

**Ontwerpcriteria voor de
Vismigratierivier Afsluitdijk
voor water- en zouttransport,
morfologie en sedimentatie**



Ontwerpcriteria voor de Vismigratierivier Afsluitdijk voor water- en zouttransport, morfologie en sedimentatie

drs. A.J. Nolte
ir. C.M. Wesselius
ir. T. van der Kaaij

1209181-000

Titel

Ontwerpcriteria voor de Vismigratierivier Afsluitdijk voor water- en zouttransport, morfologie en sedimentatie

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Dienst Landelijk Gebied	1209181-000	1209181-000-ZKS-0007	79

Trefwoorden

Vismigratie, Waddenzee, IJsselmeer, Afsluitdijk, SOBEK, Delft3D-FLOW, zouttransport.

Samenvatting

Voor het verbeteren van de vismigratie tussen Waddenzee en IJsselmeer wordt de vismigratierivier onderzocht. De vismigratierivier bij het sluiscomplex Kornwerderzand bestaat uit een doorgang door de Afsluitdijk en een traject aan de Waddenzeezijde en de IJsselmeerszijde. Om het waterbeheer te reguleren en een zoutlast naar het IJsselmeer te voorkomen wordt sturing aangebracht. Voor het hydraulisch ontwerp van de vismigratierivier gelden de volgende functionele eisen: a) maximale lokstroom, b) maximale openingsduur kunstwerken, c) gunstige stroomsnelheid voor vissoorten, d) geen transport van zout naar het IJsselmeer, e) minimaal baggeronderhoud of herstel van het bodemprofiel, f) brakwaterzone, g) intergetijdengebied.

In twee iteratieslagen is het conceptueel hydraulisch ontwerp van de vismigratierivier onderzocht. De 1^e iteratieslag is vooral gericht op het voorkomen van zoutlekkage naar het IJsselmeer. De 2^e iteratieslag is vervolgens gericht op andere eisen, in het bijzonder een gunstige stroomsnelheid door middel van een extra vertical slots passage en de inzet van een afsluiter aan de IJsselmeeropening ten behoeve van intergetijdengebied. De kentallen van de onderzochte varianten zijn opgenomen in Tabel 3.2, Tabel 3.8-3.10 en Tabel 4.3. Inzet van een 3D model is cruciaal gebleken vanwege het belang van gelaagde dichtheidsstroming.

Geconcludeerd wordt dat het ontwerp van de vismigratierivier een aanzienlijk aantal vrijheidsgraden bevat. Het is daardoor mogelijk om de vismigratierivier hydraulisch zo te ontwerpen dat op enige wijze aan alle functionele eisen voldaan wordt. Echter omdat keuzes in het hydraulisch ontwerp tegelijkertijd voor de ene functionele eis gunstig en voor de andere functionele eis ongunstig zijn, is het niet mogelijk om voor alle functionele eisen het maximale te bereiken. Met name een brakwaterzone is moeilijk te realiseren. Er zal een afweging en balans tussen de verschillende eisen gevonden moeten worden. Er zijn voldoende vrijheidsgraden (sturingsknoppen) om dat te realiseren, maar door het grote aantal variaties en combinaties is vooraf geen definitief conceptueel ontwerp te bepalen. Aanbevolen wordt om operationele sturing van de vismigratierivier te ontwikkelen en in de praktijk (dat wil zeggen na aanleg) in te regelen.

Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0	maart 2014	drs. A.J. Nolte		-		-	
		ir. C.M. Wesselius					
		ir. T. van der Kaaij					
def	juli 2014	drs. A.J. Nolte	AV	dr. ir. R.E.	AM	drs. F.M.J.	
		ir. C.M. Wesselius		Uittenbogaard		Hoozemans	
		ir. T. van der Kaaij					

Status

definitief

Inhoud

Lijst met Figuren	iii
1 Inleiding	1
1.1 Algemeen	1
1.2 Doelstelling	2
1.3 Aanpak	3
1.4 Iteratief proces met voortschrijdend inzicht	4
1.5 Leeswijzer	4
2 Waterbeweging- en zoutmodellering Vismigratierivier	5
2.1 Algemeen: Dichtheidsgedreven stroming	5
2.2 Parameters voor hydrodynamische definitie van een variant (1 ^e iteratie)	5
2.3 Opzet schematisatie basisvariant (1 ^e iteratie)	6
2.3.1 Geometrie	7
2.3.2 Koker Afsluitdijk	7
2.3.3 Afsluiting IJsselmeerzijde	7
2.3.4 Randvoorwaarden	8
2.3.5 Bodemruwheid vismigratierivier	9
2.3.6 Simulatieperiode	9
2.4 De basisvariant in SOBEK (1D)	9
2.4.1 Model specifieke parameters	9
2.4.2 1D berekeningsresultaten basisvariant	10
2.5 De basisvariant in Delft3D-FLOW (3D)	12
2.5.1 Model specifieke parameters	13
2.5.2 3D Berekeningsresultaten basisvariant	14
2.6 Vergelijking 1D en 3D modelering	18
2.6.1 Vergelijking basisvariant en kalibratie 1D model op basis van 3D model	18
2.6.2 Definitie kentallen voor vergelijking varianten	20
2.6.3 Validatie vergelijkbaarheid 1D model en 3D model	20
3 Eerste iteratie: scenario's water- en zouttransport	23
3.1 Varianten met het 1D model	23
3.1.1 Algemeen	23
3.1.2 Effect van dwarsprofiel IJsselmeerzijde (bij een 20 m ² koker)	24
3.1.3 Effect van grootte van de koker (1D varianten 1A, 1A_1 en 1A_11)	25
3.1.4 Effect van openingsduur (varianten 1A, 1A_7 en 1A_8)	26
3.1.5 Effect van intergetijdengebied (varianten 1A, 2B)	26
3.1.6 Effect van ruwheid (varianten 1A, 1A_11, 1A_12)	27
3.2 Extra verificatie met het 3D model	27
3.2.1 Effect van dwarsprofiel IJsselmeerzijde	28
3.2.2 Effect van grotere koker	29
3.2.3 Effect van onderkant koker (3D varianten 0 en 0_14)	29
4 Tweede iteratie: scenario's water- en zouttransport	31
4.1 Inleiding	31
4.2 Modelresultaten 2 ^e iteratie	34
4.2.1 Effect van de kortere, ondiepere herziene basisvariant	35

4.2.2	Effect van niet-verdronken koker (Variant B)	37
4.2.3	Effect van vertical slots passage (Variant C)	37
4.2.4	Effect van kortere openingstijd (Varianten D en E)	37
4.2.5	Effect van een afsluiter aan de IJsselmeerzijde (Variant F)	38
4.2.6	Effect van zoutgehalte aan de Waddenzeezijde (Variant G)	39
4.3	Algemene conclusies 2 ^e iteratie	40
5	Sedimentatie en morfologie	41
5.1	Sedimentatie	41
5.1.1	Slibaanvoer: maximaal potentieel voor aanslibbing	41
5.1.2	Percentage bezinking	41
5.1.3	Opwerveling	42
5.1.4	Conclusie	42
5.2	Morfologie	42
5.2.1	Mogelijke consequenties aan de Waddenzeezijde.	42
5.2.2	Mogelijke consequenties aan de IJsselmeerzeezijde.	44
6	Ontwerpcriteria voor de vismigratierivier	47
6.1	Functionele wensen en ontwerpvariabelen	47
6.2	Ontwerpvariabele(n) per functionele eis (kwalitatieve evaluatie)	47
6.3	Integrale afweging van ontwerpvariabelen (kwantitatieve evaluatie)	50
6.4	Overwegingen en aanbevelingen	53
7	Referenties	55
	Bijlage(n)	
A	Beschrijving varianten als startpunt voor de studie	A-1

Lijst met Figuren

Figuur 1.1	Schetsen van de varianten van de vismigratierivier die in de MER studie worden meegenomen.....	2
Figuur 1.2	Overzicht van de stappen in het onderzoek.....	3
Figuur 2.1	Schematische weergave van een gestratificeerde toestand	5
Figuur 2.2	Als randvoorwaarde gezette waterstanden van meetlocatie Kornwerderzand, waar “binnen” de IJsselmeerzijde en “buiten” de Waddenzeezijde betekent. Bron: Waterbase (2012)	8
Figuur 2.3	Waterstanden bij de Afsluitdijk ter plaatse van de koker, zowel aan de Waddenzeekant als aan de IJsselmeerkant	10
Figuur 2.4	Debiet door de koker in de basisvariant.....	11
Figuur 2.5	Berekende saliniteit (psu) in het lengteprofiel van de vismigratierivier. De afstand wordt gerekend vanaf de opening aan de Waddenzeezijde (0 m) tot aan opening aan de IJsselmeerzijde (7000 m). De koker door de Afsluitdijk bevindt zich op 1000 m	12
Figuur 2.6	Waterstanden bij de Afsluitdijk ter plaatse van de koker, zowel aan de Waddenzeekant als aan de IJsselmeerkant	14
Figuur 2.7	Debiet door de koker	15
Figuur 2.8	Zoutindringing in de basisvariant aan het eind van de vloedperiode.....	16
Figuur 2.9	Zoutindringing in de basisvariant aan het eind van de ebperiode	17
Figuur 2.10	Horizontaal langsprofiel van maximale dieptegemiddelde saliniteit (psu) tijdens de simulatieperiode	18
Figuur 2.11	Vergelijking van verschillende dispersiecoëfficiënten in 1D SOBEK met Delft3D-FLOW voor de basisvariant.....	19
Figuur 2.12	Vergelijking van maximale zoutindringingslengte voor verschillende 1D en 3D modelberekeningen.....	22
Figuur 3.1	Relatie tussen oppervlak van het dwarsprofiel aan de IJsselmeerzijde en de maximale zoutindringingslengte in het 1D model	25
Figuur 3.2	Relatie tussen oppervlak van het dwarsprofiel aan de IJsselmeerzijde en de maximale zoutindringingslengte in het 1D model en in het 3D model.....	29
Figuur 4.1	Schets van de verbinding door de Afsluitdijk met naast twee grote kokers een derde koker voorzien van vertical slots (uit Grontmij presentatie op 2 ^e schetsdag 16 april 2014).....	31
Figuur 4.2	Verticaal profiel van saliniteit in de vismigratierivier (op 500 m van de Afsluitdijk) voor de herziene basisvariant. Boven: tijdserie; Onder: verticale profielen gedurende twee getijcycli	36
Figuur 4.3	Berekende waterstand voor Variant C met vertical slots en Variant F met een afsluiter aan de IJsselmeerzijde. Let op dat er geen intergetijdengebied in de	

	berekening is meegenomen. Door het grote oppervlak van het intergetijdengebied zal de waterstand aanzienlijk minder snel oplopen	38
Figuur 4.4	Verticaal profiel van saliniteit in de vismigratierivier (op 500 m van de Afsluitdijk) voor de herziene basisvariant met vertical slots passage zonder instroom via de grote koker en met een afsluiter aan de IJsselmeerzijde (Variant F). Boven: tijdserie; Onder: verticale profielen gedurende twee getijcycli	39
Figuur 5.1	Onderzoeksgebied bij Kornwerderzand met de Afsluitdijk, de Lorentzsluizen, bestaande uit een stelsel van spuisluizen en schutsluizen, de meetlocaties "Kornwerderzand" en een SOBEK-schematisatie van de vismigratierivier. (Uit Deltares, 2012)	43
Figuur 5.2	Morfologische ligging van de Waddenzeezijde (vaklodingen 2009,2003,1997,1991 en 1981) en de morfologische veranderingen tussen 2009 en 2003 (Blauw is erosie, rood is sedimentatie)	45
Figuur 6.1	Toetsing van varianten aan de ontwerpcriteria	52

1 Inleiding

1.1 Algemeen

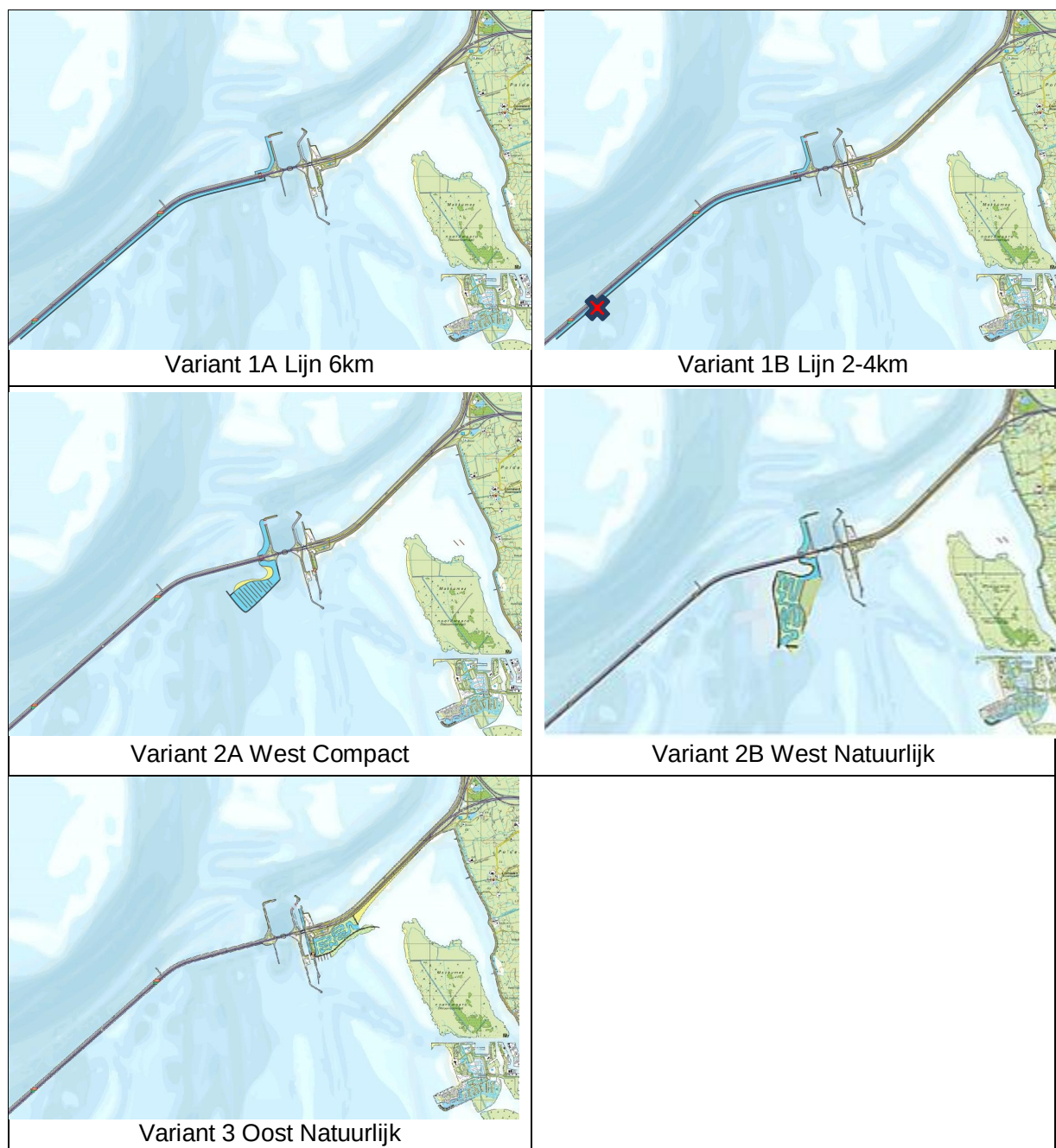
Voor het verbeteren van de vismigratie tussen de Waddenzee en het IJsselmeer wordt het ontwerp van de vismigratierivier onderzocht. De vismigratierivier wordt voorzien bij het sluiscomplex Kornwerderzand en bestaat uit een doorgang door de Afsluitdijk en een traject aan zowel de Waddenzeezijde als de IJsselmeerzijde. Om het waterbeheer te reguleren en een zoutlast naar het IJsselmeer te voorkomen worden sturingswerken aangebracht. Tenslotte kunnen de trajecten aan weerszijden ingericht worden voor natuurlijke, recreatieve en educatieve doelen.

In opdracht van Linkit Consult heeft Deltares in 2012 de hydraulische haalbaarheid en hydraulische effectiviteit van de vismigratierivier onderzocht (Deltares, 2012). Door gebruik te maken van een 1D SOBEK model zijn het waterstandsverloop, de zoet-zoutgradiënt, de stroomsnelheden en het netto debiet (lokstroom) voor verschillende varianten berekend. Een belangrijke uitkomst was de openstellingsduur van de kunstwerken, welke een indicatie geeft voor hoeveel tijd vissen de rivier voor migratie kunnen gebruiken. Een indicatieve berekening met een 3D hydrodynamisch model heeft laten zien dat de waterkolom niet (permanent) verticaal gemengd zal zijn. Dichtheidsstroming van het zoute(re) water onder het zoete(re) water zorgt voor zouttransport richting het IJsselmeer, waar bij het ontwerp van de vismigratierivier rekening gehouden moet worden.

Begin 2013 is het rapport Haalbaarheid en Projectplan verschenen (Programma Naar een Rijke Waddenzee, 2013). In vervolg op dit rapport is een Notitie Reikwijdte en Detailniveau opgesteld (Witteveen+Bos en Altenburg & Wymenga, 2014). Hierin zijn onder andere een 0-variant en 3 planvarianten geïdentificeerd. Deze varianten zijn nu onderwerp van diverse verdiepende studies en een milieueffectrapportage, uitmondend in een voorkeursvariant waarover in september 2014 bestuurlijke besluitvorming plaatsvindt. Vervolgens zal deze variant verder uitgewerkt worden.

Een beschrijving van de varianten die als startpunt van deze studie heeft gediend, is opgenomen in bijlage A. Ten opzichte van de Notitie Reikwijdte en Detailniveau zijn er kleine verschillen. Figuur 1.1 bevat de impressie van de varianten:

1. Vismigratierivier Lijnvormig
 - 1.A Vismigratierivier Lijn 6 km
 - 1.B Vismigratierivier Lijn 2-4 km
2. Vismigratierivier West
 - 2.A Vismigratierivier West Compact
 - 2.B Vismigratierivier West Natuurlijk
3. Vismigratierivier Oost Natuurlijk



Figuur 1.1 Schetsen van de varianten van de vismigratierivier die in de MER studie worden meegenomen

1.2 Doelstelling

Dit onderzoek heeft tot doel conceptuele ontwerpcriteria voor de vismigratierivier op te stellen voor water- en zouttransport, morfologie en sedimentatie. De voor deze aspecten relevante criteria zijn:

- Zo groot mogelijke lokstroom naar de Waddenzee (minimaal $10 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Zo lang mogelijke openingsduur van de kunstwerken.
- Voldoende lange periode van gunstige stroomsnelheid (maximaal $0,5 \text{ m/s}$) voor diverse vissoorten.
- Geen transport van zout (zoutlekage) naar het IJsselmeer.

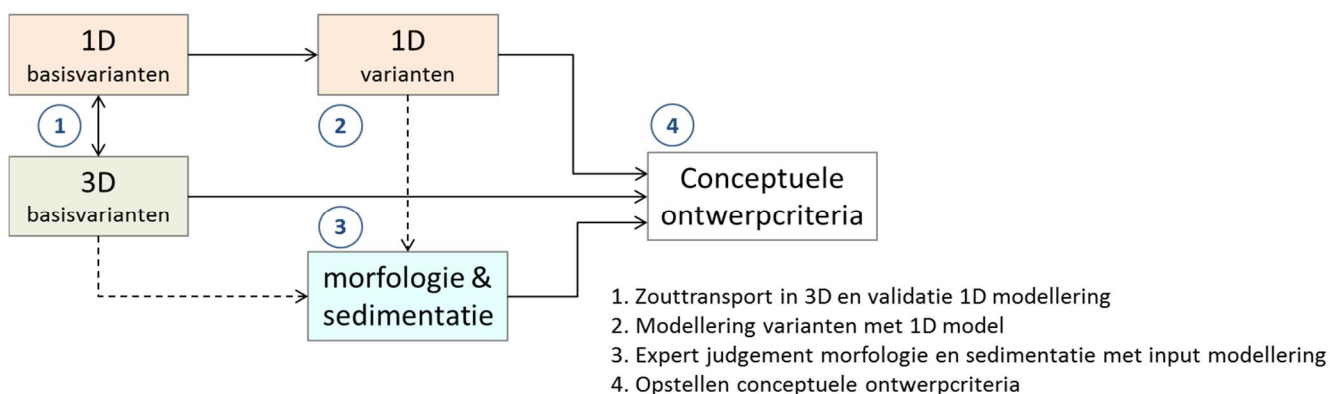
- Zo minimaal mogelijk baggeronderhoud of herstel van het bodemprofiel.
- Realisatie van een brakwaterzone aan de IJsselmeerzijde.
- Realisatie van intergetijdengebied aan de IJsselmeerzijde.

Overige criteria als de bijdrage aan het aantal vissen dat migreert, (bouw)technische mogelijkheden of economische kansen zoals recreatie, worden niet meegenomen. Uitkomsten van dit onderzoek kunnen wel input zijn voor deze onderwerpen.

1.3 Aanpak

Voor het water- en zouttransport wordt gebruik gemaakt van een 1D model en een 3D¹ model. Met het 1D model worden varianten berekend (stap 2 in Figuur 1.2). In deze stap wordt met het 1D model ook onderzocht hoe karakteristieken als getij en zoutindringingslengte afhangen van ontwerpgrontheden als diepte van de vismigratierivier of grootte van de koker.

In het 1D model kan dichtheidsstroming niet worden meegenomen, terwijl dit een belangrijk proces is voor zoutverspreiding. In het 3D model wordt dit wel expliciet meegenomen. In het 1D model wordt dit effect in de dispersiecoëfficiënt vereenvoudigd. De getalswaarde van de dispersiecoëfficiënt wordt normaal gesproken afgeregeld op basis van metingen, maar dat is in dit geval niet mogelijk. In dit onderzoek wordt daarom de dispersiecoëfficiënt geverifieerd door een vergelijking met het 3D model (stap 1 in Figuur 1.2). Met de aldus bepaalde getalswaarde worden vervolgens met het 1D model in stap 2 de varianten doorgerekend waaruit de conceptuele ontwerpcriteria worden afgeleid. Met het 3D model wordt tevens voor een aantal basisvarianten het transport van zout onderzocht.



Figuur 1.2 Overzicht van de stappen in het onderzoek

Sedimentatie en morfologische aspecten worden op basis van expert judgement beoordeeld, waarbij modelleringsresultaten als een informatiebron dienen (stap 3 in Figuur 1.2).

De verzamelde informatie uit de 1D modellering, de 3D modellering en de expert judgement voor morfologie en sedimentatie leiden tenslotte tot conceptuele ontwerpcriteria voor de vismigratierivier.

¹ Een model-technisch juiste formulering is dat een 2DV model wordt gebruikt. De twee dimensies die in het model zijn opgenomen, zijn de lengterichting en de diepte van de vismigratierivier. De 'V' duidt op een laagverdeling in de Verticaal. De breedte van de vismigratierivier wordt gerepresenteerd door één rooster cel.

1.4 Iteratief proces met voortschrijdend inzicht

De Notitie Reikwijdte en Detailniveau (Figuur 1.1) schetst varianten die parallel op een aantal terreinen worden uitgewerkt. Het in dit rapport gepresenteerde onderzoek wordt naast het civieltechnisch ontwerp (Grontmij) en de milieueffectrapportage (LievenseCSO) uitgevoerd. Daarnaast wordt door architecten en landschapsarchitecten gewerkt aan het ontwerp van een bezoekerscentrum en aan de inpassing in het landschap. Tussentijdse resultaten uit dit onderzoek zijn input geweest voor andere onderdelen en hebben vice versa tussentijds geleid tot bijstellingen en/of aanvullende vragen.

Dit iteratieve (ontwerp)proces is in dit rapport terug te zien door de presentatie van (model)resultaten in twee opeenvolgende hoofdstukken. De in hoofdstuk 3 beschouwde varianten zijn uitgegaan van de varianten in de Notitie Reikwijdte en Detailniveau. Mede op basis van de modelresultaten zijn tussentijds (ontwerp)keuzes bijgesteld dan wel concreet geworden. Dit heeft geleid tot een tweede set varianten die in hoofdstuk 4 worden beschreven. Het rapport beschrijft daarmee in chronologische volgorde de ontwikkeling van het ontwerp. Het is niet altijd mogelijk om de lezer volledig deelgenoot te maken van de dynamiek van het ontwerpproces, waardoor de leesbaarheid van het rapport mogelijk iets minder wordt.

1.5 Leeswijzer

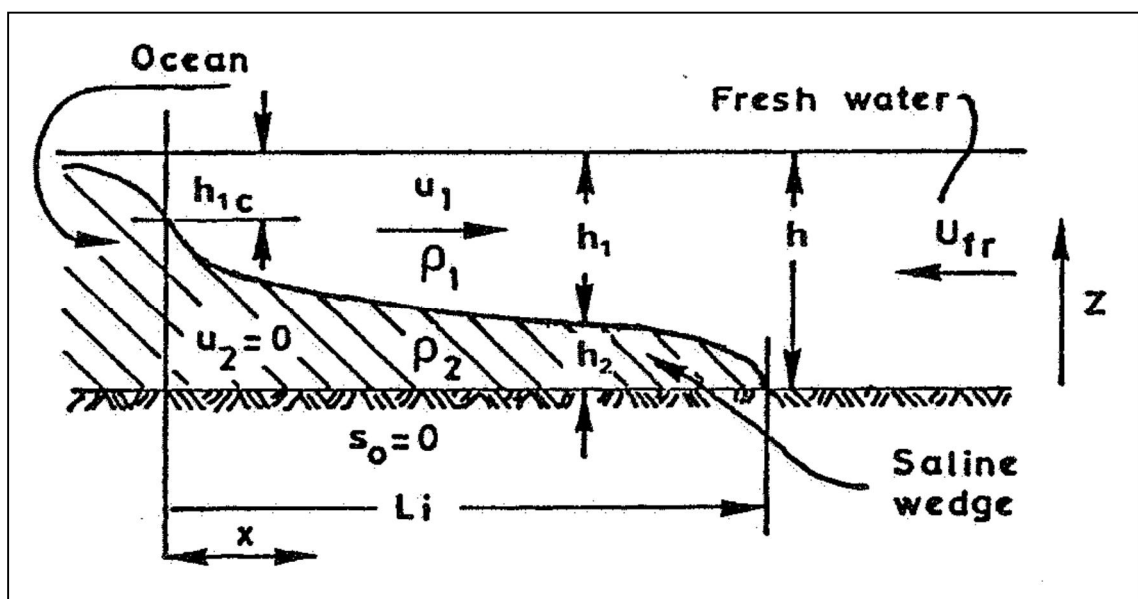
Dit rapport doet verslag van het modelonderzoek, de expert judgement voor morfologie en sedimentatie en het conceptueel ontwerp van de vismigratierivier. Voor een beschrijving van de achtergrond van de vismigratierivier wordt verwezen naar andere documenten zoals de genoemde Notitie Reikwijdte en Detailniveau. Van de lezer wordt affiniteit voor (modellering van) waterbeweging en zouttransport verwacht.

Hoofdstuk 2 tot en met 5 bevatten de gedetailleerde en (model)technische beschrijving en uitwerking van de uitgevoerde studie. De lezer kan deze overslaan en gelijk beginnen met hoofdstuk 6 dat de uitkomsten van de (model)studie vertaald naar praktische conceptuele ontwerpcriteria.

