Ecologie van zoet-zout overgangen in deltagebieden

Literatuurstudie en beoordeling van een scenario in het Volkerak-Zoommeer

Auteurs: Marijn Tangelder, Erwin Winter en Tom Ysebaert

Wageningen University &
Research rapport C116/17

Ecologie van zoet-zout overgangen in deltagebieden

Literatuurstudie en beoordeling van een scenario in het Volkerak-Zoommeer

Auteur(s): Marijn Tangelder, Erwin Winter en Tom Ysebaert

Publicatiedatum: December 2017

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Marine Research in opdracht van en gefinancierd door het Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'Natuurambitie Grote Wateren' (projectnummer BO-11-018.01-005)

Wageningen Marine Research Den Helder, december 2017

Wageningen Marine Research rapport C116/17

Marijn Tangelder, Erwin Winter en Tom Ysebaert, 2017. Ecologie van zoet-zout overgangen deltagebieden. Wageningen Marine Research Wageningen UR (University & Research centre), Wageningen Marine Research rapport C116/17. 48 blz.

Keywords: zoet-zout overgang, zoet-zout gradiënt, estuaria, Volkerak-Zoommeer

Opdrachtgever: Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit
T.a.v.: Astrid Hilgers
Bezuidenhoutseweg 73
2594 AC Den Haag

BO-11-018.01-005

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/436428>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research Wageningen UR is ISO 9001:2008 gecertificeerd.

© 2017 Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, onderdeel
van Stichting Wageningen Research
KvK nr. 09098104,
IMARES BTW nr. NL 8113.83.696.B16.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

De Directie van Wageningen Marine Research is niet aansprakelijk voor
gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de
resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van IMARES;
opdrachtgever vrijwaart IMARES van aanspraken van derden in verband met deze
toepassing.
Dit rapport is vervaardigd op verzoek van de opdrachtgever hierboven aangegeven
en is zijn eigendom. Niets uit dit rapport mag weergegeven en/of gepubliceerd
worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder
schriftelijke toestemming van de opdrachtgever.

A_4_3_1 V27

Inhoud

Samenvatting	4
1.1 Achtergrond	5
1.2 Doel	5
1.3 Werkwijze	6
2.1 Menging van zoet en zout	7
2.2 Estuariene circulatie en stratificatie	7
2.3 Sedimentdynamiek en -transport	10
2.4 Biochemische processen	11
2.5 Voorkomen van soorten	11
2.5.1 Het estuariene voedselweb: eten en gegeten worden	11
2.5.2 Soortenrijkdom langs de zoet-zout gradiënt	13
2.5.3 Verspreiding van soorten	14
3.1 Biodiversiteit en habitats	22
3.2 Opbouw van het kustsysteem	23
3.3 Brakwaterzone	24
3.3.1 Habitat	24
3.3.2 Voorkomen specifieke (zeldzame) soorten	24
3.3.3 Vismigratie	25
3.3.4 Kraam- en kinderkamerfunctie	29
4.1 Modelstudie door Deltares	31
4.2 Keuze voorkeursscenario	32
4.3 Ecologische beschouwing	33
Literatuur	41
Bijlage 1 Reconstructie oorspronkelijke zoutgehalten in de ZWD	45
Bijlage 2 Overzicht scenario's Volkerak-Zoommeer	48

Samenvatting

De overgang van zoet naar zout vanuit de rivier richting zee is een belangrijk kenmerk van estuaria. De grote variatie in waterbeweging door getij en rivier afvoer, zoutgehalten, sedimentatie/erosie in combinatie met aanvoer van nutriënten en organisch materiaal vormen de basis van een ecosysteem dat wordt gekenmerkt door een grote diversiteit in ecotopen en soorten. Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit heeft Wageningen Marine Research de opdracht gegeven om een verdiepende literatuurstudie uit te voeren naar de ecologie van zoet-zout overgangen. Dit onderzoek is gefinancierd vanuit het LNV-programma Beleidsondersteunend Onderzoek thema 'Natuurambitie Grote Wateren', projectnummer BO-11-018.01-005.

Deze studie laat zien dat een zoet-zout overgang geen simpele mengzone is van rivier- en zeewater maar een zeer complex ecosysteem met een groot aantal variabelen in fysische, chemische factoren en voorkomende habitats en levensgemeenschappen die continue variëren in ruimte en tijd. De ecologische betekenis van zoet-zout overgangen vertaalt zich in een hoge diversiteit aan habitats en soorten en het is van belang als kraam- en kinderkamer voor vissen en garnalen. Daarnaast is een open verbinding tussen rivier en zee de drager van processen van de opbouw van habitats en een hoge primaire productie als basis voor het estuariene voedselweb en een open migratie-corridor voor diadrome vissoorten. Het brakwaterhabitat is een relatief zeldzaam habitat in Noordwest Europa. De betekenis van deze zone voor unieke, zeldzame soorten lijkt beperkt en is er eerder sprake van het voorkomen van soorten met een brede zouttolerantie en enkele macrobenthos soorten die brakke omstandigheden prefereren. Daarnaast lijkt ook het belang van de brakke zone als acclimatisatiegebied voor migrerende vissen beperkt. De waarde van de brakke zone vertaalt zich vooral in het mogelijk maken van transportprocessen en het is de zone waar veel organisch materiaal wordt omgezet maar is daarnaast ook van belang voor brakwaterschorren en potentieel voorkomen van zeegras.

In deze studie is een potentieel voorkomen van een zoet-zout overgang in het Volkerak-Zoommeer en de potentiële ecologische ontwikkeling beschouwd, gekoppeld aan een modelstudie door Deltares. Het door Deltares gemodelleerde scenario voor een mogelijke zoet-zout overgang in het Volkerak-Zoommeer betreft een geringe zoetwatertoevoer vanuit het Hollands Diep via de Volkeraksluizen ($25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), en zoutwaterinlaten vanuit de Oosterschelde via Philipsdam ($240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) en Oesterdam ($60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). In dit scenario ontstaat een brak-zout systeemtype waar bij hoge afvoeren van de Dintel de bovenlaag tijdelijk verzoet. De verwachting voor de ecologische ontwikkeling is het ontstaan van een marien systeemtype dat op de Oosterschelde en het Grevelingenmeer zal lijken met soortgelijke hard- en zacht substraat gemeenschappen, voorkomen van estuariene en marien juveniele vissoorten en visetende vogels. Mogelijk dat ook zeegras kan ontwikkelen. Bij de Volkeraksluizen ontstaat een brakke zone, een relatief zeldzaam habitat. De verwachting is dat er geen blauwalgenbloei en zuurstofloosheid zal optreden wat gunstig is voor de in het water levende flora en fauna.

Voor de uitvoering van de Deltawerken vormden de centrale wateren Biesbosch/Hollands Diep/Haringvliet, Volkerak-Zoommeer/Grevelingenmeer en Oosterschelde in de Zuidwestelijke Delta een overgang van het Rijn-Maas riviersysteem naar de Noordzee. Vandaag de dag vormt alleen de Westerschelde en de Nieuwe Waterweg een geheel open verbinding waar nog sprake is van een overgang van zoet naar zout. Voorliggend rapport biedt een interessante basis met bundeling van bestaande kennis over zoet-zout overgangen voor vervolgonderzoek. Dit zou zich kunnen richten op het evalueren van hoe huidig en toekomstig beheer van de (potentiële) zoet-zout overgangen in de Zuidwestelijke Delta te weten Nieuwe Waterweg, Haringvliet, Kammer-Volkerak en Westerschelde ten goede komt aan de ecologische kwaliteit. Hierbij valt te denken aan enerzijds de migreerbaarheid van deze zones voor diadrome vissoorten maar ook de betekenis voor brakke habitats, bijzondere soorten, exoten, biologische productie en kinderkamerfunctie voor jonge vis en andere soorten.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Een estuarium is een verbrede, veelal trechtervormige monding van een rivier, waar zoet rivierwater en zout zeewater vermengd worden en zodoende brak water ontstaat, en waar getijverschil waarneembaar is. Een karakteristiek kenmerk van vele estuaria is de zoet-zout gradiënt die ontstaat door de menging van enerzijds zoet water afgevoerd vanuit de rivier en anderzijds zout water aangevoerd vanuit de zee. In de Zuidwestelijke Delta zijn als gevolg van de compartimentering en afdamming door de Deltawerken de oorspronkelijke zoet-zout gradiënten grotendeels verdwenen. Alleen in de Nieuwe Waterweg en het Schelde-estuarium is er nog sprake van een geleidelijke overgang van zoet naar zout. Al enige decennia spelen er discussies over het vergroten van estuariene dynamiek in de gecompartmenteerde wateren en daarmee gepaard gaande het herstel van zoet-zout gradiënten.

Voor het Volkerak-Zoommeer (VZM) is in de ontwerp-Rijksstructuurvisie Volkerak-Zoommeer het verzilten van het bekken verkend t.b.v. het verbeteren van de waterkwaliteit en de ecologische kwaliteit. De besluitvorming voor het opnieuw zout maken van het VZM is vanwege het ontbreken van voldoende financiën nog niet afgerond. In het voorjaar van 2017 heeft Rijkswaterstaat aan Deltares de opdracht gegeven om na te gaan of een optimalisatie mogelijk is van het voorkeursalternatief 'zout + beperkt getij' gericht op het creëren van een zoet-zout gradiënt in het bekken. Hiertoe wordt een verkenning uitgevoerd naar verschillende scenario's voor uiteenlopende debieten via doorlaten in de Volkerakdam, Philipsdam en Oesterdam (Tiessen & Nolte 2018, in voorbereiding).

Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit vindt het van belang dat er goede afwegingen worden gemaakt met het oog op de natuurbaten en ecologisch waarden van zoet-zout zones, zoals ook in lijn is met de beleidsvisie 'Natuurambitie Grote Wateren 2050 en verder' (Ministerie van Economische Zaken 2014). Daarom heeft het ministerie van LNV aan Wageningen Marine Research de opdracht gegeven om een verdiepende studie uit te voeren naar de ecologie van zoet-zout overgangen. Daarnaast en gekoppeld aan de modelstudie van Deltares is gevraagd een ecologische beoordeling te geven van één van de gemodelleerde scenario's voor een zoet-zout overgang in het VZM.

Dit onderzoek is gefinancierd vanuit het LNV-programma Beleidsondersteunend Onderzoek thema 'Natuurambitie Grote Wateren', projectnummer BO-11-018.01-005.

1.2 Doel

Het doel van deze studie is als volgt:

- Beschrijven ecologisch functioneren van zoet-zout overgangen in zijn algemeenheid en een beknopte beschrijving van (voormalige) zoet-zout overgangen in de Zuidwestelijke Delta (Hoofdstuk 2).
- Uiteenzetten van de ecologische betekenis van zoet-zout overgangen in relatie tot (Hoofdstuk 3):
 - Biodiversiteit
 - Opbouw van het kustecosysteem
 - Brakwaterzone
 - Als habitat voor specifieke (zeldzame) soorten
 - Acclimatisatiezone voor migrerende vissen
 - Kinderkamerfunctie
- Het bepalen en beoordelen d.m.v. expertoordeel van een voorkeursvariant van de door Deltares gemodelleerde scenario's voor een zoet-zout gradiënt in het Volkerak-Zoommeer (Tiessen & Nolte 2018, in voorbereiding) (Hoofdstuk 4).

NB: omdat de modelstudie door Deltares op moment van schrijven van dit rapport nog niet volledig was afgerond maar al wel zoutgehaltes zijn gemodelleerd is in overleg met de opdrachtgever ervoor gekozen om alleen de verandering van zoutgehaltes in relatie tot ecologie te beoordelen.

1.3 Werkwijze

Dit onderzoek betreft een literatuurstudie waarbij gebruik gemaakt is van bestaande kennis over zoet-zout overgangen vanuit peer reviewed artikelen, zowel nationaal als internationaal, en grijze literatuur (zoals rapporten). Daarnaast heeft het in 1973 door Wim Wolff vervaardigde proefschrift '*The estuary as a habitat. An analysis of data on the soft-bottom macrofauna of the estuarine area of the rivers Rhine, Meuse and Scheldt*' een belangrijke basis gevormd voor het beschrijven van het oorspronkelijk functioneren van zoet-zout overgangen in de Zuidwestelijke Delta. Voorliggend rapport richt zich voornamelijk op algemene ecologie van zoet-zout overgangen maar is wel grotendeels gebaseerd op kennis van (voormalige) zoet-zout overgangen in Nederland en systemen in vergelijkbare klimaatzones (o.a. Verenigde Staten). Op basis van deze kennis die in hoofdstuk 2 en 3 uiteen is gezet en vanuit expertoordeel van de auteurs van dit rapport is een ecologische beoordeling gemaakt van het VZM scenario in hoofdstuk 4.

2 Algemene ecologie van zoet-zout overgangen

Dit hoofdstuk beschrijft zoet-zout overgangen in estuaria vanuit de fysische en chemische variabelen, ruimtelijke en temporele verschillen en de gevolgen voor het voorkomen en de verspreiding van soorten.

2.1 Menging van zoet en zout

In een estuarium mengt zoet rivierwater zich met zout zeewater. Deze menging resulteert in een mengzone met een horizontale gradiënt in zoutgehalte van zoet via brak naar zout. De ligging van de mengzone en de mate van verticale menging (verticale zoutgradiënt, omdat het zoete water lichter is dan het zoute) in een estuarium zijn sterk afhankelijk van het getij, de golfslag en wind enerzijds, en de hoeveelheid zoetwateraanvoer anderzijds. Ook de vorm en bathymetrie/morfologie van het estuarium spelen hierbij een rol. Deze mengzone kan enorm fluctueren in ruimte en tijd; per dag, per getijcyclus, per seizoen, per jaar en in geval van extreme omstandigheden (bv. storm of extreme regenval). Op basis van het zoutgehalte kunnen estuaria ingedeeld worden in een aantal zones (Tabel 1).

Tabel 1. Indeling op basis van zoutgehalte (saliniteit) volgens het Venice classificatie systeem voor saliniteit (Anonymus 2003). PSU = Practical Salinity Unit

Klasse	Zone	Zoutgehalte Psu (saliniteit)
Zoet water	Limnetische zone	<0.5
Licht brak	Oligohaliene zone	0.5 – 5.0
Brak	Mesohaliene zone	5.0 – 18.0
Sterk brak	Polyhaliene zone	18.0 – 30.0
Zee water	Euhaliene zone	>30.0

Voor de uitvoering van de Deltawerken 1958-1987 vormden de centrale wateren Biesbosch/Hollands Diep/Haringvliet, Volkerak-Zoommeer/Grevelingenmeer en Oosterschelde in de Zuidwestelijke Delta een overgang van het Rijn-Maas riviersysteem naar de Noordzee. Ter illustratie zijn op basis van saliniteitsgegevens van Wolff (1973) kaarten gereproduceerd die de dynamiek van zoet en zout in de Zuidwestelijke Delta weergeven (Bijlage 1). De figuur laat de situatie zien bij gemiddelde rivierafvoeren bij hoog en laag tij. Ook worden extremen aangegeven bij laag tij en zeer hoge rivierafvoer en hoog tij bij zeer lage rivierafvoer. Deze figuren geven de bandbreedte van de brakke zone aan. In periode van droogte met lage rivierafvoeren tot gevolg reikt de brakke zone in het Rijn-Maas stroomgebied tot in de Biesbosch. Zware regenval met zeer hoge rivierafvoer als gevolg kunnen leiden tot een verzoeting van de Voordelta tot tientallen kilometers uit de kust. Dit geeft aan dat door combinatie van getij en rivierafvoeren grote fluctuaties op kunnen treden.

2.2 Estuariene circulatie en stratificatie

Verschillen in dichtheid tussen het lichtere zoete water en zwaardere zoute water veroorzaakt "estuariene circulatie": stroming in twee lagen waarbij lichter oppervlaktewater zeewaarts wordt getransporteerd over een landwaarts stromende bodemlaag (Monismith *et al.* 1996) en waarbij stratificatie kan ontstaan. Estuariene circulatie beïnvloedt ook het transport van opgeloste stoffen, sediment, organisch materiaal en biota in beide waterlagen. Het dichtheidsverschil tussen zoet en zout water veroorzaakt het potentieel voor een sterkere stratificatie dan de thermische stratificatie die voorkomt in meren of oceanen (Cloern *et al.* 2017). Stratificatie varieert met rivierafvoer over de

seizoenen. Volgens een studie van Cloern et al. (2017) in San Francisco Bay in de Verenigde Staten treedt de sterkste stratificatie op bij een saliniteit van 10-25 in het middendeel van het estuarium. De toepasbaarheid van deze grenzen op andere estuaria hangt af van het bodemprofiel (dit beïnvloedt de watercirculatie) en hydro-meteorologische omstandigheden (bv. neerslagpatronen, getij- en golfslag etc.). De gelaagdheid gaat over in semi-gemixte delen tot homogeen gemixte delen in de monding onder invloed van getijdestroming (Wolff 1973). Richting de rivier zwakt de zoute water laag steeds verder af. Het getij is meestal nog veel verder landinwaarts merkbaar dan het zout. Zo is het getij op de Rijn merkbaar tot in Hagestein (Lek) of Zaltbommel (Waal) {Liefveld, 2007 #646} terwijl de grens van de brakke zone in de Nieuwe Waterweg onder gemiddelde omstandigheden niet tot voorbij Rotterdam komt. Afhankelijk van de omstandigheden en de plek in het estuarium kan het mixen tussen zoet en zout dus op verschillende manieren verlopen, in Figuur 1 staat een schematisatie van vier verschillende regimes voor saliniteit aangegeven.

