

Brakwater zones rond de Afsluitdijk

3D modelberekeningen naar water- en
zoutbeweging in diverse ontwerpvarianten

Rapport RIKZ/2002.038

september 2002

Brakwater zones rond de Afsluitdijk

3D modelberekeningen naar water- en
zoutbeweging in diverse ontwerpvarianten

J.M. de Kok

Rapport RIKZ/2002.038

september 2002

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave 3

Samenvatting 5

1 Inleiding 7

- 1.1 Gewenste condities in de brakwater zone 7
- 1.2 Binnendijkse varianten" 11
- 1.3 "Buitendijkse varianten" 13
- 1.4 Berekeningsmethodiek 3D 13
- 1.5 Kombergingsmodel 15

2 Berekeningsresultaten 17

3 De Staart van Breehorn 19

- 3.1 Breehorn kort 20
- 3.2 Breehorn lang 20
- 3.3 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling *beide varianten*).

4 Breezand Brak 23

- 4.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling. 25

5 Brakke Boontjes 27

- 5.1 Brakke Boontjes 1 27
 - 5.1.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling. 27
- 5.2 Brakke Boontjes 2 29
 - 5.2.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling. 29
- 5.3 Brakke Boontjes3 31
 - 5.3.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling. 31

6 De staart van Kornwerderzand 35

- 6.1 De staart van Kornwerderzand (10 km) 35
 - 6.1.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling. 35
- 6.2 Staart van Kornwerderzand (6 km) 38
 - 6.2.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling 38

7 Makkummer Brak 39

- 7.1 Makkummer Brak Oost 40
 - 7.2.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicpaciteit, uitstraling. 41
- 7.2 Makkummer Brak west 40

8 Conclusies 43

9 Gebruikte rapportages 45

Samenvatting

In het kader van het verkennend onderzoek naar de mogelijkheid tot het inrichten van een estuariene overgangszone naast de Afsluitdijk zijn er door het "Ontwerp Team Brak" schetsontwerpen gemaakt van een aantal mogelijke inrichtingsmaatregelen, die moeten leiden tot het ontstaan van een zone, waarbinnen zich een tamelijk constante en geleidelijke zoet-zout overgang bevindt, de zogenaamde "brakwater zone". Er zijn numerieke modelberekeningen gedaan met een driedimensionaal waterbewegings- en zoutverspreidingsmodel en met een kombergingsmodel naar de effectiviteit van een aantal inrichtingsvarianten ten aanzien van de gewenste effecten op de zoetwaterverdeling en de intrek van diadrome vissoorten.

Uit de berekeningen komt naar voren, dat alle in dit rapport gepresenteerde inrichtingsvarianten leiden tot een voldoende stabiele saliniteitsgradiënt in de brakwater zone : de saliniteit varieert er per getijperiode niet meer dan 10 PSU en deze verandering is geleidelijk en niet discontinu.

Wat betreft de mogelijkheden voor visintrek scoren de in het IJsselmeer gelegen "binnendijkse" varianten beter dan die, welke in de Waddenzee ("buitendijks") zijn gelegen.

Van de buitendijkse varianten biedt de variant "Brakke Boontjes 1", besproken in hoofdstuk **5.1**, de beste mogelijkheden voor visintrek.

In deze laatste variant en in de variant "Breezand Brak" besproken in hoofdstuk **4** is het mogelijk om per getijperiode onder normale omstandigheden 2 miljoen m³ water van uit de brakwater zone het IJsselmeer op te laten zonder dat dit tot een waarneembare toename van de saliniteit van het IJsselmeer leidt. Met dit water kunnen passief migrerende organismen, zoals vislarven het zoete milieu binnen komen.

In de variant "Brakke Boontjes 3" is de hoeveelheid binnen te laten water 10x zo klein, maar dat is voor visintrek nog steeds een redelijke hoeveelheid.

Tijdelijke stratificatie treedt in alle varianten op, bij de een meer dan bij de ander. Deze stratificatie duurt nooit langer dan een getijperiode, behalve bij de binnendijkse varianten, waar zonder speciale inrichtingsmaatregelen de kans bestaat op meer langdurige stratificatie.

Niet onvermeld mag blijven, dat door de aanleg van de oostelijk gelegen buitendijkse varianten "Staart van Kornwerderzand" (hoofdstuk **6**) en "Brakke Boontjes" (**5**) er een toename plaatsvindt van de spuiefficiëntie van de zuid-westelijk ervan gelegen spuiemiddelen, waaronder het eventueel nieuw aan te leggen spuiemiddel in de "knik" van de Afsluitdijk. De capaciteit van de spuiemiddelen, die uitmonden in de brakwater zone, is echter niet optimaal of neemt af ten opzichte van de huidige situatie.

Verder heeft geen van de besproken varianten een belangrijke uitstraling buiten zijn directe omgeving wat betreft getij, saliniteitsverdeling of morfologische ontwikkeling. Wel is het zo, dat de "Staart van Breehorn" (hoofdstuk **3**) de bestaande zoutlast op het IJsselmeer ten gevolge van het schutten van schepen met ruwweg de helft doet afnemen, omdat de saliniteit voor de schutsluis in deze variant gemiddelde de helft lager is dan in de huidige situatie.

1 Inleiding

In het kader van het verkennend onderzoek naar de mogelijkheid tot het inrichten van een estuariene overgangszone rond de Afsluitdijk zijn er door het "Ontwerp Team Brak" schetsontwerpen gemaakt van een aantal mogelijke inrichtingsmaatregelen, die moeten leiden tot het ontstaan van zo'n zone, waarbinnen zich een tamelijk constante zoet-zout overgang bevindt, de zogenaamde "brakwater zone". De saliniteitsverdeling in zo'n overgangsgebied moet wat betreft minima en maxima en de variabiliteit daarvan aan bepaalde voorwaarden voldoen.

Om een indruk te krijgen van de effectiviteit dienaangaande van diverse typen inrichtings- en beheersmaatregelen zijn er numerieke modelberekeningen gedaan met een driedimensionaal waterbewegings- en zoutverspreidingsmodel. Dit model berekent op een rooster met een maaswijdte van ongeveer 200 meter (afhankelijk van de plaats) de tijdsafhankelijke waarden van stroomsnelheden, debieten, waterstanden en saliniteiten gedurende een springtij-doodtij cyclus, waarbij de diverse inrichtings- en beheersmaatregelen in de bodem- en kustgeometrie, de randvoorwaarden en de sluisopeningsvoorschriften geschematiseerd zijn ingebracht.

De berekende waterstanden geven informatie over de getijslag en de grootte van het daaraan gerelateerde intergetijdegebied.

De berekende stroomsnelheden geven informatie over mogelijke veranderingen in sedimentatie- en erosiepatronen en de debieten zeggen iets over de effectiviteit van de diverse spuwmiddelen in de Afsluitdijk.

De berekende saliniteiten moeten aangeven of de maatregelen leiden tot de gewenste stabiele zoet-zoetverdeling. In deze rapportage worden de berekeningsresultaten voor een aantal doorgerekende inrichtings- en beheersvarianten gepresenteerd en besproken.

De doorgerekende varianten waren voorlopige schetsontwerpen en deze verschillen enigszins van de ontwerpen die door het Ontwerp Team Brak uiteindelijk zijn gekozen. Door het "interpolerend" interpreteren van de resultaten van de meest overeenkomende wel berekende varianten is het meestal wel mogelijk conclusies te trekken over de gekozen definitieve schetsontwerpen.

De conclusies beperken zich tot de hydrodynamica, saliniteitsverdeling, mogelijke effecten op morfologie en de mogelijkheden voor de intrek van diadrome vissoorten.

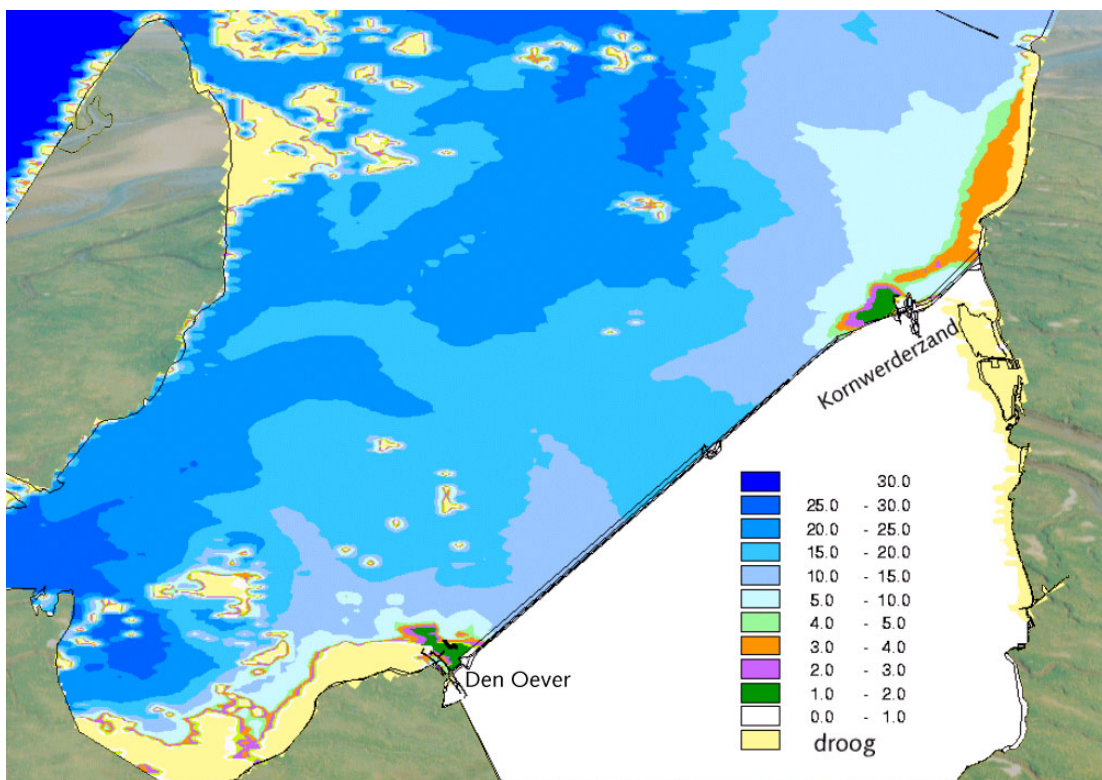
Iedere variant heeft een eigen kostenplaatje en zijn eigen interferentie met de gebruiksfuncties van de ruimte rond de Afsluitdijk. Dit valt buiten het kader van dit rapport.

Een uitvoerige behandeling van deze aspecten is te vinden in :

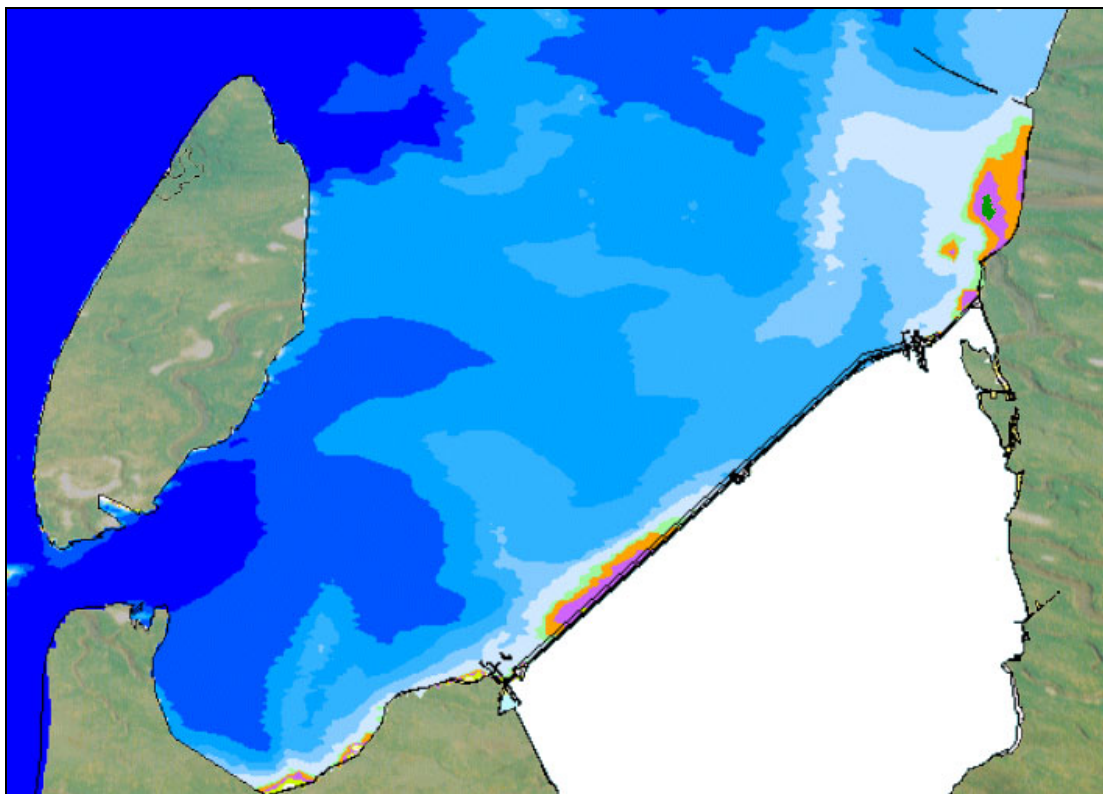
[ES]2- Afsluitdijk Schetsontwerpen Brak, Fase 3 Inrichtingsschetsen, Ontwerp Team Brak, RIZA/RIKZ, 2002.

1.1 Gewenste condities in de brakwater zone

Door de aanleg van de Afsluitdijk is de natuurlijke estuariene overgang tussen de rivier de IJssel en de Waddenzee verdwenen. De overgang tussen zoet en zout is nu discontinu. Het zoete IJsselwater wordt twee maal per dag op de Waddenzee gespuid in twee spuwpunten, nl. in Den Oever en in Kornwerderzand (figuur 1).



Figuur 1
Oppervlaktesaliniteiten in PSU tijdens laagwater



Figuur 2
Oppervlaktesaliniteiten in PSU tijdens hoogwater

Rond laag water, als de spuisluis is geopend, vormt op beide lokaties het gespuide zoete water een samenhangende water "pluim", die duidelijk uit de spuiopening afkomstig is.

Rond hoog water is de spuisluis al weer enkele uren dicht, en de spuipluimen zijn onder invloed van de vloedstroming zo'n 5 à 10 km naar het noord-oosten afgedreven en vormen daar geïsoleerde zoetwaterbellen (figuur 2).

Rond de spuikommen van de beide sluizen zijn de saliniteiten dan 10 à 20 PSU hoger dan in de centra van de spuipluimen.