2 Waterbeweging- en zoutmodellering Vismigratierivier

2.1 Algemeen: Dichtheidsgedreven stroming

De vismigratierivier beoogt een (deels) open verbinding tussen de zoute Waddenzee en het zoete IJsselmeer tot stand te brengen. Als gevolg van het verschil in dichtheid tussen zout en zoet water – zout water is zwaarder dan zoet water – kan in de vismigratierivier een gestratificeerde toestand ontstaan, dat wil zeggen een zoute(re) onderlaag met daarboven een zoete(re) bovenlaag. Schematisch wordt deze toestand weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Schematische weergave van een gestratificeerde toestand

Door middel van dichtheidsverschillen beïnvloedt de zoutverdeling de waterbeweging en omgekeerd, de waterbeweging beïnvloedt op haar beurt de zoutverdeling. Dit proces wordt in het 1-dimensionale SOBEK model niet beschreven, omdat een rekenpunt maar één (dieptegemiddelde) waarde voor saliniteit kent en geen onderscheid gemaakt wordt tussen wateroppervlak en bodem. De effecten van een gestratificeerde toestand worden in de berekening verdisconteerd (geparameteriseerd) via de dispersiecoëfficiënt.

Om een goed beeld te krijgen van de verschillen van een 1D en een 3D model is gebruik gemaakt van een basisvariant. De basisvariant omvat de essentiële kenmerken van de 0-variant en de planvarianten, maar wijkt op een beperkt aantal punten af. Deze basisvariant wordt in de volgende paragraaf verder beschreven.

2.2 Parameters voor hydrodynamische definitie van een variant (1^e iteratie)

Voor de 1D en 3D hydrodynamische modellering wordt een variant beschreven door de volgende parameters:

Deel vismigratierivier	Parameter	Waarde
IJsselmeerzijde	▪ Diepte (m NAP)	<i>variabel</i>
	▪ Lengte (m)	<i>variabel</i>
	▪ Breedte op 0 m NAP (m)	<i>variabel</i>
	▪ Talud (-)	<i>variabel</i>
	▪ Ruwheid ($s/m^{1/3}$)	<i>variabel</i>
	▪ Sturing afsluitend kunstwerk (zie §2.3.3)	<i>variabel</i>
Koker	▪ Doorstroomoppervlak (m^2)	<i>variabel</i>
	▪ Onderkant koker (m NAP)	<i>variabel</i>
	▪ Lengte (m)	100 m
	▪ Ruwheid ($s/m^{1/3}$)	<i>variabel</i>
	▪ Sturing (zie §2.3.2)	<i>variabel</i>
Waddenzeezijde	▪ Diepte (m NAP)	-4 m NAP
	▪ Lengte (m)	1000 m
	▪ Breedte op 0 m NAP (m)	<i>variabel</i>
	▪ Ruwheid ($s/m^{1/3}$)	0,024 $s/m^{1/3}$
	▪ Talud (-)	<i>Variabel</i>

Aan de Waddenzeezijde ligt de definitie van de varianten deels vast. De lengte is altijd 1 km en voor de diepte wordt altijd -4 m NAP aangenomen. De ruwheid bepaalt hoeveel weerstand de waterstroming ondervindt. De gehanteerde Manning waarde van $0,024 s/m^{1/3}$ is karakteristiek voor zanderige estuaria.

Aan de IJsselmeerzijde liggen geen van de parameters op voorhand vast. De diepte, breedte en het talud bepalen samen het dwarsprofiel (in m^2) van de vismigratierivier. Voor de koker ligt alleen de lengte vast op 100 m.

De volgende paragraaf beschrijft de parameterwaarden voor de basisvariant op basis waarvan de vergelijking tussen het 1D en het 3D model wordt uitgevoerd. De basisvariant is vrijwel gelijk aan variant 1A (Lijn 6km) met twee verschillen: 1) Er wordt met een rechthoekig dwarsprofiel gerekend in plaats van met een talud, en 2) De breedte aan de Waddenzeezijde is 25 m in plaats van 50 m.

Het berekenen van de varianten met het 1D model wordt in hoofdstuk 3 gerapporteerd. Met het 1D model wordt tevens per parameter onderzocht wat het effect op water- en zouttransport is. Vooruitlopend op de presentatie van de resultaten wordt hier alvast aangegeven dat de resultaten van 1D model ten aanzien van zouttransport als indicatief moeten worden beschouwd gezien het (groter dan verwachte) belang van dichtheidsstroming.

2.3 Opzet schematisatie basisvariant (1^e iteratie)

Om de 1D modelresultaten te onderbouwen voor wat betreft het ontbreken van dichtheidsgedreven stroming is een vereenvoudigd, drie-dimensionaal model van de vismigratierivier opgezet. Deze paragraaf beschrijft de basisvariant die zowel met het 1D model als het 3D model wordt doorgerekend.

Het 3D model, waarvan de rekentijden groter zijn dan van het SOBEK model van de vismigratierivier (12 uur versus 3 minuten), is tevens gebruikt om een beperkt aantal varianten door te rekenen. De resultaten van dit 3D model zijn leidend ten aanzien van zouttransport.

2.3.1 Geometrie

De vismigratierivier is gemodelleerd als een kanaal met een rechthoekig dwarsprofiel (dat wil zeggen een verticaal talud), met een lengte van 1 km aan de Waddenzeezijde en een lengte van 6 km aan de IJsselmeerzijde. In het stadium van conceptueel ontwerp wordt aangenomen dat er geen significant hydraulisch verschil is tussen een recht kanaal en meanderend kanaal. De breedte aan de Waddenzeezijde is 25 m en aan de IJsselmeerzijde 25 meter. De bodemligging ligt overal op -4 m NAP.

2.3.2 Koker Afsluitdijk

Tussen de Waddenzeekant en de IJsselmeerkant van de vismigratierivier ligt de Afsluitdijk. Beide delen van de vismigratierivier zijn met elkaar verbonden door een koker. In de basisvariant heeft deze koker een lengte van 100 m, een breedte van 10 m en een hoogte van 2 m. Het doorstroomprofiel is dus 20 m². De bodem van de koker ligt op -4 m NAP en dus op de bodem van de vismigratierivier. Voor de ruwheid van de koker is een Manningwaarde van 0,013 s/m^{1/3} genomen. Deze waarde komt overeen met glad afgewerkt beton (French 1986). Daarnaast is er voor de koker een intree- en uittreeverlies van 0,9 gedefinieerd. Deze waarde is afgeleid uit tabellen van verliescoëfficiënten zoals gegeven in (French 1986).

Bij een volledig open verbinding tussen Waddenzee en IJsselmeer vindt er een netto transport van Waddenzeewater naar het IJsselmeer plaats, omdat de gemiddelde waterstand in de Waddenzee hoger is dan de gemiddelde waterstand in het IJsselmeer. Dit heeft logischerwijs ook een transport van zout van Waddenzee naar IJsselmeer tot gevolg. Een indicatieve berekening komt uit op 600 kg/s. Om deze zoutlekage te voorkomen, is de duiker uitgerust met afsluiters (kleppen). De gebruikte bediening van deze afsluiters is afgeleid in Deltares (2012): de koker is gesloten als de waterstand aan de Waddenzeezijde meer dan 20 cm hoger is dan de waterstand aan de IJsselmeerzijde van de koker. Hiervoor worden in het model de gemeten waterstanden op locaties Kornwerderzand binnen en buiten gebruikt (Figuur 2.2).

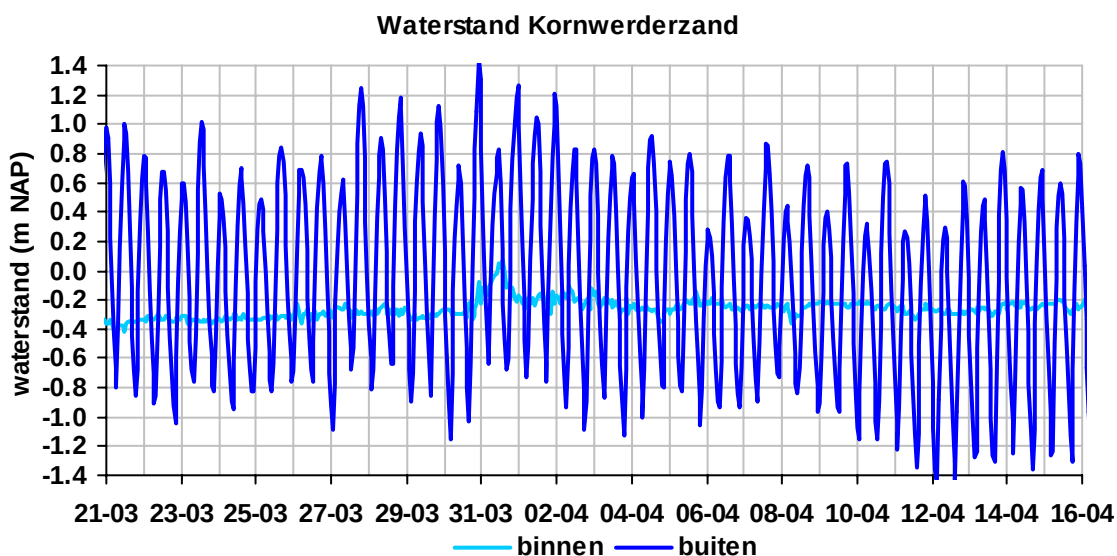
2.3.3 Afsluiting IJsselmeerzijde

Aan het uiteinde van de IJsselmeerzijde waar de vismigratierivier uitkomt in het IJsselmeer, kan de vismigratierivier ook afgesloten worden. In de basisvariant wordt echter aangenomen dat er geen afsluiting is of anders gezegd dat het afsluitende kunstwerk permanent open staat. De reden voor dit uitgangspunt is de aanname dat de primaire sturing met de afsluiter in de koker plaatsvindt en dat sturing aan de IJsselmeerzijde alleen wordt bijgeschakeld als dat ter voorkoming van zoutindringing nodig is. Sluiting aan de IJsselmeerzijde voor andere doeleinden zoals bij stormopzet worden niet in deze overweging meegenomen, omdat dat geen rol speelt voor de dagelijkse operationeel praktijk.

In de 2^e iteratie is de inzet van een afsluiter aan de IJsselmeerzijde wel als variant onderzocht (§4.2.5) om een meer natuurlijk getijverloop te realiseren.

2.3.4 Randvoorwaarden

Het model kent twee open randen, een open rand aan de Waddenzeekant van het model en een open rand aan de IJsselmeerkant van de vismigratierivier. Op deze open randen worden, ten behoeve van de berekening van de waterbeweging in de vismigratierivier de gemeten waterstanden in de Waddenzee en de gemeten waterstanden in het IJsselmeer voorgeschreven (Figuur 2.2). Deze aanpak veronderstelt dat de vismigratierivier een te verwaarlozen invloed heeft op Waddenzee respectievelijk IJsselmeer.



Figuur 2.2 Als randvoorwaarde gezette waterstanden van meetlocatie Kornwerderzand, waar “binnen” de IJsselmeerszijde en “buiten” de Waddenzeeszijde betekent. Bron: Waterbase (2012)

Ten behoeve van de berekening van de zoutverdeling in de vismigratierivier moet op de open rand van de vismigratierivier het zoutgehalte worden voorgeschreven. Deze zoutrandvoorwaarde wordt effectief alleen gebruikt tijdens instroming. Tijdens uitstroming bepaalt het zoutgehalte in de vismigratierivier de zoutconcentratie op de open rand. Op de Waddenzeerand van de vismigratierivier wordt een zoutgehalte, of saliniteit, van 31 psu^2 voorgeschreven. Dit is een hoog zoutgehalte dat geen rekening houdt met de verzoeting die normaal gesproken elke laagwaterperiode optreedt doordat er zoet water gespuid wordt via de Lorentzsluizen. Ten behoeve van zoutindringing is dit een worst-case aanname die alleen voor kan komen als een periode niet gespuid wordt.

In de 2^e iteratie is daarnaast gerekend met een saliniteit van 10 psu op de Waddenzee wat realistischer is voor gemiddelde condities (§4.2.6). Aanvullende analyse van beschikbare metingen en modellering van de saliniteit in de spuirom heeft overigens laten zien dat de spuirom nadat het spuien stopt, volledig zoet is en slechts langzaam weer zouter wordt (Deltares, 2014).

Voor het IJsselmeer is een saliniteit van 0,2 psu , ongeveer de jaargemiddelde saliniteit van het Rijnwater bij Lobith verondersteld.

² psu staat voor Practical Salinity Unit, de eenheid van zoutgehalte of saliniteit. Een toename in zoutgehalte met 1 psu komt, grofstoffelijk, overeen met een toename in dichtheid van $\frac{1}{4} \text{ kg/m}^3$

2.3.5 Bodemruwheid vismigratierivier

Voor de bodemruwheid van de vismigratierivier is een Manning waarde $0,024 \text{ s/m}^{1/3}$ aangenomen. Deze waarde is karakteristiek voor zanderige estuaria.

2.3.6 Simulatieperiode

De modelberekeningen beslaan de periode van 20 maart 2010 tot en met 16 april 2010. De duur van de gesimuleerde periode, ongeveer 25 dagen, is dus langer dan de duur van een doortij/springtij cyclus (ongeveer 15 dagen).

2.4 De basisvariant in SOBEK (1D)

SOBEK is een computerprogramma waarmee de volgende processen mathematisch kunnen worden gemodelleerd:

- Één-dimensionale open-channel flow, volgens de ondiepwatervergelijkingen, waarbij de variabele dichtheid van het water door zoutbeweging is meegenomen
- eendimensionaal stoftransport, gegeven door de advection-dispersie-vergelijking
- pipe flow

SOBEK lost de differentiaalvergelijkingen op door gebruik van een numerieke methode, het zogenoemde Stelling-schema. Hiervoor moet het onderzoeksgebied, in het voorliggend geval de vismigratierivier, met een schematisatie van knopen (Nodes) en takken (Reach Segments) worden gediscrètiseerd. Er zijn verschillende types knopen in SOBEK beschikbaar, bijvoorbeeld Boundary Nodes, Nodes voor kunstwerken (Structure, Culvert), dwarsprofielen (Cross Section) en Calculation Points. Een tak verbindt twee knopen. Voor knopen van type Connection Node en Calculation Point berekent SOBEK de waterstand, voor takken de snelheid.

Een model bestaat uit de schematisatie, modelparameters en model-data. De oplossing van de stromingsvergelijkingen is in computer-code geïmplementeerd en als executable gecompileerd. In deze studie is de SOBEK Suite 3.2.2.0 binnen Deltashell gebruikt.

2.4.1 Model specifieke parameters

Naast de algemene parameters als beschreven in paragraaf 2.1 zijn er ook enkele modelspecifieke parameters, die alleen voor het SOBEK model gelden:

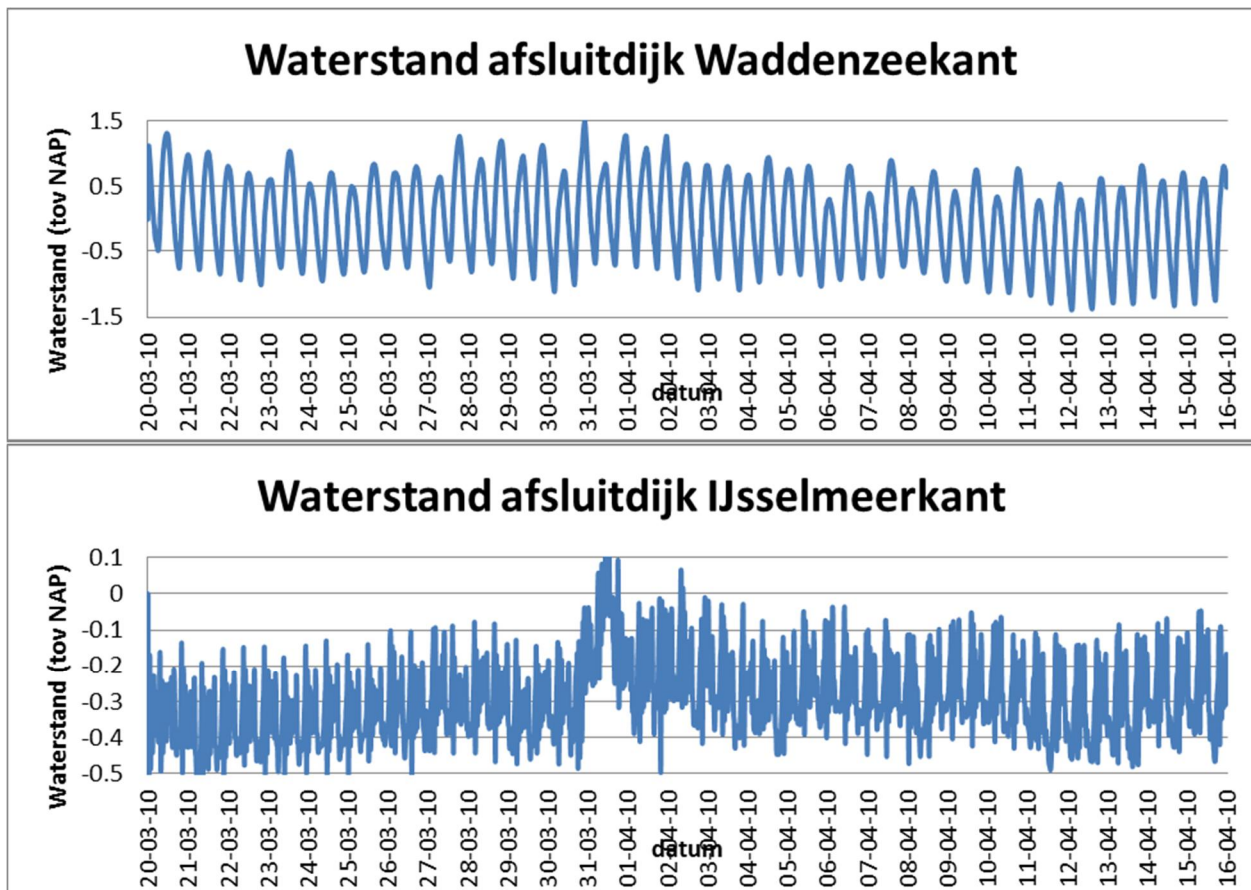
- Er is gerekend met een rekengrid van 100 m equidistant
- De rekentijdstap is 30 seconden
- De uitvoertijdstap is 10 minuten

Tenslotte verdient de dispersiecoëfficiënt bijzondere aandacht, omdat in tegenstelling tot de andere parameters hiervoor geen getalswaarde beschikbaar is. Met andere woorden, binnen het model is de dispersiecoëfficiënt (verreweg) de meest onzekere parameter. Om een beter beeld te krijgen wat de gevoeligheid van het modelresultaat van deze parameter is, zijn enkele sommen gedaan met verschillende dispersiecoëfficiënt. Voor de basisvariant wordt (uiteindelijk) $50 \text{ m}^2/\text{s}$ gerekend.

2.4.2 1D berekeningsresultaten basisvariant

Waterstanden:

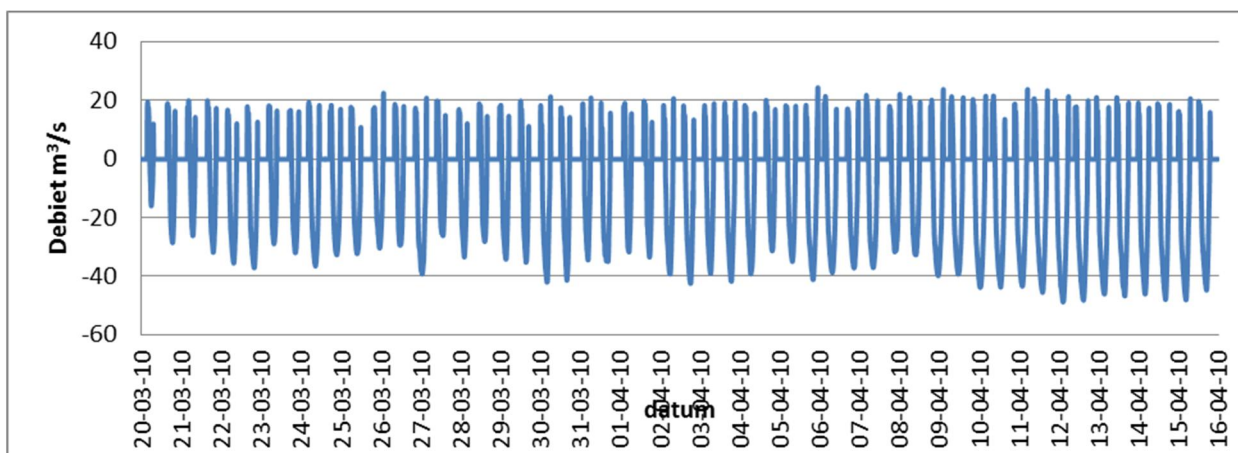
De berekende waterstanden bij de Afsluitdijk ter plaatse van de koker worden getoond in Figuur 2.3. De waterstanden aan de Waddenzee kant lijken veel op de opgelegde randvoorwaarden. Aan de IJsselmeerkant van de koker ontstaat, als gevolg van de debieten door de koker, een “zoetwater”getij met een getijslag van ongeveer 20 cm.



Figuur 2.3 Waterstanden bij de Afsluitdijk ter plaatse van de koker, zowel aan de Waddenzee kant als aan de IJsselmeerkant

Debieten en snelheden door/in de koker:

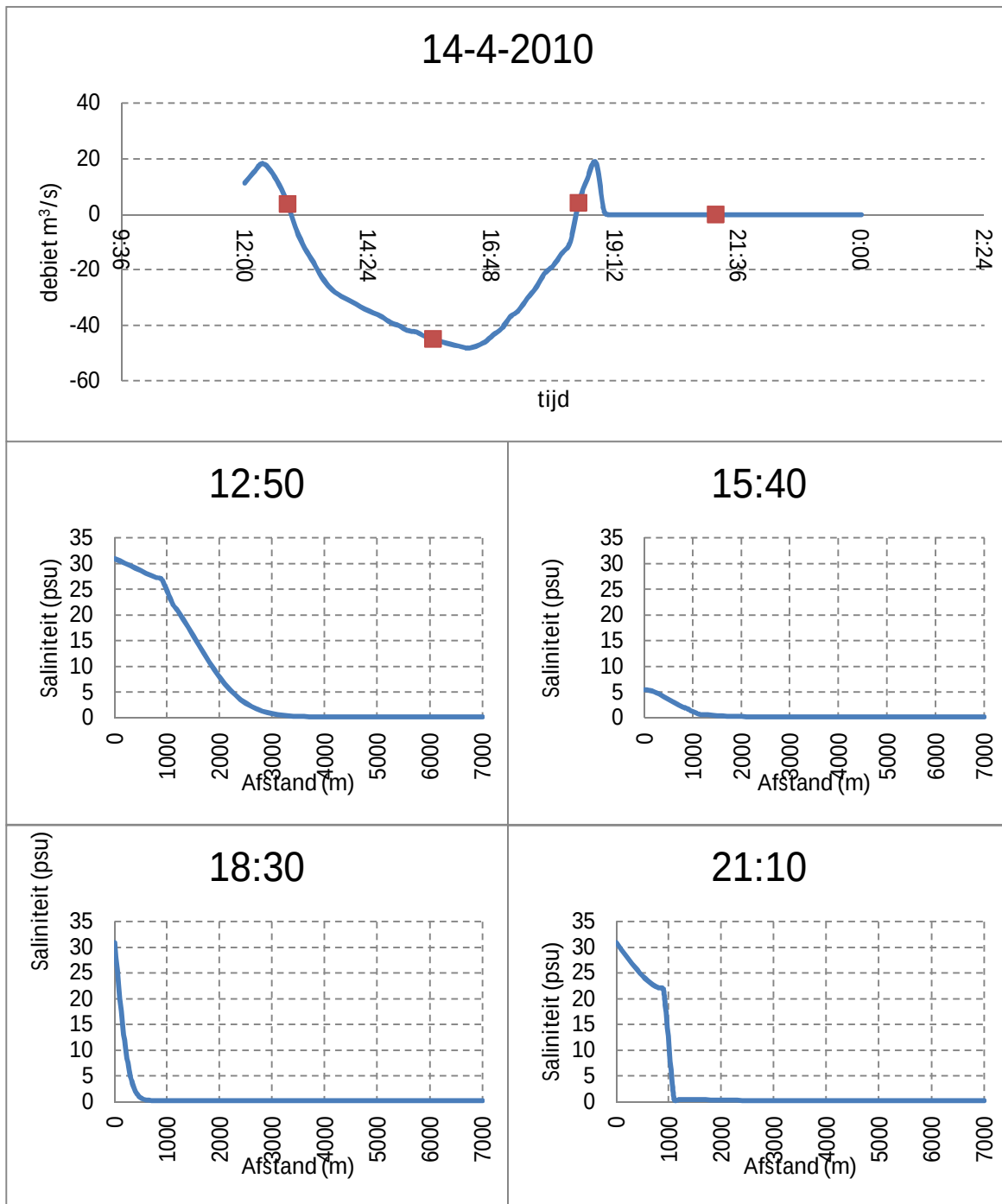
De berekende debieten door de koker worden getoond in Figuur 2.4. Het maximale vloeddebiet, van Waddenzee naar IJsselmeer, bedraagt ongeveer $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit komt overeen met stroomsnelheden in de koker van ongeveer 1 m/s . Voor het ebdebiet, van IJsselmeer naar Waddenzee, is de maximale grootte ongeveer $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit komt overeen met stroomsnelheden van ongeveer $2,5 \text{ m/s}$. Het (netto) restdebiet door de koker, gericht van IJsselmeer naar Waddenzee, d.w.z. de lokstroom, is iets groter dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 2.4 Debiet door de koker in de basisvariant

Zoutverdeling (bij dispersiecoëfficiënt $50\text{m}^2/\text{s}$):

In Figuur 2.5 is de zoutverdeling gedurende het getij te zien. Het gaat hier om de dieptegemiddelde zoutconcentratie. Bij een positief debiet stroomt het water vanuit de Waddenzee richting het IJsselmeer. Over de gehele vismigratierivier is er een grote fluctuatie in de zoutverdeling. Bij hoogwater (+/- 12:50) is de zoutconcentratie het hoogst en komt de zouttong het verst. Bij afgaand water wordt de gehele vismigratierivier weer brak tot zoet.



Figuur 2.5 Berekende saliniteit (psu) in het lengteprofiel van de vismigratierivier. De afstand wordt gerekend vanaf de opening aan de Waddenzeezijde (0 m) tot aan opening aan de IJsselmeerzijde (7000 m). De koker door de Afsluitdijk bevindt zich op 1000 m

2.5 De basisvariant in Delft3D-FLOW (3D)

De berekeningen met het drie-dimensionale model worden uitgevoerd met het simulatieprogramma Delft3D-FLOW. De basis voor dit programma zijn de zogenaamde ondiepwatervergelijkingen. Deze vergelijkingen beschrijven de beweging van water, inclusief het effect van dichtheidsverschillen bijvoorbeeld als gevolg van verschillen in zoutgehalte,

onder de aanname dat verticale versnellingen van water klein zijn ten opzichte van de zwaartekracht. Voor een uitgebreide beschrijving van dit programma wordt verwezen naar (Lesser, et al. 2004).

De schematisatie van de vismigratieriver, met één horizontale (lengte)dimensie en een verticale dimensie, staat in de literatuur bekend als 2DV schematisatie (2 Dimensionaal-verticaal).