Figuur 1. Dwarsdoorsneden van estuaria met vier regimes voor saliniteit aangegeven: A. Gestratificeerd; zoet en zout water als vrijwel volledig gescheiden stromen, B. Semi-gemengd; zoet en zout water deels gemengd met verschillen tussen bodem en oppervlakte, C. Volledig gemengd; geleidelijke overgang van zoet naar zout, D. Inverse patroon; een omgedraaid patroon waarbij het toestromende water zouter is dan het water in het estuarium als gevolg van hoge verdamping (bron: <http://www.ozcoasts.gov.au>).

2.3 Sedimentdynamiek en -transport

De hydrodynamiek van het water wordt gestuurd door primaire processen van getij, rivierafvoer en meteorologische omstandigheden ((extreme) neerslag, wind en golven etc.). Deze processen resulteren in complexe, incident gedreven waterbeweging die goed te voorspellen is.

Sedimentdynamiek wordt in de basis bepaald door de hydrodynamiek en sedimentlading van rivier- en zeewater en interacties tussen deeltjes. Deze verschillende invloeden zorgen er ook voor dat er een ruimtelijke heterogeniteit van substraattypen ontstaat. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen twee typen sediment transport: cohesief en non-cohesief (Shrestha *et al.* 2014). Cohesief sedimenttransport (betreft fijne sedimenten met een korrelgrootte van $<63\ \mu\text{m}$ - slib) wordt gestuurd door dispersie en samenklontering van deeltjes, bezinking, consolidatie en erosie. Niet-cohesief sedimenttransport (betreft grovere sedimenten met een korrelgrootte van $>63\ \mu\text{m}$ – fijn tot grof zand, grind, schelpenresten) wordt gestuurd door dispersie, bezinking, zetting en transport in suspensie over de bodem. Deze twee transportprocessen staan geïllustreerd in Figuur 2.

Figuur 2. Schematische weergave van sedimenttransport processen van samenklonterende deeltjes ("cohesive") en niet-samenklonterende deeltjes ("non-cohesive"). C is het gesuspendeerde sediment profiel, U is de stroomsnelheid, τ_b schuifspanning en u_* is de schuifsnijspanning (Shrestha, Su *et al.* 2014).

Over het algemeen verloopt de distributie van sediment in een estuarium als volgt; de rivier voert sediment aan (bv. grind, (grof/fijn) zand en slib). In het estuarium worden deze sedimenten onder invloed van eerder genoemde processen verspreid. Over het algemeen sedimenteert slib en fijn zand in de bovenstroomse delen van het estuarium en aan de randen van het estuarium op de intergetijdengebieden in de luwe zones; op de bodem van getijdegeulen komt doorgaans een grover zandig sediment voor doordat de hydrodynamiek hoger is en alleen grovere deeltjes hier kunnen bezinken. Schorvegetatie op de intergetijdengebieden speelt ook een rol in het invangen van sediment en bevorderen van sedimentatie evenals de aanwezigheid van diatomeeën; kleine benthische algen, ook wel kiezelwieren (onderdeel van het microfytobenthos) die de weerstand van sediment tegen erosie kunnen verhogen (Sutherland *et al.* 1998). Daarnaast kunnen riffen van schelpdieren, zoals van de Japanse Oester (*Crassostrea gigas*) de sedimentdynamiek ook beïnvloeden (Wallis *et al.* 2015). Verder zeewaarts worden golven en getijdenstroming dominant en is het sediment doorgaans grover.

De sedimentconcentraties in het rivierwater variëren met neerslag omdat het regen-/smeltwater sedimentpartikels van het land naar de rivier toe spoelt. Daarnaast zijn wind- en golfcondities ook van invloed omdat dit zorgt voor turbulentie waardoor bodemsedimenten opnieuw in suspensie kunnen

komen: dit wordt resuspensie genoemd. Slib aangevoerd door de rivier wordt in eerste instantie door de oppervlakkige (zoete) waterlagen in gelaagde estuaria naar zee afgevoerd. Tegelijkertijd bezinkt het echter, mede onder invloed van de eerder beschreven processen (Figuur 2) die de partikelgrootte veranderen en komt het zo terecht in de diepe zoute waterlagen die richting de rivier stromen. Het wordt dus moeilijk voor slib om te ontsnappen uit deze estuariene sedimentcirculatie. Er ontstaat een troebelheidsmaximum. Dit maakt ook dat de brakke delen over het algemeen van nature zeer troebel zijn met hoge slibgehalten en depositie van slib langs de oevers van het estuarium.

2.4 Biochemische processen

Zoet-zout overgangen zijn de plaatsen waar relatief voedselrijk water afkomstig van het land de zee bereikt. De concentraties opgeloste nutriënten (bv. stikstof en fosfor afkomstig van het land), mineralen (bv. silicaat, afkomstig van vertering van stenen) en gesuspendeerd organisch materiaal (afgestorven resten van planten en dieren en van menselijke oorsprong) passeren het estuarium. Enerzijds kunnen deze concentraties in een lineair verband variëren simpelweg volgens verhouding van het mixen tussen rivier en zeewater maar ze kunnen ook een onregelmatig verloop vertonen bijvoorbeeld door opname van nutriënten door fytoplankton of silicaat door diatomeeën (Cloern, Jassby *et al.* 2017) of door verteren van organisch materiaal door bacteriën. Een bijkomende bron van organisch materiaal is het afsterven van de zoetwaterorganismen zodra ze in het brakke water terecht komen. Daarnaast kan de zee ook zorgen voor aanvoer van nutriënten en organisch materiaal. De mate van mixen van zoet en zout water bepaalt ook de beschikbaarheid van deze stoffen voor biota en hangt vooral af van de estuariene circulatie. In de brakke zone waar de zoete stroom water uit de rivier op het zoute water 'botst' ontstaat een zone met hoge turbiditeit waar organische vlokken worden gevormd (Moens *et al.* 2001). Deze zone fungeert als het ware als een bioreactor waar grote hoeveelheden bacteriën het organisch materiaal verteren en op deze manier beschikbaar maken voor de voedselketen in de vorm van nutriënten. Als gevolg van deze afbraakprocessen daalt de zuurstofconcentratie. Door de hoge turbiditeit wordt aanvoer van organisch materiaal en afvoer van afbraakproducten optimaal gedistribueerd. Bij een hoge organische belasting kan de zuurstofconcentratie echter zo laag worden dat de in het water levende organismen er nadeel van ondervinden zoals eerder vastgesteld is in de rivier de Schelde (Van Damme & Meire 2001) als gevolg van lozing van afvalwater in Vlaanderen. Verrassend genoeg bleek in de Schelde maar een geringe hoeveelheid van het organisch materiaal de Noordzee te bereiken wat aangeeft dat er krachtige afbraakprocessen plaatsvinden (dit verklaart ook de hoge zuurstofconsumptie). Tot slot is de temperatuur van het water een belangrijke factor die afbraakprocessen maar ook groei en voortplanting van organismen beïnvloedt. Rivier- en zeewater verschillen vaak in temperatuur en variëren ook over de seizoenen.

2.5 Voorkomen van soorten

2.5.1 Het estuariene voedselweb: eten en gegeten worden

De nutriënten die vrijkomen bij de afbraak van organisch materiaal door bacteriën, voornamelijk in de brakke zone, zijn gunstig voor groei van (pelagische) algen (primaire productie). Vanwege de hoge troebelheid in de brakke zone wordt deze groei beperkt door gelimiteerde lichtindringing, maar in de mondings- en kustzone is het water helderder en stijgt de primaire productie. Het microfytobenthos (voornamelijk diatomeeën) dat zich hecht op het zand en slik gedijt goed in ondiepe zones en intergetijdengebieden waar veel licht beschikbaar is en levert een belangrijke bijdrage aan de primaire productie (Underwood & Kromkamp 1999) in het estuarium en is een bron van voedsel voor bodemdieren (wormen, slakken etc.) en sommige vissoorten. In Nederland is het organisch materiaal voornamelijk afkomstig van de rivieren en neemt de hoeveelheid organisch materiaal af richting zee als gevolg van afbraak door bacteriën en consumptie door voornamelijk bodemorganismen. Ze zuigen met een soort slurkje de bodem af (bijvoorbeeld nonnetje *Limecola balthica*) of ze nemen happen bodemmateriaal, halen daar het eetbare uit en de rest wordt uitgescheiden. Zo vormt de zeepier of wadpier (*Arenicola marina*) de bekende pierenhoopjes; een trechtertje in de bodem is de plaats waar hij zijn voedsel opneemt. Bodemdieren worden onderverdeeld in verschillende voedselgilden:

suspension of filter feeders die zich voeden uit de waterkolom (vb. mossel, kokkel, oester, tunicaten, zeepokken), deep deposit feeders (vb. vele wormen) en surface deposit feeders (vb. wadslakje, *Peringia ulvae*) die zich voeden met organisch materiaal dat zich op of in de bodem bevindt, en interface feeders. De laatste kunnen zich afwisselend als filter feeder of als surface deposit feeder gedragen zoals sommige soorten wormen. Verder onderscheidt men nog predatoren (vb. zandzager, *Nephtys hombergii*) en omnivoren (vb. zeeduizendpoot (*Hediste diversicolor*), die zich als predator, als deep deposit feeder en zelfs als filter feeder kan gedragen). Veel van de bodemdieren zijn suspension feeders. Zij domineren vaak de biomassa, zoals ook in de Westerschelde en Oosterschelde. Ze eten wat er uit de waterkolom aan organisch materiaal naar beneden dwarrelt, zoals algen (fytoplankton). In het brakke en mariene deel van het estuarium zijn het verschillende soorten borstelwormen (polychaeten) die afhankelijk zijn van deze bron van voedsel (o.a. *Heteromastus filiformis* en *Capitella capitata*) (Wolff 1973). Deze mariene soorten migreren naar bovenstrooms zodra het zoutgehalte hoog genoeg is, naar de plekken waar het meeste voedsel aanwezig is. Dit patroon waarbij dichtheid van soorten vanuit het estuarium afneemt richting de Noordzee geldt ook voor meerdere soorten schelpdieren zoals de mossel (*Mytilus edulis*), kokkel (*Cerastoderma edule*), nonnetje (*Limecola balthica*) en de strandgaper (*Mya arenaria*). Deze mariene soorten schelpdieren zijn niet zo mobiel dat wanneer het zoutgehalte te laag wordt ze tijds richting zee kunnen migreren maar lossen dit op door hun schelp te sluiten en te wachten tot het zoutgehalte weer stijgt. Dit kunnen ze maximaal 5-6 dagen volhouden (Smaal & Wijsman 2015), maar het betekent wel dat ze moeten interen op hun reserves omdat ze niet kunnen filtreren.

Een aparte categorie vormen de getijde-migreerders (sommige platvissen zoals jonge schol (*Pleuronectes platessa*) en Tong (*Solea solea*) waarvoor estuaria belangrijke kraamkamers vormen (Tulp *et al.* 2008), verder strandkrab (*Carcinus maenas*), gewone garnaal (*Crangon crangon*) en steur- en aasgarnalen. Dit zijn dieren die bij hoog water de slikken optrekken voor voedsel en zich bij laag water weer in de geulen terugtrekken. De hoeveelheid voedsel is op de platen en slikken meestal groter dan in de geulen en bovendien is daar meer ruimte, zodat ze elkaar niet zo gauw in de weg zitten. Bij het droogvallen moeten ze tijdig weer naar het water, hoewel het sommige dieren wel eens lukt in de nog vochtige bodem te overtijen. Zodra de platen en slikken droogvallen vormt het bodemleven een belangrijke voedselbron voor vele soorten steltlopers (bv. scholekster (*Haematopus ostralegus*), kluut (*Recurvirostra avosetta*), rosse grutto (*Limosa lapponica*), bonte strandloper (*Calidris alpina*)) en bodemdieretende eenden (bv. bergeend (*Tadorna tadorna*)). Deze productieve intergetijdengebieden vormen hierbij een essentiële voedselbron voor vogels (op doortrek).

Flagellaten (ééncellige organismen) zijn de belangrijkste predator van bacteriën en vormen het microzoöplankton, dat op zijn beurt een begeerde voedselbron is voor iets grotere organismen zoals roeipootkreeftjes in het estuarium en radardieltjes in het zoete deel (Moens, Herman *et al.* 2001). Deze diertjes worden weer gegeten door voornamelijk vissen, bijvoorbeeld haring (*Clupea harengus*), sprat (*Sprattus sprattus*), spiering (*Osmerus eperlanus*), fint (*Alosa fallax*) en driedoornige stekelbaars (*Gasterosteus aculeatus*) en vormen een voedselbron voor visetende vogels zoals aalscholver (*Phalacrocorax carbo*), futen en sterns maar ook voor zeezoogdieren als de gewone zeehond (*Phoca vitulina*). Aasgarnalen en roeipootkreeftjes in het licht brakke deel van het estuarium voeden op organische vlokken. In figuur 3 is een voorbeeld van een voedselweb opgenomen voor soorten van estuariene gebieden.

Figuur 3. Een voorbeeld van een marien/estuariën voedselweb met in de basis productie van algen (fytoplankton en microfytobentos) die het voedsel vormen voor zoobenthos en grotere dieren zoals krabben, garnalen en vissen en vogelsoorten aan de top van het voedselweb. Vissen worden ook weer gegeten door zeezoogdieren (staan niet in deze figuur).

2.5.2 Soortenrijkdom langs de zoet-zout gradiënt

Saliniteit is een belangrijke bepalende factor voor het voorkomen van soorten in estuaria en kustgebieden (De Leeuw & Backx 2001). De brakwaterzone heeft van nature een lage biodiversiteit. Dit is al begin vorige eeuw onderzocht door Remane (1934) in de Baltische Zee en later verder onderbouwd en breder toepasbaar gemaakt door o.a. Whitfield et al. (2011) (Figuur 4). Dit komt omdat maar enkele gespecialiseerde soorten kunnen overleven in dit dynamische milieu. In estuaria is het vooral de hoge dynamiek (in waterstanden en saliniteit) in de brakwaterzone die leiden tot een lager aantal soorten ten opzichte van zoet- en zoutwater systemen (Attril 2002). Dit patroon wordt bevestigd door het uitgebreide benthosonderzoek van Wolff (1973) voorafgaand aan de uitvoering van de Deltawerken. De soortenrijkdom van macrobenthos is lager in de brakke gebieden (34 soorten in Haringvliet en Biesbosch) en stijgt richting de monding naar de Noordzee (157 soorten) (Wolff 1973).

Figuur 4. Het relatieve aantal zoet-, brak- en zoutwatersoorten bij verschillende zoutgehalten. De brakwaterzone heeft van nature een relatief lage soortenrijkdom. De stippellijn geeft de 50% waarde aan van het zoutgehalte van zeewater. (Bron: Whitfield et al. (2011), naar Remane (1934).

2.5.3 Verspreiding van soorten

In de voorgaande paragraaf staat uitgelegd dat het zoutgehalte bepalend is voor het voorkomen van soorten. Maar wat betekent dit precies voor de verspreiding van soorten in het estuarium?

Zonering van soorten

Sommige mariene soorten zoals vissen zijn mobiel en kunnen stroomop of -afwaarts migreren wanneer het zoutgehalte ongeschikt wordt. Dit geldt niet voor de weinig mobiele of vastzittende organismen (sessiel) van zacht en hard substraat, wieren en schorrenplanten. Hieronder wordt dieper ingegaan op de zonering van deze meer sessiele soortengroepen.

Bodemdieren van zacht substraat

Aan de zeezijde wordt een duidelijke biologische begrenzing waargenomen door het verschijnen van mariene soorten en verdwijnen van estuariene soorten die samenvalt met de overgang van sterk brak naar zeewater met <30 psu (Wolff 1973). Aan de rivier zijde is overgang van soorten minder abrupt. In de jaren '70 zijn door estuariene ecologen verschillende classificaties voorgesteld om benthische soorten in estuaria in te delen. Boesch onderzocht de zonering van het macrobenthos langs de geleidelijke gradiënt (homeohaline gradiënt) van York River (Verenigd Koninkrijk) naar zee en het estuarium van de Brisbane River (Australië) dat in het regenseizoen een zonering kon vertonen die flink heen en weer kon schuiven (poiklohaline gradiënt) (Boesch 1977). Vanuit deze studies stelde Boesch (1977) een indeling voor in stenohaliene mariene soorten, euryhaliene mariene soorten, euryhaliene opportunisten en estuariene residente soorten (Figuur 5). Stenohaliene mariene soorten vindt men in de mariene wateren aangrenzend aan het estuarium, euryhaliene mariene soorten tot in de zoute delen van de mesohaliene zone, euryhaliene opportunisten (vooral soorten borstelwormen) tot in de bovenstroomse delen van het estuarium en tot slot de zoetwatersoorten.