De zoetwatergradiënt (tegengesteld aan de saliniteitsgradiënt) wijst naar het centrum van de spuipluim. Deze gradiënt wordt gezien als de "lokstroom" die migrerende vissoorten aantrekt. Deze diadrome vissen willen de rivier op, in dit geval het IJsselmeer.

In een natuurlijk estuarium (fig. 5) is de zoetwatergradiënt zowel bij laag als bij hoog water gericht naar de rivier. Rond de Afsluitdijk is dat alleen rond laag water het geval. Rond hoog water is de gradiënt gericht naar het centrum van de spuipluim, die kilometers verder op ligt. De vis wordt zo de verkeerde kant op gelokt. De spuipluim zal namelijk niet meer door de ebstroming worden teruggedreven tot voor de spuisluis en de aangelokte migrerende vis heeft zijn kans gemist om via de spuisluisen of door een naastliggende vispassage het IJsselmeer op te zwemmen.

Een ander ongewenst effect van het pulsgewijze spuien van zoet water is de plotselinge saliniteitsverandering of "zoutschok" in de omgeving van het spuipunt. Tijdens de vloedperiode, als er niet wordt gespuid, is er relatief zout water voor de sluis terecht gekomen. Na het openen van de spuisluis wordt dit vrij snel vervangen door relatief zoet water, wat een snelle saliniteitsdaling betekent (zie fig. 3).

De variabiliteit binnen een getijdeperiode is groot (> 16 PSU, zie fig. 3,4). Dit heeft een nadelig effect op tal van organismen, o.a. op platvissen, waarvan verondersteld wordt dat zij teveel "osmotische stress" krijgen te verwerken.

Omdat de sluizen alleen water in de richting van de Waddenzee doorlaten, is er voor migrerende vis nauwelijks gelegenheid om vanuit zee het IJsselmeer binnen te komen. Het is daarom wenselijk om na het spuien gedurende beperkte tijd weer water vanuit zee het IJsselmeer op te laten via een vispassage of via een open sluisdeur.

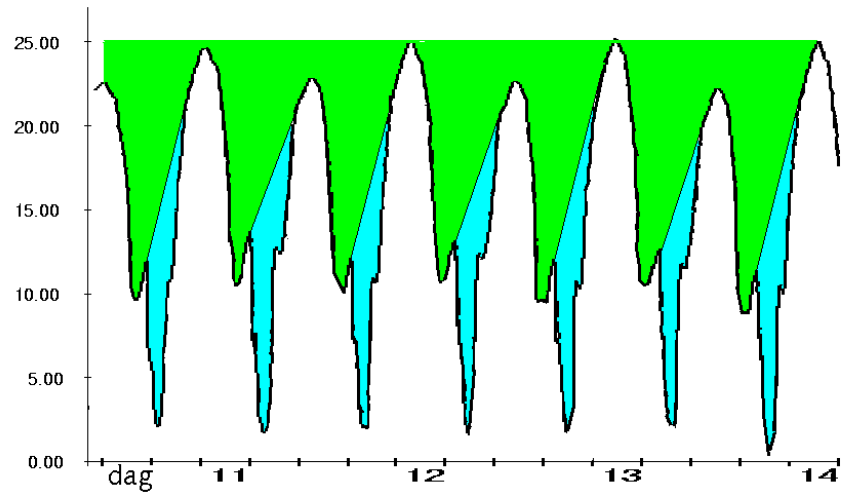
Dit water mag maar heel weinig zout bevatten om de saliniteit van het IJsselmeer niet te beïnvloeden. Het is daarom wenselijk, dat het IJsselmeer-water, dat door spuien in de Waddenzee terecht komt, na de kentering niet te snel wegstroomt en nog een tijdje voor de vispassage aanwezig blijft.

Het achtergrondgehalte voor chloride (Cl-) in het IJsselmeer is ongeveer 200 mg/l. Dat komt overeen met een saliniteitswaarde van 0,36 PSU.

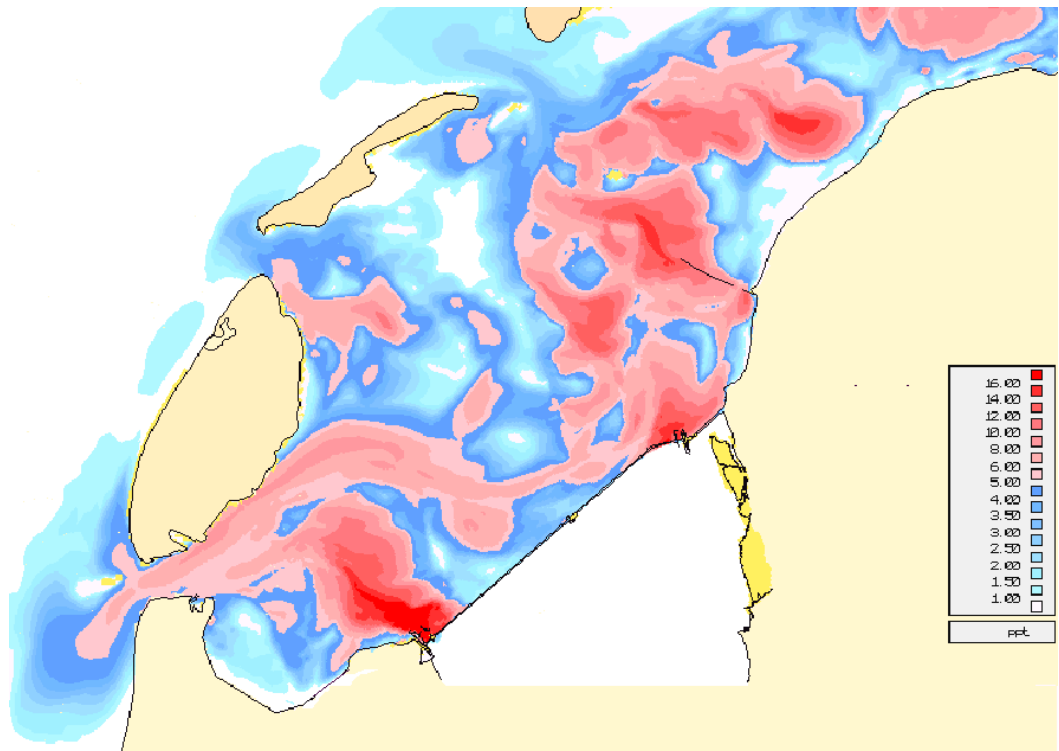
Noordzeewater heeft een saliniteit van 35 PSU. In de buurt van de Afsluitdijk varieert de saliniteit van de Waddenzee tussen de 2 en de 25 PSU als gevolg van de spui (fig. 3, 4).

In de in te richten brakwater zone moeten de saliniteiten dus aan de volgende eisen voldoen :

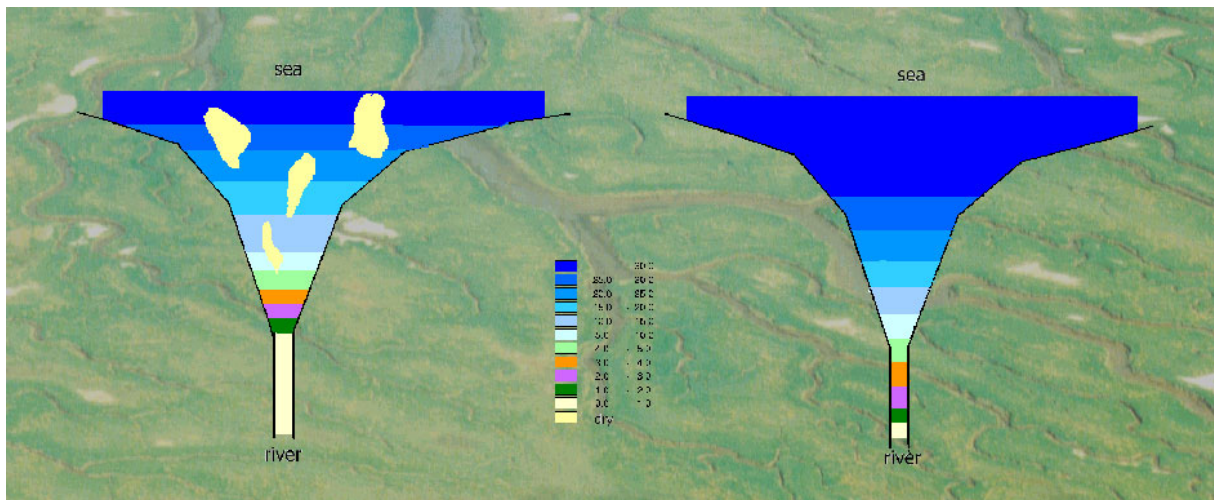
1. de zoetwatergradiënten moeten altijd gericht zijn naar het punt waar het zoete water vandaan komt. Vooral tijdens de vloedstroom is dit belangrijk, omdat sommige vissoorten zich door deze stroming laten meevoeren.
2. de zoetwatergradiënten mogen niet te groot zijn, d.w.z. er mogen geen "zoutfronten" voorkomen. Dan zijn de saliniteitsveranderingen ook niet te snel.
3. de saliniteitsveranderingen zijn niet te groot, maximaal 10 PSU per getijperiode, gezien vanuit een vaste lokatie.
4. de maximale saliniteit vóór de vispassage mag in de eerste uren na de kentering van eb- naar vloedstroom niet hoger worden dan 1 PSU.
5. een eventuele gestratificeerde situatie mag niet langer dan enkele dagen zonder onderbreking optreden.



Figuur 3
Saliniteiten in PSU in de Waddenzee voor de spuisluis van Kornwerderzand. Het groene gedeelte volgt de "natuurlijke" estuariene saliniteitsvariatie. Het blauwe gedeelte is een direct gevolg van het pulsgewijze spuien van zoet water rond laagwater.



Figuur 4
Verskil tussen maximale en minimale saliniteit bij de bodem gedurende een getijperiode. Situatie met gemiddelde winterafvoer.



Figuur 5

Saliniteitsverdelingen in een trechtervormig natuurlijk estuarium tijdens laagwater (links) en tijdens hoogwater (rechts). De zoetwatergradiënt is altijd naar de riviermond toe gericht.

De brakwater zone vormt de verbinding tussen het zoete IJsselmeer en de "zoute" Waddenzee en sluit aan op een doorlaatmiddel in de Afsluitdijk. Dit doorlaatmiddel is in een aantal gevallen een bestaande spuisluis en in een aantal andere ontwerpvarianten een nieuw te bouwen sluis.

De brakwater zone wordt in alle gevallen geheel of gedeeltelijk afgeschermd van zijn omgeving door een dam of dijk. Er wordt onderscheid gemaakt tussen "binnendijkse" en "buitendijkse" varianten.

1.2 Binnendijkse varianten

De *binnendijkse* varianten zijn gelegen in het IJsselmeer en worden daarvan geheel afgeschermd om het binnendringen van zout of brak water in de rest van het IJsselmeer te voorkomen. De verbinding met het IJsselmeer wordt gevormd door een afsluitbare doorlaat of sluis in de afschermingsdam, waardoor regelmatig zoet water vanuit het IJsselmeer in de brakwater zone wordt binnengelaten. Dit gebeurt onder natuurlijk verval, wat impliceert, dat de waterstand in de brakwater zone regelmatig (in principe iedere getijperiode) lager dan het IJsselmeerpeil moet zijn (zie figuur 6).

Om niet actief zwemmende vissen, larven of juvenielen de gelegenheid te geven vanuit de brakwater zone het IJsselmeer binnen te komen, wordt er na iedere inlaatperiode gedurende korte tijd water vanuit de brakwater zone weer het IJsselmeer opgelaten. Dit water is kort tevoren uit het IJsselmeer binnengekomen en daarom nog zoet. Door middel van zoutsensoren (geleidendheidsmeters) wordt de saliniteit van dit water continu gevolgd en op het moment dat er een zoutlast voor het IJsselmeer dreigt te ontstaan wordt het water inlaten gestopt.

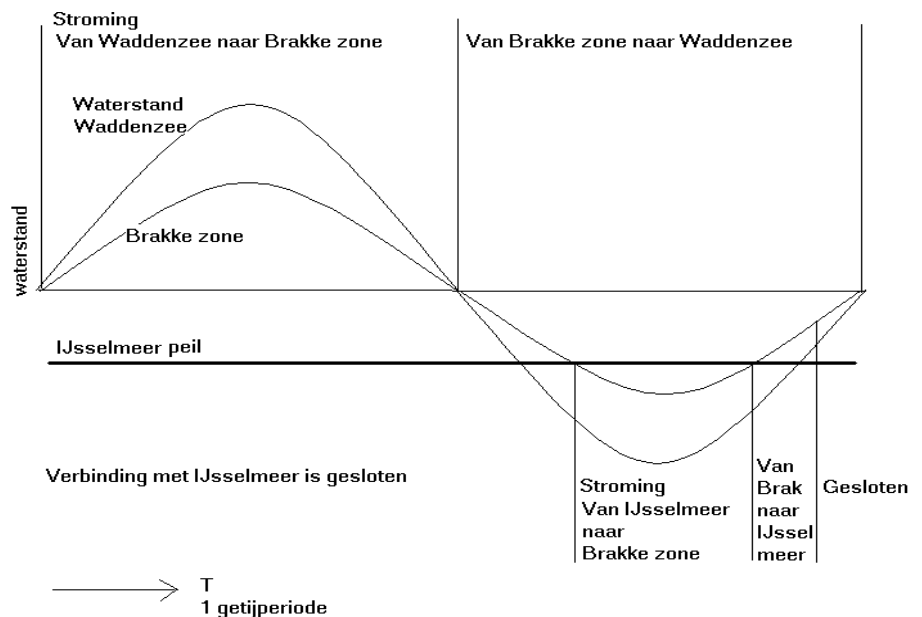
Ook de stroming richting IJsselmeer gebeurt onder natuurlijk verval en hiervoor is het nodig, dat de waterstand in de brakwater zone op dat moment hoger is dan in het IJsselmeer. Er moet dus een al dan niet gedempt getij staan in de brakwaterzone. Dit getij komt binnen door een opening in de Afsluitdijk, die speciaal daarvoor wordt geconstrueerd. Deze opening is afsluitbaar en is ontworpen om in twee richtingen water door te laten. De opening moet onder verval kunnen worden gesloten, bijvoorbeeld in geval van storm, maar ook om de waterstand in de brakwater zone door het "afknijpen" van het getij geheel te kunnen reguleren. Omdat deze opening,

ook als hij helemaal open staat, toch een vernauwing van het stromingspatroon met zich meebrengt, waardoor de getijenergie afneemt, zal de getijslag in de brakwater zone altijd veel kleiner zijn dan in de naburige Waddenzee (fig. 6).