2.5.1 Model specifieke parameters

Naast de parameters als beschreven in paragraaf 2.3 zijn er ook enkele model specifieke parameters, welke alleen voor het Delft3D model gelden:

- De grootte van de (vierkante) rekencellen bedraagt 25 bij 25 m². De Waddenzeekant van de vismigratierivier heeft een lengte van 1 km en wordt dus beschreven met 40 rekencellen. De IJsselmeerkant van de vismigratierivier met een lengte van 6 km wordt weergegeven met 240 rekencellen.
- In de verticale richting kent het model 40 rekenlagen elk met een dikte van 2,5 % van de lokale waterdiepte.
- In het drie-dimensionale model van de vismigratie rivier is de koker opgenomen als een zogenaamde "Culvert" (Deltares 2013). Ter plaatse van een culvert wordt het debiet door de culvert uitgerekend op basis van:
 - Het waterstandsverschil over de koker,
 - De afmetingen van de koker (lengte breedte hoogte),
 - De verticale positie van de koker (verzonken, deels verzonken, open wateroppervlak in de duiker),
 - Dit debiet wordt, ter hoogte van de koker, onttrokken aan de hoogwaterkant van de duiker en geloosd, met het zoutgehalte van het onttrokken water, aan de laagwaterkant van de duiker³.
- De rekentijdstap bedraagt 1,5 sec.
- Horizontale diffusie: Voor de horizontale diffusiecoëfficiënt is een waarde van 1 m²/s gebruikt. Deze waarde is veel kleiner dan de waarde gebruikt in het één-dimensionale SOBEK model omdat het effect van (verticale) dichtheidsverschillen als gevolg van verschillen in zoutgehalte expliciet wordt meegenomen in de berekening en niet geparameteriseerd, middels een dispersiecoëfficiënt hoeft te worden weergegeven.
- Verticale diffusie: De verticale diffusiecoëfficiënt, waaruit de verticale menging van zout volgt, wordt niet voorgeschreven maar uitgerekend door een verticaal turbulentiemodel, het k-ε model. Dit model heeft bewezen het ontstaan dan wel afbreken van zoutgelaagdheid goed te kunnen voorspellen.

Gevoeligheidsonderzoek model

Voorafgaand aan de eigenlijke berekeningen is een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd waarbij onderzocht is wat het effect is van:

- De roostergrootte, in plaats van rekencellen met een lengte van 25 m is een berekening uitgevoerd met rekencellen met een lengte van 10 m (bij gelijkblijvende breedte van 25 m).
- De verticale laagschematisatie, onderzocht is wat het effect is van lagen met een vaste dikte in plaats van "ademende" lagen waarvan de dikte gelijk is aan een percentage van de lokale waterdiepte.

³ De lozingen en onttrekkingen betreffen enkel massa. Er wordt geen impuls geloosd dan wel onttrokken.

- Het effect van de dispersiecoëfficiënt, onderzocht is wat het effect is van een horizontale dispersiecoëfficiënt van $10 \text{ m}^2/\text{s}$ in plaats van $1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Deze variaties bleken geen significante invloed te hebben op de berekeningsresultaten.

Beperkingen 3D modellering

De in- en uitstroomsnelheden van de koker kunnen groot zijn. Het mengende effect van deze stralen wordt in het model niet goed weergegeven omdat:

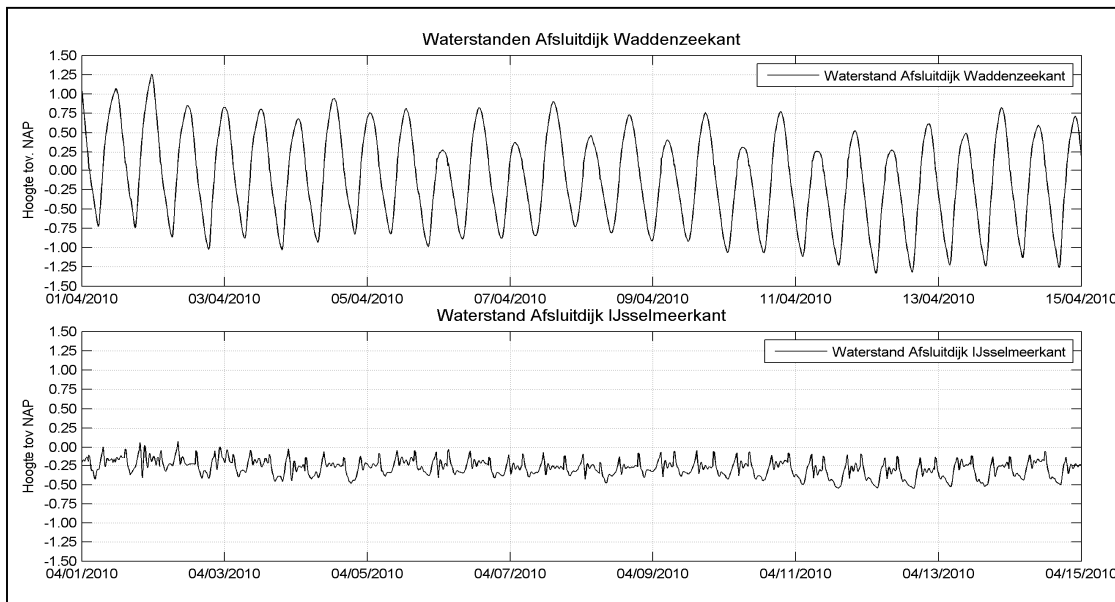
- Er wel massa maar geen (horizontale) impuls wordt geloosd dan wel onttrokken,
- Het denkbaar is dat verticale versnellingen in deze straal niet meer verwaarloosbaar zijn ten opzichte van zwaartekrachtsversnelling.

De verwachting is dat het onderschatten van de menging een bovengrens voor de berekende zoutindringing tot gevolg heeft. Meer menging betekent lagere zoutgehalten, kleinere dichtheidsverschillen en dus een kleinere zoutindringingslengte.

2.5.2 3D Berekeningsresultaten basisvariant

Waterstanden:

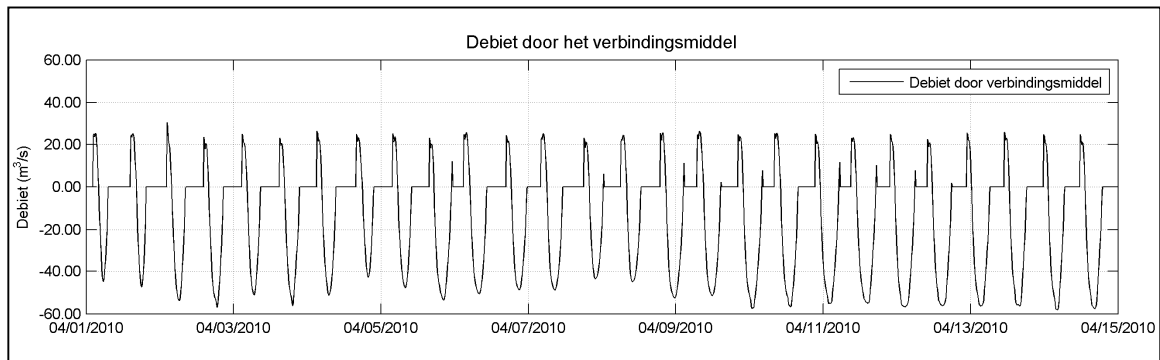
De berekende waterstanden ter plaatse van de koker door de Afsluitdijk worden getoond in Figuur 2.6. De waterstanden aan de Waddenzeekant van de koker zijn, met uitzondering van een tijdsvertraging van een paar minuten, identiek aan de opgelegde randvoorwaarde, d.w.z. de waterstanden in de monding van de vismigratierivier. Aan de IJsselmeerkant ontstaat, als gevolg van de debieten door de koker, een getij met een getijslag van ongeveer 20 cm.



Figuur 2.6 Waterstanden bij de Afsluitdijk ter plaatse van de koker, zowel aan de Waddenzeekant als aan de IJsselmeerkant

Debieten en snelheden door/in de koker:

De berekende debieten door de koker worden getoond in Figuur 2.7. Het maximale vloeddebiet, van Waddenzee naar IJsselmeer, bedraagt ongeveer $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit komt overeen met stroomsnelheden in de koker van ongeveer 1 m/s . Voor het ebdebiet, van IJsselmeer naar Waddenzee, geldt dat de maximale grootte ongeveer $60 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Dit impliceert stroomsnelheden van ongeveer 3 m/s . Het netto restdebiet door de koker, gericht van IJsselmeer naar Waddenzee i.e. de lokstroom, is iets groter dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

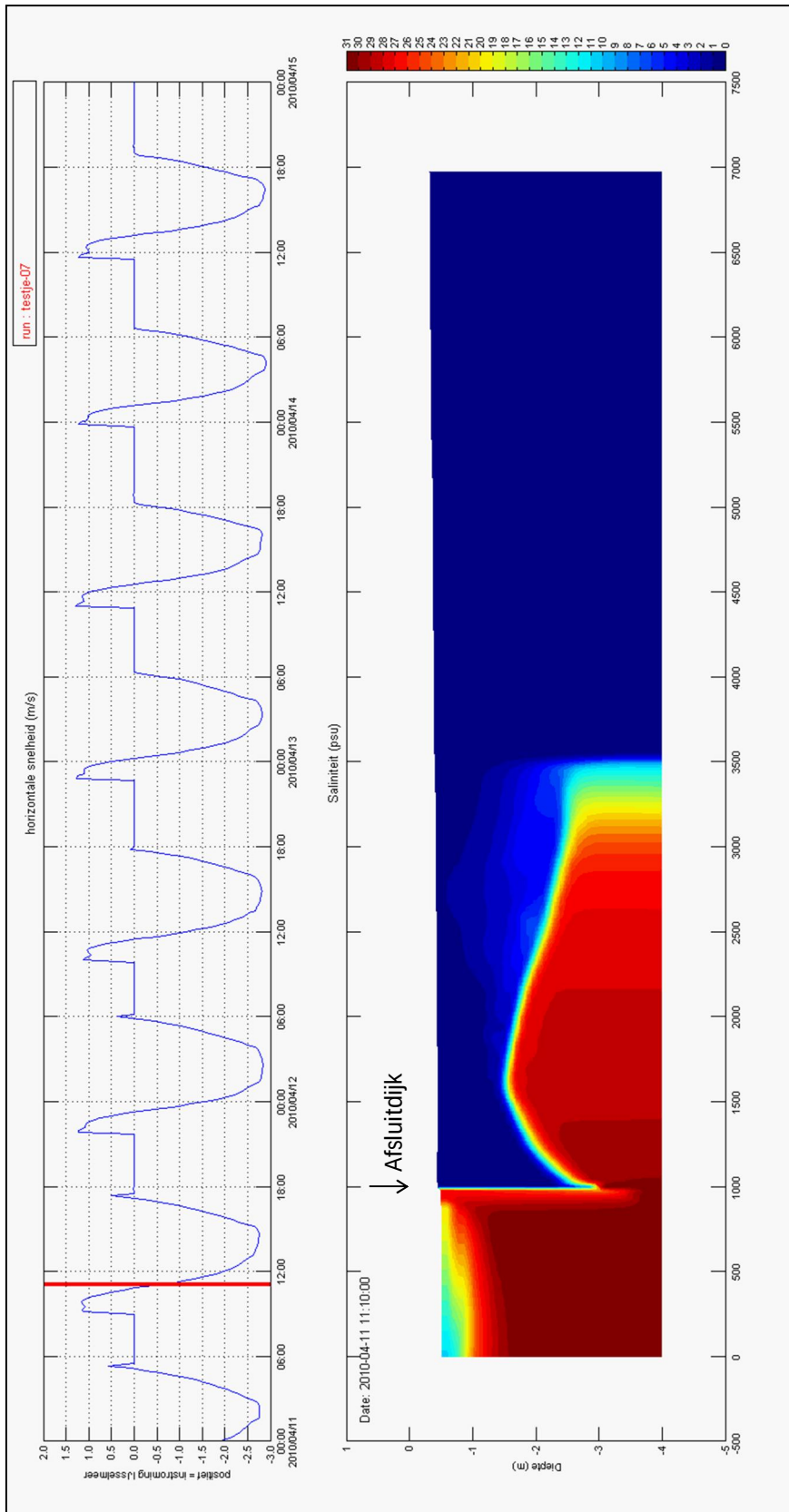


Figuur 2.7 Debiet door de koker

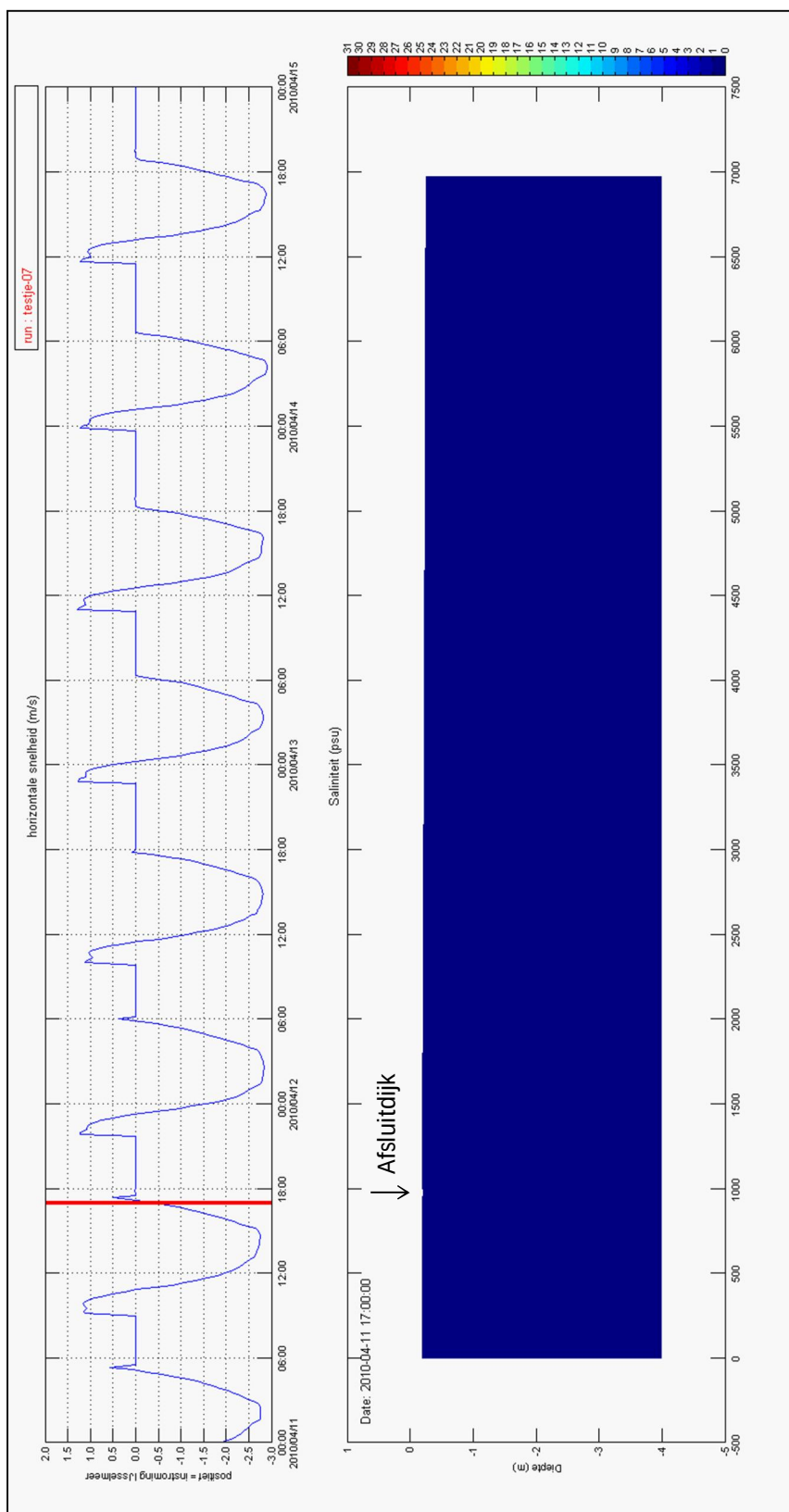
Zoutverdeling:

De berekende zoutverdeling na de vloedperiode en na de ebperiode worden getoond in Figuur 2.8 en Figuur 2.9. De vloedperiode kenmerkt zich, als gevolg van de hoge waterstanden op de Waddenzee, door stroming en dus transport van Waddenzee naar het IJsselmeer. Aan het einde van de vloedperiode wordt de maximale zoutindringing bereikt. De zoutindringingslengte bedraagt ongeveer 2,5 km gerekend vanaf de Afsluitdijk. De horizontale zoutgradiënt is groot, een verschil van ongeveer 30 psu over een afstand van 2,5 km.

Voor de ebperiode geldt dat de stroomrichting van IJsselmeer naar Waddenzee is. Aan het einde van de ebperiode is de vismigratierivier schoongespoeld en geheel zoet.



Figuur 2.8 Zoutindringing in de basisvariant aan het eind van de vloedperiode



Figuur 2.9 Zoutindringing in de basisvariant aan het eind van de ebperiode

2.6 Vergelijking 1D en 3D modelering

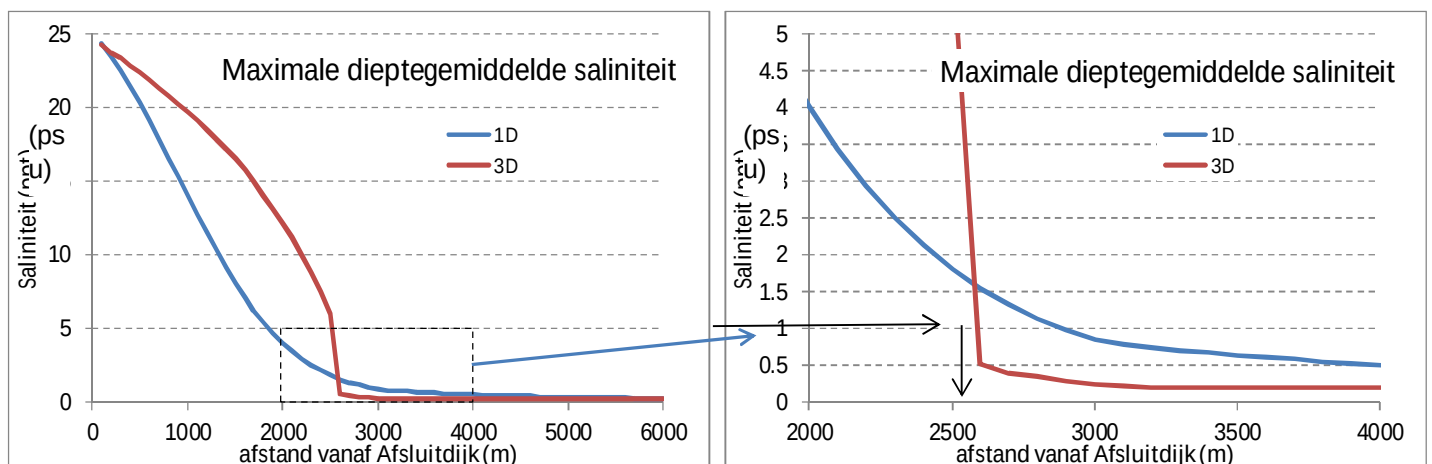
2.6.1 Vergelijking basisvariant en kalibratie 1D model op basis van 3D model

Het overzicht van berekeningen voor de vergelijking van de basisvariant (aangegeven als variant 0) is gegeven in Tabel 2.1. Uit de tabel blijkt dat de schematisatie in het 1D en het 3D model gelijk zijn. Het verschil in openingsduur van de koker (59% vs. 57%) wordt veroorzaakt doordat de simulatieperiode in het 1D model 1 dag langer is dan in het 3D model.

Tabel 2.1 Overzicht van modelberekeningen voor de vergelijking van de basisvariant met het 1D en het 3D model

Variant	Kenmerk	MODEL	IJsselmeerzijde						Koker				Waddenzeezijde			
			breedte (m) op 0 m NAP	talud	bodemligging (m NAP)	lengte (km)	ruwheid Manning (s/m ^{1/3})	Klepstanden kunstwerk	Oppervlak (m ²)	Diepte onderzijde (m NAP)	ruwheid Manning (s/m ^{1/3})	Openingsduur (%)	breedte (m) op 0 m NAP	talud	bodemligging (m NAP)	lengte (km)
Variant 0	Basisvariant	1D	25	recht	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	25	recht	-4	1
Variant 0	Basisvariant	3D	25	recht	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	57%	25	recht	-4	1

De vergelijking van het 1D en het 3D model laat zien dat het gedrag van zout aan de IJsselmeerzijde wezenlijk anders berekend wordt. In het 3D model is het dominante proces een dichtheidsstroming van een zouttong, resulterend in een scherp front (Figuur 2.8). In het 1D model is het dispersief transport dominant voor de zoutindringing. Figuur 2.10 laat zien dat het lengteprofiel van de maximale dieptegemiddelde saliniteit (dat wil zeggen de maximale concentratie die op enig moment tijdens een 14-daags springtij-doodtij periode voorkomt) er anders uitziet voor het 1D model en het 3D model.

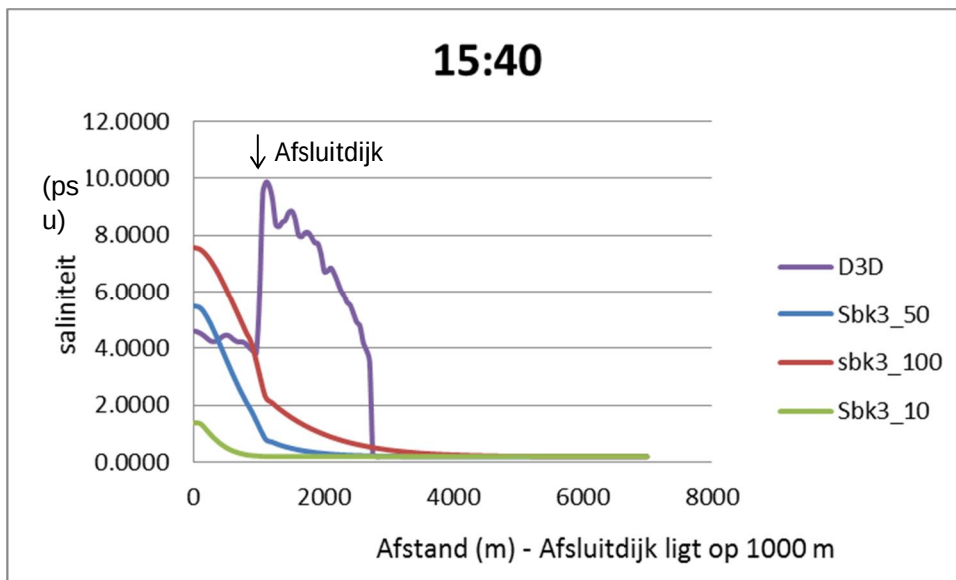


Figuur 2.10 Horizontaal langprofiel van maximale dieptegemiddelde saliniteit (psu) tijdens de simulatieperiode

Ter validatie van het 1D model wordt het 3D modelresultaat als 'waar' aangenomen. In het 1D model is de dispersiecoëfficiënt de enige modelparameter die gebruikt kan worden om het 1D modelresultaat zo goed mogelijk te laten lijken op het 3D modelresultaat.

Figuur 2.11 toont een vergelijking van het 1D model met verschillende dispersiecoëfficiënten met het 3D modelresultaat. Nogmaals valt op dat het 1D profiel substantieel afwijkt van het

3D profiel. Het 3D model laat een scherpe zouttong zien. Het 1D model laat een geleidelijk afnemende saliniteit zien. Als niet de saliniteit, maar de lengte van zoutindringing als maat voor de vergelijking wordt genomen, lijkt wel een vergelijkbaarheid af te leiden. De zoutindringingslengte is bepalend voor het wel of niet lekken van zout naar het IJsselmeer.



Figuur 2.11 Vergelijking van verschillende dispersiecoëfficiënten in 1D SOBEK met Delft3D-FLOW voor de basisvariant

Uit Figuur 2.11 lijkt voor dit tijdstip een dispersie van $100 \text{ m}^2/\text{s}$ tot een redelijke vergelijking te leiden. Deze hoge dispersie leidt echter tot een erg langgerekt profiel, waardoor het 1D model minder gevoelig is voor veranderingen in ontwerpkenmerken van de vismigratierivier. In Figuur 2.10 is voor een dispersie van $50 \text{ m}^2/\text{s}$ de maximale dieptegemiddelde saliniteit gedurende de laatste 14 dagen van de simulatieperiode getoond. De grenswaarde van 1 ppt saliniteit resulteert voor het 1D model in een zoutindringingslengte van 2800 m, wat – gezien de mate van nauwkeurigheid – goed overeenkomt met de zoutindringingslengte van 2500 m in het 3D model.

2.6.2 Definitie kentallen voor vergelijking varianten

De vergelijking van varianten wordt op basis van kentallen gedaan die aansluiten bij de (gewenste) functionaliteit van de vismigratierivier voor wat betreft water- en zouttransport. De kentallen worden berekend over een deel van de simulatieperiode om de invloed van eventuele inspeleeffecten te vermijden. Bovendien wordt met de geselecteerde periode van 14 dagen aangesloten bij een typische springtij-doodtijcyclus.

Deel vismigratierivier	Locatie	Kental
IJsselmeerzijde	Bij de Afsluitdijk	- Waterstandsfluctuatie / Getijslag (m) - Gemiddelde waterstand (m NAP)
	Op 3 km van de Afsluitdijk	- Getijslag (m) - Gemiddelde waterstand (m NAP) - Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)
	Overig	Maximale zoutindringingslengte (m vanaf Afsluitdijk)
Koker	In de koker	- Maximum debiet naar IJsselmeer (m³/s) - Maximum debiet naar Waddenzee (m³/s) - Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m³/s) - Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m³/s) - Lokstroom naar Waddenzee (m³/s) % van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is % van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is
Waddenzeezijde	Bij de Afsluitdijk	- Getijslag (m) - Gemiddelde waterstand (m NAP)

- De getijslag wordt berekend als het verschil tussen de 5-percentiel en de 95-percentiel waterstand. De getijslag geeft onder andere informatie over het areaal intergetijdengebied.
- Het percentage van de tijd dat de stroomsnelheid lager is dan 1 m/s of 2 m/s geeft informatie over de passeerbaarheid voor vissoorten. Voor de koker wordt het percentage berekend over de periode dat de koker open is.
- Het gemiddeld debiet door de koker naar het IJsselmeer of de Waddenzee zijn gemiddeld over de hele periode, waarbij het debiet gelijk is aan 0 m³/s als de koker gesloten is of als het debiet de tegengestelde richting op is (dus als de debietrichting naar de Waddenzee is, wordt voor het debiet naar het IJsselmeer 0 m³/s gehanteerd voor het berekenen van het gemiddelde). Vermenigvuldigd met 44.700 seconden geeft dit het volume in m³ wat gemiddeld per getijdeperiode van 12,4 uur de Vismigratierivier in- en uitstroomt

$$\text{Gemiddeld debiet} = \frac{\sum_{i=1}^n \max(\text{debiet}_i, 0)}{n} \quad \text{met } n = \text{aantal tijdstappen}$$

2.6.3 Validatie vergelijkbaarheid 1D model en 3D model

Om te kijken of de aanpak voor het bepalen van de zoutindringingslengte voor andere ontwerpen geldt, is de vergelijking uitgevoerd ook voor een kleinere koker (variant 0_1: 10 m² in plaats van 20 m²) en voor een ondiepere bodem aan de IJsselmeerzijde (variant 0_9: -3 m NAP in plaats van -4 m NAP). De beschrijving van deze varianten is opgenomen in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Overzicht van modelberekeningen voor de validatie vergelijkbaarheid van het 1D en het 3D model. Met de grijze schakering wordt aangegeven op welke parameter de variant verschilt van de basisvariant

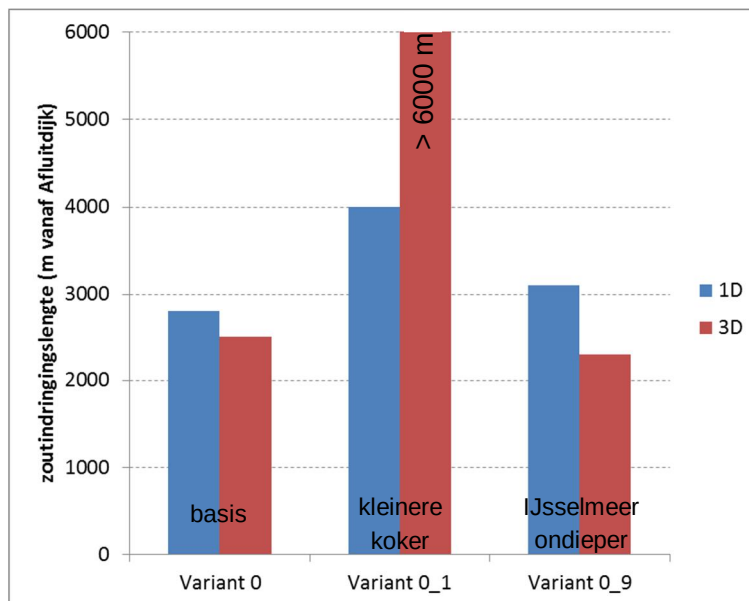
	Kenmerk	MODEL	IJsselmeerzijde						Koker				Waddenzeezijde				
			breedte (m) op 0 m NAP	talud	bodemligging (m NAP)	lengte (km)	ruwheid Manning (s/m ^{1/3})	Klepstanden kunstwerk	Oppervlakt (m2)	Diepte onderzijde (m NAP)	ruwheid Manning (s/m ^{1/3})	Openingsduur (%)	breedte (m) op 0 m NAP	talud	bodemligging (m NAP)	lengte (km)	
Variant 0	Basisvariant	1D	25	recht	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 0_1	Kleinere koker	1D	25	recht	-4	6	0.024	open	10	-4	0.013	59%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	1D	25	recht	-3	6	0.024	open	20	-3	0.013	59%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 0	Basisvariant	3D	25	recht	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	57%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 0_1	Kleinere koker	3D	25	recht	-4	6	0.024	open	10	-4	0.013	57%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	3D	25	recht	-3	6	0.024	open	20	-3	0.013	57%	25	recht	-4	1	0.024

Tabel 2.3 Berekende kentallen voor de vergelijking van het 1D en het 3D model

			IJsselmeerzijde						Koker						Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker						Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale zoutindringings-lengte (1,0 ppt, afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant 0	Basisvariant	1D	0.31	-0.28	0.22	-0.26	0.5	2800	24	-49	2.0	-12.7	10.7	41%	86%	1.87	-0.13
Variant 0_1	Kleinere koker	1D	0.21	-0.26	0.17	-0.25	0.3	3400	14	-26	1.1	-6.7	5.5	35%	83%	1.91	-0.13
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	1D	0.47	-0.32	0.29	-0.28	0.7	3100	20	-42	1.7	-11.1	9.4	46%	98%	1.88	-0.13
Variant 0	Basisvariant	3D	0.37	-0.29	0.25	-0.30	0.6	2500	31	-58	2.5	-16.1	13.6	24%	59%	1.80	-0.12
Variant 0_1	Kleinere koker	3D	0.21	-0.25	0.15	-0.27	0.4	>6000	19	-33	1.4	-9.2	7.8	18%	53%	1.88	-0.14
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	3D	0.64	-0.34	0.34	-0.33	0.7	2300	29	-44	2.0	-12.5	10.5	38%	84%	1.86	-0.13

De berekende kentallen zijn opgenomen in Tabel 2.3. De dispersiecoëfficiënt in het 1D model is afgeleid voor de basisvariant 0, waarbij de zoutindringingslengte als maat is genomen. Voor de basisvariant komt de zoutindringingslengte neer op 2500 m volgens het 3D model en 2800 m in het 1D model.