Wolff heeft in de jaren '70 een indeling ontwikkeld die is voortgekomen uit bemonstering en analyse van macrobenthos in de estuaria van de Zuidwestelijke Delta in de jaren 1958-1970 (Tabel 2). Hij maakte een onderverdeling in tien verspreidingstypen van soorten variërend van stenohaliene mariene soorten, tot mariene soorten die sterk brakke tot brakke zoutgehalten kunnen tolereren, estuariene en zoetwatersoorten. In Tabel 4 staat de verspreiding van deze 10 typen over een saliniteitsgradiënt aangegeven van de Noordzee tot aan de rivier voor de uitvoering van de Deltawerken. De saliniteitsgradiënt is ingedeeld in vijf zones: Noordzee met een hoge, stabiele saliniteit en geëxponeerde stranden (1), de monding van estuaria met hoge, stabiele saliniteit en beschutte kusten

(bv. voormalige Oosterschelde estuarium) (2), het middelste gedeelte van estuaria met onstabiele saliniteit en beschutte kusten (bv. voormalige Haringvliet estuarium) (3), de bovenstroomse delen van estuaria met zoet water met een stabiele saliniteit en beschutte kusten (bv. voormalige Biesbosch) (4) en tot slot de rivier met zoet water.

Tabel 2 en Tabel 3 geven een waardevol overzicht van de verspreiding van soorten en hun zonering langs de saliniteit gradiënt in de oorspronkelijke situatie voor het uitvoeren van de Deltawerken in het deltagebied. In paragraaf 3.1 wordt aan de hand van deze tabellen dieper ingegaan op in hoeverre soorten beperkt zijn tot een bepaalde zone en de brakke zone als habitat.

Figuur 5. Schematisch overzicht van de spreiding van benthische soortengroepen langs een geleidelijke zoutgradiënt in een estuarium (Boech 1977): stenohaliene mariene soorten (smalle zout tolerantie), euryhaliene mariene soorten (mariene soorten met een brede zouttolerantie), euryhaliene opportunisten (soorten met een brede zouttolerantie) en zoetwatersoorten.

Tabel 2. Verspreidingstypen van soorten met voorbeelden van taxa in de estuaria van de Zuidwestelijke Delta naar Wolff (1973) voor de uitvoering van de Deltawerken.

Verspreidingstypen	Voorbeeld taxa	Classificatie phylum/orde ¹	Nederlandse naam ¹
1. Offshore soorten	- <i>Corymorpha nutans</i>	-Cnidaria, Anthoathecata	-een soort van de hydroïdpoliepen orde ²
2. Soorten die voorkomen zowel offshore als in de monding van de estuaria	- <i>Anaitides groenlandica</i> (geaccepteerd als <i>Phyllodoce groenlandica</i> volgens WoRMS ¹) - <i>Ophelia borealis</i>	-Annelida, Polychaeta -Annelida, Polychaeta	-een soort van de borstelwormen orde ² -een soort van de borstelwormen orde ²
3. Soorten die voorkomen zowel offshore als in de mondingsgebieden (saliniteit > 27 psu)	- <i>Aricidea minuta</i>	- Annelida, Polychaeta	-een soort van de borstelwormen orde ²
4. Soorten die voorkomen zowel in een smalle strook langs de kust als in estuaria (saliniteit >18 psu)	- <i>Cardium edule</i> (geaccepteerd als <i>Cerastoderma edule</i> volgens WoRMS) - <i>Anaitides maculata</i> (geaccepteerd als <i>Phyllodoce maculata</i> volgens WoRMS) - <i>Capitella capitata</i> - <i>Arenicola marina</i> (getijdenwateren)	-Mollusca, Bivalvia -Annelida, Polychaeta -Annelida, Polychaeta -Annelida, Polychaeta	-kokkel -gestippelde dieseltrein worm -slangpier -zeepier/wadpier
5. Soorten die voorkomen zowel in een smalle strook langs de kust als in estuaria (saliniteit >5.4 psu)	- <i>Macoma balthica</i> (geaccepteerd als <i>Limecola balthica</i> volgens WoRMS) - <i>Heteromastus filiformis</i>	-Mollusca, Bivalvia -Annelida, Polychaeta	-nonnetje -rode draadworm
6. Soorten die hoofdzakelijk voorkomen in de brakke delen van het estuarium	- <i>Nereis diversicolor</i> (geaccepteerd als <i>Hediste diversicolor</i> volgens WoRMS) - <i>Boccardia ligierica</i> (geaccepteerd als <i>Boccardiella ligierica</i> volgens WoRMS) - <i>Streblospio shrubsolii</i>	-Annelida, Polychaeta (veelkleurige zeeduizendpoot) -Annelida, Polychaeta -Annelida, Polychaeta	-veelkleurige zeeduizendpoot -een soort van de borstelwormen orde ² -een soort van de borstelwormen orde ²
7. Soorten die voorkomen in de brakke en zoete getijdenwateren van het estuarium	- <i>Pseudamnicola confusa</i> (geaccepteerd als <i>Mercuria similis</i> volgens WoRMS) - <i>Gammarus zaddachi</i>	-Mollusca, Gastropoda -Arthropoda, Amphipoda	-getijslakje -een soort van de vlokreeftjes orde ²
8. Soorten die voorkomen in zoete getijdenwateren	- <i>Perforatella rubiginosa</i>	-Mollusca, Gastropoda	-een soort van de slakken orde ²
9. Soorten die voorkomen zowel in de rivier als in de zoete getijdenwateren	- <i>Pisidium</i> - <i>Sphaerium</i> - <i>Unio</i>	-Mollusca, Bivalvia - Mollusca, Bivalvia - Mollusca, Bivalvia	-een soort van de tweekleppigen orde ² -een soort van de tweekleppigen orde ² -een soort van de tweekleppigen orde ²
10. Migrerende soorten	- <i>Crangon crangon</i> - <i>Macropipus holsatus</i> (geaccepteerd als <i>Liocarcinus holsatus</i> volgens WoRMS) - <i>Eriocheir sinensis</i>	-Arthropoda, Decapoda -Arthropoda, Decapoda -Arthropoda, Decapoda	-noordzeegarnaal, grijze garnaal, gewone garnaal, garnaal -witte krab, slabraai, porceleinkrabbetje, kleine zeekrab, gewone zwemkrab, gewone zeekrab -wolpootkrab, wolhandkrab, Chinese wolhandkrab, Chinese kreeft, Chinese krab

World Register of Marine Species: <http://www.marinespecies.org/index.php>

² Geen Nederlandse naam bekend

Tabel 3. Verspreiding van macrobenthos over de saliniteitsgradiënt van de Noordzee naar de rivieren in de Zuidwestelijke Delta naar Wolff (1973) voor de uitvoering van de Deltawerken. De typen corresponderen met Tabel 2. Voor sommige soorten staat een oude naamgeving aangegeven en in de voetnoot de geaccepteerde naam vermeld.

A Noordzee	B Monding estuaria	C Middelste delen estuaria	D Bovenstroomse delen estuaria	E Rivier
Stabiel hoge saliniteit Geëxponeerd	Stabiele hoge saliniteit Beschut	Onstabiele saliniteit (zout/brak) Beschut	Stabiele saliniteit (brak/zoet) Beschut	Stabiele saliniteit (zoet) Beschut
Beperkt tot A Type 1 en 2 44 soorten	Beperkt tot B Type 4 17 soorten	Beperkt tot C Type 6 <i>Boccardia ligERICA</i> ¹ <i>Rhithropanopeus harrisii</i> <i>Cyathura carina</i> <i>Leptocheirus pilosus</i> <i>Corophium multisetosum</i>	Beperkt tot D Type 8 <i>Perforatella rubiginosa</i> <i>Erpobdella monostriata</i> <i>Haemopsis sanguisuga</i> <i>Glossiphonia heteroclita</i>	Beperkt tot E Type 9 4 soorten
Beperkt tot A en B Type 2, 3, 4 104 soorten				
Beperkt tot A, B en C Type 5 <i>Macoma balthica</i> ² <i>Mya arenaria</i> <i>Eteone longa</i> <i>Heteromastus filiformis</i> <i>Crangon crangon</i> <i>Carcinus maenas</i>			Beperkt tot D en E Type 9 22 soorten	
	Beperkt tot B en C Type 5 en 6 <i>Nereis succinea</i> ³ <i>Polydora ligni</i> ⁴ <i>Pygospio elegans</i> <i>Assiminea grayana</i> <i>Limapontia depressa</i> <i>Alderia modesta</i> <i>Streblospio shrubsolii</i> <i>Manayunkia aestuarina</i> <i>Neomysis integer</i> <i>Sphaeroma rugicauda</i> ⁵ <i>Gammarus salinus</i> <i>Corophium volutator</i>			
	Beperkt tot B, C en D Type 6 <i>Nereis diversicolor</i> ⁶			
		Beperkt tot C, D en E Type 7 en 8 <i>Potamopyrgus jenkinsi</i> ⁷ <i>Lymnaea peregra</i> <i>Trocheta bykowskii</i>		
Migrerende soorten Type 10 <i>Eriocheir sinensis</i>				

¹ *Boccardiella ligierica*

² *Limecola balthica*

³ *Alitta succinea*

⁴ *Polydora cornuta*

⁵ *Lekanesphaera rugicauda*

⁶ *Hediste diversicolor*

⁷ *Potamopyrgus antipodarum*

Soorten van hard substraat, wieren, en zeegras

Het harde substraat van de dijken vormt een vrij uniek milieutype met variërende habitats afhankelijk van o.a. type dijkbekleding, zoutgehalte, waterdiepte en hydrodynamiek (De Kluijver *et al.* 2015). De mariene getijdenzone (eulitoraal) wordt gedomineerd door wieren zoals blaaswier (*Fucus vesiculosus* L.) en knotswier (*Ascophyllum nodosum*) en hogerop de kleine zee-eik (*Fucus spiralis*), daar waar brakke delen gedomineerd worden door zeepokken en een lagere soortenrijkdom aanwezig is (De Kluijver, Dubbeldam *et al.* 2015). Onderwater in de mariene sublitorale delen komen afhankelijk van de diepte groen-, bruin- en roodwieren voor. Hoe beperkter de lichtindringing hoe meer diergroepen gaan domineren en de bedekking aan wieren afneemt.

Zeegrassen kunnen voorkomen in zowel het intergetijdengebied als het subtidaal (permanent onder water) en kunnen grote fluctuaties in zoutgehalte weerstaan. Zeegrasbedden ontwikkelen op specifieke plaatsen in het estuarium daar waar de omstandigheden geschikt zijn m.b.t. onder andere bodemsamenstelling, beperkte hydrodynamiek, beschikbaarheid van zaden etc. {Short, 207 #647}.

Hard substraat gemeenschappen langs een zoet-zout gradiënt vertonen een duidelijke zonering zoals aangetoond in de Westerschelde bij inventarisaties die zijn uitgevoerd waarbij er gemeenschappen in de mariene zone, oostelijke mariene zone en brakwaterzone werden onderscheiden (De Kluijver, Dubbeldam *et al.* 2015). In de Westerschelde neemt de soortenrijkdom van hard substraat gemeenschappen af van de monding naar het brakke deel (van Moorsel 1996). In het zoete deel van het estuarium zijn ook verschuivingen aangetoond voor enkele hard substraat soorten (o.a. brak tolerante slakken naar zoetwater slakken en een verschuiving van zouttolerante hydroïdpoliepen naar zoetminnende mosdierjes) (Wolff 1973).

Het is van belang te benadrukken dat deze zonering niet alleen veroorzaakt wordt door het zoutgehalte maar dat veel meer factoren zoals hydrodynamiek een rol kunnen spelen. Zo is ook in de Oosterschelde (met een constant hoog zoutgehalte) een duidelijke west-oost verdeling met karakteristieke gemeenschappen per deelgebied aangetoond (De Kluijver, Dubbeldam *et al.* 2015).

Vaatplanten: schorren en waterplanten

Schorren (in Noord-Nederland: 'kwelders') zijn met planten begroeide buitendijkse gebieden die onder invloed staan van het getij. De vegetatie varieert naar gelang het zoutgehalte van het water en kent een karakteristieke samenstelling van soorten voor zoete, brakke en zoute omstandigheden (Figuur 6). Schorren ontwikkelen zich in luwe gebieden aan de randen van estuaria en zeearmen. Door de luwte kan slibrijk sediment bezinken, zodat de bodem ophoogt. Zodra de bodem rond Gemiddeld Hoog Water is opgehoogd, vestigt zich pioniervegetatie, die in de loop van de tijd wordt opgevolgd door schorvegetatie. De belangrijkste ecologische factoren die de aanwezigheid van vegetatie en de successie op slikken en schorren bepalen zijn overstromingsdynamiek (frequentie, -duur en -hoogte), zoutgehalte, bodemtextuur en de daaraan gekoppelde zuurstofhuishouding, verzanding en stikstofgehalte in de bodem (Vandenbussche *et al.* 2002).

Zout

brak

zoet

Figuur 6. Successiepatronen van zoute, brakke en zoete schorren gebaseerd op onderzoek langs de Schelde (Vandenbussche, T'Jollyn et al. 2002)

Zoetwater- en brakwaterschorren zijn belangrijk voor broedende riet- en moerasvogels, zoals bruine kiekendief, blauwborst, rietzanger, bosrietzanger, rietgors, cetti's zanger en baardmannetje. Volgens De Boer en Wolf (1996) *Ruppia* behoren tot de ondergedoken waterplanten van brak tot zout water waarvan het zoutgehalte sterk kan fluctueren. Door deze hoge fluctuaties gaat het om soorten arme begroeiingen waarvan er in Nederland maar twee associaties bekend zijn. De associatie van snavelruppia (*Rupia maritima*) is gebonden aan meso- tot oligohaliene wateren met een schommeling in het zoutgehalte tussen 0,5-15,3 welke meestal voorkomen. Daarnaast komt de associatie van spiraalruppia (*Ruppia cirrhosa*) voor in grotere en zoutere wateren met een maximale zoutschommeling tot een saliniteit van 35. Beiden associaties zijn gevoelig voor eutrofiëring en te lage zoutgehalten en zeldzaam geworden in Nederland.

Zouttolerantie en osmoregulatie

In gebieden met een zoutgehalte tussen marien en zoet liggen voor vrijwel alle aquatische soorten kritische grenzen met betrekking tot het zoutgehalte, die hun voorkomen en verspreiding bepalen (De Boer & Wolff 1996). Organismen beschikken over een bepaalde zouttolerantie die de boven- en ondergrens van de zoutconcentratie bepaald waar het organisme kan voorkomen en in grote mate de zonering van soorten bepaald zoals beschreven in de vorige paragraaf. Daarnaast zijn er organismen die in staat zijn de concentratie aan opgeloste stoffen in hun lichaam (osmotische waarde) te reguleren en zich daarmee aan te passen aan de verandering van zoutgehalte in de omgeving. Dit noemen we 'osmoregulatie'.

Fluctuaties in zoutgehalte is een sleutelfactor in de overleving, stofwisseling en verspreiding van vissen (Varsamos *et al.* 2005). De tolerantie voor saliniteit binnen vissoorten kan worden onderverdeeld in tolerantie naar ondergrenzen voor zoutwatersoorten en bovengrenzen voor zoetwatersoorten. Binnen de zoutwatersoorten zijn er soorten die hoge tolerantie hebben voor relatief zoet water, zoals haring, harder en zeebaars. Daarnaast zijn er de estuariene en diadrome (trekvis)soorten die vaak een brede range aan zoutgehalten kunnen tolereren van zoet tot zout. Er is een complexe interactie tussen temperatuur en saliniteit, waarbij veel hormonale processen zijn betrokken bij osmoregulatie (Bœuf & Payan 2001). Van Beek (2000) geeft een goed overzicht van zouttoleranties voor veel vissoorten die in estuaria en kustgebieden voorkomen, waarbij hij aangeeft dat er vaak niet vergelijkbare en niet consistente onderzoeksresultaten beschikbaar zijn. Ook een recente literatuurstudie naar de noodzaak van een eventuele acclimatisatiezone voor trekvis gaf aan dat hierover nog veel onbekend is (Winter *et al.* 2014).