Er is een doordachte beheersstrategie nodig om de hoeveelheden zoet en zout water, die de brakwater zone binnenkomen, zodanig te doseren, dat de gewenste zoet-zout gradiënt ontstaat en onder zo veel mogelijk omstandigheden blijft bestaan. De debieten van zowel het zoete als het zoute water worden direct of indirect bepaald door de schuifstanden van de opening in de Afsluitdijk en van de opening naar het IJsselmeer en er is een Decision Support System nodig om dit sluisbeheer te optimaliseren en af te stemmen op de momentane condities wat betreft waterstanden en saliniteiten aan binnen- en buitenzijde.

Er kan dan ook goed worden ingespeeld op het peilbeheer van het IJsselmeer en het verschil in zomer- en winterpeil.

Door de brakwater zone stroomt er netto zoet water van het IJsselmeer naar de Waddenzee, maar de debieten zijn vrij klein en de zone draagt nauwelijks bij aan de totale spuicapaciteit van alle doorlaatmiddelen in de Afsluitdijk. Echter, indien er een kritieke situatie optreedt m.b.t. de IJsselafoer, kan het sluisbeheer van de brakwater zone zodanig gewijzigd worden, dat er geoptimaliseerd wordt op spuidebiet. Het getij wordt dan maximaal afgetopt, d.w.z. er wordt geen Waddenzee water meer binnengelaten en de brakwater zone wordt vrijwel zoet, voor zolang als het nodig is. Binnen 14 dagen na terugkeer naar het normale beheer kan de zoutgradiënt zich weer hebben hersteld.



Figuur 6

Waterstanden in de Waddenzee, in een brakwater zone in het IJsselmeer en in het IJsselmeer zelf.

1.3 "Buitendijkse varianten"

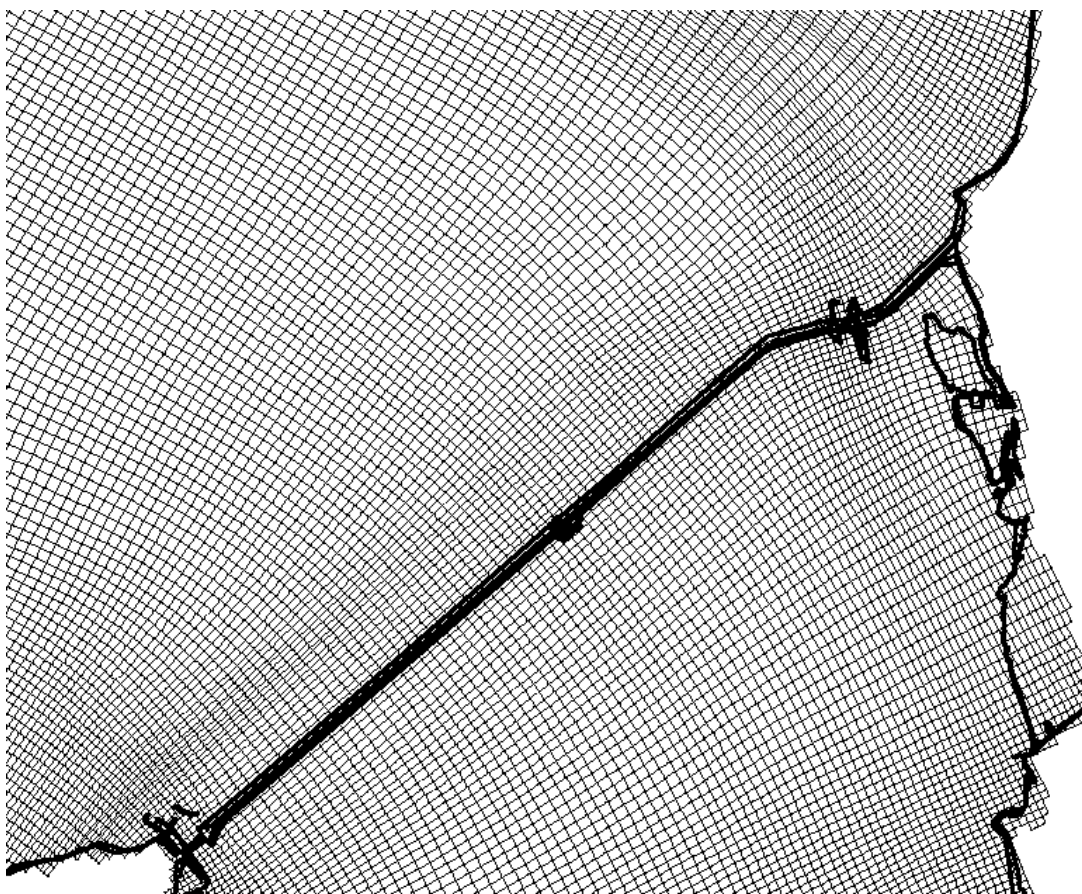
De zogenaamde "buitendijkse" varianten zijn gelegen in de Waddenzee en sluiten aan op een spuimiddel in de Afsluitdijk, soms bestaand, soms nieuw aan te leggen. De brakwater zone is enigszins afgeschermd van de Waddenzee door een dam, maar er is aan het einde altijd een vrij brede opening naar de Waddenzee, waardoor het getij onbelemmerd kan binnendringen. De getijslag in de brakwater zone is vrijwel ongedempt en er is een intensieve uitwisseling met het Waddenzee water. Om de gewenste zoutgradiënt in stand te houden is er dan ook een groter zoetwaterdebiet nodig dan bij de binnendijkse varianten (minimaal 100 - 300 m³/s). Bij hoge IJsselafvoeren kan de buitendijkse brakwater zone belangrijk bijdragen aan de spuicapaciteit, zonder dat dit direct tot volledige verzoeting van de zone leidt. Wel is het zo, dat de afschermingsdam, die meestal dicht in de buurt van het spuimiddel op de Afsluitdijk aansluit, belemmerend werkt op de spui. Het vrije afstroomoppervlak wordt ingeperkt en in een aantal gevallen worden ook de laagwaters voor de spuisluis hoger door de langere weg, die door de ebstroom moet worden afgelegd. Voor de varianten bij Kornwerderzand doet zich echter ook het volgende voor : ten gevolge van de aanwezigheid van de dam wordt de ebstroom komend vanuit de Boontjes afgebogen. Daardoor worden de laagwaters ten zuid-westen van de dam lager. Als daar een nieuw (groot) spuimiddel wordt aangelegd zal de spui-efficiëntie daarvan niet onbelangrijk groter zijn dan in de situatie zonder dam. Bij de bespreking van de diverse doorgerekende varianten wordt steeds de netto bijdrage aan de spuicapaciteit gegeven, relatief ten opzichte van de referentie situatie zonder dam, maar met nieuw groot spuimiddel. Dit geplande nieuwe spuimiddel is gelegen in "knik" van de Afsluitdijk ten zuid-westen van Kornwerderzand. In alle buitendijkse varianten is een aparte vispassage opgenomen. Voor deze vispassage wordt een apart beheer toegepast. In de uiteindelijke ontwerpen is de vispassage aan de Waddenzeekant voorzien van een retentiebekken voor zoet water met een volume in de grootteorde van 300.000 m³. Dit retentiebekken staat in open verbinding met de brakwater zone, maar de saliniteit is er veel lager, omdat het steeds tijdens laagwater via de vispassage gevuld wordt met zoet water. De debieten die hiervoor nodig zijn liggen in de orde van 10 m³/s getijgemiddeld. In perioden van lage afvoeren, als het niet mogelijk is om in de punt van de brakwater zone een voldoende lage saliniteit te handhaven, kan wel het retentiebekken zoet worden gehouden en kan er door de vispassage water het IJsselmeer op worden gelaten. Het volume hiervan is orde 100.000 m³ per getijperiode. In de berekeningen zijn deze retentiebekkens echter niet expliciet opgenomen, omdat de maaswijdte van het modelrooster hiervoor te groot was.

1.4 Berekeningsmethodiek 3D

Alle berekeningen op één na werden uitgevoerd met de 3D programmatuur voor waterbeweging en zoutverspreiding van RIKZ onder de naam TRIWAQ (versie DDVERT).

Het rekendomein was de hele westelijke Waddenzee, een stuk van de belendende Noordzee tot 30 km uit de kust en een stuk IJsselmeer. Er werd met tien modellagen gerekend, zodat stratificatie en afwijkende verticale snelheidsverdelingen expliciet op het modelrooster werden berekend. De horizontale maaswijdte van het kromlijnige en niet-equidistante modelrooster was minimaal 200 m. De afmetingen van de sluizen kunnen echter exact worden opgegeven.

De berekeningen startten altijd met een jaargemiddelde saliniteitsverdeling. Vervolgens werden er één of meer springtij-doodtijcycly doorgerekend met



Figuur 7
Gedeelte van het modelrooster rond de Afsluitdijk

een bepaalde set randvoorwaarden wat betreft wind, bodem- en kustgeometrie en spuiregime.

Op de zeeranden van het model werden astronomische waterstandsrandvoorwaarden opgelegd, op de IJsselmeerrand het constante winter- of zomerpeil. Windopzet werd niet in de randvoorwaarden opgenomen. De gebruikte wind was bijna altijd de jaargemiddelde wind, dat is een uniforme ZW wind met een sterkte van 3 Bf. In één geval werd er met een NW wind van 5 Bf gerekend.

De berekende debieten door de sluizen en vispassages hangen af van de opgegeven sluisafmetingen. Deze kunnen afhankelijk gemaakt worden van het verval over de sluis. Zo kan er een bepaald type sluisbeheer worden opgegeven. Het was echter niet mogelijk een "asymmetrisch" beheer op te geven, in de zin dat er bij afgaand water een andere opening wordt ingesteld dan bij opkomend water. Dit is wel het geval in het ontwerp sluisbeheer voor het inlaten van water uit de brakwater zone door een sluis of vispassage in het IJsselmeer, zoals in de vorige paragraaf is beschreven.

Bij de berekeningsresultaten wordt wel steeds vermeld, wat het doorstroomvolume is, dat voor een "symmetrisch" beheer werd berekend en vervolgens wordt een eerste orde afschatting gemaakt van de tijd die nodig is om dit volume bij een asymmetrisch beheer door te laten.

Er werd met diverse sluisopeningen gerekend om situaties met lage, wintergemiddelde en hoge afvoer te simuleren. De sluisopeningen werden zo gelijk mogelijk over Den Oever en Kornwerderzand (inclusief het nieuwe complex) verdeeld. De afvoeren bij Kornwerderzand waren altijd iets hoger

dan bij Den Oever. In alle gevallen werd met een afvoercoëfficiënt $\mu = 1$ gerekend. Als blijkt dat in werkelijkheid andere afvoercoëfficiënten gelden, dan moeten de spuibreedtes met een vergelijkbare factor (omgekeerd evenredig) worden aangepast om op dezelfde afvoeren uit te komen. Om de modelresultaten met de huidige situatie te vergelijken is het nuttig om te weten, dat de jaargemiddelde afvoer door de Afsluitdijk ongeveer 450 m³/s is.

De berekeningen zijn uitgevoerd door Ingenieursbureau Alklyon en door het Waterloopkundig Laboratorium en gerapporteerd in de rapporten Z3230 (WL), A726 en A726 R2 (Alkyon).

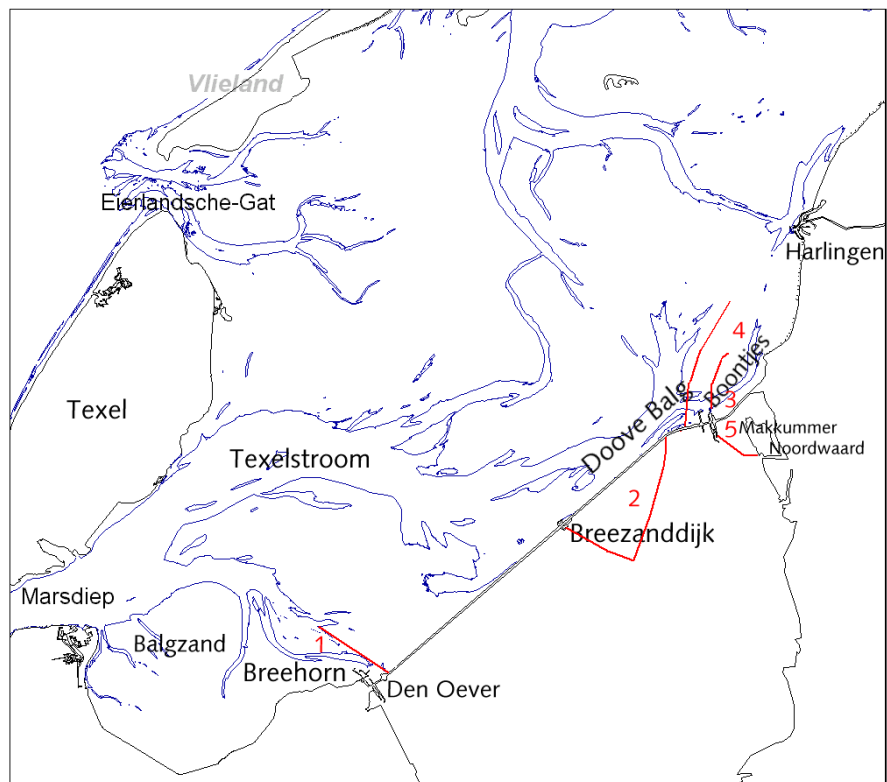
De berekeningen zijn gedefinieerd, opgedragen en begeleid door Dr. J.M. de Kok van het RIKZ.

De rapportages zijn bij het RIKZ aanwezig.

1.5 Kombergingsmodel

De grootste binnendijkse variant, "Breezand Brak" is niet met het 3D model doorgerekend, maar met een zogenaamd "kombergingsmodel". Dit is eigenlijk een "nul-dimensionaal" model, waar alleen oppervlakken en volumina een rol spelen. Er wordt uitgegaan van een sinusvormig vertikaal getij in de Waddenzee met een getijslag van 1,75 m. Het getij in de binnendijkse brakwater zone is gedempt en reageert instantaan en uniform op de buitenwaterstand via het berekende debiet door de sluis. Hiervoor wordt een zogenaamde overlaatformule gebruikt.

Bodemwrijving, looptijden, faseverschuivingen, windopzet, dichtheidsverschillen, interne oscillaties en waterspiegelverhang worden verwaarloosd. De berekeningen hebben dus slechts een verkennend karakter en gaan over gemiddelde situaties. Vooral de tijdsduur van het openen van de sluis naar het IJsselmeer is onzeker, omdat het soms gaat om waterstandsverschillen van enkele cm. Ieder beetje windopzet kan dus een flinke verschuiving veroorzaken, en voor het operationele beheer kan niet van dit model gebruik worden gemaakt.



