie zijn maximaal drie mogelijke locaties van (verschillende typen van) BEC geëvalueerd, namelijk nabij Den Oever, bij Breezanddijk, en nabij Kornwerderzand (Figuur 3.1).

Bij het optimaliseren van de locatie voor een BEC zijn de volgende aspecten buiten beschouwing gelaten:

- kostenaspecten gerelateerd aan constructie en operatie
- cultureel maatschappelijke aspecten
- inpassing in de bestaande / geplande infrastructuur
- landschappelijke aspecten
- energie opbrengst



Figuur 3.1

De Afsluitdijk met voorgestelde locaties voor een BEC

3.2 Geotechnische haalbaarheid Valmeer

De visie van het consortium Natuurlijk Afsluitdijk heeft als belangrijk onderdeel energieopslag door middel van de aanleg van een zogenaamd valmeer. In de Marktverkenning fase 2 van december 2008 is globaal aangegeven hoe het valmeer er uit komt te zien. De onderzoeksvraag betreft de (geo)technische haalbaarheid van een dergelijk valmeer.

De werkzaamheden ter beoordeling van de technische haalbaarheid van een valmeer zijn opgepakt middels een quick-scan. Alle relevante gegevens zijn ontleend aan het rapport Dijk en Meer, inclusief de daarbij behorende CD met rapporten. Vervolgens is een overzicht opgesteld van de ontwerpaspecten die het consortium AD21 aangeeft. In een expertsessie is aangegeven welke aspecten belangrijk zijn, welke informatie beschikbaar is en welke informatie nog ontbreekt. Op een kwalitatieve wijze zijn vervolgens risico's geïnventariseerd die gemoeid zijn met het plan dat door het consortium is aangegeven. De quick-scan bestaat uit twee onderdelen.

Het eerste onderdeel heeft bestaan uit het verzamelen van gegevens. Gegevens zijn ontleend aan bestaand grondonderzoek, de geologische geschiedenis van het gebied en de wijze waarop voorzien is om het valmeer aan te gaan leggen.

Het tweede onderdeel heeft bestaan uit een expertsessie. In de expertsessie is stilgestaan bij de informatie die nodig is om te kunnen komen tot uitspraken, de vaststelling welke informatie beschikbaar is en welke informatie nog ontbreekt. Tevens zijn de verschillende risico's van de aanleg van een valmeer op de aangegeven locatie geïdentificeerd.

3.3 Review van een getijdenbekken

Het consortium AD21 heeft de visie WATERmachine voor de toekomst Afsluitdijk uitgewerkt. In deze visie is onder meer een getijdenbekken opgenomen om energie uit het getij op te wekken (RWS, 2009). De energiecentrale wekt energie op door gebruik te maken van de natuurlijke getijslag in de Waddenzee. Het plan behelst in het kort de installatie van turbines / pompen in de huidige spuisluisen bij Kornwerderzand. Door de aanleg van een zanddijk ten zuiden van de Afsluitdijk wordt een getijdenbekken gecreëerd. Het bekken wordt elke getijcyclus gevuld en geleegd door de centrale. In tijden van een grote afvoer van water vanuit het IJsselmeer kunnen turbines ingezet worden als pomp, om zo extra uitslagcapaciteit te realiseren.

Deltares is door Rijkswaterstaat gevraagd een review te geven op de visie WATERmachine van het consortium AD21 ten aanzien van het getijdenbekken. De vraag hierbij is of de veronderstelde hoeveelheid water dat in- en uitstroomt, en de daaraan gekoppelde energieopbrengst middels turbines, realistisch is. Deze vraag dient te worden beantwoord voor huidige situatie betreffende spuien en voor de situatie waarin ESA (extra spuicapaciteit Afsluitdijk) is ingepast.

De volgende concrete aspecten zijn in de review beschouwd:

- Zijn de juiste uitgangspunten en randvoorwaarden gehanteerd?
- Zijn de juiste parameters gekozen en kloppen de gehanteerde kentallen?
- Levert het getijdenbekken inderdaad de aangegeven hoeveelheid energie volgens de AD21-visie op?

Beschouwing van deze aspecten dient een beeld op te leveren of een energiecentrale een (technisch) realistische optie is. De grootste risico's en onzekerheden zijn in kaart gebracht. De economische haalbaarheid is buiten beschouwing gelaten.

Als aanvulling op het rapport Meer en Dijk (Rijkswaterstaat et al., 2009) is de notitie (Arcadis et al., 2010) beschikbaar gekomen. In de notitie is antwoord gegeven op aanvullende onderzoeksvragen. Ook is de variant ESA (Extra Spuicapaciteit Afsluitdijk) in de notitie behandeld. Verder zijn enkele technische achtergronddocumenten aangeleverd, die als bijlagen bij bovenstaande rapporten horen. Een uitgebreide beschrijving van de aanpak en uitgangspunten van de onderzoeksvraag over de getijdecentrale is opgenomen in Bijlage 3.

3.4 Schaalgrootte van ecologische verbeteringen

In alle vier de visies is sprake van versterking van de natuur. De vraag is welke schaalgrootte nodig is om een significante verbetering van de ecologie te krijgen ter plaatse van de Afsluitdijk. Bij het zoeken naar het antwoord is gebruik gemaakt van beschikbare literatuur, parate kennis en inzicht, en aanwezige expertise. Met deze informatie is een set criteria opgesteld waarmee de vier visies vervolgens zijn geëvalueerd. Bij de evaluatie is primair gekeken naar de schaalgrootte voor het versterken van de ecologische kwaliteit op de overgang Waddenzee - IJsselmeer. De schaalgrootte is vergeleken met de bestaande ecologische kwaliteit.

De analyse van beschikbare literatuur omvat ook de verschillende studies die in de afgelopen decennia zijn uitgevoerd naar het verbeteren van de ecologische kwaliteit van zoet-zout overgangen; ondermeer voor de locaties Waddenzee - IJsselmeer en de Zeeuwse delta. De set van criteria is vervolgens in een expert sessie besproken ten einde een definitieve set vast te stellen.

Met de vastgestelde criteria zijn de vier visies beoordeeld. De volgende vragen zijn aan bod gekomen:

- a) Hebben de voorgestelde arealen en ontwikkelingen de juiste maat voor het realiseren van een significante ecologische verbetering?
- b) Zijn de voorgestelde arealen en ontwikkelingen niet onnodig groot?
- c) Zijn de voorgestelde arealen en ontwikkelingen niet te klein zodat ze geen of een verwaarloosbare toegevoegde waarde zullen hebben?

3.5 Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd op referentievariant "2100-Robuust". Onderzocht is de gevoeligheid bij variatie van de veiligheidsnorm en van de toegepaste randvoorwaarden. De volgende vier onderdelen zijn opgepakt.

Het eerste onderdeel betreft het vaststellen van profielen die zullen worden gehanteerd. Resultaten van berekeningen PC-Overslag worden gebruikt om de profielen vast te stellen. Een selectie van de profielen wordt op A3-formaat getekend.

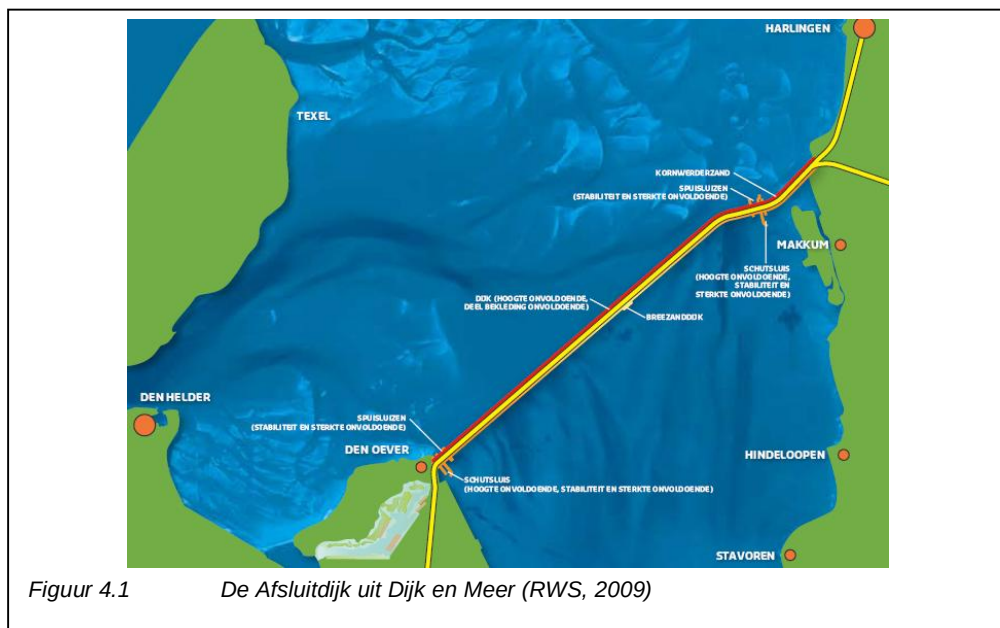
Binnen het tweede onderdeel is gekeken naar de uitgangspunten en de aangeleverde randvoorwaarden, per HR-sectie voor de diverse normfrequenties, die zijn gehanteerd in de overheidsreferentie. De bevindingen worden in een memo samengevat.

Het derde onderdeel is het uitvoeren van een risicoscan. Als basis wordt gebruik gemaakt van de grondopbouw uit het rapport "Geotechnische risico-evaluatie....Afsluitdijk" (Deltares, 2008). De bevindingen worden in de deelrapportage opgenomen. De risicoscan bestaat uit een expertsessie met deskundigen.

Vervolgens zijn in het vierde onderdeel berekeningen uitgevoerd. De berekeningen gebeuren aan kritieke profielen, waarbij diverse normfrequenties worden gehanteerd, evenals dijksecties en planperiode. Het resultaat wordt opgenomen in een overzichtstabel voorzien van een risico inschatting.

4 Resultaten en bevindingen

De huidige Afsluitdijk (Figuur 4.1) heeft primair een veiligheidsfunctie, en dient daarnaast als transportverbinding tussen Noord Holland en Friesland. Het IJsselmeer wordt gezien als een strategisch zoetwaterbekken.



De veiligheidsfunctie heeft betrekking op het bieden van bescherming tegen extreem hoge waterstanden en golven die tijdens een noordwester storm kunnen optreden in de Waddenzee. Bij Den Oever en Kornwerderzand staan spuisluizen om overtollig water af te kunnen voeren naar zee. De spuisluizen lozen samen gemiddeld ongeveer 450 m³/s zoet water per dag op de Waddenzee. Het spuien gebeurt tijdens eb, onder vrij verval. De waterstand aan de kant van de Waddenzee dient dan lager te zijn dan de waterstand aan de kant van het IJsselmeer.

De variaties in spui debieten zijn vrij groot. In een droge periode wordt namelijk niet of nauwelijks gespuid, terwijl in een natte periode juist veel water wordt gespuid. Bij het regelen van de spuisluizen wordt in de winterperiode als streefpeil op het IJsselmeer - 0.4 m NAP aangehouden, en in de zomerperiode als streefpeil - 0.2 m NAP.

4.1 Locatie Blue Energy Centrale (BEC)

Bij de bespreking van de vier visies in relatie met een BEC wordt eerst een beschrijving gegeven van de relevante geometrische en functionele veranderingen in de betreffende visie ten opzichte van de huidige Afsluitdijk. Daarna wordt achtereenvolgens op basis van de benoemde efficiëntie en impact aspecten een evaluatie opgesteld van de verschillende mogelijke locaties van een BEC.

4.1.1 Inpassing BEC in huidige situatie

Een BEC heeft interactie met de omgeving, met name door het onttrekken en het lozen van water. De BE technieken die kunnen worden toegepast in een centrale zijn hierin van belang.

Op basis van de eigenschappen van BE technieken zijn een aantal relevante aspecten geïdentificeerd om de meest geschikte locaties voor de BEC te bepalen. De aspecten zijn verdeeld over twee categorieën: efficiëntie en impact.

Onder efficiëntie vallen aspecten die een directe relatie hebben met de bedrijfsvoering om de BEC een bepaald vermogen te laten realiseren. Onder impact aspecten vallen mogelijke effecten op de omgeving die ondervonden worden door een operationele BEC op een bepaalde plaats op de Afsluitdijk².

Blue Energy technieken

Een BEC produceert energie door het mengen van zoet en zout water. Een BEC op de Afsluitdijk onttrekt zoetwater uit het IJsselmeer en zoutwater uit de Waddenzee. In een BEC komt brak water vrij dat geloosd wordt op de Waddenzee, eventueel via een “tussenmeer”. Het gevolg is dat brak water gespuid wordt op de Waddenzee; grotendeels in plaats van het overtollige zoete water dat onder de huidige condities wordt gespuid.

Het maximale vermogen van een BEC per ingenomen kubieke meter aan zoet en zout water hangt direct af van het verschil in zoutgehalte tussen het zoute en zoete water. Bij een verschil in zoutgehalte van 33 ppt³ (33 ppt in het zoute water, 0 ppt in het zoete water) kan theoretisch 0,74 kWh aan energie worden opgewekt door het mengen van 1 m³ zoetwater met een oneindige hoeveelheid zoutwater (Ecofys, 2007). In de praktijk zal de te winnen hoeveelheid energie echter aanmerkelijk lager zijn. De maximaal te winnen hoeveelheid energie (en het daaraan gekoppelde netto vermogen) hangt vooral af van de gebruikte BE techniek, het aanbod aan zoet en zout water (zoutgehaltes), en de benodigde voorzuivering in verband met bijvoorbeeld slib en algen in het water.

Twee BE technieken worden op dit moment genoemd in studies en literatuur: Pressure Retarded Osmosis (PRO) en Reversed Electro Dialysis (RED). Een uitgebreide beschrijving van deze technieken is gegeven door (Ecofys, 2007). In Bijlage 1 wordt per techniek een beschrijving gegeven en worden de belangrijke aspecten, die voor dit onderzoek van belang zijn, belicht.

Voor de haalbaarheidsanalyse van een BE centrale op de Afsluitdijk is het van groot belang precies te weten wat de specificaties voor de voorzuivering zijn, hoeveel residu er overblijft, en hoe daarmee omgegaan kan worden. Het slibgehalte in het door de BE centrale in te nemen water uit het IJsselmeer en de Waddenzee is namelijk met ongeveer 0,1 kg/m³ vrij hoog. Een dergelijk onderzoek valt echter buiten de scope van het huidige project.

In deze studie zijn drie groottes van BE centrales bekeken. In deze studie is niet geanalyseerd of het opgeschaalde vermogen (200 MW) ook te realiseren is door installatie van een serie kleinere centrales op verschillende locaties.

Aangezien de debieten voor inname en lozing voor een PRO en een RED centrale in grootteorde gelijk zijn, en over de benodigde voorzuivering nog weinig concrete gegevens

-
2. Volgens (Deltacommissie, 2008) moet in het jaar 2100 rekening worden gehouden met een peilstijging in het IJsselmeer van 1,5 m om te kunnen blijven spuien onder vrij verval en om over voldoende zoet water te beschikken in een droge periode. Deze veronderstelling is niet meegenomen bij de studie naar een BEC in de huidige situatie.
 3. 33 ppt (parts per thousand) staat ruwweg gelijk aan 33 gram zout per 1.000 gram (1 liter) water. Dit is ongeveer het gemiddelde zoutgehalte in de Noordzee. Op plaatsen nabij riviermondingen en nabij zoetwaterspuien zoals in de westelijke Waddenzee zal het zoutgehalte in het algemeen aanmerkelijk lager zijn dan 33 ppt.

beschikbaar zijn, wordt in de evaluatie van de mogelijke locaties voor de BEC in deze studie geen verder onderscheid gemaakt tussen een PRO en een RED centrale.

Efficiëntie aspecten

In een expert sessie zijn acht aspecten geïdentificeerd die direct te maken hebben met de bedrijfsvoering, de efficiëntie van een BEC. In Bijlage 1 is per aspect een nadere toelichting gegeven.

- 1 Het zoutgehalte bij het innamepunt van zoutwater (kant van de Waddenzee);
- 2 Het zoutgehalte bij het innamepunt van zoetwater (kant van het IJsselmeer);
- 3 De relatie met het spuibeheer;
- 4 Het risico van recirculatie;
- 5 De beschikbaarheid van zoetwater en het waterpeil in het IJsselmeer;
- 6 Het slibgehalte bij de inname punten van zoet en zout water;
- 7 Baggerwerkzaamheden voor regulier onderhoud aan geulen bij inname punten;
- 8 Ecologische regelgeving;
- 9 Veiligheidsaspecten.

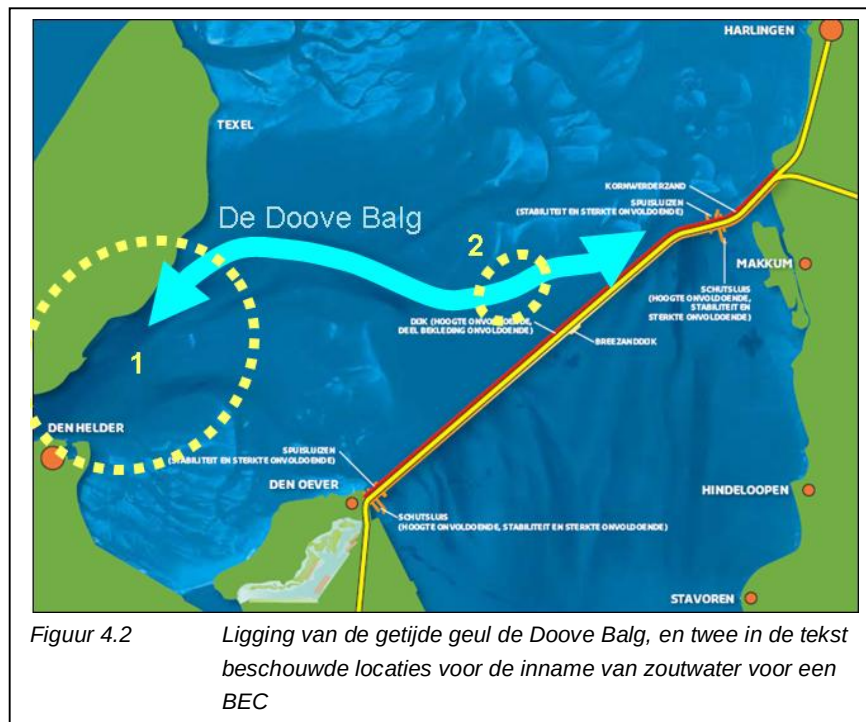
In de expert sessie is geconcludeerd dat de belangrijkste efficiëntie aspecten zijn:

- A. Het zoutgehalte bij het innamepunt van zoutwater;
- B. Het slibgehalte bij de inname punten van zoetwater en zoutwater;
- C. Het onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten.

Het belangrijkste efficiëntie aspect lijkt het zoutgehalte bij het innamepunt van zoutwater. Dit aspect is belangrijk voor alle schaalgroottes van een BEC. Het spuibeheer en mogelijke recirculatie hangen hier nauw mee samen. Ook het aspect van slibbelasting speelt voor alle schaalgroottes van een BEC. Met het opschalen naar een grotere BEC zal de logistieke problematiek van de slibafhandeling ook groter worden. Het onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten wordt belangrijker naarmate een BEC groter wordt. Dit aspect is echter ondergeschikt aan de andere aspecten.

Ad A: Het zoutgehalte bij het innamepunt van zoutwater

Het zoutgehalte in de westelijke Waddenzee varieert sterk. Vooral door het spuien van zoet water migreren grootschalige bellen zoet water naar de Waddenzee. Locaties met de hoogste gemiddelde zoutpercentages bevinden zich ver van de spuisluizen en / of nabij de bodem van de getijde geulen. De gemiddelde zoutpercentages zijn het hoogst in de buurt van de hoofdgetijde geul de Doove Balg, met name daar waar de geul aansluit op het Marsdiep. Deze locatie is in het uiterste westen van de Waddenzee (gebied 1 uit Figuur 4.2).



Vanwege het relatief hoge zoutgehalte zou een voorkeurslocatie voor een innamepunt in gebied 1 kunnen zijn. Een ruwe schatting van het gemiddelde zoutgehalte op deze locatie is 25 ppt; lokale variatie tussen ongeveer 20 ppt en 30 ppt. Een ander pluspunt van dit inname gebied is dat het risico voor recirculatie verwaarloosbaar is. Bij plaatsing van de BEC in Den Oever is wel een pijpleiding van ongeveer 10 km lengte nodig. Een pijpleiding heeft echter een negatief effect op het rendement van een centrale, en er zijn mogelijk ongewenste effecten van een pijpleiding op de omgeving. Wellicht zal het verkrijgen van een vergunning lastiger zijn bij een dergelijke lange pijpleiding. Het is belangrijk op te merken dat ter vergelijking het gemiddelde zoutgehalte in dit gebied nog aanmerkelijk lager is dan in de Noordzee (33 ppt). Bij een vergelijkbare centrale zal het vermogen bij een verschil in zoutgehalte van 25 ppt ongeveer 46% minder zijn dan bij een verschil van 33 ppt (Bijlage 1).

Op locatie 2 ligt de getijde geul de Doove Balg dichtbij de Afsluitdijk. Door stroming van het getij en de relatief grote afstand van de spuisluizen zou bij plaatsing van een BEC bij Breezanddijk relatief zout water ingenomen kunnen worden, zonder gebruik te hoeven maken van een lange pijpleiding. Een ruwe schatting geeft een gemiddeld zoutgehalte nabij de bodem van ongeveer 20 ppt tijdens perioden waarin gemiddeld gespuid wordt; met een variatie tussen 15 ppt en 25 ppt. Ook in deze optie zal een pijpleiding nodig zijn om recirculatie van het geloosde brakke water te voorkomen. Dit risico wordt groter naarmate de BEC verder wordt opgeschaald. Bij een vergelijkbare centrale zal het vermogen bij een verschil in zoutgehalte van 20 ppt ongeveer 60 à 70% minder zijn dan bij een verschil van 33 ppt (Bijlage 1).

Wat betreft het zoutgehalte bij het innamepunt voor zoutwater lijkt de meest geschikte locatie bij Den Oever (via een pijpleiding vanuit het Marsdiep) of bij Breezanddijk. Een gedetailleerdere rendement- en kostenanalyse zijn nodig om tot een voorkeur te komen.

Bovenstaande analyse geldt voor het vigerende spuibeleid. Door aanpassingen in het spuibeleid kan de verdeling van zoutgehalte in de westelijke Waddenzee worden beïnvloed. Verwacht wordt dat als er onder gemiddelde omstandigheden niet meer gespuid wordt bij Den Oever, de zoutconcentraties nabij Den Oever aanmerkelijk zullen stijgen. Daardoor wordt het mogelijk het innamepunt veel dichterbij Den Oever te leggen. Ook in deze optie zullen leidingen nodig blijven om recirculatie van het geloosde brakke water te voorkomen. De invloed op het peilbeheer en op het openhouden van de scheepvaartgeul moet nader beschouwd worden als deze werkwijze gevolgd zou worden.

Geconcludeerd kan worden dat de locaties Den Oever en Breezanddijk het meest geschikt lijken op basis van het aspect zoutgehalte onder het huidige spuibeleid. Een voorkeur dient dan te komen uit een kosten- en rendementsanalyse. Als spuien bij Den Oever wordt verminderd, lijkt plaatsing van een BEC bij Den Oever het meest geschikt. Bij een grotere BEC centrale moet dan water via een pijp ingenomen worden uit het Marsdiep om recirculatie te voorkomen. Het brakke water moet dan bij Den Oever in de spuigeul geloosd gaan worden.

Ad B: Het slibgehalte bij de inname punten van zoetwater en zoutwater

Weinig gegevens zijn bekend over variaties in het gehalte aan zwevend slib in de Waddenzee en het IJsselmeer. Op basis van een expert opinion is geschat dat de concentratie aan slib in suspensie (TSS) globaal gezien van west naar oost toeneemt in de westelijke Waddenzee. Een hogere concentratie wordt vooral verwacht op de platen en ondieptes, in een brede strook langs de Friese kust, maar ook op de platen ten noorden van Den Oever worden hogere concentraties verwacht. Vanuit het oogpunt van het slib ligt een inname van zoutwater nabij Breezanddijk het meest voor de hand, of vanuit het Marsdiep met een pijpleiding naar Den Oever. Een locatie nabij Kornwerderzand wordt het minst gunstig geacht.

In het gebied komt een zuidwestenwind gemiddeld gezien vaak voor. Verwacht wordt dat door golfactie het gehalte aan gesuspenseerd slib aan de oostkant in het IJsselmeer gemiddeld wat hoger zal zijn dan in het westen. Een innamepunt van zoetwater uit het IJsselmeer nabij Den Oever of Breezanddijk heeft daarom een zwakke voorkeur.

Slib in suspensie komt via het innamepunt de BEC binnen. In een voorzuivering moet het slib er (deels) uit worden gehaald. Aanwezigheid van slib heeft vermindering van de efficiency van de BEC tot gevolg. Aan voorzuivering en verwerking van slib zijn kosten verbonden.

Ad C: Het onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten

Door autonome ontwikkelingen in het watersysteem, kan het nodig zijn om geulen door baggerwerkzaamheden op diepte te houden. Het verdient aanbeveling om dit onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten zo beperkt mogelijk te houden. Inname vanuit een bestaande geul met relatief hoge stroomsnelheden is dan het gunstigst. Een innamepunt voor zoutwater in de Doove Balg (vanaf Breezanddijk) of nabij het Marsdiep (met een pijpleiding vanuit Den Oever) is dus het meest geschikt. Nabij de spuisluizen zou wat betreft onderhoudsbaggerwerk ook een goede optie zijn, maar dit conflicteert met het eerste aspect betreffende het zoutgehalte.

In het IJsselmeer is de stroming gering. Voor de plaatsing van het innamepunt voor zoetwater lijkt weinig onderscheid te maken te zijn tussen de drie locaties. Als er aan de westzijde van het IJsselmeer gemiddeld minder slib in suspensie is dan aan de oostzijde, krijgt een locatie bij Den Oever of Breezanddijk de voorkeur boven een inname bij Kornwerderzand. Op basis van metingen zou deze hypothese getoetst moeten worden.

Impact aspecten

Een BEC op de Afsluitdijk kan op verschillende manieren effect hebben op de omgeving van de Afsluitdijk. Dit kunnen positieve en negatieve effecten zijn. In een expert sessie zijn zeven aspecten geïdentificeerd. Cultureel-maatschappelijke aspecten zijn buiten beschouwing gelaten. In Bijlage 1 is per aspect een nadere toelichting gegeven.

- 1 Morfologische effecten in de Waddenzee;
- 2 Morfologische effecten in het IJsselmeer;
- 3 Ecologische effecten in de Waddenzee;
- 4 Ecologische effecten in het IJsselmeer;
- 5 De Scheepvaart;
- 6 De waterkwaliteit;
- 7 Het peilbeheer in het IJsselmeer.

In de expert sessie is geconcludeerd dat de twee belangrijkste impact aspecten zijn:

- A. De morfologische effecten in de Waddenzee;
- B. De ecologische effecten in de Waddenzee.

Bij de ecologische effecten in de Waddenzee wordt voorzien dat de meeste effecten positief zullen uitpakken, doordat brakwaterlozingen in de plaats komen van zoetwaterlozingen die voor de ecologie als negatief worden ervaren. De opzet is om de centrale continu te laten draaien. Dan wordt dus continu (24 uur per dag) brak water geloosd en is een stabiele overgangszone tussen zoet en zout water beschikbaar.

Een grotere BEC zal meestal sterkere effecten veroorzaken omdat de hoeveelheden brakwater die geloosd moeten worden, dan groter uitvallen. Voor een 200 MW centrale zou het bijvoorbeeld gaan om 400 m³/s of meer (Bijlage 1). Voor de pilot BEC en de 20 MW BEC, beschouwd in deze studie, wordt verwacht dat alleen lokale effecten in de directe omgeving van de BEC gaan optreden. Bij een opgeschaalde, grote BEC met een elektrisch vermogen van meer dan 100 MW, lijken effecten zodanig grootschalig te worden dat de keuze van de locatie van de BEC invloed zal hebben op de grootte en aard van de effecten.

Ad A: De morfologische effecten in de Waddenzee

Onafhankelijk van de locatie en de grootte van een BEC worden geen negatieve effecten verwacht nabij het innamepunt voor zoutwater (mogelijk nodig onderhoudsbaggerwerk wordt in dit rapport niet gezien als een morfologisch effect van een BEC). Nabij het lozingspunt voor brakwater kan geulvorming ontstaan. Dit wordt vooral verwacht bij een full-scale 200 MW BEC ten gevolge van grootschalige lozingen brakwater met een orde grootte van 400 m³/s of meer. Zelfs bij een 200 MW BEC wordt verwacht dat de morfologische effecten zeer lokaal zullen zijn. Het lozen in een bestaande geul verdient de voorkeur. Dit kan de Doove Balg zijn of één van de bestaande spuigeulen. Een lozingspunt dat uitkomt op de Doove Balg kreeg in de expertsessie een lichte voorkeur. Bij de keuze van het lozingspunt moet rekening gehouden met het risico van recirculatie.

Ad B: De ecologische effecten in de Waddenzee

Ten noordoosten van Breezanddijk is een strook van enkele kilometers langs de Afsluitdijk toegekend als een Mossel Zaad Installatie (MZI) gebied. Bij continue lozing van grote volumes brakwater vanuit Breezanddijk is er mogelijk een negatief effect op deze MZI, vanwege stromingen en wellicht te lange perioden met een laag zoutgehalte. In deze studie was geen informatie beschikbaar over eventuele mosselpercelen nabij Den Oever en Kornwerderzand. Mogelijke effecten zijn daar niet uit te sluiten. Vanuit een ecologisch oogpunt bekeken, heeft Den Oever of Kornwerderzand de voorkeur als lozingspunt.

Conclusies huidige situatie

Op basis van de aspecten zoutgehalte en slibgehalte voldoet de locatie bij Kornwerderzand niet. Deze aspecten zijn voor de haalbaarheid van de BEC zeer belangrijk. Daardoor lijkt Kornwerderzand het minst geschikt voor de plaatsing van een BEC. Dit geldt voor een pilot, een middelgrote en een grote BEC (Tabel 4.1).

Evaluatie Locatie Blue Energy Centrale – huidige situatie									
aspect	Den Oever			Breezanddijk			Kornwerderzand		
Efficiëntie									
	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW
Zoutgehalte innamepunt	±	±	±	±	±	±	-	-	-
Slibgehalte innamepunt	±	±	±	+	+	+	-	-	-
Onderhouds-baggerwerk	+	±	±	+	±	±	+	±	±
Impact									
Morfologische impact	+	+	±	+	+	+	+	+	+
Ecologische impact	+	+	+	+	+	±	+	+	+
Betekenis kleuren en symbolen									
+	meest geschikt								
±	mogelijk geschikt (met significante aanpassingen)								
-	minst geschikt								

Tabel 4.1 Overzicht van de expert evaluatie voor de huidige Afsluitdijk

Bij de afweging tussen plaatsing bij Den Oever of bij Breezanddijk spelen de volgende aspecten een rol:

- Bij Den Oever kan water ingenomen worden met een hoger zoutgehalte dan bij Breezanddijk, mits een pijpleiding wordt gebruikt om zoutwater vanuit het Marsdiep in te nemen. Dit is gunstig voor het maximaal op te wekken vermogen per kubieke meter water. Het brengt wel kosten met zich mee voor aanleg van de pijpleiding, en een mogelijk ingewikkeld vergunningstraject;
- Het water dat bij Breezanddijk kan worden ingenomen heeft gemiddeld een lager zoutgehalte dan bij Den Oever, maar kan van relatief dichtbij uit de Doove Balg worden onttrokken;

- Het water bij Breezanddijk heeft waarschijnlijk een lager slibgehalte dan bij Den Oever. Dit zou door metingen bevestigd moeten worden.

Bij beide locaties is infrastructuur nodig om recirculatie te voorkomen. Hoe groter de centrale, des te groter de benodigde constructies bestaande uit pijpleidingen, geleidedammen en dergelijke.

Er zijn mogelijk morfologische en ecologische impacts te verwachten, maar die zullen op beide locaties lokaal van karakter zijn. Dit kan gedeeltelijk worden ondervangen door het ontwerp van de installatie. Voor een pilot en een kleine BEC zullen effecten zeker te ondervangen zijn. Bij het opschalen naar een grote BEC zal voor beide locaties aandacht besteedt moeten worden aan mogelijke geulvorming of interactie met aanwezige mosselculturen.

Overige opmerkingen

Voor het schatten van de haalbaarheid van een BEC op de Afsluitdijk, onafhankelijk van de precieze locatie, is het van belang in ieder geval de volgende aspecten mee te nemen in een kosten-baten analyse:

- In de westelijke Waddenzee zijn in het algemeen de zoutgehaltes (aanmerkelijk) lager dan in de Noordzee. Daarbij vertoont het zoutgehalte sterke variaties over de seizoenen vanwege het spuien van zoetwater vanuit het IJsselmeer. Het zoutgehalte is dus beperkt. Het maximaal haalbare vermogen per m³ zoutwater uit de Waddenzee is dan ook lager dan voor zoutwater afkomstig uit de Noordzee. Van belang is dan te onderzoeken bij welk gemiddeld zoutgehalte een BEC nog rendabel kan zijn. Als dat duidelijk is, kan er onderzocht worden of geschikte locaties voor inname aanwezig zijn in de Waddenzee. Als dergelijke locaties aanwezig zijn, moet worden vastgesteld of de benodigde infrastructuur kostentechnisch en qua vergunningen geplaatst kan worden.
- Er bestaat een kennisleemte wat betreft de benodigde voorzuivering en de verwerking van filter residu, bestaande voornamelijk uit slib, bij een BEC in de Waddenzee. Aanbevolen wordt dit aspect te onderzoeken bijvoorbeeld in een pilot.

4.1.2 BEC in visie Monument in Balans

In de Visie Monument in Balans (Figuur 4.3) wordt de Afsluitdijk qua grootschalige vorm niet aangepast ten opzicht van de huidige situatie. In dit plan is een BEC opgenomen, maar lijkt het plan niet specifiek ingericht om een optimale locatie voor de BEC te creëren.



Figuur 4.3 De toekomstige Afsluitdijk volgens de visie Monument in Balans (RWS, 2009)

Veranderingen ten opzichte van de huidige situatie die relevant kunnen zijn voor een BEC zijn:

- De extra spuisluis op “de knik” ten westen van Kornwerderzand (ESA);
- De vergrote maximum spuicapaciteit van 5.000 m³/s naar 10.000 m³/s;
- Continue lozingen op de Waddenzee van brakwater afkomstig van de BEC;
- Realisatie van een brakwatergebied tussen Makkum en Harlingen door beperkt en gestuurd inlaten van zout water in het IJsselmeer via de huidige spui- en schutsluis;
- Aanpassing van het spuibeleid, zie Tabel 4.2).

spuiregime	Kornwerderzand	Den Oever	ESA / BEC
Oude situatie	Wens verdeling: 1/3 Jaargemiddelde: 205 m ³ /s	Wens verdeling: 2/3 Jaargemiddelde: 245 m ³ /s	n.v.t.
Nieuwe situatie Lage afvoeren	Zoveel als nodig om het brakwatergebied controleerbaar te houden	Minimale afvoer om indringing van zout controleerbaar te houden en geul enigszins door te spoelen	Overige benodigde afvoer (bij extreem lage afvoeren kan de BEC minder energie produceren)
Nieuwe situatie Gem. afvoeren	Zoveel als nodig om het brakwatergebied controleerbaar te houden	Minimale afvoer om indringing van zout controleerbaar te houden en de geul enigszins door te spoelen	Overige benodigde afvoer (de BE centrale kan 24 uur per dag zoet water afvoeren).
Nieuwe situatie Hoge afvoeren	Zoveel als nodig om het brakwatergebied controleerbaar te houden	Hoge afvoeren gebruiken om periodiek zout weg te spoelen en geul door te spoelen	Overige benodigde afvoer (de BEC kan 24 uur per dag zoet water afvoeren)
Nieuwe situatie extreme afvoeren	Vol benutten, maar deze spuisluis als laatste inzetten	Maximale capaciteit	Maximale capaciteit (de BEC kan 24 uur per dag zoet water afvoeren)

Tabel 4.2 Voorgenomen aanpassingen in spuibeleid als geïnterpreteerd uit Monument in Balans

Evaluatie op basis van efficiëntie aspecten

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: het zoutgehalte bij het innamepunt van zoutwater, het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en voor zoutwater, en onderhoudsbaggerwerk bij inname punten

Het zoutgehalte bij het innamepunt voor zoutwater

Door spuien van zoetwater vanuit het IJsselmeer te concentreren aan de oostkant van de Afsluitdijk via ESA, en het spuien bij Den Oever te minimaliseren, neemt het gemiddelde zoutgehalte in de Waddenzee toe nabij Den Oever. Ten noordoosten van de Afsluitdijk zal het gemiddelde zoutgehalte echter afnemen. Voor de visie Monument in Balans is het daarom het meest geschikt om het innamepunt van een BEC zo westelijk mogelijk te leggen: in diep water nabij Den Oever. Verder geldt een analoge analyse als die beschreven staat voor de huidige situatie. De analyse geldt voor alle drie de typen BEC typen (pilot, 20 MW en 200 MW). Een voorstel om te kiezen voor de locatie Kornwerderzand is dan niet voor de hand liggend.

In de visie Monument in Balans is geen infrastructuur opgenomen of is een geometrische verandering doorgevoerd die het risico verkleint op recirculatie tussen het lozingspunt van het brakke water en het innamepunt voor zoutwater. Voor alle locaties geldt daarom dat naarmate een BEC grotere volumes water gebruikt, het risico op recirculatie sterk toeneemt, tenzij er maatregelen genomen worden. Met pijpleidingen zal ervoor gezorgd moeten worden dat de punten voor inname en lozing ver genoeg uit elkaar komen te liggen.

Geconcludeerd kan worden dat op basis van het aspect zoutgehalte voor de visie Monument in Balans de voorkeurslocatie bij Den Oever is. Om risico van recirculatie te voorkomen, kan bij een grotere BEC het beste via een pijpleiding water ingenomen worden uit het Marsdiep. Het brakke water kan het beste bij Den Oever in de spuigeul geloosd worden.

Het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en zoutwater

Een inname van zoutwater nabij Breezanddijk is het meest geschikt vanuit het oogpunt van het slibgehalte analoog aan de analyse voor de huidige situatie. Een locatie bij Kornwerderzand wordt het minst geschikt geacht. Aanbevolen wordt om metingen uit te voeren om de verwachting te toetsen.

Onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten

Voor de visie Monument in Balans is de evaluatie van dit aspect wederom gelijk aan de evaluatie onder de huidige situatie: om mogelijk onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten zo minimaal mogelijk te houden, is inname vanuit een bestaande geul met relatief hoge stroomsnelheden het gunstigst. Een innamepunt in de Doove Balg (vanaf Breezanddijk) of een innamepunt nabij het Marsdiep (met een pijpleiding vanuit Den Oever) is het meest geschikt. Nabij de spuisluizen zou wat betreft onderhoudsbaggerwerk ook een goede optie zijn, maar dit conflicteert met het aspect over het zoutgehalte.

Voor de plaatsing van een innamepunt voor zoetwater, lijkt weinig onderscheid te maken te zijn tussen de drie locaties. Als er aan de westzijde van het IJsselmeer gemiddeld minder slib in suspensie is dan aan de oostzijde, krijgt een locatie bij Den Oever of Breezanddijk de voorkeur boven een locatie bij Kornwerderzand. Aanbevolen wordt om via metingen deze verwachting te toetsen.

Evaluatie op basis van mogelijke impacts

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: de morfologische effecten in de Waddenzee en de ecologische effecten in de Waddenzee.

Morfologische effecten in de Waddenzee

Voor de visie Monument in Balans is de analyse analoog aan die voor de huidige situatie: onafhankelijk van de locatie en de grootte van een BEC worden geen negatieve effecten verwacht nabij het innamepunt voor zoutwater. Nabij het lozingspunt van het brakke water kan geulvorming ontstaan, vooral bij een full-scale 200 MW BEC, van waaruit mogelijk tot 600 m³/s brakwater geloosd wordt. Zelfs bij een BEC van 200 MW wordt verwacht dat de morfologische effecten zeer lokaal zijn. Het lozen in een bestaande geul verdient de voorkeur. Dit kan de Doove Balg zijn of één van de bestaande spuigeulen. Een lozingspunt dat uitkomt op de Doove Balg kreeg in de expertsessie een lichte voorkeur.

Ecologische effecten in de Waddenzee

Ten noordoosten van Breezanddijk is een strook van enkele kilometers langs de Afsluitdijk toegekend als een Mossel Zaad Installatie (MZI). Bij de visie Monument in Balans zal deze keuze mogelijk gehandhaafd willen blijven. Bij continue lozingen van grote volumes brakwater vanuit Breezanddijk treedt dan mogelijk een negatief effect op deze MZI. Vanuit ecologisch oogpunt heeft een locatie bij Den Oever of Kornwerderzand als lozingspunt daarom de voorkeur.

Conclusies visie Monument in Balans

De analyse voor de visie Monument in Balans is grotendeels gelijk aan de analyse van de huidige situatie. Het voornaamste verschil ontstaat door een gewijzigd spuibeleid. Spuien via Den Oever onder gemiddelde omstandigheden wordt geminimaliseerd, en een nieuw spuimiddel bij De Knik wordt in gebruik genomen. Dit heeft effect op het zoutgehalte bij het innamepunt.

In de visie Monument in Balans is op basis van deze analyse een locatie bij Den Oever het meest geschikt voor een pilot en een kleine BEC van 20 MW (Tabel 4.3). Bij het ontwerp van de kleine BEC moet wel onderzoek gedaan worden naar het risico van mogelijke recirculatie tussen het innamepunt voor zoutwater en het lozingspunt voor het brakke water. De verschillen in slibgehalte tussen Den Oever en Breezanddijk lijken voor de efficiëntie van een BEC minder belangrijk dan het verwachte hogere zoutgehalte bij Den Oever.

Voor een grote BEC is op alle locaties significant leidingwerk nodig om de benodigde debieten van en naar de centrale te pompen en om het risico van recirculatie te voorkomen. Vanuit het oogpunt van rendement lijkt voor de Afsluitdijk een locatie voor een BEC bij Den Oever met inname vanuit het Marsdiep en lozing vlakbij de spuigeul het meest geschikt.

Evaluatie Locatie Blue Energy Centrale – Monument in Balans									
aspect	Den Oever			Breezanddijk			Kornwerderzand		
Efficiëntie									
	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW
Zoutgehalte innamepunt	+	+	±	±	±	±	-	-	-
Slibgehalte innamepunt	±	±	±	+	+	+	-	-	-
Onderhouds-baggerwerk	+	±	±	+	±	±	+	±	±
Impact									
Morfologische impact	+	+	±	+	+	+	+	+	+
Ecologische impact	+	+	+	+	+	±	+	+	+
Betekenis kleuren en symbolen									
+	meest geschikt								
±	mogelijk geschikt (met significante aanpassingen)								
-	minst geschikt								

Tabel 4.3 Overzicht van de expert evaluatie voor de visie Monument in Balans

4.1.3 BEC in visie Natuurlijk Afsluitdijk

In de Visie Natuurlijk Afsluitdijk (Figuur 4.4) wordt de Afsluitdijk aan de kant van de Waddenzee qua grootschalige vorm niet aangepast ten opzicht van de huidige situatie. Aan de kant van het IJsselmeer zijn grootschalige ontwikkelingen gepland. In dit plan is een BEC opgenomen, en het plan is deels ingericht om een optimale locatie voor de BEC te creëren.

Veranderingen ten opzichte van de huidige situatie die relevant kunnen zijn voor de locatie van een BEC zijn:

- De extra spuisluis op “de knik” ten westen van Kornwerderzand (ESA);
- De vergrote maximum spuicapaciteit van 5.000 m³/s naar 10.000 m³/s;
- Buitengebruikstelling van de spuisluis bij Kornwerderzand;
- Continue lozingen van brakwater afkomstig van de BEC via een meer met brakwater aan de IJsselmeerszijde van de Afsluitdijk (het brakwatermeer staat in open verbinding met de Waddenzee via een extra sluizencomplex ESA+);
- De natuurdijk in het IJsselmeer;
- Het plaatselijk verdiepen van het IJsselmeer door zandwinning;
- Aanpassing van het spuibeleid (Tabel 4.4).



spuiregime	Kornwerderzand	Den Oever	ESA / BEC
Oude situatie	Wens verdeling: 1/3 Jaargemiddelde: 205 m ³ /s	Wens verdeling: 2/3 Jaargemiddelde: 245 m ³ /s	n.v.t.
Nieuwe situatie Lage afvoeren	Buiten gebruik	Kleine hoeveelheden: circa 50 m ³ /s	Overige benodigde afvoer via de BEC, via het brakwatermeer (24 uur per dag mogelijk)
Nieuwe situatie Gem. afvoeren	Buiten gebruik	Kleine hoeveelheden: circa 50 m ³ /s	Overige benodigde afvoer via BEC (24 uur / dag) en ESA
Nieuwe situatie Hoge afvoeren	Buiten gebruik	Kleine hoeveelheden: circa 50 m ³ /s	Overige benodigde afvoer via BEC (24 uur / dag) en ESA
Nieuwe situatie extreme afvoeren	Buiten gebruik	Maximale capaciteit	Maximale capaciteit BEC en ESA benutten, en water vanuit het IJsselmeer het valmeer inlaten

Tabel 4.4 Voorgenomen aanpassingen in spuibeleid afgeleid uit de visie Natuurlijk Afsluitdijk (RWS, 2009)

De visie Natuurlijk Afsluitdijk geeft aan dat de spuidebieten sterk afhankelijk zijn van het toekomstige peilbeheer in het IJsselmeer en van de ontwikkeling van de waterstand in de Waddenzee. Volgens de visie is nader onderzoek nodig voor bepaling van de juiste dimensionering van de spuimiddelen.

Evaluatie op basis van efficiëntie aspecten

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: het zoutgehalte bij het innamepunt voor zoutwater, het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en voor zoutwater en onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten.