Van diadrome vissen wordt verwacht dat zij een grote zouttolerantie hebben, gezien hun actief gerichte zwembewegingen tussen zoet en zout. Van zoetwater naar zoutwater betekent een hormonaal gestuurd proces waarbij allerlei processen op gang komen zoals: veranderingen in de kieuw ionocyten (dit zijn cellen die voor een juist evenwicht tussen water en zouten in het lichaam zorgen), verhoogd zeewater opname en water opname in de darmen en verminderd vocht verlies via de urine (Zydlewski *et al.* 2012). Zij zijn dan op zoek naar paai of opgroei gebieden. Echter, deze tolerantie voor grote saliniteit variaties is sterk afhankelijk van de fase en eventueel het levensstadium waar de vis zich in bevindt. Zo is er bijvoorbeeld veel fysiologisch onderzoek gedaan naar de osmoregulatie van driedoornige stekelbaars (Wootton 1978; Kitano *et al.* 2012). Driedoornige stekelbaars bereidt zich hormonaal voor op de trek richting het zoete of het zoute water (Wootton 1976, Kitano *et al.* 2012) en kan dan snel grote zoutverschillen overbruggen. Ook glasaal is in staat plotselinge blootstelling aan grote variaties aan saliniteit te weerstaan (Wilson *et al.* 2004). Van de trekvis lijken met name de haringachtigen, bijvoorbeeld *Alosa* soorten (finten) meer moeite te hebben om snel grote zoutverschillen te passeren. Plotselinge schommelingen van saliniteit bleken dodelijk voor bijvoorbeeld 'American shad', *Alosa sapidissima*, die snel van zout naar zoet water zijn gebracht (Leggett & O'Boyle 1976).

Naast de diadrome (trek)vissen staan ook intergetijde en estuariene vissen bekend om hun plasticiteit in reactie op frequente saliniteit schommelingen, waaronder driedoornige stekelbaars *Gasterosteus aculeatus* (Marshall *et al.* 2012). Zij zijn in staat om met een lage permeabiliteit van de huid en kieuw epitheel met efficiënte NaCl secretie te leven in een zoute omgeving. Aan de andere kant hebben zij de optie om NaCl op te nemen in een minder zoute omgeving. Sommige soorten hebben zelfs de mogelijkheid om zout op te slaan in geval van nood indien zij in een zoet systeem terecht komen. Ook zijn er soorten die bij grote schommelingen eerst een 'tolereer fase' ingaan alvorens er echt overgestapt wordt om te acclimatiseren (Marshall *et al.* 2012). Een studie naar haring, kabeljauw en tarbot larven heeft aangetoond dat zij in staat zijn om water te drinken met diverse snelheden om te compenseren voor de saliniteit in het water (Tytler & Blaxter 1988). In hun experimenten werd

duidelijk dat de compensatiesnelheid werd vertraagd met 50% wanneer de saliniteit van 32 naar 16 promille werd gebracht.

Voor vislarven is het lastiger om zich aan te passen omdat hun osmoregulerende lichaamsfuncties nog maar beperkt ontwikkelt zijn, deze capaciteit neemt toe naarmate ze ouder worden (Varsamos, Nebel et al. 2005). Mogelijk zijn vislarven daardoor gebaat bij minder grote fluctuaties in zoutgehalte en is een geleidelijke gradiënt van belang.

Naast vissen zijn er ook andere soortengroepen die beschikken over osmoregulerende lichaamsfuncties zoals krabben (Novo et al. 2005) en garnalen (Pham et al. 2012).

3 Ecologische betekenis van zoet-zout overgangen in de Zuidwestelijke Delta

Nederland had in het verleden, als delta van de rivieren Eems, Rijn, Maas en Schelde, een groot aantal natuurlijke zoet-zoutovergangen. Deze natuurlijke overgangen in Nederland zijn afgelopen eeuwen voor een groot deel verloren gegaan door inpolderingen en bedijkingen en recenter door realisatie van de Delta- en Zuiderzeewerken in de vorige eeuw ten behoeve van waterveiligheid en optimalisatie van de waterhuishouding voor landbouw, scheepvaart en drinkwatervoorziening. De Eems, Nieuwe Waterweg en Westerschelde vormen nog een open verbinding tussen zee en rivier. Deze estuaria zijn wel vergaand beïnvloed in hun morfologie (o.a. verlies intergetijdengebied door inpolderingen, baggeren (verdiepen, verruimen) van de vaargeulen) en waterhuishouding.

Afgelopen decennia zijn er verschillende beleidslijnen opgesteld die betrekking hebben op herstel van zoet-zout overgangen in Nederland, zoals de derde en vierde nota Waterhuishouding (1989;1998) die eind vorige eeuw zijn opgesteld, de nota 'Natuur voor mensen, mensen voor natuur' (NvM, 2000) en de Structuurschema Groene Ruimte 2 (SGR-deel 1, 2001). Deze documenten bevatten concrete doelstellingen om zoetzoutovergangen in Nederland te herstellen. Ook het Beheersplan Rijkswateren bevat op regionale schaal uitgewerkte doelstellingen op dit gebied. Op dit ogenblik is vooral het Nationaal Waterplan 2016-2021 richtinggevend. Daarnaast heeft het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in 2014 de Natuurambitie Grote Wateren 2050 opgesteld waarin ook het belang van een natuurlijke zoet-zout gradiënt voor ecologie en in het bijzonder vismigratie wordt benadrukt. Ook voor de internationale stroomgebiedscommissies (Rijncommissie, Maascommissie, Scheldecommissie) is herstel van de natuurlijke relatie met de zee één van de speerpunten. Op Europese schaal zijn daarnaast vooral de Habitatrichtlijn en de Kaderrichtlijn Water van belang.

In de hierop volgende paragrafen wordt de ecologische betekenis van zoet-zout overgangen uiteengezet onder andere aan de hand van de theorie die in Hoofdstuk 2 op een rijtje is gezet. Dit wordt gedaan aan de hand van de volgende onderwerpen:

- Biodiversiteit en habitats
- Opbouw van het kuststelsel
- Brakwaterzone
 - Als habitat voor specifieke (zeldzame) soorten
 - Vismigratie, kraam- en kinderkamerfunctie

3.1 Biodiversiteit en habitats

Omdat estuaria over het geheel gezien zeer dynamische milieus zijn met vele geleidelijke overgangen bestaat er een grote verscheidenheid in zoet-, brak- en zoutwater habitats en gerelateerde soorten. Daarom is een natuurlijk estuarium als geheel toch zeer soortenrijk (De Leeuw and Backx 2001). Een hoge biodiversiteit betekent een grote genetische variatie; een belangrijke voorwaarde voor evolutionaire aanpassing aan een veranderende omgeving en overlevingskansen (www.marbef.org).

De ontwikkeling van de biodiversiteit in de Zuidwestelijke Delta van soortengroepen na de uitvoering van de Deltawerken is in 2012 nader onderzocht (Tangelder et al. 2012; Troost et al. 2012). De resultaten illustreren heel duidelijk de gevolgen van de Deltawerken door achteruitgang van diadrome vissoorten, kustbroedvogels, brakwater macrobenthos soorten en de gevolgen van een verslechterde waterkwaliteit voor het bodemleven zoals het geval was in het Veerse Meer. Na de opening van de Katse Heule 2004 is hier een verbetering van bodemleven aangetoond. Daarnaast wordt ook aangetoond dat de bekkens als sub-ecosystemen zich apart van elkaar ontwikkelen. Zo komen er in de Oosterschelde meerdere macrobenthos soorten voor die niet voorkomen in de andere bekkens. Ten dele gaat het hier ook om exoten soorten. Dit heeft onder andere te maken met import van schelpdieren en daarmee meegevoerde soorten (Wijsman & De Mesel 2009).

Exoten

Exoten worden vooral aangetroffen in estuaria. Hier bevinden zich in het algemeen veel havens, waardoor exoten die meeliften op de scheepshuid en in ballastwater herhaaldelijk geïntroduceerd worden en hierdoor een kans krijgen om zich te vestigen. Ook worden exoten geassocieerd met menselijke verstoringen, welke veelvuldig optreden langs kusten en estuaria in het algemeen omdat hier de dichtheid van menselijke bewoning relatief hoog is. Daarnaast worden bijzonder veel exoten aangetroffen in de brakke zones van estuaria, bij een saliniteit tussen 5 en 20 promille. Dit heeft mogelijk te maken met de lage soortenrijkdom in deze zones waardoor een exoot gemakkelijker zijn eigen niche vindt. De meeste exoten vormen geen probleem en sommige verdwijnen weer of vinden na een eerste periode van explosieve toename hun eigen niche in het systeem. Enkele soorten lijken problemen op te leveren voor het ecologisch systeem of voor economische activiteiten. Of een soort problemen gaat opleveren is op voorhand moeilijk te voorspellen. Over de effecten van exoten op het ecosysteem is veel discussie en (nog) geen eenduidigheid. Ze zorgen enerzijds voor een hogere biodiversiteit, maar anderzijds verspreiden deze exoten zich naar steeds meer plekken op de wereld en verdringen ze soms ook lokale soorten. Dit heeft niet alleen gevolgen voor de biodiversiteit maar kan ook leiden tot veranderingen in het ecosysteem functioneren. Een studie van Wijnhoven & Hummel (2009) beschrijft de ontwikkeling van exoten in de Zuidwestelijke Delta en gaat ook dieper in op mogelijke effecten.

3.2 Opbouw van het kustsysteem

De hydrodynamiek in een estuarium zorgt voor transport van de door rivier en zee aangevoerde sedimenten (zie paragraaf 2.3). De complexe ruimtelijke distributie van dit sediment zorgt voor een heterogeen patroon van verschillende sedimenttypen (bv. grof zand, fijn zand, slib etc.). Dit leidt tot de opbouw van karakteristieke estuariene en kust habitats zoals uitgestrekte zones met ondiep water, intergetijdengebieden, schorren en duinen. Deze habitats zijn in een dynamisch evenwicht met hun omgeving en onderhevig aan processen van erosie (afbraak) en sedimentatie (opbouw).

Figuur 7. Overzicht van de verschillende estuariene habitats langs een longitudinale zoutgradiënt, een verticale dieptegradiënt en een interne dynamiekgadiënt. (Meire en Maris, 2008).

De gevolgen van de Deltawerken voor met name de natuurlijke opbouwende processen zijn bekend: de aanwezigheid van dammen en dijken verhinderen de sedimentaanvoer en -distributie en dit leidt tot erosie van boven genoemde habitats zoals het bekende voorbeeld van de zandhonger in de Oosterschelde (Van Zanten & Adriaanse 2008). In een studie van Mulder et al. (2010) wordt vanuit de gedachte 'sediment als drager van functies' het sedimentperspectief voor de Zuidwestelijke Delta per bekken uiteengezet. Daarnaast worden oplossingsrichtingen aangedragen zoals zandwinning buiten het kustfundament een 'Bouwen met Natuur' door gerichte onderwater suppleties waarbij stroming en golven het sediment kan verspreiden. Ook de inzet van zogenoemde 'biobouwers' nuttig zijn tegen erosie en ter bevordering van de vorming van habitats zoals het stimuleren van de groei van schelpdierbanken of schorvegetatie (Temmerman et al. 2003; Tangelder et al. 2013 ; Walles et al. 2015).

3.3 Brakwaterzone

In een estuarium zijn het getij vanuit zee en de permanente, maar wel variabele, instroom van zoet water uit rivieren dominante natuurlijke processen. Vanuit een relatief kalm, maar wel aan getijdenwerking onderhevig, zoet riviermilieu vindt een geleidelijke overgang plaats naar een meer dynamisch zout milieu. De vele gradiënten zorgen voor een grote diversiteit aan habitats en soorten. Het gedeelte met een saliniteit van onder de 18 psu (tot 0,5 psu) noemen we de brakwater zone.

3.3.1 Habitat

De door brakke omstandigheden gekenmerkte getijdengebieden zijn in Noordwest Europa zeer schaars. In het verleden konden delen van de Zuiderzee en het Hollandsch Diep/Haringvlietgebied daartoe gerekend worden. Tegenwoordig heeft maar een zeer kort deel van de riviermonden zo'n zoutgehalte, of het komt helemaal niet meer voor omdat de in- en uitstromende watermassa een weg aflegt van 10-20 km. Binnen een getijperiode kan hierdoor het chloridegehalte fluctueren tussen veel minder dan 5 (ebfase) en veel meer dan 18 (vloedfase). Aspecten van de estuaria van Weser, Elbe, Thames, Humber, Somme en Seine doen er nog het meest denken aan een natuurlijke brakke zone (Baptist *et al.* 2007). Het grootste getijdengebied met brakke omstandigheden (door doorstroming met zoet water) ligt in Groot Brittannië: de 'Inner Solway' en daarnaast zijn het Britse 'Ruel estuary' en het Franse Baie de la Somme' vermeldenswaard (Baptist, De Mesel *et al.* 2007). Estuaria inclusief die brakke zone zijn beschermd onder de Europese Natura 2000 Habitatrichtlijn waarvoor verschillende habitattypen zijn aangewezen. Een estuarium (H1130) bestaat uit een mozaïek van mariene en brakke geulen met permanent overstroomde zandbanken (H1110) en bij eb droogvallende slikwadden en zandplaten (H1140), zie <https://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000>. De landschappelijke samenhang tussen en de afwisseling van de ecotopen vormen een wezenlijk aspect van de structuur en functie van estuaria. Veel soorten brengen een deel van hun levenscyclus door in verschillende deelgebieden binnen het habitatype. Het (mozaïek van ecotopen van het) estuarium vormt een landschapsecologisch geheel met terrestrische habitats van kwelders/schorren en duinen (Anonymus 2016). In het brakke deel van het estuarium hebben schorren een andere vegetatiesamenstelling dan in het zoute en zoete deel: de vegetatie van karakteristieke zoute schorplanten is veranderd, het aandeel ruigere soorten neemt toe, met name riet (*Phragmites australis*) en zeebies (*Scirpus maritimus*) (Figuur 6). De verschillende vegetatietypen ondersteunen ook weer andere soorten. Zo kan bijvoorbeeld de Grauwe gans in grote aantallen op de brakke schorren voorkomen en kan de Rietzanger broeden. Daarnaast zijn zeegrasvelden typische habitats van estuaria en vormen zij een waardevol habitat als kraamkamer, foerageergebied en schuilplaats voor vele soorten vissen, krabben, garnalen etc.

3.3.2 Voorkomen specifieke (zeldzame) soorten

De brakwaterzone in estuaria heeft van nature een lage biodiversiteit. Door de hoge dynamiek in de brakwaterzone is het soortenaantal ten opzichte van zoet- en zoutwatersystemen relatief laag, zie paragraaf 2.2 en *Figuur 4*. Dit komt omdat maar enkele gespecialiseerde soorten kunnen overleven in dit dynamische milieu. Het is interessant om nader uit te lichten of het nu om specifieke soorten gaat die alleen in brakwatergebieden voorkomen waarmee de soorten dus uniek zijn voor dit habitat. Door Wolff (1973) is nader onderzocht welke macrobenthos soorten voorkomen onder brakke omstandigheden en of deze soorten ook beperkt zijn tot dit habitat op basis van onderzoek in de estuaria van de Zuidwestelijke Delta voor uitvoering van de Deltawerken. In Tabel 4 zijn de vijf soorten opgenomen die alleen in de brakwaterzone voorkwamen. Omdat de soorten *Rhithropanopeus harrisi*, *Leptocheirus pilosus* en *Corophium multisetosum* maar zeer zelden zijn aangetroffen zijn deze niet verder beschouwd. Alleen de soorten *Cyathura carinata* and *Boccardia ligierica* lijken beperkt tot de brakke zone. *C. carinata* is niet aangetroffen in de mariene delen van het estuarium maar wel in binnendijkse gebieden met een hoge saliniteit. Deze soort lijkt daarom dus niet beperkt tot de brakke zone. Daarnaast is *Boccardia ligierica* de enige redelijk algemene soort die alleen in de brakke zone is aangetroffen maar ook van deze soort is bekend dat hij ook in mariene milieus voorkomt. Van de brakwatersoorten in de Delta is dus er niet één waarvan is aangetoond dat deze soort uitsluitend onder brakke omstandigheden kan leven. Daarom wordt geconcludeerd dat alle vermeende zacht substraat brakwatersoorten van de estuaria in de Zuidwestelijke Delta in feite euryhalie mariene of zoetwatersoorten zijn die een bredere range van zoutgehalten kunnen tolereren en vanwege een andere reden dan saliniteit enkel in het brakke water worden aangetroffen. Deze reden zou bijvoorbeeld competitie met andere soorten kunnen zijn of substraatvoorkeur (bv. kokkels die fijnzandige bodems prefereren die gelegen zijn in de overgangswateren waar meer voedsel te vinden

is). In De Boer en Wolf (1996) worden enkele macrobenthos soorten besproken die niet per definitie beperkt zijn tot brakke omstandigheden maar deze wel prefereren.