Bij een kleinere koker (variant 0_1) berekent het 3D een veel langere zoutindringingslengte dan het 1D model. De aanpak voor de vergelijking van 1D en 3D gaat dus niet op bij een kleinere koker. Omdat in paragraaf 2.4 al is geconstateerd dat een kleinere koker ongunstig is als ontwerpcriterium voor de vismigratierivier, wordt geen andere aanpak afgeleid.



Figuur 2.12 Vergelijking van maximale zoutindringingslengte voor verschillende 1D en 3D modelberekeningen

Bij een ondiepere IJsselmeerzijde maar een gelijke koker (variant 0_9), is de maximale zoutindringingslengte groter in het 1D model dan in het 3D model, 3100 m ten opzichte van 2300 m. In het 1D model neemt de zoutindringingslengte dus toe als de IJsselmeerzijde ondieper wordt, terwijl de zoutindringingslengte in het 3D model juist iets afneemt. Dit is het gevolg van de wijze waarop het verticale zoutprofiel wordt meegenomen. Hoewel de vergelijkbaarheid niet optimaal is, zal deze voor de scenarioberekeningen wel gehanteerd (kunnen) worden. Bij de interpretatie van de 1D modelresultaten met een 20 m² koker moet rekening gehouden worden met de volgende uitgangspunten:

- Het 1D model geeft waarschijnlijk een overschatting (worst-case) van de zoutindringingslengte.
- Het 1D model onderschat de zoutvariatie in de vismigratierivier en dan met name de maximale saliniteit.

De vergelijking van het 1D en het 3D model geeft aan dat volledige 3D modellering essentieel is voor het definitief ontwerp.

3 Eerste iteratie: scenario's water- en zouttransport

3.1 Varianten met het 1D model

Door DLG zijn verschillende varianten gedefinieerd. Deze varianten zijn beschreven in (Leeuw, 2014 – opgenomen in Bijlage A). Voor dit modelonderzoek zijn de varianten vertaald naar kenmerkende lengte, breedte en diepte. Het maakt voor de modellering niet uit of de lengte gevormd wordt door een meanderende rivier of door een recht kanaal.

Tabel 3.1 geeft het overzicht van de uitgevoerde 1D berekeningen. Variant 1A uit de notitie Reikwijdte en Detail is als uitgangspunt genomen. Per scenario wordt een of maximale twee invoerparameters gewijzigd ten opzichte van deze variant 1A, zodat het effect van de wijziging direct gezien kan worden. Tabel 3.2 vat in kentallen de 1D modelresultaten samen.

Tabel 3.1 Overzicht van berekende varianten met het 1D model

	Kenmerk	MODEL	IJsselmeerzijde						Koker				Waddenzeezijde				
			breedte (m) op 0 m NAP	talud	bodemligging (m NAP)	lengte (km)	ruwheid Manning ($s/m^{1/3}$)	Klepstanden kunstwerk	Oppervlak (m ²)	Diepte onderzijde (m NAP)	ruwheid Manning ($s/m^{1/3}$)	Openingsduur (%)	breedte (m) op 0 m NAP	talud	bodemligging (m NAP)	lengte (km)	ruwheid Manning ($s/m^{1/3}$)
Variant 0	Basisvariant	1D	25	recht	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 0_1	Kleinere koker	1D	25	recht	-4	6	0.024	open	10	-4	0.013	59%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	1D	25	recht	-3	6	0.024	open	20	-3	0.013	59%	25	recht	-4	1	0.024
Variant 1A	Variant 1A	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_1	Kleinere koker	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	10	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_2	Onderkant koker -3 m NAP	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	20	-3	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_3	IJsselmeer zijde 3 m breder	1D	28	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_4	Talud 1:3 IJsselmeerzijde	1D	25	1:3	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_5	Talud 1:1 Waddenzeezijde	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	1:1	-4	1	0.024
Variant 1A_6	Smallere Waddenzeezijde	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	25	1:1	-4	1	0.024
Variant 1A_7	Koker half uur langer open	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	63%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_8	Koker uur langer open	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	67%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_9	IJsselmeerzijde ondieper	1D	25	1:1	-3	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_10	IJsselmeerzijde dieper	1D	25	1:1	-5	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_11	Grotere koker	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	40	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_12	Ruwere koker	1D	25	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.02	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1A_13	Ruwere IJsselmeerzijde	1D	25	1:1	-4	6	0.03	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 1B	Smallere IJsselmeerzijde	1D	10	1:1	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024
Variant 2B	Intergetijdegebied IJsselmeerzijde	1D	24.4 op -0,3 m NAP 64.4 op 0 m NAP	1:1 1:10 0	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	59%	50	recht	-4	1	0.024

3.1.1 Algemeen

De bespreking van de resultaten wordt gericht op de IJsselmeerzijde. Uit Tabel 3.2 blijkt dat de verschillen van getijslag aan de Waddenzeezijde tussen de varianten minimaal is. Gezien de relatief korte lengte (1 km) en de grote getijslag op de Waddenzee heeft de Waddenzeezijde een korte verblijftijd en zijn geometrische aanpassingen van ondergeschikt belang voor de waterbeweging en zouttransport aan de Waddenzeezijde.

Tabel 3.2 Berekende kentallen voor de varianten met het 1D model

		MODEL	IJsselmeerzijde						Koker							Waddenzeezijde	
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker							Bij Afsluitdijk		
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1.0 ppt, afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant 1A	Variant 1A	1D	0.37	-0.29	0.25	-0.26	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.0	43%	91%	1.91	-0.13
Variant 1A_1	Kleinere koker	1D	0.22	-0.26	0.17	-0.25	0.4	3800	13	-25	1.1	-6.5	5.4	36%	85%	1.91	-0.14
Variant 1A_2	Onderkant koker -3 m NAP	1D	0.37	-0.29	0.25	-0.26	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.0	43%	91%	1.91	-0.13
Variant 1A_3	IJsselmeerzijde 3 m breder	1D	0.33	-0.28	0.23	-0.26	0.6	2900	24	-48	2.0	-12.4	10.3	42%	88%	1.91	-0.13
Variant 1A_4	Talud 1:3 IJsselmeerzijde	1D	0.74	-0.37	0.37	-0.29	0.8	3900	22	-32	1.4	-8.4	7.1	58%	100%	1.91	-0.14
Variant 1A_5	Talud 1:1 Waddenzeezijde	1D	0.37	-0.29	0.25	-0.27	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.1	43%	91%	1.90	-0.13
Variant 1A_6	Smallere Waddenzeezijde	1D	0.36	-0.29	0.25	-0.27	0.6	3000	21	-46	1.8	-12.1	10.2	44%	91%	1.85	-0.13
Variant 1A_7	Koker half uur langer open	1D	0.39	-0.29	0.26	-0.26	0.6	4800	31	-46	3.2	-11.9	8.7	34%	92%	1.90	-0.13
Variant 1A_8	Koker uur langer open	1D	0.41	-0.29	0.27	-0.26	0.6	>6000	34	-46	4.6	-11.8	7.2	33%	92%	1.90	-0.14
Variant 1A_9	IJsselmeerzijde ondieper	1D	0.57	-0.34	0.32	-0.28	0.7	3300	22	-38	1.6	-10.1	8.5	49%	100%	1.91	-0.13
Variant 1A_10	IJsselmeerzijde dieper	1D	0.31	-0.27	0.22	-0.26	0.5	2800	26	-49	2.1	-12.7	10.6	40%	86%	1.91	-0.13
Variant 1A_11	Grotere koker	1D	0.72	-0.36	0.39	-0.29	0.9	3800	35	-67	2.8	-17.9	15.1	55%	100%	1.90	-0.13
Variant 1A_12	Ruwere koker	1D	0.35	-0.29	0.24	-0.26	0.6	3000	22	-44	1.8	-11.2	9.4	46%	96%	1.91	-0.13
Variant 1A_13	Ruwere IJsselmeerzijde	1D	0.44	-0.31	0.27	-0.27	0.6	3000	23	-43	1.8	-11.2	9.4	45%	96%	1.91	-0.13
Variant 1B	Smallere IJsselmeerzijde	1D	0.70	-0.36	0.38	-0.29	1.0	4200	17	-34	1.4	-9.0	7.6	55%	100%	1.91	-0.13
Variant 2B	Intergetijdegebied IJsselmeer	1D	0.25	-0.27	0.19	-0.25	0.4	2700	25	-50	2.1	-12.9	10.8	36%	85%	1.91	-0.13
Variant 0	Basisvariant	1D	0.31	-0.28	0.22	-0.26	0.5	2800	24	-49	2.0	-12.7	10.7	41%	86%	1.87	-0.13
Variant 0_1	Kleinere koker	1D	0.21	-0.26	0.17	-0.25	0.3	3400	14	-26	1.1	-6.7	5.5	35%	83%	1.91	-0.13
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	1D	0.47	-0.32	0.29	-0.28	0.7	3100	20	-42	1.7	-11.1	9.4	46%	98%	1.88	-0.13

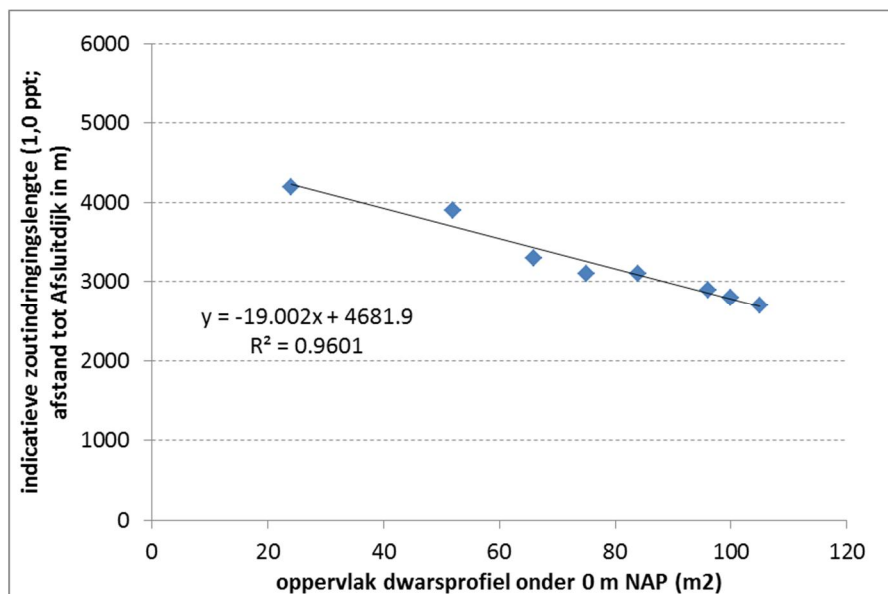
3.1.2 Effect van dwarsprofiel IJsselmeerzijde (bij een 20 m² koker)

In de 1D scenario's is er een sterke relatie tussen de zoutindringingslengte en het oppervlak van het dwarsprofiel aan de IJsselmeerzijde (of vermenigvuldigd met de lengte = met het watervolume van de vismigratierivier). In Tabel 3.3 zijn de dwarsdoorsneden weergegeven voor varianten waartussen alleen het dwarsprofiel verschilt en alle andere parameters gelijk zijn. Figuur 3.1 geeft de relatie tussen dwarsdoorsnede en maximale zoutindringingslengte met een correlatiecoëfficiënt (R^2) van 0,96 weer.

Tabel 3.3 Varianten die alleen verschillen in het oppervlak van het dwarsprofiel aan de IJsselmeerkant (1D model)

		Oppervlak dwarsprofiel IJsselmeerkant onder 0 m NAP	IJsselmeerzijde						Koker						Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker						Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1,0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant 1A	Variant 1A	84	0.37	-0.29	0.25	-0.26	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.0	43%	91%	1.91	-0.13
Variant 1A_3	IJsselmeerzijde 3 m breder	96	0.33	-0.28	0.23	-0.26	0.6	2900	24	-48	2.0	-12.4	10.3	42%	88%	1.91	-0.13
Variant 1A_4	Talud 1:3 IJsselmeerzijde	52	0.74	-0.37	0.37	-0.29	0.8	3900	22	-32	1.4	-8.4	7.1	58%	100%	1.91	-0.14
Variant 1A_9	IJsselmeerzijde ondieper	66	0.57	-0.34	0.32	-0.28	0.7	3300	22	-38	1.6	-10.1	8.5	49%	100%	1.91	-0.13
Variant 1A_10	IJsselmeerzijde dieper	100	0.31	-0.27	0.22	-0.26	0.5	2800	26	-49	2.1	-12.7	10.6	40%	86%	1.91	-0.13
Variant 1B	Smallere IJsselmeerzijde	24	0.70	-0.36	0.38	-0.29	1.0	4200	17	-34	1.4	-9.0	7.6	55%	100%	1.91	-0.13
Variant 2B	Intergetijdegebied IJsselmeer	105	0.25	-0.27	0.19	-0.25	0.4	2700	25	-50	2.1	-12.9	10.8	36%	85%	1.91	-0.13
Variant 0	Basisvariant	100	0.31	-0.28	0.22	-0.26	0.5	2800	24	-49	2.0	-12.7	10.7	41%	86%	1.87	-0.13
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	75	0.47	-0.32	0.29	-0.28	0.7	3100	20	-42	1.7	-11.1	9.4	46%	98%	1.88	-0.13

In het 1D model resulteert een kleiner dwarsprofiel in een langere maximale zoutindringingslengte. Tussen het minimale (24 m^2) en maximale (105 m^2) dwarsprofiel verschilt de zoutindringingslengte 1.500 m, hetgeen aangeeft dat de afhankelijkheid niet heel erg groot is. Bij de berekende varianten is 4.200 m de maximale zoutindringingslengte. Voor de meeste berekende varianten – met een dwarsprofiel tussen 66 m^2 en 105 m^2 – is de zoutindringingslengte circa 3.000 m. Dit geeft aan dat een 6 km lange vismigratierivier aan de IJsselmeerzijde (ruim) voldoende is om zouttransport naar het IJsselmeer te voorkomen.



Figuur 3.1 Relatie tussen oppervlak van het dwarsprofiel aan de IJsselmeerzijde en de maximale zoutindringingslengte in het 1D model

De 1D berekeningen laten zien dat de lokstroom beperkt afhankelijk is voor variatie in het dwarsprofiel. In de meeste gevallen is de lokstroom circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij het kleinste dwarsprofiel (24 m^2) neemt de lokstroom af tot $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Een kleiner dwarsprofiel zorgt voor meer wrijving, waardoor water moeilijker aanstroomt of wegstroomt.

Geconstateerd wordt dat het oppervlak van het dwarsprofiel een belangrijk ontwerpcriterium is. Beseffende dat dichtheidsstroming in het 1D model nagebootst wordt door de dispersiecoëfficiënt, wordt het noodzakelijk geacht de in Figuur 3.1 getoonde relatie met het 3D model te toetsen. Deze toetsing is in paragraaf 3.2 opgenomen.

3.1.3 Effect van grootte van de koker (1D varianten 1A, 1A_1 en 1A_11)

Het 1D model berekent dat zowel een 10 m^2 koker als een 40 m^2 koker leiden tot een langere zoutindringingslengte dan bij de basisvariant met een 20 m^2 koker (Tabel 3.4). Dit geeft aan dat er een niet lineaire relatie is tussen de grootte van de koker en de aan- en afvoer van zout water. Een grotere koker resulteert – bij verder gelijke parameters – in een groter debiet en dus een grotere aanvoer van zout naar het IJsselmeer en tegelijkertijd in een groter debiet en een grotere afvoer van zout terug naar de Waddenzee. De balans tussen aanvoer en afvoer bepaalt de zoutindringingslengte. Om de zoutindringingslengte te beperken zou de openingsduur van de vloedinstroming verkort moeten worden.

Ook voor de grootte van de koker wordt een extra toetsing met het 3D model uitgevoerd.

De getijslag, de stroomsnelheden en de debieten nemen toe als de koker groter wordt. De toename is niet lineair, dat wil zeggen dat een twee keer zo grootte koker niet resulteert in een twee keer zo groot debiet, etc. Dit komt omdat het waterstandsverschil tussen Waddenzee en IJsselmeer dat de sturende factor is voor water- en zouttransport, verandert als de grootte van de koker verandert. Bij een grotere koker neemt het waterstandsverschil af, waardoor het debiet minder dan evenredig toeneemt met de grootte.

Tabel 3.4 Varianten die alleen verschillen in de grootte van de koker

		MODEL	Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker							Bij Afsluitdijk		
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)		Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1.0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)
Variant 1A	Variant 1A	1D	0.37	-0.29	0.25	-0.26	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.0	43%	91%	1.91	-0.13
Variant 1A_1	Kleinere koker	1D	0.22	-0.26	0.17	-0.25	0.4	3800	13	-25	1.1	-6.5	5.4	36%	85%	1.91	-0.14
Variant 1A_11	Grotere koker	1D	0.72	-0.36	0.39	-0.29	0.9	3800	35	-67	2.8	-17.9	15.1	55%	100%	1.90	-0.13

3.1.4 Effect van openingsduur (varianten 1A, 1A_7 en 1A_8)

Een langere openingsduur leidt onmiddellijk tot een aanzienlijk langere zoutindringingslengte (1A_7 en 1A_8). Dit geeft aan dat sturing van de openingsduur noodzakelijk is zoutindringing naar het IJsselmeer te voorkomen, en ook dat sturing nauwkeurig zal moeten zijn.

Tabel 3.5 Varianten die alleen verschillen in de openingsduur van de koker

		MODEL	IJsselmeerzijde						Koker						Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker						Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1,0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant 1A	Variant 1A	1D	0.37	-0.29	0.25	-0.26	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.0	43%	91%	1.91	-0.13
Variant 1A_7	Koker half uur langer open	1D	0.39	-0.29	0.26	-0.26	0.6	4800	31	-46	3.2	-11.9	8.7	34%	92%	1.90	-0.13
Variant 1A_8	Koker uur langer open	1D	0.41	-0.29	0.27	-0.26	0.6	>6000	34	-46	4.6	-11.8	7.2	33%	92%	1.90	-0.14

3.1.5 Effect van intergetijdengebied (varianten 1A, 2B)

Een intergetijdengebied (variant 2B) met een 1:100 hellingshoek boven -0,3 m NAP reduceert de getijslag bij de Afsluitdijk van 0,37 m naar 0,25 m (Tabel 3.6). Op 3 km van de Afsluitdijk reduceert de getijslag van 0,25 m naar 0,19 m. Door het flauwe talud kan het intergetijdengebied een groot deel van het getijvolume herbergen, waardoor de getijslag afneemt.

Op de overige parameters heeft een intergetijdengebied relatief weinig invloed. De zoutindringingslengte neemt iets af, terwijl de debieten door de koker iets toenemen. Door de hogere debieten door de koker neemt het percentage van de tijd dat de stroomsnelheid in de koker lager dan 1 m/s of 2 m/s is af.

Tabel 3.6 Variant met intergetijdengebied

			IJsselmeerzijde						Koker						Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker						Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1,0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant 1A	Variant 1A	1D	0.37	-0.29	0.25	-0.26	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.0	43%	91%	1.91	-0.13
Variant 2B	Intergetijdengebied IJsselmeer	1D	0.25	-0.27	0.19	-0.25	0.4	2700	25	-50	2.1	-12.9	10.8	36%	85%	1.91	-0.13

3.1.6 Effect van ruwheid (varianten 1A, 1A_11, 1A_12)

De ruwheid (volgens Manning) is een invoerparameter die bepaalt hoeveel weerstand het water ondervindt van de omgeving. De ruwheid is vooral van belang bij kleine diepte of smalle breedte (wandruwheid). Bij grote diepte of breedte wordt de ruwheid onbelangrijk. Tabel 3.7 toont de 1D berekeningsresultaten waarbij de ruwheid van de koker is verhoogd tot 'ruw beton' in tegenstelling tot 'glad beton' in de basisvariant. In variant 1A_13 is de ruwheid aan de IJsselmeerzijde verhoogd ten opzichte van een zandig estuarium in de basisvariant.

Tabel 3.7 laat zien dat de ruwheid een relatief beperkt invloed heeft. Het gemiddeld debiet naar de Waddenzee en daarmee de lokstroom worden iets kleiner. De getijslag bij de Afsluitdijk wordt grotere bij een ruwere IJsselmeerzijde, maar op 3 km is het effect nog beperkt.

Tabel 3.7 Varianten die alleen verschillen in de ruwheid van de koker of de ruwheid aan de IJsselmeerzijde

		MODEL	IJsselmeerzijde						Koker						Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker						Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	Indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1,0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant 1A	Variant 1A	1D	0.37	-0.29	0.25	-0.26	0.6	3100	23	-46	1.9	-12.0	10.0	43%	91%	1.91	-0.13
Variant 1A_12	Ruwere koker	1D	0.35	-0.29	0.24	-0.26	0.6	3000	22	-44	1.8	-11.2	9.4	46%	96%	1.91	-0.13
Variant 1A_13	Ruwere IJsselmeerzijde	1D	0.44	-0.31	0.27	-0.27	0.6	3000	23	-43	1.8	-11.2	9.4	45%	96%	1.91	-0.13

3.2 Extra verificatie met het 3D model

Uit de met het 1D model berekende varianten is naar voren gekomen dat het dwarsprofiel en de grootte van de koker de belangrijkste geometrische parameters zijn. Vanwege de onderkende complexe omgang met dichtheidsstroming en dispersiecoëfficiënt is besloten om deze twee aspecten met het 3D model te verifiëren. Een eveneens beschikbare 3D modelberekening waarin de onderkant van de koker op -1 m NAP is gelegd, wordt voor de volledigheid ook in deze paragraaf gepresenteerd.

3.2.1 Effect van dwarsprofiel IJsselmeerzijde

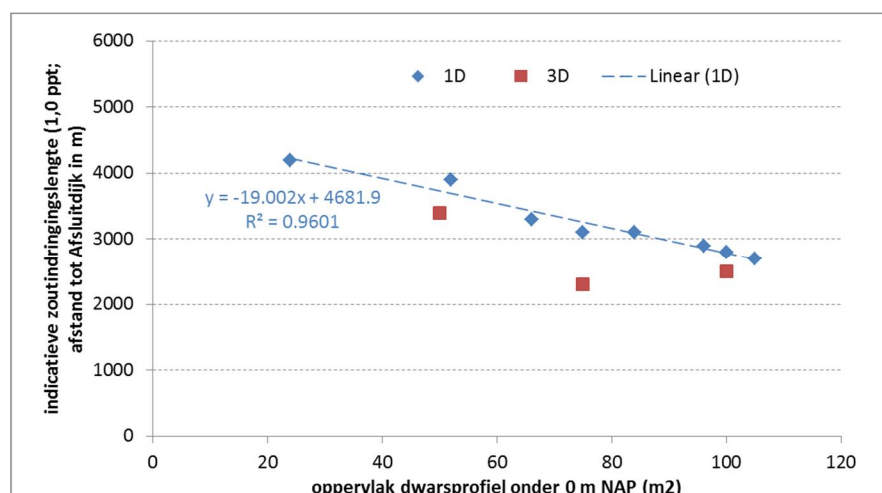
Tabel 3.8 toont de met het 3D model berekende kentallen voor verschillende dwarsprofielen van de vismigratierivier. De basisvariant heeft een dwarsprofiel van 100 m² onder 0 m NAP. In variant 0_9 is het dwarsprofiel van 75 m² gerealiseerd door de bodem te verondiepen van -4 m NAP tot -3 m NAP. In variant 0_15 is het dwarsprofiel van 50 m² gerealiseerd door de breedte te reduceren van 25 m naar 12,5. In Figuur 3.2 zijn de met het 3D model berekende zoutindringingslengtes toegevoegd aan Figuur 3.1.

Uit de tabel en de figuur blijkt dat wanneer dichtheidsstroming in het 3D model wordt meegenomen, de zoutindringingslengte niet dezelfde vrijwel lineaire relatie met het dwarsprofiel vertoont als in het 1D model. Een 75 m² dwarsprofiel resulteert in een iets kortere zoutindringingslengte dan in de basisvariant. Een nog kleiner dwarsprofiel van 50 m² resulteert wel in een langere zoutindringingslengte.

In tegenstelling tot in het 1D model maakt het in het 3D model uit of het dwarsprofiel in de diepte of in de breedte wordt aangepast. Uit variant 0_9 blijkt dat het ondieper maken een gunstig effect heeft op de zoutindringingslengte. Deels is dit te verklaren door het lagere debiet naar het IJsselmeer. Een belangrijke bijdrage is echter ook dat verondieping ervoor zorgt dat het verticale profiel minder dominant is en dat eventuele stratificatie effectiever door de stroming afgebroken wordt. Bij variant 0_15 die wel smaller maar net zo diep is als de basisvariant, is de dichtheidsstroming van zout water nog steeds belangrijk. Het kleinere dwarsprofiel met vrijwel gelijke debieten als in variant 0_9 resulteert dan in een langere zoutindringingslengte.