Het zoutgehalte bij het innamepunt voor zoutwater

Door het spuien te concentreren aan de oostkant van de Afsluitdijk via ESA, en het spuien bij Den Oever te minimaliseren zal het gemiddelde zoutgehalte in de Waddenzee nabij Den Oever toenemen. Ten noordoosten van de Afsluitdijk zal het gemiddelde zoutgehalte evenwel afnemen. Voor de visie Natuurlijk Afsluitdijk is het op grond van dit criterium daarom het meest geschikt het innamepunt van de BEC zo westelijk mogelijk te leggen: in diep water nabij Den Oever. Verder geldt een analoge analyse als beschreven voor de huidige situatie rondom de Afsluitdijk. Het gemiddelde zoutgehalte bij Breezanddijk zal iets lager zijn dan in de huidige situatie waardoor in de visie Natuurlijk Afsluitdijk deze locatie minder positief wordt beoordeeld. De analyse geldt voor alle drie de typen BEC (pilot, 20 MW en 200 MW).

In de visie Natuurlijk Afsluitdijk is het de bedoeling te lozen in een meer met brakwater aan de IJsselmeerzijde van de Afsluitdijk. Hierdoor komen de punten voor inname en lozing relatief ver uit elkaar te liggen. Er zijn dan geen lange pijpleidingen nodig als de BEC bij Breezanddijk wordt geplaatst (zoals aangegeven in het plan). De plaatsing van de BEC op een andere locatie dan Breezanddijk past niet in deze visie.

Geconcludeerd kan worden dat het zoutgehalte van het in te nemen zoute water vanuit Breezanddijk niet optimaal is, maar dat plaatsing van de BEC op een andere locatie niet in de visie Natuurlijk Afsluitdijk past.

Het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en zoutwater

Op basis van een analoge analyse als gegeven voor de huidige situatie in Hoofdstuk 4 lijkt vanuit het slibhoogpunt een zoutwaterinname nabij Breezanddijk het meest geschikt. Bij Kornwerderzand wordt dit het minst gunstig geacht. Aanbevolen wordt om metingen uit te voeren om deze hypothese te toetsen.

Onderhoudsbaggerwerk bij inname punten

De evaluatie van dit aspect is hetzelfde als de evaluatie voor een BEC onder de huidige situatie: om mogelijk onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten zo minimaal mogelijk te houden, is inname vanuit een bestaande geul met relatief hoge stroomsnelheden het gunstigst. Een innamepunt in de Doove Balg (vanaf Breezanddijk) of een innamepunt nabij het Marsdiep (met een pijpleiding vanuit Den Oever). Nabij de spuiscuizen zou wat betreft onderhoudsbaggerwerk ook een goede optie zijn, maar dit conflicteert met het aspect zoutgehalte.

Voor de plaatsing van een innamepunt voor zoetwater lijkt weinig onderscheid te maken te zijn tussen de drie locaties. Als er aan de westzijde van de Afsluitdijk in het IJsselmeer gemiddeld minder slib in suspensie is dan aan de oostzijde, krijgt een locatie bij Den Oever of Breezanddijk de voorkeur boven een locatie bij Kornwerderzand. Aanbevolen wordt om metingen uit te voeren om deze verwachting te toetsen.

Evaluatie op basis van mogelijke impacts

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: de morfologische effecten in de Waddenzee en de ecologische effecten in de Waddenzee.

Morfologische effecten in de Waddenzee

De analyse voor deze visie is analoog aan die voor een BEC onder de huidige situatie: onafhankelijk van de locatie en grootte van een BEC worden geen negatieve effecten verwacht nabij het innamepunt voor zoutwater. Nabij het lozingspunt van het brakke water

kan geulvorming ontstaan, met name bij een full-scale 200 MW BEC, van waaruit mogelijk tot 600 m³/s geloosd wordt. Zelfs bij een BEC van 200 MW wordt verwacht dat de morfologische effecten zeer lokaal zullen zijn. Het lozen in een brakwatermeer vanaf Breezanddijk verdient de voorkeur zoals voorgesteld in Natuurlijk Afsluitdijk en omdat dat in lijn is met de plannen en het risico van recirculatie kleiner is. Een aandachtspunt is mogelijk het ontstaan van ongewenste siltatie in het brakwatermeer, door vulling en lediging via het getij en mogelijk door slibaanvoer via de BEC (afhankelijk van de grootte van de centrale en de voorzuivering).

Ecologische effecten in de Waddenzee

Door plaatsing van een BEC bij Breezanddijk kan er zoals beoogd in de visie Natuurlijk Afsluitdijk geloosd worden op een brakwatermeer. Het meer is ontworpen als positieve ecologische bijdrage. Op ecologische grond is een BEC bij Breezanddijk dan geschikter dan op andere locaties. Verder zijn er geen effecten geïdentificeerd waardoor om ecologische redenen een voorkeursplaats aan te wijzen is voor een BEC.

Conclusies Natuurlijk Afsluitdijk

De analyse voor de visie Natuurlijk Afsluitdijk is wat betreft efficiëntie aspecten grotendeels gelijk aan die voor die van een BEC onder de huidige situatie. Het voornaamste verschil ontstaat doordat een BEC geïntegreerd is in het ontwerp van deze visie op een locatie bij Breezanddijk, waardoor evaluatie van de BEC op de andere locaties irrelevant is. Daarnaast bevat de visie een gewijzigd spuibeleid. Spuien bij Den Oever wordt onder gemiddelde omstandigheden geminimaliseerd. Tevens wordt een nieuw spuimiddel bij De Knik in gebruik genomen. Tabel 4.5 vat de evaluatie samen voor de visie Natuurlijk Afsluitdijk.

De belangrijkste bevinden en afwegingen zijn:

- In de visie Natuurlijk Afsluitdijk is een BEC voorzien bij Breezanddijk. Door een brakwatermeer op te nemen in het ontwerp, waar de BEC op kan lozen, is de layout van de visie daarop afgestemd.
- Een nadeel van plaatsing van een BEC bij Breezanddijk is het relatief lage zoutgehalte bij het innamepunt voor zout water. Plaatsing van een BEC bij Den Oever is beter voor het rendement, maar dit past niet in de visie. Bovendien moet bij Den Oever een oplossing worden gevonden voor het risico van mogelijke recirculatie. Ook moet rekening worden gehouden met het spuidebiet van 50 m³/s.
- Zowel vanwege het zoutgehalte als het slibgehalte kan het innamepunt bij Breezanddijk het best in de getijde geul (de Doove Balg) worden gelegd.

Evaluatie Locatie Blue Energy Centrale – Natuurlijk Afsluitdijk									
aspect	Den Oever			Breezanddijk			Kornwerderzand		
Efficiëntie									
	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW
Zoutgehalte innamepunt	X	X	X	±	±	±	X	X	X
Slibgehalte innamepunt	X	X	X	+	+	+	X	X	X
Onderhouds-baggerwerk	X	X	X	+	±	±	X	X	X
Impact									
Morfologische impact	X	X	X	+	+	+	X	X	X
Ecologische impact	X	X	X	+	+	±	X	X	X
Betekenis kleuren en symbolen									
+	meest geschikt								
±	mogelijk geschikt (met significante aanpassingen)								
-	minst geschikt								
X	Niet relevant want niet in lijn met het visieontwerp								

Tabel 4.5 Overzicht van de expert evaluatie voor de visie Natuurlijk Afsluitdijk

Overige opmerkingen

Tijdens de sessies zijn opmerkingen gemaakt over de lay-out van een BEC in de visie van Natuurlijk Afsluitdijk die niet direct verband houden met de evaluatie van de plaats van een BEC. Op verzoek van RWS zijn deze opmerkingen wel opgenomen in de rapportage.

Opmerkingen bij de Visie Natuurlijk Afsluitdijk zijn:

- In het brakwatermeer zou siltatie kunnen optreden zodat onderhoudsbaggerwerk nodig is. Experts schatten dat het om 10-15 cm slib per jaar zou kunnen gaan;
- Bij opschalen van de centrale naar een BEC van 200 MW centrale is een zeer groot kunstwerk nodig om het debiet van 400 m³/s of meer vanuit het brakwatermeer naar de Waddenzee te laten stromen;
- Uit ecologisch oogpunt wordt het nastreven van een geleidelijke zout-zoet overgang als waardevol gezien. Van een brakwater gebied als gepresenteerd in deze visie wordt echter niet of nauwelijks ecologische meerwaarde verwacht: een brak water gebied wordt in het algemeen gezien als een ecologisch arm gebied. Het brakwatermeer lijkt daardoor een complexe oplossing om recirculatie vanuit een BEC te voorkomen, waar mogelijk een pijpleiding goedkoper is.

4.1.4 BEC in visie WaddenWerken

In de visie van Waddenwerken (Figuur 4.5) zijn aan de Waddenzeezijde grootschalige ontwikkelingen gepland. Aan de IJsselmeerzijde zijn geen grootschalige ontwikkelingen

voorzien. In het plan is een BEC opgenomen. Het plan is deels ingericht om een optimale locatie voor een BEC te creëren. De centrale heeft een maximale capaciteit van 25 MW.



Verschillen ten opzichte van de huidige situatie die relevant kunnen zijn voor de BE centrale zijn:

- Aanleg van 1.500 ha kwelderareaal, 350 ha kweldernok (400 – 600m breed);
- Aanleg van luwtebanken uit te voeren in keileem en klei;
- Aanleg zout-zoet overgang Brakbaai;
- De extra spuisluis op “de knik” ten westen van Kornwerderzand (ESA);
- De vergrote maximum spuicapaciteit van 5.000 m³/s naar 10.000 m³/s;
- Aanleg zout-zoet overgang Makkumer Brak;
- Plaatselijk verdiepen van het IJsselmeer (zandwinning 55 miljoen m³ uit 1.000 tot 2.000 ha; 2,5 tot 5 m verdiepen), en het plaatselijk aanleggen van ondiepten;
- Continue lozingen van brakwater afkomstig van de BEC (gepland via Brakbaai);
- Aanpassing van het spuibeleid (Tabel 4.6).

spuiregime	Kornwerderzand	Den Oever	ESA
Oude situatie	Wens verdeling: 1/3 Jaargemiddelde: 205 m ³ /s	Wens verdeling: 2/3 Jaargemiddelde: 245 m ³ /s	n.v.t.
Nieuwe situatie Lage afvoeren	niet spuien	10 m ³ /s zoet water spuien ten behoeve van Brakbaai; BEC voert beschikbaar water af.	ESA voert water af dat niet via de BEC of via Brakbaai gespuid wordt
Nieuwe situatie Gem. afvoeren	Kleine hoeveelheden, genoeg om vaargeulen open te houden	Kleine hoeveelheden, genoeg om vaargeulen open te houden; 10 m ³ /s zoet water spuien ten behoeve van Brakbaai; ;BEC voert deel van het water af via Brakbaai.	ESA voert water af dat niet via de BEC of via Brakbaai gespuid wordt
Nieuwe situatie Hoge afvoeren	Volumes spuien die ESA en BE niet kunnen verwerken	Volumes spuien die ESA en BE niet kunnen verwerken; BE op volle capaciteit	ESA op volle capaciteit
Nieuwe situatie extreme afvoeren	Maximale capaciteit	Maximale capaciteit spui Den Oever en BEC	Maximale capaciteit ESA benutten

Tabel 4.6 Voorgenomen aanpassingen in spuibeleid, afgeleid uit de visie Waddenwerken (RWS, 2009)

Omdat de plaatsing van een BEC geïntegreerd is in de lay-out van deze visie concentreert de evaluatie zich op de voorgestelde locatie nabij Den Oever.

Evaluatie op basis van efficiëntie aspecten

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: het zoutgehalte bij het zoutwater innamepunt, het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en zoutwater, en onderhoudsbaggerwerk bij inname punten.

Het zoutgehalte nabij het innamepunt voor zoutwater

De visie WaddenWerken beoogt afvoer van zoetwater via de spuisluizen bij Den Oever te minimaliseren. Het gevolg is dat de gemiddelde zoutgehalten aan de kant van de Waddenzee nabij Den Oever hoger zullen worden. Dat is gunstig voor een innamepunt voor zoutwater voor een BEC nabij Den Oever⁴. In overeenstemming met het plan is daarom op basis van het aspect zoutgehalte de meest logische locatie voor de BEC nabij Den Oever. Om de vaargeul open te houden, zal toch met enige regelmaat gespuid moeten worden. Een innamepunt voor zoutwater direct bij het spuiwerk wordt dan als ongunstig gezien ten opzichte van het gebruik van een pijpleiding om zoutwater in te nemen vanaf een diep punt in een getijde geul op enige afstand van de spuisluizen. Dit kan het Marsdiep zijn, waar het effect van het spuien minimaal zal zijn, maar waar lange pijpleidingen voor nodig zijn, of in lokale geulen dicht bij, waar het gemiddelde zoutgehalte fractioneel lager zal zijn doordat de spuisluizen af en toe in gebruik zijn.

In de visie WaddenWerken zou het ook mogelijk zijn een pilot BEC te plaatsen bij Breezand, waarbij zoutwater wordt ingenomen uit de Doove Balg. De zoutgehalten zullen daar

4. Op langere termijn moet door hoog frequentere en extremere rivierafvoeren ten gevolge van de voorspelde klimaatveranderingen waarschijnlijk vaker toch via Den Oever worden gespuid waardoor dit effect minder sterk zal worden.

gemiddeld echter lager zijn dan nabij Den Oever. Door de grote volumes zoetwater die gespuid worden bij Kornwerderzand wordt de plaatsing van een pilot of opgeschaalde BEC op deze locatie afgeraden.

Het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en zoutwater

Bij de implementatie van de visie WaddenWerken is de verwachting dat de hoeveelheden slib in suspensie nabij Den Oever wat zullen afnemen ten opzicht van de huidige situatie doordat er minder wordt gespuid via Den Oever. Locale stroomsnelheden zullen afnemen en de grootschalige kwelderwerken gaan als slibvang werken. Op basis van een expert opinion is dit echter niet te kwantificeren. Ten opzichte van de andere mogelijke locaties is Den Oever niet minder geschikt. Ook voor plaatsing van een innamepunt voor zoetwater lijkt een locatie nabij Den Oever geschikter dan nabij de andere twee locaties.

Onderhoudsbaggerwerk bij inname punten

Als het innamepunt bij Den Oever in een getijde geul wordt gelegd, zal weinig onderhoudsbaggerwerk nodig zijn. Als het innamepunt in een spuigeul wordt gelegd, zal er een goede afstemming moeten worden gevonden tussen het spuibeleid (spuien om de geul en het innamepunt open te houden), en operatie van de BEC. Tijdens spuien zal het zoutgehalte van het in te nemen water namelijk te ver gaan dalen. Bij plaatsing van het innamepunt op andere locaties direct langs de dijk zal aanzienlijk onderhoudsbaggerwerk nodig zijn. Dit kan ondervangen worden door gebruik te maken van een pijpleiding.

Evaluatie op basis van mogelijke impacts

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: de morfologische effecten in de Waddenzee en de ecologische effecten in de Waddenzee.

Morfologische effecten in de Waddenzee

De visie WaddenWerken beoogt het brakke water van de BEC te lozen in een aan te leggen brakwater gebied (brakbaai) dat wordt gekarakteriseerd door stelsels van ondiepten en geulen. Voor een pilot BEC worden geen relevante morfologische effecten verwacht. Bij plaatsing van een BEC van 20 tot 25 MW zal er een debiet van 60 tot 70 m³/s geloosd gaan worden. Bij deze debieten kunnen zich lokaal stroomgeulen vormen. Bij het ontwerp van de uitlaat zal hiermee rekening gehouden moeten worden, en zal gekeken moeten worden hoe zulke geulen in het geplande gebied in te passen zijn.

Ecologische effecten in de Waddenzee

Het is de bedoeling dat ongeveer 10 m³/s zoetwater via de oostelijke spuibuis van Den Oever gespuid wordt via Brakbaai naar de Waddenzee, om een zoet-zout overgang te realiseren. Bij de plaatsing van de brakwater uitlaat van de BEC moet met de zoet-zout overgang in Brakbaai rekening worden gehouden: het lozingspunt van de BEC zal ver genoeg van het innamepunt van zoetwater geplaatst moeten worden. Hoe ver dit moet zijn, hangt af van het spuidebiet aan zoetwater, en het lozingsdebiet van brakwater. Naarmate het lozingsdebiet van de BEC groter wordt, zal het lozingspunt verder van de spuisluis van zoetwater geplaatst moeten worden.

In de expert sessies is opgemerkt dat brakwater gebieden over het algemeen als ecologisch arm worden gezien. Brakbaai lijkt daarom wel interessant als een geleidelijke zout-zoet overgang en dus belangrijk voor vis migratie, en als mechanisme om recirculatie tussen innamepunt en lozingspunt te minimaliseren, maar minder interessant in termen van ecologische diversiteit. Dit aspect hangt meer samen met het overall ontwerp, dan de plaatsing van de BEC.

Verder is het opgemerkt dat bij implementatie van de visie WaddenWerken voor de geplande MZI's langs de Afsluitdijk een alternatieve inpassing zal moeten worden gezocht.

Conclusies visie Waddenwerken

De analyse voor de visie WaddenWerken heeft zich geconcentreerd op een locatie nabij Den Oever, omdat de BEC daar is gepland, en geïntegreerd is in het ontwerp. Tabel 4.7 vat de evaluatie samen voor de visie WaddenWerken.

Evaluatie Locatie Blue Energy Centrale – Waddenwerken									
aspect	Den Oever			Breezanddijk			Kornwerderzand		
Efficiëntie									
	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW
Zoutgehalte innamepunt	+	+	+	X	X	X	X	X	X
Slibgehalte innamepunt	±	±	±	X	X	X	X	X	X
Onderhouds-baggerwerk	+	±	±	X	X	X	X	X	X
Impact									
Morfologische impact	+	+	-	X	X	X	X	X	X
Ecologische impact	+	+	-	X	X	X	X	X	X
Betekenis kleuren en symbolen									
+	meest geschikt								
±	mogelijk geschikt (met significante aanpassingen)								
-	minst geschikt								
X	Niet relevant want niet in lijn met het visieontwerp								

Tabel 4.7

Overzicht van de expert evaluatie voor de visie WaddenWerken

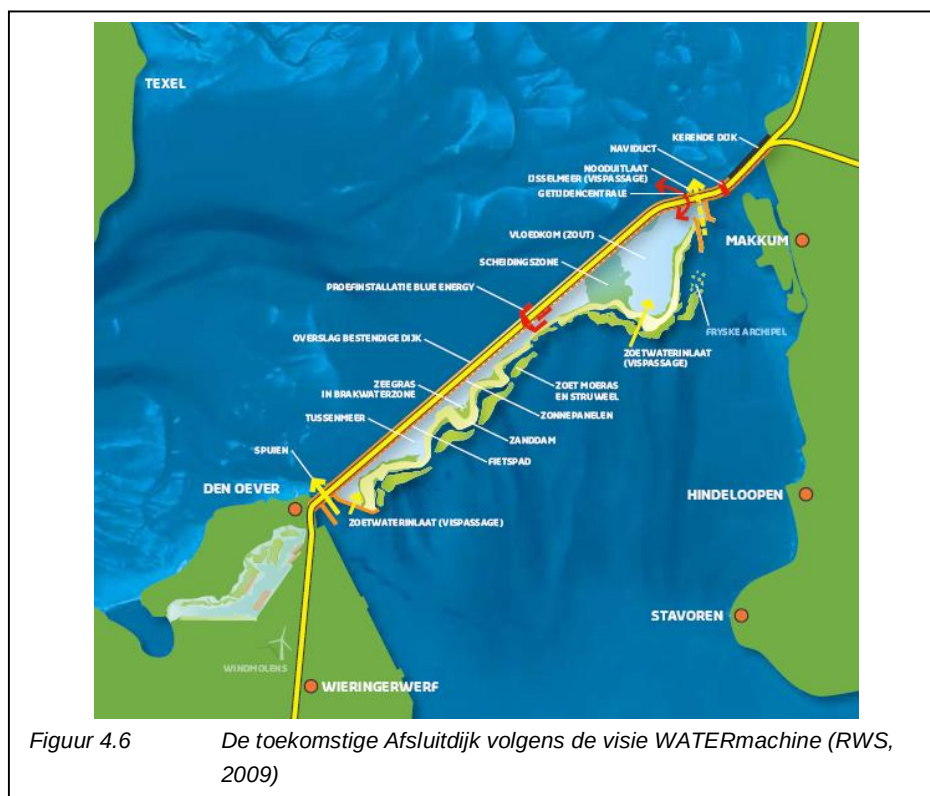
De belangrijkste bevindingen en afwegingen zijn:

- De BEC is zodanig in het ontwerp opgenomen dat een goede scheiding aanwezig is tussen zoetwater, zoutwater en brakwater. Doordat de spuisluizen bij Den Oever minimaal gaan spuien, wordt verwacht dat het zoutgehalte in de buurt van Den Oever voldoende hoog zal zijn;
- Het slibgehalte in het water dat ingenomen wordt, is waarschijnlijk vrij hoog en vormt mogelijk een probleem;
- Het spuien om de geulen open te houden, is waarschijnlijk ook belangrijk om de inname punten vrij te houden van slib. Tijdens spuien zal dan echter het zoutgehalte bij het innamepunt voor zoutwater te ver dalen en zal de BEC stil komen te liggen;
- Het ontwerp is niet ingericht voor een grote BEC. De debieten voor lozing met brakwater uit een grote BEC zijn dusdanig groot dat het beoogde karakter van Brakbaai niet te handhaven zal zijn;

- Voor een pilot is de locatie Den Oever het meest geschikt. Bij plaatsing van een kleine BEC moet het lozingspunt van brakwater ver genoeg worden geplaatst van het lozingspunt voor zoetwater in Brakbaai om de beoogde zoet-zout overgang in stand te houden;
- Ondanks dat een brakwatergebied als ecologisch arm wordt gezien is de ecologische impact van een middelgrote centrale als positief beoordeeld omdat het lozen van het brakke water als gunstiger wordt gezien dan het lozen van zoet water, en omdat er wordt verwacht dat het lozingspunt vrij eenvoudig zodanig kan worden gepositioneerd dat in samenwerking met de spui een stabiele overgang van zout naar zoet water kan worden gerealiseerd.

4.1.5 BEC in visie WATERmachine

In de visie WATERmachine zijn aan de Waddenzeezijde geen grootschalige ontwikkelingen gepland, aan de IJsselmeerzijde daarentegen wel. In dit plan is een 25 MW versie van een BEC opgenomen. Het plan behorende bij de visie is deels ingericht om een optimale locatie voor de BEC te creëren.



Veranderingen ten opzichte van de huidige situatie die relevant kunnen zijn voor een BEC zijn:

- Het spuicomplex in Kornwerderzand wordt omgebouwd tot een gemaal annex getijde centrale met een continue capaciteit van 800 m³/s (in-uit);
- Spuien via Den Oever blijft onder vrij verval, maar kan langer door een peilopzet in het IJsselmeer met 0,25m;
- Aanleg van een zoute vloedkom aan de zijde van het IJsselmeer;

- Aanleg van een brakwater tussenmeer (samen met de vloedkom ter grootte van ongeveer 50 km²);
- Continue lozingen van brakwater vanuit de BEC via het brakwatermeer;
- 160 miljoen m³ zandwinning van drie locaties in het IJsselmeer;
- Aanpassing van het spuibeleid (Tabel 4.8).

spuiregime	Kornwerderzand	Den Oever	
Oude situatie	Wens verdeling: 1/3 Jaargemiddelde: 205 m ³ /s	Wens verdeling: 2/3 Jaargemiddelde: 245 m ³ /s	n.v.t.
Nieuwe situatie Lage afvoeren	Gebruiken als getijde centrale, niet als spuimiddel en als afvoer van brak water uit de BEC	Zeër kleine volumes: spuien van overtollig water (niet gebruikt door BEC)	n.v.t.
Nieuwe situatie Gem. afvoeren	Gebruiken als getijde centrale, niet of nauwelijks als spuimiddel, wel als afvoer van brak water uit de BEC	spuien van overtollig water (niet gebruikt door BEC); langer (meer) spuien is mogelijk door peilopzet IJsselmeer	n.v.t.
Nieuwe situatie Hoge afvoeren	Gebruiken als gemaal: IJsselmeerwater afvoeren door pompen (max 1000 m ³ /s continu); BEC mogelijk niet op volle capaciteit om benodigde capaciteit om brak water af te voeren te beperken	Maximale capaciteit; langer (meer) spuien is mogelijk door peilopzet IJsselmeer	n.v.t.
Nieuwe situatie extreme afvoeren	Gebruiken als gemaal: IJsselmeerwater direct afvoeren door pompen (max 1000 m ³ /s continu); BEC niet op volle capaciteit of buiten gebruik om benodigde capaciteit om brak water af te voeren te beperken	Maximale capaciteit; langer (meer) spuien is mogelijk door peilopzet IJsselmeer	n.v.t.

Tabel 4.8 Voorgenomen aanpassingen in spuibeleid afgeleid uit de visie WATERmachine (RWS, 2009)

Bij hoge en extreme afvoeren zal water vanuit het IJsselmeer direct via Kornwerderzand gespuid gaan worden. De afvoermogelijkheid vanuit de vloedkom is dan mogelijk beperkt. De lozing van de BEC zal dan ook beperkt moeten zijn. Dit geldt vooral naarmate de BEC groter zal zijn (voor 100 à 200 MW). Een mogelijkheid om met de BEC dan brakwater direct op de Waddenzee te lozen, zou dit kunnen ondervangen, en levert een additionele afvoercapaciteit van zoetwater.

Omdat de plaatsing van de BEC geïntegreerd is in de lay-out van de visie WATERmachine concentreert de evaluatie zich op de voorgestelde locatie nabij Breezanddijk.

Evaluatie op basis van efficiëntie aspecten

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: het zoutgehalte bij het innamepunt voor zoutwater, het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en zoutwater en onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten.

Het zoutgehalte nabij het innamepunt voor zoutwater

In de visie WATERmachine zal voornamelijk worden gespuid via Den Oever. In de buurt van Den Oever zal daarom het gemiddelde zoutgehalte in de Waddenzee afnemen. Aan de kant

van Kornwerderzand en in de Doove Balg zal het zoutgehalte naar verwachting juist toenemen. Inname van zoutwater bij Kornwerderzand of Breezanddijk lijkt daarom het meest geschikt. Echter, bij het opschalen naar een grotere BEC, kan bij Kornwerderzand al snel het risico van recirculatie optreden tussen het lozingspunt van brakwater en het innamepunt voor zoetwater. Het risico van recirculatie is veel kleiner bij Breezanddijk, en dus gaat binnen de visie WATERmachine de voorkeur uit naar deze locatie.

Het slibgehalte bij de inname punten voor zoetwater en zoutwater

Op basis van een analoge analyse als gegeven voor de huidige situatie lijkt vanuit het oogpunt van het slibgehalte, inname van zoutwater nabij Breezanddijk het meest voor de hand liggend. Een locatie bij Kornwerderzand wordt het minst gunstig geacht. Aanbevolen wordt om metingen uit te voeren om deze verwachting te toetsen.

Onderhoudsbaggerwerk bij inname punten

Om mogelijk onderhoudsbaggerwerk bij de inname punten zo minimaal mogelijk te houden, is inname vanuit een bestaande geul met relatief hoge stroomsnelheden het gunstigst. Een innamepunt in de Doove Balg vanaf Breezanddijk is daarvoor een geschikte keuze.

Voor de plaatsing van het innamepunt voor zoetwater in het IJsselmeer is op te merken dat daarvoor leidingen nodig zijn om de brakwater vloedkom over te steken. Inname vanaf Breezanddijk lijkt niet nadelig ten opzicht van de andere locaties.

Evaluatie op basis van mogelijke impacts

De belangrijkste aspecten die een rol spelen zijn: de morfologische effecten in de Waddenzee en de ecologische effecten in de Waddenzee.

Morfologische effecten in de Waddenzee

Bij de implementatie van de visie WATERmachine wordt weinig morfologische impact verwacht van de BEC. Geulvorming wordt verwacht in de vloedkom nabij het lozingspunt. Dit is afhankelijk van het lozingsdebiet en het ontwerp van de uitlaat. Daarnaast wordt aanslibbing in de vloedkom verwacht van ongeveer 1 miljoen m³/jaar. Dit is slechts beperkt afhankelijk van de grootte van de BEC en de gebruikte voorzuivering.

Ecologische effecten in de Waddenzee

Bij plaatsing van de BEC bij Breezanddijk, zoals aangegeven in de plannen, worden geen relevante negatieve ecologische effecten verwacht. Er zal wel aandacht moeten worden besteed aan de waterkwaliteit in de vloedkom, en aan de relatie tussen het brakwater debiet afkomstig van de BEC en de geplande zoet-zout overgang. Voor de zoet-zout overgang lijkt het het meest geschikt de uitlaat te plaatsen aan de relatief zoute kant van de scheidingszone die in het plan staat aangegeven. Dit wordt belangrijker naarmate het uitlaatdebiet groter wordt.

Er is verder opgemerkt dat het verhogen van het IJsselmeerpeil invloed zal hebben op flora en fauna rond het IJsselmeer.

Conclusies WATERmachine

De analyse van de visie WATERmachine concentreerde zich op een locatie nabij Breezanddijk, omdat de BEC daar is gepland, en geïntegreerd is in de lay-out van het ontwerp. Tabel 4.9 geeft een samenvatting van de uitgevoerde evaluatie.

Evaluatie Locatie Blue Energy Centrale – WATERmachine									
aspect	Den Oever			Breezanddijk			Kornwerderzand		
Efficiëntie									
	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW	 pilot	 20 MW	 200 MW
Zoutgehalte innamepunt	X	X	X	±	±	±	X	X	X
Slibgehalte innamepunt	X	X	X	+	+	+	X	X	X
Onderhouds-baggerwerk	X	X	X	+	±	±	X	X	X
Impact									
Morfologische impact	X	X	X	+	+	+	X	X	X
Ecologische impact	X	X	X	+	+	±	X	X	X
Betekenis kleuren en symbolen									
+	meest geschikt								
±	mogelijk geschikt (met significante aanpassingen)								
-	minst geschikt								
X	Niet relevant want niet in lijn met het visieontwerp								

Tabel 4.9 Overzicht van de expert evaluatie voor de visie WATERmachine

De belangrijkste bevindingen en afwegingen zijn:

- De grote volumes zoetwater die via Den Oever worden gespuid, kunnen voor een verlaging van het zoutgehalte zorgen bij Breezanddijk. Richting Kornwerderzand zal het zoutgehalte hoger zijn;
- Ondanks dat qua slibgehalte plaatsing bij Breezanddijk het meest geschikt is, kan slib ook daar een groot probleem zijn voor de haalbaarheid van de BEC;
- Met een pilot BEC zal dichtbij de dijk water ingenomen kunnen worden. Bij een kleine en grote BEC, zal in de getijde geul ingenomen moeten worden, en wordt onderhoudsbaggerwerk mogelijk belangrijker;
- Mogelijke morfologische en ecologische impacts blijven beperkt tot de vloedkom, behalve voor een grote BEC, waar een grote lozing brakwater waarschijnlijk zal zorgen dat de vloedkom vrijwel geheel brak zal worden. Van een dergelijk brak gebied wordt verwacht dat het ecologisch relatief arm zal zijn. Wel zorgt het voor een geleidelijke overgang tussen het zoete water van het IJsselmeer en het zoute water van de Waddenzee. Migratie van vis is daarmee geholpen. Ook ontstaan naar verwachting aanmerkelijke geulen bij het lozingspunt van een BEC, en nabij het innamepunt in de Waddenzee.

Overige opmerkingen

Voor de plaatsing van het innamepunt voor zoetwater in het IJsselmeer is op te merken dat daarvoor leidingen nodig zijn om de vloedkom gevuld met brakwater over te steken.

4.2 Geotechnische haalbaarheid valmeer

Het consortium Natuurlijk Afsluitdijk heeft een visie uitgewerkt, waarin onder meer een zogenaamd valmeer is voorzien in het IJsselmeer (RWS, 2009). Het valmeer heeft tot doel energie op te wekken. Het valmeer bestaat in het kort uit de aanleg van een dijk rond een cirkelvormig, uit te baggeren meer met een diepte van 20 m en een oppervlakte van 7 km². In de kern van de dijk is een wand van cementbentoniet geplaatst.

Een valmeer werkt als een omgekeerd stuwmeer. In tijden met een overschot aan elektriciteit, bijvoorbeeld 's nachts, wordt water uit het valmeer opgepompt en geloosd op het IJsselmeer. Bij een toename in de vraag naar elektriciteit, en dus een tekort aan elektriciteit, stroomt water uit het IJsselmeer naar het valmeer en wordt gelijktijdig een turbine aangedreven en stroom opgewekt. Het gevolg is dat er forse fluctuaties optreden in de waterstand van het valmeer van ruim vijftien meter.

Voor de aanleg van een valmeer op de beoogde locatie is Deltares gevraagd een kwalitatieve geotechnische en geohydrologische risicoanalyse op te stellen voor de haalbaarheid van dit plan. De volgende onderdelen zijn in de risicoanalyse onderzocht:

1. Geologische en geohydrologische uitgangspunten
2. Ontwerp, aanleg en onderhoud van de ringdijk
3. Ontwerp en aanleg van de cementbentonietwand
4. Duurzaamheid / levensduur van de constructie

Voor het opstellen van de risicoanalyse is een geologische opinie opgesteld (zie Bijlage 3). Daarnaast is een interne expertsessie gehouden waarin de geotechnische en geohydrologische risico's en de haalbaarheid van het plan kwalitatief zijn onderzocht.

4.2.1 Uitgangspunten valmeer

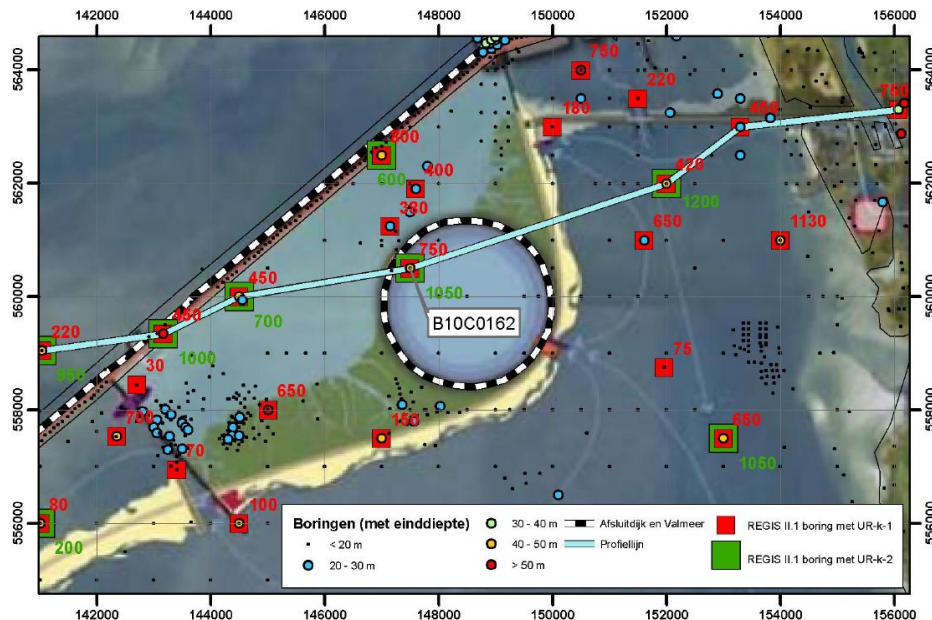
Geometrische uitgangspunten

Het valmeer is een brakwaterbassin met een diepte van circa 20 m, omringd door een dijk van 5 meter hoog. De locatie van het valmeer is beoogd in het IJsselmeer, tussen de Afsluitdijk en de Friese IJsselmeerkust. Rond het valmeer is een zoekgebied aangegeven waarbinnen de gegevens van de ondergrond zijn verzameld (Figuur 4.7). De locatie van het valmeer is afgeleid uit de afbeelding in het rapport (Deltares, 2008).

Uit het plan zijn verder de volgende uitgangspunten voor de constructie af te leiden:

- Aanwezigheid van aaneengesloten kleilagen om te zorgen voor een goede onderafsluiting van het valmeer;
- Toepassing van een wand van cementbentoniet in de kern van de ringdijk tot een diepte van ongeveer NAP-40 m om te zorgen voor een goede zijafsluiting van het valmeer;
- Toepassing van HDPE-folie (lengte niet aangegeven) in de wand van cementbentoniet, eveneens om te zorgen voor een goede zijafsluiting;
- De afmetingen van het valmeer zijn:
 - oppervlakte ongeveer 7 km²;
 - omtrek ongeveer 9,4 km;
 - diameter ongeveer 3,0 km;
 - diepte ongeveer 20 m.

Figuur 4.7 geeft de locatie van het valmeer weer, evenals de locaties van uitgevoerde grondboringen (de gekleurde vierkantjes) en de ligging van het geologische profiel (de lichtblauwe lijn).



Figuur 4.7 Ligging valmeer in het IJsselmeer, met dikten van de kleiige eenheden 'Urk klei 1' en 'Urk klei 2' in centimeters

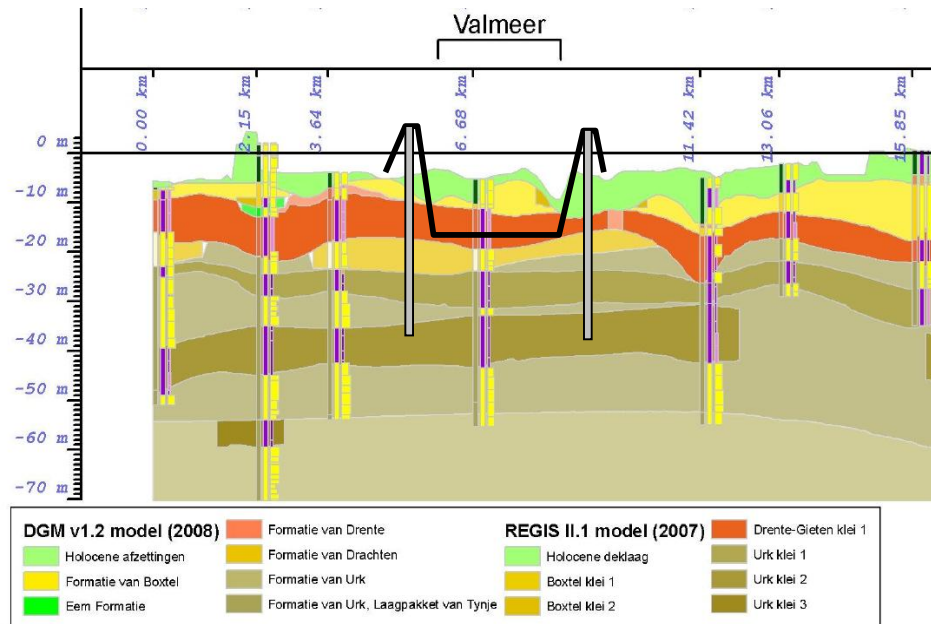
Geologische uitgangspunten

Op basis van de in de DINO database aanwezige ondergrondgegevens is een analyse gemaakt van de aanwezigheid en de laterale verspreiding van afsluitende lagen, die voor de onderafsluiting van het valmeer moeten zorgen (zie bijlage 2B). In totaal is in het plangebied 1 diepe (> 40 m) boring aangetroffen in de database. Op basis van deze diepe boring en de omliggende ondiepe boringen is een profiel gemaakt in het Digitaal Geologisch Model (DGM) van TNO. Ten slotte is op basis van *expert judgement* een verwachting gegeven van de aanwezigheid en de kwaliteit van de afsluitende (klei) lagen.

Het geologische profiel uit het DGM is weergegeven in Figuur 4.8. Tevens is schematisch het valmeer weergegeven inclusief de ringdijk en de wand van cementbentoniet. Uit de figuur is af te leiden dat de constructie gebruik maakt van de onderafsluiting door de Formatie van Urk, bestaande uit de geologische kleiige eenheden 'Urk klei 1' en 'Urk klei 2'. Deze kleilagen moeten uitwisseling van water tussen het valmeer en de ondergrond tegengaan. Aanvulling van het water in het valmeer met grondwater leidt tot een vermindering van de efficiency van het valmeer.

Eenvoudige handberekeningen wijzen uit dat voor de haalbaarheid van dit ontwerp deze onderafsluiting over het gehele oppervlak van het valmeer vereist is. De kleien moeten slecht doorlatend zijn. Gezien de beperkte hoeveelheid beschikbare informatie, slechts 1 boring op deze diepte ter plaatse van het voorziene valmeer, bestaat een grote mate van onzekerheid op dit punt. De hoofdconclusie van de geologische opinie op basis van de gegevens van de DINO database luidt: "Door het ontbreken van voldoende boorgegevens en analyses van grondmonsters in de locatie valmeer is het niet mogelijk om met enige zekerheid uitspraken te doen over voorkomen, dikte en eigenschappen van de kleilagen in de ondergrond van het valmeer op diepten gelegen tussen circa NAP -20 m en NAP -40 m."

De aanwezigheid van een aaneengesloten slecht waterdoorlatende laag over de gehele oppervlakte van het valmeer is een belangrijke randvoorwaarde. Voor het aangegeven bodemscenario is de haalbaarheid van het valmeer nader onderzocht.



Figuur 4.8 Geologische doorsnede DGM van TNO

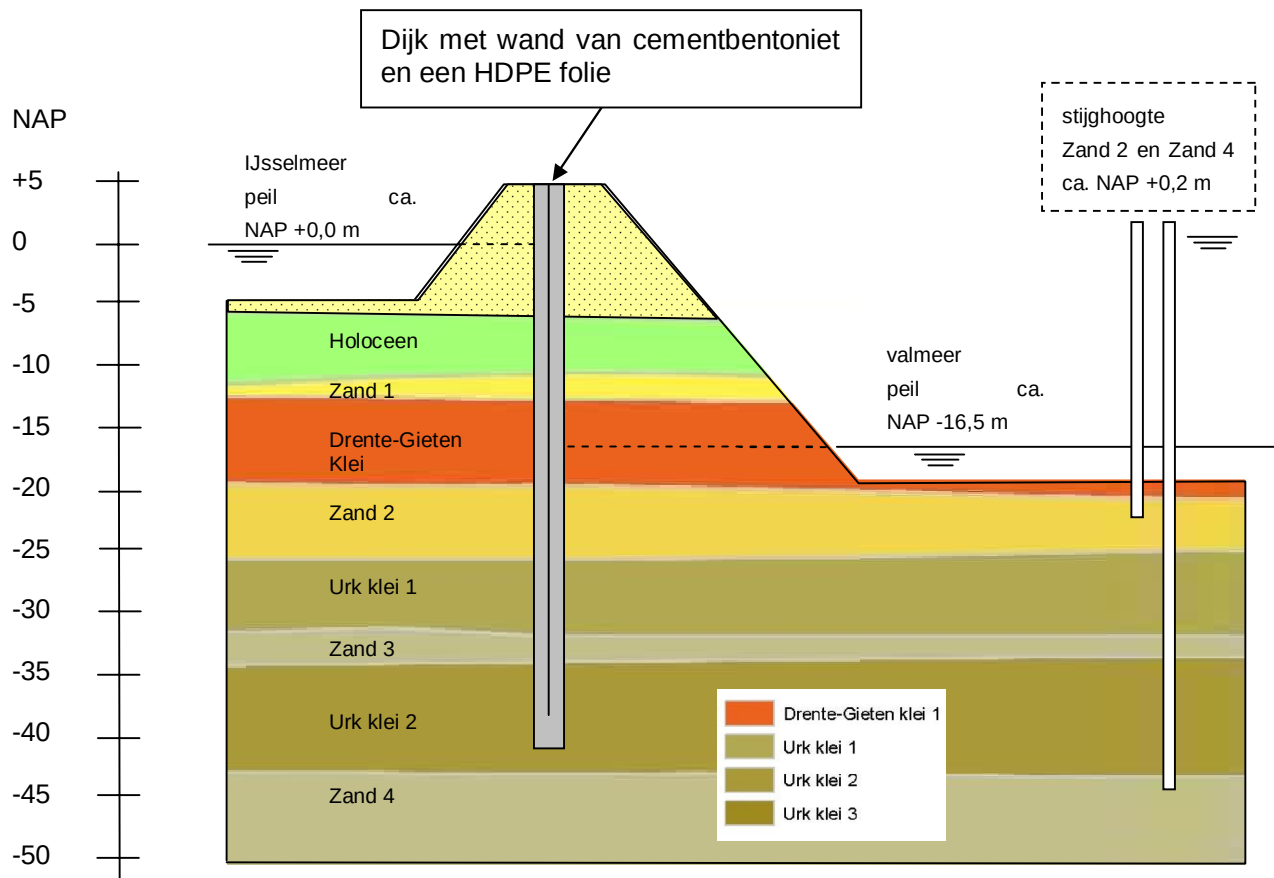
Geohydrologische uitgangspunten

Uit het plan van het consortium en de grondwaterkaart van Nederland kunnen een aantal geohydrologische uitgangspunten worden herleid. Figuur 4.9 is gemaakt om het ontwerp van de ringdijk met de wand van cementbentoniet te verduidelijken. In de figuur is eveneens de geïnterpoleerde geologische bodemopbouw aangegeven, ontleend aan DGM, evenals de stijghoogten (indicatief) in de diepere zandlagen. De wand van cementbentoniet dient volgens dit ontwerp, gegeven de geologische opbouw, te worden aangelegd tot in de laag 'Urk Klei 2' (Figuur 4.9).

Bekeken is in hoeverre het risico van opbarsten van aanwezige kleilagen in de ondergrond kan optreden. Bij een aanlegdiepte van NAP-20 m en een aangenomen diepst mogelijk waterstand van NAP-16,5 m, is een verticale beschouwing uitgevoerd naar het krachten evenwicht. Uit de analyse blijkt dat de wand van cementbentoniet tot tenminste in de laag 'Urk klei 2', gelegen op een diepte van ongeveer NAP-40 m, moet reiken om opbarsten van de bodem te voorkomen. Voorwaarde is dan wel dat de hydraulische weerstand van de laag 'Urk klei 2' aanmerkelijk groter is dan van de laag 'Urk klei 1'. Is dat niet het geval dan kan opbarsten vanuit de laag 'Zand 3' plaatsvinden. Het gevaar van opbarsten van de bodem verdient dan ook bij het ontwerp de nodige aandacht.

Een ander risico vormt het waterbezwaar, toestroming van water via de ondergrond naar het valmeer. Een indicatieve berekening is daartoe uitgevoerd. Bij de berekening is de bijdrage van stroming door de wand van cementbentoniet (zijkant) en de bijdrage van kwel door de laag 'Urk Klei 2', zijnde de onderkant van de constructie, op het waterbezwaar onderzocht. Een handberekening op basis van indicatieve parameters (Bijlage 2A) wijst uit dat de bijdrage van stroming door de wand van cementbentoniet vermoedelijk een factor 2 tot 20 lager zal

zijn, dan de bijdrage van kwel door de laag 'Urk Klei 2'. Vermoedelijk is het effect van een bijdrage aan de stijging van het waterpeil in het Valmeer orde grootte 5 à 10 mm/dag.