Figuur 8
Overzicht van de positie van de diverse groepen varianten

2 Berekeningsresultaten

Er is een groot aantal varianten doorgerekend, die hier niet alle worden behandeld.

Voor een volledige rapportage wordt verwezen naar de documenten van WL en Alkyon.

De volgende varianten worden in dit rapport besproken :

1. Staart van Breehorn (2x)
2. Breezand Brak
3. Brakke Boontjes (3x)
4. Staart van Kornwerderzand (2x)
5. Makkummer Brak (2x)

Voor variant 2 is gebruik gemaakt van het kombergingsmodel. Van de varianten onder 4 werd er slechts één doorgerekend. De andere wordt "interpolerend" beschreven.

Per variant worden in dit rapport besproken :

- omvang en locatie t.o.v. Afsluitdijk van brakwater zone en de verschillende doorlaten.
- doorlaatvolumina, saliniteiten en duur visintrek
- effecten op stroomsnelheden, aanslibbing en erosie, spuicapaciteit
- mogelijke versnelde kweldervorming, uitstraling op de omgeving

Voor de beschrijving van alle varianten geldt overigens, dat de gepresenteerde getallen slechts indicatief voor jaar- of seizoensgemiddelde situaties zijn, omdat bij vrijwel alle berekeningen de effecten van een variabele meteorologie niet zijn meegenomen. Deze meteorologische effecten uiten zich vooral in momentane op- en afwaaiing rond de doorlaatmiddelen, waardoor de debieten weer sterk worden beïnvloed. Ook de saliniteitsverdelingen in de brakwater zone en in de Waddenzee zijn sterk van deze meteo effecten afhankelijk.

In de simulaties is het openen en sluiten van de vispassages afhankelijk van exact berekende binnen- en buitenwaterstanden. In de praktijk is zo'n soort beheer niet mogelijk, omdat het soms om verschillen van enkele centimeters gaat. De beslissing t.a.v. de tijdsduur van het inlaten van water door een vispassage zal in werkelijkheid af moeten hangen van de gemeten saliniteit aan de bovenstroomse kant van de vispassage en eventueel van de gemeten stroomsnelheden in de vispassage.

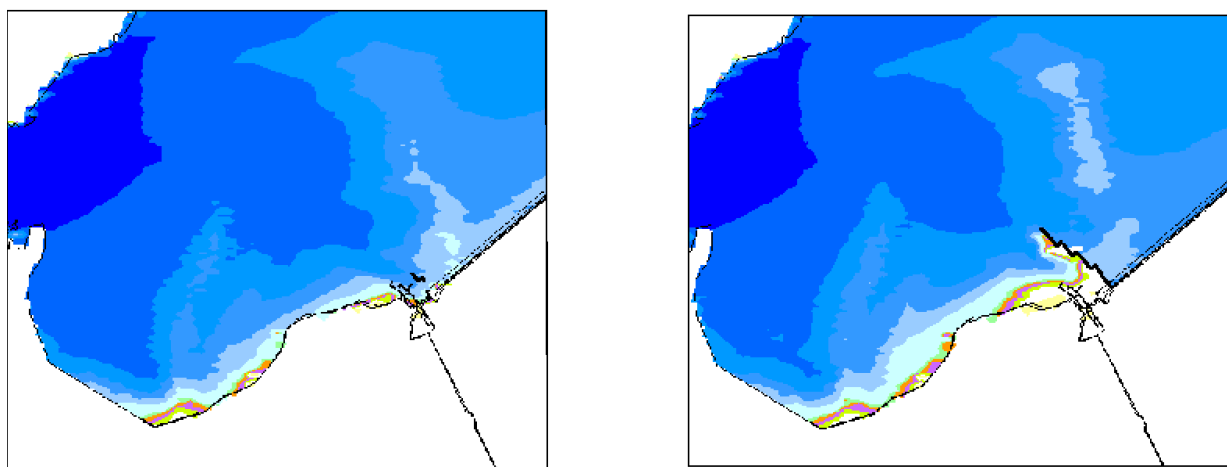
saliniteit

	BOVEN 30.0
	25.0 - 30.0
	20.0 - 25.0
	15.0 - 20.0
	10.0 - 15.0
	5.0 - 10.0
	4.0 - 5.0
	3.0 - 4.0
	2.0 - 3.0
	1.0 - 2.0
	0.0 - 1.0
	droogvallend

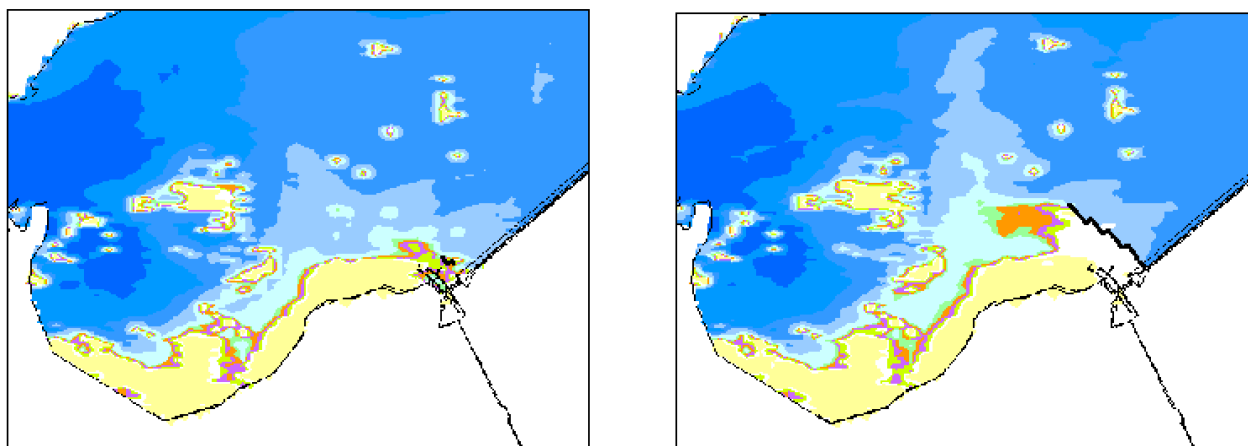
3 De Staart van Breehorn

De Staart van Breehorn is een brakwater zone in de Waddenzee ten noord-oosten van het voormalig eiland Wieringen, met een afschermingsdam aan de noord-oostzijde.

Van deze variant zijn twee subvarianten doorgerekend, één van 3,5 km lengte en één van 4 km.



Figuur 9.
Berekend saliniteitspatroon vlak bij de bodem tijdens hoogwater in de T0 situatie (links) en voor de variant Breehorn kort (rechts) bij ZW wind. De afvoer bij Den Oever bedraagt 363 m³/s getijgemiddeld.



Figuur 10.
Berekend saliniteitspatroon vlak bij de bodem tijdens laagwater in de T0 situatie (links) en voor de variant Breehorn kort (rechts) bij ZW wind.

3.1 Breehorn kort

De **korte** variant had bij lage afvoer ($94 \text{ m}^3/\text{s}$ getijgemiddeld) saliniteiten voor de vispassage tussen de 0,4 en 7 ppt in de bovenlaag en tussen de 2 en 10 ppt in de onderlaag.

De zoutimport in het IJsselmeer door de vispassage bedroeg in die situatie $0,6 \cdot 10^6 \text{ kg}$ per getij.

De vispassage heeft afmetingen $5 \times 2 \text{ m}$, $\mu = 1$, sluit op NAP+0,1 m bij een IJsselmeerpeil van NAP - 0,20 m.

Door de vispassage komt 162.000 m^3 water per getij naar binnen en er gaat 837.000 m^3 per getij naar buiten. Het netto uitgaand debiet is $15 \text{ m}^3/\text{s}$ getijgemiddeld.

Per getijperiode stroomt er volgens dit scenario twee maal gedurende ongeveer 3 kwartier water het IJsselmeer in. Eénmaal bij opkomend water en éénmaal bij afgaand water. In de praktijk is het effectiever om alleen bij opkomend water de vispassage te openen. Als ('s zomers) de buitenwaterstand een niveau van NAP +0,4 m heeft bereikt wordt de vispassage gesloten. Dezelfde hoeveelheid water wordt dan in ongeveer 80 minuten binnengelaten.

Het saliniteitspatroon bij een getijgemiddelde afvoer van $363 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Den Oever (fig. 9,10) laat zien dat er door de geul een zouttong naar binnen trekt. Omdat het hier een scheepvaartgeul betreft is hier waarschijnlijk weinig tegen te doen in de vorm van drempels. De maximale saliniteit voor de vispassage blijft echter ruim onder de 1 PSU.

3.2 Breehorn lang

De **lange** variant (fig. 11) ligt meer tegen de geul aan en is effectiever in het vasthouden van zoet water. De maximale saliniteit in de bovenlaag voor de vispassage is bij lage afvoer 2 ppt en in de onderlaag 5 ppt.

Er is in de lange variant berekening geen precieze zoutflux door de vispassage berekend. Als we er van uitgaan, dat de vispassage voornamelijk via de bovenlaag water inneemt, kunnen we lineair interpolerend stellen, dat de zoutimport $3,5 \times$ zo klein is als bij de korte variant, omdat de zoutconcentratie in de bovenlaag voor de vispassage bij lage afvoer ook $3,5 \times$ zo klein is. Deze zoutflux zou dan minder dan $0,2 \cdot 10^6 \text{ kg}$ /getij zijn.

Er zijn in figuur 11 geen saliniteiten hoger dan 1 ppt te zien op het IJsselmeer vlak achter de vispassage, wat betekent, dat er geen zoutimport van belang plaats vindt.

Door de schutsluizen komt in de referentiesituatie jaargemiddeld $0,75 \cdot 10^6 \text{ kg}$ zout per getij binnen.

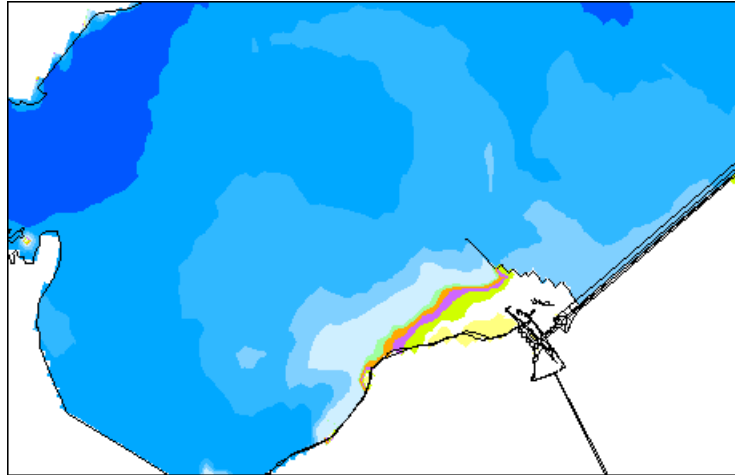
Door de aanleg van de Breehorn dam halveert de saliniteit voor de schutsluis, en daarmee ook de zoutimport door het schutten. Deze wordt dan $0,375 \cdot 10^6 \text{ kg}$ /getij.

Door de vispassage komt $0,2 \cdot 10^6 \text{ kg}$ /getij naar binnen, dus het netto resultaat is een vermindering van de zoutimport bij Den Oever met $0,175 \cdot 10^6 \text{ kg}$, dat is 23 % van de huidige hoeveelheid.

Van al deze kilogrammen is bij het zoetwaterinlaatpunt bij Andijk overigens niets te merken. Het zout wordt in het IJsselmeer zodanig verdund, dat de saliniteitstoename bij Andijk niet meer meetbaar is.

Om de vispassage ook in geval van zeer lage afvoer ($15 \text{ m}^3/\text{s}$ getijgemiddeld) aan de Waddenzeezijde te kunnen voorzien van een voorraad zoet water om het IJsselmeer op te laten, zou er een afgeschermd retentiebekken kunnen worden aangelegd met een oppervlak van minstens 250.000 m^2 .

In zowel de lange als de korte variant komt er door de vaargeul een zouttong naar binnen, die niet door drempels kan worden tegengehouden, omdat de geul op diepte moet blijven voor de scheepvaart. Het aangrenzende Breehorngebied is veel ondieper en daar is de saliniteit dan ook beduidend lager, omdat de zouttong dit gebied niet bereikt.



Figuur 11

Berekende saliniteitspatroon vlak bij de bodem tijdens hoogwater voor de variant Breehorn lang bij harde NW wind.

3.3 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling (beide varianten).

De getijstroomsnelheden naast de geul in het afgeschermd gebied nemen aanzienlijk af en hier valt ook meer aanslibbing te verwachten. Een lokale aanslibbingssnelheid tot 20 cm per jaar is mogelijk op kleinere oppervlakken, maar daar zit een grote onzekerheidsmarge omheen. Het kan zijn, dat vanuit het westen invallende golven regelmatig de boel weer opschudden, zodat de netto sedimentatie uiteindelijk vrij gering wordt. De globale aanslibbingssnelheid zal in de orde van 1 tot 5 cm per jaar zijn.

In de geul zullen binnentrekkende zouttongen bij vloed slib meebrengen, maar dit zal waarschijnlijk tijdens een flinke spui weer verdwijnen.

De autonome ontwikkeling van kweldergebieden ten westen van Den Oever zal niet sterk worden beïnvloed. Door opstuwingeffecten tijdens storm uit westelijke richtingen zullen buitendijkse kwelders eerder en vaker onderlopen, maar dit zal niet in die mate gebeuren, dat er een versnelde opslibbing ontstaat.

Ten oosten van de afschermingsdam, daar waar hij aansluit op de Afsluitdijk, ontstaat een zeer luwe zone, afgeschermd van getijstrooming en golfwerking. Daar zal een snelle aanslibbing plaatsvinden met mogelijk beginnende kweldervorming na enige decennia.