Tabel 4. Brakwatersoorten in de Zuidwestelijke Delta naar Wolff (1973)

Taxa	Classificatie phylum/orde ¹	Nederlands ¹	Beredenering typische brakwatersoort
<i>Boccardia ligERICA</i> (geaccepteerd als <i>Boccardiella ligERICA</i> volgens WoRMS ¹)	Annelida, Polychaeta	een soort van de borstelwormen orde ²	Komt voor in de brakke wateren van het Haringvliet met fluctuerende zoutgehaltes maar kan ook voorkomen bij hogere zoutgehaltes in meer mariene milieus ¹
<i>Rhithropanopeus harrisii</i>	Arthropoda, Decapoda	zwart krabbetje, Zuiderzeekrabbetje, brakwaterkrabbetje, brakwater krabbetje	Zeer zelden aangetroffen en daarom niet verder beschouwd
<i>Cyathura carinata</i>	Arthropoda, Isopoda	lijnpijsbed	Naast de brakke zone van het Haringvliet is deze soort ook aangetroffen in het stagnante Kanaal door Zuid-Beveland met een veel hogere saliniteit (11-15 ‰ Cl') en volgens Salvat (1967) komt deze soort ook voor bij een saliniteit tot 17,4 ‰ Cl'. De soort is dus niet beperkt tot brakke wateren en kan niet gezien worden als typische brakwatersoort.
<i>Leptocheirus pilosus</i> (geaccepteerd als <i>Leptocheirus pilosus</i> volgens WoRMS)	Arthropoda, Amphipoda	Een soort van de vlokreeftjes orde ²	Zeer zelden aangetroffen en daarom niet verder beschouwd
<i>Corophium multisetosum</i>	Arthropoda, Amphipoda	Een soort van de vlokreeftjes orde ²	Zeer zelden aangetroffen en daarom niet verder beschouwd

World Register of Marine Species: <http://www.marinespecies.org/index.php>

² Geen nederlandse naam bekend

3.3.3 Vismigratie

Er zijn soorten vissen die hun gehele levenscyclus in een estuarium kunnen volbrengen, dit zijn de estuarien residente soorten. Sommige soorten gebruiken het estuarium als kinderkamer en dit heeft vooral betrekking op juveniele vissen en garnalen (Tulp et al. 2008). Daarnaast is er een aantal vissoorten dat het estuarium gebruikt als doortrekgebied tussen zee en rivier (en ten dele ook als opgroeigebied). Dit zijn de diadrome (trek) vissoorten, die nog verder worden onderverdeeld in 'katadrome' soorten die in zoutwater paaien, zoals bot en paling, en 'anadrome' die in zoet water paaien, zoals zalm, spiering, fintachtigen, houting en prikken. Het estuarium wordt verder bevolkt door seizoensgasten, dwaalgasten vanuit zee of vanuit zoet water. Deze zogenaamde ecologische gilden komen veelal in vaste relatieve verhoudingen in het estuarium voor. De estuariene visfauna kent een sterke seizoensgebondenheid en dynamiek, zowel in soortensamenstelling als in abundantie. De vissoorten die behoren tot overgangswateren zijn ingedeeld in ecologische gilden door Pihl et al. (2002):

- Diadrome soorten: diadroom is een verzamelterm voor katadroom (voortplanting in zout water, leefgebied in zoet water) en anadroom (voortplanting in zoet water, leefgebied in zout water).
- Estuarien residente soorten: deze soorten kunnen hun hele leven in de estuaria verblijven en zijn hierop sterk aangewezen.
- Marien juveniele soorten: deze mariene soorten gebruiken het overgangswater als kinderkamer.

- Seizoensgasten: deze mariene soorten gebruiken de estuaria om te paaïen of te foerageren. De aanwezigheid in het estuarium is vaak van korte duur of afhankelijk van gunstige abiotische omstandigheden.
- Zoetwatersoorten: deze soorten verblijven regelmatig in de oligohaliene zone, bijvoorbeeld om te foerageren.

In Tabel 5 staat de soortensamenstelling van vissoorten volgens de hierboven beschreven indeling voor de Nederlandse wateren in een natuurlijk estuarium aangegeven zoals is vastgesteld in de Kaderrichtlijn Water.

Tabel 5. Referentie van de soortensamenstelling van vissoorten in een natuurlijk estuarium zoals deze is vastgesteld vanuit de Kaderrichtlijn Water (Jager 2008).

Diadroom	Estuarien resident	Marien juveniel	Marien seizoensgast
Steur – <i>Acipenser sturio</i>	Harnasman – <i>Agonus cataphractus</i>	Haring – <i>Clupea harengus</i>	Geep – <i>Belone belone</i>
Elft – <i>Alosa alosa</i>	Zandspiering – <i>Ammodytes tobianus</i>	Zeebaars – <i>Dicentrarchus labrax</i>	Pijlstaartrog – <i>Dasyatis pastinaca</i>
Fint – <i>Alosa fallax</i>	Glasgrondel – <i>Aphia miuta</i>	Kabeljauw – <i>Gadus morhua</i>	Snotlof – <i>Cyclopterus lumpus</i>
Paling – <i>Anguilla anguilla</i>	Slakdolf – <i>Liparis liparis</i>	Schar – <i>Limanda limanda</i>	Ansjovis – <i>Engraulis encrasicolus</i>
Driedoornige stekelbaars – <i>Gasterosteus aculeatus</i>	Zeedonderpad – <i>Myoxocephalus scorpius</i>	Wijting – <i>Merlangius merlangus</i>	Sprot – <i>Sprattus sprattus</i>
Rivierprik – <i>Lampetra fluviatilis</i>	Botervis – <i>Pholis gunnellus</i>	Schol – <i>Pleuronectes platessa</i>	Diklipharder – <i>Chelon labrosus</i>
Spiering – <i>Osmerus eperlanus</i>	Bot – <i>Platichthys flesus</i>	Tarbot – <i>Scophthalmus maximus</i>	
Zeeprik – <i>Petromyzon marinus</i>	Brakwatergrondel – <i>Pomatoschistus microps</i>	Griet – <i>Scophthalmus rhombus</i>	
Zalm – <i>Salmo salar</i>	Dikkopje – <i>Pomatoschistus minutus</i>	Tong – <i>Solea solea</i>	
Zeeforel – <i>Salmo trutta</i>	Grote zeenaald – <i>Syngnathus acus</i>	Rode poon – <i>Trigla lucerna</i>	
Houting – <i>Coregonus oxyrinchus</i> *	Kleine zeenaald – <i>Syngnathus rostellatus</i>		
	Puitaal – <i>Zoarces viviparus</i>		

Open verbinding (corridor-functie van estuaria)

Een barrière vrije zoet-zout overgang is van groot belang voor het voortbestaan van diadrome vissoorten om hun voortplantings- of opgroei-habitat te kunnen bereiken en hun levenscyclus te voltooien. De historische Zuidwestelijke Delta van het Rijn-Maas-Schelde stroomgebied kende een grote rijkdom aan trekvis (Quak 2016). Door het bouwen van barrières, overbevissing, waterverontreiniging en habitatverlies zijn Europese steur, Atlantische zalm, houting en elft verdwenen in de eerste helft van de 20^e eeuw (de Groot 2002). Fint is na 1970 als paaipopulatie verdwenen uit de zuidwestelijke delta, maar was nog wel langs de kust voor opgroei aanwezig. Andere trekvissoorten als driedoornige stekelbaars, spiering, zeeforel, rivierprik en zeeprik zijn sterk in aantal achteruitgegaan. Het dieptepunt was de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw. Daarna zijn veel investeringen gedaan om de waterkwaliteit van de instromende rivieren te verbeteren, barrières voor trekvis passeerbaar te maken. Ook zijn er herintroductieprogramma's uitgevoerd voor zalm, houting en elft en wordt er momenteel een pilot-studie uitgevoerd met Europese steur (Griffioen et al. 2017). Hierdoor is het aantal trekvis in de delta weer toegenomen, maar nog steeds zijn enkele migratiebarrières en gebrek aan estuariene dynamiek een beperking voor het herstel van sommige trekvissoorten. De eisen die trekvissoorten stellen aan estuaria varieert sterk tussen diadrome vissoorten.

Er bestaat veel verschil in de afmetingen van de ruimtelijke schaal die migrerende vissen benutten, zowel in het zoete water als tijdens de zee fase (Griffioen et al. 2017). Een voorbeeld van een vissoort die op grote ruimtelijke schaal migreert is de Atlantische Zalm (*Salmo salar*). Deze soort zwemt tot ver het stroomgebied van rivieren in (zoals de Rijn en Maas) om te paaïen in de snelstromende bovenlopen met grindbanken. Tijdens de zee fase trekt de zalm tot in de Noordelijke Atlantische Oceaan naar de Faeröer-eilanden en Groenland om daar op te groeien van smolt naar volwassen zalm; een ruimtelijke schaal die vele 1000-en km beslaat. Een ander voorbeeld van een lange afstand migreerder is de Europese paling (*Anguilla anguilla*), deze trekt van de benedenstroomse rivieren van het Europese continent ongeveer 6000 km naar de Sargasso Zee om daar te paaïen. Aan het andere

kant van het spectrum zitten vissoorten die over duidelijk veel kortere afstanden migreren, zelfs in en rond een estuarium zoals spiering en driedoornige stekelbaars.

Een onbelemmerde migratieroute is één aspect dat van belang is voor de levenscyclus van diadrome vissen. Daarnaast speelt ook bijvangst in visserij (met name tijdens de periode van migratie), habitatkwaliteit van paai- en (op)groeigebieden, waterkwaliteit en aanwezigheid van (exotische) pathogenen een rol (Griffioen, Winter *et al.* 2017).

De vereisten die trekvisen stellen aan zoet-zout habitats of estuaria verschillen sterk tussen soorten. Veel soorten hebben als belangrijkste vereiste dat deze passeerbaar moeten zijn om zee- en rivierhabitats te verbinden (deze verlangen slechts een corridor-functie) zoals zalm, rivierprik en zeeprik. Andere soorten stellen hoge eisen aan estuariene dynamiek voor paai- en opgroei zoals de fint. Voor een aantal trekvisen zijn estuaria niet alleen belangrijk om te kunnen passeren, maar gebruiken deze ook als foerageerhabitats tijdens verschillende levensstadia, zoals spiering, driedoornige stekelbaars, zeeforel (grotere juvenielen en adulten), elft, steur (juvenielen), houting en paling. Voor deze soorten zal niet alleen de passeerbaarheid van zoet-zout overgangen uitmaken in een herstel naar hogere populatieniveaus maar ook de kwaliteit van estuariene habitats meespelen. Voor fint is deze zelfs onontbeerlijk voor herstel van paaipopulaties. In de Westerschelde-Schelde estuarium wordt er door de fint weer succesvol gepaaid, nadat de waterkwaliteit van de Schelde flink verbeterd is. In de Maas-Rijn delta is estuariene dynamiek nog onvoldoende hersteld om een terugkeer van een paaipopulatie fint op gang te brengen (Griffioen *et al.* 2017).

Acclimatisatie

Diadrome vissoorten hebben in het algemeen een groot vermogen zich aan te passen aan de overgang van zoet naar zout water en andersom. Van de beschikbare kennis over het belang van een zoet-zout overgang als habitat in het gewinningsproces en daarmee als 'acclimatisatie zone' voor diadrome vissoorten in Nederland is door Winter *et al.* (2014) een overzicht gemaakt in het kader van onderzoek in relatie tot de Vismigratie Rivier in de Afsluitdijk. Hierin wordt voor alle KRW diadrome doelsoorten en voor Bot (estuariene residente soort die ook naar binnendijkse wateren migreert) een opsomming gemaakt (Tabel 6).

In de studie door Winter *et al.* (2014) wordt geconcludeerd dat het belang een zoet-zout overgang voor acclimatisatie niet veel bekend is in de literatuur. Wel wordt dit belang vaak gekoppeld aan waarnemingen in gedrag van vis, maar bewijs hiervoor blijft vooralsnog achterwege. Veel soorten zullen zich al in het zoute water, voordat zij de overgang maken naar zoet, fysiologisch voorbereiden op de overgang van zoet naar zout. De vraag is in hoeverre ze daar een brak milieu voor nodig hebben. Hier wordt veel over gespeculeerd, maar er zijn weinig concrete aanwijzingen. Voor fintachtigen is bekend dat zij wanneer zij buiten het migratie seizoen in het zoete milieu worden geplaatst zullen sterven (Legget & Oboyle 1976). Voor glasaal lijkt een habitat voor de acclimatisatie weer niet of nauwelijks van belang (Wilson *et al.* 2004). Voor larven en jonge stadia (m.u.v. glasaal die goed tegen zoutfluctuaties kan) is wellicht de fysiologische osmoregulerende capaciteit beperkter en zou het belang van een zoet-zout gradiënt voor acclimatisatie groot kunnen zijn.

Er is veel literatuur over de fysiologische mogelijkheid om tussen zoet en zout water te migreren, maar of er acclimatisatie nodig is en zo ja hoe lang en welke zoet-zout gradiënten daar voor nodig zijn is grotendeels onbekend. In de studie door Winter *et al.* (2014) is de beschikbare kennis hierover samengevat. Volwassen salmoniden en glasaal zijn in staat snelle overgangen van zout naar zoet te overbruggen. Trekkende driedoornige stekelbaars lijkt ook zeer snelle overgangen van zout naar zoet te kunnen overleven. Alleen voor de Noord-Amerikaanse en nauw met fint en elft verwante fintachtige *Alosa sapidissima* is onderzoek uitgevoerd naar het belang van acclimatisatie. Met telemetrie is waargenomen dat volwassen vis met de getijdebeweging heen en weer migreerde en zodoende in een gelijkblijvende zout-zoet gradiënt verbleef, wat de onderzoekers relateerden aan acclimatiseren aan zoeter water (Dodson *et al.* 1972). Zij hebben dat vervolgens experimenteel getest met overzettingsproeven van zout naar zoet water en hier vonden zij hoge sterfte onder deze fint-soort (Legget & Oboyle 1976). Voor de overige soorten is de noodzaak en benodigde duur van acclimatisatie onbekend. Aangezien kleine vis of vislarven (bijvoorbeeld bot of haring) een relatief groot huidoppervlak hebben ten opzichte van hun inhoud, en bovendien minder goed ontwikkelde nier- of

andere bij de osmoregulatie betrokken orgaanfuncties, lijkt het aannemelijk dat een meer geleidelijke aanpassing aan zout-zoet gradiënten voor de kleine vissoorten en jonge levensstadia het meest waarschijnlijk is.

Geraadpleegde experts uit Duitsland, België en Noord-Amerika uit de studie door Winter et al. (2014) bevestigen dat er weinig onderzoek naar noodzaak en duur van acclimatisatie beschikbaar is. Beschikbare informatie is beperkt tot experimenten met juveniele stadia van een paar soorten, met name salmoniden soorten ('smolts') en Noord-Amerikaanse steursoorten, die vanuit zoetwater naar zee migreren. Over de noodzaak en duur van acclimatisatie tijdens intrek vanuit zee naar zoetwater is veel minder kennis voorhanden.

Tabel 6. Overzicht van de beschikbare kennis over het belang van een zoet-zout overgang voor diadrome vissoorten (doelsoorten KRW) uit een studie van Winter et al. (2014).