Figuur 4.9 Schetsontwerp ringdijk met wand van cementbentoniet rond het valmeer

4.2.2 Ontwerp, aanleg en onderhoud van de ringdijk

Als gevolg van sterke en snelle peilfluctuaties in het valmeer is bij de aanleg en het gebruik van het valmeer het risico aanwezig van het optreden van zettingsvloeiing en ongecontroleerde bresvloeiing. Dit treedt vooral op als de taludhellingen niet flauw genoeg zijn. Uit een analyse van nabij gelegen sonderingen volgt dat er zeker tot een diepte van -10 m NAP los gepakte zandlagen aanwezig zijn die gevoelig zijn voor zettingsvloeiing. De sonderingen reiken echter maar tot -12 á -15 m NAP. Uit de geologische verkenning volgt dat er ook op grotere diepte matig fijne zandlagen voorkomen, die mogelijk gevoelig zijn voor zettingsvloeiing. Lokaal aanwezige kleilagen kunnen de gevoeligheid voor zettingsvloeiing verminderen. Hier is echter niet veel over bekend.

Het ontgraven bij de aanleg van het valmeer kan ook leiden tot ongecontroleerde bresvloeiing. Zonder nadere informatie is het verantwoord om uit te gaan van een onderwater talud van 1:7. Het consortium Natuurlijk Afsluitdijk heeft geen informatie afgegeven ten aanzien van taludhellingen die gehanteerd gaan worden.

De ringdijk wordt, zoals aangegeven door het consortium, aangelegd tot een hoogte van NAP+5 m. Dit lijkt voldoende gezien de hoogte van de Friese IJsselmeerdijken in de omgeving. Dit betekent dat er geen substantiële overslag optreedt bij een storm met een herhalingsstijd van 1 keer in de 4.000 jaar. Naar verwachting zal de dijk worden gebouwd met

het materiaal dat vrijkomt bij het graven van het valmeer. Het ligt dan voor de hand om een ringdijk te maken bestaande uit een zandkern met daarop een voldoende dikke bekledingslaag van klei of, indien er te weinig klei beschikbaar is, van keileem.

Ten gevolge van de wisselende waterstand in het valmeer, kan er tevens micro-instabiliteit van het binnentalud optreden. Daardoor kan mogelijk zand uitspoelen, of de bekledingslaag kan worden opgedrukt of afgeschoven. Zonder nadere informatie is het raadzaam om uit te gaan van een dijktaalud met een helling van maximaal 1:4 en een voldoende dikke bekleding, met een dikte van 1 m tot 2 m. Overwogen kan worden om een binnenberm aan te leggen. Uit aanvullend grondonderzoek moet blijken of de uitkomende grond kan worden hergebruikt om de ringdijk aan te leggen.

4.2.3 Ontwerp en aanleg van de cementbentonietwand

In principe is de aanleg van een wand van cementbentoniet een bewezen techniek. De waterdichtheid van de wand als geheel is afhankelijk van een aantal factoren. De verticaliteit van de individuele panelen kan beter worden gegarandeerd bij toepassing van een diepwandfrees dan bij het ontgraven met een grijper. Verder dient vooraf laboratoriumonderzoek te worden uitgevoerd naar de invloed van opgeloste stoffen in het water, zoals in de diepere grondlagen aanwezig zout grondwater, op het gedrag van de suspensie van cementbentoniet in de vloeibare fase (tijdens de aanleg) en in vaste fase (tijdens gebruik van het valmeer).

In het ontwerp van de visie staat aangegeven dat HDPE folie wordt toegepast. De lengte is niet aangegeven. Toepassen van een HDPE folie kan in de praktijk lastig zijn. Slotverbindingen moeten zorgen voor aansluitende panelen. In de praktijk zijn lengtes tot 15 m gangbaar. Tevens staat aangegeven dat een folie tot ongeveer 25 m beneden maaiveld technisch haalbaar is, mits uitgevoerd onder een strikt protocol. In het voorliggende ontwerp houdt dat in dat de folie wellicht niet over de gehele hoogte van de wand kan worden aangebracht. Als de combinatie aangeeft een folie over de gehele wandhoogte te willen toepassen, dan kunnen er problemen in de uitvoering worden verwacht met het aanbrengen van de folie. Door het aanbrengen van een folie tot in de laag 'Urk Klei 1' kan de toestroming van water vanuit de laag 'Zand 1' en de laag 'Zand 2' worden beperkt. Uit ingebrachte geologische expertise blijkt dat over de dikte en de laterale verbreiding van de laag 'Urk Klei 1' veel onzekerheid bestaat. Het nut en de mogelijke effectiviteit van de toepassing van een folie zijn op basis van de voorliggende gegevens niet in te schatten. Gezien de uitkomst van de indicatieve berekening naar de grondwaterstroming door de wand van cementbentoniet en door de kleilaag, zal een folie weinig bijdragen aan het verminderen van het waterbezwaar.

4.2.4 Duurzaamheid / levensduur van de constructie

Indien de wand van cementbentoniet voor afdoende beperking van de kwel zorgt, is alleen het fluctuerende waterpeil in het valmeer een potentieel risico. Door een snel dalende waterstand kan micro-instabiliteit optreden, zoals eerder aangegeven. Als hier in het ontwerp rekening mee wordt gehouden is de dijk duurzaam, mits de wand van cementbentoniet goed blijft functioneren. Ook het onderwatertalud moet flauw genoeg zijn, zie voorgaande.

Bij de review is het begrip duurzaam hier vernauwd tot het begrip levensduur. Andere milieuaspecten zijn hier niet beschouwd. Voor de duurzaamheid van de wand van cementbentoniet is het van belang dat de wand onder de grondwaterstand blijft. Bij langere periodes van droogstand kan de wand namelijk uitdrogen, wat tot scheurvorming en verminderde waterdichtheid leidt. Vooral aan de kant van het valmeer dienen eventueel aanvullende maatregelen te worden getroffen. Daarnaast dient het ontwerp van de ringdijk zo

robuust te zijn dat er door de belastingswisselingen door het vullen en legen van het valmeer geen verplaatsingen optreden die kunnen leiden tot scheurvorming in de wand van cementbentoniet. De beschikbare gegevens ten aanzien van het ontwerp van het consortium Natuurlijk Afsluitdijk bevatten geen taludhellingen, wel een dijkhoogte.

4.3 Review van een getijdenbekken

In de visie WATERmachine van het consortium Afsluitdijk 2100 (AD21) is een getijdencentrale opgenomen. In het basisplan is een 'tussenmeer' met een 'vloedkom' voorzien ten zuiden van de Afsluitdijk. Dit tussenmeer staat in verbinding met de Waddenzee door de getijdencentrale. Energieopwekking vindt plaats door benutting van de getijdenstroming, terwijl in tijden van grote afvoeren ook water weggepompt kan worden. Naar aanleiding van vervolgvragen van RWS zijn enkele varianten op het basisplan uitgewerkt.

Een uitgebreide beschrijving van de varianten, de uitgangspunten van het consortium en een theoretische benadering van de opbrengst van een getijdencentrale worden behandeld in Bijlage 3. Ook de rekenmethode gehanteerd door het consortium wordt hierin toegelicht.

Een aantal aspecten in de technische review van deze centrale komen aan bod. Zijn de juiste uitgangspunten en randvoorwaarden gehanteerd? Zijn de juiste parameters gekozen en kloppen de gehanteerde kentallen? Uiteindelijk zal een antwoord worden gegeven op de vraag "Klopt de som?" Met andere woorden, levert de getijdencentrale inderdaad de berekende hoeveelheid energie op volgens de AD21-visie.

4.3.1 Waterstand in het IJsselmeer

In het IJsselmeer is momenteel het streefpeil in de zomer NAP -0,2 m en in de winter NAP -0,4 m. Het consortium AD21 kiest in de toekomst voor een peilverhoging in het IJsselmeer met 0,25 m, onafhankelijk van een mogelijk toekomstige stijging van de zeespiegel als gevolg van klimaatontwikkeling.

De keuze voor een 0,25 m hoger waterpeil op het IJsselmeer is hydraulisch gezien de belangrijkste keuze die AD21 maakt. Immers het waterpeil op het IJsselmeer bepaalt hoeveel water er onder vrij verval gespuid kan worden en hoeveel water er verpompt moet worden, en heeft daarmee grote invloed op de uitwerking van de herinrichtingsplannen en op de kosten en de opbrengsten van de getijdencentrale. Een uitgebreide toelichting bij deze keuze ontbreekt.

Het toekomstige peil van het IJsselmeer is van groot belang voor een groot deel van de Nederlandse waterhuishouding en voor de zoetwatervoorziening. Een hogere maximum waterstand op het IJsselmeer biedt mogelijkheden voor de vorming van een grotere zoetwatervoorraad. Bij een hoger peil neemt de capaciteit van de bestaande spuisluizen aanzienlijk toe (vooral door het grotere verval en het grotere spuienster), waardoor bestaande spuisluizen nog lang toereikend zouden kunnen zijn. Daar staat tegenover dat het uitslaan van water uit de laaggelegen gebieden rond het IJsselmeer bij een hoger waterpeil in het IJsselmeer meer inspanning kost. Ook zal aandacht nodig zijn voor een mogelijk hogere, ongewenste kwel en er zullen maatregelen moeten worden getroffen om de veiligheid tegen overstroming te waarborgen. In een degelijke onderbouwing van de keuze voor een peilopzet van 0,25 m zoals AD21 beoogd zouden daarom al deze facetten uitgebreid meegenomen moeten worden.

4.3.2 Waterstand en getijslag op de Waddenzee

In de berekeningen van AD21 wordt, uitgaande van de huidige gemiddelde waterstand wat ongeveer NAP niveau is, rekening gehouden met een toekomstige stijging van de zeespiegel als gevolg van klimaatverandering. Uitgangspunt is volgens de rapportage van AD21 het W+ klimaatscenario uit KNMI-06. In alle berekeningen van energieverbruik (bij pompen) en energieopwekking (bij turbinen) en in berekeningen van spui- en pomphoeveelheden hanteert AD21 echter een scenario waarbij de stijging van de zeespiegel later in de tijd begint dan in het W+ scenario (Tabel 4.10). De keuze voor dit uitgestelde scenario leidt tot een hogere energieproductie en een lagere energieconsumptie, met name gedurende de eerste helft van deze eeuw.

Jaar	W+ scenario van KNMI (m)	AD21 scenario (m)	Vershil (m)
2015	0,10	0	-0,10
2050	0,40	0,25	-0,15
2070	0,60	0,50	-0,10
2090	0,80	0,75	-0,05
2100	0,85	0,85	-0,00

Tabel 4.10 Scenario's zeespiegelstijging

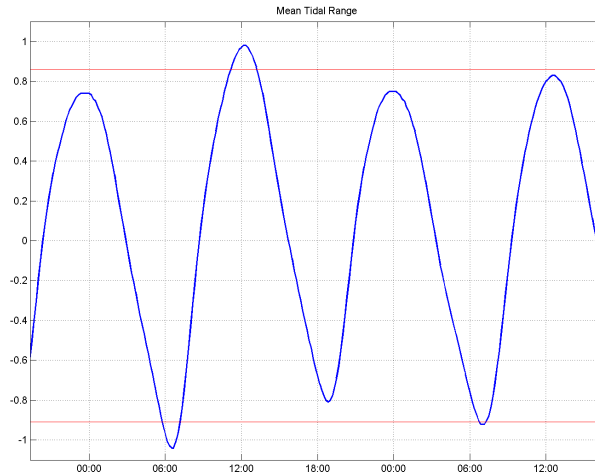
De lokale getijbeweging op de Waddenzee bij Kornwerderzand wordt voorgesteld als een sinusvormige beweging met dubbele amplitude van 1,8 m en een periode van 12,0 uur (Figuur 4.10). De slag van 1,8 m is enigszins hoger dan de gemiddelde getijbeweging van 1,77 bij Kornwerderzand, zoals die volgt uit de getijtafel (Tabel 4.11).

De variatie in de getijslag is bij het astronomische getij ruim 10% (om het gemiddelde) ten gevolge van springtij-doodtij variaties. Bovendien vertoont het getij een duidelijke dagelijkse ongelijkheid. Deze variatie werkt ook door in de getijslag binnen en in het energiehoogteverschil ΔH over de getijdencentrale. Omdat de energieopbrengst gerelateerd is aan $\Delta H^{1.5}$ zou de uitkomst van de berekeningen nauwkeuriger zijn geweest wanneer van een variatie in het getij was uitgegaan. Maar gezien de verkennende aard van de berekeningen is de aanname van 1,8 m getijslag zeker acceptabel, ook gezien andere, meer effect hebbende uitgangspunten voor de berekeningen.

De aangenomen getijperiode van 12 uur is aan de korte kant, maar speelt nauwelijks door in de gehanteerde rekenmethoden, evenmin als de aangenomen sinusvorm van het getij. Er is voorts geen rekening gehouden met windeffecten in de vorm van windopzet of afwaaiing (die lokaal tot 1 m afwijking ten opzichte van het astronomische getij kunnen leiden). Dit is in deze fase zeker te rechtvaardigen.

	Springtij	Doodtij	Gemiddeld getij
Gemiddeld Hoog Water (m NAP)	+0,98	+0,73	+0,86
Gemiddeld Laag Water (m NAP)	-0,96	-0,80	-0,91
range (m)	1,94	1,53	1,77
Gemiddelde waterstand (m NAP)			+0,05

Tabel 4.11 Astronomisch getij bij Kornwerderzand



Figuur 4.10 Getijbeweging bij Kornwerderzand bij gemiddelde getijcondities

4.3.3 Waterstand en getijslag op vloedkom en tussenmeer

Zolang er niet gespuid wordt via de getijdencentrale Kornwerderzand is de waterstand en de getijslag in de vloedkom en in het tussenmeer geheel afhankelijk van de getijbeweging in de Waddenzee en het operationele beheer van de centrale. Bij tweezijdig turbineren en gelijke efficiëntie en stromingsweerstand van de pompturbines in beide stroomrichtingen zal de gemiddelde waterstand op het bekken ongeveer gelijk zijn aan de gemiddelde waterstand op de Waddenzee ter plaatse. Hier wordt ook in de AD21 berekeningen vanuit gegaan.

De getijslag op het bekken wordt uitgerekend zoals is aangegeven in Bijlage 3, Paragraaf 2.3. Er wordt uitgegaan van een constant waterdebiet dat via de pompturbines in- en uitstroomt. Dit debiet vermenigvuldigd met de tijdsperiode en gedeeld door het bekkenoppervlak levert de getijslag op voor het bekken. Voor de basisvariant is dat 0,87 m, en daarbij wordt – uitgaande van een ‘handmatige’ verschuiving van de veronderstelde sinusvormige beweging van de binnenwaterspiegel – een ‘gewogen’ gemiddeld verval berekend van 0,67 m. Het vaste inlaat- en uitlaatvolume is het resultaat van de gekozen periode van 4 u inlaten (of uitlaten) per getijcyclus van 12 uur, en een gekozen vast debiet van 27,5 m³/s per turbine.

Over dit niet nader toegelichte debiet van 27,5 m³/s kan het volgende gezegd worden. Gerekend wordt met een diameter van het turbinehuis van 2,5 m (keuze AD21). De opening voor doorstroming bedraagt dan 4,9 m². Zonder turbine is het debiet bij het rekenval van 0,67 m en een afvoercoëfficiënt $\mu = 1$ à 1,2 (het laatste alleen in geval van een zeer goed uitgevoerde venturi vorm) gelijk aan 17,9 à 21,5 m³/s per turbinegang. Wanneer de turbine in bedrijf is, wordt er energie onttrokken, en daalt het debiet aan doorstroming. Een bovengrens van het debiet lijkt dan 15 m³/s per turbine te zijn. Een lager debiet geeft vervolgens in de berekening van AD21 een kleinere getijslag op het bekken en een wat groter verval, maar deze iteratieslag leidt slechts tot een geringe verhoging van het debiet. Conclusie is dat het debiet door de turbines ongeveer 80% te hoog is aangenomen. Dit werkt lineair door in de berekening van de energieopbrengst en zorgt dus voor een grote overschatting van de energieproductie.

Bovendien is het nog maar de vraag of de afvoercoëfficiënt μ zo hoog aangenomen kan worden. De geometrie van de sluiskolken geeft beperkingen aan de constructie van een optimale geleiding door middel van een venturi vorm. Om een zo hoog mogelijke afvoer te

bereiken zal een geleideconstructie van enkele tientallen meters lang nodig zijn (bovenstrooms zowel als benedenstrooms) welke geleidelijk verbreedt om de stroomsnelheden te verlagen naar de omgevingscondities. Vanwege de beperkte breedte en diepte van de spuikolken (12 m en 4.5 m respectievelijk) en de opstelling van 4 pompen per kolk, zal dit moeilijk realiseerbaar zijn. Hierdoor zal de afvoercoëfficiënt μ wel eens aanzienlijk lager kunnen uitvallen dan een waarde van 1, waardoor de debieten en dus ook de energieproductie nog verder zullen afnemen.

De getijslag berekend door AD21 is een gemiddelde waarde voor het gehele bekken. De getijgolf op het bekken loopt echter heen en weer. Er zal dus sprake zijn van faseverschillen. Hoe dit uitpakt voor de lokale waterbeweging bij de oostelijk in het bekken gelegen getijdencentrale is niet eenvoudig te voorspellen, want dit hangt sterk af van de vorm van de vloedkom en van het bodemverloop (al dan niet met flauw glooiende zandtaluds). De getijde beweging binnen wordt nog complexer wanneer het tussenmeer door middel van een overlaat wordt aangekoppeld. Numerieke berekeningen kunnen hier echter een goed inzicht in geven.

Door AD21 is in de berekening van het verval over de getijdencentrale uitgegaan van een vast faseverschil van 2 uur tussen de getijbeweging buiten en de getijbeweging binnen (de laatste loopt achter). Deze keuze heeft invloed op het rekenverval: was bijvoorbeeld 3 uur faseverschil aangenomen dan zou het rekenverval 0,83 m zijn geweest in plaats van 0,67 m, en bij 1 uur faseverschil zou het rekenverval 0,53 m zijn geweest (alles in het basisplan). Het rekenverval werkt lineair door in de door AD21 gehanteerde berekeningsmethode van de energieopbrengst van de turbines. Daardoor kan door een foutieve keuze van het faseverschil al gauw 10% to 20% verschil ten voordele of ten nadele ontstaan.

Het faseverschil tussen binnen en buiten is een natuurlijk optredend fenomeen waarin traagheid en weerstand van het getijdenbekken een grote rol spelen, en wat daarmee locatieafhankelijk is. Daarbij is ook van belang of de turbinegangen met kleppen worden afgesloten tijdens een gedeelte van het getij; hiermee zou het faseverschil kunnen worden beïnvloed en het lokale verval kunstmatig worden vergroot. Het consortium bespreekt niet of in hun plannen kleppen zijn voorzien. Een hydrodynamisch model kan uitsluitsel geven over de werkelijk optredende, plaatsafhankelijke getijbeweging binnen, inclusief het extra faseverschil door eventueel tijdelijk sluiten van de turbinegangen. Dit model zou ook inzicht geven in het lokale waterstandsverschil over de getijdencentrale dat gehanteerd moet worden in de berekening van de energieopbrengst. Gezien het verkennende karakter van de inrichtingsplannen is een numerieke berekening in deze fase nog niet aan de orde geweest. Gelet op alle onzekerheden is de keuze voor een faseverschil van 2 uur acceptabel.

De keuze om in de berekening uit te gaan van een periode van 4 uur turbineren bij vloed en 4 uur turbineren bij eb (d.w.z. gedurende 2/3 van de aangenomen duur van 12 uur van de getijcyclus) is redelijk. Bovendien is de keuze in overeenstemming met enige praktijkcijfers (Royal Haskoning, 2009). De grootte van het verval bij het opstarten van de turbines hangt samen met deze keuze; het startverval komt bij het gekozen faseverschil van 2 uur uit op ongeveer 0,4 m. Daarmee wordt tevens aangenomen dat de pompturbines in een vervalgebied van 0,4 m tot 0,8 à 1,0 m kunnen werken.

4.3.4 Pompen door de getijdencentrale

Voordat met het afdalen van water vanuit het IJsselmeer begonnen kan worden, dient eerst het peil van vloedkom en het tussenmeer, zonodig met behulp van de pompturbines, te worden verlaagd tot ruim beneden het IJsselmeerpeil; dit om toestroming door de

zogenaamde 'nooduitlaat' mogelijk te maken. Bij het toestromen zal zonder afscherpende constructies niet voorkomen kunnen worden dat zoetwater vanuit het IJsselmeer in de zoutere vloedkom terecht komt. Wanneer aflaten bij Kornwerderzand onregelmatig voorkomt, geeft dit aanleiding tot fluctuaties in het zoutgehalte van de vloedkom. AD21 geeft in de rapportage niet aan of dit consequenties heeft voor de waterkwaliteit in relatie tot natuurontwikkeling en ecosysteem.

Voor de hoeveelheid te lozen water bij Kornwerderzand, wordt gekeken naar de totale jaarlijkse spuibehoeftte van het IJsselmeer. De jaarlijkse spuibehoeftte is constant gehouden op de huidige $16 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Het scenario voor de stijging van de zeespiegel gehanteerd door AD21 vormt het vertrekpunt. Voor ieder jaar wordt vervolgens berekend hoeveel minder water onder vrij verval kan worden gespuid bij Den Oever. Deze vermindering dient dan extra bij Kornwerderzand te worden verpompt.

In Bijlage 3, tabel 2.2, wordt een beknopt overzicht gegeven van de verschuiving van de spuihoeveelheden, zoals gevonden in de rapportage van AD21. De verschuiving is in de berekeningen van AD21 tot 2050 lineair in de tijd aangenomen. Verder wordt toegelicht (Bijlage 3, Paragraaf 2.6) dat er door AD21 een te geringe verschuiving van spuidebiet van Den Oever naar Kornwerderzand is doorgevoerd in de berekeningen. Daarnaast is er het effect van een latere start van de zeespiegelstijging in het door AD21 gehanteerde scenario in vergelijking met het W+ scenario. Beide effecten leiden tot een te gunstig beeld van de energieproductie in verhouding tot de energieconsumptie van de pompturbines.

In de berekeningen wordt de opvoerhoogte van de pompturbines gesteld op 0,5 m, lineair oplopend tot 0,75 m in de periode tot 2050. Deze stijging komt overeen met een stijging van de zeespiegel met 0,25 m zoals die in het door AD21 gehanteerde scenario optreedt. De aanname van de opvoerhoogte van 0,5 m lijkt realistisch te zijn gezien het feit dat pas met pompen zal worden begonnen wanneer bij Den Oever niet meer onder vrij verval kan worden gespuid. De opvoerhoogte varieert dan in eerste instantie van 0 tot ca. 1 m, en neemt in latere jaren toe met de zeespiegelstijging.

4.3.5 Rendement van de pompturbines

Een pompturbine (PT) is een hydraulische component die een relatie legt tussen het debiet door de PT en het verval of de opvoerhoogte over de PT (verval is negatieve opvoerhoogte). De PT levert, dan wel onttrekt, hydraulisch vermogen in samenhang met een verbruikt respectievelijk geleverd mechanisch vermogen op de as. Bij de vermogensomzetting in beide mogelijke richtingen (mechanisch $\leftrightarrow$ hydraulisch) is sprake van verliezen welke met een pomp- respectievelijk turbinerendement worden weergegeven.

Voor het beoogde toepassen van 40 PT's met een ontwerpdebiet van circa $25 \text{ m}^3/\text{s}$, een opvoerhoogte (head) van circa 1 m en een ontwerp-toerental van circa 200 rpm en een diameter van 2.25 m zijn axiaalpompen, zoals voorgesteld door AD21, inderdaad de meest geëigende keuze. Het zogenaamde specifieke toerental N_s (vormgetal) van pompen bij dergelijke ontwerp-grootheden is circa 1.000. Van dergelijke, zeer axiale, PT's zullen de hydraulische ($H(Q,N)$) en mechanische ($T(Q,N)$) karakteristieken (voor zowel positieve als negatieve toerentallen en debieten) door de fabrikant geleverd moeten worden. Een pomprendement van 80% lijkt voor dergelijke PT's haalbaar. Het turbinerendement bij vloed kan dan ongeveer 70% bedragen en bij eb ongeveer 55%. Bij dit pomprendement is sprake van een geïnstalleerd pompvermogen van $40 \times 25 \text{ m}^3/\text{s} \times 1 \text{ m} \times 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 10 \text{ m/s}^2 \times 80\% = 8 \text{ MW}$. Hieruit is niet zonder meer de turbineopbrengst te herleiden.

Nijhuis noemt rendementen die hierbij in de buurt liggen. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen de rendementen van vloed-turbinen en eb-turbinen. Vanwege de kromming van de waaierbladen zal dat verschil er wél zijn. Vooral als de pomp wat meer op pompen is geoptimaliseerd is het rendement van een vloed-turbine hoger dan het rendement bij eb.

Het voorbeeldrapport dat Nijhuis bijsluit, heeft betrekking op een pomp met een specifiek toerental $N_s=234$. Dit wijkt behoorlijk af van de gewenste waarde van circa 1.000. In de literatuur zijn gegevens bekend van een axiaalpompe met een N_s -waarde van 261. Het is overigens wel zo dat de eigenschappen niet fundamenteel meer verschillen zodra we met axiaalpompen te doen hebben ($N_s > 200$). Wel zal vooral op het rendement nog effect te zien zijn bij een toenemende N_s . Hierover zijn echter geen kwantitatieve uitspraken te doen zonder specifieke pompkarakteristieken aangeleverd door een mogelijke compleverancier.

De QH-karakteristiek van de PT zoals het systeem buiten de PT deze ondervindt, is afhankelijk van de bedrijfsvoering. Dit kan zijn: vrij roteren, stilstaand (geblokkeerd), toerengevarieerd, en vast toerental. Bij toerengevarieerde bedrijfsvoering zijn er meerdere doelwaarden mogelijk: maximum rendement, vaste drukval, vast debiet, vast vermogen en combinaties daarvan. De QH-karakteristiek van de PT levert samen met de omgevingskarakteristiek het werkpunt (de QH-combinatie die op dat moment evenwicht maakt tussen beide karakteristieken). De instroom- en uitstroomverliezen kunnen arbitrair worden opgenomen in de PT QH-karakteristiek of in de omgevingskarakteristiek. De omgevingskarakteristiek bestaat voornamelijk uit het gedrag van de zee (getijdeslag) en de vloedkom (berging). In beide dient ook de dynamica op adequate wijze te worden meegenomen, om de daadwerkelijke QH-relatie op elk tijdstip "om" de PT te kunnen leveren.

Voor turbinebedrijf lijkt de PT QH-karakteristiek op een weerstandskromme. Bij bedrijfsvoering op maximum rendement (waarmee een bovengrens van de op te leveren energie kan worden bepaald) heeft deze weerstandskromme een vaste coëfficiënt en weinig of geen "offset" in de H-as. Bij andere bedrijfsvoeringen (hierboven genoemd), zal er wél een offset door de H-as zijn.

De coëfficiënt van de turbineweerstand van een axiale PT zal voor het maximum rendementspunt in de orde van 0,2 à 0,4 liggen. Dit betekent dat aan de in- en uitstroomweerstand hoge eisen worden gesteld, omdat de coëfficiënten daarvan al gauw in dezelfde grootteorde kunnen komen te liggen. Daardoor neemt èn het debiet af èn de voor de PT beschikbare head, hetgeen dus sterk ten koste van de energieproductie gaat (en voor pompbedrijf sterk verhogend werkt op het energieverbruik). Het effect van de instroom- en uitstroomverliezen is ook als rendement in de berekening van het consortium AD21 betrokken, echter daarbij is voorbijgegaan aan het feit dat dit rendement geen debietonafhankelijk vast getal is, gezien de kwadratische head-debiet relaties. De term rendement kan hier beter gewijzigd worden in (reductie)factor.

De rendementen van de PT sec, genoemd in het werkdocument, lijken ons nogal optimistisch maar nog wel plausibel. Bij pompbedrijf is wél rekening gehouden met in- en uitstroomverliezen, bij turbinebedrijf is dit niet gedaan. De reden daarvan is ons niet duidelijk.

Een correcte berekening van de energieproductie van de PT getijdencentrale vergt een tijd-integratie van de optredende werkpunten door middel van een hydraulisch model. In het model moeten diverse niet-lineaire en technische details voor de bedrijfsvoering worden meegenomen. In het algemeen hebben de details een reducerend effect op de energieproductie bij turbinen en een verhogend effect op het energieverbruik bij pompen.

Het startverval van de turbines hangt sterk af van de karakteristieken van de gekozen PT. De door het consortium gehanteerde 0.4 m lijkt vrij hoog te zijn in vergelijking met de lage vervallen die over de centrale zullen optreden. Het kan blijken dat de eis van het startverval het turbinetijdvenster daarmee ontoelaatbaar klein maakt.

Het rendement van de frequentieomvormers zal waarschijnlijk het totale elektrische rendement lager maken dan 95%.

4.3.6 Energieopbrengst en energieconsumptie van pompturbines in basisplan

AD21 heeft de energieproductie en het energieverbruik van de getijdencentrale berekend uitgaande van een systeemrendement van 0,65 bij turbineren en een systeemrendement van 0,55 bij pompen. De gehanteerde formules zijn benaderingsformules en geven geen 'exacte' uitkomst, zoals door middel van een integratie over de tijd zou kunnen worden verkregen. Gezien de aard van de inrichtingsvoorstellen in deze fase is dit ook acceptabel. Voor het eerste jaar met peilopzet van 0,25 m op het IJsselmeer wordt op deze wijze een energieproductie berekend van 21 GWh en een energieverbruik van 5 GWh, zie Bijlage 3, Tabel 2.2.

Wat betreft de energieproductie het volgende. Wanneer we formule 3.9 (Bijlage 3) gebruiken voor een eerste schatting van de energieproductie vinden we bij een bekkenoppervlak van 15 km² (basisplan: vloedkom zonder tussenmeer), een systeemrendement van 0,65, en een actief-factor 0,85 (uitdrukkend het deel van het jaar dat de turbines actief zijn, zoals ook gehanteerd door AD21), een energieproductie van ca. 21 GWh, gelijk aan het berekeningsresultaat van AD21. Dit geeft wel vertrouwen, maar bedacht moet worden dat de schattingsformule is gebaseerd op projecten met niet-overeenkomende waarden van A_{turbine}/S en dus niet per se geldig is voor toepassing op de condities bij de Afsluitdijk.

Gelet op de hiervoor besproken overschatting door AD21 van het debiet door de turbines met 80%, is het waarschijnlijk dat de energieopbrengst in het eerste jaar lager zal zijn dan de genoemde 21 GWh, mogelijk slechts 12 GWh. Een zelfde reductie met een factor 0,55 (=100/180) zal in alle volgende jaren eveneens van toepassing zijn.

Bij de berekening van het energieverbruik van de getijdencentrale is vooral de inschatting van de hoeveelheid te verpompen water van belang. Het lijkt er op, dat er een te geringe verschuiving van spuidebiet van Den Oever naar Kornwerderzand is doorgevoerd in de berekeningen van AD21. Dit leidt, zij het in beperkte mate, tot een te hoge uitkomst voor de energieproductie en een te lage uitkomst voor het energieverbruik van de pompturbines. Van belang is ook dat de te verpompen hoeveelheid water niet gelijkmatig is verdeeld over het jaar en per pompsessie. Dit kan effect hebben op de overall efficiency van de pompen.

Een aanzienlijke verlaging van de energieproductie ontstaat wanneer het W+ scenario wordt toegepast in plaats van het door AD21 gehanteerde scenario voor zeespiegelstijging. Bij het W+ scenario zet de zeespiegelstijging eerder in. Het effect hiervan is dat al in eerdere jaren meer water moet worden verpompt, hetgeen over de gehele beschouwde periode tot 2100 leidt tot een verlaging van de energieproductie en een stijging van het energieverbruik. Als het werkelijke W+ scenario gehanteerd wordt zal het omslagpunt van netto energieopwekking naar netto energieverbruik door de centrale dus eerder plaatsvinden dan in 2050, wat door het consortium wordt berekend. Bij beschouwing van het werkelijke W+ scenario en verder de berekeningen van AD21 aanhoudend wordt dit omslagmoment al in 2030 bereikt.

In de berekeningen van AD21 zijn niet expliciet perioden opgenomen waarin de pompturbines buiten gebruik worden gesteld in verband met defecten en (periodiek) onderhoud. Met name wanneer veel zand wordt getransporteerd door de in- en uitgaande stroming kan een flinke slijtage van turbineonderdelen worden verwacht. Ook kan ongewenste aangroei optreden in de turbinegangen. In de praktijk zou buiten gebruik stelling voor onderhoud gedurende 5% van de tijd nodig kunnen zijn. Dit zou dan vooral ten koste kunnen gaan van de energieproductie. Bovendien wordt er geen rekening gehouden met een eventuele buitenbedrijf-stelling tijdens stormcondities.

Alles overziend kan worden gesteld dat de energieproductie van de pompturbines over de gehele beschouwde periode tot 2100 zeer waarschijnlijk flink lager zal zijn dan geraamd door AD21 en het energieverbruik hoger.

Ten aanzien van de kosten kan nog opgemerkt worden dat de aannames van een inkoopprijs van energie van € 0,08 per kWh en een verkoopprijs van € 0,17 per kWh ('groene stroom') gedurende de gehele beschouwde periode tot 2100 discutabel is. De verhouding van baten en kosten zal immers sterk verslechteren wanneer de prijs voor groene stroom naar de gewone stroomprijs toe beweegt.

Het geïnstalleerde vermogen van de getijdencentrale met 40 pomp-turbines kan bij aannames van een systeemrendement van 0,65, een grootst verval van ca. 1,0 m en een grootst debiet per turbine van ca. 20 m³/s op 5 MW worden gesteld. Dit is lager dan de 8 MW die door het consortium geschat wordt, wat gebaseerd is op een verval van 0,75m en een debiet van 27,5 m³/s. In de berekening van AD21 wordt echter ten onrechte het rendement niet meegenomen, waardoor hun berekening hoger uitvalt. Was dit wel gedaan, dan was het consortium ook op 5 MW uitgekomen.

Om dit in perspectief te stellen geeft tabel 4.12 een overzicht van het geïnstalleerde vermogen van de huidige bestaande operationele centrales. Hierin zijn enkele kleinere centrales in China niet opgenomen waarvan geen gegevens bekend zijn. Momenteel worden er plannen ontwikkeld voor de installatie van getijdencentrales in o.a. Engeland, Australië, Rusland en Amerika, waarvan sommigen al in een vergevorderd stadium zijn. Enkele voorbeelden worden in tabel 4.13 gepresenteerd. Er kan gesteld worden dat het getijverschil bij Kornwerderzand (gemiddeld 1,8 m) ver onder het gemiddelde valt van de hieronder beschouwde bestaande en potentiële locaties, wat op Kislaya Guba uitgezonderd niet onder de 4 m. komt. Bovendien dient hier opgemerkt te worden dat er nog weinig ervaring is met de winning van getijdenenergie; wereldwijd zijn slechts een handvol centrales in werking.

Land	Lokatie	Gemiddeld getijverschil (m)	Oppervlakte getijdenbekken (km ²)	Geïnstalleerd vermogen (MW)
Frankrijk	La Rance	8.5	22	240
Rusland	Kislaya Guba	2.3	1.1	0.4
Canada	Annapolis	6.4	15	18
China	Jiangxia	5.1	1.4	3.9

Tabel 4.11 Karakteristieken van bestaande getijdencentrales (Deltares, 2009)

Land	Lokatie	Gemiddeld getijverschil (m)	Oppervlakte waterbassin (km ²)	Potentieel vermogen (MW)
USA	Passamaquoddy	5.5	300	400
USA	Cook Inlet	4.3	3100	tot 18,000
Rusland	Mezen	5.7	2640	15,000
Rusland	Tugur	5.4	1080	6790
UK	Severn	8.3	490	6000
UK	Mersey	8.4	60	700
Argentinië	San Jose	6.0	780	7,000
Korea	Carolim Bay	4.7	90	480
Australië	Secure	8.4	130	570
Australië	Walcott	8.4	260	1,750

Tabel 4.12 Enkele potentiële lokaties voor realisatie van een getijdencentrale (Gorlov, 2001)

4.3.7 Energieopbrengst en energieconsumptie van pompturbines in varianten

Bij de variant waarbij alleen een vloedkom met oppervlak van 19 km² wordt gerealiseerd met pompturbines in de spuisluis Kornwerderzand, verandert er in de berekeningen van AD21 niet veel ten opzichte van het basisplan. De getijslag in de nu grotere vloedkom wordt wat kleiner berekend, maar bij turbineren wordt eenzelfde verval van 0,67 m aangehouden en een zelfde debiet van 27,5 m³/s per turbine, en ook wordt dezelfde actieve periode van 4 u voor inlaten en 4 uur voor uitlaten van water per getijcyclus van 12 uur gehanteerd. De energieopbrengst zou daarom hetzelfde moeten zijn als in het basisplan. Waarom niettemin voor deze variant een 10% hogere energieopbrengst per jaar wordt opgegeven in de rapportage (zie Bijlage 3, tabel 2.3), wordt daarom niet begrepen. Het energieverbruik van de pompen is wel onveranderd gelaten.

Bij de ESA-variant worden de pompturbines in het nieuwe spuimiddel (ter plaatse van de knik in de Afsluitdijk) geplaatst; de vloedkom met oppervlak van 19 km² omringt het nieuwe spuimiddel. De spuisluis Kornwerderzand, die ook binnen de vloedkom ligt, wordt buiten gebruik gesteld. Er wordt dus alleen gespuid via de spuisluis Den Oever, en noodzakelijkerwijs zal nu evenveel water moeten worden verpompt via het nieuwe spuimiddel als in het basisplan via de spuisluis Kornwerderzand.

Het systeemrendement van de pompturbines in het nieuwe spuimiddel wordt hoger geschat, zowel bij pompen als bij turbineren. Het gevolg is dat de jaarlijkse energieproductie in de gehele beschouwde periode van 2015 tot 2100 ongeveer 22% hoger wordt geraamd dan in het basisplan en het energieverbruik ongeveer 15% lager. Een efficiëntieverbetering door middel van een uitgekiend ontwerp van de turbinegangen in het nieuwe complex is zeker mogelijk, maar de genoemde verhoging van de energieproductie en verlaging van het energieverbruik lijken vooralsnog aan de optimistische kant te zijn. Dit zou nader, door middel van een voorontwerp van het nieuwe complex, moeten worden onderbouwd.

4.4 Schaalgrootte van ecologische verbeteringen

Het beantwoorden van de onderzoeksvragen betreffende de schaalgrootte van ecologische verbeteringen heeft plaatsgevonden door het houden van een expert sessie. In de sessie zijn eerst criteria geformuleerd die van belang zijn voor natuur en ecologie in de Waddenzee en in het IJsselmeer. De criteria zijn vervolgens tegen het licht (van de vier visies) gehouden om te komen tot een inschatting met betrekking tot schaalgrootte.

4.4.1 Criteria

In de expert sessie zijn een vijftal criteria genoemd die als belangrijk worden gezien. De criteria zijn:

- i. **Natura 2000.** Het is belangrijk dat een visie kansen biedt voor de ontwikkeling van het leefgebied voor bedreigde soorten. Daarbij is het van belang om niet alleen naar bedreigde soorten te kijken maar ook naar verscheidenheid in habitats. Een belangrijk aspect is hierbij het ontwikkelen en instandhouden van *jonge kwelders* omdat dit een specifiek Natura 2000 doel is (voor de Waddenzee). Daarnaast wordt voor het IJsselmeer genoemd dat habitatarmoede een probleem is en dat het een pré zou zijn wanneer een visie zich hierop richt. Dit criterium is van direct belang voor schaalgrootte van natuurgebieden.
- ii. **Kaderrichtlijn Water (KRW).** Een verbetering van scores op de KRW-maatlatten (Van der Molen & Pot 2007) is wenselijk. De eerder genoemde zoet-zout overgang kan de score op de maatlat vis verbeteren. Daarnaast kan het faciliteren van bijvoorbeeld de ontwikkeling van zeegras of kranswier door toename van morfologie en dynamiek positief op de maatlatscore werken.
- iii. **Wat raak je kwijt en wat komt erbij?** De uitvoering van een visie kan er ook voor zorgen dat waardevol gebied verloren gaat. Het verlies aan bestaande kwaliteit moet afgewogen worden tegen de winst van gewenste natuurontwikkeling.
- iv. **Natuurlijkheid van de zoet-zout overgang.** Een geleidelijke natuurlijke overgang (gradiënt) geniet hierbij de voorkeur aangezien dit beter is voor migrerende organismen (waaronder enkele bedreigde vissoorten).
- v. **Lering uit het verleden.** Het is van belang dat bij de ontwikkeling van de huidige visies gekeken wordt naar projecten uit het verleden (bijvoorbeeld op het gebied van algen, macrofyten, vis, doorzicht en sediment).

4.4.2 Grootte van de voorgestelde natuurgebieden

Van de vier visies zijn zowel de gebieden die in de 'kernen' zijn opgenomen als in de 'componenten' meegenomen in de analyse van de ecologische schaalgrootte⁵. Drie van de vier visies stellen arealen en ontwikkelingen voor die qua schaal significante ecologische verbeteringen zullen opleveren. De drie visies zijn: Natuurlijk Afsluitdijk, WATERmachine en WaddenWerken.

De visie Monument in Balans stelt ook maatregelen voor in de aangrenzende 'haltes'. Deze gebieden zijn normaliter groot genoeg voor significante verbeteringen gericht op ecologie, behalve het brakwatergebied bij Makkum. Echter in deze visie worden veel ontwikkelingen gepland in al bestaande natuurgebieden, die al heel waardevol zijn. Daardoor bestaat de kans dat geen of weinig significante ecologische verbeteringen plaats gaan vinden. Het brakwatergebied nabij Makkum is op dit moment van onvoldoende grootte, maar zou groot genoeg kunnen worden indien de voormalige binnendijkse kwelders betrokken worden bij het brakwatergebied.

Het is belangrijk om natuurontwikkeling op landschapsschaal te laten plaatsvinden (Van Eerden, 1998). Het voordeel van een natuurgebied op landschapsschaal is dat er dan weinig fluctuaties zijn (van bijvoorbeeld zout) waardoor organismen minder stress zullen ondervinden. Op dit moment worden veel zoetwatervissen door het spuibeheer op de

⁵ Met het begrip 'kernen' wordt bedoeld de primaire functionaliteit van de Afsluitdijk, namelijk veiligheid en waterhuishouding. Onder het begrip 'componenten' wordt verstaan alle extra elementen die in de visies daar aan zijn toegevoegd. Deze elementen zijn vaak qua locatie uitwisselbaar.

Waddenzee geloosd, omdat ze niet door hebben dat ze op de grens tussen Waddenzee en IJsselmeer in de nabijheid van een zout milieu zijn, en sterven daar. Door het realiseren van een brakwaterzone kunnen deze vissen aanvoelen dat het water zouter wordt en terugkeren naar het IJsselmeer in plaats van terecht te komen in de Waddenzee. Natuurgebieden op landschapsniveau zijn ook robuuster en zullen sneller stabiel worden en daardoor bijvoorbeeld minder waterkwaliteitsproblemen ondervinden. Dit zal de KRW ten goede komen.

4.4.3 Beoordeling van visies

In de expert sessie is het criterium 'lering uit het verleden' weliswaar als belangrijk criterium gezien, maar geen enkele visie bevat ook maar enige verwijzing daarover. Dit criterium is daarom als negatief gescoord voor alle visies en verder buiten beschouwing gelaten.

In de expert sessie is ook opgemerkt dat verschillende gebruiksdoeleinden binnen een gebied aanwezig zijn en dat doelsoorten uit Natura 2000 een groot areaal nodig hebben.

Monument in Balans

De omvang van het estuariene landschap tussen Harlingen en Makkum is groot genoeg (zeker niet te klein). Dit gebied is echter op dit moment ook al van groot ecologisch belang en het is vooralsnog onduidelijk wat de meerwaarde van de geplande maatregelen zal zijn. Het brakwatergebied nabij Makkum zal wel groter moeten worden om een ecologische verbetering op te leveren (zie hieronder).

De visie Monument in Balans geeft niet expliciet aan dat verbetering van Natura2000 doelen wordt nagestreefd. De visie lijkt echter mogelijkheden te bieden voor de ontwikkeling van jonge kwelders en dat is een Natura2000 doel. Indien jonge kwelders goed worden beheerd, kan dit ook positieve effecten hebben op de KRW-scores aangezien deze ook worden beoordeeld in de maatlat voor overige waterflora in overgangs- en zout water. De maatlatscores voor vis kunnen positief worden beïnvloed al zal het effect klein zijn door het geringe aantal vispassages dat in deze variant wordt aangelegd. Voor het criterium KRW scoort de visie negatief omdat bijna niets gedaan wordt aan de IJsselmeerszijde en er in het IJsselmeer sprake is van een autonome neergaande trend. Dat betekent dat als er in het gebied niks gedaan wordt deze steeds meer achteruitgaat. Maatlatscores voor de KRW zullen dus minder worden als er niet ingegrepen wordt.

Het Balgzand is een belangrijk foerageergebied voor watervogels. Het veranderen van dit gebied naar een brak kweldergebied kan verschuivingen opleveren. Wellicht levert dit een ander interessant gebied op, maar dat zal nader onderzocht moeten worden en bij vogelexperts neergelegd moeten worden. Aan de Friese zijde in het IJsselmeer wordt een geïsoleerd brakwatergebied voorgesteld. Momenteel is dit echter een belangrijk Natura 2000-gebied en de geplande verbrakking in combinatie met effecten van afname van windwerking en getij door het isoleren kunnen leiden tot verarming van het gebied.

De uitstroom van een Blue Energy Centrale (BEC) moet zorgen voor een stabiele overgang van zoet naar zout water voor de Friese IJsselmeerkust. Deze brakwaterzone wordt geïsoleerd en moet een geleidelijke overgang van zout naar zoet zijn voor intrekende vis. Creatie van een natuurgebied op deze locatie heeft enkel zin indien de overblijfselen van voormalige kwelders (die nu binnendijks liggen) erbij worden betrokken (gebied moet dus groter worden). Isolatie van deze brakwaterzone kan voorts voor waterkwaliteitsproblemen zorgen (algenbloei).