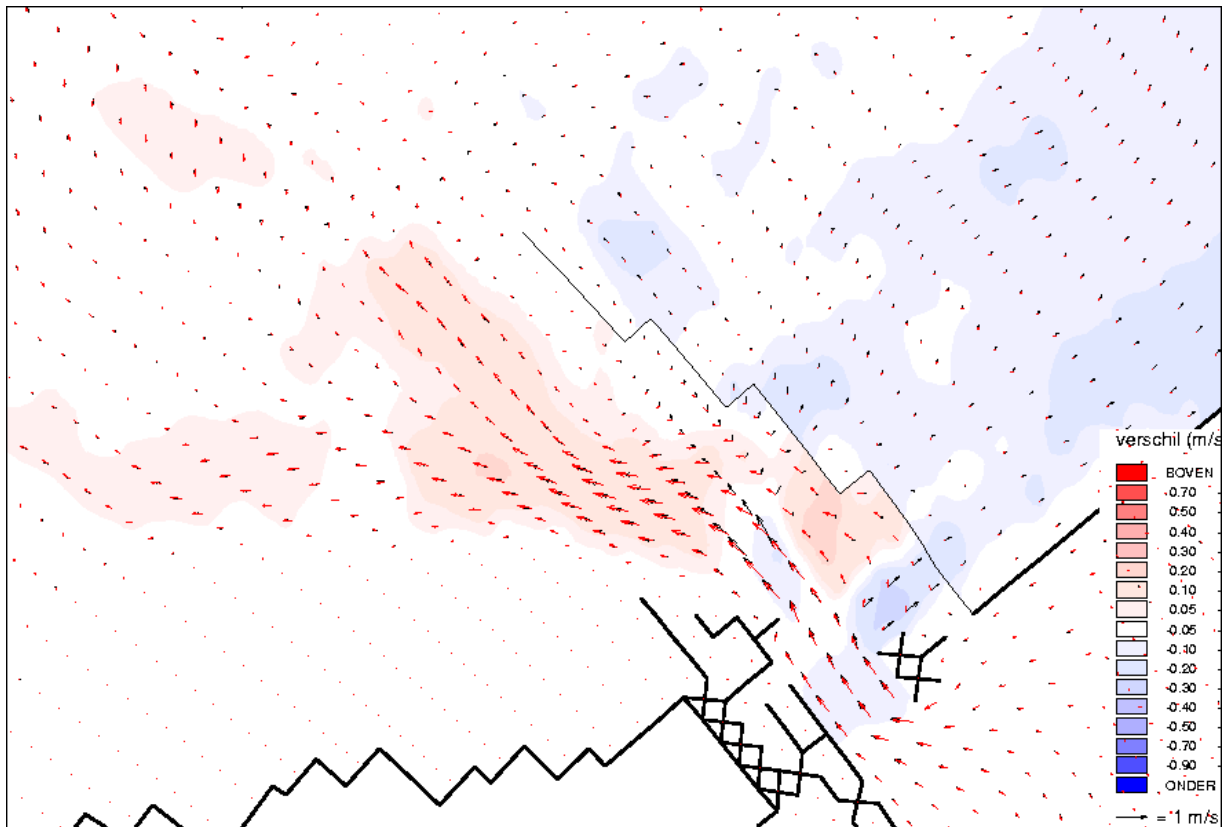
De spuisnelheden nemen in een groot deel van de geul toe, zodat deze vermoedelijk zonder extra baggerwerk op diepte zal blijven (fig. 12).

Ten oosten van de dam zal ook aanslibbing optreden als gevolg van het wegvallen van de getijsnelheden aldaar.

De spuicapaciteit neemt naar verwachting af met maximaal 15 % bij hoge afvoer en harde NW wind.

Bij een totale opening van 700 m² komt dat neer op een verlies van 105 m².

Uitstraling op de omgeving : De effecten op de stroomsnelheden beperken zich tot de geul en de directe omgeving van de dam. De saliniteiten worden tot op een afstand van meer dan 10 km naar het westen en noord-westen verlaagd met enkele ppt. Pal ten oosten van de dam neemt de saliniteit toe met enkele ppt.



Figuur 12.

Berekende stroomsnelheden vlak bij de bodem tijdens spui in de variant Breehorn kort (rood) en in de referentiesituatie (zwart).

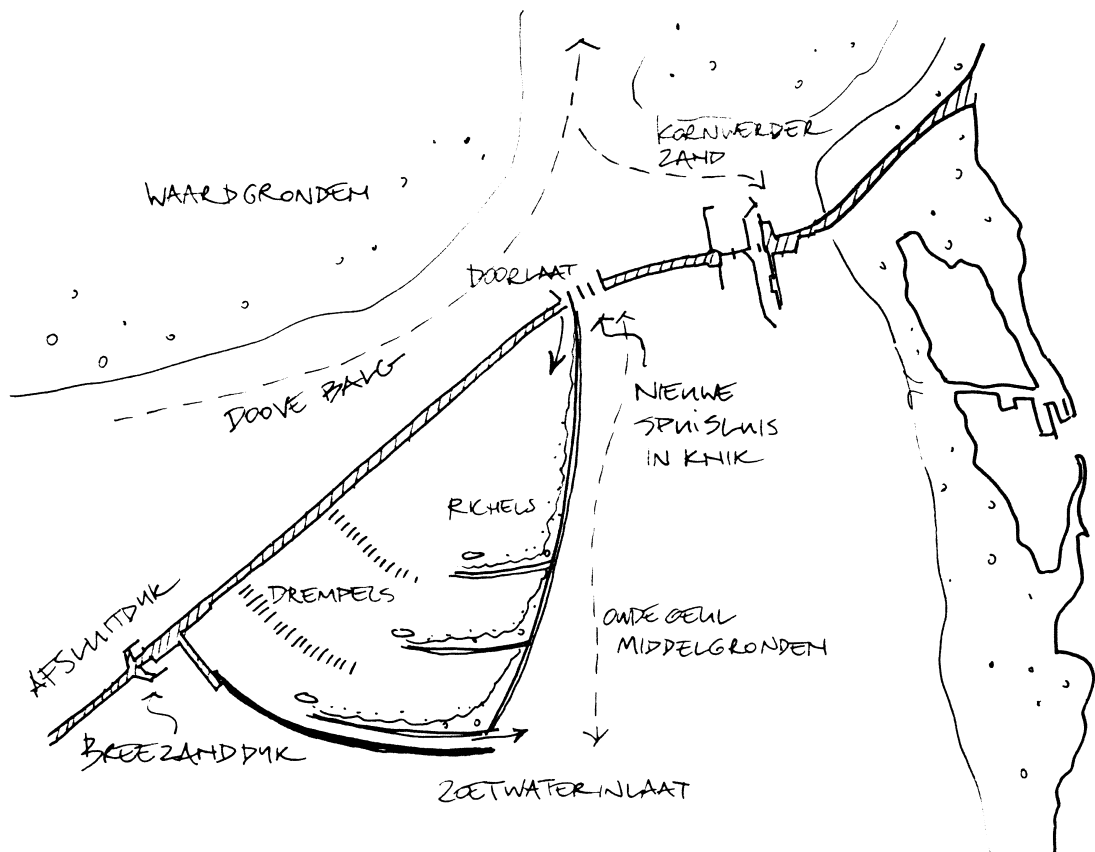
4 Breezand Brak

Breezand Brak is een binnendijkse (in het IJsselmeer gelegen) variant tussen Kornwerd en Breezand met een oppervlak van 19 km² (fig. 13).

De verbinding met de Waddenzee heeft een doorstroomoppervlak van 320 m² en is afsluitbaar.

De verbinding met het IJsselmeer heeft een doorstroomoppervlak van 120 m². Deze is ook afsluitbaar en heeft een drempelhoogte van NAP -1,40 m. Dat is ongeveer 2,6 m boven het huidige bodemniveau. Het doel hiervan is om een eventueel binnengedrongen zouttong te beletten het IJsselmeer op te stromen. Voor vis, die het IJsselmeer intrekt, mag dit geen barrière zijn, dus de drempel sluit aan op een glooiende helling, die een gladde overgang naar het bodemniveau van NAP -4 m vormt (fig.14).

In de zomer staat de verbinding met de Waddenzee (de "stormvloedkering") in principe het gehele getij open, tenzij er door opwaaiing een waterstandsverhoging in de nabije Waddenzee optreedt. In dat geval wordt het hoogwater "afgetopt" door middel van het gesloten houden van de kering in een tijdvenster rond hoogwater. Het is wel nodig dat de kering zo geconstrueerd is, dat hij onder verval ("op stroom") gesloten kan worden.



Figuur 13.
Breezand Brak (Schetsontwerpen Brak, fase 3, 2002)



Figuur 14.
Het langsprofiel van de geul naar de vispassage

Met het kombergingsmodel zijn berekeningen gemaakt naar debieten en waterstanden in de brakwater zone. De buitenwaterstand was een sinusvormig dubbeldaags getij met een getijverschil van 175 cm. Dit is het gemiddelde getijverschil voor de Afsluitdijk. Alle andere getijcomponenten en eventuele windeffecten zijn niet meegenomen. De waterstand in de binnendijkse brakwater zone varieert tussen NAP $-0,51$ m en NAP $+0,55$ m. Een getijslag van 106 cm dus. De doorlaat aan de IJsselmeerkant gaat ('s zomers) open als de waterstand in de brakwater zone lager wordt dan NAP $-0,2$ m. Bij een IJsselmeerpeil van NAP $-0,2$ m (zomerpeil) stroomt er dan vanuit het IJsselmeer zoet water de brakwater zone in. Bij opkomend water blijft de sluis openstaan tot de waterstand in de brakwater zone op NAP $+0,4$ m is gekomen. Dan wordt hij gesloten (zie principeschets fig. 6). Gedurende bijna 3 uur is er dan water vanuit de brakwater zone het IJsselmeer ingestroomd. De totale hoeveelheid is 2 miljoen m^3 . Er moet dus een voldoende voorraad zoet water aan het eind van de brakwater zone aanwezig zijn om geen zoutimport in het IJsselmeer te krijgen. Is deze niet aanwezig, dan moet er eerder worden gesloten. De tijd dat er onder normale omstandigheden water vanuit het IJsselmeer de brakwater zone binnenstroomt is ongeveer 4 uur per getij en het totale toegestroomde volume is bijna 3 miljoen m^3 . Netto stroomt er 's zomers dus 1 miljoen m^3 per getijperiode van het IJsselmeer via de brakwater zone naar de Waddenzee. Dat komt overeen met een zoetwaterdebiet van ongeveer $22 \text{ m}^3/\text{s}$ getijgemiddeld. Dit is voldoende om een zoetwatergradiënt te handhaven in de brakwater zone.

In de winter is het IJsselmeerpeil NAP $-0,4$ m en wordt het beheersscenario aangepast. De verbinding met het IJsselmeer wordt dan bij afgaand water op NAP $-0,4$ m geopend en bij opkomend water op NAP $-0,3$ m weer gesloten (zie fig. 6). Het netto uitgaande debiet is dan $26 \text{ m}^3/\text{s}$ en er wordt ook nog 135.000 m^3 water per getijperiode het IJsselmeer opgelaten gedurende bijna een half uur. De tijdsduur, dat deze instroming plaats vindt, kan eventueel (bij gelijkblijvend instroomvolume) verlengd worden door de doorstroomopening in deze fase kleiner te maken.

Het water dat vanuit de brakwater zone het IJsselmeer opstroomt mag niet vermengd zijn met zout water. In het onderzoek "Opties Brak" (Alkyon, A726) is gekeken naar een binnendijks estuarium op de plek waar nu Breezand Brak is geprojecteerd. Het estuarium oppervlak in Opties Brak was 26 km^2 .

Het sluisbeheer was vergelijkbaar met dat van de huidige variant Breezand Brak.

Bij een getijslag in het estuarium van ongeveer 70 cm werd er in Opties Brak berekend, dat er een sterke (vertikale) stratificatie zou optreden met een bodemlaag met een bijna constante saliniteit van 12 ppt. Deze zouttong reikt tot aan het eind van het estuarium.

De saliniteit in de bovenlaag varieerde gedurende een getijperiode van 0 tot 7 ppt.

Voor Breezand Brak moeten dus ingrijpende maatregelen worden genomen om het opdringen van de zouttong tegen te gaan. Dit kan bijvoorbeeld door het aanleggen van een serie drempels en eilandjes. In het algemeen moet er voor worden gezorgd, dat een zouttong een maximale weg moet afleggen voordat hij bij de verbinding met het IJsselmeer komt. Deze weg zal dus zeer kronkelend zijn.

Bij de gegeven estuariumafmetingen moet een weglengte van 10 à 20 km mogelijk zijn.

De toegang naar de IJsselmeersluis moet speciaal worden vormgegeven om daar vermenging van IJsselmeerwater met brak water te voorkomen. De genoemde drempel met flauwe taludhelling moet gelegen zijn in een ondiep compartiment dat is afgescheiden van de rest van de brakwater zone. Dit compartiment moet aan één kant aansluiten op de IJsselmeersluis en aan de andere kant op de brakwater zone via een niet te brede opening.

Het compartiment moet in principe ruimschoots de hoeveelheid water kunnen bevatten, die het IJsselmeer wordt binnengelaten. Als er voor de zomer gedacht wordt aan een volume van 2 miljoen m³, zal het compartiment een oppervlak van minstens 10⁶ m² moeten hebben bij een gemiddelde diepte van minimaal 2 m.

4.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling.

Buitendijks nemen alleen de stroomsnelheden voor de spuiopening toe, waardoor er lokaal erosie optreedt. Er zal een diepe ontgrondingskuil ontstaan.

Binnendijks zijn de stroomsnelheden laag en zal er lokaal aanslibbing plaatsvinden, behalve in de buurt van de sluis in de Afsluitdijk, waar er zandtransport zal kunnen plaatsvinden en ook een ontgrondingskuil zal ontstaan. De koppen van met zand aangelegde dammen zullen lokaal moeten worden verdedigd.

De lokale bodemophoging door aanslibbing wordt geschat op 5 à 15 cm per jaar uitgaande van een getijslag van 100 cm.

Als het toegelaten wordt, dat de brakwater zone bij harde wind uit noordelijke richtingen sterk verzilt, is er een spuibeheer denkbaar waarbij het getij pas boven NAP +1,00 m wordt afgetopt. Er komt dan slibrijk water de brakwater zone binnen. Dit water overstroomt dan ook de hoogst gelegen plaatgebieden, waar zich dan slib kan afzetten. Op den duur kunnen zo kleine kweldergebieden ontstaan.

Bij een op spuicapaciteit geoptimaliseerd beheer van beide sluizen kan er getijgemiddeld 203 m³/s via de brakwater zone worden gespuid. Dat is de spuicapaciteit van een normale spuisluis (zonder brakwater zone) op die plaats ter grootte van 170 m².

De getijslag in de brakwater zone is bij dit geoptimaliseerde beheer nog maar 38 cm (waterstanden van NAP -0,60 m tot -0,22 m). Er treedt dan ook een sterke verzoeting op.

Bij een spuibeheer gericht op het ecologisch functioneren is het toegelaten debiet hooguit 30 m³/s. De bijdrage aan de spuicapaciteit is dan 6,5 x zo klein en de grootte van een overeenkomstige onbelemmerde spuiopening is 26 m².