Tabel 3.8 Varianten die alleen verschillen in het oppervlak van het dwarsprofiel aan de IJsselmeerkant (3D model)

		Oppervlak dwarsprofiel IJsselmeerkant onder 0 m NAP	IJsselmeerzijde						Koker							Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker							Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)		Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)		Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1,0 ppt. afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)
Variant 0	Basisvariant	100	0.37	-0.29	0.25	-0.30	0.6	2500		31	-58	2.5	-16.1	13.6	24%	59%	1.80	-0.12
Variant 0_9	IJsselmeerzijde ondieper	75	0.64	-0.34	0.34	-0.33	0.7	2300		29	-44	2.0	-12.5	10.5	38%	84%	1.86	-0.13
Variant0 15	IJsselmeerzijde smaller	50	0.79	-0.32	0.41	-0.34	0.9	3400		24	-40	1.9	-11.1	9.2	46%	100%	1.87	-0.13



Figuur 3.2 Relatie tussen oppervlak van het dwarsprofiel aan de IJsselmeerzijde en de maximale zoutindringingslengte in het 1D model en in het 3D model

3.2.2 Effect van grotere koker

Het 3D model laat zien dat een 6 km lange IJsselmeerzijde niet voldoende is om zoutlekkage naar het IJsselmeer te voorkomen bij een 10 m² grote koker. Bij een 40 m² grote koker neemt de zoutindringingslengte wel toe ten opzichte van de basisvariant, maar blijft ruim binnen de 6 km lange IJsselmeerzijde.

Tabel 3.9 Varianten die alleen verschillen in de grootte van de koker (3D model)

		MODEL	IJsselmeerzijde							Koker							Waddenzeezijde	
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker							Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale zoutindringings-lengte (1.0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	
Variant 0	Basisvariant	3D	0.37	-0.29	0.25	-0.30	0.6	2500	31	-58	2.5	-16.1	13.6	24%	59%	1.80	-0.12	
Variant 0_1	Kleinere koker	3D	0.21	-0.25	0.15	-0.27	0.4	>6000	19	-33	1.4	-9.2	7.8	18%	53%	1.88	-0.14	
Variant 0_11	Grotere koker	3D	0.71	-0.29	0.36	-0.34	0.9	3300	41	-78	2.1	-22.4	20.3	45%	100%	1.76	-0.11	

3.2.3 Effect van onderkant koker (3D varianten 0 en 0_14)

Het is essentieel dat de onderkant van de koker en de bodemligging aan de IJsselmeerzijde vloeiend op elkaar aansluiten. Wanneer dat niet gebeurt (variant 0_14) ontstaat een drempel die het terugspoelen van zout naar de Waddenzee hindert. De zoutindringingslengte neemt dan enorm toe. De lokstroom neemt af, ook omdat de koker niet permanent volledig onder water staat.

Tabel 3.10 Variant waarbij de onderkant van de koker op -1 m NAP ligt (3D model)

		MODEL	IJsselmeerzijde						Koker						Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker						Bij Afsluitdijk			
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1,0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant 0	Basisvariant	3D	0.37	-0.29	0.25	-0.30	0.6	2500	31	-58	2.5	-16.1	13.6	24%	59%	1.80	-0.12
Variant0_14	Onderkant koker -1 m NAP	3D	0.18	-0.25	0.13	-0.27	0.2	>>6000	17	-10	1.2	-3.2	2.0	100%	100%	1.89	-0.14

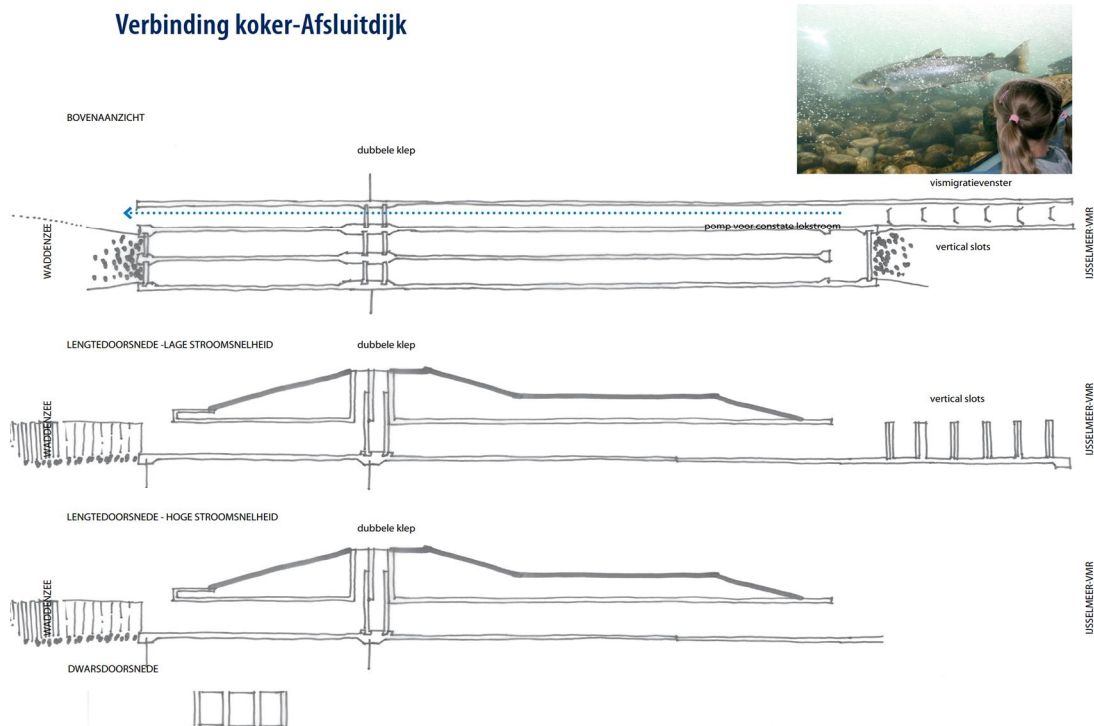
4 Tweede iteratie: scenario's water- en zouttransport

4.1 Inleiding

Van alle functionele wensen (§1.2) is tijdens de 1^e iteratie relatief veel aandacht besteed aan het voorkomen van zoutlekage naar het IJsselmeer. Toen de modelresultaten lieten zien dat dat goed mogelijk is, nam de aandacht toe voor de overige, vooral kwalitatieve functionele wensen.

Uit de (model)resultaten van de eerste iteratie werd geconcludeerd dat:

- De zoutindringingslengte beperkt blijft tot maximaal 3 tot 3,5 km, waardoor het niet nodig is om de vismigratierivier 6 km lang te maken aan de IJsselmeerzijde. In het ontwerp is de lengte aangepast naar 4 km.
- Een ondiepere vismigratierivier (-3 m NAP in plaats van -4 m NAP) heeft een gunstig, beperkend effect op de zoutindringingslengte. In het ontwerp is de diepte aangepast naar -3 m NAP.
- De stroomsnelheden in de koker werden te hoog bevonden voor vismigratie. Door Grontmij is daarom een aparte passage ontworpen waarin met behulp van vertical slots de stroomsnelheid gereduceerd wordt tot maximaal 0,5 m/s in de bredere delen (Figuur 4.1). Ter plekke van de daadwerkelijke slots kan de stroomsnelheid hoger zijn, waar vissen door middel van hun sprintsnelheid kunnen passeren. Het idee is om deze passage permanent open te laten staan voor vispassage.



Figuur 4.1 Schets van de verbinding door de Afsluitdijk met naast twee grote kokers een derde koker voorzien van vertical slots (uit Grontmij presentatie op 2^e schetsdag 16 april 2014)

- In de oorspronkelijke ontwerpen werd uitgegaan van een permanent verdrongen koker met als voordeel dat het debiet dan maximaal is (omdat het gehele doorstroomoppervlak wordt gebruikt). Tijdens het ontwerpproces is het ontwerp gewijzigd naar een niet-verdrongen koker, ofwel een koker waarin minimaal een deel van de tijd ook lucht aanwezig is.
- De wens om intergetijdengebieden te creëren aan de IJsselmeerzijde is prominenter naar voren gekomen, onder andere vanuit landschappelijke invulling. Het inzetten van een afsluiting aan de in/uitstroomopening naar het IJsselmeer biedt de mogelijkheid om het water op een hoger peil vast te houden. De werkbaarheid van een dergelijke afsluiter is tijdens de 1^e iteratie niet onderzocht.
- Alle scenario's rekenen tot nu toe met een hoge saliniteit van 30 psu aan de Waddenzeezijde. Vanuit een worst-case perspectief voor zoutlekage is dat een goede aanname. In werkelijkheid is de saliniteit meestal lager en in de spuirom is de saliniteit tijdens en na het spuien gedurende langere tijd zoet tot vrijwel zoet (zie bijvoorbeeld Deltares, 2014). Voor de dagelijkse situatie moet derhalve niet de worst-case maar een realistisch voorkomende saliniteit gehanteerd worden.

Bovenstaande conclusies en overwegingen hebben in overleg met DLG en met Grontmij geleid tot een tweede set varianten die met het 1D model en het 2DV model zijn doorgerekend. De varianten worden kort beschreven in Tabel 4.1 en de modelinstellingen worden samengevat in Tabel 4.2

Tabel 4.1 Korte beschrijving van varianten die in de 2^e iteratie zijn beschouwd

ID	Titel en korte omschrijving	1D	3D
A	Herziene basisvariant <i>De herziene basisvariant van de VMR heeft een lengte van 4 km aan de IJsselmeerzijde en een diepte van -3 m NAP. Deze herziene basisvariant is de nieuwe referentie waarmee de variaties vergeleken worden.</i>	Ja	Ja
B	Niet-verdrongen koker <i>Het ontwerp van de kokerdoorlaat door de Afsluitdijk is geëvolueerd naar een niet-verdrongen koker, dat wil zeggen een koker die een (groot) deel van de tijd lucht bevat. De dimensies van deze koker zijn 8 m breed en 4 meter hoog. Bij een bodemligging van -3 m NAP, ligt de bovenzijde van de koker op +1 m NAP. Alleen bij springtij en/of bij windopzet is de waterstand aan de Waddenzeezijde hoger dan +1 m NAP. In tegenstelling tot een verdrongen koker is het natte doorstroomoppervlak afhankelijk van de waterstand: bij -1 m NAP 16 m², bij NAP 24 m² en bij +1 m NAP 32 m². Het effect van deze niet-verdrongen koker ten opzichte van een verdrongen koker met een doorstroomoppervlak van 20 m² zal met het 1D model verkend worden.</i>	Ja	Nee
C	Vertical slots passage <i>Omdat de stroomsnelheid in de koker (te) vaak te hoog is voor vispassage, wordt een aparte koker met zogenaamde vertical slots voorzien. De vertical slots zorgen voor extra weerstand waardoor de stroomsnelheid lager blijft. De voorziene koker heeft een breedte van 3 m en een hoogte van 4 m. De breedte van de vertical slots is 1 m, zodat het natte doorstroomoppervlak bij NAP gelijk is aan 3 m². Het is de bedoeling dat de vertical slots passage permanent open staat.</i> <i>Een gedetailleerd ontwerp van de vertical slots passage, kan niet zonder vrij aanzienlijke extra inspanning in de 1D en 2DV modellen worden opgenomen. De modellen richten zich daarom op het resultaat van het ontwerp, namelijk een maximale stroomsnelheid van circa 0,5 m/s en een maximaal debiet van circa 2 m³/s.</i>	Ja	Nee

	<i>Het 1D model zal hierop worden afgeregeld door de ruwheidsparemeter te verhogen.</i>		
D	Kortere openingstijd koker en vertical slots <i>De 4 km lengte van de VMR is afgestemd op de berekende zoutindringingslengte bij gebruik van de grote koker. Verwacht wordt dat met een permanent open vertical slots passage (variant 3c) de zoutindringingslengte langer zal zijn dan 4 km en dat dus de openingstijd van de grote koker beperkt moet worden. Verlenging van de VMR is geen optie.</i> <i>In varianten D en E wordt in twee stappen verkend wat het effect van kortere openingstijd is met als maximum dat er door de grote koker geen water meer van de Waddenzee naar het IJsselmeer stroomt. Alleen via de vertical slots passage stroomt er dan water (en zout) naar de VMR. Deze variant (E) wordt zowel met het 1D model als met het 2DV model doorgerekend. Omdat het niet mogelijk is om de vertical slots passage als kunstwerk aan het 2DV model toe te voegen, wordt de berekende debietijdsreeks door de passage uit het 1D model als gecombineerde onttrekking en lozing aan het 2DV model opgelegd.</i>	Ja	Nee
E	Geen instroming door grote koker naar IJsselmeerzijde en vertical slots <i>Zie beschrijving bij D</i>	Ja	Ja
F	Afsluiter IJsselmeer en vertical slots <i>In de VMR ontstaat getijvariatie aan de IJsselmeerzijde. Het betreft echter geen 'natuurlijk' getijverloop, omdat het hoogwater snel daalt naar het IJsselmeerpeil op het moment dat de grote koker gesloten wordt. Voor een natuurlijker peilverloop wordt aan de IJsselmeerzijde een afsluiter geïntroduceerd die het water in de VMR op een hoger peil (vast)houdt. De sluiting en opening van deze afsluiter kan op verschillende manier vorm gegeven worden. Als pragmatische verkenning wordt er hier voor gekozen om geen water van de VMR naar het IJsselmeer te laten stromen. De stroomrichting door de afsluiter is dan dus altijd gericht naar de Afsluitdijk en (dus) naar de Waddenzee. Ook deze variant wordt zowel met het 1D model als met het 2DV model berekend, waarbij wederom de debietijdsreeks uit het 1D model aan het 2DV model worden opgelegd.</i>	Ja	Ja
G	Vertical slots en saliniteit Waddenzee 10 psu <i>Het is duidelijk geworden dat de aangenomen randvoorwaarde van 30 psu saliniteit aan de Waddenzeezijde als te voorzichtige worst-case moet worden gezien. Tijdens het spuien door de Lorentzsluizen verzoet de spuikom vrijwel volledig, in ieder geval in de oppervlaktelaag. De spuikom verzout vanaf het moment dat het spuiten stopt, maar het duurt waarschijnlijk tot enkele uren totdat zout de VMR bereikt. Ook dan loopt de saliniteit op tot hooguit 20 psu. Alleen als langdurig niet spuien zou de saliniteit langdurig boven 20 psu uit kunnen komen. Om de gevoeligheid voor de aangenomen randvoorwaarde te testen, wordt met het 2DV model een berekening uitgevoerd met een constante saliniteit van 10 psu.</i>	Nee	Ja

Tabel 4.2 Overzicht van modelberekeningen tijdens de 2^e iteratie. Ter vergelijking is de basisvariant uit de 1^e iteratie toegevoegd. De instellingen voor de Waddenzeezijde worden niet getoond. Zij zijn onveranderd ten opzichte van de Basisvariant in Tabel 2.1

			IJsselmeerzijde						Koker				Vertical slots			
	Kenmerk	MODEL	breedte (m) op 0 m NAP	talud	bodemligging (m NAP)	lengte (km)	ruwheid Manning (s/m ^{1/3})	Klepstanden kunstwerk	Oppervlakt (m2)	Diepte onderzijde (m NAP)	ruwheid Manning (s/m ^{1/3})	Openingsduur (%)	Oppervlakt (m2)	Diepte onderzijde (m NAP)	ruwheid Manning (s/m ^{1/3})	Openingsduur (%)
Variant O	Basisvariant	1D/3D	25	recht	-4	6	0.024	open	20	-4	0.013	57%				
Variant A	Herziene basisvariant	1D	25	recht	-3	4	0.024	open	20	-3	0.013	59%				
Variant B	Niet-verdronken koker	1D	25	recht	-3	4	0.024	open	bxxh = 8x4	-3	0.013	59%				
Variant C	Vertical slots	1D	25	recht	-3	4	0.024	open	20	-3	0.013	59%	bxxh=2x2	-3	0.1	100%
Variant D	Kortere instroming koker	1D	25	recht	-3	4	0.024	open	20	-3	0.013	50%	bxxh=2x2	-3	0.1	100%
Variant E	Geen instroming koker	1D	25	recht	-3	4	0.024	open	20	-3	0.013	45%	bxxh=2x2	-3	0.1	100%
Variant F	Afsluiter IJsselmeer	1D	25	recht	-3	4	0.024	1-richting	20	-3	0.013	59%	bxxh=2x2	-3	0.1	100%
Variant A	Herziene basisvariant	3D	25	recht	-3	4	0.024	open	20	-3	0.013	57%				
Variant E	Geen instroming koker	3D	25	recht	-3	4	0.024	open	10	-3	0.013	45%	tijdserie uit 1D SOBEK			
Variant F	Afsluiter IJsselmeer	3D	25	recht	-3	4	0.024	1-richting	10	-3	0.013	57%				
Variant G	Waddenzee 10 psu saliniteit	3D	25	recht	-3	4	0.024	open	10	-3	0.013	57%	tijdserie uit 1D SOBEK			

4.2 Modelresultaten 2^e iteratie

Tabel 4.3 vat de berekende kentallen samen voor de in de 2^e iteratie beschouwde varianten.

Tabel 4.3 Berekende kentallen voor de varianten uit de 2^e iteratie. NB: Omdat de berekende SOBEK-tijdseries voor de vertical slots aan het 3D model zijn opgelegd, worden voor het 3D model geen modelresultaten voor de vertical slots getoond. NB2: De maximale stroomsnelheid in de koker is gelijk aan het maximale debiet gedeeld door 20 m², het doorstroomoppervlakt van de koker

		MODEL	IJsselmeerzijde					Koker							Waddenzeezijde		
			Bij Afsluitdijk		Op 3 km van Afsluitdijk		Overig	In de koker							Bij Afsluitdijk		
			Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)	Maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)	indicatieve maximale Zoutindringings-lengte (1,0 ppt; afstand tot Afsluitdijk)	Maximaal debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m3/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m3/s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m3/s)	Lokstroom (m3/s)	% van de tijd dat stroomsnelheid <1 m/s is (%)	% van de tijd dat stroomsnelheid <2 m/s is (%)	Getijslag (m)	Gemiddelde waterstand (m NAP)
Variant O	Basisvariant	1D	0.31	-0.28	0.22	-0.26	0.5	2800	24	-49	2.0	-12.7	10.7	41%	86%	1.87	-0.13
Variant A	Herziene basisvariant	1D	0.36	-0.30	0.17	-0.26	0.6	3300	23	-42	1.9	-11.7	9.8	43%	96%	1.78	-0.11
Variant B	Niet-verdronken koker	1D	0.28	-0.28	0.15	-0.25	0.5	2900	19	-34	1.5	-9.3	7.8	53%	100%	1.83	-0.12
Variant C	Vertical slots	1D	0.36	-0.30	0.17	-0.26	0.6	>4000	24	-41	1.9	-11.3	9.4	43%	99%	1.78	-0.11
Variant D	VS + Kortere instroming koker	1D	0.31	-0.30	0.16	-0.26	0.6	≈4000	11	-41	0.3	-11.4	11.1	34%	99%	1.78	-0.11
Variant E	VS + Geen instroming koker	1D	0.31	-0.30	0.16	-0.26	0.6	3500	0	-41	0.0	-11.6	11.6	28%	99%	1.78	-0.11
Variant F	VS + Afsluiter IJsselmeer	1D	0.80	-0.10	0.67	-0.06	0.6	2700	18	-41	0.5	-12.7	12.3	43%	100%	1.78	-0.11
Variant O	Basisvariant	3D	0.37	-0.29	0.25	-0.30	0.6	2500	31	-58	2.5	-16.1	13.6	24%	59%	1.80	-0.12
Variant A	Herziene basisvariant	3D	0.52	-0.33	0.19	-0.29	0.7	2400	28	-49	2.3	-14.0	11.8	29%	69%	1.83	-0.13
Variant E	VS + Geen instroming koker	3D	0.27	-0.28	0.14	-0.28	0.6	2200	0	-41	0.0	-11.6	11.6	n.b.	n.b.	1.86	-0.13
Variant F	VS + Afsluiter IJsselmeer	3D	0.87	-0.19	0.61	-0.25	0.7	1800	18	-41	0.5	-12.7	12.3	n.b.	n.b.	1.85	-0.13
Variant G	Waddenzee 10 psu saliniteit	3D	0.29	-0.29	0.14	-0.28	0.6	1500	0	-41	0.0	-11.6	11.6	n.b.	n.b.	1.84	-0.13

		Vertical slots passage							
		In de vertical slots passage							
		Maximaal debiet naar IJsselmeer (m ³ /s)	Maximale stroomsnelheid naar IJsselmeer (m/s)	Maximaal debiet naar Waddenzee (m ³ /s)	Maximale stroomsnelheid naar Waddenzee (m/s)	Gemiddeld debiet naar IJsselmeer (m ³ /s)	Gemiddeld debiet naar Waddenzee (m ³ /s)	Lokstroom (m ³ /s)	Percentage open
Variant 0	Basisvariant								
Variant A	Herziene basisvariant								
Variant B	Niet-verdronken koker								
Variant C	Vertical slots	2.9	0.7	-2.0	0.5	1.0	-0.6	-0.4	100%
Variant D	VS + Kortere instroming koker	2.9	0.7	-2.0	0.5	1.0	-0.6	-0.4	100%
Variant E / G	VS + Geen instroming koker	2.9	0.7	-2.0	0.5	1.0	-0.6	-0.4	100%
Variant F	VS + Afsluiter IJsselmeer	2.2	0.6	-2.0	0.5	0.6	-0.7	0.1	100%

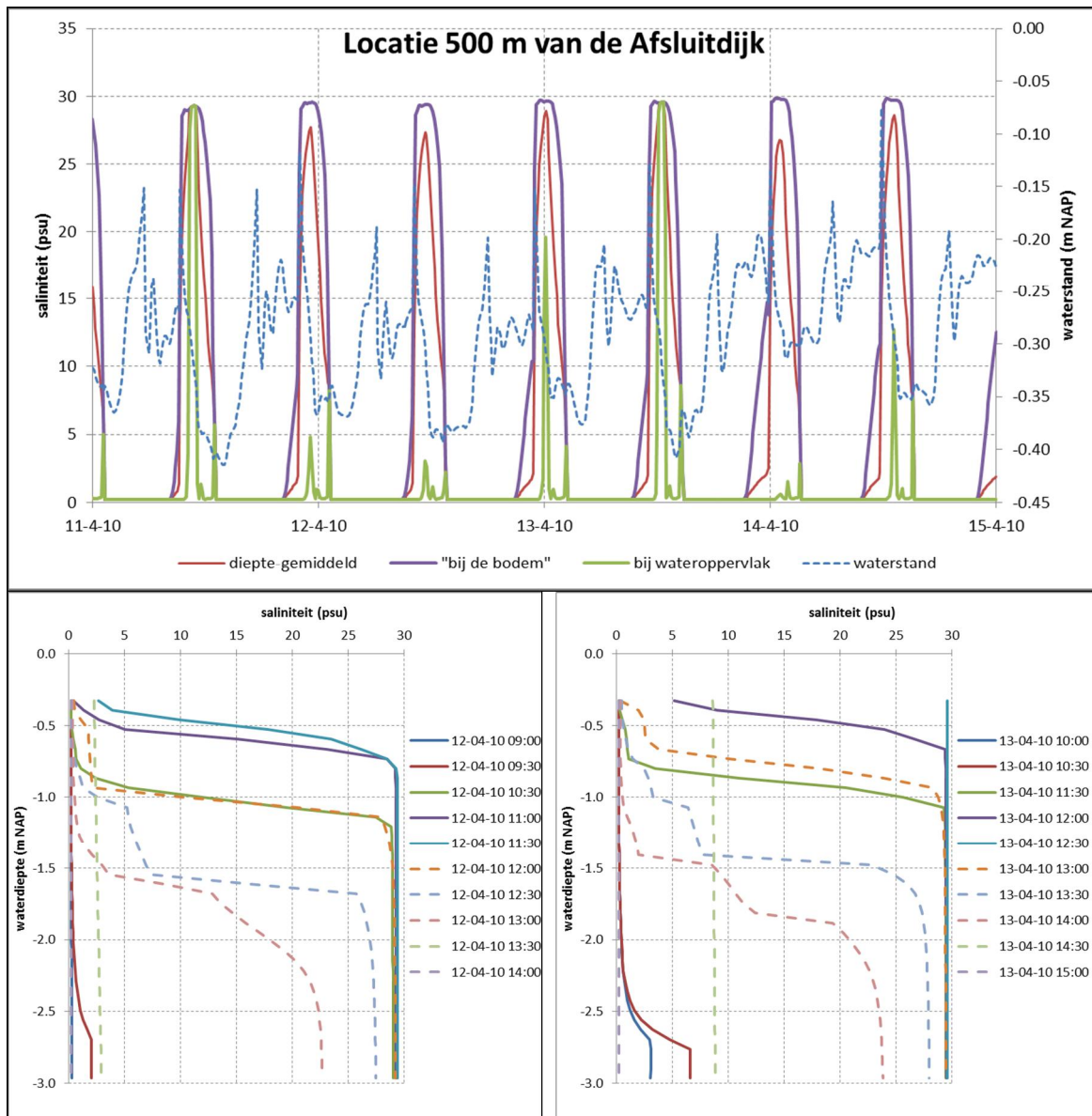
4.2.1 Effect van de kortere, ondiepere herziene basisvariant

Ten opzichte van de oorspronkelijke basisvariant is de herziene basisvariant korter en ondieper aan de IJsselmeerszijde: 4 km in plaats van 6 km en -3 m NAP in plaats van -4 m NAP. Tabel 4.3 laat zien dat de zoutindringingslengte met 2400 m (3D model) ruim binnen de lengte van de vismigratierivier blijft. Er is dus nog speelruimte voor het inlaten van meer zout water ten behoeve van het realiseren van een brakwaterzone.

De getijslag bij de Afsluitdijk neemt iets toe en op 3 km van de Afsluitdijk iets af. Door de kleinere diepte neemt de maximale stroomsnelheid 0,1 m/s toe, maar is met 0,7 m/s zoals berekend in het 3D model nog steeds relatief laag.

De lokstroom in de herziene basisvariant is 9,8 m³/s in het 1D model en 11,8 m³/s in het 3D model. De lokstroom neemt hiermee circa 10% af ten opzichte van de oorspronkelijke basisvariant. Doordat de getijslag bij de Afsluitdijk toeneemt, neemt het waterstandsverschil tussen Waddenzee en vismigratierivier af, waardoor het debiet afneemt.

De stroomsnelheid in de grote koker blijft hoog. Het verondiepen van de VMR van -4 m NAP naar -3 NAP heeft enigszins een effect omdat door grotere weerstand in de VMR het verval over de koker wordt beïnvloed, waardoor het debiet wat kleiner wordt. Dat is bijvoorbeeld te zien aan de lokstroom die afneemt van 13,6 m³/s naar 11,8 m³/s in het 3D model. Bij 20 m² doorstroomoppervlak kan afgeleid worden dat als het gemiddeld al groter is dan 10 m³/s, dat de gemiddelde stroomsnelheid al groter is dan 0,5 m/s. Als bovendien meegewogen wordt dat de koker zo'n 40% van de tijd dicht is (zo'n 60% van de tijd open), is de gemiddelde stroomsnelheid in de grote koker tijdens opening al meer dan 0,8 m/s.



Figuur 4.2 Verticaal profiel van saliniteit in de vismigratierivier (op 500 m van de Afsluitdijk) voor de herziene basisvariant. Boven: tijdserie; Onder: verticale profielen gedurende twee getijcycli

Figuur 4.2 laat de saliniteit in de waterkolom zien op 500 m van de Afsluitdijk. Uit de figuur is te zien dat het zoute water zich verspreidt langs de bodem. Nabij de bodem neemt de saliniteit snel toe tot 30 psu, ofwel de saliniteit van de Waddenzee. Gedurende enkele uren blijft de saliniteit hoog. Nabij het wateroppervlak is de situatie anders door de aanwezigheid van een sterke stratificatie. In de bovenste 0,5 tot 1 m van de waterkolom neemt de saliniteit later toe dan bij de bodem en is gedurende 2 uur verhoogd ten opzichte van het zoete IJsselmeer water. In sommige getijcycli vindt op 500 m van de Afsluitdijk nabij het wateroppervlak echter nauwelijks verhoging van de saliniteit plaats. Omdat het intergetijdengebied zich in deze bovenste 0,5 m van de waterkolom bevindt, moet de aanwezigheid van stratificatie en de relatief maar beperkte variatie en duur van (verhoogde) saliniteit meegewogen worden bij de ecologische afweging.