Beoordeling aan de hand van criteria:

- | | |
|--|----------|
| • Natura2000: | onbekend |
| • KRW: | negatief |
| • Wat raak je kwijt / wat komt erbij?: | onbekend |
| • Zoet-zout gradiënt: | positief |

Natuurlijk Afsluitdijk

De grootte van de voorziene natuurgebieden in deze visie, bestaande uit een brakwatermeer en een zoetwatermoeras, zijn voldoende groot. De grootte van beide gebieden maakt het voor vogelsoorten zoals de lepelaar en de roerdomp mogelijk om voldoende te kunnen foerageren, te rusten en te broeden. Het brakwatermeer is de belangrijkste bijdrage van deze visie aan Natura2000 doelen omdat het de verbinding tussen Waddenzee en IJsselmeer verbeterd. Een dergelijke verbindingzone moet groot genoeg zijn om soorten geleidelijk van het ene systeem naar het andere te kunnen laten migreren. In de expertessie is de grootte als voldoende beoordeeld.

In de visie wordt de draagkracht genoemd als de belangrijkste natuurwaarde van het zoetwatermoeras. De reden is het creëren van een habitat voor mosselen en spiering (voedsel voor vogels). Om een significante bijdrage te leveren aan de draagkracht voor vogels moet de stand van mossel en spiering vrij uitgebreid zijn. In dat opzicht is dus de grootte van het voorgestelde zoetwatermoeras goed. Natura2000 doelen zullen dan ook verbeteren.

In de expert sessie is verder opgemerkt dat het risico aanwezig is op onvoldoende menging en stratificatie in het brakwatermeer. Daardoor wordt een scheiding van zoet en zout water in stand gehouden en dit kan aanleiding zijn tot zuurstofloosheid van het water en sterfte van vissen en planten. Ook bloei van blauwalgen kan een rol gaan spelen vanwege de geïsoleerde ligging een relatief klein brakwatermeer. In het verleden zijn dit soort problemen in relatief kleine geïsoleerd gelegen meren vaker naar voren gekomen.

Het behoud van een brakke zone kan in de zomer onder druk komen te staan bij een tekort aan zoet water. Het brakwatermeer zal dan geleidelijk zouter worden. In combinatie met een eventuele druk door recreatie kan dit conflicteren met de beoogde ecologische ontwikkeling.

De kans op zuurstofloosheid en bloei van blauwalgen in het brakwatermeer kan de KRW-doelen negatief beïnvloeden, ongeacht de grootte. In dat geval zal de ontwikkeling van het gebied duidelijk geen meerwaarde opleveren. Ondanks dat in het zoetwatermoeras voldoende doorstroming plaatsvindt, is de kans op blauwalgen aanwezig. Dit komt doordat het IJsselmeer zelf veel blauwalgen bevat (vooral in het noordwesten) waardoor een instroom van blauwalgen in het zoetwatermoeras kan plaatsvinden. Aan de IJsselmeerzijde van de 'zachte' dijk kunnen blauwalgen zich ophopen als gevolg van een zuidwesten wind.

Beoordeling aan de hand van criteria:

- | | |
|--|----------|
| • Natura2000: | positief |
| • KRW: | negatief |
| • Wat raak je kwijt / wat komt erbij?: | onbekend |
| • Zoet-zout gradiënt: | positief |

WaddenWerken

In de visie WaddenWerken wordt voorgesteld een luwtebank en een kwelder aan te leggen aan de kant van de Waddenzee. In de ontwikkelingsdoelstellingen Natura2000 voor de Waddenzee wordt het tekort aan jonge kwelders genoemd. De visie Waddenwerken speelt in op het tekort aan kwelders door de aanleg van een kweldergebied voor te stellen. De grootte van het kweldergebied bedraagt 1.500 ha. Dat is ruim voldoende gezien het feit dat de minimumomvang van goed kwelderareaal ongeveer 500 ha bedraagt (Dijkema et al., 2007).

Een kwelder is een instabiel systeem, dat wil zeggen dat de toestand (hier de vegetatie) autonoom zal veranderen (door bijvoorbeeld opslibbing) indien geen beheer zal plaatsvinden, zoals het toelaten van grazers. Om de kwaliteit van de kwelders te behouden is aanwezigheid van alle stadia in de successiereeks gewenst. Echter, indien geen beheer wordt toegepast zal er veroudering van de kwelder optreden waarbij een kwelder in een climaxvegetatie terecht komt en de vegetatie enkel uit bomen zal bestaan. Beheer (beweiding met grazers) kan dit tegengaan.

De suggestie om de geplande 1.500 ha gefaseerd aan te leggen, is ook mogelijk mits de gefaseerde stukken breed genoeg zijn. Een areaal van 500 ha, 10 km lang en 500 m breed, zal daarom groot genoeg zijn. Alle kwelderarealen zullen vroeg of laat in een climaxstadium terecht gaan komen indien geen beheer wordt toegepast. Grazers moeten dan worden toegelaten om de vegetatie (deels) te onderdrukken. De verschillende successiereksen kunnen dan aanwezig blijven en een hoge biodiversiteit blijft gewaarborgd.

De luwtebank heeft ook een areaal die groot genoeg is om een significante ecologische verbetering te realiseren. De grootte maakt een natuurlijke zout-zoet gradiënt makkelijker. De realisatie van luwtebank en kwelders in de Waddenzee levert tevens een positieve score op voor het criterium 'Wat raak je kwijt en wat komt erbij?'.

Het realiseren van een zoet-zout gradiënt lijkt aan de kant van de Waddenzee beter haalbaar dan aan de kant van het IJsselmeer. Natuurlijke getijdenwerking kan goed zorgen voor het mengen van zoet en zout water. De zoet-zout gradiënt kan ook een positief effect hebben op de visstand, en dus positief uitpakken op de KRW-score, in het IJsselmeer en de omliggende wateren. Tevens kan dit positief werken voor Natura2000 omdat hiermee habitat wordt gecreëerd voor vogels.

De vorm van de aan te leggen luwteplaat en luwtebank heeft invloed op de omgeving. De vorm zou eigenlijk getoetst moeten worden op de invloed op het bovengelegen gebied, het tegengaan van een verschuiving van de vaargeul, en op het tussenliggende gebied, zoals het vasthouden van zoet water om schokken tegen te gaan.

Een zoetwaterplan aan de kant van het IJsselmeer ontbreekt in deze visie. Aan de doelen voor KRW en Natura 2000 in het IJsselmeer en aangrenzende gebieden zal dus niet veel worden bijgedragen. Net zoals voor Monumenten in Balans zullen de maatlatcores van de KRW achteruitgaan indien er in het IJsselmeer geen ingrepen zullen plaatsvinden (autonome neergaande trend). Zodoende scoort Waddenwerken voor het IJsselmeer negatief. De Makkumerwaard wordt wel als optie gezien.

Het huidige plan biedt mogelijkheden tot de ontwikkeling van typische brakke flora en fauna, waarvan er nu al enkele voorkomen. Het creëren van stagnerend water kan echter ook problemen opleveren met betrekking tot waterkwaliteit (algenbloei en dat levert dus een lage KRW-score op). Daarnaast kan 'verbrakking' inclusief de afwezigheid van getij en

windwerking ook leiden tot verarming. De Makkumerwaard is momenteel een belangrijk natuurgebied. De visie WaddenWerken biedt kansen de waarde uit te breiden, maar ook de kans op verarming binnen het gebied.

Beoordeling aan de hand van criteria:

- | | |
|--|---|
| • Natura2000: | positief |
| • KRW: | positief (Waddenzee), negatief (IJsselmeer) |
| • Wat raak je kwijt / wat komt erbij?: | positief |
| • Zoet-zout gradiënt: | positief |

WATERmachine

De visie WATERmachine biedt een diversiteit aan habitats. Net zoals voor de visie Natuurlijk Afsluitdijk geldt hier dat de grootte van het tussenmeer goed is omdat vogelsoorten als de lepelaar grote leefgebieden nodig hebben. Het tussenmeer is bovendien opgedeeld in een zoetwatermoeras en een inter-getijdengebied. Het moeras is extra habitat (voedsel, rust -en broedplaats) voor vogels en in het inter-getijdengebied kunnen vogels voedsel zoeken. Dit betekent dat het grote gebieden moeten zijn willen ze voldoen aan deze functies voor vogels. In de expertsessie is de omvang van beide gebieden als groot genoeg beoordeeld. Voor het criterium Natura2000 is de grootte van het gebied dus goed. Voor het criterium 'Wat raak je kwijt en wat komt erbij?' is dit ook een positieve score.

In de expert sessie zijn de volgende problemen naar voren gekomen met betrekking tot isolatie en het risico op bloeiproblemen. Dit laatste is vergelijkbaar met de visie Natuurlijk Afsluitdijk. In de visie van de WATERmachine wordt een beperkte instroom ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) vanuit het IJsselmeer in het tussenmeer voorzien. Het oppervlak van het tussenmeer bedraagt 50 km^2 . Indien we aannemen dat het een gemiddelde diepte van 3 meter zal hebben dan is het totaal volume $150 \times 10^6 \text{ m}^3$. Met een instroom van $5 \text{ m}^3/\text{s}$ levert dit een verblijftijd van het water in het tussenmeer op van ruim 1.000 dagen. Bij een verblijftijd van water tussen 40 en 90 dagen levert dit al een algeensamenstelling op die voor 60% uit blauwalgen bestaat (Dionisio Pires, 2007). De KRW-doelen komen daarmee in gevaar.

Andere mogelijke knelpunten zijn:

- Tijdens een zoetwatertekort in de zomer zal het aanhouden van een brakwatersysteem onder druk komen te staan;
- De ontwikkeling van zeegras is moeilijk te realiseren.
- De dynamiek en de fluctuerende saliniteit zullen waarschijnlijk bijdragen aan een lage diversiteit, waardoor het gebied mogelijk geen meerwaarde oplevert. Echte brakwatergebieden (zoals in het verleden in de Zuiderzee bestonden) zullen eerder in de luwte voorkomen.

Beoordeling aan de hand van criteria:

- | | |
|--|----------|
| • Natura2000: | positief |
| • KRW: | negatief |
| • Wat raak je kwijt / wat komt erbij?: | positief |
| • Zoet-zout gradiënt: | onbekend |

4.5 Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties

4.5.1 Uitgangspunten

Een ontwerp is veilig als aan de wettelijke norm voor de veiligheid wordt voldaan. Deze wettelijke norm bestaat uit een waterstand die met een bepaalde zekerheid moet worden

gekeerd. De bepaling van de (minimale) te keren waterstand en de (minimale) sterkte van de waterkering is vastgelegd in diverse leidraden. Indien niet aan de vigerende leidraden wordt voldaan, is het ontwerp niet veilig.

Hydraulische randvoorwaarden

In de gevoeligheidsanalyse wordt de hydraulische randvoorwaarden gebruikt zoals weergegeven in (Rijkswaterstaat, 2010) en opgenomen in Bijlage 5A.

Tabel 4.13 geeft de hydraulische randvoorwaarde voor de normfrequentie 1/10.000 voor de planperiode tot 2050.

Afsluitdijk ontwerp frequentie 1 / 10.000			
Dijksectie	Ontwerppeil-2050	Hs-ontwerp-2050	Tm-1,0-ontw-2050
km	m + NAP	m	s
Den Oever – 5	5.15	2.85	5.90
5 – 12	5.25	3.35	6.10
12 – 20	5.25	3.55	6.35
20 – 25	5.35	3.45	6.00
25 - Friesland	5.35	2.75	5.80

Tabel 4.13 Ontwerprandvoorwaarden voor planperiode 2050

Tabel 4.14 geeft de hydraulische randvoorwaarden voor de normfrequenties 1/1.430, 1/10.000, 1/50.000 voor de planperiode tot 2100.

Afsluitdijk ontwerp frequentie 1 / 1430			
Dijksectie	Ontwerppeil-2100	Hs-ontwerp-2100	Tm-1,0-ontw-2100
km	m + NAP	m	s
Den Oever – 5	5.70	3.10	5.90
5 – 12	5.80	3.60	6.10
12 – 20	5.80	3.80	6.35
20 – 25	5.90	3.70	6.00
25 - Friesland	5.90	3.00	5.80
Afsluitdijk ontwerp frequentie 1 / 10.000			
Dijksectie	Ontwerppeil-2100	Hs-ontwerp-2100	Tm-1,0-ontw-2100
km	m + NAP	m	s
Den Oever – 5	6.05	3.30	6.05
5 – 12	6.15	3.80	6.30
12 – 20	6.15	4.00	6.50
20 – 25	6.25	3.90	6.20
25 - Friesland	6.25	3.20	5.95
Afsluitdijk ontwerp frequentie 1 / 50.000			
Dijksectie	Ontwerppeil-2100	Hs-ontwerp-2100	Tm-1,0-ontw-2100
km	m + NAP	m	s
Den Oever – 5	6.40	3.50	6.20
5 – 12	6.50	4.05	6.45
12 – 20	6.50	4.25	6.65
20 – 25	6.60	4.15	6.35
25 - Friesland	6.60	3.40	6.10

Tabel 4.14 Ontwerprandvoorwaarden bij de diverse normfrequenties

Tabel 4.15 geeft de randvoorwaarden die in een eerdere studie zijn gebruikt (Deltares, 2009). Deze randvoorwaarden zijn toen representatief gesteld voor de gehele dijk.

Dijkvak	Ontwerppeil	Hs	Tp
km	m+NAP	m	s
Den Oever – 5	6.03	3.50	8.1
5 – 12	6.03	3.50	8.1
12 – 20	6.03	3.50	8.1
20 – 25	6.03	3.50	8.1
25 - Friesland	6.03	3.50	8.1

Tabel 4.15 Ontwerprandvoorwaarden 1/10.000 voor het jaar 2100 (uit: Verkenning OIVA-2007)

Dijkhoogte

Robuust ontwerpen

Overeenkomstig de aanbevelingen in de algemene leidraden voor dijkverbeteringen (ENW, HWBP) moet worden uitgegaan van een robuust ontwerp. Bij een robuust ontwerp wordt in voldoende mate rekening gehouden met onzekerheden in toekomstige belastingen en ontwikkelingen. Er wordt niet alleen rekening gehouden met het veiligheidsaspect, maar ook met eventuele uitbreidingsmogelijkheden, de ruimtelijke kwaliteit en de verwachte (klimaat-) veranderingen in de planperiode.

Goed robuust ontwerpen betekent volgens de Leidraad Rivieren in het ontwerp rekening houden met toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden, zodat het uitgevoerde ontwerp tijdens de planperiode blijft functioneren zonder dat ingrijpende en kostbare aanpassingen noodzakelijk zijn, en dat het ontwerp uitbreidbaar is indien dat economisch verantwoord is.

Aspecten die bij robuust ontwerpen een rol spelen zijn de planperiode van het ontwerp, de ontwerpbelastingen en onzekerheden in de hydraulische belastingen en sterkte van de waterkeringen.

Het meenemen van onzekerheden rondom de sterkte in het ontwerp leidt over het algemeen tot een verzwaring van het ontwerp. De mate van verzwaring kan worden bepaald door een goede, volledige probabilistische analyse van de onzekerheden.

Het huidige beleid houdt in dat er een Robuustheidstoeslag wordt toegepast op de golfhoogte en de golfperiode. Er zijn ook andere onzekerheden, maar deze worden niet meegenomen in de Robuustheidstoeslag. Bijlage 5A geeft een juiste weergave van de voor deze studie te hanteren toeslagen.

Bepaling dijkhoogte

Bij de bepaling van de benodigde dijkhoogte is gebruik gemaakt van berekeningen met PC-Overslag, met de volgende uitgangspunten:

- overslagdebiet is 10 l/s/m
- hoek van inval $\beta = 0^\circ$
- basalt bekleding op buitentalud (excl. de berm) tot aan de kruin
- een gladde berm op ontwerppeil met helling 1:20
- buitentaludhelling 1:3,7, ook boven berm

In deze globale studie zijn de volgende aspecten niet meegenomen:

- bodemdaling over de planperiode
- kruindaling door klink en zetting van de ondergrond

Dit omdat deze effecten beperkt zijn t.o.v. de gevoeligheid van de vereiste kruinhoogte voor het toelaatbare overslagdebiet. Tevens is er geen toeslag voor bui-oscillaties, buistoten en seiches meegenomen, aangezien de golfoploop dominant is en de geprognostiseerde waterstanden nogal onzeker zijn.

Keuze t.a.v. afmetingen dijksprofielen

Uit de door de opdrachtgever aangeleverde dwarsprofielen (autocadfile "nieuw Afsluitdijk", 2008) is per dijksectie in overleg met de opdrachtgever de meest representatieve gekozen.

Eigenschap profiel		kenmerken
Buitenberm	Breedte Hoogte helling	Minimaal 5 m - maximaal 10 m Ontwerppeil 1:20
Helling buitentalud		De helling wordt boven de buitenberm doorgezet ⁶
Dijkhoogte		Streefwaarde: maximaal 10 m + NAP
Kruinbreedte		3 m
Helling binnentalud		1:3
Breedte binnenberm		De afmetingen vanaf de teen van de tuimeldijk worden ontleend aan ⁶

Tabel 4.16 Uitgangspunten geometrie van binnenwaartse versterking

De afmetingen en taludhellingen die als uitgangspunt voor het ontwerp zijn genomen, staan in Tabel 4.16. Tevens is als uitgangspunt een overslag debiet van 10 l/s/m gehanteerd.

Bij het dimensioneren met behulp van PC-Overslag is in eerste instantie uitgegaan van een minimale breedte van de buitenberm van vijf meter, waarna deze, indien nodig, verbreed is om de benodigde dijkhoogte naar tien meter terug te brengen. Als de bembreedte gelijk is aan tien meter, dan is er voor gekozen de dijkhoogte verder aan te passen tot waarden groter dan 10 m, zodat het overslag debiet 10 l/s/m is. Deze uitgangspunten zijn in overleg met de opdrachtgever vastgesteld.

Dijksterkte algemeen

Voor de sterkte van de waterkering worden in de leidraden verschillende bezwijkmechanismen onderscheiden. Onderscheid wordt gemaakt tussen de volgende mechanismen:

1. Binnenwaartse en buitenwaartse macrostabiliteit;
2. Piping;
3. Microstabiliteit;
4. Instabiliteit voorland en zettingsvloeiing;
5. Bezijken en erosie van bekleding.

Een veilig dijkontwerp voldoet aan alle richtlijnen van de verschillende bezwijkmechanismen. In de volgende paragrafen worden de uitgangspunten voor de diverse faalmechanismen behandeld.

4.5.1.1 Binnenwaartse en buitenwaartse macrostabiliteit

Stabiliteitseisen

In voorgaande studie (Deltares 2008) is gewerkt met partiële veiligheidsfactoren voor een Bishop glijvlak berekening. Deze veiligheidsfilosofie is niet één op één toepasbaar bij

6. Uit de autocad file "nieuw Afsluitdijk".

overslaghoeveelheden van meer dan 1 l/s/m. Op basis van de beschikbare gegevens is de schematisatie van de ligging van de freatische lijn een groot vraagteken. Dit wordt veroorzaakt door de grote onzekerheid in de mate van infiltratie. In de huidige studie is daarom gewerkt met een aanname. De stabiliteitsfactoren uit de in deze studie uitgevoerde MStab berekeningen kunnen dan ook alleen relatief ten opzichte van elkaar worden beschouwd. Als de stabiliteitsfactor kleiner is dan 1, dan is er zeker sprake van onvoldoende veiligheid.

Schematisatie ondergrond

Algemeen

De ondergrond is per definitie heterogeen. Voor het verkennen van de ondergrond zijn in het verleden verschillende grondonderzoeken uitgevoerd. In het onderzoek is sprake van puntwaarnemingen op basis waarvan een inschatting is gemaakt van de bodemopbouw en (sterkte)eigenschappen van de verschillende grondlagen. De dichtheid van het uitgevoerde grondonderzoek is onvoldoende voor het opstellen van een voldoende gedetailleerde deterministische schematisatie van de ondergrond die voldoende zekerheid biedt voor het aanpassen van het ontwerp van de Afsluitdijk.

Daarom is gekozen om de berekeningen niet uit te voeren met één deterministische schematisatie van de bodemopbouw, maar met een selectie uit vijftien varianten voor de bodemopbouw. Met deterministische bodemopbouw wordt bedoeld: een aan de hand van grondonderzoek door de ingenieur bepaalde maatgevende bodemopbouw.

Voor variantenstudies wordt ook wel gebruik gemaakt van stochastische ondergrondmodellen⁷. Voor het stochastische ondergrondmodel wordt aan de hand van de grondgegevens en bekende geologische processen een inschatting gemaakt van de mogelijke grondlagen die zich ter plaatse in de ondergrond kunnen voordoen en de mate van waarschijnlijkheid van voorkomen. In deze studie is nog geen gebruik gemaakt van een stochastisch ondergrondmodel. Dit kan wel in een latere fase worden gedaan.

Bodemopbouw

De vijftien varianten voor de bodemopbouw zijn overgenomen uit (Fugro 2008). In (Deltares 2008) is dit ook gedaan. Aan de hand van een geotechnisch lengteprofiel is de Afsluitdijk opgedeeld in segmenten waarvoor een deterministische één-dimensionale bodemopbouw is gegeven. Het geotechnische lengteprofiel is afgeleid van een beperkt aantal sonderingen. De verschillende varianten voor de één-dimensionale bodemopbouw staan in bijlage 5C.

Wanneer de maximaal verkende diepte is bereikt dan wordt er bij de berekeningen vanuit gegaan dat daar het pleistocene zand begint. Dit heeft weinig invloed op de uitkomsten, omdat het gaat om een diep gelegen zandlaag die geen invloed heeft op de maatgevende glijcirkels.

⁷ Stochastische ondergrondmodellen zijn de basis voor zogenaamde Rationele Risicobenadering Dijken (RRD) analyses. Een stochastisch ondergrondmodel voorkomt de noodzaak om voor elke variant van de waterkeringen op alle tracés zeer veel boor- of sondeerpunten beschikbaar te moeten hebben. In plaats daarvan wordt gebruik gemaakt van al bestaande gegevens samen met kennis over de manier waarop de ondergrond is opgebouwd. Deze kennis gecombineerd met de gegevens beperken de theoretisch oneindige hoeveelheid mogelijkheden waarop de ondergrond kan zijn opgebouwd.

In werkelijkheid kan de bodemopbouw per meter variëren. In deze verkennende fase van het ontwerp is bovenstaande aanpak voldoende om tot een verantwoorde veilige keuze voor de ontwerp schematisatie te komen. In een later stadium is het wel van belang nader onderzoek te doen naar de bodemopbouw.

Uit de vijftien variëte voor de bodemopbouw uit bijlage 5C is per dijksectie (HR segment) de maatgevende bodemopbouw gekozen (Tabel 4.17).

Dijksectie	Maatgevende bodemopbouw (Bijlage 5C)
Den Oever – 5	D2
5 – 12	D6
12 – 20	D7
20 – 25	D11
25 – Friese Kust	D14

Tabel 4.17 Maatgevende bodemopbouw per dijksectie

Grondeigenschappen

De gehanteerde rekenwaarden voor de grondparameters zijn overgenomen uit (Fugro, 2008). In de berekeningen is uitgegaan van de in het rapport gegeven rekenwaarden⁸ voor de range aan sterkte eigenschappen per grondlaag. Dat iedere grondlaag een range aan sterkte eigenschappen heeft, wordt veroorzaakt door het heterogene karakter van deze lagen, en het ontbreken van voldoende gedetailleerd grondonderzoek. Voor de berekeningen is per grondlaag het gemiddelde van de range van rekenwaarden aangehouden.

De gehanteerde grondeigenschappen staan vermeld in Tabel 4.18. De eigenschappen voor veen zijn bepaald op basis van de NEN 6740. De eigenschappen van de laag bestaande uit keileem zijn ontleend aan een beperkt aantal laboratoriumproeven op de Afsluitdijk (Deltares, 2009-1). De eigenschappen van de kleideklaag zijn geschatte waarden voor een goede erosiebestendige klei.

8. Rekenwaarden zijn veilige waarden voor de in de macrostabiliteitsberekeningen te hanteren parameters (zie Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies).

Grondsoort	Beschrijving grondsoort	c' (kPa)	Phi (graden)	Gamma (kN/m ³)	
				nat	droog
Dijksmateriaal	Dijklichaam klei/zand, voornamelijk zand	0,0	26,4	19,0	17
Zand_klei	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiing met lokaal kleilaagjes	0,0	30,1	19,0	17
Veen	Veen	2	15,0	11,0	11
Klei_zand	Klei, matig vast, zwak zandig met lokaal zandlaagjes	2,4	18,3	15,5	15,5
Klei_humeus_zand	Klei, matig vast, siltig, licht humeus, zandig	2,4	18,3	15,5	15,5
Zand	Zand, matig tot fijn, licht siltig	0,0	30,1	20,0	18,0
Klei_humeus	Veen kleiig overlopend in klei humeus	2,0	14,8	14,0	14,0
keileem		2,6	23,7	19,0	16,0
Klei deklaag		5	25	16,5	15

Tabel 4.18 Rekenwaarden voor grondeigenschappen

In de risico-sessie is nagegaan hoeveel de onzekerheden in de grondopbouw zouden kunnen bijdragen ten aanzien van andere onzekerheden, zoals de positie van de freatische lijn. In onderdeel 4 zijn enkele berekeningen gemaakt om dit nader te kwantificeren.

Schematisatie van waterspanningen

Binnenwaartse macrostabiliteit

Het verloop van de waterspanningen voor de binnenwaartse macrostabiliteit is als volgt geschematiseerd:

- De stijghoogte in het watervoerende pakket is lineair verondersteld (het watervoerende pakket staat in contact met het buitenwater).
- De freatische lijn is geschematiseerd met de ontwerpwaterstand. De freatische lijn is grotendeels lineair verondersteld van ontwerppeil naar een niveau van 2 m – NAP, waarbij de freatische lijn gedeeltelijk over het maaiveld loopt, zodat de zone rond de binnentoe van de tuimeldijk nat is. Een volledig verzadigde dijk, zoals in voorgaande studie (Deltares 2008) doorgerekend is minder waarschijnlijk. Indien de dijk volledig is verzadigd is deze zeker niet stabiel.
- Een natte zone rond de binnentoe is waarschijnlijk, op basis van recent uitgevoerde overslag- en infiltratieproeven (Deltares 2009-2). De stabiliteit van de dijk is zeer gevoelig voor de ligging van de freatische lijn, zoals blijkt uit onderstaande resultaten.

Buitenwaartse macrostabiliteit

Het verloop van de waterspanningen voor de buitenwaartse macrostabiliteit is als volgt geschematiseerd:

- De stijghoogte in het watervoerende pakket is lineair verondersteld tussen ontwerppeil en IJsselmeerpeil (winterpeil), dat wil zeggen het watervoerende pakket staat in contact met het buitenwater.
- De freatische lijn is geschematiseerd voor een situatie met val na hoog water⁹, van ontwerpwaterstand naar NAP-niveau langs het buitentalud. Verder is deze in de dijk lineair verondersteld van ontwerpwaterstand naar een niveau van 0,40 m – NAP.

Verkeersbelasting

- Bij een verkeersbelasting op de weg is een 5 m brede en 10 kN/m² grote belasting aangenomen aan de buitenrand van de berm. Dit geeft een conservatieve schatting van de te verwachten belasting door normaal verkeer.
- Bij een 3 m brede kruin is een 3 m brede verkeersbelasting van 13 kN/m² aangenomen.

4.5.1.2 Piping

Voor het beoordelen van het bezwijkmechanisme piping is gebruik gemaakt van de bevindingen uit de eerdere studie (Deltares 2008).

4.5.1.3 Microstabiliteit

Het mechanisme microstabiliteit is nader beschouwd aan de hand van de rekenvoorbeelden uit paragraaf 5.4.4 van het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.

Tevens is gebruik gemaakt van de inzichten, zoals verkregen uit de recente overslag- en infiltratieproeven op een deel van de Afsluitdijk (Deltares 2009-2).

4.5.1.4 Instabiliteit onderwatertalud Waddenzeezijde en zettingsvloeiing

Voor het beoordelen van dit faalmechanisme is gebruik gemaakt van de bevindingen uit de eerdere studie [Deltares 2008].

4.5.1.5 Bezijken en erosie van bekleding

Hier is gebruik gemaakt van de bevindingen uit de recent uitgevoerde overslag- en infiltratieproeven op de Afsluitdijk (Deltares 2009-2).

Combinaties van faalmechanismen zijn waarschijnlijk, met name de combinatie met micro-instabiliteit.

*4.5.2 Bevindingen en resultaten**4.5.2.1 Check op hydraulische randvoorwaarden*

De hydraulische randvoorwaarden, gebruikt in de gevoeligheidsanalyse en weergegeven in (Rijkswaterstaat, 2010), zijn door Deltares beoordeeld op juistheid en consistentie (Bijlage 5B). De belangrijkste bevindingen zijn als volgt samen te vatten:

- Uitgangswaarden zijn in overeenstemming met de gegeven bronnen;
- De gegeven $T_{m-1,0}$ in Tabel 5, en eveneens in Tabel 8 en Tabel 10, uit (Rijkswaterstaat, 2010) voor de planperiodes 2050 en 2100 zijn gelijk in plaats van oplopend.

9. 'Val na hoogwater' betekent dat de freatische lijn hoog ligt terwijl het peil in het oppervlakte water al is teruggevallen.

De 10% verhoging (van 2011 naar 2100) van de $T_{m-1,0}$ als gevolg van modelonzekerheden (toeslag e) is echter van dezelfde orde als wanneer er wordt uitgegaan van de aanname dat bij toename van de waterstand en golfhoogte, de golfsteilheid gelijk blijft. Dan geldt:

$$T_{m-1,0} (2100) = T_{m-1,0} (2011) \cdot \sqrt{\frac{H_s (2100)}{H_s (2011)}}$$

Deze benadering zou ook kunnen worden toegepast om de $T_{m-1,0}$ voor planperiode 2050 af te schatten.

- De correcties voor H_s en $T_{m-1,0}$ voor de planperiodes 2050 en 2100 zijn niet altijd correct uitgevoerd in Tabel 8 en Tabel 10 (Rijkswaterstaat, 2010).
- Voor de beoogde doeleinden zijn gegeven ontwerprandvoorwaarden uit (Rijkswaterstaat, 2010) voldoende conservatief en bruikbaar.

4.5.2.2 Risicoscan en faalmechanismen

Een risicoscan is uitgevoerd (Tabel 4.19). De faalmechanismen die met “+” beoordeeld zijn, zorgen voor het grootste risico's. Vervolgens is een verdere beschouwing per faalmechanisme gegeven.

Faal-mechanisme	Overslagbestendig ¹⁰
Macrostabiliteit binnenwaarts, bij overslag	+ ¹¹
Macrostabiliteit, buitenwaarts	+
Piping	0
Microstabiliteit	+
Stabiliteit onderwatertalud, Waddenzeezijde	0
Zettingsvloeiing	0
Stabiliteit bekleding buitentalud	0 ¹²
Stabiliteit en erosiebestendigheid bekleding, binnentalud	+

+ = van groot belang, d.w.z. vormt het grootste risico

0 = check nodig, maar van minder belang

- = nauwelijks van belang, d.w.z. vormt nauwelijks een risico

Tabel 4.19 Risico's per faalmechanisme voor een overslag bestendige variant

Macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts

Grofweg kan gesteld worden dat een verloop van de stijghoogte over het talud tussen binnen- en buitenzijde nabij de teen van de tuimeldijk van 1 á 2 meter nog net moet kunnen, zonder dat er opdrukken of ondiepe afschuiving optreedt. Met dit verloop in stijghoogte is dan ook gerekend met het programma MStab om de macrostabiliteit te onderzoeken. Uitgangspunt is geweest dat bij een nog hogere freatische lijn opdrukken en afschuiven van de gehele bekleding het relevante inleidende mechanisme is.

Piping

Piping vormt een beperkt risico. De opbouw van de grondlagen en de afmetingen van de dijkprofielen zijn in ieder geval niet ongunstiger dan in voorgaande studie (Deltares, 2008). Uit

10. Indien een overslagdebiet van meer dan 10 l/s/m wordt toegestaan, moet de dijk overslagbestendig worden gemaakt.

11. Hier wordt ervan uitgegaan dat de freatische lijn sterk verhoogd is ten gevolge van infiltratie.

12. Er moet worden nagegaan of de huidige bekleding stabiel is onder de ontwerprandvoorwaarden

de voorgaande studie is gebleken dat piping geen groot risico vormt en er een flinke veiligheidsmarge aanwezig was. Daarom is in deze studie niet meer gerekend aan piping.

Microstabiliteit

Naar verwachting treedt een lokale opbolling van de freatische lijn op bij de binnenteen van de tuimeldijk. Als de waterstand in de dijk ten gevolge van infiltratie te hoog oploopt, dan kan de bekleding op het binnentalud worden opgedrukt, of kan als geheel afschuiven. Grofweg kan gesteld worden dat een stijghoogteverschil tussen binnen- en buitenzijde nabij de teen van de tuimeldijk van 1 á 2 meter nog net moet kunnen, zonder dat er opdrukken of ondiepe afschuiving optreedt. Een grove handberekening laat zien dat als de gemiddelde doorlatendheid van het dijklichaam 10^{-4} tot 10^{-5} m/sec is, er in een 10-tal uren genoeg water infiltreert door het buitentalud, kruin, binnentalud en een zone op de binnenberm nabij de teen van de tuimeldijk, om een stijging van het freatisch vlak van enkele meters te verkrijgen.

Stabiliteit onderwatertalud Waddenzeezijde en zettingsvloeiing

De opbouw van de grondlagen en de afmetingen van de dijkprofielen zijn in ieder geval niet ongunstiger dan in voorgaande studie (Deltares, 2008). Uit de voorgaande studie is gebleken dat voor de binnenwaartse versterking zettingsvloeiing geen groot risico vormt. Bovendien zijn geen nieuwe gegevens beschikbaar die mogelijk van belang zijn. Daarom is verder niet meer gerekend aan de stabiliteit van het onderwatertalud en aan zettingsvloeiing.

Stabiliteit steenbekleding buitentalud

De steenbekleding aan de buitenzijde is mogelijk te licht. Dit moet nader worden onderzocht.

Stabiliteit en erosiebestendigheid bekleding binnentalud (deklaag van klei met goed ontwikkelde grasmatten)

Uit recent uitgevoerde overslagproeven volgt dat de grasbekleding met enige erosiebeschermende maatregelen (Deltares 2008) waarschijnlijk wel overslagbestendig kan worden gemaakt, zodat er 10 l/s/m kan worden toegelaten. Uit (Deltares, 2009-2) kan worden afgeleid dat het mechanisme ondiepe afschuiving waarbij zich waterspanningen opbouwen op de scheiding tussen toplaag en onderlaag niet waarschijnlijk is. Het overslaande water infiltreert daartoe te gemakkelijk naar de zandige dijk kern. Naar verwachting treedt dit ook op bij een gestructureerde klei deklaag.

De proeven naar golfoverslag hebben zich beperkt tot typische zee- en estuariumdijken bij golven van 2 m. Het effect van een grotere of kleinere golfhoogte is nog niet onderzocht. De duur dat overslag optreedt, en het effect van de grote golfhoogte (> 3,5 meter) en de langere golfperiode moeten nog worden nagegaan.

Combinaties van faalmechanismen zijn waarschijnlijk, met name de combinatie met micro-instabiliteit. Verderop wordt ingegaan op de resultaten uit enkele MStab berekeningen naar de macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts.

4.5.2.3 Resultaten van PC-Overslag berekeningen

Tabel 4.20 geeft de resultaten ten aanzien van de buitenberm en de dijkhoogte, uitgaande van de diverse maatgevende dwarsprofielen (Bijlage 5D). De dwarsprofielen zijn ontleend aan de autocad file "Nieuw Afsluitdijk".

Berekeningen Afsluitdijk in jaar 2100 met overslag 10 l/s/m, frequentie van 1/1.430			
Dwarsprofiel	Bermbreedte	Bermhoogte = Ontwerppeil	MKH(10)
D	5	5,7	9,2
E	5	5,8	9,8
G	7	5,8	10,0
I	5	5,9	9,9
M	5	5,9	9,2
Berekeningen Afsluitdijk in jaar 2100 met overslag 10 l/s/m, frequentie van 1/10.000			
Dwarsprofiel	Bermbreedte	Bermhoogte = Ontwerppeil	MKH(10)
D	5	6,05	9,9
E	10	6,15	10,0
G	10	6,15	10,3
I	10	6,25	10,1
M	5	6,25	9,8
Berekeningen Afsluitdijk in jaar 2100 met overslag 10 l/s/m, frequentie van 1/50.000			
Dwarsprofiel	Bermbreedte	Bermhoogte = Ontwerppeil	MKH(10)
D	10	6,4	10,0
E	10	6,5	10,7
G	10	6,5	11,1
I	10	6,6	10,8
M	9	6,6	10,0

Tabel 4.20 Kernmerken van de buitenberm en de dijkhoogte voor de planperiode 2100

Voor het zwaarst aangevallen profiel G zijn ook PC-Overslag berekeningen gemaakt voor de planperiode 2050 (Tabel 4.21).

Berekeningen Afsluitdijk in jaar 2050 met overslag 10 l/s/m, .freq. 1/1430:			
Dwarsprofiel	Bermbreedte	Bermhoogte = Ontwerpp	MKH(10)
G	5	5,25	9,4
Berekeningen Afsluitdijk in jaar 2050 met overslag 10 l/s/m, freq. 1/10.000:			
Dwarsprofiel	Bermbreedte	Bermhoogte = Ontwerpp	MKH(10)
G	6	5,6	10,0
Berekeningen Afsluitdijk in jaar 2050 met overslag 10 l/s/m, freq. 1/50.000:			
Dwarsprofiel	Bermbreedte	Bermhoogte = Ontwerpp	MKH(10)
G	10	5,95	10,3

Tabel 4.21 Kernmerken van de buitenberm en de dijkhoogte voor de planperiode 2050, voor het zwaarst aangevallen profiel G

Voor de planperiode tot 2050 zijn ook berekeningen uitgevoerd met een 0,2 sec lagere golfperiode, welke volgt uit de aanname dat de golfsteilheid tot 2100 gelijk blijft. De invloed op de kruinhoogte bedraagt maximaal 15 cm. Het resulterende dwarsprofiel voor dijksectie 3 met de planperiode 2100 en een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 (12-20 km) is gegeven in de bijlage 5E. De diepte van de onderwaterbodem aan de zijde van de Waddenzeezijde is 9 m – NAP en aan de zijde van het IJsselmeer 5 m – NAP. Deze diepten zijn ontleend aan kaarten met informatie over echolodingen en komen voor langs grote delen van het tracé. Voor de beoordeling van de sterkte van de dijk zijn dit conservatieve aannamen. Vandaar dat hiermee de gevoeligheidsanalyses met het programma MStab zijn uitgevoerd.

Ter vergelijking zijn in Tabel 4.22 de resultaten met betrekking tot het dwarsprofiel gegeven, zoals eerder werd bepaald op basis van de randvoorwaarden uit Tabel 4.16 en met dezelfde uitgangspunten (Deltares, 2008).

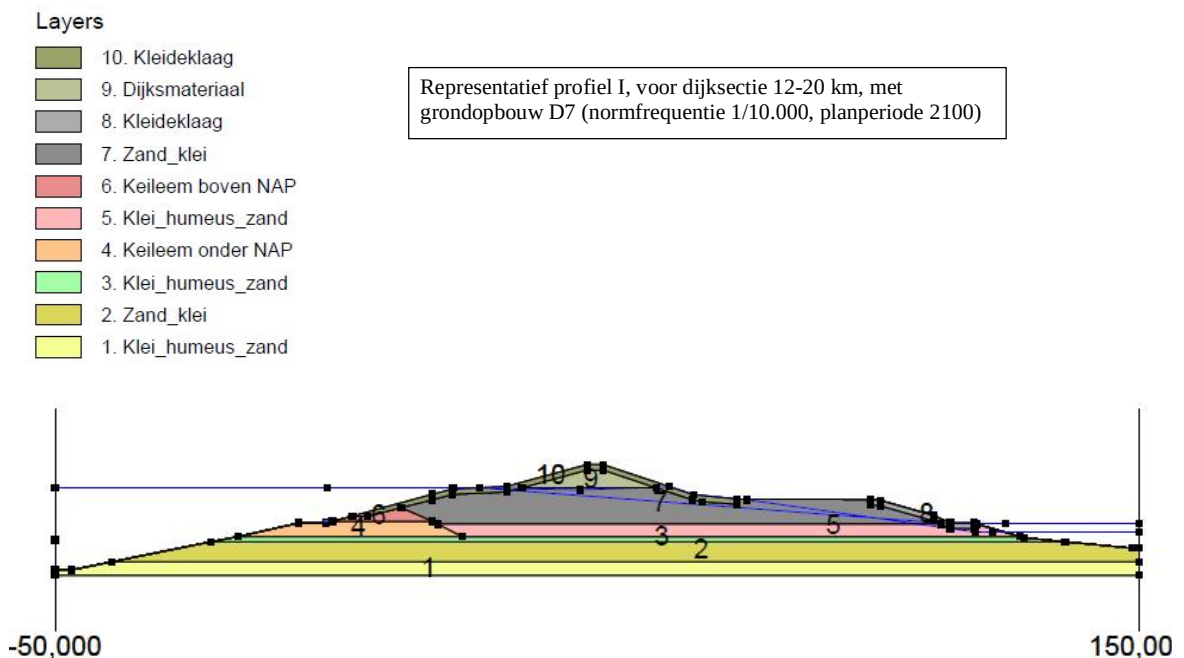
Kruinhoogte (m)	Overslag	
Bermbreedte (m)	1 l/m/s	10 l/m/s
5 m	12,5	10,6
10 m	11,5	9,9

Tabel 4.22 Berekende kruinhoogte; breedte buitenberm 5 of 10 meter, overslag 1 of 10 l/s/m (Deltares, 2008)

4.5.2.4 Macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts

De stabiliteit voor maatgevende profiel voor dijksectie 3 is onderzocht met behulp van een Bishop glijvlak analyse. De analyse is gedaan door berekeningen uit te voeren met het programma MStab. De aangegeven uitgangspunten zijn gehanteerd en de analyse is uitgevoerd voor de dijksectie die het zwaarst aangevallen wordt. Deze dijksectie ligt tussen 12 en 20 km. Als maatgevende bodemopbouw is D7 gehanteerd. Uit de ligging van de glijcirkels blijkt dat bodemopbouw D7 ook maatgevend is voor alle dijksecties.

Als uitgangspunt is profiel I genomen, omdat het grootste deel van de sectie ongeveer dit profiel heeft, en profiel G alleen over een paar km aanwezig is. Dit profiel I blijkt voor de inschatting van de stabiliteit redelijk representatief voor de gehele dijk. Het uitgangsprofiel staat weergegeven in Figuur 4.11, evenals de grondopbouw.



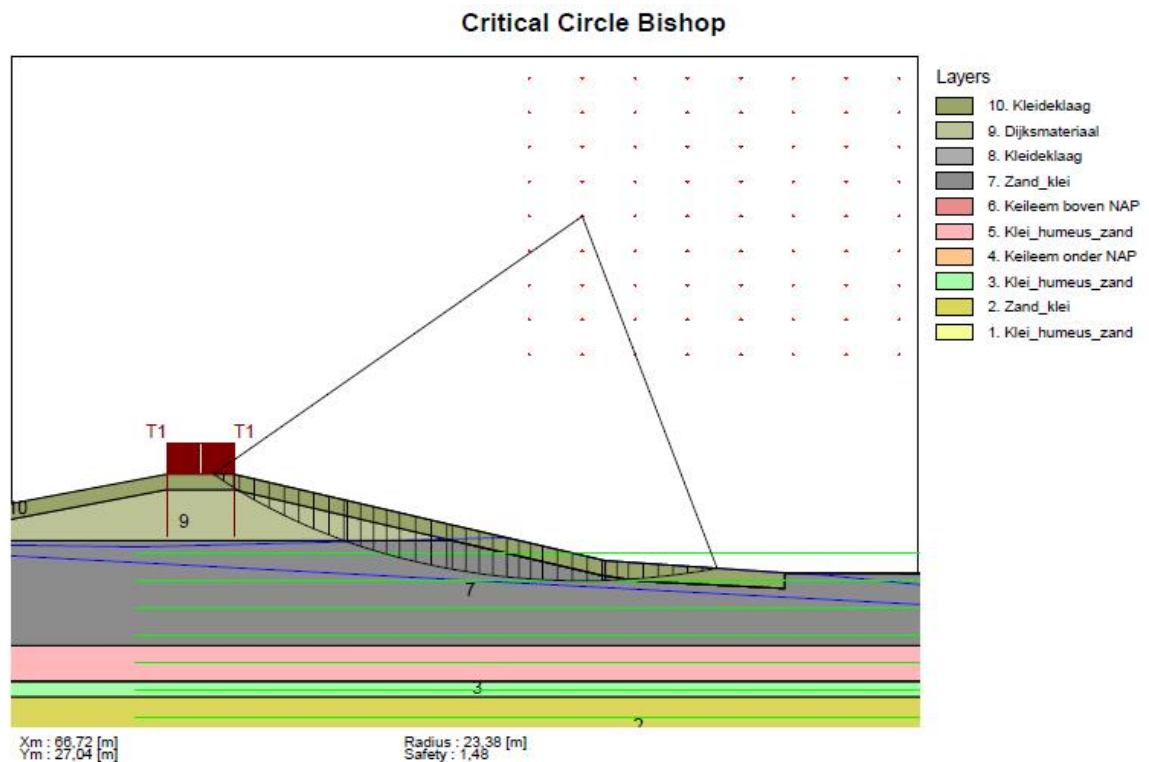
Figuur 4.11 Grondopbouw van representatief profiel (Bijlage 5F)

De dikte van de kleilaag op het bovenste deel van het buitentalud, de kruin en het binnentalud is 1 m dik. Voor de eenvoud is de onderlaag bestaande uit keileem op het onderste deel van het buitentalud samen genomen met de toplaag van klei, en met

parameters overeenkomend met goede erosiebestendige klei. De grondeigenschappen zijn gegeven in Tabel 4.18.