Uitstraling naar de omgeving : in de Waddenzee, rond de opening in de Afsluitdijk nemen de stroomsnelheden aanzienlijk toe, met effecten op de morfologie tot op een afstand van enkele kilometers. De saliniteiten in dit gebied nemen af met enkele ppt. Dit gaat echter niet schoksgewijs zoals bij een spui, de getijvariatie is meer sinusvormig. In het IJsselmeer is geen effect op de saliniteit merkbaar.

5 Brakke Boontjes

Onder de noemer Brakke Boontjes is een drietal varianten doorgerekend met een dam, die aansluit op de Afsluitdijk direct ten oosten van de schutsluis bij Kornwerderzand. Aan de oostzijde hiervan is een extra spui aangebracht inclusief een vispassage, die aansluiten op een brakwater zone ten oosten van de dam. De dam doornijdt de Boontjes, zodat de vaargeul verlegd moet worden.

5.1 Brakke Boontjes 1

Variant 1 is uitgerust met een slurf voor de retentie van zoet water (fig. 15). De slurf is effectief, want de maximale saliniteit is er ruim onder de 1 ppt. Er komt geen zouttong door naar binnen, want de slurf is gelegen in het ondiepe gedeelte ten zuid-oosten van de Boontjes.

Op de slurf sluit een vispassage aan plus een klein spuimiddel met een totaal doorstroomoppervlak van 120 m².

Uit de vergelijking met de referentiesituatie, waarvan de saliniteiten in figuur 16 zijn te zien, valt op te maken dat er een sterke verzoeting optreedt langs de Afsluitdijk en in de Boontjes van Kornwerderzand tot aan Zurich.

Er is duidelijk een sterke lokstroom (=saliniteitsgradiënt) zichtbaar die aansluit op de Doove Balg. Deze lokstroom is bij hoogwater veel beter gericht op de vispassage dan in de referentiesituatie. Er zijn dus goede kansen voor visintrek.

De indruk bestaat, dat het meest zeewaarts gelegen deel van de dam wel weggelaten zou kunnen worden.

5.1.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spulcapaciteit, uitstraling.

De getijstroomsnelheden in het afgeschermd gebied ten westen en ten oosten van de dam nemen aanzienlijk af en hier valt ook meer aanslibbing te verwachten. Een aanslibbingssnelheid tot 20 cm per jaar zou lokaal kunnen optreden.

In de slurf naar de vispassage wordt weinig aanslibbing verwacht, omdat daar geen zouttong binnenkomt.

De totale spuicapaciteit neemt bij afwezigheid van harde wind **toe** met 30 %, onder andere als gevolg van het feit dat voor de bestaande spuisluis bij Kornwerderzand de laagwaterstanden lager worden. Dit is een gevolg van het feit, dat de ebstroom vanuit de Boontjes wordt afgebogen naar het Noord-Westen.

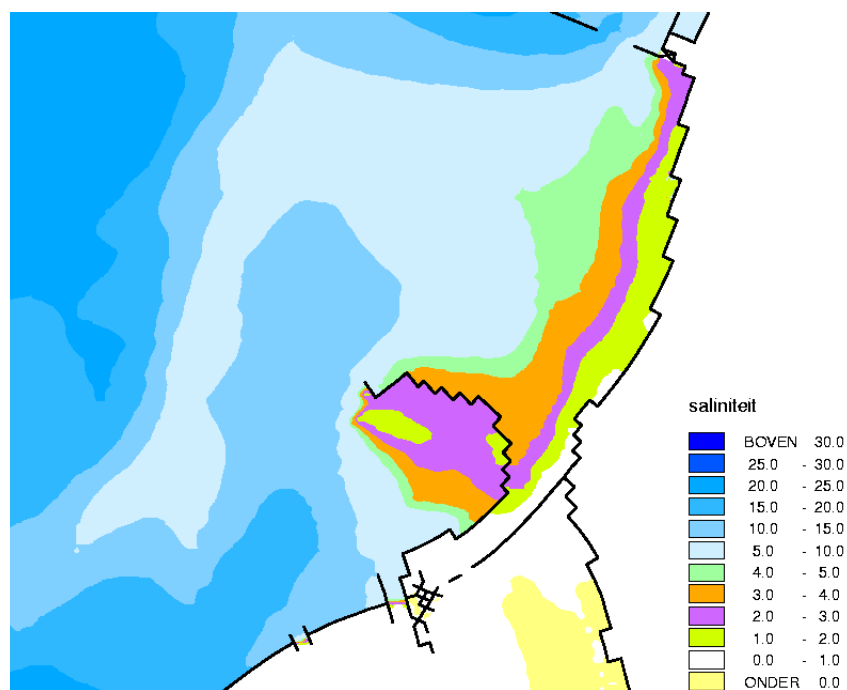
Bij sterke W tot ZW wind wordt dit effect weer te niet gedaan door opstuwing tegen de dam.

Bij sterke N wind, die op zich ongunstig is, heeft de dam wel een verhogend effect op de spuicapaciteit van de westelijk ervan gelegen spui middelen.

Dam en de spui middelen naar de brakwater zone leveren een extra spuicapaciteit met een equivalent van 160 m².

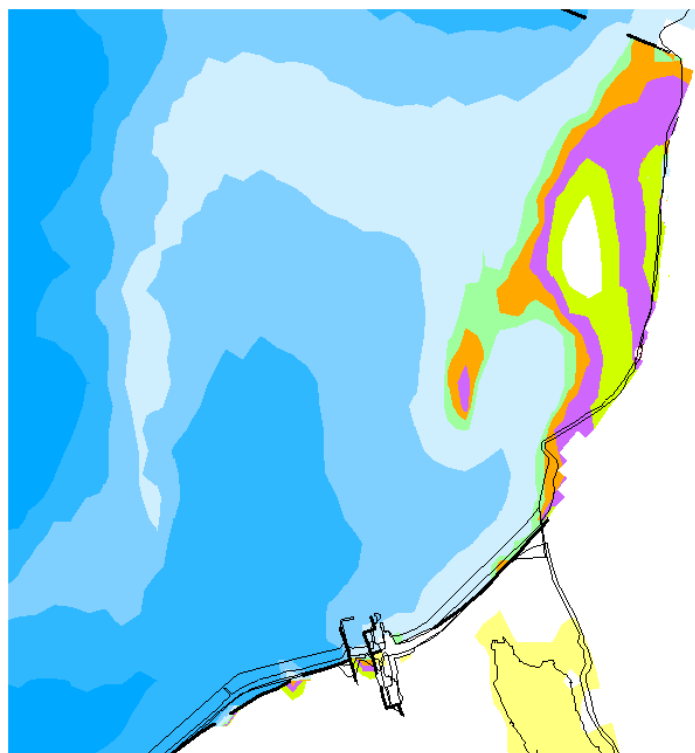
De vispassage zou nog bij een debiet van 20 m³/s kunnen werken, dwz er wordt ('s zomers) gedurende 80 minuten water ingelaten zonder dat dit tot een meetbare verzilting op het IJsselmeer leidt.

Uitstraling op de omgeving : tussen Harlingen en Kornwerderzand veranderen de saliniteiten (vergelijk fig. 15 met fig. 16). In de T0 situatie



Figuur 15.

Berekend saliniteitspatroon in de bodemlaag voor de variant Brakke Boontjes1 tijdens hoogwater. De afvoer door de brakwater zone is $85 \text{ m}^3/\text{s}$ (spuiopening 120 m^2) en door de ernaast gelegen spuiomiddelen $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (spuiopening 400 m^2).



Figuur 16.

Berekend saliniteitspatroon in de bodemlaag voor de referentiesituatie tijdens hoogwater. Het centrum van het gespuide zoete water bevindt zich ruim 6 km ten noord-oosten van de sluis. Spui bij Kornwerderzand is $525 \text{ m}^3/\text{s}$ getijgemiddeld (spuiopening 520 m^2).

beweegt zich een zoete bel voor de Friese kust. Deze bel contrasteert sterk met de omgeving en pendelt heen en weer, waardoor er lokaal in de tijd grote saliniteits-veranderingen ontstaan.

In de Brakke Boontjes variant 1 is er sprake van een vrij constante saliniteitsgradiënt loodrecht op de Friese kust met weinig variatie in de tijd. Op 5 km afstand van de kust is het verschil met de T0 situatie zeer gering. Er treedt over het algemeen een verzoeting op, omdat het gespuide water langer blijft hangen.

5.2 Brakke Boontjes 2

Deze korte variant (fig. 17) heeft geen slurf en doorsnijdt de Boontjes dicht bij de schutsluis.

Ten oosten van de schutsluis is een vispassage van 10 m² en daarnaast weer een extra spuisluis met een doorstroomoppervlak van 100 m² om de saliniteit van de brakwater zone te regelen.

Uit figuur 18 blijkt, dat ook bij een getijgemiddelde afvoer van bijna 300 m³/s de maximale saliniteit aan de bodem groter dan 5 blijft. Dit is een gevolg van het binnentrekken van een zouttong via de geul de Boontjes. Deze zouttong veroorzaakt een relatief hoge saliniteit voor de vispassage tijdens vloed.

De maximale zoutconcentraties op het IJsselmeer rond de vispassage zijn daarom lokaal hoger dan 0,6 ppt. Op enige afstand echter is (bij rustig weer) al geen effect meer te zien.

Bij lage afvoer (60 m³/s door de brakwater zone) worden wel verhogingen met meer dan 0,2 ppt in een vrij groot gebied ten zuiden van de vispassage berekend. Deze effecten kunnen verminderd worden door de aanleg van een extra zoetwaterretentiebekken in de brakwaterzone, aansluitend op de vispassage.

5.2.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling.

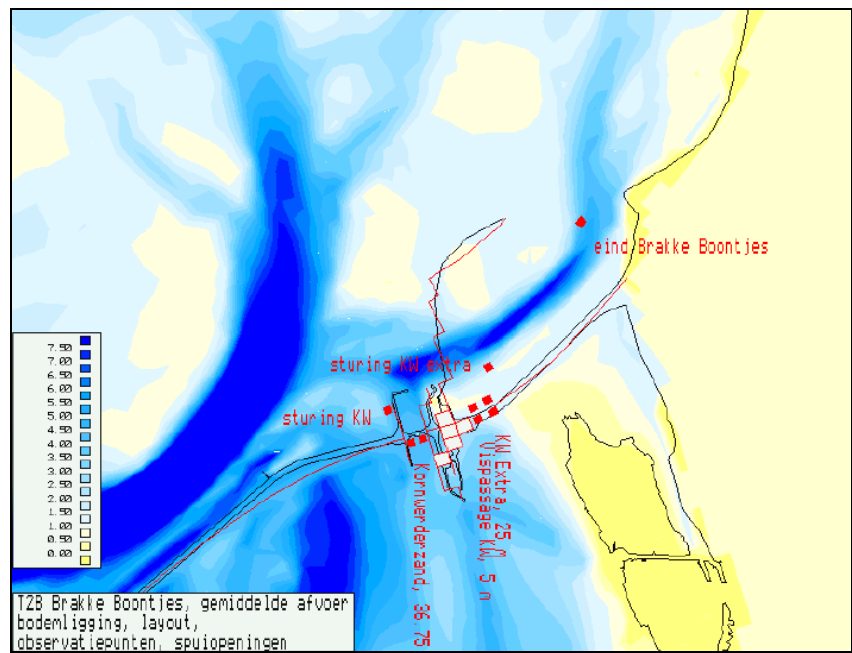
De getijstroomsnelheden in het afgeschermd gebied ten oosten van de dam nemen aanzienlijk af en hier valt ook extra aanslibbing te verwachten. Door de Boontjes wordt met de zouttong veel slib aangevoerd. Een aanslibbingssnelheid van 20 cm per jaar zou lokaal kunnen optreden. In de Boontjes zelf zijn de getijsnelheden nog zo hoog, dat alleen aanslibbing in de buurt van de vispassage is te verwachten. Door het spuien wordt een deel van de Boontjes nog op diepte gehouden.

Het gebiedje tussen de Boontjes en de Afsluitdijk is ondiep en nu extra luw gelegen. Hier zal een extra aanslibbing gaan optreden met mogelijk kweldervorming na enige decennia.

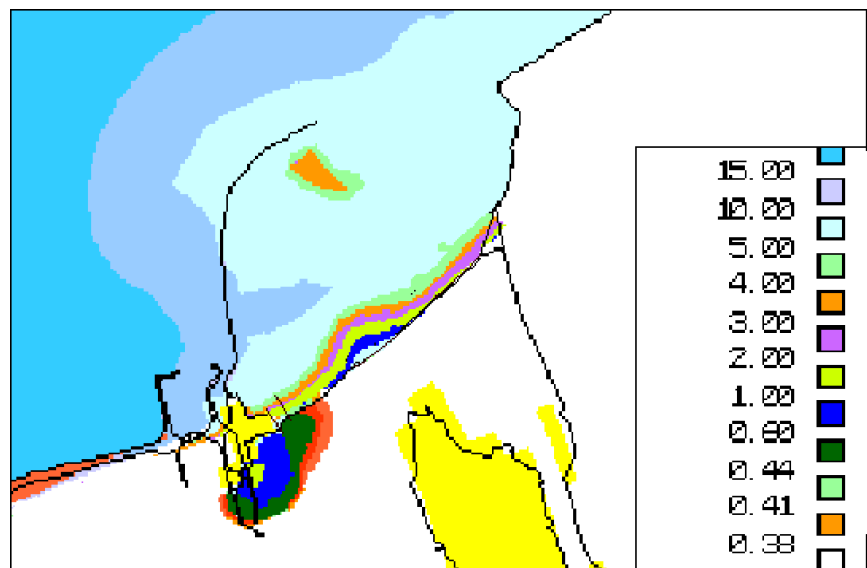
De spuicapaciteit van het spuimiddel dat aansluit op de brakwater zone neemt af als gevolg van het feit dat de laagwaterstanden er hoger worden. Het extra spuimiddel in de brakwater zone werkt dan niet optimaal. Voor dit spuimiddel is het capaciteitsverlies 50 %. Het doorstroomoppervlak van 100 m² heeft een effectieve capaciteit die overeenkomt met een opening van 50 m² bij onbelemmerde afstroming.

Voor de oude spuisluis bij Kornwerderzand en het nieuwe spuimiddel in de knik is er geen capaciteitsverlies.

De uitstraling naar de omgeving is gering. Ten noord-oosten van de brakwater zone treedt enige verzoeting op.



Figuur 17
Brakke Boontjes2. Bodemdiepten in meters t.o.v. NAP.



Figuur 18.
Berekende saliniteiten in ppt in de bodemlaag tijdens hoogwater voor variant Brakke Boontjes 2. De getijgemiddelde afvoer door de oude spuisluis is $210 \text{ m}^3/\text{s}$ (spuiopening 147 m^2) en door het extra spuimiddel naar de brakwater zone $67 \text{ m}^3/\text{s}$ (spuiopening 100 m^2). Door de vispassage gaat netto $9 \text{ m}^3/\text{s}$ naar buiten.