Geconcludeerd wordt dat de modelberekening bevestigt dat de herziene basisvariant in ongeveer gelijke mate voldoet aan de functionele wensen als de oorspronkelijke basisvariant. De berekende verschillen zijn in de orde van 10% voor bijvoorbeeld lokstroom en getijslag.

4.2.2 Effect van niet-verdronken koker (Variant B)

Bij een niet-verdronken koker wordt de zoutindringingslengte iets korter (2900 m vs 3300 m in het 1D model), omdat het effectief doorstroomoppervlak iets kleiner is dan bij een verdronken koker van 20 m². Het debiet door de koker neemt substantieel af. De lokstroom neemt bijna 20% af ten opzichte van de herziene basisvariant (tot 7,8 m³/s in het 1D model). Omdat in het 1D model de lokstroom altijd lager voorspeld wordt dan in het 3D model, is niet op voorhand duidelijk of de lokstroom in de verdronken koker te laag wordt, dat wil zeggen niet voldoet aan de functionele eis om minimaal 10 m³/s te realiseren. Dit hangt ook af van de ruwheid die in de koker gerealiseerd wordt. Gedacht wordt over het aanbrengen van stenen in de koker om tussen de stenen lagere stroomsnelheden te realiseren. De grotere ruwheid zal het debiet echter (nog verder) beperken. Het verdient aanbeveling de dimensionering van een niet-verdronken koker op basis van dit modelresultaat nog een keer te controleren.

Door de lagere debieten door de koker zijn getijslag en stroomsnelheid eveneens iets lager dan in de herziene basisvariant.

4.2.3 Effect van vertical slots passage (Variant C)

De vertical slots passage is zodanig in het model afgeregeld (met de ruwheidparameter) dat de maximale stroomsnelheid circa 0,5 m/s is en het maximale debiet circa 2 m³/s. Deze waarden worden gerealiseerd voor de stroomrichting naar de Waddenzee. Richting de IJsselmeerzijde zijn maximale stroomsnelheid en maximaal debiet iets hoger. De afregeling is uitsluitend met het 1D model uitgevoerd.

Door de toevoeging van de vertical slots passage neemt de maximale zoutindringingslengte in het 1D model toe tot meer dan 4000 m. Er zal zonder aanpassing dus zout lekken naar het IJsselmeer. Doordat de vertical slots passage permanent openstaat, is er een netto debiet van circa 0,4 m³/s naar het IJsselmeer. De netto lokstroom is dan 9,0 m³/s (9,4 m³/s door de koker naar de Waddenzee en 0,4 m³/s door de vertical slots passage naar het IJsselmeer).

4.2.4 Effect van kortere openingstijd (Varianten D en E)

Het effect van kortere openingstijd wordt vergeleken ten opzichte van de herziene basisvariant met vertical slots passage (Variant C).

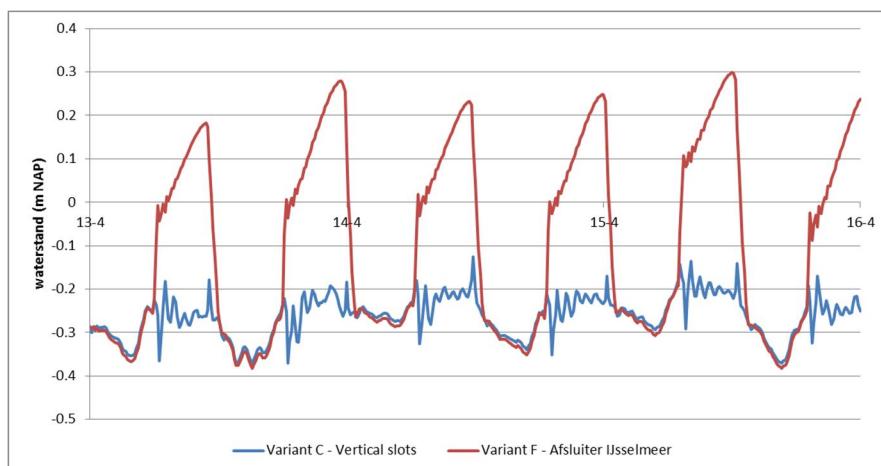
Een kortere openingstijd van de grote koker verkort zoals verwacht de zoutindringingslengte met honderden meters. In het 1D model moet de instroming door de grotere koker volledig gestopt worden (Variant E) om de zoutindringingslengte tot 3500 m te beperken. De 3D modellering laat echter zien dat de zoutindringingslengte circa 2200 m is als er alleen instroming is via de vertical slots passage en niet via de koker. Het 1D model overschat de zoutindringingslengte dus aanzienlijk. Deze berekeningen tonen aan dat het mogelijk is om met sturing op de inlaat door de grote koker de zoutgradiënt te controleren.

4.2.5 Effect van een afsluiter aan de IJsselmeerzijde (Variant F)

De afsluiter aan de IJsselmeerzijde heeft een substantieel effect op de zoutindringingslengte. In het 3D model wordt in vergelijking met variant E de lengte met 400 verkort tot 1800 m. Ten opzichte van de herziene basisvariant (Variant A) is de verkorting 600 m.

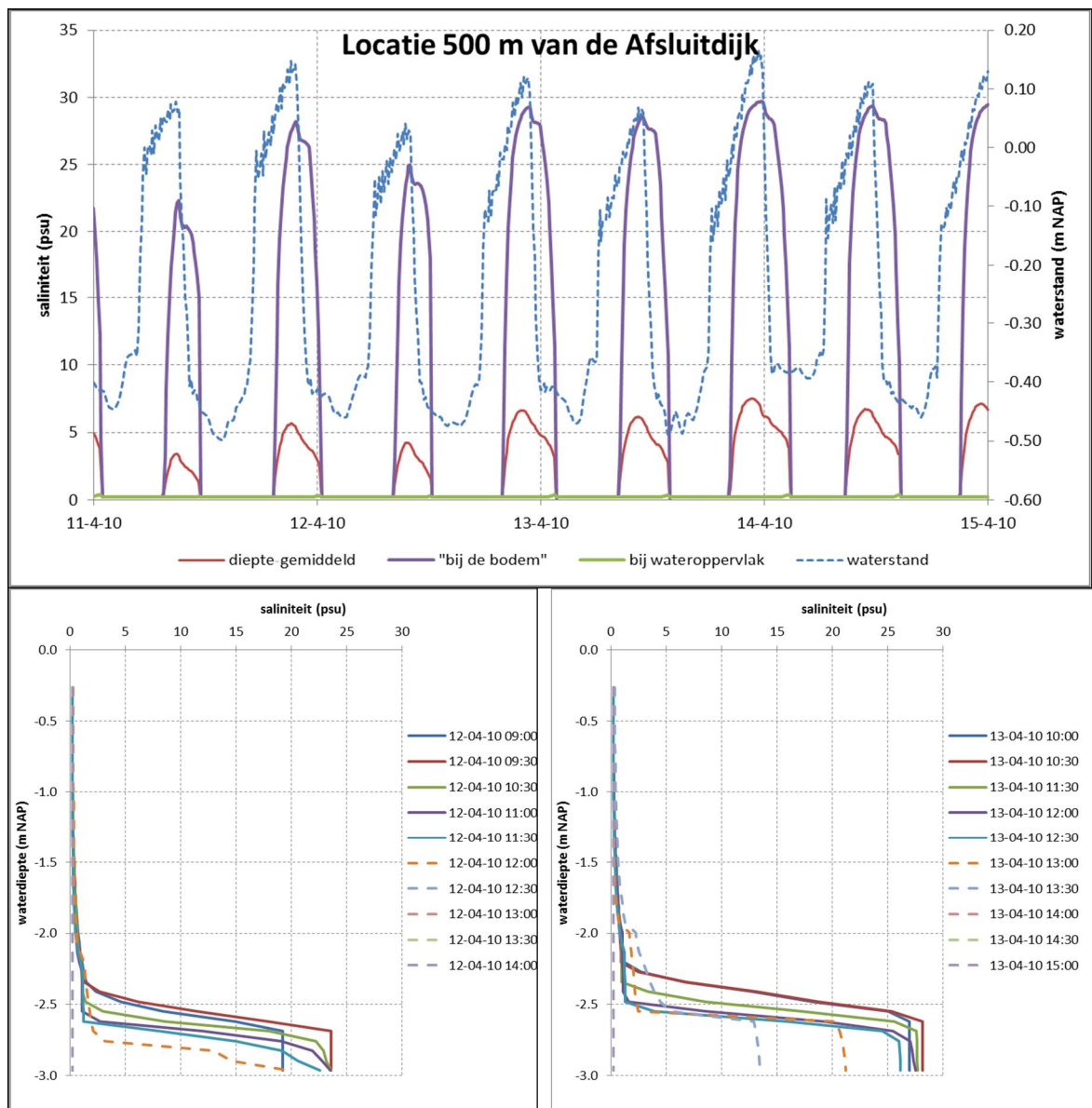
Als een afsluiter aan het IJsselmeer wordt ingezet, wordt een aanzienlijk grotere getijslag bereikt: 0,8 m aan de Afsluitdijk en 0,6 m op 3 km van de Afsluitdijk. Figuur 4.3 laat het waterstandsverloop zien. Duidelijk te zien is dat de vismigratierivier 'gevuuld' wordt als de afsluiter aan het IJsselmeer dicht gaat. De initiële snelle vulling vindt plaats als de grote koker nog open staat. De langzamere vulling gebeurt via alleen de vertical slots passage.

Omdat in deze modelberekening met een verticaal talud is gerekend, kan deze getijslag niet rechtstreeks naar areaal intergetijdengebied vertaald worden. In §3.1.5 is voor het 1D getoond dat het meenemen van intergetijdengebied de getijslag met circa 33% reduceert. Aannemende dat die reductiefactor ook hier opgaat, zou indicatief gerekend kunnen worden met een getijslag van 0,5 m bij de Afsluitdijk en 0,4 m op 3 km van de Afsluitdijk.



Figuur 4.3 Berekende waterstand voor Variant C met vertical slots en Variant F met een afsluiter aan de IJsselmeerzijde. Let op dat er geen intergetijdengebied in de berekening is meegenomen. Door het grote oppervlak van het intergetijdengebied zal de waterstand aanzienlijk minder snel oplopen

Figuur 4.4 laat zien dat de zouttong zich tot de onderste 0,5 tot 1 m van de waterkolom beperkt. Op 500 m van de Afsluitdijk zal het water bij het wateroppervlak geheel zoet blijven en er zal dus geen sprake zijn van een brakwater intergetijdengebied. Om wel een brakwaterzone te realiseren zal ook (zout) water via de grote koker ingelaten moeten worden. Naast het volume zorgt de grotere stroomsnelheid voor meer turbulentie en daardoor een grotere verticale menging.



Figuur 4.4 Verticaal profiel van saliniteit in de vismigratierivier (op 500 m van de Afsluitdijk) voor de herziene basisvariant met vertical slots passage zonder instroom via de grote koker en met een afsluiter aan de IJsselmeerzijde (Variant F). Boven: tijdserie; Onder: verticale profielen gedurende twee getijcycli

4.2.6 Effect van zoutgehalte aan de Waddenzeezijde (Variant G)

Een lagere saliniteit op de Waddenzee (10 psu in plaats van 31 psu) blijkt wel effect te hebben op de zoutindringingslengte, maar zeker niet lineair. In Variant G (10 psu) is de zoutindringingslengte 700 m korter dan in verdere equivalente Variant E (31 psu).

Wat betreft het dieptegemiddelde zoutgehalte in de brakwaterzone is wel een ongeveer evenredige afname van toepassing.

4.3 Algemene conclusies 2^e iteratie

- In alle gevallen blijft de zoutindringing (ruim) binnen de 4 km lengte van de vismigratierivier. Dit is een bevestiging dat een ontwerp van 4 km lengte voor wat betreft zoutlek voldoende is. Voor de zoutindringingslengte moeten de 3D modelresultaten als sturend worden beschouwd. De 1D modelresultaten zijn – vanwege het ontbreken van de verticale dichtheidsgradiënt – hooguit indicatief.
- De maximale stroomsnelheid in de VMR op 3 km van de Afsluitdijk varieert in alle gevallen tussen 0,5 en 0,7 m/s en lijkt daarmee geschikt voor vismigratie.
- In vrijwel alle varianten varieert de getijslag tussen 0,3 en 0,4 m bij de Afsluitdijk en 0,15 en 0,2 m op 3 km van de Afsluitdijk. Met een afsluiter aan de IJsselmeerzijde kan de getijslag verhoogd worden tot 0,8 m bij de Afsluitdijk en 0,6 m op 3 km van de Afsluitdijk. Als intergetijdengebied wordt aangelegd, zal de getijslag met circa 33% afnemen als gevolg van het grotere waterbergingsoppervlak.
- Door sterke stratificatie is de saliniteit bij het wateroppervlak laag, waardoor in de bovenste 0,5 tot 1 m van de waterkolom voornamelijk zoet water voorkomt en de mogelijkheid van een brakwater intergetijdengebied in de vismigratierivier minimaal lijkt.
- Bij de bodem (op -3 m NAP) zal de saliniteit toenemen als zout water van de Waddenzee naar de vismigratierivier stroomt. Geschat wordt dat tot ongeveer 75% van de zoutindringingslengte gesproken kan worden van een ieder getij terugkerende brakwaterzone bij de bodem.
- Bij een niet-verdronken koker is de voorziene afmeting van 8 m breed (en een bodemligging van -3 m NAP) mogelijk onvoldoende om een lokstroom van gemiddeld 10 m³/s te realiseren. Het 1D model berekent een 20% lagere lokstroom dan bij een verdronken koker met een 20 m² doorstroomoppervlak.

5 Sedimentatie en morfologie

5.1 Sedimentatie

De vraag is of en zo ja in welke mate er aanslibbing te verwachten is in de vispassage die ontworpen wordt in de Afsluitdijk. Deze vraag kan worden opgeknipt in drie deelvragen:

1. Hoeveel slib wordt er aangevoerd?
2. Welk deel hiervan kan bezinken?
3. Kan het bezonken slib weer worden opgewerveld of blijft het permanent achter?

5.1.1 Slibaanvoer: maximaal potentieel voor aanslibbing

De eerste vraag wordt beantwoord met behulp van een beschouwing van de uitwisselingsdebieten en de slibconcentratie in de Waddenzee en het IJsselmeer. De slibconcentratie in het IJsselmeer wordt afgeleid uit het MWTL meetpunt Vrouwezand. De gemiddelde concentratie in de periode 1989-2009 bedraagt 30 mg/l. De slibconcentratie in de Waddenzee wordt afgeleid uit het MWTL meetpunt Doove Balg Oost. De gemiddelde concentratie in de periode 1989-2009 bedraagt 33 mg/l. Deze concentraties zijn op ongeveer 1 m onder het wateroppervlak gemeten, de concentraties bij de bodem zijn waarschijnlijk hoger.

Bij een getijgemiddelde zoetwaterafvoer van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt de zeewaartse slibvracht vanuit het IJsselmeer $10 \times 12.5 \times 3600 \times 30 = 13.5$ ton per getij. De landwaartse slibvracht vanuit de Waddenzee is tenminste gelijk aan het product van het kombergingsvolume en de lokale slibconcentratie in de Waddenzee. Voor een vispassage die aan de Waddenzeezijde 1 km lang is en 25 m breed is het kombergingsvolume 50.000 m^3 bij een getijslag van 2 m. IJsselmeerzijde. Door zout- of slibgedreven dichtheidstromingen en neervorming rond de uitgang van de vispassage kan de slibvracht verder toenemen. Volgens het 2DV model, waarin deze effecten alsmede de getijdoordringing aan de IJsselmeerzijde van de vispassage wel zijn meegenomen, bedraagt de instroming vanuit de Waddenzee circa 100.000 m^3 per getij. De reststroming bij de bodem is naar buiten gericht (d.w.z. in de richting van de Waddenzee), zodat dichtheidsgedreven import beperkt is. Dit resulteert in een slibvracht vanuit de Waddenzee van 3.3 ton per getij. De totale slibvracht wordt hiermee $13,5+3.3 = 16,8$ ton per getij ofwel 11,8 kton per jaar. Aangenomen dat het slib zich afzet met een droge dichtheid van 600 kg/m^3 is dit equivalent met circa 20.000 m^3 per jaar ofwel zo'n 20 cm per jaar voor een vispassage met een totale oppervlakte van 10 ha. Dit is de bovengrens voor de aanslibbing. Merk op dat lokaal een grotere aanslibbing kan optreden.

5.1.2 Percentage bezinking

De vraag is hoeveel van het sedimentatiepotentieel van circa 20 cm per jaar daadwerkelijk optreedt. Dit is onder andere gerelateerd aan de bezinktijd van het sediment ten opzichte van de verblijftijd in de vispassage. Het volume van de vispassage bedraagt $4000 \times 25 \times 3 = 300.000 \text{ m}^3$ en de uitwisseling $450.000+100.000 = 550.000 \text{ m}^3$. De gemiddelde verblijftijd van water in de vispassage is dus zo'n 7 uur. Tijdens 1 getij kan zich maximaal een hoeveelheid $H = w_s C A T$ slib afzetten, met w_s de valsnelheid, C de concentratie, A het areaal en T de getijperiode. Voor slib uit de Waddenzee met $w_s = 0.5$ tot 2 mm/s geldt $H = 0.5 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^{-3} \times 17.5 \times 10^4 \times 45.000 = 118$ tot 472 ton per getij. Dit getal is veel groter dan de aanvoer van

16,8 ton per getij. Kortom, de verblijftijd is niet limiterend voor de aanslibbing. Dit ligt mogelijk anders voor slib uit het IJsselmeer, dat nog niet of veel minder is geflocculeerd en een lagere valsnelheid heeft. Indien de valsnelheid lager is dan 0,1 mm/s, is niet langer het aanbod, maar de verblijftijd bepalend voor de maximale aanslibbing. Echter, door flocculatie in de vispassage ten gevolge van toenemende saliniteit is het aannemelijk dat de valsnelheid van slib uit het IJsselmeer groter wordt dan 0,1 mm/s.

5.1.3 Opwerveling

Op basis van het voorafgaande is bekend hoeveel slib bruto wordt geïmporteerd (11.8 kton per jaar) en hoeveel hiervan potentieel tot bezinking kan komen gegeven de valsnelheid en verblijftijd (bijna alles). Of dit ook gebeurt, hangt af van de bodemschuifspanningsdynamiek, die sturend is tussen de verhouding tussen erosie en depositie. De depositieflux bedraagt maximaal $w_s \times C$. De erosieflux bedraagt $E = M (\tau/\tau_{krit} - 1)$ met M de erosieconstante (in $\text{kg/m}^2/\text{s}$), τ de bodemschuifspanning en τ_{krit} de kritische schuifspanning voor erosie. Een conservatieve schatting voor de erodeerbaarheid van vers afgezet slib is $M = 10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ en $\tau_{krit} = 0.5 \text{ Pa}$. Dit betekent indien de bodemschuifspanning meer dan de helft van de tijd groter is dan de kritische waarde, er geen risico is van permanente slibafzetting. Op basis van deze conservatieve schatting wordt een erosiepotentieel berekend van circa $100 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$ ofwel 19 cm per jaar. Dit getal is ongeveer net zo groot als de maximale depositie, d.w.z. geen permanente afzetting. Deze berekening is gebaseerd op uitvoer van de bodemschuifspanning van het 2DV-model op twee posities, namelijk aan weerszijde van de Afsluitdijk. In geval van een andere dimensionering kan dit evenwicht verschuiven. Het risico op aanslibbing wordt groter naarmate de maximale stroomsnelheid afneemt en naarmate de zeewaarts gerichte reststroming aan de bodem minder sterk wordt.

5.1.4 Conclusie

Potentieel bedraagt de aanslibbing in de vispassage circa 20 cm per jaar, maar bij een juist ontwerp van de passage kan dit grotendeels worden voorkomen. Het is vereist dat het gemiddelde bodemschuifspanningsniveau voldoende hoog blijft zodat depositie van slib wordt voorkomen en/of tijdelijke slibafzettingen weer kunnen eroderen. Ook dient de reststroming bij de bodem netto naar buiten (dat wil zeggen in de richting van de Waddenzee) te zijn gericht om een sterke toename van de slibaanvoer bovenop de aanvoer t.g.v. zoetwaterspui vanuit het IJsselmeer en getijvulling vanuit de Waddenzee te voorkomen. De breedte-diepte-verhouding en de lengte van de vispassage zijn hierbij belangrijke ontwerpvariabelen. Het huidige schetsontwerp zoals geïmplementeerd in het 2DV-model resulteert waarschijnlijk niet in significante aanslibbing.

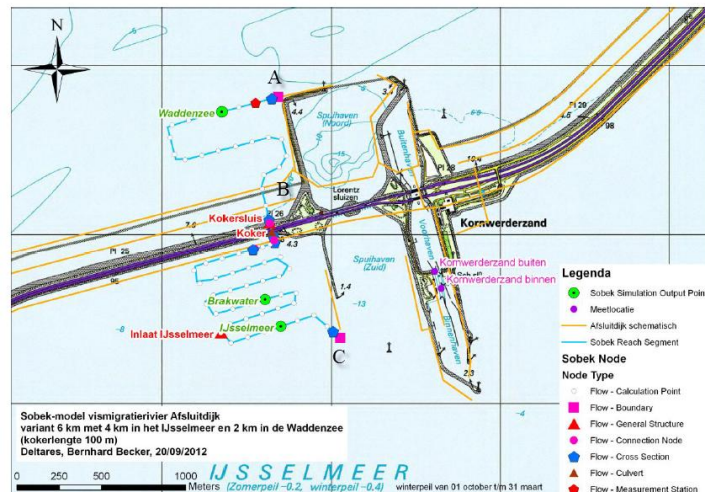
5.2 Morfologie

Hieronder worden de zandige aspecten behandeld. Er kan verder onderscheid gemaakt worden in de IJsselmeerzijde en de waddenzijde.

5.2.1 Mogelijke consequenties aan de Waddenzeezijde.

In Figuur 5.1 is de vismigratierivier schematisch weergegeven met de uitlaat aan de Waddenzeezijde bij de locatie aangegeven met de letter A. Andere schematisaties geven de uitlaat weer bij de locatie aangegeven met de letter B. De morfologische ligging van dit gebied is weergegeven in Figuur 5.2 gemaakt met behulp van de vaklodingsdata van Rijkswaterstaat uit 2009, 2003, 1997, 1991 en 1981.

Deze data zijn geïnterpoleerd met behulp van raaidata met een raaiafstand van 200 meter. Lokale kleinschalige geultjes en/of platen worden daarom niet altijd goed weergegeven. Tevens is de morfologische ontwikkeling gegeven tussen 2009 en 2003.



Figuur 5.1 Onderzoeksgebied bij Kornwerderzand met de Afsluitdijk, de Lorentzsluizen, bestaande uit een stelsel van spuisluizen en schutsluizen, de meetlocaties "Kornwerderzand" en een SOBEK-schematisatie van de vismigratierivier. (Uit Deltares, 2012)

De grootschalige morfologische ontwikkeling van het gebied wordt vooral bepaald door de stijging van de zeespiegel met ongeveer 20 cm per eeuw en de afsluiting van de Zuiderzee in 1932. De afsluiting van de Zuiderzee had een vergroting van de getijslag in de Waddenzee tot gevolg. De getijslag bij Den Helder nam met circa 20 cm toe door de afsluiting van de Zuiderzee. De verandering in getijslag had een toename van het getij volume tot gevolg wat door de verschillende zeegaten (Marsdiep, Eijerlandse Gat en Vlie) de Waddenzee in- en uitstroomt. De veranderingen in getijslag en getijvolumes resulteerden in andere stroompatronen en sedimenttransporten in de Waddenzee. De veranderende waterbeweging in de Waddenzee door de afsluiting van de Zuiderzee heeft dan ook verregaande gevolgen voor de morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee. Er is ook sprake van een sterke interactie. De veranderende morfologie heeft weer effect op de waterbeweging enz. enz. De tijdschalen waarop deze veranderingen zich afspelen zijn daardoor ook vrij lang (tientallen tot honderden jaren). Het Marsdiep kende een sterke verandering tussen 1930 en 1970, met een sterke aanzanding in de noord-zuid georiënteerde geulen en een verdieping van de oost-west georiënteerde geulen, waarbij netto aanzanding heeft plaatsgevonden. Na 1970 lijkt een licht eroderende trend zichtbaar in het Marsdiep. Het Vlie kende juist na 1970 een sterke aanzandende trend. Netto is het systeem van de westelijke Waddenzee na 1970 nog steeds importerend.

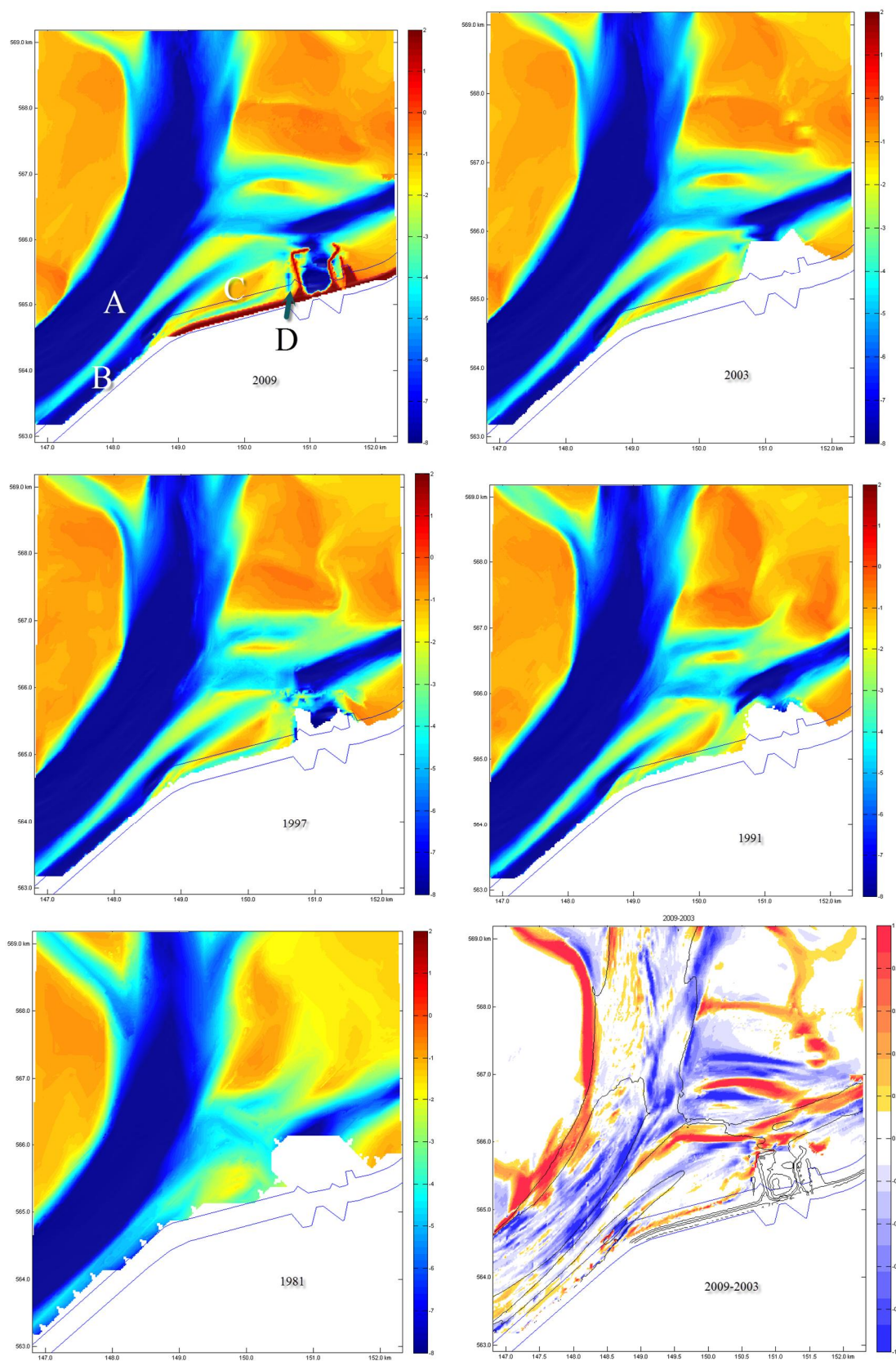
Lokaal nabij Kornwerderzand is de Doove Balg (aangegeven met de letter A in Figuur 2) de grootste getijgeul met een diepte ter hoogte van het spuiwerk van circa -15 tot -20 m NAP. Parallel langs de Afsluitdijk loopt ook een geul met een diepte van circa -5 tot -8 m NAP die gescheiden is van de Doove Balg door een sedimentrug met een hoogte van circa -3 m NAP(aangegeven met de letter B in Figuur 2). De Doove Balg heeft zich na 1932 verruimd in dit gebied en de bocht nabij de Afsluitdijk is langzaam verder aan het uitbochten waardoor de Doove Balg met ongeveer 5 m per jaar richting dijk beweegt. De kleine geul parallel aan de dijk (B) is langzaam aan het verdiepen. Het zandplaatje (C in figuur2) is langzaam aan het ophogen.