(Fugro, 2008) vermeldt dat de rekenwaarde voor de cohesie van de kleilagen minimaal 0,8 kPa bedraagt. Met name voor de keileem en de klei onder NAP-niveau is er een reële kans dat de rekenwaarde voor de cohesie gelijk is aan deze ondergrens, met een beperkt risico op een nog lagere waarde. De inschatting is gebaseerd op geologische gebiedskennis. Vandaar dat er ook berekeningen zijn gedaan met deze verlaagde c-waarde voor de laag bestaande uit klei_humeus_zand en de keileemkern onder NAP-niveau.

De freatische lijn in de dijk ligt bij de binnenteen van de tuimeldijk 1,5 m hoger dan het niveau van maaiveld op deze plaats (Figuur 4.12). De motivatie voor deze keuze is als volgt: Grofweg kan gesteld worden dat een stijghoogteverschil tussen binnen- en buitenzijde nabij de teen van de tuimeldijk van 1 á 2 meter nog net moet kunnen, zonder dat er opdrukken of ondiepe afschuiving optreedt.



Figuur 4.12 Ligging van de freatische lijn (bovenste blauwe lijn)

Vervolgens is een berekening uitgevoerd met een lineair verloop van de freatische lijn gelegen tussen de waterstanden in de Waddenzee en het IJsselmeer. De voorlopige resultaten staan in Tabel 4.23. De glijcirkels zijn gegeven in de Bijlagen 5G t/m 5M.

Deel dijk	Eigenschappen	Verkeers-belasting	Stabiliteits-factor	Inschatting risico ¹³	Bijlage
Tuimeldijk binnenwaarts	Zie tabel 4.19	Ja, op de kruin en binnenberm	1,48	veilig	G
Talud buitenwaarts	Zie tabel 4.19	idem	1,84	veilig	H
Talud binnenberm	Zie tabel 4.19	idem	1,48	veilig	I
Talud binnenberm	Verlaagde cohesie klei/keileem onder NAP ($c'=0,8$)	idem	1,35	substantieel risico	J
Tuimeldijk binnenwaarts	Dijksmateriaal i.p.v. Zand_klei (Tabel 4.19)	idem	1,32	substantieel risico	K
Talud buitenwaarts	Verlaagde cohesie klei/keileem onder NAP ($c'=0,8$)	idem	1,71	veilig	L
Tuimeldijk binnenwaarts	Verlaagde freatische lijn, lineair in dijk	idem	1,84	veilig	M

Tabel 4.23 Resultaten van de MStab berekeningen ten aanzien van macrostabiliteit (Figuur 4.11)

Uit Tabel 4.23 volgt dat de verlaagde cohesie een potentieel risico vormt. Tevens blijkt dat de combinatie "minder goed dijk materiaal en verhoogde freatische lijn" (zie Bijlage K) ook een potentieel risico vormt. Aangezien de grondeigenschappen geschat zijn aan de hand van de tabel uit NEN6740 en met veel onzekerheden zijn omgeven, wordt aanbevolen om gericht grondonderzoek uit te voeren. De onzekerheid in de ligging van de freatische lijn wordt veroorzaakt doordat niet goed bekend is hoeveel water er in de dijk infiltreert. Om dit te bepalen is het van belang om de doorlatendheden van de diverse lagen beter te kennen.

Bij een overslagdebiet van 10 l/s/m is het binnentalud vrijwel onafgebroken vochtig, waardoor de infiltratie door blijft gaan tussen de overslaande golven in. Dit zal zeker het geval zijn bij grotere overslagdebieten. De doorlatendheid van de bekledingslaag is limiterend voor de infiltratie snelheid. Het verloop van de waterstand is bepalend voor de periode waarin via het buitentalud, kruin en binnentalud met berm infiltratie optreedt.

Ten aanzien van de risico's bij de normfrequenties 1/1.430 en 1/50.000 zullen bovenstaande bevindingen niet veel afwijken, omdat de waterstanden en de dijkafmetingen relatief weinig variëren ten opzichte van de onzekerheden in de ligging van de freatische lijn en de grondopbouw.

13. Als de freatische lijn hoger ligt als aangenomen, zijn deze inschattingen niet meer correct.

5 Conclusies en Aanbevelingen

Door consortia van marktpartijen zijn vier visies voor een toekomstige inrichting van de Afsluitdijk ontwikkeld:

- Monument in Balans;
- Natuurlijk Afsluitdijk;
- WaddenWerken;
- WATERmachine.

Aanvullend zijn door Rijkswaterstaat nog twee overheidsreferenties opgesteld:

- Basisreferentie;
- 2100-Robuust.

In dit hoofdstuk staan de conclusies en aanbevelingen opgenomen vanuit de vijf onderzoeksvragen.

5.1 Locatie Blue Energy Centrale

In alle vier de visies van de marktpartijen is een BEC (Blue Energy Centrale) opgenomen op de Afsluitdijk om energie te winnen door gebruik te maken van het verschil in zoutgehalte van het (zoete) IJsselmeer en de (zoute) Waddenzee. De studie is uitgevoerd op basis van beschikbare gegevens en twee expert sessies. Achtereenvolgens wordt ingegaan op:

- De optimale locatie voor een BEC;
- De interactie van een voorgestelde locatie van een BEC met het bestaande spuibeheer;
- De relatie tussen het effect op de waterkwaliteit (brakwaterafvoer in plaats van zoet water) en de energieopbrengst.

Optimalisatie van de locatie voor de Blue Energie Centrale

Voor de efficiëntie van een BEC is het belangrijk de centrale zo te plaatsen dat:

- zoutwater ingenomen kan worden daar waar het zoutgehalte zo hoog mogelijk is. Dat wil zeggen innemen zo ver mogelijk van operationele (zoetwater) spuisluizen in de diepere geulen, eventueel door gebruikmaking van pijpleidingen;
- brak water voldoende ver lozen van het innamepunt voor zoutwater om het risico van recirculatie te voorkomen. Dit wordt belangrijker naarmate een BEC groter wordt;
- de inname punten voor zoetwater en zoutwater te kiezen op plaatsen waar de hoeveelheid slib in suspensie zo laag mogelijk is: liefst ver van de kust en platen, vanuit stroomgeulen.
- aanslibbing en aanzanding bij de inlaatfaciliteiten zoveel mogelijk voorkomen kan worden door in te nemen vanuit bestaande getijde geulen of spuigeulen

Qua impact is het van belang dat de effecten van een BEC op de omgeving groter en belangrijker worden naarmate een BEC groter wordt uitgevoerd. Bij een pilot BEC en een kleine BEC zullen de effecten zeer lokaal van karakter zijn, en grotendeels te ondervangen zijn door het ontwerp van de uitlaatfaciliteiten. Grote lozingen kunnen geulvorming

veroorzaken nabij de lozingspunten. Om geulvorming te minimaliseren, is het van belang de BEC zo te plaatsen dat geloosd kan worden in een bestaande getijde geul of spuigeul.

Qua ecologische effecten wordt verwacht dat lozing van brakwater de voorkeur heeft boven lozing van zoetwater dat als negatief ervaren wordt vanwege de sterke zoet-zout fluctuaties door spuien van zoetwater. Een BEC zal echter wel continu brakwater lozen. Daarom is het bij het plaatsen van een kleine BEC en vooral bij een grote BEC van belang de BEC zo te plaatsen dat een continue stroom brakwater geen negatief effect heeft op bestaande mosselculturen, zeegrasgebieden of andere ecologische habitats. Verder zijn er geen waterkwaliteitsaspecten geïdentificeerd die een relatie hebben met de grootte (energieopbrengst) van een BEC.

Evaluatie Locatie Blue Energy Central									
locatie	Den Oever			Breezanddijk			Kornwerderzand		
Efficiëntie									
Layout									
Huidige Afsluitdijk	±	±	±	±	±	±	-	-	-
Monument in Balans	+	±	±	±	±	±	-	-	-
Natuurlijk Afsluitdijk	X	X	X	±	±	±	X	X	X
Waterwerken	+	+	-	X	X	X	X	X	X
WATERmachine	X	X	X	+	+	±	X	X	X
Betekenis kleuren en symbolen									
+	meest geschikt								
±	mogelijk geschikt (met significante aanpassingen)								
-	minst geschikt								
X	Niet relevant want niet in lijn met het visieontwerp								

Tabel 5.1 Samenvatting van de expert evaluatie van de locaties voor de verschillende typen Blue Energy centrale voor de huidige situatie en de vier toekomstvisies

Tabel 5.1 geeft een samenvatting van de conclusies per visie. De belangrijkste bevindingen en afwegingen bij de evaluaties zijn:

- De evaluatie van de locaties voor een pilot BEC is uitgevoerd op basis van dezelfde efficiëntie en impact criteria als de evaluatie van grotere centrales. Als de plaatsing van een pilot centrale vooral dient om proceskennis op te doen, en minder als eerste stap voor opschaling op die locatie is een pilot op Breezanddijk in alle gevallen geschikt in plaats van mogelijk geschikt;
- In de huidige situatie kan een centrale mogelijk bij Den Oever worden geplaatst, maar dan moet het zoute water voor de BEC via pijpleidingen uit het Marsdiep worden gehaald. Brakwater kan via de spuigeul geloosd worden. Dit is ook een mogelijkheid bij de visie Monument in Balans;

- Als bij Den Oever slechts minimaal of niet gespuid wordt, zal de westelijke Waddenzee in de buurt van Den Oever zouter worden. Dat is gunstig voor een BEC. Water met een relatief hoog zoutgehalte kan dan worden ingenomen. Dit speelt bij de visies Monument in Balans en WaddenWerken, waar de benodigde spuicapaciteit is ondergebracht bij het Extra Spuimiddel Afsluitdijk;
- het zoutgehalte bij Breezanddijk wordt sterk beïnvloed door het spuien van zoetwater via de spuisluizen bij Kornwerderzand of ESA. Afhankelijk van het spuibeleid wordt dit ook beïnvloed door het spuien bij Den Oever. Daardoor zijn de gemiddelde zoutgehalten mogelijk te laag en optredende fluctuaties mogelijk te groot om bij Breezanddijk geschikt zoutwater in te nemen. Dit is vooral van belang voor de beoordeling van de huidige situatie, en voor de visies Natuurlijk Afsluitdijk en WATERmachine;
- In de buurt van Kornwerderzand wordt regelmatig gespuid (behalve in de visie van WATERmachine). Daardoor zal in de buurt van Kornwerderzand het zoutgehalte te laag zijn voor een BEC;
- De visie Waterwerken is niet geschikt voor een grote BEC omdat de debieten brakwater te groot worden om Brakbaai morfologisch en ecologisch volgens de visie in te richten.

Interactie met het spuibeheer

Een BEC heeft op de volgende manieren een relatie met het spuibeheer:

- Een BEC neemt zoetwater in en fungeert daarmee ook als middel om overtollig zoetwater naar de Waddenzee af te voeren. Het verschil met de bestaande wijze van spuien is dat het water in een BEC wordt gemengd met zoutwater en daardoor als brakwater wordt geloosd. Het lozen gebeurt continu (24 uur per dag) in plaats van binnen tijdvensters waarin het waterpeil op het IJsselmeer hoger is dan op de Waddenzee;
- Een BEC moet water innemen uit de Waddenzee met een zo hoog mogelijk zoutgehalte. Spuien beïnvloedt het zoutgehalte in de westelijke Waddenzee sterk. Tijdens spuien is het water in de buurt van de spuisluizen nagenoeg zoet. Tot op grote afstand van de spuisluizen daalt het zoutgehalte aanzienlijk en zijn de fluctuaties in het zoutgehalte groot. Tijdens spuien is het innemen van zoutwater voor een BEC daardoor minder of niet effectief, tenzij het innamepunt voor zoutwater ver van de spuisluizen af ligt.

Waterkwaliteit versus energie opbrengst

Een BEC neemt zoetwater in vanuit het IJsselmeer, en vervangt de afvoerfunctie van de spuisluizen. Er wordt niet verwacht dat deze alternatieve manier van afvoeren van zoetwater de waterkwaliteit van het IJsselmeer beïnvloedt. Ook ten gevolge van de inname van zoutwater uit de Waddenzee worden geen significante effecten op de waterkwaliteit in de Waddenzee verwacht. Het lozen van brakwater in plaats van zoetwater op de Waddenzee zal wel effect hebben op de waterkwaliteit in de Waddenzee. Naarmate een BEC (en dus de energie opbrengst) groter wordt, wordt het gebied groter waar de waterkwaliteit beïnvloed wordt. Voor zover bekend krijgt lozing van brakwater op de Waddenzee uit ecologisch oogpunt de voorkeur boven lozing van zoetwater. Bij lozing op een (volledig) brak tussenmeer is de ecologische waarde beperkt. Wel maakt het vismigratie makkelijker. Grootschalige lozing brengt mogelijk meer slibdeeltjes in suspensie, maar de verwachting is niet dat dit veel anders zal zijn dan de effecten die optreden in de buurt van de huidige spuisluizen.

Aanbevelingen en opmerkingen

Buiten de optimalisatievraag wat betreft de keuze van de locatie voor een BEC, adviseert Deltares een nader onderzoek uit te voeren naar de haalbaarheid van een BEC op de Afsluitdijk met inachtneming van de volgende aspecten:

- Zoutgehaltes in de westelijke Waddenzee aanmerkelijk lager zijn dan in de Noordzee, waardoor mogelijk lange pijpleidingen nodig zijn om voldoende zoutwater te kunnen innemen;
- Slibgehaltes in het IJsselmeer en in de Waddenzee kunnen zo hoog zijn dat de benodigde voorzuivering en slibresiduen kostentechnisch onhandelbaar zijn;
- Voor een grote BEC is mogelijk niet genoeg zoetwater beschikbaar, waardoor een BEC enkele weken tot enkele maanden per jaar niet gebruikt kan worden.

5.2 Geotechnische haalbaarheid valmeer

De conclusies over de geotechnische haalbaarheid van een valmeer staan beschreven per aandachtsgebied.

Conclusies geologie / geohydrologie

- In het ontwerp is de laterale verbreiding en de dikte van de kleilagen van Urk ('Urk klei 1' en 'Urk klei 2') van cruciaal belang. Bij het gedeeltelijk ontbreken van een (relatief) ondoorlatende kleilaag op de locatie van het valmeer is het concept niet uitvoerbaar;
- Er is te weinig grondonderzoek voorhanden om op dit moment de haalbaarheid van het concept te kunnen beoordelen;
- Uitgaande van een afdoende onderafsluiting door de kleilaag van Urk, is een eenvoudige berekening uitgevoerd naar de stijging van de waterstand in het valmeer door lekkage en kwel. De snelheid van stijging zal de orde van 5 à 10 mm/dag bedragen;
- Gezien de grote drukverschillen in grondwater over de grondlagen als gevolg van fluctuatie in het waterpeil van het valmeer is opbarsten van de bodem een reëel risico;

Conclusies ringdijk

- Voor de aanleg van de ringdijk worden geen onoverkomelijke technische bezwaren verwacht, mits in het ontwerp rekening wordt gehouden met een mogelijke snel wisselende waterstand in het valmeer en het risico op ongecontroleerde bresvloeiing tijdens ontgraven;
- Aandachtspunten zijn de helling van het onderwatertalud en de taludbekleding. Informatie is te beperkt om daar nu een uitspraak over te doen.

Conclusies wand van cementbentoniet

- Technisch kan op de locatie een wand van cementbentoniet worden gemaakt tot een diepte van NAP -40 m. Aandacht voor de waterdichtheid over de gehele hoogte van de wand is wel noodzakelijk. Dat vereist een strenge kwaliteitscontrole (ervaring Griffpark Utrecht);
- In een volgende ontwerpfase dient onderzoek te worden gedaan naar de invloed van het zoute milieu en eventueel aanwezige verontreinigingen op de eigenschappen van de vloeibare en uitgeharde wand;
- De haalbaarheid van het toepassen van een HDPE folie is afhankelijk van de functie(s) en de voorziene lengte van de folie. De wenselijkheid voor een folie dient evenwel nader bepaald te worden.

Conclusies levensduur

- Indien goed ontworpen, is de ringdijk duurzaam, mits maatregelen worden genomen en de wand van cementbentoniet blijft functioneren;
- Ten behoeve van de duurzaamheid dienen wellicht voorzieningen te worden getroffen om het bovenste deel van de wand van cementbentoniet tegen uitdrogen te beschermen

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het ontwerp van een valmeer op de in de planstudie beoogde locatie is gebaseerd op de aanwezigheid van een afsluitende kleilaag. Meer uitgebreide kennis over de laterale verbreiding en de dikte van de kleilagen van Urk ('Urk klei 1' en 'Urk klei 2') gelegen op een diepte tussen ongeveer NAP – 20 m en NAP -40 m is van cruciaal belang. Voor verkrijging van verdere informatie kan in deze fase worden gedacht aan een combinatie van sonderingen en continu gestoken boringen. Aanwezige kleilagen worden dan doorboord. Daarom dienen de boor- en sondeergaten over de volledige hoogte te worden afgedicht om geen lekkage door de kleilaag te veroorzaken.

Daarnaast zou een prospectief geofysisch onderzoek met behulp van reflectiesismiek informatie kunnen opleveren over verbreiding (en mogelijk ook dikte) van de voorkomende kleilagen. Dit laatste onderzoek moet gecombineerd (gecorrleerd) worden met boringen en / of sonderingen.

5.3 Review van een getijdenbekken

De conclusies die getrokken kunnen worden uit de review van het getijdenbekken luiden als volgt:

Conclusies uitgangspunten AD21

- Bij het maken van plannen voor herinrichting en aanpassing van de Afsluitdijk zou idealiter de uitkomst van een studie naar het gewenste toekomstige peil op het IJsselmeer richtinggevend moeten zijn. In de plannen van AD21 is nu gekozen voor een direct te realiseren peilopzet van 0,25 m zonder verdere aanpassingen in de toekomst. De plannen moeten dan – gelet op een mogelijke zeespiegelstijging – noodzakelijkerwijs bewegen in de richting van een te realiseren pompcapaciteit in de Afsluitdijk. De keuze voor de peilopzet van 0,25 m wordt niet uitgebreid toegelicht door het consortium.
- Door AD21 wordt een scenario voor zeespiegelstijging gehanteerd waarbij de stijging van de zeespiegel later inzet dan in het referentie W+ scenario van het KNMI.

Conclusies berekening energieproductie

- De gehanteerde rekenmethode door het consortium is in dit stadium van de planvorming acceptabel.
- In de berekeningen van AD21 veroorzaken de later inzettende zeespiegelstijging, het te hoog aangenomen debiet door de turbines en, in mindere mate, de te geringe verschuiving van spuidebiet bij Den Oever naar pompdebet bij Kornwerderzand een flinke overschatting in de raming van de energieproductie van de getijdencentrale. Tegelijkertijd wordt het energieverbruik van de pompen daarmee onderschat.
- Het is onduidelijk welke verliezen worden meegenomen in de gehanteerde rendementen in de berekeningen. Er wordt niet gesproken over een verschil in rendement voor eb- danwel vloedturbineren, wat er wel zal zijn. Bovendien is het twijfelachtig of de geleiding van de aanstroming naar de turbines zodanig vormgegeven

kan worden (dmv venturi vorm) dat geen grote stromingsverliezen op zullen treden. Het stromingsrendement zou daardoor erg ongunstig kunnen uitvallen. Al met al lijkt het systeemrendement aan de optimistische kant te zijn gekozen, resulterend in een overschatting in de raming van de energieproductie van de getijdencentrale. Tegelijkertijd wordt het energieverbruik van de pompen daarmee onderschat.

- In de berekeningen wordt geen rekening gehouden met periodes dat de centrale buitenbedrijf zal zijn ten behoeve van onderhoud en schoonmaak, wat volgens een eerste schatting ongeveer 5% van de tijd het geval kan zijn. Dit resulteert in een lagere energieproductie. Bovendien wordt niet genoemd dat de centrale tijdens stormcondities mogelijk ook buiten bedrijf gesteld zou moeten worden.
- Voor de ESA-variant gelden dezelfde bovenstaande constatering. Bovendien wordt het verwachte hogere rendement van de ESA variant ten opzichte van de Kornwerderzand variant door verbeterde vormgeving aan de hoge kant geschat.
- Het consortium heeft ten onrechte bij het berekenen van het opgestelde vermogen van de centrale geen rendement meegenomen. Het genoemde, opgestelde vermogen van 8 MW komt daarmee uit op ongeveer 5 MW.

Conclusies getijdenbekken algemeen

- Wereldwijd zijn slechts enkele getijdencentrales operationeel. De natuurlijke getijslag die bij Kornwerderzand optreedt, is laag in vergelijking met de getijden die op locaties van bestaande en geplande centrales heerst.

Al met al kan gesteld worden dat een getijdencentrale bij Kornwerderzand technisch realiseerbaar is. Er dient echter wel een aanzienlijk lagere verwachting ten aanzien van de energieproductie te zijn dan gepresenteerd door AD21. Zonder vervolgonderzoek kan er geen kwantitatieve uitspraak gedaan worden over wat de realistische energieproductie zou worden.

Onbeantwoorde vragen

Enkele nog onbeantwoorde vragen zijn:

- Bij het verpompen van water via de getijdencentrale zal, wanneer er geen voorzieningen worden getroffen, met een onregelmatige frequentie en met een wisselende hoeveelheid zoet IJsselmeerwater op de zoutere vloedkom terecht komen. Wat is het effect hiervan op de waterkwaliteit in relatie tot natuurontwikkeling en ecosysteem in het tussenmeer?
- Welke effecten zijn te verwachten bij een verschuiving van de spuistroom van Kornwerderzand naar Den Oever? Gedacht kan worden aan onder andere effecten van doorstroming, stroombeelden en waterkwaliteit IJsselmeer, verschuiving van de zoetwaterlozing van oost naar west op de Waddenzee en erosie rondom sluizen Den Oever.
- Hoe wordt de getijdencentrale als onderdeel van de primaire waterkering ingebed in de overall veiligheid?
- Er wordt een kosten-batenanalyse van de getijdencentrale gepresenteerd door het consortium. Hoe verandert deze analyse wanneer gelijke prijzen voor inkoop en verkoop van elektrische stroom worden gehanteerd, in plaats van groene prijzen voor verkoop?

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Als een kwantitatieve uitspraak vereist is over de verwachte energieproductie en -consumptie van een getijdencentrale op de Afsluitdijk zal een uitgebreidere studie uitgevoerd moeten worden. Hierin zouden onder andere de volgende aspecten aandacht moeten krijgen, dan wel meegenomen moeten worden:

- inachtneming van de natuurlijke getijslag op de Waddenzee;
- hydrodynamiek en getijslag van de vloedkom;
- karakteristieken van de pomp/turbines aangeleverd door leverancier;
- aannames betreffende buitengebruikstelling centrale tgv onderhoud en stormcondities;
- verdere onderbouwing van de spui/pomp scenario's en de verdeling van afvoeren over Den Oever en Kornwerderzand.

Om de werkelijk optredende getijslag in de vloedkom vast te stellen zal een hydrodynamisch model ingezet moeten worden, waarin de geometrie en bodemligging van het tussenmeer uitdrukkelijk meegenomen worden. Ook om de pompturbine prestaties te onderzoeken is het mogelijk een model toe te passen, mits gegevens over de pompkarakteristieken beschikbaar zijn. Met deze informatie zou uiteindelijk het verval, daarbij behorende debiet en geleverde / verbruikte energie geïntegreerd over de tijd kunnen worden vastgesteld.

5.4 Schaalgrootte van ecologische verbeteringen

Drie van de vier visies stellen arealen en ontwikkelingen voor die qua schaalgrootte significante ecologische verbeteringen kunnen opleveren. Deze drie visies zijn: Natuurlijk Afsluitdijk, WATERmachine en Waddenwerken. Monument in balans stelt ook gebieden voor die normaliter groot genoeg zijn voor significante verbeteringen gericht op ecologie, maar in deze visie worden veel ontwikkelingen gepland in al bestaande natuurgebieden (die dus al heel waardevol zijn). Daardoor bestaat er de kans dat er geen of weinig significante ecologische verbeteringen zullen plaatsvinden.

In deze drie visies worden natuurgebieden voorgesteld die qua omvang groot genoeg zijn voor het bereiken van Natura2000 doelen (vogels). Ze zijn zeker niet te klein omdat sommige vogelsoorten namelijk een groot areaal nodig hebben om voedsel te zoeken. Daarnaast zullen natuurgebieden ook mogelijkheden voor recreatie gaan bieden. Het combineren van recreatie en stiltegebieden voor bijvoorbeeld broedende vogels pleit eveneens voor grote natuurgebieden.

De visie Monument in Balans stelt echter veel nieuwe habitats voor in bestaande gebieden met een hoge natuurwaarde. Daardoor is het onduidelijk of de nieuw voorgestelde habitats wel een ecologische verbetering op zullen leveren en het verlies aan bestaande habitats ruimschoots gaan compenseren. Het brakwatergebied nabij Makkum dient de voormalige kwelders, die tegenwoordig binnendijs liggen, erbij te betrekken om hier van een echte ecologische verbetering te kunnen spreken. Zo niet, dan is de omvang van dit gebied onvoldoende groot.

Vier criteria zijn onderscheiden en meegenomen bij de beoordeling. De vier criteria zijn Natura 2000, KRW, Wat raak je kwijt of wat komt erbij en de overgang van zoet naar zout water. Aan alle vier de visies is op basis van bovengenoemde criteria een score (+, - of $\pm$) toegekend.

	Natura 2000	KRW	Wat erbij/wat eraf	Zoet-zout gradiënt
Monument in Balans	±	-	±	+
Natuurlijk Afsluitdijk	+	-	±	+
WATERmachine	+	-	+	±
WaddenWerken	+	deels + en deels - ¹⁴	+	+

Tabel 5.2 Overzicht van criteria en toetsingsresultaten. +=meerwaarde, -=afname, ±=onbekend of gelijk. Criterium Natura2000 is van direct belang voor de grootte van natuurgebieden.

De verschillende visies dragen in verschillende mate bij aan het realiseren van Natura2000-doelen:

- Monument in Balans: levert geen bijdrage;
- Natuurlijk Afsluitdijk: verbinden van de Waddenzee met het IJsselmeer;
- WATERmachine: extra habitat voor vogels door creatie van zoetwatermoeras en foerageergebied voor vogels door de aanleg van een inter-getijdengebied;
- Waddenwerken: aanleg jonge kwelders, zoet-zout overgang.

Bij de beoordeling in de expert sessie scoren drie visies dus goed op het criterium 'Natura2000'. De visie Monument in Balans vormt een twijfelgeval vanwege de potentie om jonge kwelders te laten ontstaan. De positieve score van de andere visies in Tabel 5.2 heeft te maken met de grootte van voorgestelde natuurgebieden.

De kwelderwerken die in Waddenwerken worden voorgesteld kunnen zowel in één keer als gefaseerd worden aangelegd. Indien gefaseerd dan moet de minimale omvang 500 ha zijn (Dijkema et al., 2007).

De brakwatergebieden die in de visies Natuurlijk Afsluitdijk en WATERmachine worden voorgesteld in het IJsselmeer, zijn qua omvang groot genoeg om ecologische verbeteringen te realiseren omdat ze vogels van voedsel, rust -en broedlocaties kunnen voorzien. De visie Monument in Balans stelt een brakwatergebied voor vlakbij Makkum. Het voorgestelde brakwatergebied is echter te klein. Het gebied kan worden vergroot door de voormalige kwelders, die nu binnendijs liggen, bij dit brakwatergebied te gaan betrekken.

De kans is echter aanwezig dat de waterkwaliteit in deze brakwatergebieden slecht zal zijn waardoor onder andere algenbloei op kan treden. De kans van optreden is niet afhankelijk van de grootte van het gebied.

Alleen de visie WaddenWerken scoort positief op het criterium KRW. Dat komt omdat de natuurlijke overgang van zoet naar zout water mogelijk een positieve score voor vis inhoudt. Echter, aan IJsselmeerzijde kan deze score weer negatief uitvallen omdat de kans bestaat op algenbloei bij de Makkumerwaard. De visies Monument in Balans, Natuurlijk Afsluitdijk en WATERmachine scoren negatief vanwege de kans op blauwalgen. Voor Monument in Balans kan de KRW-score ook nog positief uitvallen indien kwelders ontwikkeld gaan worden.

De beide visies WATERmachine en Waddenwerken scoren positief op het criterium "Wat raak je kwijt en wat komt erbij?" vanwege de aanleg van een tussenmeer (WATERmachine)

14. Positief (+) aan de Waddenzeekant en negatief (-) aan de IJsselmeerkant (zie tekst).

en een luwtebank en kwelderwerken (Waddenwerken). Natuurlijk Afsluitdijk scoort onbekend omdat het brakwatermeer mogelijk geen meerwaarde oplevert gezien de druk in de zomer op zoet water en het mogelijk opleveren van problemen met de waterkwaliteit. De visie Monument in Balans scoort onbekend omdat onzeker is of de plannen in bestaande natuurgebieden waardevol zijn meer op zullen gaan leveren.

Drie visies scoren positief op het criterium zoet-zout gradiënt. Dat zijn de visies van Monument in Balans, Natuurlijk Afsluitdijk en Waddenwerken. De overgang van zoet naar zout water is als het natuurlijkst ervaren in de visie van Waddenwerken omdat het de meest geleidelijke overgang is. De score van Waddenwerken zou dan eigenlijk ++ moeten zijn. In de visie van WATERmachine ligt het tussenmeer vrij geïsoleerd ten opzichte van het IJsselmeer en de Waddenzee. Daardoor is eigenlijk geen sprake van een natuurlijke zoet-zout overgang.

Bij de beoordeling van de visies in de vorm van een expert sessie is de verwachting uitgesproken dat met de aanleg van een aantal natuurgebieden aan de IJsselmeerszijde, de waterkwaliteit mogelijk zou kunnen verslechteren met blauwalgen als uiteindelijk gevolg. Bij het verder uitwerken van het ontwerp behoeft dat punt verdere aandacht. Mogelijk kan aansluiting plaatsvinden bij het onderzoeksprogramma ANT IJsselmeer.

5.5 Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties

De conclusies en aanbevelingen voor de onderzoeksvraag naar de gevoeligheidsanalyse van de overheidsreferenties zijn onderstaand gegeven. Ze zijn gegroepeerd naar de verschillende deelvragen.

Randvoorwaarden

De aangeleverde randvoorwaarden door de opdrachtgever hebben een beperkte nauwkeurigheid. Voor deze verkennende fase zijn ze echter nauwkeurig genoeg. Ten aanzien van een vervolgfase geldt dat Hydra-K vooralsnog niet in staat zal zijn om de hydraulische randvoorwaarden te berekenen bij een normoverschrijding van 1 keer per 50.000 jaar. Het zal een substantiële inspanning kosten om dit in de toekomst wel te kunnen.

Gevoeligheids analyse dwarsprofiel

Bij een bermbreedte van maximaal 10 meter en een toelaatbaar overslag debiet van 10 l/s/m, is het doorgaans mogelijk een dijkhoogte te berekenen die kleiner of gelijk is aan NAP+11 m. Dat geldt ook voor de normfrequentie van 1 keer per 50.000 jaar. Een binnentalud met een helling van 1:3 lijkt vooralsnog haalbaar. Er zijn echter risico's, zoals aangegeven in deze studie, die nader moeten worden onderzocht. Taludverflauwing naar 1:4 is een mogelijke oplossing. Daarvoor zal echter ruimte moeten worden gereserveerd.

In een voorgaande studie bij de oude randvoorwaarden was voor profiel I een dijkhoogte berekend van 9,89 m, bij een breedte voor de buitenberm van 10 m voor een planperiode tot 2100. Met de nieuwe randvoorwaarden is dit 0,2 m lager dan de kruinhoogte van 10,1 m met een 10 m brede berm voor hetzelfde profiel. Qua dijkhoogte is de dijksectie 3 tussen kilometerpaal 12 en kilometerpaal 20 het meest ongunstig. Voor de planperiode tot 2100 en een breedte voor de buitenberm van 10 m, bedraagt de vereiste kruinhoogte 10,3 m, bij een overslagdebiet van 10 l/s/m. Bij een kortere planperiode tot 2050, kan worden volstaan met een breedte voor de buitenberm van 5 à 6 m.

Ook is gekeken naar de gevoeligheid van een verandering van normfrequentie op de uitkomsten. Een overschrijdingsfrequentie van 1/1.430 geeft een smallere buitenberm;

namelijk van 5 tot 7 m in plaats van 10 m. Bij een overschrijdingsfrequentie van 1/50.000 dient de dijk 1 m hoger te worden; hoogte van de dijk 11,1 m voor dijksectie 3.

Risicoscan

Het moeilijke punt in de beschouwing van de risico's is dat vooralsnog eisen ontbreken voor het toetsen op macrostabiliteit. Dit wordt veroorzaakt door de grote onzekerheid over de mate waarin infiltratie optreedt, zowel via de grondlagen onder de dijk, als via de taluds en de bermen. Volstaan is met een kwalitatieve beoordeling met behulp van een gevoeligheidsanalyse.

Er is te weinig bekend over de grondopbouw en grondeigenschappen van de dijk, om in deze fase al tijdsafhankelijke berekeningen uit te voeren naar de grondwaterstroming.

Ondanks het ontbreken van gegevens over de grondeigenschappen is toch gerekend aan het faalmechanismen met het grootste risico. Noodgedwongen zijn daarbij grove aannamen gedaan. Het blijkt dat, indien de freatische lijn veel hoger wordt genomen dan het lineaire verloop tussen de waterstand in de Waddenzee en de waterstand in het IJsselmeer, het mechanisme microstabiliteit het inleidende mechanisme is.

Het risico op het optreden van microstabiliteit kan worden verminderd door het binnentalud verder te verflauwen. Bij een overslagdebiet van 10 l/s/m is de dijk met aanvullende maatregelen wel erosiebestendig te maken, zoals het toepassen van een versterkte grasmat of van een open steenbekleding (Deltares, 2008).

Een volledige probabilistische analyse van de onzekerheden is gewenst bij het uitwerken van het definitieve ontwerp. Deze analyse kan inzicht geven in de te hanteren eisen, zoals een juiste keuze van de zogenaamde schematisatie factor. Een onzekerheidsanalyse van de belasting kan aanleiding zijn de toeslag voor robuustheid bij te stellen. Een lagere toeslag leidt tot een minder 'zwaar' en dus tot een goedkoper ontwerp.

Voor een onzekerheidsanalyse van de ondergrond is nader grondonderzoek, inclusief laboratoriumproeven, gewenst ten behoeve van het maken van het voorontwerp. Er zijn namelijk weinig gegevens voorhanden over de opbouw en de eigenschappen van de ondergrond. Op dit moment zijn vooral sonderingen ter plaatse van de kruin van de dijk uitgevoerd.

Met de nieuwe inzichten uit het aanvullende onderzoek kan vervolgens uit het aanvullend onderzoek een gevoeligheidsanalyse voor de maatgevende bezwijkmechanismen worden uitgevoerd voor de diverse ontwerpvarianten. Op basis hiervan kan worden beoordeeld of het ontwerp voldoende veilig is. Bij het uitwerken van de voorkeursvariant dienen ook de minder maatgevende mechanismen nader te worden onderzocht.

Het plaatsen van peilbuizen en waterspanningsmeters levert informatie op tijdens het optreden van (extreem) hoog water. Het maken van (tijdsafhankelijke) berekeningen naar de grondwaterstroming is nodig om te komen tot een realistische schematisatie van optredende waterspanningen. Deze berekeningen kunnen worden geverifieerd door gebruik te maken van de metingen uit de waterspanningsmeters.

Referenties

Arcadis, Dredging International, NUON, HNS en Alkyon (2010)
Afsluitdijk 21^e eeuw: beantwoording vervolgvragen marktverkenning (2010)
Rapport, 22 januari 2010, pp. 40.

Bernshtein, L.B. (1996)
Tidal Power Plants
Seoul: Korea Ocean Research and Development Institute

Deltacommissie (2008)
Samen werken met water; een land dat leeft, bouwt aan haar toekomst,
Rapport, Den Haag pp134.

Deltares (2008)
Geotechnische risico-evaluatie van vijf basisreferentievarianten voor versterking Afsluitdijk,
Rapport no. 432660-0007, Delft, september 2008.

Deltares (2009-1)
Grondmechanisch onderzoek Houtribdijk, bijlage F, Deltares, juli 2009, no. 1001656-002-GEO-0002.

Deltares (2009-2)
SBW-Golfoverslagproeven, Factual Report Monitoring Afsluitdijk,
Factual Report no. 1200259-001-GEO-0002, Delft, juli 2009.

Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman & P.W. van Leeuwen (2007)
Monitoring van kwelders in de Waddenzee.
Alterra-rapport 1574.

Dionisio Pires, L.M. (2007)
Cyanobacteriën in Terra Nova: literatuuronderzoek naar oorzaken van en maatregelen tegen de opkomst en dominantie van cyanobacteriën. NIOO-rapport, Juni 2007.

Ecofys (2007)
Energie uit zout en zoet water met osmose, een visualisatie bij de Afsluitdijk,
Rapport, 17 Oktober 2007.

Fugro (2008)
Geotechnische schematisatie Afsluitdijk,
Rapport 1207-0127-000, Leidschendam, 26 mei 2008.

Gorlov, A.M. (2001)
Tidal Energy
Northeastern University, Boston, USA

Post, J.W. (2009)
Blue Energy, Electricity Production from Salinity Gradients by Reverse Electrodialysis,
PhD Thesis, Wageningen University, ISBN 978-90-8585-510-1.

- Quak, R.W. (2009)
Feasibility of a Power Plant, Blue Energy in the Dutch Delta.
MSc. Thesis, report 1111000, TU Delft, 2009.
- Royal Haskoning (2009)
'Tidal energy – lessons learnt from the United Kingdom and opportunities for the Netherlands'
October 2009
- Rijkswaterstaat, Provinsje Fryslân en Provincie Noord-Holland (2009)
Dijk en Meer: eindrapportage verkenning Toekomst Afsluitdijk
Rapport, maart 2009, pp 103 plus CD.
- Rijkswaterstaat (2010)
Ontwerprandvoorwaarden toekomst Afsluitdijk
Memo TA2010-def.doc, email E. Regeling aan B. Wichman, datum 8-1-2010
- Van Eerden, M.R. (1998)
Patchwork; patch use, habitat exploration and carrying capacity for water birds in dutch freshwater wetlands
PhD, Rijksuniversiteit Groningen, 23 februari 1998, pp 448.
- Van der Molen, D.T. & R. Pot (red.) (2007)
Referenties en maatlatten voor natuurlijke wateren voor de Kaderrichtlijn Water.
Utrecht, STOWA, 362 pp.
- WL | Delft Hydraulics (1997)
'Renovatie spuisluis IJmuiden. Beoordeling hydraulisch ontwerp schuiven'
Rapport Q2172, mei 1997
- WL | Delft Hydraulics (2003)
'IJKmetingen spuisluizen Afsluitdijk'
Rapport H3849 (drie delen), 2003
- Zwan, S. van der, Pothof, I.W.M., Blankert, B., Bara, J. (2010)
Feasibility of Osmotic Power from a hydrodynamic analysis at module and plant scale
Journal of Membrane Science (in review)

Bijlage 1 Locatie Blue Energy Centrale (BEC)

B1. Blue Energy technieken

In een BEC wordt energie gewonnen door het mengen van zoet en zout water. De bedoeling van een BEC op de Afsluitdijk is dus dat die energie produceert door het mengen van zoet water uit het IJsselmeer met zout zeewater uit de Waddenzee. Daarbij zal brak water worden geproduceerd dat geloosd wordt op de Waddenzee, al dan niet via een “tussenmeer” (grotendeels in plaats van het overtollige zoete water dat nu gespuid wordt).

Het vermogen dat een BEC maximaal kan genereren per ingenomen kubieke meter aan zoet en zout water hangt direct af van het verschil in zoutgehalte tussen het zoute en zoete water. Bij een verschil in zoutgehalte van 33 ppt¹⁵ (33 ppt zout water, 0 ppt zoet water) kan theoretisch 0.74 kWh aan energie worden opgewekt door mengen van 1 m³ zoet met een oneindige hoeveelheid zout water (Ecofys, 2007). In de praktijk zal dit echter aanmerkelijk minder zijn. Het op te wekken netto vermogen hangt met name af van de gebruikte BE techniek, het aanbod aan zoet en zout water (zoutgehaltes), en de benodigde voorzuivering in verband met bijvoorbeeld slib en algen in het water. In een rekenvoorbeeld in het Ecofys rapport neemt bijvoorbeeld het vermogen van een BEC met 25% af als er in plaats van zeewater met een zoutgehalte van 33 ppt zoutwater wordt gebruikt met 29 ppt aan zoutgehalte, en 46% bij een zoutgehalte van 25 ppt (Aangenomen wordt dat dit is bij verbruik van dezelfde volumes water).

In studies en literatuur worden op dit moment voornamelijk twee BE technieken belicht:

- Pressure Retarded Osmosis (PRO)
- Reversed Electro Dialysis (RED)

Een uitgebreide beschrijving van deze technieken is gegeven in het onderzoeksrapport (Ecofys, 2007). In de onderstaande beschrijvingen worden per techniek de voor dit onderzoek belangrijke aspecten belicht.

B1.1 Pressure Retarded Osmosis (PRO)

Bij de PRO techniek wordt gebruik gemaakt van het feit dat er een verschil is in osmotische druk tussen zoet en zout water. Door gebruik te maken van een semipermeabel membraan dat wel water doorlaat maar geen opgeloste zouten zorgt het osmotische drukverschil ervoor dat zoet water door het membraan stroomt naar een hogere hydraulische druk aan de zoutwater-zijde. Tijdens dit proces wordt zoet water met zout water gemengd en ontstaat brak water bij een druk van 10 tot 15 bar. Deze brakwaterstroom wordt deels door een turbine geleid, waarmee een generator wordt aangedreven, zodat elektriciteit gewonnen kan worden.

Met de huidige stand van de PRO techniek wordt het maximaal bruto opgewekte vermogen bij inname van 1 m³/s zoet (0 ppt) en 2 m³/s zout water (33 ppt) geschat op ongeveer 0.8 MW (Zwan et al., 2010). Bij gebruikmaking van zout water met een later zoutgehalte zullen grotere volumes water nodig zijn om hetzelfde vermogen te kunnen produceren.

15. 33 ppt (parts per thousand) staat ruwweg gelijk aan 33 gram zout per 1.000 gram (1 liter) water. Dit is ongeveer het gemiddelde zoutgehalte in de Noordzee. Op plaatsen nabij riviermondingen en nabij zoetwaterspuien zoals in de westelijke Waddenzee zal het zoutgehalte in het algemeen aanmerkelijk lager zijn dan 33 ppt.

Bij een PRO BE centrale is uitgegaan van de benodigde debieten volgens tabel B1.1.

PRO Blue Energy Centrale			
	inname (m ³ /s)		lozing (m ³ /s)
Vermogen	zoet	zout	brak
0.05 MW	0.063	0.13	0.19
20 MW	25	50	75
200 MW	250	500	750

Tabel B1.1: Aangenomen relatie tussen het vermogen van een PRO centrale en de inname- en lozingsdebieten.

Doordat bij het gebruik van deze osmosetechniek watermoleculen ongehinderd door het membraan moeten kunnen stromen is het van belang dat het membraan schoon blijft. Hiervoor moet in ieder geval het zoete water dat de centrale inkomt eerst door een zuiveringsproces. In dit zogenaamde voorzuiveringsproces moeten onder andere slib en algen worden verwijderd, maar mogelijk ook andere stoffen die de membranen zouden kunnen aantasten. Volgens het Noorse Statkraft zou een grove vorm van filtering (alles > 50µm gefilterd) in combinatie met periodieke spoel- en schoonmaakbeurten volstaan als voorzuivering (Ecofys, 2007). Deze bevinding is mogelijk niet van toepassing voor een BE centrale op de Afsluitdijk, omdat in tegenstelling tot het IJsselmeerwater het te gebruiken Noorse gletsjerwater vrijwel slibloos is. Omdat het water in de centrale netto van zoet naar zout door de membranen zal stromen wordt tot nu toe aangenomen dat zuivering van het zoete water belangrijker zal zijn dan van het zoute water. Voor een BE centrale aan de Afsluitdijk is nog geen onderzoek bekend naar benodigde voorzuivering, en mogelijk vrijkomende slibvolumes. Een kosten-baten analyse laat zien dat een economisch verantwoorde bedrijfsvoering alleen mogelijk is, indien het zoute water beperkt voorgezuiverd kan worden (Zwan et al., 2010); de membranen moeten daarom geschikt gemaakt worden voor slibhoudend zout water.

Ter indicatie van mogelijk vrijkomende slibvolumes: Een grote 200 MW centrale neemt per seconde ongeveer 200 m³ zoet water en 400 m³ zout water in. Als alleen het slib uit het zoet water gefilterd moet worden, en ervan uitgaande dat de concentratie slib in suspensie bij het inname punten in het IJsselmeer ongeveer 100 mg/l (0.1 kg/m³) is, leidt dit tot een gefilterde hoeveelheid slib van 20 kg. Per dag komt dat neer op ongeveer 1700 ton slib. Voor een kleine (20 MW) centrale komt dit neer op 170 ton slib per dag, en voor een pilot centrale (0.05 MW) 0.4 ton slib. Zelfs als 90% van het slib ongehinderd door de centrale zou kunnen stromen, is de hoeveelheid slibresidu dat overblijft na voorzuivering zeer groot. Deze analyse geldt ook voor de hierna te bespreken RED techniek.

B1.2 Reversed Electro Dialysis (RED)

Bij de RED techniek laten de gebruikte membranen geen water door, maar opgeloste zouten (ionen). Er worden twee type membranen gebruikt: een type dat elektrisch negatief geladen ionen doorlaat (met name Cl⁻), en een type dat positief geladen ionen (voornamelijk Na⁺) doorlaat. Hierdoor ontstaat een spanningsverschil tussen het zoete en zoute water. Door op grote schaal hiervan gebruik te maken kan een groot potentiaalverschil worden gerealiseerd en elektrische stroom worden opgewekt.

Met de huidige stand van de RED techniek wordt het opgewekte vermogen bij inname van 1 m³/s zoet (0.3 ppt) en 1 m³/s zout water (29 ppt) geschat op ongeveer 0.64 MW (Ecofys, 2007). (Post, 2009) geeft een schatting van 1 MW bij inname van 1 m³/s zoet (0.3 ppt) en 1 m³/s zout water, maar de aangenomen zoutgehaltes zijn niet duidelijk. Bij gebruikmaking van

zout water met een later zoutgehalte zullen grotere volumes water nodig zijn om hetzelfde vermogen te kunnen produceren. De RED centrale mengt dus zout en zoet water in de verhouding 1:1.