5.3 Brakke Boontjes3

Deze variant is gelijk aan variant 2, met dit verschil, dat er twee drempels zijn gelegd in de Boontjes om de zoutindringing tegen te gaan (fig.19). Dat zo'n maatregel effectief kan zijn, valt op te maken uit de vergelijking van figuur 18 met figuur 20.

De saliniteiten in de bodemlaag voor de vispassage zijn tijdens hoogwater lager dan 2 ppt. Tijdens hoogwater treden meestal de hoogste saliniteiten op en wel bij de bodem.

Op het IJsselmeer is de verhoging van de chloriniteit kleiner dan 20 mg/l. De drinkwaternorm is 360 mg/l.

De vispassage sluit op een buitenwaterstand van NAP +10 cm. Er gaat dan per getijperiode 600.000 m³ water naar buiten en 190.000 m³ water naar binnen. Het getijgemiddeld uitstromend zoetwaterdebiet is 9 m³/s.

Per getij komt er 0,3 10⁶ kg zout naar binnen. Deze hoeveelheid is onder normale omstandigheden binnen enkele dagen weer verdwenen als gevolg van spui. Door het naast de vispassage gelegen extra spuimiddel gaat 67 m³/s naar buiten.

Deze variant werkt dus goed als vispassage, zonder dat er een meetbare verhoging van de saliniteiten op het IJsselmeer optreedt.

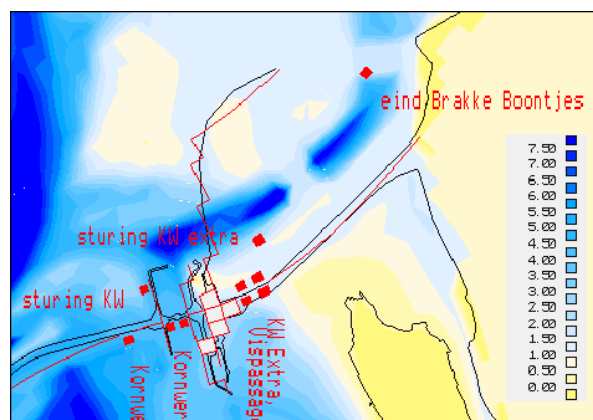
5.3.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling.

De getijstroomsnelheden in het afgeschermd gebied ten oosten van de dam nemen aanzienlijk af en hier valt ook meer aanslibbing te verwachten. Door de Boontjes komt geen zouttong naar binnen, dus de aanslibbing zal veel geringer zijn dan in variant 2. Mogelijk op den duur kweldervorming tussen de Boontjes en de Afsluitdijk.

Het extra spuimiddel naar de brakwater zone heeft een doorstroomopening van 100 m² maar de effectieve capaciteit is equivalent met een doorstroomoppervlak van 50 m² in een situatie zonder capaciteitsverlies. Voor de oude spuisluis bij Kornwerderzand en het nieuwe spuimiddel in de knik is er geen capaciteitsverlies.

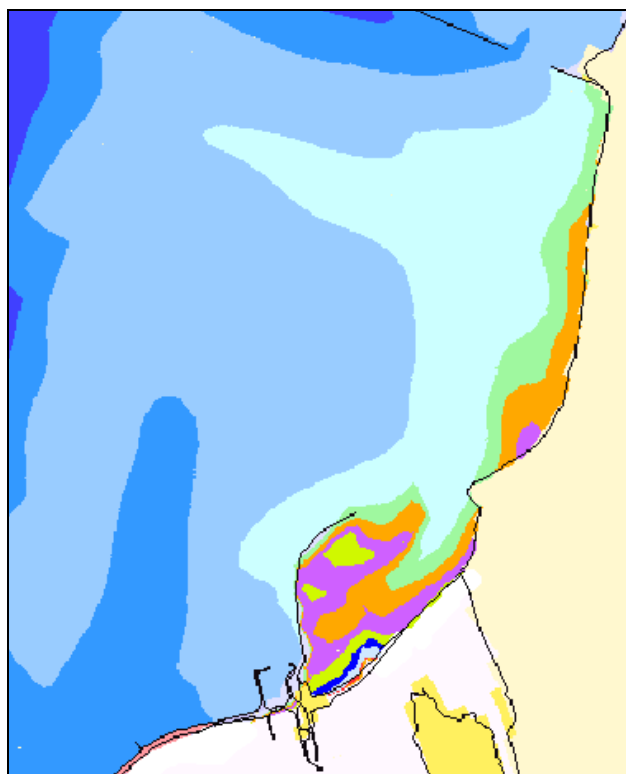
De vispassage zou bij een debiet van 50 m³/s door de brakwater zone nog goed kunnen werken. Bij een lagere afvoer moet er een actief spui- en inlaatbeheer worden gevoerd om te voorkomen dat bij ongunstige wind te veel zout het IJsselmeer binnenkomt, of er moet een apart zoetwaterretentiebekken in de brakwater zone worden aangelegd. In dat geval werkt hij nog bij een afvoer van 10 m³/s.

De uitstraling naar de omgeving is gering. Ten noord-oosten van de brakwater zone treedt enige verzoeting op.

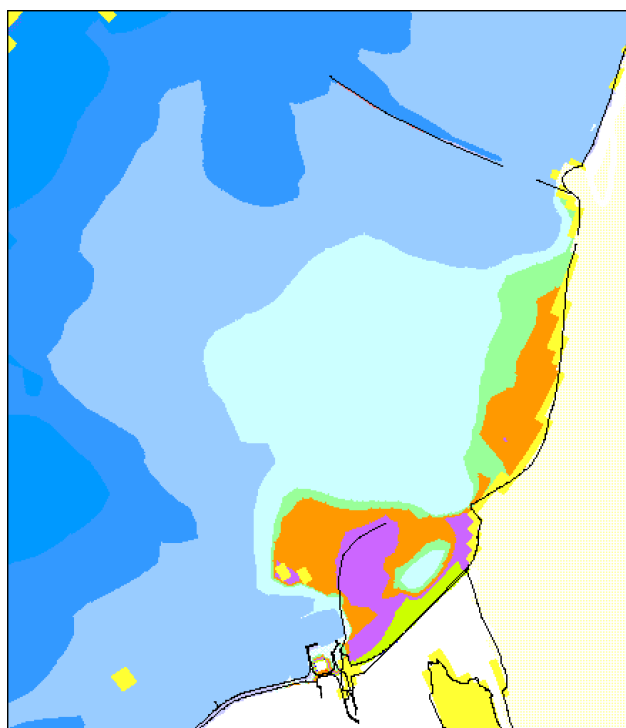


Figuur 19

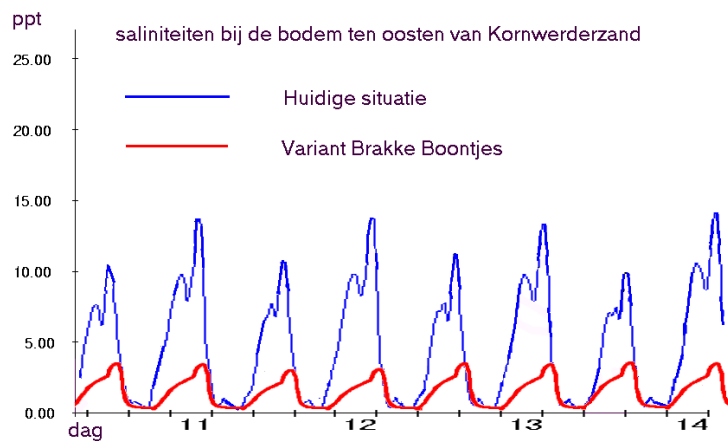
Bodemgeometrie van Brakke Boontjes 3 (met drempels in de Boontjes).



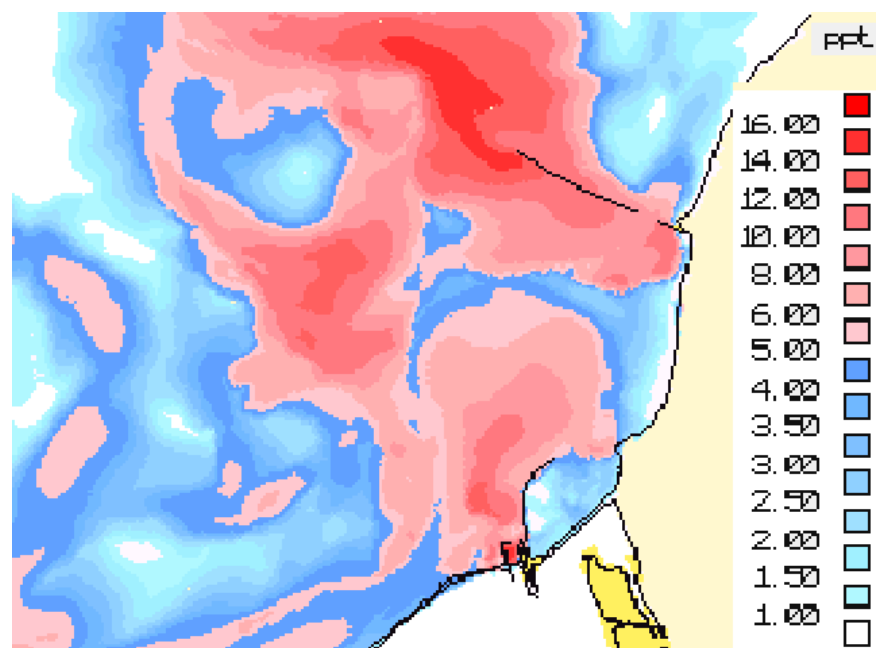
Figuur 20
Berekende saliniteitsverdeling vlak boven de bodem tijdens hoogwater in de variant de Brakke Boontjes 3.



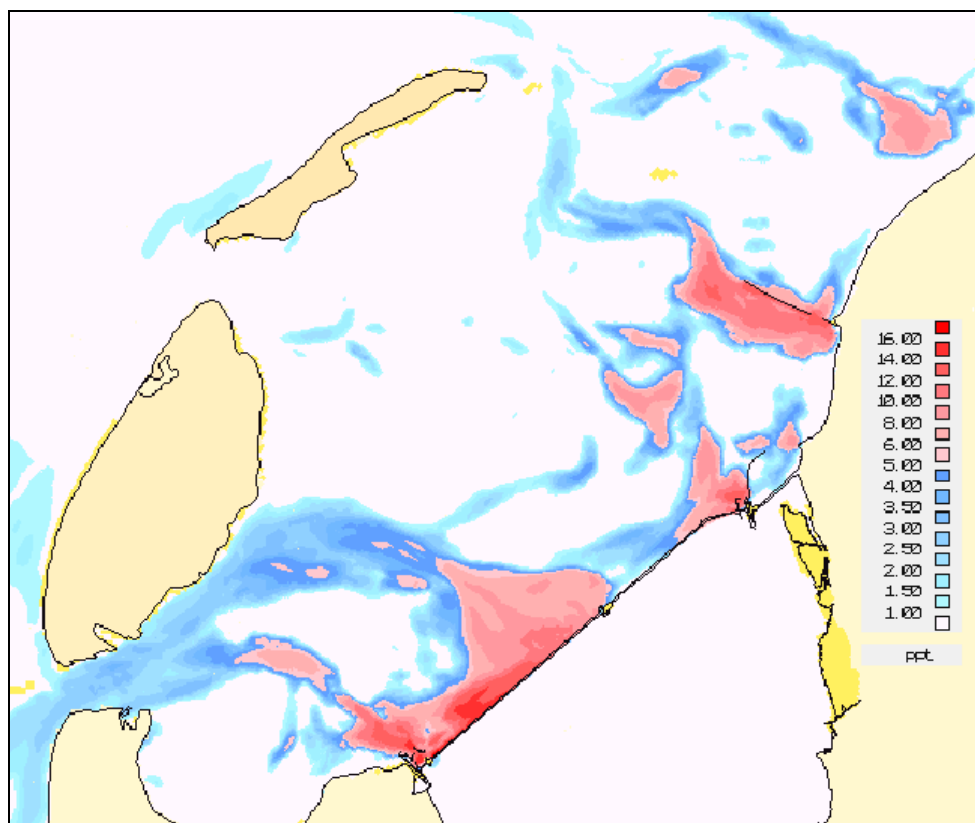
Figuur 21
Berekende saliniteitsverdeling vlak boven de bodem na laagwater in de variant de Brakke Boontjes 3.



Figuur 22
Saliniteiten in de brakwater zone. In de variant Brakke Boontjes 3 is de variabiliteit met 10 PSU afgenomen.



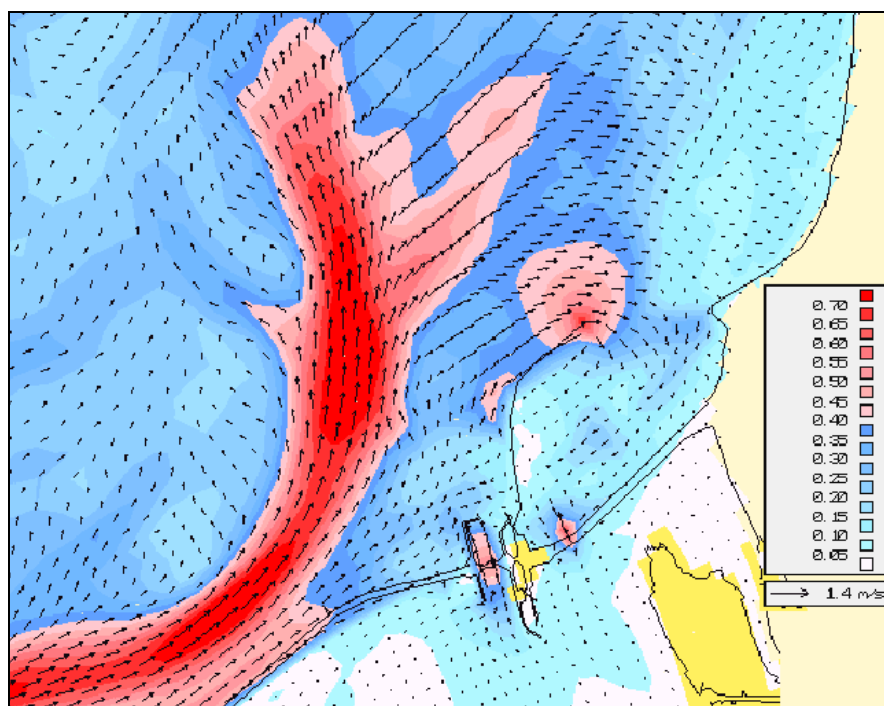
Figuur 23
Verskil tussen maximale en minimale saliniteit aan de bodem gedurende een getijcyclus in de variant Brakke Boontjes 3. Vergelijk met figuur 4. In de brakwater zone is de variabiliteit lager dan 5 PSU. Zie ook figuur 22.