De ontwikkeling van het gebied gelegen in de oksel van de afsluitdijk met de dam van de spuihaven noord (D) is niet geheel duidelijk. De nauwkeurigheid van de vaklodingsgegevens is hier onvoldoende. Of de blauwe lijn parallel aan de dam van de spuihaven noord een geultje weergeeft is dan ook zeer twijfelachtig.

Waarschijnlijk sedimenteert deze oksel en is het niet aan te bevelen om de uitgang van de vismigratierivier hier (D in figuur 2) te positioneren. Een meer noordwaarts gelegen locatie (zoals bijvoorbeeld locatie A in figuur 1) ligt zonder nadere studie meer voor de hand, daar waar de waterdiepte meer is dan zo'n 5 meter. De kans op aanzanding is dan heel gering. Het is in ieder geval een aanbeveling om een gedetailleerde bodem van dit gebied te maken. Andersom zijn geen effecten op de morfologie te verwachten door de aanleg van de vismigratie rivier, daarvoor zijn de veranderingen in stroomsnelheden in de Waddenzee te gering.

5.2.2 Mogelijke consequenties aan de IJsselmeerzezijde.

Aan de IJsselmeerzijde zijn de stroomsnelheden zeer gering en is er nauwelijks tot geen sprake van zandtransporten. Morfologische effecten zijn hier dan ook niet te verwachten.



Figuur 5.2 Morfologische ligging van de Waddenzeezijde (vaklodingen 2009,2003,1997,1991 en 1981) en de morfologische veranderingen tussen 2009 en 2003 (Blauw is erosie, rood is sedimentatie)

6 Ontwerpcriteria voor de vismigratierivier

6.1 Functionele wensen en ontwerpvariabelen

De functionele wensen voor de vismigratierivier zijn vanuit verschillende uitgangspunten opgesteld. Voor dit rapport zijn relevant een maximale bijdrage aan vismigratie, geen effect op zoetwatervoorziening en een minimaal (bagger)onderhoud. Dit rapport beperkt zich tot de functionele wensen die in relatie staan tot transport van water, zout, zand en slib. Met name voor de maximale bijdrage aan vismigratie zal een vertaling van hydrodynamische grootheden zoals stroomsnelheid en openingstijd van de koker naar mogelijkheden voor diverse vissoorten gemaakt moeten worden. Dit geschiedt buiten dit rapport.

Voor het ontwerp van de vismigratierivier is een aanzienlijk aantal keuzes te maken:

- Geometrie
 - o IJsselmeerzijde: Lengte, breedte, diepte en vorm van dwarsprofiel inclusief eventueel intergetijdengebied
 - o Koker: Doorstroomoppervlak, diepte onderzijde, materiaal/afwerking (ruwheid). De lengte van 100 m ligt vast.
 - o Waddenzee: Breedte, diepte en vorm van dwarsprofiel inclusief eventueel intergetijdengebied. De lengte van 1 km ligt vast.
- Sturing van opening van de koker
- Sturing van opening van het kunstwerk aan de IJsselmeerzijde

Deltares constateert dat er veel vrijheidsgraden zijn voor het ontwerp. Het voordeel is dat het een goed beheersbaar en regelbaar watersysteem is, waarbij in eerste plaats met sturing van de opentijden van de koker en als tweede door sturing van afsluiting van de IJsselmeerzijde het transport van water en zout goed gecontroleerd kan worden. Een nadeel is dat optimalisatie vooraf vanwege het grote aantal combinaties niet goed mogelijk is.

In dit concluderende hoofdstuk worden geen harde ontwerpcriteria opgesteld, omdat verschillende functionele wensen tot verschillende ontwerpcriteria leiden. Een integrale afweging op basis van onder andere civieltechnische en financiële aspecten zal nodig zijn voor een definitief ontwerp.

6.2 Ontwerpvariabele(n) per functionele eis (kwalitatieve evaluatie)

Als eerste wordt op basis van de uitgevoerde 1D en 3D modelberekeningen per functionele wens aangegeven, welke ontwerpcriteria het meest van belang zijn (Tabel 6.1).

De Waddenzeezijde is niet opgenomen in deze tabel, omdat het ontwerp aan de Waddenzeezijde van ondergeschikt belang blijkt voor getij, lokstroom en andere hydraulische kenmerken van de vismigratierivier. De reden hiervoor is de relatief korte lengte van 1 km ⁴ in combinatie met het grote getij. De getijdynamiek is zo dominant, dat pas bij een aanzienlijk langere rivier een significante invloed van het ontwerp aan de Waddenzeezijde zou gaan

⁴ Volgens het meest recente ontwerp zal het gedeelte aan de Waddenzeezijde maximaal 750 m lang zijn. Dit beïnvloedt de resultaten echter niet.

meespelen. Hetzelfde geldt overigens voor breedte en diepte, maar binnen aannemelijke waarden van minimaal 25 m breed en -4 m NAP bodemprofiel is de getijdynamiek dominant.

Tabel 6.1 Belangrijkste ontwerpvariabele(n) per functionele eis. Een '>' groter-dan-teken betekent een zo groot mogelijke realisatie; Een '<' kleiner-dan-teken een zo klein mogelijk realisatie.

Functionele wens	IJsselmeerzijde			Koker		Overig
	Lengte	Dwarsprofiel		Oppervlak	Opening	
		Breedte	Diepte			
Zo groot mogelijke lokstroom naar de Waddenzee		>		>		
Zo lang mogelijke openingsduur van de kunstwerken	>	>				
Voldoende lange periode van gunstige stroomsnelheid (in de koker) voor diverse vissoorten		<		>		
Geen transport van zout (zoutlekkage) naar het IJsselmeer	>		<		< (vloed)	geen drempels
Zo minimaal mogelijk baggeronderhoud of herstel van het bodemprofiel		<		>		
Realisatie van een brakwaterzone aan de IJsselmeerzijde					< (eb)	dagelijks grote variatie zout
Voor zover mogelijk, realisatie van intergetijdengebied		> (rond middenpeil)				

NB: Het ontwerp van de Waddenzeezijde blijkt voor geen van de functionele eisen een belangrijke variabele.

Tabel 6.1 laat twee ontwerpvariabelen zien die één kant op wijzen:

- Een zo lang mogelijke vismigratierivier
- Een zo groot mogelijke koker

Een zo lang mogelijke vismigratierivier biedt de meeste ruimte om de vismigratierivier te controleren voor wat betreft openingsduur en voor wat betreft zouttransport. Beide aspecten zijn niet onafhankelijk van elkaar, doordat een grotere openingsduur resulteert in meer zout water dat naar het IJsselmeer stroomt, waardoor de zoutindringingslengte toeneemt.

Een grotere koker is wenselijk voor een grotere lokstroom, voor een langere periode met gunstige stroomsnelheid en voor een lager baggerhoud. Een grotere koker zorgt voor een groter debiet en dus een groter lokstroom. Een groter debiet in de rivier staat gelijk aan een grotere stroomsnelheid waardoor eventueel gesedimenteerde slib weer uitgespoeld kan worden. De stroomsnelheid in de koker neemt juist iets af, omdat het debiet niet evenredig toeneemt met het doorstroomoppervlak.

Uit Tabel 6.1 valt af te leiden dat functionele eisen op twee ontwerpvariabelen tot tegenstrijdigheid leiden:

- De grootte van het dwarsprofiel
- De openingsduur van de koker

Voor de lokstroom en de openingsduur is een groter dwarsprofiel wenselijk; voor de stroomsnelheid in de koker, het transport van zout en het baggerhoud juist een kleiner dwarsprofiel.

Een groter dwarsprofiel aan de IJsselmeerzijde verkleint de weerstand die het water ondervindt in het 6 km lange traject. Bij uitstroom naar de Waddenzee kan daardoor iets makkelijker water uit het IJsselmeer toestromen, waardoor de lokstroom iets groter kan zijn. Het debiet is wat groter en meer zout water kan afgevoerd, waardoor ruimte ontstaat voor een langere openingstijd. Een genoemde grotere debiet is 1-op-1 te vertalen naar een hogere stroomsnelheid in de koker (stroomsnelheid = debiet / oppervlak).

Als kental voor het transport van zout wordt in dit rapport de maximale zoutindringingslengte gehanteerd. Pas als de maximale zoutindringingslengte langer is dan de lengte van de vismigratierivier is er sprake van zouttransport vanuit de vismigratierivier naar het IJsselmeer. Uit de 1D berekeningen blijkt dat de zoutindringingslengte toeneemt als het dwarsprofiel toenemend. Verificatie met het 3D model heeft laten zien dat daarbij de diepte meer van belang is dan de breedte. Een kleinere diepte beperkt de zoutindringingslengte doordat eventuele verticale stratificatie makkelijker en effectiever afgebroken wordt en dus dat zout water teruggespoeld wordt naar de Waddenzee. Een kleiner dwarsprofiel resulteert bij vergelijkbaar debiet in een hogere stroomsnelheid, waardoor slib dat bij lage stroomsnelheid is uitgezakt, bij hogere stroomsnelheid weer opgenomen en uitgespoeld wordt.

De openingsduur is tegenstrijdig voor het transport van zout en voor de realisatie van een brakwaterzone aan de IJsselmeerzijde. De logische en ultieme beperking van de zoutindringingslengte is het beperken van de instroming van zout water naar de IJsselmeerzijde. Het is duidelijk dat dit tegenstrijdig is met realisatie van een brakwaterzone aan de IJsselmeerzijde, waarvoor juist zout water toegelaten moet worden.

6.3 Integrale afweging van ontwerpvariabelen (kwantitatieve evaluatie)

Alle functionele wensen zullen in een ontwerp moeten passen, waarbij andere afwegingen als kosten en inpassing in de huidige omgeving uiteraard ook een rol spelen. Tabel 6.2 vat de kwantitatieve ontwerpcriteria samen.

Tabel 6.2 Kwantitatieve ontwerpcriteria voor de vismigratierivier

Deel vismigratierivier	Parameter	Criterium
IJsselmeerzijde	▪ Lengte (m)	Minimaal 3-3,5 km bij een 20 m ² koker Minimaal 4-4,5 km bij een 40 m ² koker
	▪ Diepte (m NAP)	Bij voorkeur -3 m NAP, niet dieper dan -4 m NAP
	▪ Breedte op 0 m NAP (m)	Bij voorkeur 25 m, bij smaller neemt noodzakelijke lengte toe
	▪ Talud (-)	
	o Permanent onderwater	Zo steil mogelijk om oppervlak dwarsprofiel te maximaliseren
	o Intergetijdengebied	Geen criterium – vrij inrichtbaar
	▪ Ruwheid (s/m ^{1/3})	Normaal
Koker	▪ Sturing afsluitend kunstwerk IJsselmeer	- Beperking zoutlek: Alleen bij gelegenheid, geen dagelijkse sturing nodig - Intergetijdengebied: ± halve getijcyclus dicht om waterstand in vismigratierivier te verhogen
Waddenzeezijde	▪ Doorstroomoppervlak (m ²)	minimaal 20 m ²
	▪ Onderkant koker (m NAP)	gelijk aan diepte IJsselmeerzijde
	▪ Lengte (m)	100 m (vaste aanname)
	▪ Ruwheid (s/m ^{1/3})	Zo glad mogelijk
	▪ Sturing	Dagelijks operationele sturing
	▪ Lengte (m)	1 km (vaste aanname)
	▪ Diepte (m NAP)	-4 m NAP (vaste aanname)
	▪ Breedte op 0 m NAP (m)	minimaal 25 m
	▪ Ruwheid (s/m ^{1/3})	Normaal
	▪ Talud (-)	Normaal

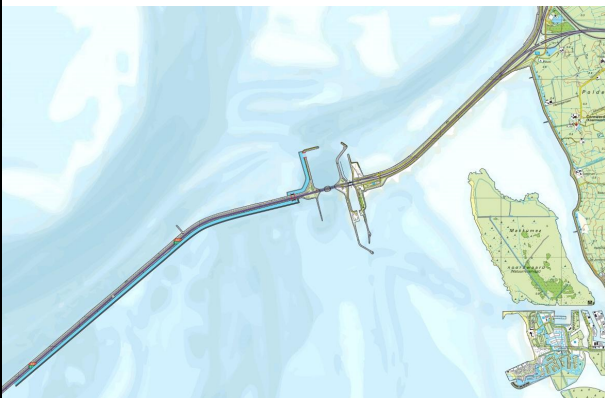
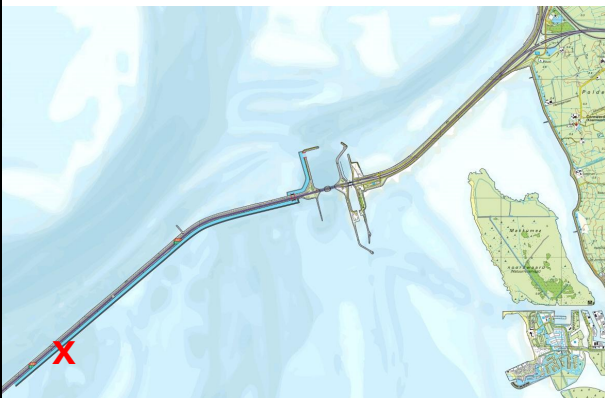
De functionele eis om geen zouttransport naar het IJsselmeer toe te staan, wordt door Deltares als meest dominant gezien. De grootte van de koker is daarvoor de belangrijkste ontwerpvariabele, terwijl met de sturing van de openingstijd van de koker zeer veel te reguleren is.

Het kokeroppervlak zal minimaal 20 m² moeten zijn, omdat een te klein oppervlak – zoals de berekende koker met 10 m² oppervlak – onvoldoende stroomsnelheid aan de IJsselmeerzijde genereert om het zoutere water dat in een gestratificeerde waterkolom bij de bodem zit, af te voeren. Bij 20 m² wordt een zoutindringingslengte van 2,5 km vanaf de Afsluitdijk berekend bij een breedte van 25 m en een diepte van -4 m NAP. Verondieping tot -3 m NAP leidt tot vergelijkbare zoutindringingslengte (2,3 km). Versmalling tot 12,5 m leidt tot een grotere zoutindringingslengte (3,4 km). Een grotere koker met 40 m² oppervlak vergroot de zoutindringingslengte tot 3,3 km. Met het 1D model worden vergelijkbare, hetzij iets grotere zoutindringingslengtes berekend.

In al deze gevallen valt de maximale zoutindringingslengte ruim binnen de voorgestelde 4 km lengte van de vismigratierivier aan de IJsselmeerzijde (herziene basisvariant). Met de aangenomen openingstelling van de koker (openen als waterstand Waddenzee minder dan 20 cm hoger is dan het IJsselmeer) wordt een zoutindringingslengte van maximaal 2,4 km berekend, wat aangeeft dat er ruimte is om meer zout binnen te laten door de koker langer open te laten. Langere openstelling is mogelijk, maar zal nauw luisteren. Het 1D model gaf aan dat 30 minuten langer open al resulteerde in een 1,7 km langere zoutindringing (4,8 km in plaats van 3,1 km).

Cruciaal is de sturing van openen en sluiten van de koker. Hoewel dat in deze studie niet onderzocht is, is onze overtuiging dat met een operationeel sturingssysteem dat op actuele waterstand en zoutconcentratie de opening en sluiting van koker regelt een goed gecontroleerd en beheersbaar watersysteem gerealiseerd kan worden. De mogelijkheid tot sluiting aan de IJsselmeerzijde is dan op dagelijkse aansturing niet nodig, maar kan voor onverwachte situaties en/of speciale omstandigheden als een storm toch nodig zijn. Dit biedt een tweede regelknop waarmee water- en zouttransport in bijzondere gevallen te sturen is.

In Figuur 6.1 worden de varianten uit de Notitie Reikwijdte en Detail (zie ook bijlage A) langs de geïdentificeerde ontwerpcriteria uit Tabel 6.2 gelegd. Variant 1B Lijn 2-4km voldoet niet aan de ontwerpcriteria. De andere vier varianten voldoen wel.

 Variant 1A Lijn 6km	Deze variant komt overeen met de basisvariant in de modelberekeningen. De 6 km lengte aan de IJsselmeerzijde kan gereduceerd worden tot 3-3,5 km voor een koker van 20 m² oppervlak. Deze variant is ook mogelijk met een 40 m² koker, maar dan moet de lengte minimaal 4-4,5 km zijn. De breedte van 25 m voldoet. De diepte van -4 m NAP aan de IJsselmeerzijde kan, maar zou tot -3 m NAP gereduceerd kunnen worden. Operationele sturing van de koker is noodzakelijk. De afsluiting aan de IJsselmeerzijde is nodig voor onverwachte situaties of bijzondere gevallen.
 Variant 1B Lijn 2-4km	Ten opzichte van 1A Lijn 6 km is deze variant korter en smaller. De combinatie van 2-4 km lengte en 10 m breedte <u>voldoet niet</u> aan de functionele eis van geen zouttransport. Alleen door de openstelling van de 20 m² koker te beperken zou de zoutindringing beperkt kunnen worden. Een 40 m² koker is in deze variant niet mogelijk. Operationele sturing van de koker is noodzakelijk. De afsluiting aan de IJsselmeerzijde is nodig voor onverwachte situaties of bijzondere gevallen.

 Variant 2A West Compact	In plaats van een rechte lijn als in Variant 1A 6 km Lijn is de vismigratierivier aan de IJsselmeerzijde 'opgevouwen' in een meanderende rivier. Hydraulisch zijn de Variant 1A 6 km Lijn en deze Variant 2A West Compact identiek: De 6 km lengte aan de IJsselmeerzijde kan gereduceerd worden tot 3-3,5 km voor een koker van 20 m² oppervlak. Deze variant is ook mogelijk met een 40 m² koker, maar dan moet de lengte minimaal 4-4,5 km zijn. De breedte van 25 m voldoet. De diepte van -4 m NAP aan de IJsselmeerzijde kan, maar zou tot -3 m NAP gereduceerd kunnen worden. Operationele sturing van de koker is noodzakelijk. De afsluiting aan de IJsselmeerzijde is nodig voor onverwachte situaties of bijzondere gevallen.
 Variant 2B West Natuurlijk	In deze variant is intergetijdengebied 'toegevoegd' aan Variant 2A West Compact. Intergetijdengebied heeft een zeer beperkte invloed op het water- en zouttransport, zodat er geen aanvullende hydraulische afwegingen zijn voor deze variant.
 Variant 3 Oost Natuurlijk	Hydraulisch wordt deze variant gekenmerkt door een minder diepe geul. De 6 km lengte aan de IJsselmeerzijde kan gereduceerd worden tot 3-3,5 km voor een koker van 20 m² oppervlak. Deze variant is ook mogelijk met een 40 m² koker, maar dan moet de lengte minimaal 4-4,5 km zijn. De breedte van 25 m en de diepte van -3 m NAP aan de IJsselmeerzijde voldoen. Operationele sturing van de koker is noodzakelijk. De afsluiting aan de IJsselmeerzijde is nodig voor onverwachte situaties of bijzondere gevallen. Voor aansluiting op de spuikom moet de scheepvaartroute gepasseerd worden middels een lange en diepe duiker. Dit aspect is niet onderzocht in deze studie.

Figuur 6.1 Toetsing van varianten aan de ontwerpcriteria

6.4 Overwegingen en aanbevelingen

De waterbeweging en het zouttransport in de vismigratierivier zijn complex en het aantal keuzes voor optimalisatie en/of afweging is groot. Met de 1D en 3D modellen is niet alles onderzocht. Deze afsluitende paragraaf bevat een aantal overwegingen van aspecten die niet modelmatig onderzocht zijn en van aspecten die geobserveerd zijn maar niet in het kader van dit onderzoek beantwoord kunnen worden. Hieruit volgt een aantal aanbevelingen.

3D model noodzakelijk

Dit rapport heeft laten zien dat de waterkolom aan de IJsselmeerzijde verticaal niet goed gemengd is. Naast de horizontale gradiënt in het zoutgehalte is er een sterke verticale gelaagdheid. Deze gradiënten zijn belangrijk voor het zouttransport en moeten in de modellering voor het definitief ontwerp meegenomen worden. Het 1D model heeft zijn voordeel gehad in deze verkennende fase, maar voldoet niet voor het definitief ontwerp. Een 3D model is noodzakelijk. Aanbevolen wordt dan ook om in het vervolg een 3D model in te zetten.

Lokale menging en turbulentie bij de in- en uitstroming van de koker

Door de koker gaan hoge (piek)debieten en de stroomsnelheid kan oplopen tot boven de 2 m/s. Dergelijke lokale stromingsprocessen bij in- en uitstroming kunnen niet goed in het 3D model geproduceerd, maar kunnen belangrijk zijn voor het zouttransport. Verwacht wordt dat het 3D model een worst-case benadering geeft. De lokale processen zijn met een specifiek 3D model gebaseerd op Computational Fluid Dynamics wel in beeld te brengen. Ook kan overwogen worden om met een fysiek schaalmodel van de vismigratierivier het gedrag van zout nader te onderzoeken.

Zoutvariatie in relatie tot vissen en intergetijdengebied

De modelberekeningen laten zien dat zout water de vismigratierivier aan de IJsselmeerzijde instroomt bij vloed op de Waddenzee. Er ontstond een brakwaterzone met een zoutgehalte variërend van 30 ppt bij de Afsluitdijk tot enkele ppt op zo'n 3 km van de Afsluitdijk. Bij eb op de Waddenzee wordt de IJsselmeerzijde ververs met zoet water. Dit houdt in dat op een bepaalde locatie twee maal per dag de zoutconcentratie van zoet naar zout en weer terug verandert. Voor flora en fauna die zich op een locatie vestigen, zijn dit ongebruikelijke en zware omstandigheden en er zijn betrekkelijk weinig soorten die zich hierbij thuis voelen. Vissen kunnen zich verplaatsen en zullen daarom minder bloot staan aan grote variatie.

De gelaagdheid van de waterkolom met hoge(re) zoutgehaltes onderin en lage(re) zoutgehaltes bij het wateroppervlak zorgt ervoor dat de zoutconcentratie bij het wateroppervlak laag blijft (zie Figuur 4.2 en Figuur 4.4). Die betekent dat intergetijdengebieden aan de IJsselmeerzijde vooral overstroomd zullen worden met zoet water of hooguit met licht brak water.

Aanbevolen wordt de grote variatie van het zoutgehalte op een locatie en de naar verwachting zoete of hooguit licht brakke intergetijdengebieden mee te nemen in de afweging van de ecologische potentie van de vismigratierivier.

Effect van klimaatverandering

In klimaatscenario's wordt rekening gehouden met zeespiegelstijging en een lage rivierafvoer. In het kader van het Deltaprogramma wordt voor het IJsselmeer onderzocht of een ander peilregime nodig is om aan klimaatverandering het hoofd te kunnen bieden. Voor de vismigratierivier zijn twee aspecten van belang.

Ten eerste of bij lage rivierafvoer voldoende zoet water beschikbaar is voor de lokstroom. Daarover kan dit onderzoek geen uitspraak doen.

Ten tweede het waterstandsverschil tussen het IJsselmeer en de Waddenzee, want dat bepaalt het debiet door de koker. Bij zeespiegelstijging en gelijkblijvend IJsselmeerpeil zal de koker korter openstaan als de sturingsregels niet aangepast worden. Tevens zal het waterstandsverschil gemiddeld kleiner zijn, waardoor het lokstroomdebiet kleiner zal worden.

Als het IJsselmeerpeil meestijgt met de zeespiegel treden er geen veranderingen op.

7 Referenties

Deltares, 2012: Verkenning naar de hydraulische haalbaarheid en effectiviteit van een Vismigratierivier door de Afsluitdijk, auteurs B. Becker en A.J. Nolte, Rapport 1206966, in opdracht van LINKIT CONSULT, oktober 2012.

Deltares, 2013: Delft3D-FLOW User Manual. manual, Delft: Deltares, 2013.

Deltares, 2014: auteur Th. Van der Kaaij, Rapport 120

French, Richard H., 1986: Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill International Editions.

Lesser, G.R., J.A. Roelvink, J.A.T.M. van Kester, and G.S. Stelling. "Development and validation of a three-dimensional Morphological model." (Journal of Coastal Engineering) 51 (2004).

Programma Naar een Rijke Waddenzee, 2013: Vismigratierivier Afsluitdijk, Haalbaarheid en Projectplan, 10 januari 2013

<http://www.rijkewaddenzee.nl/assets/pdf/Rapport%20haalbaarheid%20Vismigratierivier%20DEF.pdf>

Witteveen+Bos en Altenburg & Wymenga, 2014: Notitie Reikwijdte en Detailniveau Vismigratierivier Afsluitdijk, Referentie LW322-1/14-000.642, 10 januari 2014.

A Beschrijving varianten als startpunt voor de studie

In de MER studie naar de mogelijke varianten voor een vispassage bij Kornwerderzand worden 4 alternatieven genoemd. Binnen het alternatief 3 Vismigratierivier, worden hier 5 varianten onderzocht.

Alternatieven	Omschrijving	Varianten
Alternatief 1 Bestaande situatie optimaliseren (O+ Sluisbeheer)	Optimaliseren van de bestaande situatie. Het gaat om het optimaliseren van de bestaande spui- en scheepvaartsluizen in de Afsluitdijk. Hier worden KRW maatregelen door RWS uitgevoerd.	
Alternatief 2 Technische voorziening, hevel met getijdenbekken (met getijdewerking)	Hevelvoorziening over de dijk heen met een compact brakwater getijdenbekken aan de IJsselmeerzijde. De voorziening is technisch en bestaat uit een aantal diverse onderdelen die gekoppeld zijn met hevels; de totale waterstroom is beperkt,	
Alternatief 3 Vismigratierivier (gesloten zoet – zout overgang)	Dit is een vispassage door de Afsluitdijk waarbij er sprake is afvoer van water onder vrij verval, een retourstroming van zout zeewater en een brak water gebied. De vispassage is afsluitbaar zodat er geen sprake is van extra zout waterbelasting voor het IJsselmeer.	1. VMR – Lijn 1.A VMR - lijn, 6 km 1.B VMR - lijn, 2-4 km 2. VMR – west 2.A VMR west -Compact 2.B VMR west Natuurlijk 3. VMR – oost, natuurlijk
Alternatief 4 Open zoet – zout overgang	In dit alternatief worden de bestaande spuisluizen substantieel langer open gehouden zodat er een open, niet afsluitbaar brakwater gebied in het IJsselmeer ontstaat.	