RED Blue Energy Centrale			
	inname (m ³ /s)		lozing (m ³ /s)
Vermogen	zoet	zout	brak
0.05 MW	0.05-0.08	0.05-0.08	0.1 - 0.16
20 MW	20-31	20-31	40-63
200 MW	200-313	200-313	400-626

Tabel B1.2: Aangenomen relatie tussen het vermogen van een RED centrale en de inname- en lozingsdebieten.

Voor een RED (Reversed Electro Dialysis) centrale is nog geen experimentele data beschikbaar over de benodigde voorzuivering. Het heersende idee is om in een RED centrale gesuspenderde deeltjes van het water te scheiden met een microzeefsysteem. Ook hierbij wordt verwacht dat er grote hoeveelheden slibresidu zullen resulteren van het voorzuiveringsproces, vergelijkbaar met de bovengegeven getallen voor de PRO centrale. Een pilot centrale zou hier meer inzicht in moeten geven.

Hieronder volgen nog enige opmerkingen over de beschouwde BE centrales in deze studie:

- Voor de haalbaarheidsanalyse van een BE centrale op de Afsluitdijk is het van groot belang precies te weten wat de specificaties voor de voorzuivering zijn, hoeveel residu er overblijft, en hoe daarmee omgegaan kan worden. Een dergelijk onderzoek valt echter buiten de scope van het huidige project.
- In deze studie zijn drie groottes van BE centrales bekeken. In deze studie is niet geanalyseerd of het opgeschaalde vermogen (200 MW) ook te realiseren is door installatie van een serie kleinere centrales op verschillende locaties.
- Aangezien de inname en lozingsdebieten voor de PRO en RED centrale in grootteorde gelijk zijn, en over de benodigde voorzuivering nog weinig concrete gegevens beschikbaar zijn, wordt in de evaluatie van de mogelijke locaties voor de BE centrale in deze studie geen verder onderscheid gemaakt tussen de PRO en RED centrales.

Bij een vast vermogen worden de benodigde hoeveelheden water voor een BEC groter naarmate het verschil in zoutgehalte tussen het zoete en het zoute water kleiner wordt. Dit geldt zowel voor een PRO als voor een RED centrale.

B2. Geïdentificeerde efficiëntie aspecten

De volgende aspecten die direct te maken hebben met bedrijfsvoering van de BE centrale zijn geïdentificeerd:

1a. het zoutgehalte aan de Waddenzeezijde

Het vermogen dat een BE centrale maximaal kan genereren per ingenomen kubieke meter aan zoet en zout water hangt direct af van het verschil in zoutgehalte tussen het zoete en zoute water. Hoe hoger het verschil in zoutgehalte hoe hoger het maximaal haalbare vermogen per volume aan water. Dit aspect beschouwend zou de BE centrale dus zo geplaatst moeten worden dat water met een zo hoog mogelijk zoutgehalte ingenomen kan worden.

Dit aspect is erg relevant omdat het direct betrekking heeft op het mogelijk rendement, en dus de haalbaarheid van een BE centrale op de afsluitdijk.

1b. het zoutgehalte aan de IJsselmeerszijde

Dit aspect heeft een direct verband met het bovengenoemde aspect 1a. Voor de BE centrale is het van belang dat het in te nemen zoet water een zo laag mogelijk zoutgehalte heeft. Het zoutgehalte van het ingenomen zoete water zou in ieder geval onder de 1 ppt moeten zijn. Met een zoutgehalte van het IJsselmeer tussen de 0.2 – 0.5 ppt (Quak, 2009) zou hieraan altijd voldaan worden. Echter, via de spuisluizen stroomt mogelijk over de bodem een beperkte hoeveelheid zout water het IJsselmeer in, waardoor lokaal nabij de bodem bij de spuisluizen het water af en toe een zoutgehalte boven 1 ppt zou kunnen hebben¹⁶. Door een geschikte plaatsing en ontwerp van de zoetwaterinlaat lijkt dit hiermee voldoende rekening te houden.

Dit aspect lijkt minder relevant dan het zoutgehalte aan de Waddenzeezijde en wordt daarom in deze studie niet verder meegenomen.

2. Relatie met spuibeheer

Door spuien wordt overtollig zoet water vanuit het IJsselmeer geloosd op de Waddenzee, momenteel via spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand. Dit spuien wordt gedaan tijdens afgaand tij, onder vrij verval. Het spuien veroorzaakt een verlaging van het gemiddelde zoutgehalte in de westelijke Waddenzee, en veroorzaakt tevens sterke variaties in het zoutgehalte in de vorm van zogenaamde migrerende zoetwaterbellen. Het gehanteerde spuibeheer kan dus een directe invloed hebben op aspect 1a: het zoutgehalte bij het innamepunt voor zoutwater. De keuze voor een bepaalde locatie voor de BE centrale kan daardoor afhankelijk zijn van een eventuele aanpassing in het spuibeheer; bijvoorbeeld het buiten gebruik stellen van een van de spuien.

Dit aspect zal in de evaluaties meegenomen worden wanneer de zoutgehalten bij de zoutwaterinname worden beschouwd.

3. Recirculatierisico

De BE centrale neemt zoet en zout water in, en loost brak water. Het lozen van brak water kan een verlaging van het zoutgehalte bij de zoutwaterinname veroorzaken, afhankelijk van de ligging van het lozingspunt ten opzichte van het innamepunt, de locale stromingen, en de inname- en lozingsdebieten. In het algemeen moeten de inname- en lozingslocaties zo ver mogelijk uit elkaar liggen om recirculatierisico's te minimaliseren. Dit aspect wordt belangrijker naarmate de door de centrale gebruikte debieten groter worden: voor een pilotcentrale zal het recirculatierisico zeer klein zijn. Voor de kleine centrale zal er lokaal rekening gehouden moeten worden met stromingen bij het ontwerp van de in- en uitlaatsystemen. Bij de grote centrale speelt het recirculatierisico een belangrijke rol en zal bij het ontwerp met grootschalige verspreiding van de brakwaterlozingen rekening gehouden moeten worden.

Ook dit aspect heeft een directe relatie met aspect 1a, en zal bij de evaluatie meegewogen worden.

16. Dit effect wordt in principe ondervangen door de spuisluisdeuren pas te openen bij 10 cm waterhoogteverschil.

4. Beschikbaarheid van zoet water en IJsselmeerpeil

Een BE centrale verbruikt zoet water bij de energieproductie. Het zoete water wordt onttrokken aan het IJsselmeer. Naast de BE centrale zijn er andere gebruikers van het IJsselmeer water: (i) het water wordt gebruikt voor productie van drinkwater (het IJsselmeer wordt van strategisch belang geacht als zoetwaterreservoir), (ii) het water wordt voor landbouwdoeleinden ingenomen, met name in Friesland, gedurende de (drogere) zomerperiodes. Daarnaast vindt er verdamping plaats. Zoetwater wordt voornamelijk aangevoerd via de IJssel. In de zomermaanden is de rivierafvoer van de IJssel beperkt en worden conflicterende belangen verwacht. Ter indicatie zou een centrale die 200 m³/s zoet water verbruikt een peildaling van ongeveer 2 cm per dag veroorzaken wanneer de toevoer van zoet water erg klein of nihil is.

Het vigerende streefpeil in de zomer in het IJsselmeer is -0.2m NAP, en in de winter -0.4m NAP. In de zomermaanden wordt soms meer dan een maand achtereen niet gespuid, wat betekent dat er geen overtollig zoet water is. Dit betekent feitelijk dat al het water wordt gebruikt of wordt gebufferd en er niet of nauwelijks water beschikbaar is voor de BE centrale.

Als het waterpeil onder de -0.4m NAP komt ondervindt de scheepvaart mogelijke hinder en schade. De hoeveelheid beschikbaar zoet water is dus beperkt en kan beperkend zijn voor de operatie van de BE centrale (downtime). Deze problematiek speelt een grotere rol naarmate de BE centrale verder wordt opgeschaald.

Volgens RWS zal de de zoetwatervraag van de BE centrale een lagere prioriteit krijgen dan de zoetwatervraag voor drinkwater en landbouw. Dit betekent dat een grote centrale gedurende significant lange perioden per jaar niet operationeel zal zijn. Een grote centrale op de Afsluitdijk is hierdoor mogelijk niet haalbaar. Deze problematiek speelt echter geen rol in het optimaliseren van *de locatie van de BE centrale* langs de Afsluitdijk, en wordt daarom verder niet meegenomen in deze studie.

5. het zwevend stof gehalte (TTS)

De osmosetechnieken waarmee in een BE centrale energie wordt gewonnen maken gebruik van semipermeabele membranen. Deze membranen kunnen verstopt of beschadigd raken door zwevend stof, algen en waterplanten (zeesla) (organisch en anorganisch vast materiaal in het water) en opgeloste chemicaliën, zie paragraaf 3.2.

Voor de efficiëntie van zowel een PRO als RED centrale is het van belang het vermogen dat nodig is voor de voorzuivering en het volume filterresidu te minimaliseren. Daarvoor lijkt het van belang water in te nemen daar waar het gehalte aan zwevend stof het laagst is. Voor een PRO centrale zou de TTS fractie met een diameter > 50µm zo klein mogelijk moeten zijn, voor een RED centrale lijkt het zo dat het totale gehalte aan zwevend stof (TTS) zo klein mogelijk zou moeten zijn. Omdat het materiaal in suspensie in de Waddenzee en het IJsselmeer voornamelijk uit slib bestaat zijn vooral de lokale slibconcentratie en slibeigenschappen van belang.

Aannemend dat de voorzuivering technisch en financieel haalbaar is, kan de locatie van de BE centrale geoptimaliseerd worden door te kijken naar een locatie waar de slibconcentraties zo laag mogelijk zijn. Voor dit project was echter slechts beperkte informatie beschikbaar over ruimtelijke variaties in slibgehalten in de Waddenzee en IJsselmeer. Het aspect is daarom meegewogen op basis van expert opinion en niet op basis van metingen of modeldata.

6. *Onderhoudsbaggerwerk / benodigde lengte van aanvoerleidingen*

Afhankelijk van de locatie moet nabij inname punten mogelijk regelmatig onderhoudsbaggerwerk worden uitgevoerd om aanslibbing te voorkomen en de benodigde wateraanvoer te garanderen. Bij de lozingspunten is dit minder van belang, omdat de stroomsnelheden door het lozen zodanig hoog zullen zijn dat aanslibbing geen probleem vormt. Het ligt daarom voor de hand om inname punten zo nodig door middel van pijpleidingen zodanig te positioneren dat ze in een al bestaande geul komen te liggen waarin onderhoudsbaggerwerk niet of zeer beperkt nodig is.

Bij de weging van de BE centrale locaties zal dit aspect worden meegenomen.

7. *Ecologische regelgeving*

Bij continue grote volumes van brakwaterlozingen kan het zoutgehalte in de Westelijke Waddenzee lang achtereen laag worden of te sterk variëren. Dit kan nadelige effecten hebben op de ecologie, bijvoorbeeld op zeegras. Voor zeegras in de Waddenzee zijn algemene "Instandhoudingsdoelstellingen". Deze houden in dat er een inspanningsverplichting voor de overheid is om er voor te zorgen dat het huidige bestand aan zeegras niet verder achteruit gaat, of zelfs verbetert. Dat wil zeggen dat men geen maatregelen mag nemen waarvan men vooraf kan weten (of sterk vermoeden) dat dit negatief uitwerkt voor zeegras. Het zou daardoor kunnen dat de BE centrale niet altijd op volle capaciteit kan opereren om hieraan te voldoen.

Gezien de grote volumes zoet water die in de huidige situatie regelmatig worden gespuid, ligt het niet in de lijn der verwachting dat het lozen van het brakke water een probleem gaat vormen bij het voldoen aan de ecologische regelgeving. Daarbij bestaan er geen harde criteria met betrekking tot bepaalde milieufactoren in de instandhoudingsdoelstellingen (Het wettelijk kader voor deze milieudoelstellingen liggen in de EU wetgeving "Kaderrichtlijn water" (KRW) en in Natura 2000.). Op basis van de beschikbare gegevens is dit aspect daarom moeilijk te beoordelen en niet meegenomen in de verdere analyse.

8. *Veiligheidsaspecten*

Er is in deze analyse van uitgegaan dat een BE centrale zodanig te ontwerpen is dat er geen nadelige effect is op de veiligheidsfunctie van de afsluitdijk, en dat daar bij de keuze voor de locatie van de BE centrale in dit stadium geen rekening mee gehouden hoeft te worden.

B3. Geïdentificeerde Impact aspecten

Een BE centrale op de Afsluitdijk kan op verschillende manieren effect hebben op de omgeving van de Afsluitdijk. Dit kunnen positieve en negatieve effecten zijn. In dit project zijn de volgende impact aspecten geïdentificeerd (cultureel-maatschappelijke aspecten zijn buiten beschouwing gelaten):

1. *Morfologische veranderingen aan de Waddenzeezijde*

Door continue lozing van grote volumes water (tot 600 m³/s voor een full-scale 200 MW PRO centrale) kunnen nieuwe stroomgeulen ontstaan. Dit is niet noodzakelijk een negatieve ontwikkeling, maar kan negatieve effecten hebben op de stabiliteit van (bestaande) constructies en/of de ecologie beïnvloeden. De effecten zullen afhankelijk zijn van de locatie waarop de (opgeschaalde) BE centrale wordt geplaatst. Bij de verdere evaluaties wordt dit aspect meegewogen.

2. Morfologische veranderingen aan de IJsselmeerzijde

Aangezien er door een BE centrale aan de IJsselmeerzijde alleen water wordt ingenomen zijn er weinig of geen morfologische veranderingen te verwachten. Dit aspect zal daarom verder niet meegenomen worden.

3. Ecologische veranderingen aan de Waddenzeezijde

Doordat een operationele BE centrale op de Afsluitdijk zoet water zal onttrekken uit het IJsselmeer, dat vervolgens mengt met zout water, en daarna als brak water loost op de Waddenzee pompt de centrale netto water van het IJsselmeer naar de Waddenzee. Bij een zoet water inname van 200 m³/s voor een 200 MW centrale betekent dit dat de BE centrale gemiddeld ongeveer evenveel zoet water uit het IJsselmeer onttrekt als het bestaande spuicomplex bij Kornwerderzand. Het gemiddelde totale debiet aan zoet water dat gespuid wordt door de spuicomplexen bij Kornwerderzand en Den Oever samen bedraagt ongeveer 450 m³/s (tijdens het spuien). Het bovenstaande laat zien dat met een operationele 200 MW BE centrale ongeveer de helft minder zoet water op de Waddenzee wordt gespuid. Ten gevolge hiervan wordt verwacht dat de fluctuaties in zoutgehaltes in de westelijke Waddenzee zullen afnemen. Aangezien juist de bestaande sterke fluctuaties (zoetwaterschokken) als negatief effect van het spuien op de ecologie wordt gezien, zou een BE centrale een positief ecologisch effect kunnen hebben.

Bij plaatsing van het lozingspunt van de BE centrale op een andere locatie dan nabij de huidige spuisluizen kunnen lokaal toch fluctuaties in zoutgehaltes toenemen, of kan er een relevante daling optreden van het tijdsgemiddelde zoutgehalte op die plaats. Dit kan effect hebben op bestaande zeegrasvelden of mossel zaad installaties (MZI's).

4. Ecologische veranderingen aan de IJsselmeerzijde

Van de inname van zoet water aan de IJsselmeerzijde worden niet of nauwelijks ecologische effecten verwacht. Alleen zeer lokaal bij de inlaat als gevolg van veranderende stromingspatronen. Dit aspect zal daarom niet worden meegenomen in de verdere analyse.

5. Scheepvaart

Door grootschalige lozingen van de BE centrale kunnen stroompatronen veranderen, en kunnen turbulente stromingen ontstaan nabij de uitlaatwerken. Aangezien de huidige schutssluisen nabij de spuicomplexen liggen waar met gelijksoortige debieten wordt gespuid wordt niet verwacht dat de scheepvaart ernstige hinder zou gaan ondervinden van een BE centrale. Dit aspect wordt minder belangrijk geacht, dan de operationele aspecten en de overige impact aspecten, en zal daarom verder in deze studie niet beschouwd worden.

6. Waterkwaliteit

Op basis van de beschikbare gegevens over de werking van een BE centrale worden er geen relevante effecten verwacht op de waterkwaliteit op het IJsselmeer en in de Waddenzee. Er is daarbij vanuit gegaan dat bij het (chemisch) reinigen van de BE membranen geen toxische stoffen vrijkomen en dat slibresiduen uit de centrale verantwoord worden verwerkt. De BE centrale zal de hoeveelheid beschikbare nutriënten in het water niet significant veranderen. Effecten op zoutgehaltes in de Waddenzee zijn eerder benoemd bij de ecologische impact aspecten. Dit aspect zal bij de optimalisatie van de BE centrale niet verder meegewogen worden.

7. Peilbeheer

De peilbeheer problematiek is een efficiëntie en impact aspect van de BE centrale. Dit aspect is beschreven in de voorgaande paragraaf. Ook qua impact geldt dat de relatie met het

peilbeheer onafhankelijk is van de locatie van de centrale. Daarom wordt dit aspect in de optimalisatie van de plaats van de centrale niet meegewogen.

B4. Expert sessies

In enkele expert sessies is kennis en expertise ingebracht door de volgende personen:

Arnout Bijlsma	specialist stroming en getij
Herman Gerritsen	specialist hydrodynamica
Ivo Pothof	specialist industriële stromingstechnologie en Blue Energy
Bas van Maren	specialist slib en morfologie
Zheng Wang	specialist morfologie en deskundige Waddenzee
Mindert de Vries	specialist ecosystemen
Luca van Duren	specialist ecosystemen
Valesca Harezlac	specialist ecosystemen en IJsselmeer
Bas van Vossen	sessie moderator
Jan de Bont	sessie moderator

Vanuit Rijkswaterstaat heeft Eric Regeling deelgenomen aan een van de expert sessies.

Bijlage 2 Geotechnische haalbaarheid valmeer

In een expertsessie is stilgestaan bij de informatie die nodig is om te kunnen komen tot uitspraken, de vaststelling welke informatie beschikbaar is en welke informatie nog ontbreekt. Tevens zijn de verschillende risico's van de aanleg van een valmeer op de aangegeven locatie geïdentificeerd. Aan de expert sessie is deelgenomen door:

- Bernadette Wichman (Deltares);
- Ad Verweij (Deltares);
- Frits van Tol (Deltares);
- John Lambert (Deltares);
- Wim Dubelaar (TNO)

Bijlage 2A Berekeningen

Opmerking: de berekeningen gaan uit van een voldoende dikke kleilaag (Urk klei 2) die over het gehele oppervlak van het valmeer aanwezig moet zijn. Dit dient nog door aanvullend grondonderzoek te worden bevestigd.

Opbarstberekening onderkant Urk Klei 2 (zie figuur 4.3.3)

$$\begin{aligned}
 \text{S.F.} &= F_{\downarrow} / F_{\uparrow} \\
 &= (\sum \gamma_i \times d_i) / (\gamma_w \times \Delta H_w) \\
 &= (20 \text{ kNm}^{-3} \times 22 \text{ m} + 10 \text{ kNm}^{-3} \times 3,5 \text{ m}) / (10 \text{ kNm}^{-3} \times 42 \text{ m}) \\
 &= 475 / 420 \\
 &= 1,13
 \end{aligned}$$

Lekkage en kwel

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{wand}} &= A_{\text{wand}} \times k_{v,\text{wand}} \times \Delta H_w / D_{\text{wand}} \\
 &= O_{\text{wand}} \times \Sigma D_{\text{zand}} \times k_{v,\text{wand}} \times \Delta H_w / D_{\text{wand}} \\
 &= 9.400 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times (10^{-8} \text{ à } 10^{-7} \text{ m/s} \times 16,5 \text{ m} / 1,0 \text{ m}) \\
 &= 2,33 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s} \\
 &= 2.000 \text{ à } 20.000 \text{ m}^3/\text{dag}
 \end{aligned}$$

Opmerking: 10^{-8} m/s is een normale waarde voor de doorlatendheid van een goed uitgevoerde cementbentonietwand; 10^{-7} m/s is een zeer lage waarde voor een slecht uitgevoerde wand met gaten erin.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{kwel}} &= A_{\text{valmeer}} \times \Delta H_w / c_{\text{klei}} \\
 &= 7.000.000 \text{ m}^2 \times 16,5 \text{ m} / 3.000 \text{ dagen} \\
 &= 40.000 \text{ m}^3/\text{dag}
 \end{aligned}$$

Stijging valmeer door lekkage en kwel

$$\begin{aligned}
 \Delta h &= (Q_{\text{wand}} + Q_{\text{kwel}}) / A_{\text{valmeer}} \\
 &= ((2.000 \text{ à } 20.000) \text{ m}^3/\text{dag} + 40.000 \text{ m}^3/\text{dag}) / 7.000.000 \text{ m}^2 \\
 &= 6 \text{ à } 9 \text{ mm/dag}
 \end{aligned}$$

Bijlage 2B



Retouradres: Postbus 80015, 3508 TA UTRECHT

Deltares
T.a.v. Dr. Bernadette Wichman
Postbus 177
2600 MH DELFT

Ondergrond
Princetonlaan 6
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 30 256 42 56
F +31 30 256 44 75
info-BenO@tno.nl

Onderwerp
Ondergrondgegevens valmeer

Datum
14 januari 2010

Onze referentie
TNO-034-UT-2010-00064

E-mail
wim.dubelaar@tno.nl

Doorkiesnummer
+31 30 256 48 61

Doorkiesfax
+31 30 256 48 55

Projectnummer
557261

Geachte mevrouw Wichman,

Volgend op het telefonisch overleg op 9 januari 2010 met u en na opdrachtverlening op 12 januari 2010 (brief met kenmerk 1201757-000-GEO-0008), is door TNO Bouw en Ondergrond, afdeling Geomodellering, een studie uitgevoerd naar de gegevens over bodemopbouw van de locatie van het valmeer nabij de Afsluitdijk.

De resultaten van deze studie zend ik u hierbij toe in de vorm van een korte notitie.

Hoogachtend,

Drs. C.W. Dubelaar
senior geoloog
Geomodellering

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, zoals gedeponeerd bij de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Haaglanden; de Algemene Voorwaarden zullen op verzoek worden toegezonden.



Datum

14 januari 2010

Onze referentie

TNO-034-UT-2010-00064

Blad

2/2

Notitie bodemopbouw van het valmeer nabij de Afsluitdijk

Auteurs: Drs. C. W. Dubelaar & Drs. R. Harting

Afdeling: Geomodellering

1. Inleiding

Het valmeer is een door het consortium 'Natuurlijk Afsluitdijk' gedacht brakwaterbassin met een diepte van circa 20 m, omringd door een dijk van 5 meter hoog. De locatie van het valmeer is beoogd in het IJsselmeer, tussen de Afsluitdijk en de Friese kust. Rond het valmeer is een zoekgebied aangegeven waarbinnen de gegevens van de ondergrond zijn verzameld (afb. 1). De locatie van het valmeer is afgeleid uit de afbeelding in het rapport 'Natuurlijk Afsluitdijk – marktverkenning fase 2' (blz. 25, fig.2).

In het rapport 'Natuurlijk Afsluitdijk' wordt op pag. 36 gesteld dat 'De geologie van het gebied aangeeft dat er een ondoorlatende en voldoende diep gelegen kleilaag aanwezig is'. Opdrachtgever heeft TNO de vraag gesteld 'of de veronderstelling van het consortium realistisch is dat er een voldoende dikke kleilaag aanwezig is tussen -20 en -40m NAP in de locatie van het valmeer'. Deze vraag dient op basis van de beschikbare gegevens beantwoord te worden.

De voorliggende notitie geeft een overzicht van de beschikbare boringendata in DINO, ingedeeld naar de einddiepte, in het zoekgebied valmeer (afb. 1). Tevens is uit bestaande geologische rapporten en karteergegevens een beknopt overzicht samengesteld van de opbouw van de ondergrond in dit gebied (hoofdstuk 2). Er is op de locatie van het valmeer specifiek gekeken naar wat uit boringen en geo(hydro)logische modellen bekend is over het voorkomen en de dikte van kleilagen tussen ca -20 mNAP en -40mNAP (hoofdstuk 3). De rapportage sluit af met conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 4).



Datum

14 januari 2010

Onze referentie

TNO-034-UT-2010-00064

Blad

3/3

2. Inventarisatie geologische opbouw van de ondergrond van de locatie valmeer

Uit geologische onderzoeksrapporten (Ter Wee 1976, Rijks Geologische Dienst 1977) en gegevens uit het Digitaal Geologisch Model van de Nederlandse ondergrond is het volgende overzicht van de geologische opbouw van de ondergrond in het zoekgebied samengesteld. De voorkomende formaties en laagpakketten in het bereik tot ca 70 m diepte zijn schematisch weergegeven in het geohydrologisch profiel (afb.2).

Vanaf maaiveld worden de volgende eenheden onderscheiden:

Formatie van Naaldwijk (lithostratigrafische code: NA). Holocene afzettingen.

Lithologie: overwegend matig grof tot matig fijn, humeus schelphoudend zand met dunne kleilagen; geulopvullingen met afwisseling van klei en (aan de basis) grof zand met schelpen.

Dikte: 0-10 m

Diepteligging van de basis: 5-10 m -NAP; in geulen tot ca 15 m -NAP

Formatie van Boxtel (BX)

Lithologie: zandige leemlenzen in een pakket van overwegend fijn zand

Dikte: 5-10 m

Diepteligging van de basis: 10-18 m -NAP

Eem Formatie (EE)

De Eem Formatie komt slechts lokaal voor in het zoekgebied.

Lithologie: hoofdzakelijk een kleipakket met aan de top een dunne veenlaag; aan de basis schelphoudend matig grof zand in geulopvullingen.

Dikte: 0-5 m

Diepteligging van de basis: ca 10-15 m -NAP

Formatie van Drente (DR)

Lithologie Laagpakket van Gieten (DRGI) : Keileem, sterk zandige leem met stenen.

Dikte van de keileem: ca 5 – 10 m

Diepteligging van de keileem: ca 15-20 m -NAP

Formatie van Drachten (DN)

Vermoedelijk niet over het gehele zoekgebied aanwezig.

Lithologie: Overwegend fijn tot matig grof zand met leemlagen.

Dikte: 0-5m

Diepteligging van de basis: ca 20- 25 m -NAP

Formatie van Urk (UR)

Lithologie: overwegend matig fijn tot zeer grof zand; enkele kleilagen met dikten van 1 tot ca 5 m.

Dikte: ca 40-50 m

Diepteligging van de basis: ca 70-80 m -NAP

Kleilagen. Uit boorddata blijkt de aanwezigheid van kleilagen op diepten tussen ca 25-45 m. Zie ook hoofdstuk 3.



Datum

14 januari 2010

Onze referentie

TNO-034-UT-2010-00064

Blad

4/4

3. Kleilagen in de Formatie van Urk

Opdrachtgever heeft TNO de vraag gesteld 'of de veronderstelling van het consortium realistisch is dat er een voldoende dikke kleilaag aanwezig is tussen -20 en -40m NAP in de locatie van het valmeer'.

In het zoekgebied valmeer ten zuidoosten van de Afsluitdijk zijn maar weinig boringen aanwezig die dieper reiken dan 20 m onder de waterbodem (afb. 2) en het aantal boringen dat het gevraagde dieptebereik heeft doorboord is nog geringer. In het zoekgebied is één boring aanwezig met een boorgatmeting (boring B10C0157; locatie werkeiland Breezanddijk).

Binnen de ring van de locatie valmeer is slechts één boring aanwezig die reikt tot een diepte > 40 m. Dit betreft boring B10C0162, met een einddiepte van 50 m onder maaiveld (= waterbodem op 5.40 m -NAP). Zie ook de boorbeschrijving in Bijlage 1. In deze boring komen twee trajecten met kleilagen voor, van 18.50- 26.00 m en van 27.50 tot 38 m ten opzichte van bovenkant boring. Het betreft lagen zwak tot sterk siltige klei, die deels sterk zandig kan zijn (laag van 36-38 m).

Over de verbreiding en het dikte verloop van de kleilagen in de Formatie van Urk in de locatie van het valmeer is weinig bekend. Het Regionaal Geohydrologisch model (REGIS II.1, 2007) toont in het dieptebereik van ca 20 tot 50 m -NAP een tweetal kleiige eenheden (Urk klei 1 en Urk klei 2; zie afb. 1 & 2) waarin kleilagen kunnen worden aangetroffen. Het model geeft een regionaal beeld van het voorkomen van de kleiige eenheden, maar over dikte en voorkomen van de kleilagen op een specifieke locatie doet het model geen uitspraak. Er zij opgemerkt dat deze kleiige eenheden weliswaar slecht doorlatend zijn, maar zeker niet als ondoorlatend moeten worden beschouwd.

In het geval van de locatie valmeer, met een oppervlakte van ca 7 km², kan op basis van de dikte van de kleilagen in de omliggende boringen en op basis van 'expert geologische kennis' worden verwacht dat de kleiige eenheid Urk 1 op verschillende plaatsen binnen de locatie valmeer wel eens dunner zou kunnen zijn dan 750 cm. Ook is het niet onmogelijk dat kleilagen binnen deze eenheid geheel ontbreken in de ondergrond van de locatie van het valmeer.

Daarbij moet worden bedacht dat in de beschrijving van de puls boring B10C0162 enige onzekerheid schuilt over de precieze dikte van de kleilagen. Het type boring en de monsterneming over relatief grote intervallen laten slechts een beperkte kwaliteit van de beschrijving toe (zie Bijlage 1). Zo zouden, bijvoorbeeld, dunne zandlagen in de kleiige trajecten aanwezig kunnen zijn, maar niet in de beschrijving zijn opgenomen.

De onderliggende kleiige eenheid (Urk klei 2, afb. 1 & 2) bereikt in de boringen in het zoekgebied een dikte tot ca 10 m, maar ook hier geldt dat het gaat om deels siltige en zandige trajecten. Door de diepere ligging van de eenheid Urk klei 2 is het aantal gegevens uit boringen in het zoekgebied valmeer nog geringer dan het aantal gegevens over de kleilagen in de Urk 1 eenheid.

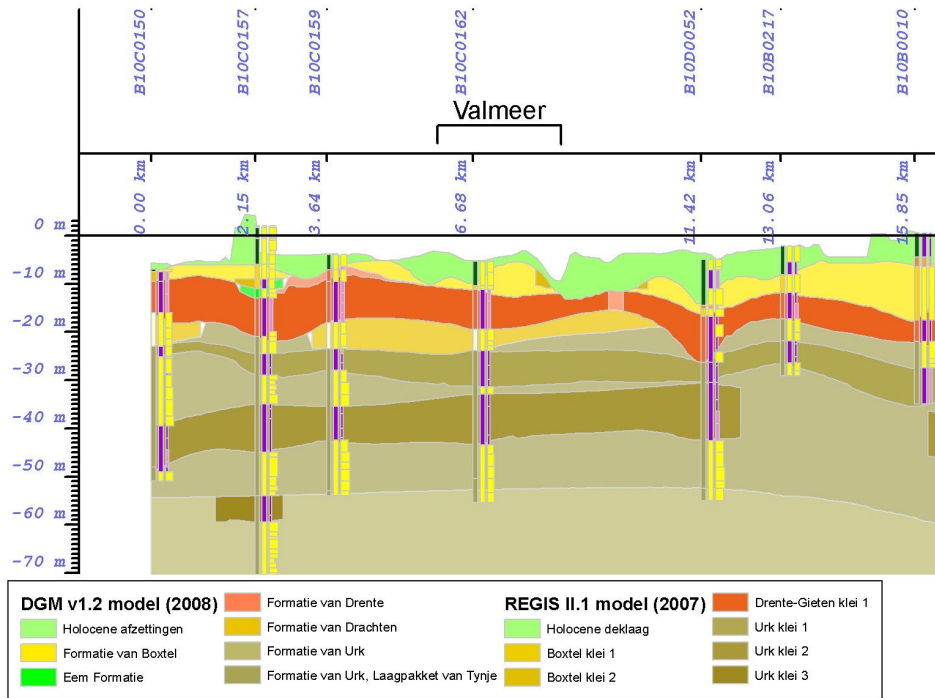
Afb. 1 Zoekgebied van het valmeer met dikten van de kleiige eenheden Urk klei 1 en Urk klei 2 in centimeters.



Datum
14 januari 2010

Onze referentie
TNO-034-UT-2010-00064

Blad
6/6



Afb. 2 Schematisch geohydrologisch profiel door het zoekgebied valmeer. De ligging van het profiel is weergegeven in afb.1



Datum

14 januari 2010

Onze referentie

TNO-034-UT-2010-00064

Blad

7/7

4. Conclusies en aanbevelingen

Door het ontbreken van voldoende boorgegevens en analyses van grondmonsters in de locatie valmeer is het niet mogelijk om met enige zekerheid uitspraken te doen over voorkomen, dikte en eigenschappen van de kleilagen in de ondergrond van het valmeer op diepten tussen ca 20 tot 40 m –NAP.

Om grotere zekerheid te krijgen over verbreiding en dikte van de kleilagen in de Formatie van Urk tussen ca 20 tot 40 m -NAP op de locatie valmeer zal nader onderzoek nodig zijn. Gedacht kan worden aan gestoken boringen in combinatie met sonderingen waarbij de kleiige eenheden geheel worden doorboord. Ook een prospectief geofysisch onderzoek met behulp van reflectieseismiek zou in het geval van het valmeer informatie kunnen opleveren over verbreiding (en mogelijk ook dikte) van de voorkomende kleilagen. Dit laatste onderzoek zal gecombineerd moeten worden met boringen en/of sonderingen.



Datum

14 januari 2010

Onze referentie

TNO-034-UT-2010-00064

Blad

8/8

5. Geraadpleegde bronnen

Rijks Geologische Dienst, 1977. Geologisch Onderzoek van het Nederlandse Waddengebied. Bijdragen van medewerkers van de Rijks Geologische Dienst en van de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders bijeengebracht door C.J. van Staalduinen, 77p.

Ter Wee, M.W., 1976. Toelichtingen bij de Geologische kaart van Nederland 1: 50.000. Blad Sneek (10 West en 10 Oost). Rijks Geologische Dienst Haarlem, 130 p.

Review rapportages fase 2 in het kader van de marktverkenning Afsluitdijk – Technische haalbaarheid, 28-01-2009, TU Delft.



Datum

14 januari 2010

Onze referentie

TNO-034-UT-2010-00064

Blad

9/9

Bijlage 1

Boorbeschrijvingen boring B10C0162 in het zoekgebied van het valm

NITG-Boornummer	B10C0162	Coordinatenstelsel	Rijksdriehoeksmeting
X-coördinaat	147500	Bepaling lokatie	
Y-coördinaat	560500	Beschrijvingsmethode	Onbekend
Maaiveld (m tov NAP)	-5.40	Vertrouwelijkheid	Openbaar
Datum boring	14-04-1986	Werknummer	1
Plaatsnaam			10CR0162
Provincie	Friesland		
Kaartblad	10C		
Soort boring	Matig diepe boring derden		
Einddiepte (m)	50.00		
Uitvoerder	RWS - Zuiderzeewerken		
Boormethode	Pulsboring		
Opmerkingen			

Lithologie		Stratigrafie 1975	
Beschrijver lagen	Wilde, W. de	Beschrijver stratigrafie	Klijnstra, B.
Organisatie beschrijver	RGD	Organisatie beschrijver	RGD
Nat/droog	Onbekend	Datum stratigrafie	
		Versie stratigrafie	1
		Stratigrafie 2003	
		Beschrijver stratigrafie	Gessel, S.F. van
		Organisatie beschrijver	TNO-NITG
		Datum stratigrafie	17-03-2003
		Versie stratigrafie	2

Oude beschrijving

\$8:Opmerkingen =1-11-1994. STRATIGRAFIE I.V.M. REGIS II. \$H:Boorlokatie =ZZW BOR 1 \$O:Kwaliteitsnr=211199 \$S:Typist =N.ADMIRAAL

Laagbeschrijving

Boven	Onder	Grondsoort	Omschrijving	M63	LU	SI	ZA	GR	OR	CA
0.00	2.20	zand	grijs, Zand: matig fijn (O), Schelpen: veel schelpen, veel schelpresten, Mytilus edulis	190						3
		oude omschr.	[ZAND,***,190,3] matig fijn, grijs, veel fijne schelprestEN OA. mytilus							
2.20	5.00	zand	grijs, Zand: matig fijn (O), Schelpen: schelpen, schelpresten	190						3
		oude omschr.	[ZAND,***,190,3] matig fijn, grijs, ALS VOORGAAND, ENKELE DUNNE kleilensjes, FIJNE schelprestjes.							
5.00	5.80	zand	licht-geel-grijs, Zand: matig fijn (O)	160						3
		oude omschr.	[ZAND,***,160,3] matig fijn, beige							
5.80	8.20	leem	zwak siltig, zandig, grindig, onbekend, Grind: fijn grind	40						1
		oude omschr.	[LEEM,40,****,1] IETS zandig, MATIG zwaar, ENKELE HEEL fijne grindJES							
8.20	14.00	leem	zwak siltig, zwak grindig, onbekend, keileem	40						3
		oude omschr.	[LEEM,40,****,3] MATIG zwaar, enkele grindjes, OA. KWARTS, keileem.							
14.00	16.50	zand	grindig, licht-geel-grijs, Zand: matig grof (O), matig grote spreiding, Grind: fijn grind	260						2
		oude omschr.	[ZAND,***,260,2] matig grof, beige, grote spreiding, EEN ENKEL HEEL fijn grindJE. {m200-m350}							
16.50	17.50	zand	zwak siltig, zwak grindig, licht-geel-grijs, Zand: matig fijn (O)	200						1
		oude omschr.	[ZAND,***,200,1] matig fijn, iets slibhoudend, beige, EEN enkel grindje HEEL FIJN KWARTS.							
17.50	18.50	zand	humeus, bruin, Zand: matig fijn (O)	200						1
		oude omschr.	[ZAND,***,200,1] matig fijn, weinig, bruin							
18.50	21.50	klei	matig siltig, sterk humeus, bruin	40						1
		oude omschr.	[KLEI,40,****,1] sterk humeus, bruin							
21.50	24.50	klei	zwak siltig, grijs	40						1

Boven	Onder	Grondsoort	Omschrijving	M63	LU	SI	ZA	GR	OR	CA
		<i>oude omschr.</i>	<i>[KLEI,40,***,1] matig zwaar, grijs.</i>							
24.50	26.00	klei	zwak siltig, grijs, veenbrokjes		40					
		<i>oude omschr.</i>	<i>[KLEI,40,***,*] matig zwaar, grijs, veenresten</i>							
26.00	27.50	zand	grijs, Zand: matig fijn (O), spoor glimmer	190						3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[ZAND,***,190,3] matig fijn, grijs, zwak glimmerhoudend.</i>							
27.50	30.00	klei	sterk siltig, grijs, Organisch materiaal: weinig plantenresten		28					3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[KLEI,28,***,3] licht, grijs, enkele fijne plantenrestjes.</i>							
30.00	36.00	klei	zwak siltig, grijs, Organisch materiaal: weinig riet		40					3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[KLEI,40,***,3] matig zwaar, grijs, enkele rietresten</i>							
36.00	38.00	klei	sterk siltig, sterk zandig, licht-grijs, Zand: fijne categorie (O), Organisch materiaal: weinig hout		26					3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[KLEI,26,***,3] sterk fijn zandig, licht, grijs, enkele houtbrokjes</i>							
38.00	40.00	zand	sterk siltig, grijs, Zand: matig fijn (O), Organisch materiaal: hout, verspoelde plantenresten	170	18					3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[ZAND,18,170,3] matig fijn, sterk slibhoudend, grijs, ENKELE FIJNE houtrestjes, detritus resten</i>							
40.00	42.50	zand	grijs, Zand: matig grof (O), glimmer	240						3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[ZAND,***,240,3] matig grof, grijs, EEN enkel kleilaagje, glimmerhoudend</i>							
42.50	45.00	zand	grijs, Zand: matig grof (O), Grind: spoor fijn grind	240						3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[ZAND,***,240,3] matig grof, grijs, EEN enkel kleilaagje, EEN enkel fijn grindje, KWARTS.</i>							
45.00	48.00	zand	licht-geel-grijs, Zand: matig grof (O), Schelpen: schelpen, schelpresten	260						3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[ZAND,***,260,3] matig grof, grijsbeige, EEN ENKEL HEEL FIJN schelpgruisJE</i>							
48.00	50.00	zand	licht-geel-grijs, Zand: matig grof (O), Grind: spoor fijn grind	260						3
		<i>oude omschr.</i>	<i>[ZAND,***,260,3] matig grof, grijsbeige, EEN enkel fijn grindje.</i>							

Stratigrafie 1975

Boven	Onder	S	AS	LF	ST	Omschrijving
0.00	5.00	WE				Westland Formatie
5.00	14.00	DR6				Formatie van Drente, grondmorene
14.00	18.50	EH				Formatie van Eindhoven
18.50	40.00	URWHO				Formatie van Urk, Urk II, Holstein veen en klei
40.00	50.00	PE				Formatie van Peelo

Stratigrafie 2003

Boven	Onder	S	AS	LF	ST	Omschrijving
0.00	5.00	NA				Formatie van Naaldwijk
5.00	5.80	BX				Formatie van Boxtel
5.80	14.00	DRGI				Formatie van Drente, Laagpakket van Gieten
14.00	18.50	DN				Formatie van Drachten
18.50	45.00	URTY				Formatie van Urk, Laagpakket van Tynje
45.00	50.00	URTY	URVE			Formatie van Urk, Laagpakket van Tynje of Formatie van Urk, Laagpakket van Veenhuizen

Bijlage 3 Review van een Getijdenbekken

Bijlage 3 - Verkenning toekomst Afsluitdijk

**Review van voorstel Combinatie Afsluitdijk 21e eeuw (AD21)
voor aanleg van een getijdenbekken met energiecentrale**

T.H.G. Jongeling
A.G.T.J. Heinsbroek
C.M. Swinkels

Titel

Bijlage 3 - Verkenning toekomst Afsluitdijk

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat -
Waterdienst

Pagina's

22

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	feb. 2010	C. Swinkels		R. de Jong			

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Onderzoeksvraag	1
1.2 Toegeleverde gegevens	1
1.3 Werkwijze	2
2 Interpretatie van toegeleverde gegevens	3
2.1 Globale beschrijving plan voor een getijdenbekken met energiecentrale	3
2.2 Getijdenbeweging en verwachte zeespiegelstijging	4
2.3 Waterstanden van IJsselmeer,loedkom en tussenmeer	5
2.4 Kunstwerken in het basisplan	5
2.5 Pompen en turbines in het basisplan	6
2.6 Verwachte energieopbrengst turbines en energieverbruik pompen: basisplan	7
2.7 Verwachte energieopbrengst turbines en energieverbruik pompen: varianten	9
3 Theoretische beschouwing getijdenbekken	11
3.1 Energiebeschouwing	11
Energieverlies over getijdencentrale	11
Afvoercoëfficiënt μ	13
Systeemrendement η van de getijdencentrale	13
Getijdenbeweging in deloedkom	14
Formule voor eerste schatting energieopbrengst getijdencentrale	15

1 Inleiding

1.1 Onderzoeksvraag

Het consortium AD21 heeft een planstudie voor de toekomst Afsluitdijk uitgewerkt, waarin onder meer een getijdenenergie centrale is voorzien. De centrale heeft tot doel energie op te wekken door gebruik te maken van de natuurlijke getijslag in de Waddenzee. Het plan behelst in het kort de installatie van turbines / pompen in de huidige spuisluiskolken bij Kornwerderzand. Door middel van een zanddijk ten zuiden van de Afsluitdijk wordt een getijdebekken gecreëerd, wat elke getijcyclus vult en ledigt door de centrale. In tijden van grote afvoeren van het IJsselmeerwater kunnen de turbines ingezet worden als pomp, om zo extra uitslagcapaciteit te genereren.

Deltares is door Rijkswaterstaat gevraagd een review te geven op de Visie van het consortium AD21 ten aanzien van het getijdebekken. De vraag hierbij is of de veronderstelde hoeveelheid in- en uitstroming – en de daaraan gekoppelde energieopbrengst middels turbines – realistisch is. Deze vraag dient te worden beantwoord voor zowel de oorspronkelijke AD21-visie, als wel de variant waarin ESA (extra spuicapaciteit Afsluitdijk) is ingepast.

De volgende concrete aspecten worden in de review beschouwd:

- Zijn de juiste uitgangspunten en randvoorwaarden gehanteerd?
- Zijn de juiste parameters gekozen en kloppen de gehanteerde kentallen?
- Levert het getijdebekken inderdaad de aangegeven hoeveelheid energie volgens de AD21-visie op?

Door beschouwing van bovenstaande aspecten dient een beeld gevormd te worden of een energiecentrale een (technisch) realistische optie is – de economisch haalbaarheid wordt buiten beschouwing gelaten – en in kaart gebracht te worden waar de grootste risico's en onzekerheden in het plan optreden. In het overleg met dhr. Regeling dd 26-01-10 is bovendien mondeling gevraagd om een schaduwberekening uit te voeren van de te verwachten energieopbrengsten met door Deltares aangenomen uitgangspunten.

1.2 Toegeleverde gegevens

Het rapport waarin de visie van AD21 wordt gepresenteerd vormt het basisdocument voor deze review (1). Bij opdrachtverlening was slechts dit document beschikbaar, echter gedurende de studie is hierop een aanvulling aangeleverd (2), waarin antwoord wordt gegeven op aanvullende onderzoeksvragen gesteld door RWS. Ook wordt de variant ESA (Extra Spuicapaciteit Afsluitdijk) hierin behandeld.

Bovenstaande twee documenten geven een beschrijving van de visie van het consortium, maar presenteren geen technische gegevens of berekeningen. De beschouwing van de getijdencentrale wordt beschreven in twee technische achtergrond-documenten, die als bijlagen bij bovenstaande rapporten horen (3,4). In aanvulling hierop is een Excel werkdocument (5) aangeleverd door Arcadis, waarin de feitelijke berekeningen van de energieopbrengsten van de centrale zijn uitgevoerd.

Deze laatste gegevens zijn tijdens de uitvoering van deze review aangeleverd. De berekeningen en aannames uit de twee achtergronddocumenten en het Excel werkdocument zijn uiteindelijk als uitgangspunt voor de review beschouwd. Inconsistenties tussen de verschillende rapporten komen voor en worden waar nodig in deze rapportage vermeld.