Nederlandse naam	Belang zoet-zout overgang	Motivatie	referentie
atlantische steur	onbekend	Er zijn geen gegevens gevonden dat steur eisen stelt aan een bepaald habitat voor de acclimatisatie naar zoet water	
atlantische zalm	onbekend/ klein	In de literatuur wordt vaak gesuggereerd dat salmoniden met het getij mee zwemmen bij de intrek. Dit kan gekoppeld worden aan oriëntatie, acclimatisatie en of het besparen van energie. Er zijn wel voorbeeld dat salmoniden relatief snel een zoet-zout overgang kunnen passeren, waarbij er veel individuele variatie is.	Potter, 1988 Bij de Vaate 2003 Stasko 1975 Davidsen, 2013
bot	groot?	Mogelijk dat de aanwezigheid van zoet-zout gradiënten voor de acclimatisatie bij juveniele botten en botlarven een grotere rol speelt. Met name larven hebben minder fysiologische mogelijkheden m.b.t. osmoregulatie.	Vethaak, 2013 Vethaak, 2004
driedoornige stekelbaars	onbekend/ gering	Er is veel fysisch onderzoek gedaan naar osmoregulatie van driedoornige stekelbaars. Stekelbaarzen bereiden zich, hormonaal gedreven, gedurende het paai seizoen voor op veranderende saliniteitsgehalten. In hoeverre zij hier een bepaald type habitat voor nodig hebben is onbekend. Er zijn geen meldingen bekend van sterfte van driedoornige stekelbaars die middels hevelpassage van zout naar zoet water zijn overgezet.	Wintermans 1997 Wintermans 2004 Kitano, 2012 Wootton, 1976
elft	onbekend/ groot?	Het gedrag bij zoet-zout overgangen waarbij fintachtigen met het getij mee bewegen wordt vaak gerelateerd aan het acclimatiseren aan zoetwater tijdens de migratie. Maar bewijs hiervoor ontbreekt en het gedrag kan ook besparing van energie of oriëntatie betekenen. Een studie naar American shad, <i>Alosa sapidissima</i> , waarbij 35 dieren snel van zout naar zoet water zijn gebracht, gaf aan dat bijna alle dieren dood gingen als gevolg van de overplaatsing naar zoet water. Het belang van een zoet-zout overgang als habitat voor de acclimatisatie is onbekend.	Dodson 1972 Leggett, 1976
aal	klein	Het belang van een acclimatisatie habitat lijkt klein voor glasaal. Glasalen die vanuit brakwater (24‰) overgezet zijn in zoet water vertoonden geen sterfte. Zij lijken goed in staat grote variaties aan saliniteit aan te kunnen.	Wilson, 2004
fint	onbekend/ groot?	zie elft	zie elft
houting	onbekend	Er zijn geen aanwijzingen gevonden dat houting eisen stelt aan een bepaald habitat voor de acclimatisatie naar zoet water	
rivierprik	onbekend	Voor prikken is hier niets over bekend	
spiering	onbekend	Het is onbekend of spiering een bepaald type habitat nodig heeft voor de acclimatisatie naar zoet water tijdens de intrek.	
zeeforel	Onbekend/ klein	Er wordt vaak gesproken over suggesties dat salmoniden met het getij mee zwemmen bij de intrek. Dit kan gekoppeld worden aan oriëntatie, acclimatisatie en of het besparen van energie. Er zijn wel voorbeeld dat salmoniden relatief snel een zoet-zout overgang kunnen passeren. Individuele variatie is hier aanwezig.	Potter 1988 Bij de Vaate 2003 Stasko 1975 Davidsen 2013
zeeprik	onbekend	Voor prikken is hier niets over bekend	

3.3.4 Kraam- en kinderkamerfunctie

Zoet-zout overgangen herbergen een grote verscheidenheid aan zoet-, brak- en zoutwater habitats. Daarnaast zijn ze van nature voedselrijk door aanvoer van nutriënten uit de rivieren, en door een hoge primaire productie in de uitgestrekte gebieden met ondiep water. Deze voedselrijkdom en

specifieke fysische omstandigheden (zoals beschutting door troebelheid en ondiepte van het water waardoor het relatief snel opwarmt) maakt het gebied tot een belangrijke kraam- en kinderkamer voor juveniele vissen.

Zoet-zout overgangen vormen een geschikt gebied voor jonge vissen en garnalen. Vooral in het mesohaliene deel kunnen hoge dichtheden voorkomen van enkele soorten bodemvissen en garnalen die foerageren op het detritus (Lievaart & Pouwer 2003). Hoewel de biomassa hoog is, is de biodiversiteit over het algemeen vrij laag in de brakke zone. Deze soortenrijkdom stijgt richting de monding. Voor vissen zijn twee hoofdgroepen te onderscheiden: in of vlak aan de bodem levende vissen (demersaal), of in de waterkolom levende vissen (pelagisch). Binnen deze twee hoofdgroepen worden weer verschillende subgroepen onderscheiden. Vissen gebruiken een estuarium voor verschillende doelen, als kraamkamer (geboortegrond) en/of kinderkamer (foerageer en schuilfunctie) en verblijven een deel van hun leven in het estuarium. Dit gaat bijvoorbeeld om marien juveniele soorten, waarbij met name voor demersale vissoorten als schol, tong, schar en bot, pelagische vissoorten als haring, sprong en zandspiering en ook zeebaars, estuaria als belangrijke kinderkamer fungeren (Tulp, Bolle *et al.* 2008; Breine *et al.* 2011). Voorheen was de zuidwestelijke rivierdelta bijvoorbeeld zeer rijk aan haring (Haringvliet heeft zijn naam niet voor niets, Quak 2016). Demersale vis leeft doorgaans van langzame of aan het sediment gebonden prooi zoals schelpdieren, polychaeten, nematoden, amphipoden en garnalen. Pelagische vis leeft van snel bewegende prooi zoals mesozooplankton en garnalen, maar ook van microzooplankton en fytoplankton. Daarnaast is er een grote groep van garnalen die zowel benthisch als hyperbenthisch voorkomen. De voedselpreferentie van de garnaal is gering variërend van detritus tot vissenlarven.

Ondiepe vlakke bodems in Waddenzee, Eems-Dollard en Westerschelde spelen een zeer belangrijke rol tijdens het opgroeien van jonge platvissen, krabben en garnalen. Veel juveniele, maar ook adulte vissen en kreeftachtigen gebruiken naast het ondiepe sublitoraal ook het litoraal om voedsel te zoeken. Ze pendelen mee met het op- en afgaande water, zogenoemde 'getij migreerders' (Bouma *et al.* 2005) (Figuur 8).

Figuur 8. De kinderkamerfunctie van het ondiepe sublitoraal en het litoraal voor diverse soorten platvissen, garnalen en krabben. De pelagische (= in de waterkolom verblijvende) larven ontwikkelen zich in het ondiepe sublitoraal, drijven naar het litoraal, en veranderen daar in benthische / demersale (= in of, in dit geval, vlak boven de bodem verblijvende) juvenielen. Zowel de juvenielen als de adulten pendelen heen en weer met het getij (figuur naar (Bouma, De jong *et al.* 2005)).

4 Ecologische beoordeling Volkerak-Zoommeer

4.1 Modelstudie door Deltares

Door Rijkswaterstaat zijn aan Deltares verdiepende vragen gesteld over het Volkerak-Zoommeer (Figuur 9) en het mogelijk terugbrengen van een zoet-zout overgang. Deltares is daartoe een modelstudie gestart om na te gaan of een optimalisatie mogelijk is van het voorkeursalternatief in de Rijksstructuurvisie, 'zout + beperkt getij' gericht op het creëren van een zoet-zout gradiënt. De volgende twee opties zijn modelmatig onderzocht op voor- en nadelen door een combinatie van (Tiessen & Nolte 2018, in voorbereiding):

1. Een doorlaatmiddel in de Philipsdam en inlaat via de Volkeraksluizen en uitstroom via de Bathse spuisluis.
2. Een doorlaatmiddel Philipsdam en in het noordelijk deel van de Oesterdam en inlaat via de Volkeraksluizen en uitstroom via de Bathse spuisluis.

Figuur 9. De deelgebieden van het Volkerak-Zoommeer met namen van dammen, doorlaatmiddelen en toestromende rivieren (bron Google Earth ©)

Zoet-zout gradiënten ontstaan in het samenspel van zoetwateraanvoer en zoutwateraanvoer. De belangrijkste bronnen voor zoetwater in de VZM-modelstudie zijn de Volkeraksluizen en de Brabantse rivieren Dintel en Vliet (Figuur 9). Zout water wordt ingelaten via de Philipsdam en Oesterdam. De modelstudie door Deltares is in twee stappen uitgevoerd (Tiessen & Nolte 2018, in voorbereiding):

1. 'Steady-state' berekeningen met een 3D hydrodynamisch model voor 28 verschillende scenario's uitgaande van 30cm getijslag en debieten via de Volkeraksluizen, Philipsdam en Oesterdam. Ook de lozing via de Bathse spuisluis op de Westerschelde is meegenomen en het inkomende debiet via de Brabantse rivieren Dintel en Steenbergse Vliet.
2. Berekening van de jaarvariatie van de zoet-zoutgradiënt, waterkwaliteit en primaire productie voor een geselecteerde variant met een 3D hydrodynamisch model en een 3D waterkwaliteitsmodel.

In de eerste stap zijn 28 scenario's gemodelleerd met als doel om te onderzoeken hoe de zoet-zoutgradiënt afhangt van de inkomende debieten en hoe deze debieten elkaar beïnvloeden: de zoetwateraanvoer door de Volkeraksluizen, de zoetwateraanvoer door de Dintel en de verdeling van de zoutwateraanvoer via doorlaatmiddelen in de Philipsdam en de Oesterdam. De getijslag is in alle gevallen gelijk aan 30 cm conform de voorkeursvariant van de Rijksstructuurvisie. In Bijlage 1 is een overzicht opgenomen van de 28 scenario's. De scenario's bevatten een combinatie van zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen (25 m³/s, 50 m³/s en 100 m³/s), met in- en uitgaande debieten via de Philipsdam (variërend van 85-300 m³/s) al dan niet in combinatie met de Oesterdam (0 m³/s, 60 m³/s, en 120 m³/s) en uitgaande debieten via de Bathse spuisluis (10 of 50 m³/s) naar de Westerschelde. Daarnaast is rekening gehouden met wisselende afvoeren van de rivier de Dintel (10, 20 en 40 m³/s,) en constant een debiet vanuit de Steenbergsge vliet (5 m³/s). De doorlaten in de Philipsdam en Oesterdam werken als 'communicerende vaten': om 30 cm getijslag te garanderen wordt het debiet van de ene doorlaat verlaagd als dat van de andere doorlaat wordt verhoogd en andersom.

De 'steady-state' berekeningen leiden tot de volgende inzichten (Tiessen & Nolte 2018, in voorbereiding):

- Aanvoer van zoetwater via de Volkeraksluizen resulteert niet in het ontstaan van een zoete zone maar een (licht) brakke bovenlaag die in westelijke richting stroomt. Dit komt omdat het rivierwater dat naar binnen stroomt bij de Volkeraksluizen snel mengt met de zoute onderlaag. Bij gelijkblijvende Dintel afvoer zorgt meer zoetwater via de Volkeraksluizen voor een relatief beperkte verlaging van de saliniteit en ontstaat stratificatie.
- Het zoute Oosterscheldewater dat via de Philipsdam wordt ingelaten stroomt via de diepe geul van het Krammer-Volkerak in oostelijke richting. Grote aanvoer van zoetwater (100 m³/s) in combinatie met een doorlaat in de Philipsdam zorgt voor een verzoeting van de bovenlaag (licht brak) en versterkt de stratificatie die tot in het Zoommeer blijft bestaan. Dit komt ook doordat er bij een hoger debiet via de Volkeraksluizen minder water via de Philipsdam wordt ingelaten om een getijslag van 30 cm te handhaven.
- De combinatie van zoetwater inlaat via de Volkeraksluizen met debieten vanuit de Oosterschelde via de Philipsdam naar het Krammer-Volkerak en via de Oesterdam naar het Zoommeer zorgt voor een hogere saliniteit in het Zoommeer en een iets lagere saliniteit in het Krammer-Volkerak. Dit komt omdat het debiet via de Philipsdam lager is als er water via de Oesterdam wordt ingelaten om een getijslag van 30 cm te kunnen handhaven. Bij maximale zoetwater aanvoer (100 m³/s) treedt sterke verlaging van de saliniteit in de bovenlaag op in het Krammer-Volkerak en Zoommeer waardoor een gestratificeerde situatie ontstaat.
- Bij de uitstroom van de rivieren Dintel en de Steenbergse Vliet treedt een duidelijke zoet-zout gradiënt op. Het effect van de Dintelafoer (maximaal 40 m³/s), lijkt een groter effect te hebben op het ontstaan van een brakwaterzone in het noordelijk Krammer-Volkerak dan aanvoer via de Volkeraksluizen. Dit heeft mogelijk te maken met laterale instroming.
- Voor meer detailinformatie wordt verwezen naar Tiessen et al. (2018, in voorbereiding).

4.2 Keuze voorkeursscenario

In samenwerking met Deltares en gekoppeld aan de totstandkoming van voorliggend rapport heeft Wageningen Marine Research een voorkeursscenario aangegeven van de in stap 1 uitgewerkte scenario's die voor ecologie het meest gunstig lijkt. Voor dit voorkeursscenario is een jaarsom berekend wat inhoudt dat het model voor een vol jaar wordt doorgerekend (zelfs meer dan een jaar

van 1 september 2011- 31 december 2012) met alle (seizoens)fluctuaties die daarbij horen om zo meer inzicht te krijgen in temporele en ruimtelijke veranderingen.

Het voorkeursscenario betreft scenario 10 (Tabel 7) met een geringe zoetwatertoevoer vanuit het Hollands Diep via de Volkeraksluizen ($25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), en zoutwaterinlaten vanuit de Oosterschelde via Philipsdam ($240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) en Oesterdam ($60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). In werkelijkheid zal de jaarsom ook de scenario's 11 en 12 omvatten, aangezien wisselende debieten over het jaar heen zullen optreden in de Dintel ($10\text{-}40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Tabel 7 Voorkeursscenario waarvoor een meer gedetailleerde modellering is uitgewerkt met het Delft 3D model op basis van een jaarsom.

Nummer	Inkomende debieten m^3/s				Uitgaande debieten m^3/s			
	Volkeraksluizen	Dintel	Vliet	Philipsdam	Oesterdam	Philipsdam	Oesterdam	Bathse spuisluis
10	25	10	5	240	60	230	100	10
11	25	20	5	240	60	240	100	10
12	25	40	5	220	60	240	100	10

Het voorkeursscenario is gekozen op basis van de volgende overwegingen:

- Geringe zoetwatertoevoer vanuit de Volkeraksluizen leidt tot een relatief zout Volkerak, de toevoer van zout water via de Oesterdam leidt tot een zouter Zoommeer. Een zout systeem is gunstig voor het terugdringen van de blauwalgen waar het Volkerak-Zoommeer in een volledig zoete situatie mee te kampen heeft (Meijers *et al.* 2008). Bij scenario's met meer zoetwatertoevoer lijkt het Volkerak te verzoeten (licht brakke bovenlaag), wat blauwalgen mogelijk de kans geeft zich te ontwikkelen.
- Stratificatie: in dit scenario treedt minder stratificatie op dan in scenario's met meer zoetwater vanuit de Volkeraksluizen. Overigens is stratificatie geen onnatuurlijk fenomeen in estuaria, zeker in systemen waar getijslag klein is of zoetwatertoevoer gering. Alleen kan langdurige stratificatie o.i.v. geringe waterbeweging leiden tot zuurstofloze condities bij de bodem, waardoor bodemgemeenschappen hinder kunnen ondervinden. Bij grotere afvoer vanuit de rivieren vergroot de stratificatie.
- Brak milieu: afhankelijk van de afvoer van de Brabantse rivieren ontstaat een zout dan wel brak milieu in het Volkerak-Zoommeer. M.a.w., brakke milieus ontstaan in dit scenario. Dit wordt als gunstig gescoord (zeldzaam in Nederland). Je zou kunnen overwegen om bij lage rivierafvoeren de zoetwateraanvoer vanuit de Volkeraksluizen te verhogen waardoor het brakke milieu meer constant over de tijd heen in stand blijft.
- Zoet-zout overgangen: bij de riviermondingen en bij de Volkeraksluizen ontstaan zoet-brak-zout overgangen die gunstig zijn als acclimatisatiezone en sturende prikkel ter oriëntatie voor diadrome vissen. Zoals eerder besproken zal bij de Volkeraksluizen wel een vismigratiepassage moeten worden voorzien. Dit geldt voor alle scenario's.
- Extra overwegingen die verder niet beoordeeld worden: verbinding met Oesterdam zorgt voor uitwisseling met de Oosterschelde; lozing op Westerschelde blijft beperkt.

4.3 Ecologische beschouwing

Vanuit ecologisch perspectief is het interessant om de resultaten van de jaarsom modellering te vergelijken met de ecologische aspecten van een natuurlijke zoet-zout overgang zoals beschreven in Hoofdstuk 2 en 3. Meest interessante abiotische aspecten in relatie tot de ecologische betekenis van de zoet-zout overgang:

- Zoutdynamiek: horizontale en verticale gradiënt in ruimte en tijd.

Meenemen in een eventueel vervolg (niet in deze studie):

- Nutriëntendynamiek: aanvoer van N, P en organisch materiaal en relatie doorzicht / PP.
- Waterdynamiek: stroomsnelheden (hoog/laag dynamisch), waterstandfluctuaties (intergetijdengebieden? Schor vegetatie?).
- Sedimentdynamiek: potentie opslibben intergetijdengebieden.

Zoutdynamiek

Horizontale gradiënt

Uit de resultaten is op te maken dat er sprake is van een brak-zout gradiënt vanaf de Volkeraksluizen richting de Philipsdam en de Eendracht en Zoommeer. Er is sprake van een mesohaliene zone (5-18 psu) van 0-2000 ha ten opzichte van een polyhaliene zone (18-30 psu) van 3000-5000 ha. Bij hoge rivierafvoer kan tijdelijk een oligohaliene zone optreden waarbij het zoutgehalte van de waterlaag aan de oppervlakte beneden 5 psu daalt ter plaatse van de monding van de Dintel en de Volkeraksluizen.

Verticale gradiënt

De rivierafvoer van voornamelijk de Dintel beïnvloedt de verticale gradiënt (Figuur 10). Hoge afvoeren, zoals in januari/februari met circa 80m³/s, zorgen voor het verzoeten van de oppervlaktelaag (Figuur 11). Dit effect is tot in het Zoommeer merkbaar. Afhankelijk van de rivierdynamiek van de Dintel (en verdamping in de zomer) is de zoet-zout gradiënt over het algemeen te omschrijven als een gedeeltelijk gemengd systeemtype (Figuur 1). Het verschil in saliniteit is het grootst in het Volkerak en neemt af richting de Eendracht en het Zoommeer.