De belangrijkste technische karakteristieken van de 5 varianten zijn onderstaand weergegeven.

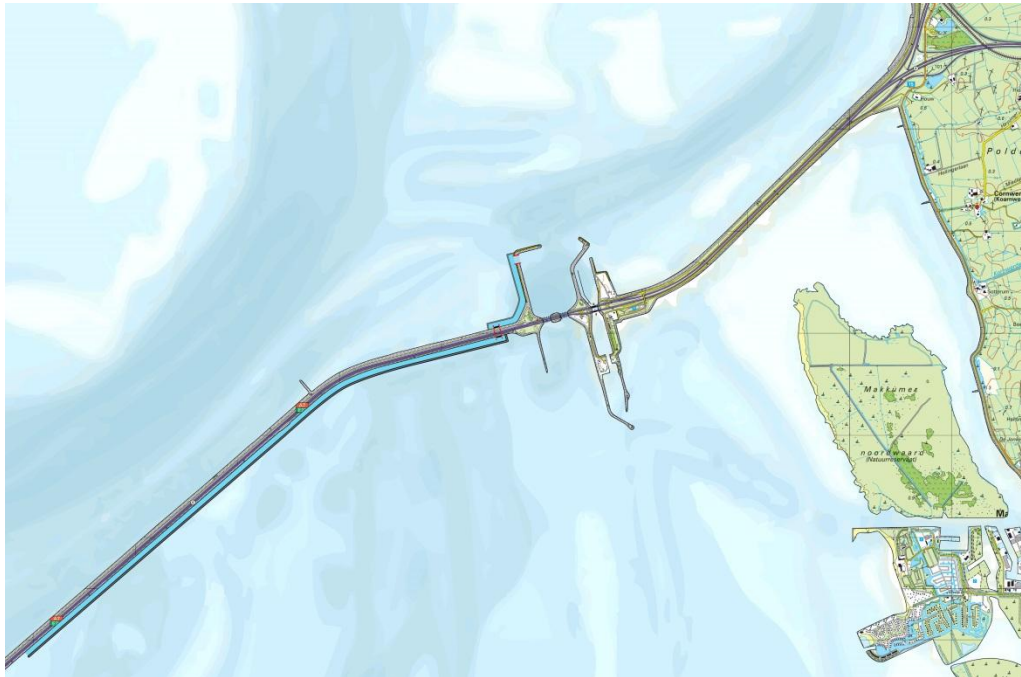
Varianten	Kenmerken Basisvoorziening VMR	Lengte	Doorstroom- opening koker	Breedte water	Oppervlakte (afgerond; inclusief dijken en omgeving)
1.A VMR - Lijn, 6 km	Stenen dijken en kribben	6 km	10 m ² 20 m ²	25 m	30 ha
1.B VMR - Lijn, 2-4 km	Vertical slot; betonnen constructie	2 km 4 km	10 m ² 20 m ²	10 m	5 ha 2,5 ha

2.A VMR – west, compact	Stenen dijken en kribben	6 km	10 m ² 20 m ²	25 m	30 ha
2.B VMR – west, natuurlijk	Getijdengeul tussen slikken en platen	6 km 10 km	10 m ² 20 m ²	50 – 300 m	100 – 150 ha
3. VMR – oost, natuurlijk	Getijdengeul tussen slikken en platen	6 km 10 km	10 m ² 20 m ²	50 – 300 m	100 – 150 ha

Beschrijving varianten

Variant 1.A VMR - Lijn, 6 km

Beeld



Beschrijving

De VMR-lijn is een langgerekt lijnelement, heeft een technische setting (stenen taluds) en ligt parallel aan de zuidzijde van de Afsluitdijk. Deze variant is geënt op de bijzondere karakteristieken van de VMR, zoals (zie verder haalbaarheidsstudie):

- Natuurlijk karakter waterstromen (op basis van het getij);
- Grote lokstroom van 10 – 20 m³/sec;
- Retourstroming van zout zeewater;
- Lange openstand. VMR blijft zo lang mogelijk open om maximale vismigratie mogelijkheden te bieden;
- Beperkt brak water habitat binnen de VMR.

De doelstelling is dat 90% van alle vóór de spuisluizen aanwezige trekvisen middels de VMR het IJsselmeer kunnen bereiken. Hiervoor moet de VMR zo lang mogelijk open blijven staan bij gelijk water en instromend zeewater. De variant heeft een langgerekte vorm aan de voet van de Afsluitdijk. Aan de buitenzijde, Waddenzeezijde, wordt gekozen voor een lijnvormig element

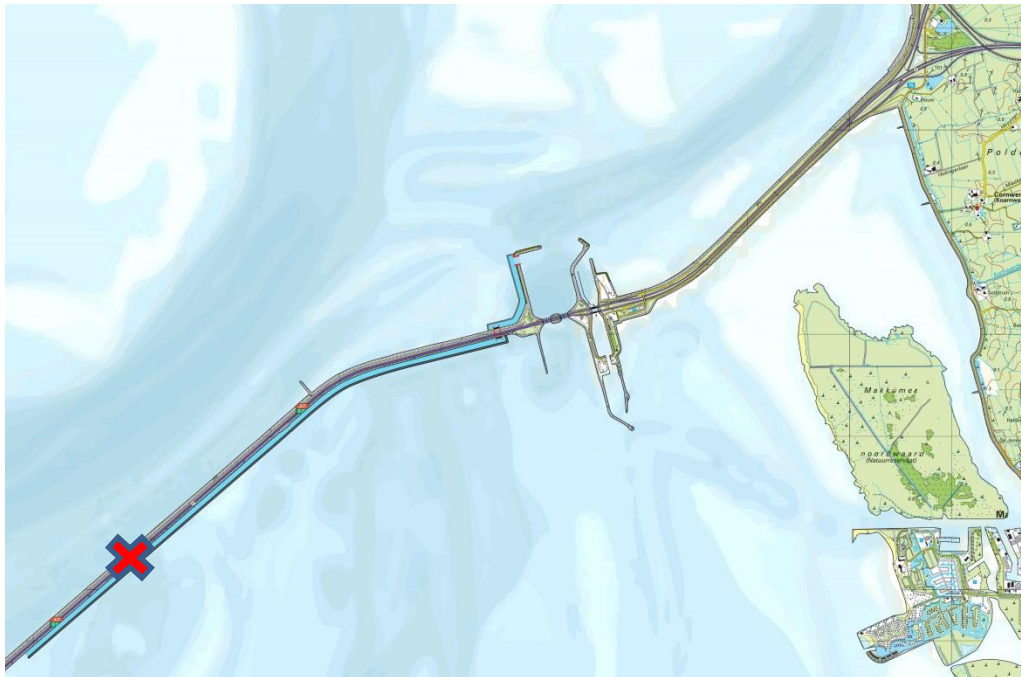
gekoppeld aan de strekdam.

De concrete afmetingen van de variant zijn:

- Lengte: 6 km (1 km in Waddenzee en 5 km in IJsselmeer);
- Breedte water: 25 m breed op waterlijn;
- Oppervlakte (circa): 30 ha;
- Doorstroomopening koker door Afsluitdijk: 10 m² en 20 m²;
- Technische setting: in steen gelegde dijken met korte strekdammen dwars op lengte dijk
- De lokstroom bedraagt maximaal 20 m³/sec (deze wisselt door het getij heen);
- Waterdiepte van 4 m;
- Zeer beperkt oevermilieu;
- Stenen op de bodem om microhabitat te bieden;
- De VMR heeft 3 of 4 uitlaten naar de spuikom van KWZ toe om optimaal op de bestaande spuistroom aan te sluiten;
- De VMR heeft 2 afsluitbare uitgangen naar het IJsselmeer.
- De VMR heeft afsluitbare, stormbestendige (1:10.000) sluizen aan de Afsluitdijk (2 x) en aan de IJsselmeerzijde (1 x per opening)
- De lokstroom bedraagt maximaal 20 m³/sec (deze wisselt door het getij heen)

Variant 1.B VMR - Lijnelement, 2-4 km

Beeld



Beschrijving

De variant is de meer compacte vorm van variant 3.1. De VMR-lijn is ook een langgerekt lijnelement, heeft een technische setting (stenen taluds) en ligt parallel aan de zuidzijde van de Afsluitdijk. Deze variant is geënt op een aantal bijzondere karakteristieken van de VMR, zoals (zie verder haalbaarheidsstudie):

- Natuurlijk karakter waterstromen (op basis van het getij);
- Lokstroom zoet water (te bepalen hoe veel precies);
- Retourstroming van zout zeewater;
- Zo lange mogelijke openstand;
- Beperkt brak water habitat binnen de VMR.

De doelstelling is dat 90% van alle vóór de spuisluizen aanwezige trekvisen middels de VMR het IJsselmeer kunnen bereiken. De variant heeft een langgerekte vorm aan de voet van de Afsluitdijk. Aan de buitenzijde, Waddenzeezijde, wordt gekozen voor een lijnvormig element gekoppeld aan de strekdam.

Echter, deze variant is compacter dan de eerste variant: hij is smaller (10 m waterlijn), korter 2 – 4 km) en heeft kleinere doorstroom openingen (in de VMR) waardoor het zeewater niet zo snel de VMR in kan dringen. Er zijn dus voorzieningen aanwezig om de zoutindringing te beperken. Dit kunnen deels bewegende elementen zijn. De variant is in de basis een vertical slot vispassage met een waterstroming in 2 richtingen. De Elbe fish way in Geesthacht is de inspiratie voor deze variant. De te overbruggen hoogte tussen laag en hoog water op Waddenzee is in gemiddelde situatie 2 m; dit betreft 0,60 van winterpeil IJsselmeer naar eb; en 1,40 m van winterpeil IJsselmeer naar vloed op de Waddenzee. De variant heeft een betonnen constructie in een compacte vorm. Aan de buitenzijde wordt gekozen voor een lijnvormig element gekoppeld aan de strekdam. Aan de binnenzijde wordt gekozen voor een geblokte

vorm.

De concrete afmetingen van de variant zijn:

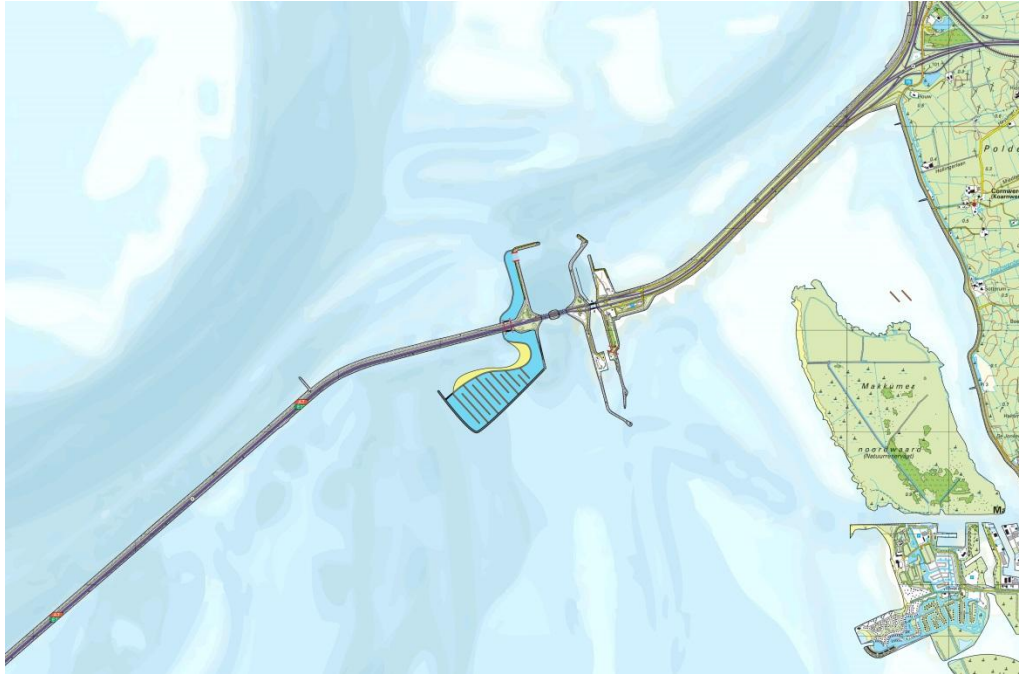
- Lengte: 2 km; en 4 km (1 km in Waddenzee en 1 km in IJsselmeer; 1 km in Waddenzee en 3 km in IJsselmeer)
- Breedte water: 10 m breed op waterlijn;
- Oppervlakte (circa): 5 ha (bij een lengte van 3 km); en 2,5 ha (bij een lengte van 1 km);
- Doorstroomopening koker door Afsluitdijk: 10 m² en 20 m²;
- Betonnen constructie van aan elkaar geschakelde bakken (vertical slot passage);
- 10 m brede bakken; lengte van de bakken 20 m;
- Verschil in waterpeil tussen bakken 5 cm (bij Geesthacht 10 cm);
- Aan het eind van de bak, 2 x 1 m opening naar de volgende bak. Hierdoor is de weerstand voor instromend zout water hoog. De hoeveelheid instromend zout water wordt hier echter ook mee beperkt. En de debiet dat door de VMR kan stromen is waarschijnlijk beperkt, en daarmee en de lokstroom;
- De lokstroom: de te realiseren grootte moet worden bepaald in de modellering;
- Waterdiepte van 4 m;
- Geen oevermilieu;
- Stenen op de bodem om microhabitat te bieden;
- De VMR heeft 3 of 4 uitlaten naar de spuikom van KWZ toe om optimaal op de bestaande spuistroom aan te sluiten;
- De VMR heeft 2 afsluitbare uitgangen naar het IJsselmeer.
- De VMR heeft afsluitbare, stormbestendige (1:10.000) sluisen aan de Afsluitdijk (2 x) en aan de IJsselmeerzijde (1 x per opening)

Referentiebeeld



Variant 2.A VMR – west, compact

Beeld



Beschrijving

Deze variant van de VMR heeft een technische setting (stenen dijken/taluds) en ligt compact ten westen van het bestaande spuicomplex van KWZ. Deze variant is geënt op de bijzondere karakteristieken van de VMR, zoals (zie verder haalbaarheidsstudie):

- Natuurlijk karakter waterstromen (op basis van het getij);
- Grote lokstroom van 10 – 20 m³/sec;
- Retourstroming van zout zeewater;
- Lange openstand. VMR blijft zo lang mogelijk open om maximale vismigratie mogelijkheden te bieden;
- Beperkt brak water habitat binnen de VMR.

De doelstelling is dat 90% van alle vóór de spuisluizen aanwezige trekvisen middels de VMR het IJsselmeer kunnen bereiken. Hiervoor moet de VMR zo lang mogelijk open blijven staan bij gelijk water en instromend zeewater. De variant heeft een compacte vorm op enige afstand van de Afsluitdijk. Aan de buitenzijde, Waddenzeezijde, wordt gekozen voor een lijnvormig element gekoppeld aan de strekdam.

De concrete afmetingen van de variant zijn:

- Lengte: 6 km (1 km in Waddenzee; en 5 km in IJsselmeer)
- Breedte water: 25 m breed op waterlijn;
- Oppervlakte (circa): 30 ha;
- Doorstroomopening koker door Afsluitdijk: 10 m² en 20 m²;
- Technische setting: in steen gelegde dijken met strekdammen;
- De lokstroom bedraagt maximaal 20 m³/sec (deze wisselt door het getij heen);
- Waterdiepte van 4 m;
- Zeer beperkt oevermilieu;

- Stenen op de bodem om microhabitat te bieden;
- De VMR heeft 3 of 4 uitlaten naar de spuikom van KWZ toe om optimaal op de bestaande spuiroom aan te sluiten;
- De VMR heeft 2 afsluitbare uitgangen naar het IJsselmeer;
- De VMR heeft afsluitbare, stormbestendige (1:10.000) sluisen aan de Afsluitdijk (2 x) en aan de IJsselmeerzijde (1 x per opening);
- De lokstroom bedraagt maximaal 20 m³/sec (deze wisselt door het getij heen).

Variant 2.B VMR West - natuurlijk

Beeld



Vismigratie rivier in een natuurlijke setting aan de Afsluitdijk. Deze variant is gebaseerd op de bijzondere karakteristieken van de VMR, zoals (zie verder haalbaarheidsstudie):

- Natuurlijk karakter waterstromen (op basis van het getij);
- Grote lokstroom van 10 – 20 m³/sec;
- Retourstroming van zout zeewater;
- Lange openstand. VMR blijft zo lang mogelijk open om maximale vismigratie mogelijkheden te bieden;
- Brak water habitat.

De doelstelling is dat 90% van alle vóór de spuisluizen aanwezige trekvis middels de VMR het IJsselmeer kunnen bereiken. Hiervoor moet de VMR zo lang mogelijk open blijven staan bij gelijk water en instromend zeewater

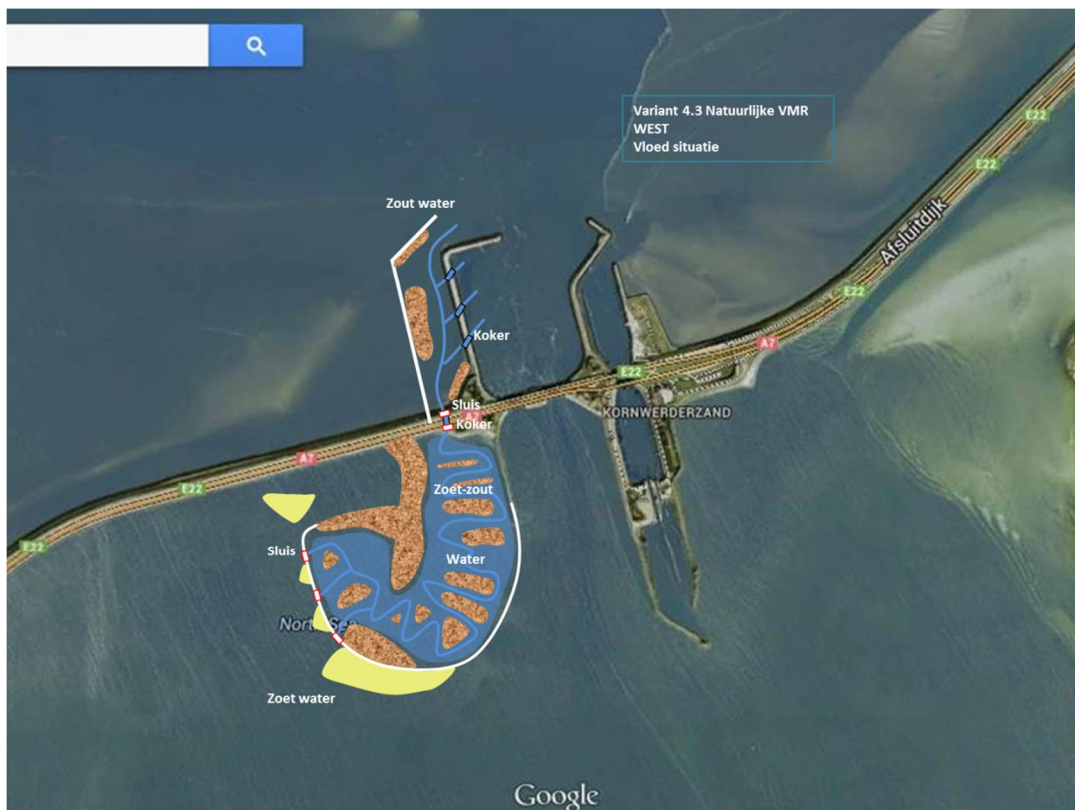
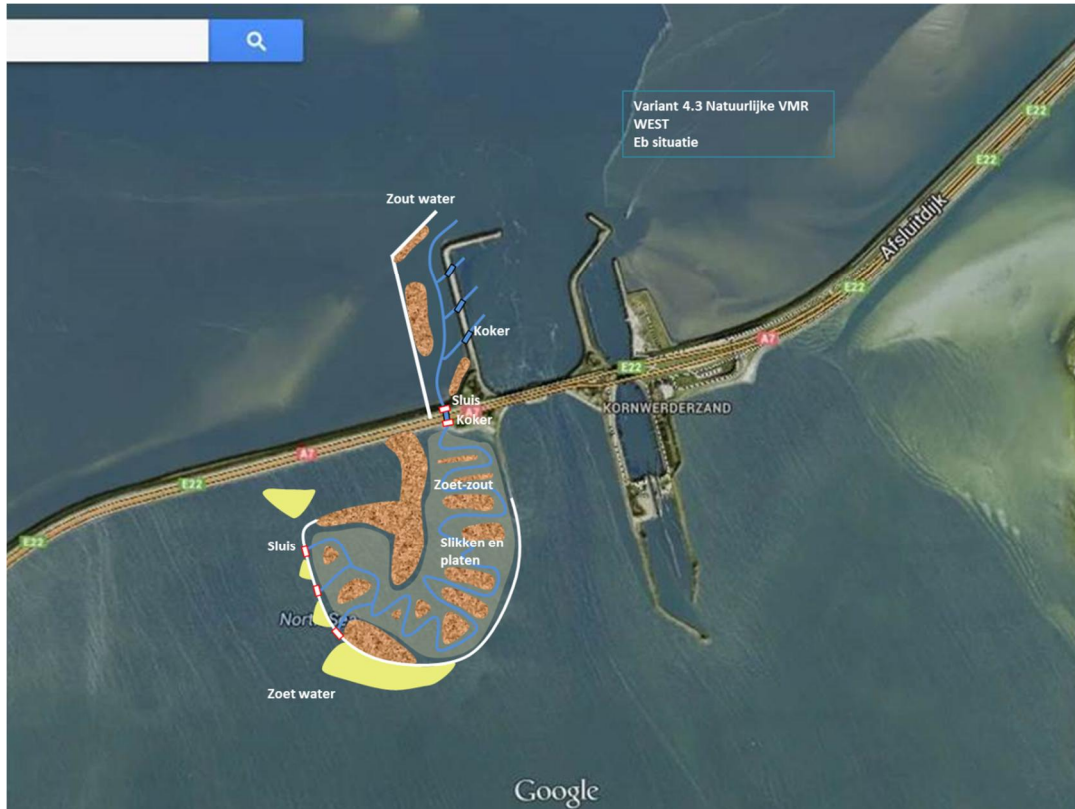
Deze variant van de vismigratierivier wordt gevormd door een getijdengeul in een landschap van slikken en platen. Aan de Waddenzee-zijde wordt gekozen voor een concrete aantakking op de spuikom van de spuisluizen; aan de IJsselmeer-zijde is een circa 100 - 150 ha groot brakwatergetijde gebied aanwezig dat wordt begrensd door een beschermende dijk en eilanden.

Concrete afmetingen van de varianten zijn:

- Lengte: 6 km en 10 km (1 km in Waddenzee en 5 km in IJsselmeer; 1 km in Waddenzee en 9 km in IJsselmeer)
- Breedte water: de getijdengeul heeft een wisselende breedte van 50 m tot 300 m (bij laag water en hoog water);

- Oppervlakte (circa): 100 – 150 ha;
- Doorstroomopening koker door Afsluitdijk: 10 m² en 20 m²;
- Natuurlijke setting: getijdengeul die tussen slikken en platen slingert;
- De lokstroom bedraagt maximaal 20 m³/sec (deze wisselt door het getij heen);
- De getijdegeul is 4 m diep en heeft een natuurlijk profiel met brede ondiepe oevers;
- Er is sprake van groot oppervlak aan droogvallende slikken platen bij laag water;
- Het totale gebied beslaat circa 100 - 150 ha brakwatergetijde natuur met een getijdeslag van circa 0,5 m;
- Bij hoog water staat circa 80% van het gebied onder water; bij laag water valt een groot deel van het gebied droog en ligt de getijdegeul tussen de slikken en platen;
- De bedding van de VMR is van klei en zand;
- De buitenkant van de VMR bestaat uit een beschermende dijk en eilanden met een vooroeververdediging ;
- De VMR heeft 3 of 4 uitlaten naar de spuikom van KWZ toe om optimaal op de bestaande spuistroom aan te sluiten;
- De VMR heeft 2 of 3 afsluitbare uitgangen naar het IJsselmeer;
- De VMR heeft afsluitbare sluizen aan de Afsluitdijk (2 x) en aan de IJsselmeerzijde (1 x);
- De lokstroom sluit optimaal aan op de westzijde van de spuikom van Kornwerderzand en einde van de spuikom.

Aanvullend beeld



Variant 3 VMR Oost - natuurlijk

Beeld



Vismigratie rivier in een natuurlijke setting aan de Afsluitdijk, aan de oostzijde van het spui/sluiscocomplex Kornwerderzand. Deze variant is geënt op de bijzondere karakteristieken van de VMR, zoals (zie verder haalbaarheidsstudie):

- Natuurlijk karakter waterstromen (op basis van het getij);
- Grote lokstroom van 10 – 20 m³/sec;
- Retourstroming van zout zeewater;
- Lange openstand. VMR blijft zo lang mogelijk open om maximale vismigratie mogelijkheden te bieden;
- Brak water habitat.

De doelstelling is dat 90% van alle vóór de spuisluizen aanwezige trekvisen middels de VMR het IJsselmeer kunnen bereiken. Hiervoor moet de VMR zo lang mogelijk open blijven staan bij gelijk water en instromend zeewater

Deze variant van de vismigratierivier wordt gevormd door een getijdengeul in een landschap van slikken en platen. Er wordt vanaf de oostzijde, via het scheepvaart-complex, aangesloten op de spui; aan de IJsselmeer-zijde is een circa 100 - 150 ha groot brakwatergetijde gebied aanwezig dat wordt begrensd door een beschermende dijk en eilanden.

Concrete afmetingen van de varianten zijn:

- Lengte: 6 km en 10 km (1 km in Waddenzee en 5 km in IJsselmeer; 1 km in Waddenzee en 9 km in IJsselmeer);
- Breedte water: de getijdengeul heeft een wisselende breedte van 50 m tot 300 m (bij laag water en hoog water);
- Oppervlakte (circa): 100 – 150 ha;

- Doorstroomopening: er wordt een separate, open koker van 20 m² aangelegd aan de oostzijde in het scheepvaart-sluiscapex. Aan de Waddenzeezijde moet een buis met een doorstroomprofiel van 20 m² worden aangelegd; en een koppeling worden gemaakt naar de spuikom (voor de spuisluisen van KWZ). Cruciaal is of de vissen de ingang vanuit de spuikom kunnen vinden en de "onderwater-buis" willen gebruiken voor passage;
- Natuurlijke setting: getijdengeul die tussen slikken en platen slingert;
- De lokstroom bedraagt maximaal 20 m³/sec (deze wisselt door het getij heen);
- De getijdengeul is 4 m diep en heeft een natuurlijk profiel met brede ondiepe oevers;
- Er is sprake van groot oppervlak aan droogvallende slikken platen bij laag water;
- Het totale gebied beslaat circa 100 - 150 ha brakwatergetijde natuur met een getijdeslag van circa 0,5 m;
- Bij hoog water staat circa 80% van het gebied onder water; bij laag water valt een groot deel van het gebied droog en ligt de getijdengeul tussen de slikken en platen;
- De bedding van de VMR is van klei en zand;
- De buitenkant van de VMR bestaat uit een beschermende dijk en eilanden met een vooroeververdediging;
- De VMR ligt ten oosten van KWZ. Dit heeft een aantal potentiële voordelen: locatie in minder diep water, in de "windluwte" waardoor windbelasting minder zal zijn en goede koppeling met recreatie/ontsluiting bij bestaande afslag snelweg/parkeerplaats;
- De VMR heeft 3 of 4 uitlaten naar de spuikom van KWZ toe om optimaal op de bestaande spuistroom aan te sluiten;
- De VMR heeft 2 of 3 afsluitbare uitgangen naar het IJsselmeer;
- De VMR heeft afsluitbare sluisen aan de Afsluitdijk (2 x) en aan de IJsselmeerzijde (1 x);
- De lokstroom sluit optimaal aan op de westzijde van de spuikom van Kornwerderzand en einde van de spuikom

Aanvullend beeld