- (1) Afsluitdijk 21^e eeuw – Rapportage fase 2, marktverkenning
- (2) Afsluitdijk 21^e eeuw – Beantwoording vervolgvragen marktverkenning
- (3) Werkdocument Afsluitdijk 21^e eeuw
- (4) Bijlagenrapport: Pompen / turbines in KWZ
- (5) 'Berekening opbrengsten turbines en kosten pompen 3e fase.xls'

1.3 Werkwijze

Binnen Deltares zijn verschillende specialisten geconsulteerd op het gebied van getijdencentrales/getijdedynamiek en op het gebied van pompen/turbines voor een eerste beschouwing van de visie van het consortium AD21. Hierna hebben twee senior adviseurs de eigenlijke review uitgevoerd; te weten Ir. T.H.G. Jongeling voor het gedeelte getijdehydrodynamica; en Dr. Ir. A.G.T.J. Heinsbroek voor het gedeelte pompen en turbines. De projectleider van het team is C.M. Swinkels, M.Sc..

Met het team zijn drie gezamenlijke sessies gehouden waarin verschillende aspecten de revue zijn gepasseerd. In het eerste onderdeel zijn de randvoorwaarden en uitgangspunten, zoals het consortium die beschrijft, samengevat en onderzocht op hun realiteitswaarde. Het gaat hier om de hydrodynamische uitgangspunten en kentallen met betrekking tot de pomp-turbines en de getijdencentrale. In het tweede onderdeel is gekeken naar de aannames en de methoden die zijn gehanteerd om het energieverbruik en de energielevering van de getijdencentrale te berekenen. Hierbij zijn korte modelexercities uitgevoerd om gevoel te krijgen voor de gehanteerde kentallen. Deze modelresultaten worden niet gepresenteerd maar zijn voor ondersteuning van het eigen begrip toegepast. In het derde onderdeel zijn de bevindingen van de twee aparte secties (getijdenhydrodynamica en pompen & turbines) samengevoegd om tot geïntegreerde conclusies te komen.

Tijdens de uitvoering van de review is besloten de gewenste schaduwberekening (mondeling besproken tijdens overleg met dhr. Regeling dd 26-01-10) niet tot in detail uit te voeren; dit zou een diepgaande studie vereisen wat buiten de scope van de review valt. Het is beoordeeld dat, zonder adequate middelen voor zo'n studie, een schaduwberekening weinig zou bijdragen vanwege de grote onzekerheden en de vele aannames die hierin een rol spelen. Het antwoord van een eventuele berekening zou dan weinig waarde hebben om de resultaten van het consortium aan te toetsen. Wel zijn waar mogelijk kwantitatieve uitspraken gedaan over de aannames van het consortium en het te verwachten effect op de energie-opbrengsten.

In dit rapport wordt een samenvatting gegeven van de aannames en rekenmethode van het consortium. Daarna volgt een discussie van de uitgangspunten en berekende opbrengsten, waarna tenslotte conclusies en aanbevelingen worden gepresenteerd. De review is uitgevoerd in de periode januari 2010.

2 Interpretatie van toegeleverde gegevens

2.1 Globale beschrijving plan voor een getijdenbekken met energiecentrale

De combinatie AD21 heeft een herinrichtingsplan gemaakt voor de Afsluitdijk en omgeving. De belangrijkste keuze die gemaakt is houdt in dat het peil van het IJsselmeer met 0,25 m wordt opgezet, en dat dit peil ook bij een mogelijk stijgende zeewaterspiegel gehandhaafd blijft. Er is een basisplan met 'tussenmeer' en 'vloedkom' gemaakt in combinatie met getijden-energieopwekking en wegpompen van water; dit basisplan behelst ook natuurontwikkeling en recreatie in het binnengebied. Naar aanleiding van vervolgvragen van RWS zijn enkele varianten aangegeven. De plannen worden hieronder kort besproken.

Basisplan

In het IJsselmeer wordt een zanddijk aangelegd, ongeveer parallel aan de Afsluitdijk, waardoor een apart bekken wordt gevormd tussen Afsluitdijk en zanddijk. Dit bekken, dat tussenmeer wordt genoemd, heeft een eigen, variërend waterpeil. De Afsluitdijk zelf wordt enigszins (met 0,5 m) verhoogd, maar in de plannen wordt geaccepteerd dat bij hoge stormvloed zeewater over de dijk slaat. De dijk wordt hier op gedimensioneerd, en het overslagwater wordt afgevoerd naar het tussenmeer.

Het tussenmeer heeft een totaal oppervlak van ca. 50 km². Ter plaatse van de Lorentz sluizen bij Kornwerderzand is een zogenaamde vloedkom ontworpen. Dit afzonderlijke deel van het tussenmeer staat via de Lorentz spuisluizen in verbinding met de Waddenzee. Het resterende deel van het tussenmeer, een strook parallel lopend aan de Afsluitdijk vanaf de vloedkom tot aan de Stevin spuisluizen bij Den Oever, is bedoeld voor opvang van overslagwater maar is vooral interessant vanwege de natuurwaarden. Dit deel wordt verondiept tot een diepte van gemiddeld ca. NAP -2 m; de zanddam heeft hier een flauw binnentalud (aan tussenmeerzijde) van 1:100 waardoor een groot intergetijdengebied wordt gecreëerd waar wadvogels kunnen foerageren.

Beide delen van het tussenmeer zijn van elkaar gescheiden door middel van een dam, maar er is wel in beperkte mate uitwisseling van water mogelijk. Hiertoe wordt in de dam een lokale verlaging aangebracht. Vooralsnog is deze verlaging niet nader ontworpen. Er wordt vanuit gegaan dat in de vloedkom een gemiddelde getijslag van 0,6 m à 0,8 m zal ontstaan, en in het deel na de scheidingsdam een getijslag van 0,1 m à 0,15 m. In de spuisluizen bij Kornwerderzand worden turbines geplaatst; deze turbines kunnen ook als pomp worden gebruikt.

Opgemerkt zij dat in de hoofdtekst (Rapportage fase 2, Marktverkenning) gesproken wordt over een tussenmeeroppervlak van ca. 40 km² (inclusief vloedkom) en dat in de uitwerking van het basisplan en de berekeningen uitgegaan wordt van een totaal oppervlak van 34 km², waarbij de vloedkom een oppervlak heeft van 15 km².

Het peil van het IJsselmeer wordt met 0,25 m verhoogd. Hierdoor neemt het zogenaamde spuienster (de periode dat onder vrij verval gespuid kan worden) toe, evenals het verval bij spuien en de doorstroomopening. Het afvoeren van water vanuit het IJsselmeer zal volgens het plan voor het grootste deel plaats vinden via de spuisluizen Den Oever. Het resterende deel wordt geloosd via de pomp-turbines in de spuisluizen Kornwerderzand. Daartoe is een afsluitbare verbinding ontworpen tussen het IJsselmeer en deze spuisluizen (nooduitlaat genoemd). Een groot deel van de tijd zullen de pomp-turbines evenwel worden gebruikt voor het opwekken van energie. De getijbeweging op de Waddenzee wordt daartoe benut. Wanneer in de toekomst een zeespiegelrijzing zal optreden, zal een verschuiving plaats

vinden van energieopwekking naar pompen, ook al omdat de spuisluizen Den Oever dan minder kunnen worden gebruikt.

Vanuit het IJsselmeer kan op twee plaatsen zoet water naar het tussenmeer worden gevoerd; deze doorlaten hebben een beperkte capaciteit van ca. 15 m³/s. Er zijn voorts visdoorgangen ontworpen tussen Waddenzee en vloedkom en tussen het tussenmeer en het IJsselmeer.

Het plan omvat eveneens andere vormen van energieopwekking: windmolens in de Wieringermeerpolder, zonnepanelen op de Afsluitdijk, en – na verdere ontwikkeling – blue energy door middel van RED technologie op een nader te kiezen locatie langs de Afsluitdijk.

Varianten

Als alternatief heeft AD21 op verzoek van RWS een variant uitgewerkt waarbij alleen de vloedkom wordt gerealiseerd ter plaatse van de spuisluizen Kornwerderzand; deze vloedkom heeft een oppervlak van 19 km².

Daarnaast is ook een variant uitgewerkt waarbij een mogelijk toekomstig extra spuimiddel in de Afsluitdijk (ESA) wordt benut. Dit spuimiddel heeft als mogelijke locatie de knik in de Afsluitdijk tussen Kornwerderzand en Breezanddijk. De vloedkom van 19 km² sluit in dit geval aan op het nieuwe spuimiddel, en de pomp-turbines worden in het nieuwe spuimiddel geplaatst (dat dan in feite geen spuimiddel meer zal zijn maar een waterkrachtcentrale annex gemaal). De spuisluis Den Oever blijft daarbij in gebruik als spuimiddel; de spuisluis Kornwerderzand, die binnen de vloedkom is gelegen, wordt buiten gebruik gesteld.

Bij beide varianten is het mogelijk om in een latere fase het tussenmeer uit het oorspronkelijke basisplan toe te voegen; dit tussenmeer heeft dan een oppervlak van 15 km².

2.2 Getijdenbeweging en verwachte zeespiegelstijging

In de hoofdttekst (Rapportage fase 2, Marktverkenning) en ondersteunenden documenten wordt de getijdebeweging ter plaatse van de spuisluizen Kornwerderzand niet expliciet genoemd. Uit een toegeleverde spreadsheet blijkt dat de getijslag in berekeningen op 1,8 m is gesteld. Er is daarbij een sinusvormige beweging in de tijd aangenomen met een periode van 12 uur.

Er wordt rekening gehouden met een toekomstige zeespiegelstijging (ZSS). In de hoofdttekst (Rapportage fase 2, Marktverkenning) wordt op pag. 19 vermeld dat het W+ scenario als uitgangspunt is genomen (het W+ scenario is in de figuur op blz. 18 weergegeven; dit scenario kenmerkt zich door een vrijwel lineair in de tijd toenemende zeespiegel in de periode tot 2100). In berekeningen van energieverbruik (bij pompen) en energieopwekking (bij turbinen) en in berekeningen van spui- en pomphoeveelheden wordt door AD21 evenwel uitgegaan van een scenario met een zeespiegelstijging die later inzet dan in het W+ scenario, zie onderstaande Tabel 2.1:

Tabel 2.1 Scenario's zeespiegelstijging

Jaar	W+ scenario van KNMI (m)	AD21 scenario (m)	Vershil (m)
2015	0,10	0	-0,10
2050	0,40	0,25	-0,15
2070	0,60	0,50	-0,10
2090	0,80	0,75	-0,05
2100	0,85	0,85	0,0

2.3 Waterstanden van IJsselmeer, vloedkom en tussenmeer

De waterstand op het IJsselmeer wordt in de huidige situatie tussen NAP -0,4 m en NAP -0,2 m gehouden. In het plan van A21 wordt het IJsselmeer 0,25 m hoger opgezet.

De waterstandsvariëaties van vloedkom en tussenmeer zijn gerelateerd aan de getijbeweging op de Waddenzee bij Kornwerderzand. Uit het toegeleverde spreadsheet blijkt dat de waterstandsvariatie van de vloedkom wordt berekend uitgaande van de aangenomen sinusvormige getijbeweging (met slag van 1,8 m en periode van 12,0 uur), een aangenomen vast turbinedebiet van 27,5 m³/s, een gekozen tijdsperiode van 4,0 uur voor inlaten of uitlaten van water, en het ontworpen oppervlak van de vloedkom van 15 km² (bij de twee uitgewerkte varianten is het oppervlak van de vloedkom 19 km²). De getijslag in de vloedkom is daarmee gelijk aan een vaste hoeveelheid instromend (uitstromend) water gedeeld door een vast oppervlak; dit levert in de berekening van AD21 een getijslag op van 0,87 m (basisplan). De getijbeweging in de vloedkom wordt sinusvormig in de tijd aangenomen, eveneens met periode van 12,0 uur, en wordt “handmatig” zodanig verschoven ten opzichte van de getijbeweging op de Waddenzee dat gedurende de periode van 4,0 uur een ‘gewogen’ gemiddeld verval van 0,67 m ontstaat. De turbines werken zowel bij opkomend water als afgaand water, en wel gedurende een totale periode van 2 x 4,0 uur = 8,0 uur, gelijk aan 2/3 van de getijperiode van 12,0 uur. Hoewel niet genoemd in de hoofdttekst (Rapportage fase 2, Marktverkenning) wordt kennelijk impliciet verondersteld dat de kokers met turbines afgesloten kunnen worden of dat de turbines in een vrijloopstand kunnen worden gezet (opm.: de bestaande spuisluizen Kornwerderzand hebben een dubbele set van hefdeuren, zodat bij handhaving daarvan afsluiten mogelijk is; de aanname van een sinusvormige waterbeweging in de vloedkom is bij tijdelijke afsluiting van de turbinegangen overigens niet meer correct).

De gemiddelde waterstand van de vloedkom is bij de door AD21 gedane aannamen gelijk aan de gemiddelde waterstand van de Waddenzee bij Kornwerderzand. Bij een stijgende zeewaterspiegel zal de waterstand van de vloedkom de zeespiegel volgen.

Voor de situatie waarbij een tussenmeer wordt gerealiseerd dat met de vloedkom in verbinding staat wordt door AD21 een correctie uitgevoerd op de getijslag in de vloedkom: het getijvolume van de vloedkom wordt verminderd met het getijvolume van het tussenmeer en de getijslag op de vloedkom wordt dienovereenkomstig gereduceerd. Het getijvolume van het tussenmeer wordt berekend als het product van een aangenomen getijslag van 0,15 m op het tussenmeer en het ontworpen oppervlak van het tussenmeer. De inlaat- en uitlaatperiode van 4,0 uur per getijcyclus blijft evenwel bij alle varianten met 40 turbines gehandhaafd, evenals het ‘gewogen’ gemiddelde verval van 0,67 m over de turbines.

Er wordt geen nadere onderbouwing gegeven van het vaste debiet van 27,5 m³/s door elk van de turbines. Ook wordt geen rekening gehouden met het effect van glooiende oevers langs vloedkom en tussenmeer op de getijbeweging binnen (in geval van glooiende oevers verandert de waterspiegel bij een aangenomen vast getijvolume sneller tijdens laag water dan tijdens hoog water).

2.4 Kunstwerken in het basisplan

De belangrijkste kunstwerken in het basisplan samenhangend met het getijdenbekken zijn de spuisluizen Kornwerderzand met ingebouwde pomp-turbines en de keersluis in de verbinding tussen IJsselmeer en spuisluizen Kornwerderzand (de nooduitlaat).

De bestaande spuisluis Kornwerderzand bestaat uit een tweetal groepen van 5 spuiokers; elke koker heeft een doorsnede van 12,0 m (breed) bij 7,15 m (hoog). De vloer ligt op NAP-4,65 m, het plafond op NAP+2,5 m. Iedere koker kan worden afgesloten met behulp van stalen hefschuiven (er zijn twee schuiven achter elkaar geplaatst).

In het voorstel van AD21 worden in iedere koker 4 pomp-turbines geplaatst met een diameter van 2,5 m en een waaier van 2,25 m (40 stuks totaal). De toestroming naar en afstroming van de turbines wordt verbeterd door middel van geleideschotten (geen nadere uitwerking). Het ontwerp van de pomp-turbines is geoptimaliseerd op de functie turbineren. Het systeemrendement bij turbineren wordt gesteld op een factor 0,65 (voor beide stroomrichtingen; rendement als totaal van elektrische verliezen, mechanische verliezen, en hydraulische verliezen); het systeemrendement bij pompen wordt gesteld op 0,55 (ook voor beide stroomrichtingen). Zie paragraaf 2.5 voor verdere beschouwing.

De nooduitlaat bestaat uit een met hefschuiven afsluitbare doorstroomopening. Bij opening van de in totaal drie schuiven stroomt zoet water vanuit het IJsselmeer de vloedkom in (die is gevuld met zout water), waarna het water via de pomp-turbines in de spuisluis Kornwerderzand kan worden afgevoerd naar de Waddenzee. De doorstroomopening van de nooduitlaat heeft in het plan van AD21 een netto oppervlak van ca. 330 m². Daarbij mikt men op een capaciteit van 1000 m³/s. Dit is ook de beoogde capaciteit van de pomp-turbines.

Nabij de spuisluizen Kornwerderzand wordt een vispassage door de Afsluitdijk voorzien. Vispassages zijn ook ontworpen in de zanddam tussen IJsselmeer en vloedkom en tussen IJsselmeer en tussenmeer.

De schutsluizen bij Kornwerderzand worden vervangen door een naviduct (wegverkeer onder de scheepvaartroute door) en de schutsluizen bij Den Oever krijgen een versterkt buitenhoofd.

2.5 Pompen en turbines in het basisplan

AD21 spreekt in het werkdocument van een pomp met een diameter van 2,25 m, een debiet van 25 m³/s bij een opvoerhoogte van 1 m. Het turbinedebiet bedraagt volgens dit document 27,5 m³/s bij een verval van 0,75 m. Het consortium noemt een pomprendement van 88%. Tezamen met 70% "stromingsrendement" en 95% elektrisch rendement komt men dan op een totaal rendement van 55%. Voor turbineren schat men in dat dit 10% beter kan, resulterend in een systeemrendement van 65%. Men noemt een geïnstalleerd piekvermogen van de turbines van 8 MW (ruim 200 kW per turbine), gebaseerd op de 27,5 m³/s turbinedebiet en 0,75 m verval. Hierbij is het systeemrendement van de genoemde 65% ten onrechte niet meegenomen.

De pompenfirma Nijhuis, die bijgedragen heeft aan het plan van AD21, noemt andere waarden voor de haalbare pomprendementen:

Functie	Bovengrens pomprendement [%]	
	Pompen	Turbineren
Conventionele pomp	80	55
Optimale pomp-turbine	75	65
Optimale turbine-pomp	65	75

Voorts geeft Nijhuis nog als voorbeeld een rapport van een doorgemeten model pomp-turbine. Deze heeft een diameter van 0,32 m, een ontwerpdebiet van 675 m³/h, een opvoerhoogte van 1,55 m en een toerental van 750 rpm. Het ontwerpkoppel is 0,0433 kNm, waarmee het mechanisch/hydraulisch rendement 83,8% bedraagt.

2.6 Verwachte energieopbrengst turbines en energieverbruik pompen: basisplan

Uitgaande van de huidige verdeling van het spuidebiet over de sluisen Den Oever en Kornwerderzand (totaal spuidebiet 16 miljard m³/jr) is een herverdeling gemaakt die past bij de toekomstige situatie (met pomp-turbines in de spuisluis Kornwerderzand, een vloedkom en eventueel een tussenmeer). Daarbij is het totale spuidebiet van 16 miljard m³ constant gehouden (Tabel 2.2). In de eerste jaren van het door AD21 gehanteerde scenario, zonder zeespiegelstijging maar met peilverhoging van 0,25 m op het IJsselmeer, kan meer water worden afgelaten bij Den Oever (vanwege het grotere spuivenster, het grotere verval en de grotere doorstroomopening). Dientengevolge hoeft in dat geval slechts een relatief kleine hoeveelheid water via de nooduitlaat naar de vloedkom te worden afgevoerd en vervolgens met de pomp-turbines te worden uitgeslagen. In latere jaren stijgt de zeespiegel in het scenario en kan steeds minder water onder vrij verval bij Den Oever worden geloosd. Dit betekent dat steeds meer water bij Kornwerderzand moet worden verpompt (ter illustratie: bij 0,75 m zeespiegelstijging, dat in het scenario optreedt in 2090, kan bij Den Oever niet meer worden gespuid en dient alle water te worden verpompt). Achtergrondinformatie over de wijze van berekening van de herverdeling van het spuidebiet in de tijd wordt in de rapporten niet gegeven.

In het toegeleverde spreadsheet wordt voor de periode 2015 – 2050 (35 jaar, met zeespiegelstijging van 0,25 m) een berekening gemaakt van de hoeveelheid opgewekte getijdenenergie (turbines) en de hoeveelheid verbruikte energie (pompen) bij Kornwerderzand, uitgaande van een lineaire afname in de tijd van het spuidebiet in Den Oever (van 14.10⁹ m³/jaar naar 11.10⁹ m³/jaar) en een gelijktijdige en even grote toename van het pompdebiet bij Kornwerderzand (van 2.10⁹ m³/jaar naar 5.10⁹ m³/jaar); de gekozen begin- en eindwaarde van het spuidebiet worden niet nader toegelicht. In samenhang daarmee wordt het aantal turbineerdagen lineair in de tijd verlaagd en het aantal pompdagen lineair verhoogd (opm.: in het toegeleverde werkdocument, pag. 20, worden lagere aantallen pompdagen genoemd dan in het spreadsheet). Het verval waarbij geturbineerd wordt, wordt constant gehouden (0,67 m); de opvoerhoogte van de pompen wordt lineair in de tijd vergroot van 0,5 m tot 0,75 m. Opgemerkt zij dat de procedure bij pompen niet nader wordt toegelicht; in ieder geval zal het peil van de vloedkom lager moeten zijn dan het peil van IJsselmeer voordat de deuren van de nooduitlaat kunnen worden geopend.

De energieopbrengst van de pomp-turbines wordt berekend met de gebruikelijke formule:

$$E = \frac{\eta_{turbine} \cdot \rho \cdot g \cdot V \cdot \Delta h}{3600 \cdot 10^9} \quad [\text{GWh/jaar}] \quad (2.1)$$

met:

- η = systeemrendement (vaste waarde van 0,65)
- ρ = soortelijke dichtheid water (gerekend met 1000 kg/m³)
- g = zwaartekrachtsversnelling (gerekend met 10 m/s²)
- V = totaal geturbineerd watervolume per jaar = $Q \cdot n \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot f.a$ [m³/jaar]
- n = aantal turbines (gerekend met 40 stuks)
- Q = debiet per turbine (gerekend met een vast debiet van 27,5 m³/s)

- f = fractie van het jaar dat wordt geturbineerd (gerekend met 0,85 in 2015, lineair aflopend naar 0,75 in 2050)
a = fractie van getijcyclus dat turbines actief zijn (gerekend met vaste waarde van 0,67 overeenkomend met periode van 2 x 4 uur per getijcyclus van 12 uur)
 Δh = waterstandsverschil over de getijcentrale (gerekend met vaste waarde van 0,67 m)

Het energieverbruik van de pomp-turbines wordt berekend met de eveneens gebruikelijke formule:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot V \cdot \Delta h}{\eta_{pomp} \cdot 3600 \cdot 10^9} \text{ [GWh/jaar]} \quad (2.2)$$

met:

- η = systeemrendement (vaste waarde van 0,55)
 ρ = soortelijke dichtheid water (gerekend met 1000 kg/m³)
g = zwaartekrachtsversnelling (gerekend met 10 m/s²)
V = totaal verpompt watervolume per jaar (volgt uit spuidebietverdeling [m³/jaar])
 Δh = opvoerhoogte pompen (gerekend met vaste waarde van 0,5 m in 2015, lineair toenemend tot 0,75 m in 2050)

Er wordt gerekend met een inkoopprijs van energie van € 0,08 per kWh voor pompen en een verkoopprijs van € 0,17 per kWh voor turbinen. Over de beschouwde periode van 35 jaar worden de inkoop- en verkoopbedragen gekapitaliseerd.

In de rapporten wordt een langere periode, tot 2100, beschouwd. Voor de periode tussen 2050 en 2100 wordt geen nadere onderbouwing gegeven van de gepresenteerde energiehoeveelheden. De berekende hoeveelheden worden in onderstaande tabel getoond:

Tabel 2.2 Spuidebiet, geproduceerde en verbruikte hoeveelheid energie per jaar volgens berekening AD21

Jaar / zeespiegelst.	Spuidebiet Den Oever (10 ⁹ m ³ / jaar)	Spuidebiet Kornwerderz. (10 ⁹ m ³ / jaar)	Energieverbruik pompen (GWh / jaar)	Energieopbrengst turbines (GWh / jaar)
2004	9	7	-	-
2015 / 0,00 m	14	2	5	21
2050 / 0,25 m	11	5	19	19
2070 / 0,50 m	5	11	50	14
2090 / 0,75 m	0	16	80	9
2100 / 0,85 m	0	16	89	9

Merk op dat het spuidebiet Den Oever in 2050 nagenoeg hetzelfde zou moeten zijn als in 2004; immers in 2050 is de zeespiegel volgens het AD21 scenario gestegen met 0,25 m, dus evenveel als de peilopzet van 0,25 m op het IJsselmeer. De doorstroomopening is bij 0,25 m hogere waterstand zo'n 5% groter maar geen factor 11/9 (overeenkomend met 22%). In 2050 zou daarom al meer energie door de pompen moeten worden verbruikt dan er door turbinen aan energie wordt gewonnen. Merk ook op dat door het veelvuldig spuien van zoet water in latere jaren via Kornwerderzand er grote wisselingen zullen optreden in het zoutgehalte van de vloedkom en het tussenmeer.

2.7 Verwachte energieopbrengst turbines en energieverbruik pompen: varianten

Bij de variant waarbij alleen een vloedkom met oppervlak van 19 km² wordt gerealiseerd met 40 stuks pomp-turbines in de spuisluis Kornwerderzand, verandert er in de berekeningen van AD21 niet veel. De getijslag in de nu grotere vloedkom wordt berekend als 0,83 m i.p.v. 0,87 m van het basisplan, maar bij turbineren wordt volgens het toegeleverde spreadsheet eenzelfde 'gewogen' gemiddelde verval van 0,67 m aangehouden en ook wordt dezelfde actieve periode van 4 uur voor inlaten en 4 uur voor uitlaten van water per getijcyclus van 12 uur gehanteerd. Niettemin wordt voor deze variant zo'n 10% hogere energieopbrengst per jaar opgegeven in de rapportage (zonder nadere toelichting), zie Tabel 2.3. Het energieverbruik van de pompen blijft onveranderd.

Bij de ESA-variant worden de pomp-turbines in het nieuwe spuimiddel (ter plaatse van de knik in de Afsluitdijk) geplaatst; de vloedkom met oppervlak van 19 km² omringt het nieuwe spuimiddel. De spuisluis Kornwerderzand, die ook binnen de vloedkom ligt, wordt buiten gebruik gesteld. Er wordt dus alleen gespuid via de spuisluis Den Oever, en noodzakelijkerwijs zal nu evenveel water verpompt moeten worden via het nieuwe spuimiddel als wordt verpompt in het basisplan via de spuisluis Kornwerderzand. De efficiëntie van de pomp-turbines in het nieuwe spuimiddel wordt hoger ingeschat, zowel bij pompen als bij turbineren, dan de efficiëntie van de pomp-turbines in het basisplan. Dit leidt er toe dat het energieverbruik per jaar in de gehele beschouwde periode van 2015 – 2100 door AD21 ca. 15% lager wordt ingeschat dan in het basisplan, en de energieproductie per jaar ca. 22% hoger, zie Tabel 2.3. Dit wordt overigens niet onderbouwd in de rapporten van AD21.

Tabel 2.3 Geproduceerde en verbruikte hoeveelheid energie per jaar volgens berekening AD21, varianten

Jaar / zeespiegelst.	Basisplan Verbruik pompen (GWh / jaar)	Basisplan Opbrengst turbines (GWh / jaar)	Variant 19 km ² Verbruik pompen (GWh / jaar)	Variant 19 km ² Opbrengst turbines (GWh / jaar)	ESA-variant 19 km ² Verbruik pompen (GWh / jaar)	ESA-variant 19 km ² Opbrengst turbines (GWh / jaar)
2004	-	-	-	-	-	-
2015 / 0,00 m	5	21	5	24	4,3	26
2050 / 0,25 m	19	19	19	21	16	23
2070 / 0,50 m	50	14	50	16	43	17
2090 / 0,75 m	80	9	80	10	68	11
2100 / 0,85 m	89	9	89	10	76	11

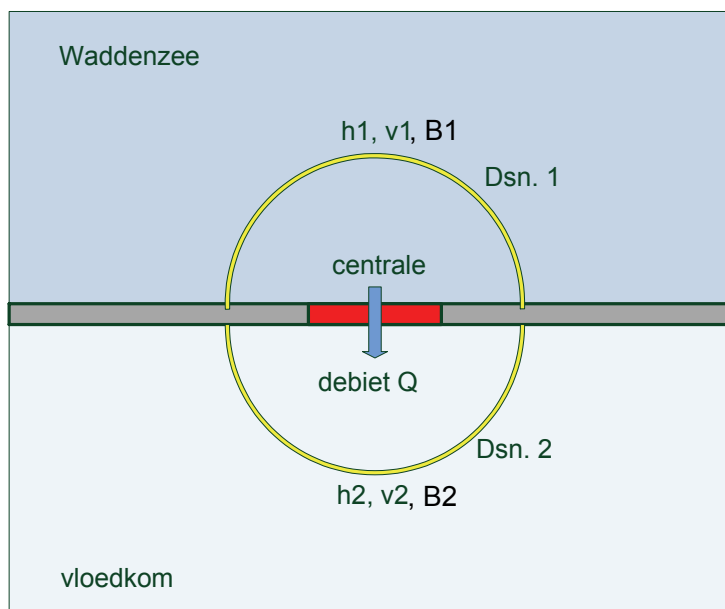
3 Theoretische beschouwing getijdenbekken

3.1 Energiebeschouwing

In deze paragraaf worden enkele basisbegrippen besproken aangaande energieopwekking door middel van een getijdencentrale.

Energieverlies over getijdencentrale

In onderstaande Figuur 3.1 is het gebied rond de getijdencentrale in de Afsluitdijk schematisch weergegeven. Er stroomt water door de centrale van de Waddenzee naar de vloedkom.



Figuur 3.1 Energiebeschouwing

In doorsnede 1 met ontwikkelde lengte B_1 is de waterdiepte h_1 en de stroomsnelheid v_1 ; in doorsnede 2 met ontwikkelde lengte B_2 is de waterdiepte h_2 en de stroomsnelheid v_2 (gemiddelden). De "energiestroom" door dsn. 1 per tijdseenheid dt is:

$$E_1 = \left(\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 \right) h_1 v_1 B_1 \cdot dt \quad [\text{Nm}]$$

met:

ρ = soortelijke dichtheid water [kg/m^3]
 g = zwaartekrachtsversnelling [m/s^2]

Evenzo geldt voor dsn.2:

$$E_2 = \left(\frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \right) h_2 v_2 B_2 \cdot dt \quad [\text{Nm}]$$

De hoeveelheid energie die per tijdseenheid dt door dsn.1 en dsn.2 stroomt is ongelijk. Het verschil ΔE in hoeveelheid energie volgt met:

$$Q_{in} = h_1 v_1 B_1 = h_2 v_2 B_2 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

uit:

$$\Delta E = \left\{ \rho g \cdot \left(\frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) - \rho g \cdot \left(\frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) \right\} \cdot Q_{in} \cdot dt = \rho g (H_1 - H_2) Q_{in} \cdot dt = \rho g \Delta H Q_{in} \cdot dt \quad [\text{Nm}]$$

Wanneer dsn. 1 en dsn. 2 op voldoende grote afstand liggen en de stroomsnelheid in deze doorsnedes laag is, kan het energiehoogteverschil ΔH bij benadering vervangen worden door het waterstandsverschil Δh .

Het debiet Q_{in} dat eerst dsn. 1, dan de getijdencentrale en tenslotte dsn. 2 passeert is een functie van ΔH en van de totale doorstroomopening $A_{turbine}$ van de turbines:

$$Q_{in} = \mu \cdot A_{turbine} \sqrt{2g\Delta H} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.1)$$

Hierbij is μ een afvoercoëfficiënt [-], die samenhangt met de gekozen referentiedoorsnede. Gewoonlijk wordt de kleinste doorstroomopening als referentiedoorsnede gekozen, in dit geval $A_{turbine}$, de keeldoorsnede ter plaatse van de turbines. De afvoercoëfficiënt μ is representatief voor alle stromingsverliezen die optreden tussen dsn. 1 en dsn. 2. De onttrekking van energie door de turbines is daarbij nog buiten beschouwing gelaten.

Substitutie van de uitdrukking voor Q in die voor ΔE geeft:

$$\Delta E = \mu \rho g^{1.5} \Delta H^{1.5} A_{turbine} \sqrt{2} \cdot dt \quad [\text{Nm}] \quad (3.2)$$

In bovenstaande uitdrukkingen zijn Q_{in} , ΔH en in zekere mate ook de afvoercoëfficiënt μ afhankelijk van de tijd t , de laatste bijvoorbeeld wanneer het stroombeeld een functie is van ΔH . De totale hoeveelheid energie die aan het stromende water wordt onttrokken gedurende de periode T_{vloed} (halve getijdencyclus) waarbij water de vloedkom in stroomt, wordt gevonden door integratie:

$$E_{vloed} = \int_{T_{vloed}} \Delta E \cdot dt \quad [\text{Nm} = \text{Ws} = \text{J}] \quad (3.3)$$

Eenzelfde integraal kan worden opgesteld voor de ebphase met stroming uit de vloedkom. De onttrekking van energie hangt samen met de door het water geleverde wrijvings- en vervormingsarbeid en met omzetting van kinetische energie in warmte.

Bij de getijdencentrale is het de bedoeling dat een zo groot mogelijk deel van de energie in het water naar de as van de turbines wordt overgedragen; alle andere energieonttrekkingen, met name de energieverliezen die ontstaan bij afstroming achter de turbines, dienen daarom zo klein mogelijk te zijn.

De afstroomverliezen kunnen beperkt blijven wanneer het doorstroomoppervlak na de turbines slechts zeer geleidelijk in grootte toeneemt (venturi-vorm). Vanwege de mogelijkheid

van omdraaiing van de stroomrichting dient zo'n geleidelijke verwijding aan beide kanten van de turbines te worden gerealiseerd.

Afvoercoëfficiënt μ

De afvoercoëfficiënt μ van spuisluizen is in het algemeen sterk afhankelijk van factoren als omgevingsvormgeving, vormgeving van de constructie, stroomlijning en wandruwheid. In geval van uniforme, rechthoekige kokers zal μ in een range tussen 0,7 en 1,0 kunnen liggen. Stroomlijning, maar vooral een zeer geleidelijke verwijding van de kleinste doorsnede naar de uitstroombdoorsnede, zodanig dat de stroming de wanden van de koker goed blijft volgen, verhogen de afvoercoëfficiënt.

De uittredesnelheid mag niet te hoog zijn, bij voorkeur lager dan 1 m/s. Wanneer de uittredende stroming op een aanwezig stroomveld kan aansluiten zal geen verder verlies meer optreden. Bij uitstroming in stil water ontstaat nog extra vertragsverlies.

Om problemen met luchtaanzuiging te voorkomen verdient het aanbeveling om het dak van de koker ruim boven de waterspiegel te plaatsen zodat in de spuikokers altijd een vrije waterspiegel aanwezig is. De koker kan ook juist geheel onder water worden gesitueerd.

Bij de spuisluis IJmuiden met onder water gelegen kokers met mooie venturi-vorm, is bij metingen een μ -waarde van ca. 1,3 vastgesteld, gebaseerd op de keeldoorsnede [WL | Delft Hydraulics (1997)]. Een μ -waarde groter dan 1,0 is hier mogelijk doordat de gekromde stroomlijnen ter plaatse van de keeldoorsnede van de venturi voor onderdruk zorgen. Recente metingen in de spuisluizen in de Afsluitdijk geven een μ -waarde van ca. 1,0 aan [WL | Delft Hydraulics (2003)]. Opgemerkt zij dat de afvoercoëfficiënt moet worden berekend uitgaande van goed gedefinieerde meetpunten van de waterspiegel.

Systeemrendement η van de getijdencentrale

Wanneer turbines worden geplaatst in de spuikokers neemt de hydraulische weerstand toe en het debiet af. De afvoerrelatie en energierelatie laten zich nu schrijven als:

$$Q_{\text{met-turb}} = \mu_{\text{met-turb}} \cdot A_{\text{turbine}} \sqrt{2g\Delta H} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.4)$$

$$\Delta E_{\text{met-turb}} = \rho g \Delta H Q_{\text{met-turb}} \cdot dt = \mu_{\text{met-turb}} \rho g^{1.5} \Delta H^{1.5} A_{\text{turbine}} \sqrt{2} \cdot dt \quad [\text{Nm}] \quad (3.5)$$

Waarbij geldt: $\mu_{\text{met-turb}} < \mu$.

De hoeveelheid energie die gedurende vloed (een halve getijdencyclus) aan de stroming wordt onttrokken is nu gelijk aan:

$$E_{\text{vloed}} = \int_{T_{\text{vloed}}} \Delta E_{\text{met-turb}} \cdot dt \quad [\text{Nm}] \quad (3.6)$$

De fractie energie die door de turbines aan de stroming wordt onttrokken, E_{hydr} , stellen we gelijk aan:

$$E_{\text{hydr}} = \eta_{\text{hydr}} \cdot E_{\text{vloed}}$$

met $\eta_{\text{hydr}} < 1$

Een deel van deze hydraulische energie gaat verloren in de turbine bij de omzetting naar mechanische energie; vervolgens gaat nog weer een deel daarvan verloren bij de omzetting naar elektrische energie.

De overblijvende elektrische energie laat zich schrijven als:

$$E_{\text{elektr}} = \eta_{\text{hydr}} \cdot \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{elektr}} \cdot E_{\text{vloed}} = \eta \cdot E_{\text{vloed}} \quad (3.7)$$

met $\eta_{\text{hydr}} < 1$, $\eta_{\text{mech}} < 1$, $\eta_{\text{elektr}} < 1$

Voor het systeemrendement $\eta = \eta_{\text{hydr}} \cdot \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{elektr}}$ geldt dus ook: $\eta < 1$.

De hoeveelheid elektrische energie die gedurende vloed (een halve getijcyclus) wordt geproduceerd door de turbines is nu:

$$E_{\text{elektr}} = \int_{T_{\text{vloed}}} \eta \cdot \Delta E_{\text{met-turb}} \cdot dt \quad [\text{Nm} = \text{Ws} = \text{J}] \quad (3.8)$$

Een zelfde vergelijking kan worden opgesteld voor de ebfase. Integratie over alle getijcycli in een jaar levert de totale energieproductie van dat jaar.

In de praktijk moet er rekening mee worden gehouden dat de turbines een deel van de tijd buiten gebruik gesteld moeten worden om onderhoud te kunnen plegen of om reparaties uit te kunnen voeren. De (slechts mondjesmaat beschikbare) ervaring met getijdenturbines in het buitenland leert dat regelmatig onderhoud noodzakelijk kan zijn vanwege de agressieve omgevingscondities; denk aan zand, zout en marine aanval. De buiten gebruik periode kan orde 5% bedragen. Ook kan de centrale tijdens stormcondities mogelijk niet in bedrijf gesteld worden.

Er zijn mogelijkheden om de opbrengst van de getijdencentrale in geld te optimaliseren, bijvoorbeeld door gebruik te maken van goedkope nachtstroom om het peil in het bekken extra te verhogen. De daarna volgende extra energieproductie kan dan tegen een hoger dagtarief worden verkocht. Puur energetisch gezien is dit echter niet voordelig, omdat er per saldo meer energie verloren gaat.

Getijdenbeweging in de vloedkom

Bij een getijdenbeweging op de Waddenzee met lokale getijslag R (top-dal waarde) wordt in de vloedkom een gereduceerde getijbeweging met slag r opgewekt. De grootte van r is afhankelijk van de getijslag R , de doorstroomopening A_{turbine} en het oppervlak S van de vloedkom. Hoe groter de verhouding A_{turbine}/S hoe groter de getijslag r in de vloedkom. Het tijdsafhankelijke verval $\Delta h(t) = R(t) - r(t)$ over de centrale neemt evenwel af met een toename van A_{turbine}/S (en dus ook $\Delta h(t)$). De energieproductie van de centrale is gebaat bij een zo groot mogelijk instroomvolume V of, vertaald, bij een zo groot mogelijke waarde van het product $\Delta h^{1.5} \cdot A_{\text{turbine}}$ gedurende de vloedfase. Hetzelfde geldt voor de ebfase. Voor een zo groot mogelijke energieopbrengst dient dus de integraal van het product $\Delta h^{1.5} \cdot A_{\text{turbine}}$ te worden geoptimaliseerd. In de praktijk zijn het veelal economische-, landschappelijke en milieutechnische factoren die bepalen hoe groot het turbineoppervlak en het vloedkom-oppervlak worden gedimensioneerd.

De getijbeweging in de vloedkom loopt achter op de getijbeweging buiten. Met een numeriek model kan bij een gegeven getijbeweging op de Waddenzee de getijbeweging op de vloedkom worden berekend. Daarbij worden traagheidseffecten in de vloedkom meegenomen. In een voldoende groot numeriek model kan ook het eventuele reducerende effect van de vloedkom op de getijbeweging op de Waddenzee worden verdisconteerd.

De getijbeweging op de vloedkom wordt meer gecompliceerd wanneer het bekken is voorzien van flauwe zijtaluds of wanneer er een verbinding is met een tweede bekken door middel van een overlaat (zoals in het basisplan van AD21). De getijbeweging is dan echter nog steeds goed met een numeriek model te berekenen,

Een bekkengeometrie met flauwe zijtaluds heeft ook consequenties voor de energieproductie. Vullen van het bekken met open sluizen in de vloedfase en turbineren in de eb fase levert daarbij in het algemeen meer energie op dan ledigen in de eb fase en turbineren in de vloedfase. Dit komt doordat de gemiddelde waterstand in het bekken in het eerste geval hoger ligt en er dus een groter watervolume in de energieproductiefase is betrokken dan in het tweede geval. De hogere gemiddelde waterstand in het eerste geval wordt veroorzaakt door het verschil in weerstand bij instromen (lagere weerstand) en uitstromen (hogere weerstand). Bij tweezijdig turbineren maakt het geen verschil mits de stromingsweerstand van de centrale voor beide stroomrichtingen gelijk is en de turbines een even groot rendement hebben in beide stroomrichtingen. Met name het laatste is evenwel niet gemakkelijk te realiseren zodat het dan verstandig lijkt om de turbines zo te plaatsen dat ze in de eb fase het hoogste rendement hebben.

Formule voor eerste schatting energieopbrengst getijdencentrale

Omdat de berekening van de hoeveelheid geproduceerde energie van een getijdencentrale vereist dat zowel $\Delta H(t)$ als $Q(t)$ als functie van de tijd bekend zijn, en omdat deze afhankelijk zijn van factoren die zonder nader onderzoek moeilijk nauwkeurig aan te geven zijn (zoals turbine rendement, stromingsverliezen, getijslag, effect vloedkomgrootte met hydraulische eigenschappen), wordt er wel gebruik gemaakt van ervaringsgegevens om een eerste afschatting te maken. Deze gegevens komen van bestaande projecten (waarvan er overigens niet veel zijn in de wereld) of zijn afkomstig van ontwerpstudies voor potentiële sites. Hier wordt een studie van Royal Haskoning [Royal Haskoning (2009)] genoemd waarin enkele ervaringsgegevens zijn opgenomen.

De jaarlijkse energieproductie E van een getijdencentrale wordt afgeschat met de formule:

$$E = \frac{2 \cdot n \cdot \eta \cdot \rho \cdot g \cdot V \cdot \Delta H}{3,6 \cdot 10^{12}} \quad [\text{GWh/jaar}] \quad (3.9)$$

met:

- 2 = factor in verband met tweezijdig turbineren
- n = aantal getijcycli per jaar (705)
- η = rendement van de turbines
- ρ = soortelijke dichtheid water [licht zout water: 1015 kg/m^3]
- g = zwaartekrachtsversnelling [$9,81 \text{ m/s}^2$]
- V = hoeveelheid water die bij vloed het bekken in stroomt en bij eb uit stroomt [m^3]
- ΔH = gemiddelde energiehoogteverschil gedurende turbine bedrijf [m]

Het volume V wordt berekend als:

$$V = 0,5.S.R \quad [\text{m}^3] \quad (3.10)$$

met:

0,5 = verhoudingsfactor tussen getijslag in het bekken en getijslag op zee

S = oppervlak bekken bij gemiddelde waterstand [m^2]

R = lokale getijslag op zee [m]

Merk op dat de getijslag r in het bekken gelijk wordt gesteld aan 50% van R , de lokale getijslag buiten. Het volume V wordt berekend als het product van S en r .

Daarnaast wordt het gemiddelde verval (ΔH) gedurende het in bedrijf zijn van de turbines gesteld op 40% van de getijslag R . Het rendement wordt in vloedfase en ebphase gelijk genomen. Er wordt geen rekening gehouden met het buiten bedrijf zijn van de turbines voor onderhoud e.d.. Wanneer genoemde waarden worden gesubstitueerd in E , waarbij S wordt uitgedrukt in km^2 en R in m, ontstaat:

$$E = 0,78.\eta.S.R^2 \quad [\text{GWh/jaar}] \quad (3.11)$$

Opgemerkt zij dat in deze formule niet expliciet het effect van de verhouding A_{turbine}/S (doorstroomopening turbines / bekkenoppervlak) wordt meegenomen.

Bijlage 4 Schaalgrootte ecologische verbetering

Op 1 februari 2010 is een expert sessie gehouden. Deelnemers aan de sessie waren:

- Ruurd Noordhuis (RWS Waterdienst)
- Miguel Dionisio Pires (Deltares)
- Bregje van Wesenbeeck (Deltares)
- Victor Langenberg (Deltares)
- Leon van Kouwen (Deltares)

Mennobart van Eerden (RWS Waterdienst) was helaas verhinderd. Daarom is later met hem telefonisch overleg geweest. Zijn opmerkingen zijn verwerkt.

Bijlage 5 Gevoeligheidsanalyse overheidsreferentie

De risicoscan heeft bestaan uit een expertsessie met deskundigen. De volgende deskundigen vanuit Deltares hebben deelgenomen aan de expertsessie:

- Gerard Kruse;
- Bernadette Wichman;
- Han Knoeff;
- Hans Venema;
- Irene van de Zwan;
- Andre van Hoven.

Bijlage 5A

Projectteam
Toekomst Afsluitdijk

Rijkswaterstaat
IJsselmeergebied

Bezoekadres
Zuiderwagenplein 2
("Smedinghuis")
Postadres Postbus 600
8200 AP Lelystad
T 0320 29 91 11
F 0320 23 43 00

Contactpersoon
ing.H.J. Regeling

T 7633
eric.regeling@rws.nl

memo

Ontwerprandvoorwaarden Toekomst Afsluitdijk

Datum
4 januari 2010

Bijlage(n)
-

1. Inleiding

Uit de in 2006 – overeenkomstig de Wet op de Waterkering – uitgevoerde veiligheidstoetsing is gebleken dat de Afsluitdijk de score 'onvoldoende' krijgt. Het grondlichaam, de twee schutsluiscomplexen en de twee spuisluiscomplexen zijn onvoldoende bestand tegen een maatgevende storm vanaf de Waddenzee. De waterkering voldoet niet aan de vigerende normfrequentie van 1/10.000 per jaar. Verbetermaatregelen aan grondlichaam en waterkerende kunstwerken zijn noodzakelijk.