Figuur 10. Jaarstatistiek van de saliniteit in de oppervlaktelaag van het Volkerak-Zoommeer (10-percentiel, gemiddelde en 90-percentiel). De afvoer van de Brabantse rivieren Dintel en Vliet is variabel (Tiessen & Nolte 2018, in voorbereiding).

Figuur 11. Tijdreeksen van debieten voor de jaarberekening van 1 september 2011 tot 31 december 2012 voor scenario 10 (Tiessen & Nolte 2018, in voorbereiding).

Verwachting ontwikkeling soortengroepen:

- Macrobenthos van zacht substraat: voorkomen van mariene soorten in het Zoommeer, Eendracht en zuidelijk Krammer-Volkerak tot meer euryhalie mariene soorten (brede zouttolerantie) in de brakke zone in het noordelijk deel van het Krammer-Volkerak. Omdat de saliniteit op de bodem in het noordelijk deel gedurende het hele jaar (op één hoogafvoer situatie na) rond de 25 psu ligt is de verwachting dat hier ook mariene soorten voor zullen komen. Het systeem zal qua soortensamenstelling meer op de Oosterschelde gaan lijken. De verwachting is dat stroomsnelheden beperkt zijn ($<0,8$ m/s) en dat zich overwegend laagdynamische gemeenschappen zullen ontwikkelen. Lokaal kunnen zich hoog-dynamische gemeenschappen ontwikkelen daar waar het harder stroomt, bijvoorbeeld nabij een doorlaat.
- Macrobenthos en wieren van hard substraat: de verharde dijktafsluitingen en oeververdedigingen zullen begroeid raken met zoutminnende wieren in het eulittoraal en met epifauna soorten variërend van gemeenschappen mogelijk met Japanse oesters (*Crassostrea gigas*) als structuurvormend organisme zoals ook in het Grevelingenmeer, Oosterschelde en Westerschelde het geval is.
- Vissen: voorkomen van estuariene residente soorten (bv. puitaal, brakwatergrondel, botervis, zeedonderpad) en ook mariene juveniele soorten zoals haring, sprot, schol, tongen zeebaars en seizoensgasten als harders. De betekenis van deze zone voor diadrome vissoorten is vanwege de beperkte kennis (potentieel voorkomen diadrome soorten, migratieroutes etc.)

nog lastig in te schatten en hangt uiteraard ook af van de vispasseerbaarheid van de kunstwerken, maar zal zeker voor soorten die lokaal zowel paai- als opgroeigebieden beschikbaar hebben zoals driedoornige stekelbaars en spiering een veel gunstigere situatie vormen dan de huidige. Wellicht dat er ook herkolonisatie door rivierprik van de West-Brabantse beken kan plaatsvinden, mits hier ook paaisubstraat (grind of stenen) in aanwezig is. Het belang van een geleidelijke zoet-zout overgang als acclimatisatiezone voor diadrome vissoorten lijkt weliswaar relatief beperkt op basis van bronnenonderzoek dat is uitgevoerd voor de vismigratie rivier (Winter, Briffioen *et al.* 2014). Echter gezien de schaarste aan estuariene habitats in de huidige situatie in de Rijn-Maas-delta zal het Volkerak hierin een goede aanvullende rol kunnen spelen, waarbij een deel van de trekvispopulaties die de Maas en Rijn gebruiken ook het Volkerak kunnen benutten als opgroeihabitat, voor bijvoorbeeld soorten als elft, zeeforel, houting en op termijn wellicht ook juveniele steur. In welke mate het Volkerak gebruikt zal worden door Rijn-Maas populaties is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer en de 'aantrekkelijkheid' en vindbaarheid van het Volkerak tijdens zowel stroomopwaartse als stroomafwaartse migraties en dispersie. Dit is lastig op voorhand in te schatten, maar het Volkerak met een zoet-zout gradiënt kan een zeer waardevolle aanvulling zijn voor de delta, omdat dit nu grotendeels ontbreekt. In de Zuidwestelijke delta is deze dynamiek alleen nog aanwezig in de Westerschelde. Voor fint is waarschijnlijk grootschaliger herstel van estuariene dynamiek nodig om paai- en opgroeimogelijkheden te geven dan in het Volkerak kan worden gerealiseerd. Zeker ook omdat er in het Haringvliet met een kierbeheer nog regelmatig langere perioden met een harde zoet-zout overgang zullen plaatsvinden en de continuïteit van een geleidelijke zoet-zout overgang hier slechts een deel van de tijd aanwezig is (Griffioen *et al.* 2017).

- Vogels: visetende vogels zoals bijvoorbeeld aalscholver (*Phalacrocorax carbo*), middelste zaagbek (*Mergus serrator*) en fuut (*Podiceps cristatus*) zullen profiteren van de toename in estuariene en mariene vissoorten. Daarnaast zullen vogels ook profiteren van het ontstaan van intergetijdengebieden en potentieel foerageergebied. Omdat de focus van dit rapport ligt op zoet-zout overgangen is dit aspect verder niet beoordeeld.
- Zeegras: de ontwikkeling van zeegrasvelden is van veel verschillende factoren afhankelijk zoals lokale hydrodynamiek, aanwezigheid van zaden, etc. Het is daarom lastig om hier een uitspraak over te doen. Echter in het scenario van een zout Volkerak-Zoommeer met beperkte getijdedynamiek en zoetwater invloed ontstaan in potentie geschikte ondiepe delen waar zeegras tot ontwikkeling zou kunnen komen.
- Schorren: vanwege de beperkte getijslag van 30 centimeter in het scenario is de verwachting dat er geen volwaardige schorren tot ontwikkeling kunnen komen met een krekensysteem en bijbehorende transportprocessen. Wel zal onder invloed van het zoute water de oevers geleidelijk verzilten en zich mogelijk een zilte pioniervegetatie ontwikkelen met o.a. zeekraal (*Salicornia europaea*).

Andere aspecten:

- Toename areaal brakwaterhabitat en intergetijdengebied
- Toename diversiteit habitats
- Kraam- en kinderkamerfunctie
- Beperken/stoppen blauwalgen en goede zuurstofcondities op de bodem voor ontwikkeling macrobenthos

5 Conclusies

Ecologie van zoet-zout overgangen (conclusie Hoofdstuk 2)

Deze studie laat zien dat een zoet-zout overgang meer is dan een simpele overgangszone tussen rivier en zee maar eerder een geheel eigen ecosysteem met unieke soortensamenstelling, karakteristieke habitats en transportprocessen van sediment, nutriënten en andere (opgeloste) stoffen, organisch materiaal en organismen. Als gevolg hiervan is deze overgang geen simpele mengzone van twee waterbronnen maar is zeer complex met een groot aantal variabelen in fysische en chemische factoren en voorkomende levensgemeenschappen die continu variëren in ruimte en tijd. De afbraak van organisch materiaal door bacteriën en de opname van nutriënten door eencellige algen vormen de basis van het voedselweb. Deze algen en bacteriën (of hun afbraakproducten) dienen als voedsel voor dierlijk plankton, bodemdieren, vissen, schaaldieren, vogels (steltlopers, eenden, ganzen) en zeezoogdieren.

Ecologische betekenis van zoet-zout overgangen (conclusie Hoofdstuk 3)

De ecologische waarde van zoet-zout overgangen vertaalt zich voornamelijk in:

- Grote verscheidenheid van zoet-, brak- en zoutwater getijdenhabitats met een grote verscheidenheid aan soorten als gevolg.
- Een open verbinding tussen rivier en zee ten bate van:
 - o Vismigratie voor diadrome vissoorten zoals Europese steur, Atlantische Zalm, Houting, Elft, Fint en Zeeforel om hun voortplantings- of opgroeihabitat te kunnen bereiken en hun levenscyclus te voltooien;
 - o Transportprocessen van sediment en de daarmee samenhangende opbouw van habitats zoals ondiepwater- en intergetijdengebieden, schorren en duinen.
 - o Biochemische processen en een optimale distributie van stoffen vanuit de zee en de rivier door de waterbeweging als basis voor een goede waterkwaliteit met afbraakprocessen en een hoge primaire productie met voedselrijkdom voor soorten.
- Kraam- en kinderkamer voor juveniele vissen en garnalen door voedselrijkdom, aanwezigheid van (relatief warmere) ondiepe zones en beschutting tegen predatoren.
- Brakwater getijdenhabitat is een schaars habitat in Noordwest Europa. De soortenrijkdom is hier laag en alleen soorten die fluctuaties in zoutgehalten kunnen tolereren kunnen hier voorkomen. De betekenis van de brakwaterzone als acclimatisatie zone voor migrerende vissen lijkt beperkt.

Ecologische beoordeling Volkerak-Zoommeer (conclusie Hoofdstuk 4)

Het door Wageningen Marine Research geselecteerde voorkeurssscenario voor een mogelijke zoet-zout overgang in het Volkerak-Zoommeer betreft een geringe zoetwatertoevoer vanuit het Hollands Diep via de Volkeraksluizen ($25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), en zoutwaterinlaten vanuit de Oosterschelde via Philipsdam ($240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) en Oesterdam ($60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). De afvoer van de Dintel is variabel. In dit scenario ontstaat een gedeeltelijk gemengd brak-zout systeemtype waarbij geen sprake is van een zoete zone. Bij hoge afvoer van de Dintel kan er tijdelijk een zoete laag ontstaan aan de oppervlakte.

Verwachting ecologische ontwikkeling:

- Levensgemeenschappen - ontwikkeling van een marien systeemtype met bijbehorende soorten vergelijkbaar met de Oosterschelde en het Grevelingenmeer met soorten van hard en zacht substraat. Paai-, leef- en opgroei gebied voor estuariene vissoorten en voorkomen marien juveniele soorten. Door het voorkomen van deze vissoorten wordt het gebied ook aantrekkelijk voor visetende vogels. Ook kan het gebied fungeren als migratiecorridor voor diadrome soorten afhankelijk van de vismigratiemogelijkheden bij de doorlaatmiddelen. Potentieel interessant voor ontwikkeling van zeegrasvelden, afhankelijk van factoren als hydrodynamiek, aanwezigheid van zaden etc.
- Toename van meer diversiteit aan habitats en in Europa relatief zeldzaam brakwater habitat
- Beperken, mogelijk geheel voorkomen van bloei van blauwalgen en voorkomen van zuurstofloze condities.

6 Discussie

Ecologie van zoet-zout overgangen

Uit voorliggend rapport komen de vele verschillende facetten van zoet-zout overgangen naar voren. Het doel was dan ook om deze facetten in de breedte te beschrijven en te illustreren aan de hand van voorbeelden. Binnen deze studie was geen ruimte om alle facetten vergaand uit te diepen (en dit was niet het doel).

De ecologische betekenis van een zoet-zout overgang komt vooral tot uiting in de grote diversiteit van habitats en soorten. Daarnaast komt naar voren dat een volwaardige open verbinding van belang is om transportprocessen van sediment voor opbouw van habitats en biochemische processen met afbraak van organisch materiaal en vrijkomen van nutriënten te waarborgen en daarnaast migratie van diadrome vissen. Bij het (deels) herstellen van zoet-zout overgangen door debiet van zoet- en zout water toe te staan zoals in de modelstudie van het Volkerak-Zoommeer is het van belang om naast saliniteit bovengenoemde transportprocessen en migratie in acht te nemen.

Uit deze studie komt naar voren dat sommige macrobenthos soorten karakteristiek zijn voor brakke wateren (De Boer & Wolff 1996) maar er niet per definitie toe zijn beperkt. Het gaat grotendeels om meer algemene soorten met een brede zouttolerantie die vanwege andere redenen zoals bv. substraatvoorkeur, voedsel of op de vlucht voor predatoren naar de brakke zone migreren. Daarnaast zijn er enkele soorten die de brakke omstandigheden prefereren (De Boer & Wolff 1996). Van belang is om te benadrukken dat dit onderzoek gericht was op macrobenthos. Daarnaast komt ook naar voren dat de geleidelijkheid van de zoet-zout overgang als acclimatisatiezone voor diadrome vissen minder van belang lijkt. Daarmee lijkt de brakwaterzone als habitat an sich van beperkt belang en is deze zone vooral waardevol als verbinding en omzetten van organisch materiaal tot nutriënten wat in het mariene deel van het estuarium voor hoge primaire productie zorgt. Toch moet ook benadrukt worden dat de brakwaterzone ondersteunend is aan het voorkomen van brakwaterschorren met geheel eigen vegetatiesamenstelling ten opzichte van zoet- en zoutwater schorren en dit geldt ook voor soorten van hard substraat (De Kluijver, Dubbeldam *et al.* 2015). Daarnaast is de invloed van zoet/brak water van belang voor zeegras (Boström *et al.* 2002).

Ecologische beschouwing Volkerak-Zoommeer

De modelstudie van Deltares schept interessante inzichten in de mogelijkheden van (combinatie van) verschillende doorlaten en de consequenties voor saliniteit en de potentie voor ecologische ontwikkeling. In het Krammer-Volkerak is geen sprake van een zoet-zout overgang maar meer van een brakke mengzone die overgaat naar een zoute zone in westelijke richting. Bij hogere zoetwater inlaat ontstaat een (licht) brakke en soms zoete bovenlaag. Er ontstaat wel een brakke zone hetgeen een relatief zeldzaam habitat in Europa vertegenwoordigd. Er moeten hier wel kanttekeningen bij geplaatst worden omdat de waarde van dit habitat zich juist uit door een verbinding tussen zoet en zout met alle aspecten die daarbij horen zoals vismigratie, hoge turbulentie en chemische processen zoals het omzetten van organisch materiaal dat vervolgens in de vorm van nutriënten beschikbaar komt voor primaire productie en daarmee voedsel voor hogere trofische niveau's. Voor deze aspecten is een (volwaardige?) verbinding met zowel de zoete als de zoute zone van belang. In het Volkerak-Zoommeer is de robuustheid van deze verbinding dus afhankelijk van het ontwerp van de doorlaatmiddelen en vismigratievoorzieningen. In een vervolg is het waardevol om ook nutriënten, water- en sedimentdynamiek mee te nemen in de beschouwing om een breder beeld te krijgen van de ecologische potentie in relatie tot bovengenoemde aspecten.

In de rivieren Dintel en Steenbergse Vliet ontstaat wel een zoet-brak-zout overgang maar vanwege beperkte tijd en data zijn deze overgangen verder niet beoordeeld terwijl ze ecologisch gezien van betekenis zijn. Dit is ook afhankelijk van het ontwerp van sluizen / zoet-zout scheiding.

Aanbevelingen

De Zuidwestelijke Delta heeft door de compartimentering als gevolg van de Deltawerken een verscheidenheid aan watersystemen. Ieder systeem kent daarbij zijn eigen verhaal en sores in relatie

tot de natuur- en/of waterkwaliteit die onder druk staan als gevolg van de compartimentering of door ander menselijk handelen (bv. baggeren). Er zijn verschillende opgaven geformuleerd die zich richten op het aanpakken van de waterkwaliteit zoals binnen de Rijksstructuurvisie Grevelingen en Volkerak-Zoommeer en het vergroten van mogelijkheden voor vismigratie zoals in het Haringvliet. Dit biedt kansen voor herstel van ecologisch waardevolle zoet-zout overgangen waarbij de dammen en kunstwerken fungeren als 'draaiknoppen'. Daarnaast kampen ook de open wateren, Westerschelde en Nieuwe Waterweg, waar nog een overgang van zoet naar zout aanwezig is, met toenemende druk door menselijk handelen zoals baggerwerkzaamheden. Voor het Ministerie van LNV is het van belang om inzicht te verkrijgen in de (toekomstige) ecologische betekenis van deze zoet-zout overgangen in relatie tot menselijk handelen. Voorliggende rapportage waarin bestaande kennis is gebundeld en het potentiële herstel van een zoet-zout overgang in het VZM is beschreven biedt een goede basis voor vervolgonderzoek. Dit vervolgonderzoek zou zich kunnen richten op het evalueren hoe huidig en toekomstig beheer van de (potentiële) zoet-zout overgangen in de ZWD te weten Nieuwe Waterweg, Haringvliet, Kammer-Volkerak en Westerschelde ten goede komt aan de ecologische kwaliteit. Hierbij valt te denken aan enerzijds de migreerbaarheid van deze zones voor diadrome vissoorten maar ook de betekenis voor brakke habitats, bijzondere soorten, exoten, biologische productie en kinderkamerfunctie voor jonge vis en andere soorten. Ook is hierbij de betekenis van verbindingen met het binnendijkse gebied via kleinere riviertjes zoals de Dintel en Steenbergse Vliet en polderwater overslagpunten (gemalen/sluizen) van belang.

7 Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2008 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem (certificaatnummer: 187378-2015-AQ-NLD-RvA). Dit certificaat is geldig tot 15 september 2018. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV Certification B.V.

Literatuur

- Anonymus (2003). "The Venice System for the Classification of Marine Waters According to Salinity." *Limnology and Oceanography* **3**(3).
- Anonymus (2016). Estuaria (H1130).
- Attril, M. J. (2002). "A testable linear model for diversity trends in estuaries." *Journal of Animal Ecology* **71**: 262-269.
- Baptist, M. J., I. De Mesel, L. C. P. M. Stuyt, R. Henkes, H. De Molenaar, J. Wijsman, N. Dankers & V. Kimmel (2007). Herstel van estuariene dynamiek in de zuidwestelijke Delta. IMARES Wageningen UR, Texel.172
- Boesch, D. F. (1977). A new look at the benthos along the estuarine gradient. Ecology of Marine Benthos. B. C. Coul. South Carolina, University of South Carolina Press, Columbia: 245-266.
- Bœuf, G. & P. Payan (2001). "How should salinity influence fish growth?" *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* **130**(4): 411-423.
- Boström, C., E. Bonsdorff, P. Kangas & A. Norkko (2002). "Long-term Changes of a Brackish-water Eelgrass (*Zostera marina* L.) Community Indicate Effects of Coastal Eutrophication." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **55**(5): 795-804.
- Bouma, H., D. J. De jong, F. Twisk & K. Wolfstein (2005). Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1). Voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren. RIKZ, Middelburg. Rapport RIKZ/2005.024
- Breine, J., J. Maes, F. Ollevier & M. Stevens (2011). "Fish assemblages across a salinity gradient in the Zeeschelde estuary (Belgium)." *Belgium Journal of Zoology* **141**: 21-44.
- Cloern, J. W., A. D. Jassby, T. S. Schrage, E. Nejad & C. Martin (2017). "Ecosystem variability along the estuarine salinity gradient: Examples from long-term study of San Francisco Bay." *Limnology and Oceanography*.
- De Boer, K. & W. Wolff (1996). Tussen zilt en zoet. Voorstudie naar de betekenis van estuariene gradiënten in het Waddengebied. Rijksuniversiteit Groningen Groningen. C13937:94
- de Groot, S. J. (2002). "A review of the past and present status of anadromous fish species in the Netherlands: is restocking the Rhine feasible?" *Hydrobiologia* **478**(1): 205-218.
- De Kluijver, M. J., M. Dubbeldam, M. Dooge & B. J. L. Van Broekhoven (2015). De effecten van de versterking van de vooroever, situatie 2014. T5-Schouwen-Duiveland, T0-Wemeldinge, T3 en T5-Westerschelde. Stichting Zeeschelp,
- De Leeuw, C. C. & J. J. G. M. Backx (2001). Naar een herstel van estuariene gradiënten in Nederland. Een literatuurstudie naar de algemene ecologische principes van estuarine gradiënten, ten behoeve van herstelmaatregelen voor de Nederlandse kust. RIKZ en RIZA:169
- Dodson, J. J., R. A. Jones & W. C. Legget (1972). "BEHAVIOR OF ADULT AMERICAN SHAD (ALOSA-SAPIDISSIMA) DURING MIGRATION FROM SALT TO FRESH WATER AS OBSERVED BY ULTRASONIC TRACKING TECHNIQUES." *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **29**(1445).
- Griffioen, A. B., H. V. Winter & R. Van Hal (2017). Prognose visstand in en rond het Haringvliet na invoering van het Kierbesluit in 2018. Wageningen Marine Research, Rapport C081/17
- Jager, Z. (2008). Maatlat vissen in estuarie KRW watertype O2. Ravon & Rijkswaterstaat Waterdienst,
- Kitano, J., A. Ishikawa, M. Kume & S. Mori (2012). "Physiological and genetic basis for variation in migratory behavior in the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus*." *Ichthyological Research* **59**(4): 293-303.
- Legget, W. C. & R. N. Oboyle (1976). "Osmotic stress and mortality in adult american shad during transfer from saltwater to freshwater." *Journal of Fish Biology* **70**: 630-637.
- Leggett, W. C. & R. N. O'Boyle (1976). "Osmotic stress and mortality in adult American shad during transfer from saltwater to freshwater." *Journal of Fish Biology* **8**(6): 459-469.
- Lievaart, M. A. & A. J. Pouwer (2003). MOVE de Westerschelde als Kraam-en kinderkamer voor vis en garnaal in relatie tot de verruiming.
- Marshall, W. S., S. D. McCormick, A. P. Farrell & C. J. Brauner (2012). 8 - Osmoregulation in Estuarine and Intertidal Fishes. Fish Physiology, Academic Press. **32**: 395-434.
- Meijers, E., S. Groot, M. Haasnoot, B. K. Van Wesenbeeck & I. De Vries (2008). Waterkwaliteit in een zout Volkerak-Zoommeer. Planstudie Volkerak-Zoommeer. Deltares, Delft.73
- Ministerie van Economische Zaken (2014). Natuurambitie Grote Wateren 2050 en verder. Den Haag.75
- Moens, T., P. M. J. Herman & T. Ysebaert (2001). "Eten en gegeten worden in het Schelde-estuarium." *De Levende Natuur* **2**: 52-55.

- Monismith, S. J., W. Kimmerer, J. R. Bureau & M. T. Stacey (1996). Stratification dynamics and gravitational circulation in northern San Francisco Bay. San Francisco Bay: The ecosystem. J. T. Hollibaugh, Pacific Division of the American Association for the Advancement of Science: 123-153.
- Mulder, J. P. M., J. Cleveringa, M. D. Taal, B. K. Van Wesenbeeck & F. Klijn (2010). Sedimentperspectief voor de Zuidwestelijke Delta. Deltares,
- Novo, M. S., R. B. Miranda & A. Bianchini (2005). "Sexual and seasonal variations in osmoregulation and ionoregulation in the estuarine crab *Chasmagnathus granulatus* (Crustacea, Decapoda)." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **323**(2): 118-137.
- Pham, D., G. Charmantier, N. Wabete, V. Boulo, F. Broutoi, J.-R. Mailliez, J.-M. Peignon & M. Charmantier-Daures (2012). "Salinity tolerance, ontogeny of osmoregulation and zootechnical improvement in the larval rearing of the Caledonian Blue Shrimp, *Litopenaeus stylirostris* (Decapoda, Penaeidae)." *Aquaculture* **362-363**(Supplement C): 10-17.
- Pihl, L., A. Cattijse, I. Coldling, S. Mathieson, D. S. Mcluskus & C. Roberts (2002). Habitat Use by Fishes in Estuaries and Other Brackish Areas. Fishes in Estuaries. M. Elliot and K. Hemingway, Blackwell Publishing Ltd.
- Quak, J. (2016). Van aal tot zalm tussen zoet en zout: een beschouwing over de visstand in het Haringvliet, Hollands Diep en Goreesche Gat tussen 1870-1970. Sportvisserij Nederland, Bilthoven.
- Remane, A. (1934). "Die Brackwasserfauna." *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft* **36**: 34-74.
- Shrestha, P., S. Su, S. James, P. Shaller, M. Doroudian, C. Firstenberg & C. Thompson (2014). "Conceptual Site Model for Newark Bay—Hydrodynamics and Sediment Transport." *Journal of Marine Science and Engineering* **2**(1): 123.
- Smaal, A. C. & J. Wijsman (2015). Minimum zuurstofgehalte voor bodemdieren in het Grevelingenmeer. IMARES Wageningen UR, Yerseke. Rapport C022/15
- Sutherland, T. F., J. Grant & C. L. Amos (1998). "The effect of carbohydrate production by the diatom *Nitzschia curvilineata* on the erodibility of sediment." *Limnology and Oceanography* **43**(1): 65-72.
- Tangelder, M., A. V. De Groot & T. Ysebaert (2013). Biobouwers als optimalisatie van waterveiligheid in de Zuidwestelijke Delta. IMARES, Yerseke. C198/13:80
- Tangelder, M., K. Troost, D. Van den Ende & Y. Ysebaert (2012). Ecologische begrippen: Veerkracht en verwante begrippen in het kader van Beleid Ondersteuning Programmabureau Zuidwestelijke Delta. IMARES Wageningen UR, C068/12:33
- Temmerman, S., G. Govers, P. Meire & S. Wartel (2003). "Modelling long-term tidal marsh growth under changing tidal conditions and suspended sediment concentrations, Scheldt estuary, Belgium." *Marine Geology* **193**: 151-169.
- Tiessen, M. C. H. & A. J. Nolte (2018, in voorbereiding). Verkenning zoet-zoutgradiënten in het Volkerak-Zoommeer gericht op ecologische kwaliteit. Modelstudie. Deltares, Delft. 11201168-000
- Troost, K., M. Tangelder, D. Van den Ende & T. Ysebaert (2012). From Past to Present. Biodiversity in a Changing Delta. IMARES Wageningen UR, Yerseke.
- Tulp, I., L. Bolle & A. D. Rijnsdorp (2008). "Signals from the shallows: in search of common patterns in long-term trends in Dutch estuarine and coastal fish." *Journal of Sea Research* **60**: 54-73.
- Tytler, P. & J. H. Blaxter (1988). "The Effects of External Salinity on the Drinking Rates of the Larvae of Herring, Plaice and Cod." *Journal of Experimental Biology* **138**(1): 1-15.
- Underwood, G. J. C. & J. Kromkamp (1999). Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. Estuaries. D. B. Nedwell and D. G. Raffaelli. London, Academic Press. **29**: 93-139.
- Van Beek, G. C. W. (2000). Zout Zout Zuid-Holland. RIZA-Rijkswaterstaat, Lelystad.
- Van Damme, S. & P. Meire (2001). "Het Schelde-estuarium als filter: een bioreactor van stofstromen." *De Levende Natuur* **2**: 48-51.
- van Moorsel, G. W. N. M. (1996). Biomonitoring van levensgemeenschappen op sublitorale harde substraten in Grevelingenmeer, Oosterschelde, Veerse Meer en Westerschelde. Resultaten t/m 1995.
- Van Zanten, E. & L. Adriaanse (2008). "Verminderd getij. Verkenning naar mogelijke maatregelen om het verlies van platen, slikken en schorren in de Oosterschelde te beperken." *Hoofdrapport Rijkswaterstaat*.
- Vandenbussche, V., F. T'Jollyn, A. Zwaenepoel, E. Van Den Balck & M. Hoffmann (2002). Systematiek van natuurtypen voor de biotopen heide, moeras, duin, slik en schor. Deel 5: slik en schor. MINA 102/99/01:149
- Varsamos, S., C. Nebel & G. Charmantier (2005). "Ontogeny of osmoregulation in postembryonic fish: A review." *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **141**(4): 401-429.
- Wallis, B., R. Mann, T. Ysebaert, K. Troost, P. M. J. Herman & A. C. Smaal (2015). "Demography of the ecosystem engineer *Crassostrea gigas*, related to vertical reef accretion and reef persistence." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **154**(Supplement C): 224-233.

-
- Walles, B., J. Salvador de Paiva, B. C. van Prooijen, T. Ysebaert & A. C. Smaal (2015). "The Ecosystem Engineer *Crassostrea gigas* Affects Tidal Flat Morphology Beyond the Boundary of Their Reef Structures." *Estuaries and Coasts* **38**(3): 941-950.
- Whitfield, A. K., M. Elliott, A. Basset, S. J. M. Blaber & R. J. West (2011). "Paradigms in estuarine ecology - A review of the Remane diagram with a suggested revised model for estuaries." *Estuarine Coastal and Shelf Science* **97**: 78-90.
- Wijnhoven, S. & H. Hummel (2009). Historische analyse van exoten in de Zeeuwse delta. De opkomst, verspreiding, ontwikkeling en impact van exoten onder de macrofauna van het zachte substraat in de Zeeuwse brakke en zoute wateren. Monitor Taakgroep (KNAW/NIOO-CEME), Yerseke. 2009-11:196
- Wijsman, J. W. M. & I. De Mesel (2009). Duurzame schelpdiertransporten. IMARES, Wageningen. C067/09:111
- Wilson, J. M., J. C. Antunes, P. D. Bouca & J. Coimbra (2004). "smoregulatory plasticity of the glass eel of *Anguilla anguilla*: freshwater entry and changes in branchial ion-transport protein expression." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **61**: 432-442.
- Winter, H. V., A. B. Briffioen & O. A. Van Keeken (2014). De Vismigratierivier: Bronnenonderzoek naar gedrag van vis rond zoet-zout overgangen. IMARES Wageningen UR, IJmuiden. Rapport Co350/14
- Wolff, W. (1973). The estuary as a habitat. An analysis of data on the soft-bottom macrofauna of the estuarine area of the rivers Rhine, Meuse and Scheldt. PhD, State university of Leiden.
- Wootton, R. J. (1978). The biology of sticklebacks. London, New York, San Fransisco, Academic Press.
- Ysebaert, T., M. Tangelder & J. Wijsman (2013). Samenhang in de Delta, ontwikkelvarianten voor de Zuidwestelijke Delta: Ecologische ontwikkeling van habitats en levensgemeenschappen (deel 2). IMARES, Yerseke. C159/13:64
- Zydlowski, J., M. P. Wilkie, S. D. McCormick, A. P. Farrell & C. J. Brauner (2012). 6 - Freshwater to Seawater Transitions in Migratory Fishes. *Fish Physiology*, Academic Press. **32**: 253-326.

Verantwoording

Rapport C116/17

Projectnummer: 4318100123

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research

Akkoord: Dr. ir. M.J. Baptist
Senior onderzoeker

Handtekening:

Datum: December 2017

Akkoord: Drs. J. Asjes
Manager Integratie

Handtekening:

Datum: December 2017

Bijlage 1 Reconstructie oorspronkelijke zoutgehalten in de ZWD

Reconstructie van de oorspronkelijke zoutgehalten in de Zuidwestelijke Delta naar gegevens uit Wolff (1973) bij gemiddelde en extreme situaties. Zoutgehalten bij hoogwater en laagwater en gemiddelde rivierafvoer. Zoutgehalten bij lage rivierafvoer en hoogwater en hoge rivierafvoer en laagwater. De huidige situatie (gebaseerd op gemodelleerde waarden uit Ysebaert et al. (2013)) en de legenda op basis van het Venice classificatie systeem (Tabel 1). De figuren geven de zoutgehalten nabij de bodem aan. De rivierafvoeren betreffen de gemiddelde, hoogste en laagste rivierafvoeren van de Rijn, Maas en Schelde (beperkte data) in de jaren 1965-1968 (debieten staan niet vernoemd). Hoogwater bij gemiddelde rivierafvoer, situatie voor de Deltawerken.

Laagwater bij gemiddelde rivierafvoer, situatie voor de Deltawerken.

Hoogwater bij lage rivierafvoer, situatie voor de Deltawerken.

Laagwater bij hoge rivierafvoer, situatie voor de Deltawerken.

Huidige situatie

Bijlage 2 Overzicht scenario's Volkerak-Zoommeer

De door Deltares gemodelleerde scenario's voor het Volkerak-Zoommeer met in- en uitgaande debieten via de Volkeraksluizen, Philipsdam en Oesterdam. Ook de lozing via de Bathse spuisluis op de Westerschelde staat aangegeven en het inkomende debiet via de Brabantse rivieren Dintel en Steenbergse Vliet. Deze 28 scenario's zijn uitgewerkt voor een kort tijdsbestek van 7 dagen. De blauw gemarkeerde delen geven de scenario's aan die zijn uitgewerkt in een jaarsom.

ID	Inkomende debieten					Uitgaande debieten		
	Volkeraksluizen	Dintel	Vliet	Philipsdam	Oesterdam	Philipsdam	Oesterdam	Bathse spuisluis
1	25	10	5	300	0	290	0	50
2	25	20	5	300	0	300	0	50
3	25	40	5	280	0	300	0	50
4	50	10	5	285	0	300	0	50
5	50	20	5	275	0	300	0	50
6	50	40	5	255	0	300	0	50
7	100	10	5	235	0	300	0	50
8	100	20	5	225	0	300	0	50
9	100	40	5	205	0	300	0	50
10	25	10	5	240	60	230	100	10
11	25	20	5	240	60	240	100	10
12	25	40	5	220	60	240	100	10
13	50	10	5	225	60	240	100	10
14	50	20	5	215	60	240	100	10
15	50	40	5	195	60	240	100	10
16	100	10	5	175	60	240	100	10
17	100	20	5	165	60	240	100	10
18	100	40	5	145	60	240	100	10
19	25	10	5	180	120	170	160	10
20	25	20	5	180	120	180	160	10
21	25	40	5	160	120	180	160	10
22	50	10	5	165	120	180	160	10
23	50	20	5	155	120	180	160	10
24	50	40	5	135	120	180	160	10
25	100	10	5	115	120	180	160	10
26	100	20	5	105	120	180	160	10
27	100	40	5	85	120	180	160	10
28	25	10	5	300	0	250	0	90