In 2008 is de verkenningsfase gestart van het "Onderzoek Integrale Verbetering Afsluitdijk" (OIVA). Marktpartijen zijn gevraagd hun integrale visies te ontwikkelen voor een toekomstige Afsluitdijk en een globaal ontwerp te maken voor de dijkversterking. Na een selectie fase zijn uiteindelijk 4 integrale toekomstvisies beschreven en vergeleken in het rapport "Dijk en Meer" [1]. In dit rapport zijn tevens twee overheidsreferenties voor een dijkversterking opgenomen.

Voor de uitgevoerde toetsing in 2006 is gebruik gemaakt van de hydraulische toetsrandvoorwaarden zoals voorgeschreven in "HR2006" [2].

Als uitgangspunt in 2008, voor de eerste fase van de toekomstverkenning en de globale dijkversterkings-ontwerpen, is een set van hydraulische ontwerp-randvoorwaarden gekozen, die is afgeleid van de specifiek voor de ontwikkeling van de Extra Spuicapaciteit Afsluitdijk (ESA) bepaalde ontwerp-randvoorwaarden. In het rapport "Hydraulische randvoorwaarden voor het ontwerp van een nieuw spuicomplex in de Afsluitdijk" uit 2007 [3] zijn randvoorwaarden vastgesteld voor de locatie van 'de knik' bij km 24. Die ontwerp-randvoorwaarden voor ESA zijn – alhoewel dus berekend voor één locatie – binnen OIVA als representatieve basis gekozen voor de ontwerp-randvoorwaarden langs de gehele dijk.

In 2010 volgt op onderdelen een verdere uitwerking van de visies en overheidsvarianten ten behoeve van een beoordeling middels een MKBA en een Plan-MER.

In deze fase van nadere uitwerking van de visies, is het ook gewenst om de laatste stand van de kennis rondom hydraulische randvoorwaarden in de westelijke

Waddenzee – gebaseerd op o.a. lopend onderzoek voor SBW en WTI2011 – toe te passen.

Rijkswaterstaat
IJsselmeergebied

Datum
4 januari 2010

Deze memo geeft de conclusies uit een Deltares-advies [4] waarin die laatste stand van de kennis is beschreven en toegepast. Op de in [4] afgeleide 'basis hydraulische randvoorwaarden voor toetsing' worden vervolgens toeslagen toegepast om te komen tot een update van ontwerp-randvoorwaarden voor de norm-frequentie van 1/10.000.

Deze update van ontwerp-randvoorwaarden zal worden gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse van de overheidsvariant '2100-Robuust'. Deze analyse richt zich vooral op variatie van randvoorwaarden langs de dijk lengte, en op variatie van de normfrequentie.

De memo is inhoudelijk afgestemd met de Waterdienst.

Er wordt met nadruk op gewezen dat de nu beschikbare 'basis hydraulische randvoorwaarden' uit [4] een tussenstand vormen. In 2011 zullen de nieuwe, formele hydraulische randvoorwaarden voor het Randvoorwaardenboek (HR2011) worden vastgesteld. Afwijkingen van de nu als tussenstand gegeven waarden zijn niet ondenkbaar.

Ten behoeve van de na 2010 volgende (Planstudie-) fase voor Toekomst Afsluitdijk zal opnieuw een update van ontwerp-randvoorwaarden worden gedaan op basis van de dan vastgestelde HR2011.

2. Overzicht van tot dusver toegepaste randvoorwaarden

Voor de Veiligheidstoetsing 2006 is gebruik gemaakt van de hydraulische randvoorwaarden, zoals opgenomen in de HR2006 [2].

Dijkvak	Toetspeil	Hs	Tm02	Tp
km	m+NAP	m	s	s
Den Oever – 5	5.0	2.45	5.8	7.48
5 – 12	5.1	2.45	5.8	7.48
12 – 20	5.1	2.45	5.8	7.48
20 – 25	5.1	2.45	5.8	7.48
25 - Friesland	5.2	2.45	5.8	7.48

Tabel 1. Toetsrandvoorwaarden 1/10.000
(uit de formele HR2006)

NB. Voor de veiligheidstoets-2006 dienden, ten behoeve van golfoverslagberekeningen, de golfparameter $Tm-1,0$ of de parameter Tp te worden toegepast (en niet de parameter $Tm02$).

Onder aanname van een JONSWAP-spectrum voor Waddenzee-golven gelden de volgende empirische relaties:

$$Tp = 1.11 * Tm-1,0$$

$$Tp = 1.29 * Tm02$$

Deze relaties zijn bij de toets-2006 gebruikt, maar volgens recente inzichten gaat dit empirisch verband in een complex gebied als de Waddenzee niet meer op. Aangeraden wordt nu om de parameter voor golfperiode $T_{m-1,0}$ rechtstreeks met het model SWAN te bepalen.

Rijkswaterstaat
IJsselmeergebied

Datum
4 januari 2010

Voor de eerste fase van de Toekomstverkenning Afsluitdijk (OIVA) zijn de ontwerprandvoorwaarden overgenomen, die werden bepaald in het kader van het project 'Extra Spuicapaciteit Afsluitdijk' (ESA).

Dijkvak	Ontwerppeil	Hs	Tp
km	m+NAP	m	s
Den Oever – 5	6.03	3.50	8.1
5 – 12	6.03	3.50	8.1
12 – 20	6.03	3.50	8.1
20 – 25	6.03	3.50	8.1
25 - Friesland	6.03	3.50	8.1

Tabel 2. Ontwerprandvoorwaarden 1/10.000 voor het jaar 2100
(uit: Verkenning OIVA-2007)

NB. In de ESA-rapportage van ontwerp-randvoorwaarden is rechtstreeks de berekende T_p -waarde weergegeven.

3. Nieuwe basis-hydraulische randvoorwaarden uit SBW/WTI-onderzoek
Door Deltares is in het rapport "Hydraulische belastingen Afsluitdijk" [4] een advies gegeven voor de (update van) toe te passen toetsrandvoorwaarden.

Dijkvak	Toetspeil	Hs	$T_{m-1,0}$
km	m+NAP	m	S
Den Oever – 5	5.0	2.65	5.5
5 – 12	5.1	3.10	5.7
12 – 20	5.1	3.30	5.9
20 – 25	5.2	3.20	5.6
25 - Friesland	5.2	2.55	5.4

Tabel 3. Toetsrandvoorwaarden voor WTI2011
(niet-formele, voorlopige, waarden uit [4], incl. toename van 10%)

Deze update van toetsrandvoorwaarden is gebaseerd op berekeningen met een door DGW voor ontwerpen geaccepteerde versie van het golfmodel SWAN, en met de nieuwste versie van het probabilistisch model HYDRA-K-Waddenzee. Deltares adviseert om op deze nieuwste rekenresultaten voor $T_{m-1,0}$ en Hs uit de SWAN/HYDRA-K exercities, een opslag van +10% toe te passen. (memo en brief van Deltares, november 2009 [9])

Met deze modellen zijn voor een zeer groot aantal locaties langs de dijk (tussenafstanden ca. 300 m) basis randvoorwaarden berekend. Vervolgens zijn

hieruit de representatieve waarden voor de vijf onderscheiden dijktrajecten geselecteerd.

De golfperiodemaat $T_m-1,0$ wordt rechtstreeks in SWAN bepaald.

In [4] wordt aangegeven dat voor het complexe systeem van de Waddenzee géén goed eenduidig verband (een vaste factor is niet erg nauwkeurig) tussen $T_m-1,0$ en T_p is aan te geven.

Golfoverslagberekeningen dienen dan ook bij voorkeur met de parameter $T_m-1,0$ te worden bepaald.

Rijkswaterstaat
IJsselmeergebied

Datum
4 januari 2010

Overall beeld is dat op basis van de (voorlopige) nieuwe inzichten:

- Toetspeil 2011 is nagenoeg gelijk aan Toetspeil-2006
- Hs-2011 is 0 à 0.8 m hoger dan de Hs-2006
- $T_m-1,0$ is ongeveer 1 s korter dan de $T_m-1,0$ -2006

4. Toetsing versus ontwerp

Bij randvoorwaarden zoals in tabel 3. – afgeleid ten behoeve van de wettelijke toetsing – gelden belangrijke uitgangspunten ten aanzien van het omgaan met kennisonzekerheden. Statistische onzekerheid en modelonzekerheden worden bij toetsrandvoorwaarden – vanwege het vrij korte toetsinterval van 5 à 6 jaar - niet in beschouwing genomen.

Maar voor een goed ontwerp, bij planperiodes van bijvoorbeeld 50 of 100 jaar, geldt dat wél met kennisonzekerheden rekening moet worden gehouden, naast toeslagen voor bv. klimaatverandering in de gehanteerde planperiode.

Voor deze update van hydraulische randvoorwaarden voor ontwerp zal rekening worden gehouden met de volgende robuustheidstoeslagen en onzekerheden:

- a- Toename van de waterstand op de Waddenzee als gevolg van klimaatverandering
- b- Toename van de getijslag als gevolg van klimaatverandering
- c- Golfgedreven opzet van de waterstand (samenhangend met (d))
- d- Onzekerheid in overschrijdingsfrequentie van waterstanden op de Waddenzee
- e- Modelonzekerheden (formuleringen, modelaansturing, parameters en schematisatie) van het SWAN golfmodel.
- f- Effect van absolute zeespiegelstijging op de maatgevende golfhoogte

Voor het Project Toekomst Afsluitdijk worden Ontwerprandvoorwaarden afgeleid voor de planperiode tot 2050 en tot 2100 bij de vigerende veiligheidsnorm van 1/10.000.

NB.

Bij het nader uitwerken van een goed ontwerp voor dijkversterking moet – naast de hierboven genoemde toeslagen in de ontwerprandvoorwaarden – ook nog rekening worden gehouden met onder andere:

- toeslag voor beleidsmatige onzekerheden (bv. een andere veiligheidsbeschouwing of conclusies uit het rapport van de Commissie Veerman)
- toeslag in verband met te verwachten zetting en klink

- toeslag in verband met te verwachten autonome bodemdaling
Deze afzonderlijke toeslagen maken geen onderdeel uit van de hier gepresenteerde ontwerprandvoorwaarden en dienen in een latere fase van detaillering in het ontwerpproces te worden toegepast.

Rijkswaterstaat
IJsselmeergebied

Datum
4 januari 2010

5. Toeslagen

a- Toename van de waterstand op de Waddenzee als gevolg van klimaatverandering

Overeenkomstig het NWP [5] wordt voor het project Toekomst Afsluitdijk het KNMI'06 klimaatscenario W+ toegepast [6]. Afhankelijk van de planperiode leidt dit tot de volgende toeslagen op de maatgevende waterstand:

2050: 0,35 m

2100: 0,85 m

b- Toename van de getijslag als gevolg van klimaatverandering

Onder andere in het rapport 'Risico's in bedijkte termen' [7] wordt aangegeven dat de verwachting is dat als gevolg van klimaatverandering de getijslag toeneemt. Het gemiddeld hoogwater stijgt sneller dan het gemiddeld laagwater.

Als toeslag voor snellere stijging van de hoogwaterstand worden hier waarden overgenomen uit het rapport 'Omgaan met veiligheid in de toekomst' [8]:

2050: 0.04 m

2100: 0.08 m

c- Golfgedreven opzet van de waterstand

Uit recent onderzoek blijkt dat er in de Waddenzee sprake kan zijn van een golfgedreven waterstandsopzet tijdens zware stormen ('Golfgedreven opzet in de Waddenzee', Alkyon, feb 2009 [9]).

Het modelonderzoek geeft aan dat dit 25 à 35 cm zou kunnen zijn, maar ook dat de golfgedreven opzet afneemt bij grotere waterdiepte. Het rapport concludeert tevens dat meer onderzoek ten aanzien van dit aspect nodig.

In deze fase van de verkenning Toekomst Afsluitdijk zal een toeslag van 0.10 m op de maatgevende waterstand worden toegepast voor beide planperiodes.

d- Onzekerheid overschrijdingsfrequenties waterstanden Waddenzee

Het toetspeil is gebaseerd op de beste schatting van waterstands overschrijdingsfrequenties, zoals bepaald in het 'De basispeilen langs de Nederlandse kust, 1993' [12]. De curves die de overschrijdingsfrequenties beschrijven zijn onderhevig aan onzekerheid. In [4] wordt, als voorbeeld uit het rapport [12], aangegeven dat voor het Toetspeil bij Harlingen van 5 m +NAP er een onzekerheid is van 0,40 m.

Op basis van bovenstaande zou er voor gekozen kunnen worden een robuustheids toeslag hiervoor toe te passen (nader te bepalen; orde grootte 0.10 m). Tot op heden wordt een toeslag voor statistische onzekerheden landelijk echter niet toegepast. Voor de in deze memo beschreven update van ontwerprandvoorwaarden wordt deze toeslag dan ook (nog) niet toegepast.

- e- Robuustheidstoets vanwege modelonzekerheden (formuleringen, modelaansturing, parameters en schematisatie) van het SWAN golfmodel.
Ten aanzien van modelonzekerheden wordt hier een toeslag aangenomen van 10% op de golfhoogte en 10% op de golfperiode (zie brief-advies Deltares van oktober 2009 en het daarin aangehaalde onderzoek van Van der Meer [13]).
- f- Effect van verhoogde waterstand door zeespiegelstijging op de maatgevende golfhoogte

Verhoogde waterstanden als gevolg van zeespiegelstijging hebben een effect op de maatgevende golfhoogte. Als vuistregel wordt hier gehanteerd dat de golfhoogte H_s toeneemt met een factor 0.45 van de zeespiegelstijging (Addendum I bij de Leidraad Zee- en Meerdijken, Ministerie van VenW, maart 2009 [10])

5.1 Uitwerking

Ontwerpwaterstand

Als voorbeeld leiden de bovengenoemde toeslagen, voor het dijktraject km 20-25 en de planperiode tot 2100, tot het volgende Ontwerppeil:

Toetspeil-2011 + zeespiegelstijging (a) + getijslag(b) + golfgedreven opzet(c) + onzekerheid overschrijdingsfrequenties(d)

Ontwerppeil = $5.2 + 0.85 + 0.08 + 0.10 + 0.00 = 6.25$ m (afgerond)

Voor het dijktraject km 20-25 en de planperiode tot 2050, is het ontwerppeil bijvoorbeeld: $5.2 + 0.35 + 0.04 + 0.10 + 0.00 = 5.70$ m (afgerond)

Ontwerp-golfkarakteristieken

De ontwerp-golfhoogte, opnieuw als voorbeeld voor dijktraject km 20-25 en planperiode tot 2100, wordt dan als volgt bepaald:

$H_s + \text{Modelonzekerheid (e)} + \text{effect zeespiegelstijging (f)}$

$3.20 + (3.20 \cdot 0.10) + (0.45 \cdot 0.85) = 3.90$ m afgerond

Voor de ontwerp-golfperiode geldt:

$T_m - 1.0 + \text{Modelonzekerheid (e)}$

$5.60 + (5.60 \cdot 0.10) = 6.20$ s afgerond

6. Overzicht van te hanteren Ontwerprandvoorwaarden

In tabel 7 wordt het overzicht gegeven van ontwerpwaterstanden voor alle 5 dijktrajecten en voor beide planperiodes.

Dijkvak	Toetspeil-2011	Ontwerppeil-2050	Ontwerppeil-2100
km	m+NAP	m + NAP	m + NAP
Den Oever – 5	5.0	5.50	6.05
5 – 12	5.1	5.60	6.15
12 – 20	5.1	5.60	6.15
20 – 25	5.2	5.70	6.25
25 - Friesland	5.2	5.70	6.25

Tabel 4. Ontwerp peilen bij 1/10.000

Dijkvak	Hs-toets-2011	Hs-ontwerp-2050	Hs-ontwerp-2100
km	m	m	m
Den Oever – 5	2.65	3.10	3.30
5 – 12	3.10	3.55	3.80
12 – 20	3.30	3.80	4.00
20 – 25	3.20	3.70	3.90
25 - Friesland	2.55	2.95	3.20

Dijkvak	Tm-1,0-toets-2011	Tm-1,0-ontw-2050	Tm-1,0-ontw-2100
km	s	S	s
Den Oever – 5	5.5	6.05	6.05
5 – 12	5.7	6.30	6.30
12 – 20	5.9	6.50	6.50
20 – 25	5.6	6.20	6.20
25 - Friesland	5.4	5.95	5.95

Tabel 5. Ontwerp golfbrandvoorwaarden bij 1/10.000

7. Geschatte ontwerprandvoorwaarden bij andere normfrequenties

In het kader van WV21 wordt een uitgebreide normstudie uitgevoerd in combinatie met een onderzoek naar een fundamenteel andere veiligheidsbenadering. In 2011 zal hierover een principe-besluit worden genomen; formele toepassing wordt niet eerder voorzien dan in 2017.

In het rapport van de commissie Veerman wordt geadviseerd om in de toekomst scherpere normfrequenties te hanteren ('toename met een factor 10').

Vanwege deze mogelijke toekomstige wijzingen in normfrequentie en veiligheidsbenadering is het gewenst een gevoeligheidsanalyse uit te voeren van de overheidsvariant "2100- Robuust" bij een andere norm dan de vigerende 1/10.000. In deze paragraaf wordt een schatting gegeven van ontwerprand-voorwaarden voor de 'oude' norm van 1/1.430 (dwz. voor inwerkingtreding van de Wet op de waterkering, 1996) en voor een – willekeurige - scherpere norm van 1/50.000.

De nieuwste getallen voor golfrandvoorwaarden bij de norm 1/10.000 zijn bepaald met behulp van berekeningen met het SWAN/HYDRA-K instrumentarium. Voor de normen 1/1.430 en 1/50.000 zijn dergelijke model-uitkomsten nog niet beschikbaar. Voor de gevoeligheidsanalyse is er daarom voor gekozen om randvoorwaarden bij deze andere normen te schatten met behulp van beschikbare rapporten en betrekkinglijnen.

Rijkswaterstaat
IJsselmeergebied

Datum
4 januari 2010

7.1 Ontwerprandvoorwaarden bij de normfrequentie 1/1.430

In "HR Afsluitdijk" [11, Deltares, 2004] wordt – voor toetsomstandigheden en op basis van de toenmalige inzichten rondom golfrandvoorwaarden – een inzicht gegeven in de verschillen in toetspeil en in golfrandvoorwaarden bij zowel een norm van 1/1.430 als 1/10.000.

Hieruit volgt dat bij 1/1.430 het Toetspeil 0.35 m lager is dan bij 1/10.000. De toets-golfhoogte H_s is 0.20 m lager en de toets-golfperiode T_p is 0.15 s lager.

Deze verschillen worden afgetrokken van de meest recente inzichten in Toets- en ontwerprandvoorwaarden voor de norm 1/10.000 (zie tabel 4 en 5) en leveren zo randvoorwaarden op bij de norm 1/1.430.

Er is voor gekozen om het verschil in golfperiode van 0.15 s – bepaald voor de parameter T_p – hier ook toe te passen op de in 4 gebruikte parameter $T_{m-1,0}$.

Dijkvak	Toetspeil-2011	Ontwerppeil-2050	Ontwerppeil-2100
km	m+NAP	m + NAP	m + NAP
Den Oever – 5	4.65	5.15	5.70
5 – 12	4.75	5.25	5.80
12 – 20	4.75	5.25	5.80
20 – 25	4.85	5.35	5.90
25 - Friesland	4.85	5.35	5.90

Tabel 7. Toetspeil-2011 en Ontwerp peilen bij 1/1.430

Dijkvak	Hs-toets-2011	Hs-ontwerp-2050	Hs-ontwerp-2100
km	m	m	m
Den Oever – 5	2.45	2.85	3.10
5 – 12	2.90	3.35	3.60
12 – 20	3.10	3.55	3.80
20 – 25	3.00	3.45	3.70
25 - Friesland	2.35	2.75	3.00

Dijkvak	$T_{m-1,0}$ -toets-2011	$T_{m-1,0}$ -ontw-2050	$T_{m-1,0}$ -ontw-2100
km	s	s	s
Den Oever – 5	5.35	5.90	5.90
5 – 12	5.55	6.10	6.10
12 – 20	5.75	6.35	6.35
20 – 25	5.45	6.00	6.00
25 - Friesland	5.25	5.80	5.80

Tabel 8. Ontwerp golfrandvoorwaarden bij 1/1.430

7.2 Ontwerprandvoorwaarden bij de normfrequentie 1/50.000

Uit de overschrijdingsfrequenties voor waterstandsregistraties nabij de Afsluitdijk kan worden afgeleid dat de decimeringshoogte ongeveer 0.50 m bedraagt. (Bron: Waternormalen, Slotgemiddelden 1990.0)

Bij aanscherping van de huidige norm van 1/10.000 met een factor 5 naar 1/50.000 neemt de waterstand dan met ruim 0.35 m toe. Deze toename wordt hier zowel bij het Toetspeil-2011 als bij de ontwerppeilen uit tabel 4 opgeteld.

Voor de golfhoogte H_s en –periode $T_m-1,0$ wordt een toename van 0,2 m, respectievelijk 0,15 s aangenomen ten opzichte van de 1/10.000-waarden.

Dijkvak	Toetspeil-2011	Ontwerppeil-2050	Ontwerppeil-2100
km	m+NAP	m + NAP	m + NAP
Den Oever – 5	5.35	5.85	6.40
5 – 12	5.45	5.95	6.50
12 – 20	5.45	5.95	6.50
20 – 25	5.55	6.05	6.60
25 - Friesland	5.55	6.05	6.60

Tabel 9. Toetspeil-2011 en Ontwerp peilen bij 1/50.000

Dijkvak	Hs-toets-2011	Hs-ontwerp-2050	Hs-ontwerp-2100
km	m	m	m
Den Oever – 5	2.85	3.30	3.50
5 – 12	3.30	3.80	4.05
12 – 20	3.50	4.00	4.25
20 – 25	3.40	3.90	4.15
25 - Friesland	2.75	3.20	3.40

Dijkvak	$T_m-1,0$ -toets-2011	$T_m-1,0$ -ontw-2050	$T_m-1,0$ -ontw-2100
km	s	s	s
Den Oever – 5	5.65	6.20	6.20
5 – 12	5.85	6.45	6.45
12 – 20	6.05	6.65	6.65
20 – 25	5.75	6.35	6.35
25 - Friesland	5.55	6.10	6.10

Tabel 10. Ontwerp golfrandvoorwaarden bij 1/50.000

Referenties

Datum
4 januari 2010

- [1] Dijk en Meer, Rijkswaterstaat, Provincies Friesland en Noord-Holland, maart 2009
- [2] HR2006, Ministerie van VenW, 2006
- [3] Hydraulische randvoorwaarden voor het ontwerp van een nieuw spuicompex in de Afsluitdijk; Rijkswaterstaat, 2007
- [4] Hydraulische belastingen Afsluitdijk, J.V.L. Beckers, Deltares 2009
- [5] NWP, Ministerie van VenW e.a., december 2009
- [6] KNMI'06 scenario's, KNMI, augustus 2006
- [7] Risico's in bedijkte termen, RIVM, mei 2004.
- [8] Omgaan met veiligheid in de toekomst, Rijkswaterstaat, 2001
- [9] Brief Deltares aan Waterdienst, 27 november 2009
- [10] Addendum I bij de Leidraad Zee- en Meerdijken, Ministerie van VenW, maart 2009
- [11] HR Afsluitdijk, Deltares, 2004]
- [12] De basispeilen langs de Nederlandse kust, Rijkswaterstaat RIKZ, 1993
- [13] Advies aangaande de te hanteren hydraulische randvoorwaarden in het Waddenzeegebied, Brief-advies Deltares aan Waterdienst, 16 oktober 2009 .

Bijlage 5B

Memo

Aan
Bernadette Wichman

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
15 januari 2010	1201757-000-GEO-0009	3
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Reimer de Graaff	(088) 33 58 321	reimer.degraaff@deltares.nl

Onderwerp
Ontwerprandvoorwaarden Toekomst Afsluitdijk

Review van memo “*Ontwerprandvoorwaarden toekomst Afsluitdijk*”

Inleiding

Deltares zoekt in opdracht van RWS een aantal onderzoeksvragen uit in het kader van het project ‘Verkenning Toekomst Afsluitdijk’ (ref.: Deltares offerte 1201757-000-GEO-0003, 28 december 2009).

Eén van de onderzoeksvragen betreft het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse van de overheidsreferentie van de variant “2100-Robuust”, bij variatie van de veiligheidsnorm en toegepaste randvoorwaarden. Bernadette Wichman, die deze onderzoeksvraag uitwerkt, vroeg om een korte review van de door Eric Regeling (RWS) opgestelde memo “Ontwerprandvoorwaarden toekomst Afsluitdijk” (OntwerpHR-Adijk-TA2010-def.doc, email E. Regeling aan B. Wichman, datum 8-1-2010).

De review is uitgevoerd door Reimer de Graaff. Tevens heeft Jacco Groeneweg de memo bekeken en achtergrondrapporten beschikbaar gesteld. Hieronder worden de bevindingen van de review beschreven.

Bevindingen review

Hoofdstuk 1

geen commentaar

Hoofdstuk 2

1. De uitgangswaarden zoals gegeven in tabellen 1 en 2 komen overeen met de vermelde bronnen.

Hoofdstuk 3

2. De uitgangswaarden zoals gegeven in tabel 3 (excl. 10% verhoging van H_s en $T_{m-1,0}$) komen overeen met de vermelde bronnen.

Hoofdstuk 4 & 5

3. De lijst met *toeslagen* (a-f) lijkt grotendeels compleet te zijn, waarbij de volgende opmerkingen zijn te maken:
4. *toeslag a*: KNMI'06 klimaatscenario W+ geeft de volgende schattingen:
2050: 20 – 35cm
2100: 40 – 85cm

In de memo wordt de bovenwaarde (resp. 35 en 85cm) als toeslag genomen in plaats van een gemiddelde schatting. Dit is een ontwerpkeuze.

5. *toeslag c*: indien je golfgedreven opzet meeneemt als toeslag, zou je in principe ook het effect van stroming mee moeten nemen (wat vermoedelijk een reducerend effect op je waterstandtoeslag zal hebben).
6. *toeslag e*: voor de duidelijkheid zou het goed zijn te vermelden dat de in tabel 3 gebruikte correctie is om te corrigeren voor de systematische afwijking van gemiddeld (over locaties) 10%. De toeslag onder e heeft te maken met modelonzekerheden (scatter). Laatstgenoemde is echt een toeslag en dus altijd positief. Dit is bij toeval gelijk aan de systematische afwijking.
7. *toeslag f*: bij een toename van de golfhoogte als gevolg van zeespiegelstijging kan er vanuit worden gegaan dat ook de golfperiode ($T_{m-1,0}$) toeneemt. Deze toename wordt in de memo wel meegenomen (zie opmerking 8), maar dan onder de mom van modelonzekerheden (toeslag e).

Hoofdstuk 6

8. De gegeven $T_{m-1,0}$ in Tabel 5 (en eveneens in Tabellen 8 en 10) voor planperiodes 2050 en 2100 zijn gelijk in plaats van oplopend (zie opmerking 7). Het is niet duidelijk of dit een foutieve invulling is of een ontwerpkeuze. De 10% verhoging (van 2011 naar 2100) van de $T_{m-1,0}$ als gevolg van modelonzekerheden (toeslag e) is echter van dezelfde orde als wanneer er wordt uitgegaan van de aanname dat bij toename van de waterstand en golfhoogte, de golfsteilheid gelijk blijft. Dan geldt:

$$T_{m-1,0} (2100) = T_{m-1,0} (2011) \cdot \sqrt{\frac{H_s (2100)}{H_s (2011)}}$$

Deze benadering zou ook kunnen worden toegepast om de $T_{m-1,0}$ voor planperiode 2050 af te schatten.

Hoofdstuk 7

9. De correcties voor H_s en $T_{m-1,0}$ voor planperiodes 2050 en 2100 zijn niet altijd correct uitgevoerd in Tabellen 8 en 10 (fouten van resp. 0.05m en 0.05s).
10. Het is niet duidelijk waar de toename van H_s en $T_{m-1,0}$ van 1/10.000 naar 1/50.000 op is gebaseerd, al lijkt een log-lineaire extrapolatie te zijn toegepast. Een indicatieve schatting op basis van een GEV verdeling (en de afgeronde waarden zoals gegeven in de tabellen) geeft min of meer vergelijkbare waarden.

Samenvatting

De belangrijkste bevindingen van de review van de memo "Ontwerprandvoorwaarden toekomst Afsluitdijk" zijn als volgt samen te vatten:

- o Uitgangswaarden zijn in overeenstemming met de gegeven bronnen.
- o De gegeven $T_{m-1,0}$ in Tabel 5 (en eveneens in Tabellen 8 en 10) voor planperiodes 2050 en 2100 zijn gelijk in plaats van oplopend.
- o De correcties voor H_s en $T_{m-1,0}$ voor planperiodes 2050 en 2100 zijn niet altijd correct uitgevoerd in Tabellen 8 en 10.
- o Voor de beoogde doeleinden zijn de in genoemde memo aangegeven ontwerprandvoorwaarden voldoende conservatief en bruikbaar.

Datum
15 januari 2010

Ons kenmerk
1201757-000-GEO-0009

Pagina
3/3

Kopie aan
Jacco Groeneweg

Bijlage 5C

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
Dijkvak	3,5 tot 4,0	4,0 tot 4,4	4,4 tot 5,1	5,1 tot 5,4	5,4 tot 8,25	8,25-15,2	15,2-15,75	15,75-17,2	17,2-18,5	18,5-21,1	21,1-21,9	21,9-23,1	23,1-23,9	23,9-25,7	25,7-26,1
Type	AD3	AD4	AD1	AD1	AD1	AD1	AD4	AD2	AD3	AD2	AD4	AD2	AD2	AD4	AD5
NAP +10 m							Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand							
NAP +7,5 m	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Zand, matig tot	Zand, matig tot	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand	Top dijklichaam, klei/zand
NAP +5,0 m	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes
NAP + 2,5 m															
NAP 0.0m							Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig								
NAP -2,5 m							Klei, matig vast, siltig, licht humeus zandig	Klei, matig vast, siltig, licht humeus zandig							
NAP - 5m		Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes									
NAP - 7,5 m	Klei, matig vast, zwak zandig met lokaal zandlaagjes		Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig met lokaal kleilaagjes	Klei, matig vast, siltig, licht humeus zandig			Klei, matig vast, siltig, licht humeus zandig	Klei, matig vast, siltig, licht humeus zandig		Maximaal verkende diepte	Klei, matig vast, siltig, licht humeus zandig	Zand, matig tot fijn, licht siltig, kleiig lokaal kleilaagjes
NAP -10 m															

Bijlage 5C: 15 deterministische bodemopbouwen (zie Fugro 2008)

Bijlage 5D

Bijlage 5D. Berekeningen in jaar 2100:

Dijkvak km	Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 1430			
	Ontwerppeil-2100 m + NAP	Hs-ontwerp-2100 m	Tm-1,0-ontw-2100 s	
D		5,7	3,1	5,9
E		5,8	3,6	6,1
G		5,8	3,8	6,35
I		5,9	3,7	6
M		5,9	3	5,8

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 10.000			
Ontwerppeil-2100 m + NAP	Hs-ontwerp-2100 m	Tm-1,0-ontw-2100 s	
	6,05	3,3	6,05
	6,15	3,8	6,3
	6,15	4	6,5
	6,25	3,9	6,2
	6,25	3,2	5,95

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 50.000			
Ontwerppeil-2100 m + NAP	Hs-ontwerp-2100 m	Tm-1,0-ontw-2100 s	
	6,4	3,5	6,2
	6,5	4,05	6,45
	6,5	4,25	6,65
	6,6	4,15	6,35
	6,6	3,4	6,1

Dwarsprofiel	Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 1430 jaar 2100			
	Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
D	5	5,7	9,2	
E	5	5,8	9,8	
G	7	5,8	10,0	
I	5	5,9	9,9	
M	5	5,9	9,2	

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 10.000 jaar 2100			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
5	6,05	9,9	
10	6,15	10,0	
10	6,15	10,3	
10	6,25	10,1	
5	6,25	9,8	

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 50.000 jaar 2100			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
10	6,4	10,0	
10	6,5	10,7	
10	6,5	11,1	
10	6,6	10,8	
9	6,6	10,0	

Berekeningen in jaar 2050:

Dijkvak km	Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 1430			
	Ontwerppeil-2050 m + NAP	Hs-ontwerp-2050 m	Tm-1,0-ontw-2050 s	
G		5,25	3,55	6,35
Dwarsprofiel	Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 1430 jaar 2050			
	Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
G	5	5,25	9,4	

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 10.000			
Ontwerppeil-2050 m + NAP	Hs-ontwerp-2050 m	Tm-1,0-ontw-2050 s	
	5,6	3,8	6,5
Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 10.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
6	5,6	10	

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 50.000			
Ontwerppeil-2050 m + NAP	Hs-ontwerp-2050 m	Tm-1,0-ontw-2050 s	
	5,95	4	6,65
Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 50.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
10	5,95	10,3	

Dwarsprofiel I met rww van G	Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 1430 jaar 2050			
	Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
	5	5,25	9,3	

Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 10.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
5	5,6	9,9	

Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 50.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
10	5,95	10,2	

Verlaging van Tm-1,0 met 0,2 sec:

Dijkvak km	Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 1430			
	Ontwerppeil-2050 m + NAP	Hs-ontwerp-2050 m	Tm-1,0-ontw-2050 s	
G		5,25	3,55	6,15
Dwarsprofiel	Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 1430 jaar 2050			
	Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
G	5	5,25	9,3	

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 10.000			
Ontwerppeil-2050 m + NAP	Hs-ontwerp-2050 m	Tm-1,0-ontw-2050 s	
	5,6	3,8	6,3
Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 10.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
5	5,6	10	

Afsluitdijk ontwerpfrequentie 1 / 50.000			
Ontwerppeil-2050 m + NAP	Hs-ontwerp-2050 m	Tm-1,0-ontw-2050 s	
	5,95	4	6,45
Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 50.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
10	5,95	10,1	

Dwarsprofiel I met rww van G	Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 1430 jaar 2050			
	Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
	5	5,25	9,2	

Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 10.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
5	5,6	9,8	

Resultaten ontwerpfrequentie 1 / 50.000 jaar 2050			
Bermbreedte	Bermhoogte (midden)	maatgevende kruinhoogte (10 liter)	
10	5,95	10,1	

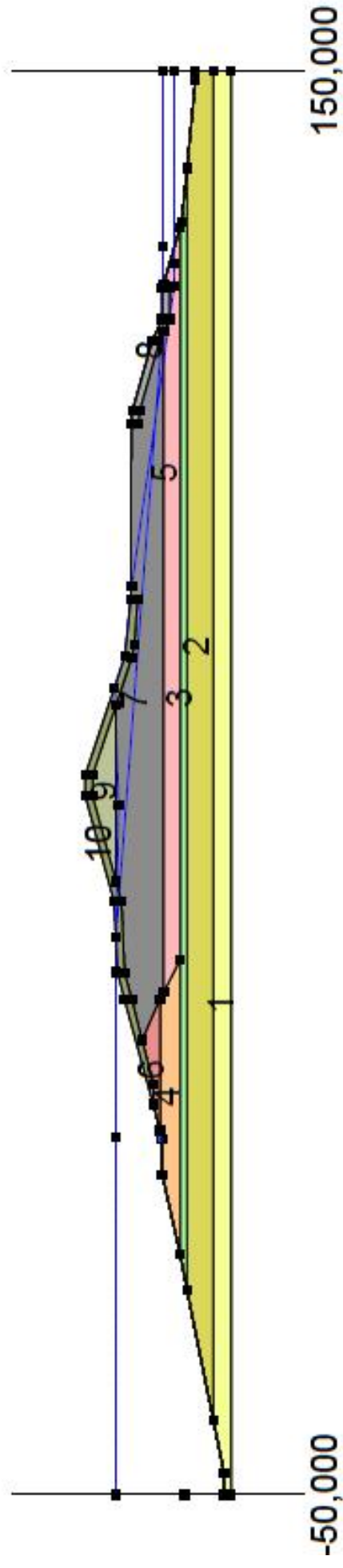
Bijlage 5E

Bijlage 5F

Layers

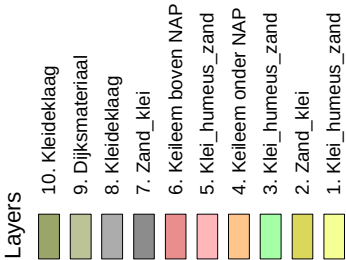
- 10. Kleideklaag
- 9. Dijksmateriaal
- 8. Kleideklaag
- 7. Zand_klei
- 6. Keileem boven NAP
- 5. Klei_humeus_zand
- 4. Keileem onder NAP
- 3. Klei_humeus_zand
- 2. Zand_klei
- 1. Klei_humeus_zand

Representatief profiel I, voor dijksectie 12-20 km, met grondopbouw D7 (normfrequentie 1/10.000, planperiode 2100)



Bijlage 5G

Critical Circle Bishop



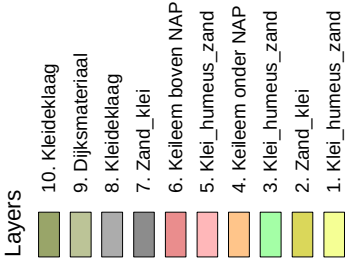
Xm : 66,72 [m]
Ym : 27,04 [m]

MStab 9.10 : Sectie I_D7_binnen tuimel.st

Deltares	Stieltjesweg 2 2628 CK Delft	Phone Fax	+31-15-2693500 +31-15-2610821	date 5-2-2010	drw. -
	File created by MStab Batch Plugin as part of a batch run			-	ctr.
Annex -				form. A4	

Bijlage 5H

Critical Circle Bishop



Radius : 23,27 [m]
Safety : 1,84

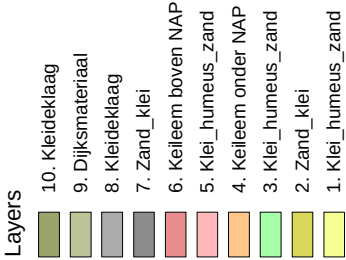
Xm : 5,81 [m]
Ym : 19,90 [m]

MStab 9.10 : Sectie I_D7_buiten.sti

 Stieltjesweg 2 2628 CK Delft Phone +31-15-2693500 Fax +31-15-2610821	date	drw.
	5-2-2010	-
	File created by MStab Batch Plugin as part of a batch run	ctr.
	Annex -	form. A4

Bijlage 5I

Critical Circle Bishop



Radius : 24,27 [m]
Safety : 1,48

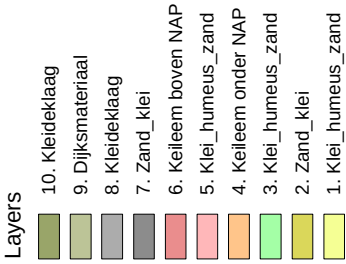
Xm : 116,33 [m]
Ym : 20,90 [m]

MStab 9.10 : Sectie I_D7_binnen kreukel.sti

 Stelljesweg 2 2628 CK Delft Phone +31-15-2693500 Fax +31-15-2610821	5-2-2010		chr.
	File created by MStab Batch Plugin		ctr.
	as part of a batch run		form.
	Annex	-	A4

Bijlage 5J

Critical Circle Bishop



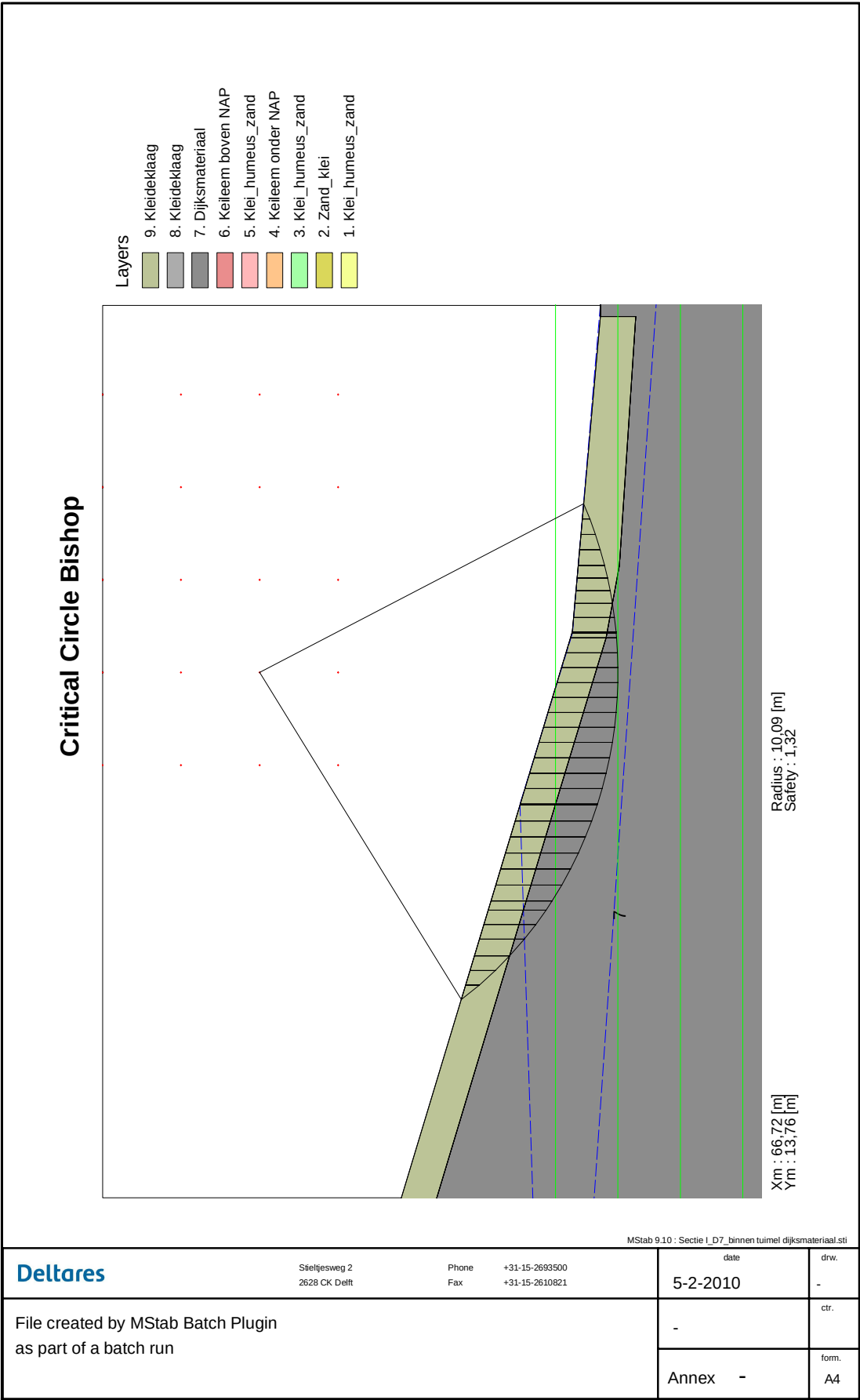
Radius : 24,27 [m]
Safety : 1,35

Xm : 116,33 [m]
Ym : 20,90 [m]

MStab 9.10 : Sectie I_D7_binnen kreukel c aangepast.stb

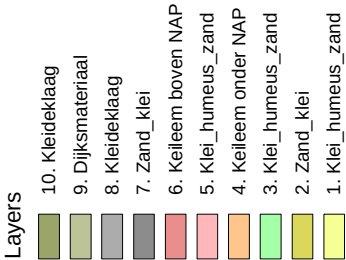
 Stieltjesweg 2 2628 CK Delft Phone Fax +31-15-2693500 +31-15-2610821	date	drw.
	5-2-2010	-
	File created by MStab Batch Plugin as part of a batch run	ctr.
	Annex -	form. A4

Bijlage 5K



Bijlage 5L

Critical Circle Bishop



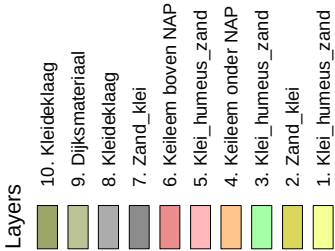
Radius : 21,54 [m]
Safety : 1,71

MStab 9.10 : Sectie I_D7_buiten c aangepast.st

Deltares	Stieltjesweg 2 2628 CK Delft	Phone Fax	+31-15-2693500 +31-15-2610821	date 5-2-2010	drw. -
	File created by MStab Batch Plugin as part of a batch run			-	ctr.
Annex -				form. A4	

Bijlage 5M

Critical Circle Bishop



Radius : 23,83 [m]
Safety : 1,84

Xm : 64,36 [m]
Ym : 29,26 [m]

MStab 9.10 : Sectie I_D7_binnen tuimel_lagefreatlijn.sti

Deltares

Stieltjesweg 2
2628 CK Delft

Phone +31-15-2693500
Fax +31-15-2610821

date
9-2-2010

drw.

File created by MStab Batch Plugin
as part of a batch run

—

ctr.

Annex

A4

Bijlage 6 Betrokkenen bij het project

De onderzoeksvragen bestrijken meerdere disciplines. De werkzaamheden zijn binnen Deltares dan ook uitgevoerd door een team van mensen.

Locatie Blue Energie Centrale

- Bas van Vossen;
- Arnout Bijlsma;
- Herman Gerritsen;
- Ivo Pothof;
- Zheng Wang;
- Bas van Maren;
- Luca van Duuren;
- Mindert de Vries;
- Valesca Harezlak;
- Reimer de Graaff dr. B.G.H.M. Wichman (review).

Geotechnische haalbaarheid valmeer

- Bernadette Wichman;
- Ad Verweij;
- Frits van Tol;
- Jan Blinde;
- John Lambert (review).

Review van een getijdenbekken

- Cilia Swinkels;
- Anton Heinsbroek;
- Tom Jongeling;
- Rob de Jong (review).

Schaalgrootte van ecologische verbeteringen

- Miguel Dionisio Pires;
- Leon van Kouwen;
- Victor Langenberg;
- Bregje van Wesenbeeck;
- Harm Duel (review).

Gevoeligheidsanalyse overheidsreferenties

- Bernadette Wichman;
- Gerard Kruse;
- Han Knoeff;
- Hans Venema;
- Irene van de Zwan;
- Andre van Hoven;
- Arno Rozing (review).

De overall projectleiding lag bij Gerard van Meurs.