Figuur 24

Grootste verticale saliniteitsverschil gedurende een getijperiode.

In de brakwaterzone Brakke Boontjes 3 treedt (gedurende korte tijd) een geringe stratificatie op.



Figuur 25

Maximale stroomsnelheden bij de bodem gedurende een getijcyclus (zwakke ZW wind).

De stroomsnelheden in en rond de spuikokers worden sterk onderschat als gevolg van de relatief grote maaswijdte van het model.

6 De staart van Kornwerderzand

Onder deze naam is één variant doorgerekend. Daarnaast wordt nog een variant besproken, die veel overeenkomst vertoont met de doorgerekende variant.

De Staart van Kornwerderzand wordt begrensd door een dam, die ten westen van de Lorentzsluizen aantakt op de Afsluitdijk en vandaar naar het NNO loopt. Er is een lange (10 km) en een korte (6 km) variant. De dam sluit de Boontjes af van de Doove Balg.

6.1 De staart van Kornwerderzand (10 km)

Er loopt in deze variant een lange dam van de knik in de Afsluitdijk in de richting van de Pollendam (fig. 26). In het noordelijk gedeelte van de Boontjes is een drempel gelegd en de gebieden ter weerszijden van de Boontjes zijn door aanzanding en opslibbing op NAP niveau komen te liggen, zodat ze droogvallen rond laagwater. Het nieuwe spuimiddel ligt links van de knik, buiten de brakwater zone. In de punt van de brakwater zone, rechts van de knik is een vispassage.

Ondanks de drempel in de ingang van de Boontjes komt er met vloed vrij veel zout water de brakwater zone binnen. De maximale saliniteiten lopen in de onderlaag op tot 4 ppt en in de bovenlaag tot 3 ppt.

Er is lichte stratificatie in de punt. De vormgeving is ook in de punt nog te open om effectief zoet water vast te houden (fig. 27).

De vispassage heeft afmetingen 13×4 m, $\mu = 1$ en sluit op een buitenwaterstand van NAP + 10 cm (in de zomer). Per getijperiode wordt er $1.250.000 \text{ m}^3$ water gespuid en er wordt 500.000 m^3 Waddenzeewater binnengelaten. Het netto uitgaand debiet is $16,5 \text{ m}^3/\text{s}$ getijgemiddeld.

De maximale saliniteiten in het IJsselmeer komen niet boven 1 ppt. Bij zwakke wind is dit geen bezwaar. Bij harde wind uit noordelijke richtingen moet de vispassage worden gesloten om verspreiding van zout op het IJsselmeer te voorkomen, of er moet in de brakwater zone een zoetwaterrentiebekken worden aangelegd.

6.1.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling.

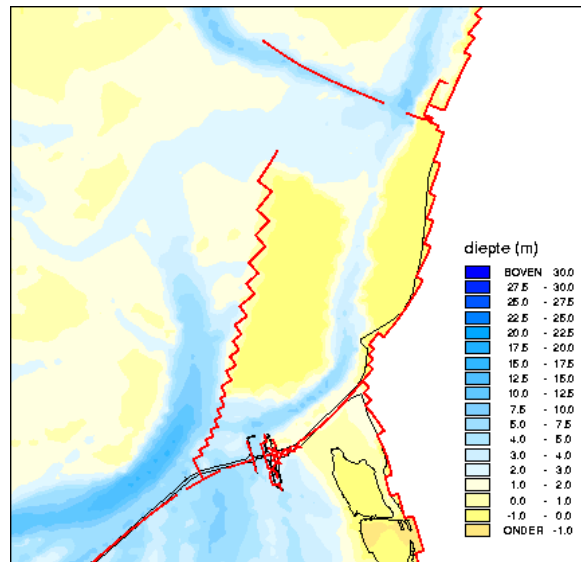
De getijstroomsnelheden in het afgeschermd gebied ten oosten van de dam nemen aanzienlijk af en hier valt ook extra aanslibbing te verwachten. In de Boontjes zelf zijn de getijsnelheden nog vrij groot. In het noordelijk gedeelte van de geul zal geen aanslibbing plaatsvinden, omdat vooral daar de getijsnelheden nog vrij groot zijn. Ter weerszijden van de geul zal wel sterke aanslibbing optreden met mogelijk op termijn plaat- of kweldervorming. Ten westen van de dam zullen de getijsnelheden sterk toenemen. Een langs de dam aangelegde scheepvaartgeul zal niet onderhouden hoeven te worden, omdat de grote stroomsnelheden aanslibbing en aanzanding zullen verhinderen.

De spuicapaciteit in de brakwater zone neemt aanzienlijk af ten gevolge van de aanwezigheid van de lange dam. De laagwaters hierachter worden gemiddeld 20 cm hoger. Ten westen van de dam, voor het nieuwe spuimiddel worden de laagwaters lager, dus de capaciteit van het nieuwe spuimiddel neemt toe. Het netto resultaat is een afname van de spuicapaciteit met een equivalent van 60 m^2 doorstroom-oppervlak t.o.v. een situatie zonder dam.

De vispassage zou bij een debiet van minder dan $300 \text{ m}^3/\text{s}$ door de brakwater zone niet goed meer werken. Er moeten dus extra maatregelen worden genomen zoals zoetwater retentiebekkens buitendijks of zoutwaterretentiebekkens binnendijks voor een frequent gebruik van de vispassage.

Ook is het mogelijk om de punt van de brakwater zone smaller te maken, om de ingang smaller te maken of om nog meer drempels in de Boontjes aan te leggen om de uitwisseling van zoet en zout water te beperken.

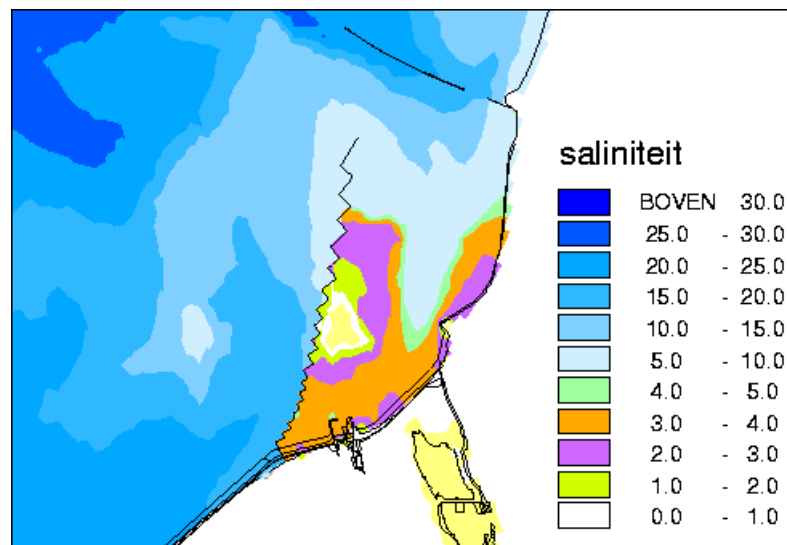
De uitstraling met de omgeving beperkt zich tot het gebied ten zuiden van de Pollendam, waar enige verzoeting optreedt.



Figuur 26

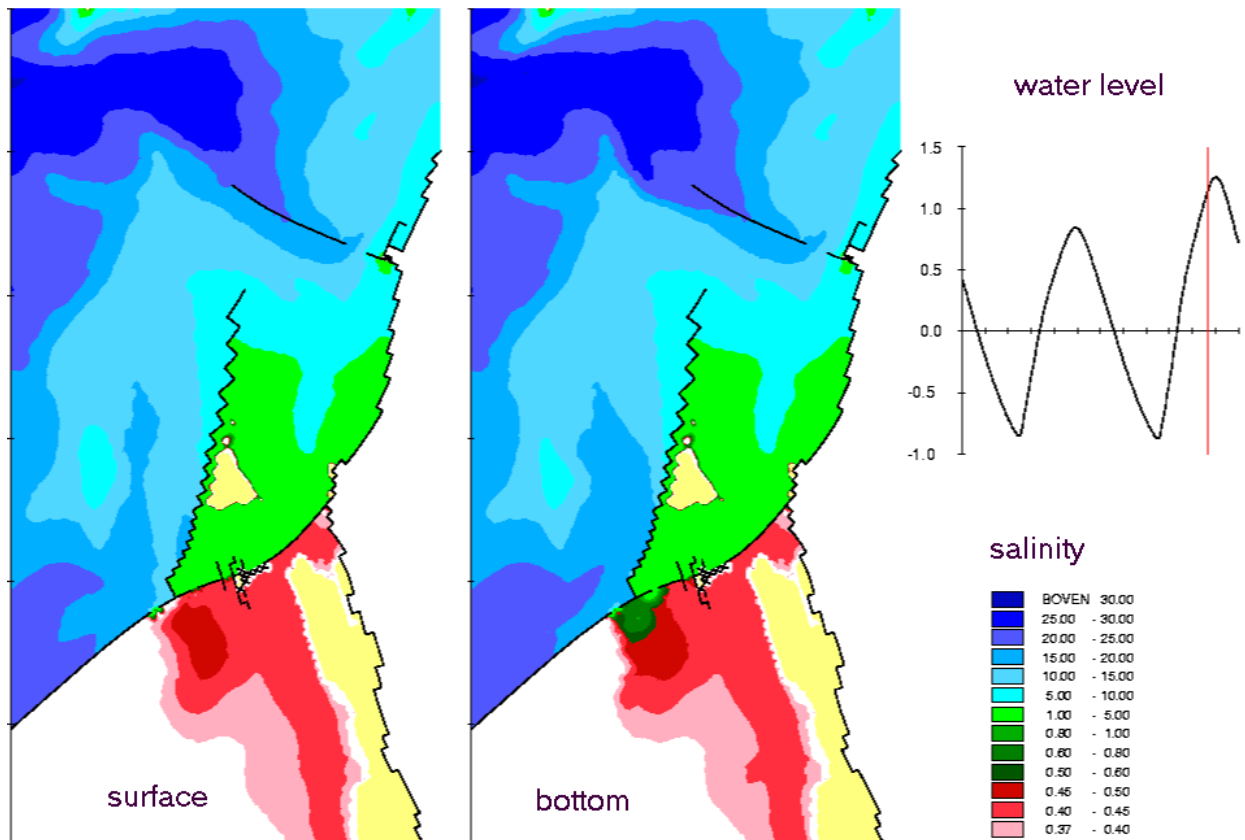
Bodemgeomtrie van de Staart van Kornwerderzand (10 km).

De afschermingsdam is op het modelrooster geschematiseerd als trapjeslijn, maar is in werkelijkheid glad.



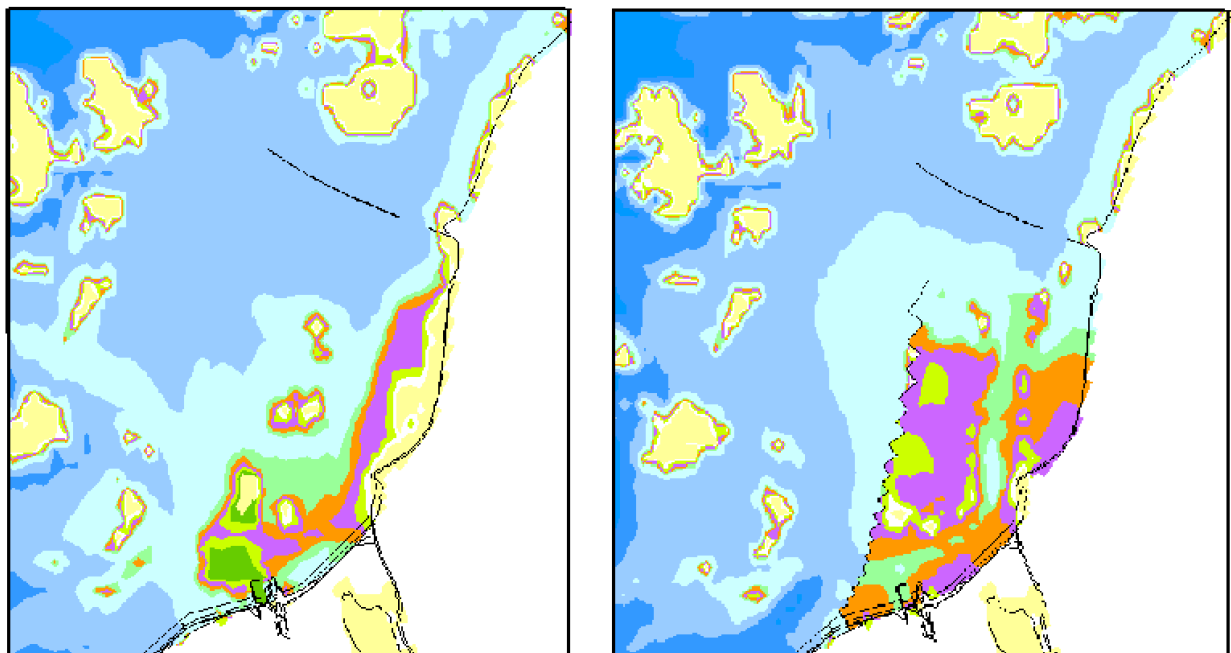
Figuur 27

Berekende saliniteiten in de onderste modellaag tijdens hoogwater in de Staart van Kornwerderzand(10 km). Debieten : nieuwe spui $276 \text{ m}^3/\text{s}$ (spuiopening 200 m^2), oude spui + vispassage $367 \text{ m}^3/\text{s}$ getijgemiddeld (spuiopening 320 m^2). Vergelijk met figuur 16.



Figuur 28

Saliniteiten aan oppervlak en bodem tijdens hoogwater in de Staart van Kornwerderzand. Door de vispassage dringt in de onderste lagen licht brak water binnen. De achtergrondsaliniteit is 0,36 PSU. De toename van de chloriniteit is in het lichtpaarse gebied minder dan 20 mg/l.



Figuur 29

Berekende saliniteitsverdeling vlak boven de bodem tijdens laagwater in de T0 situatie.

6.2 Staart van Kornwerderzand (6 km)

Deze variant is niet doorgerekend, maar lijkt veel op variant 4.1. De dam is 4 km korter dan variant 4.1 en sluit aan vlak ten westen van de Lorentzsluizen (fig. 30). Hij lijkt ook enigszins op variant 3.3

Links van de dam is een nieuwe schutsluis geprojecteerd en pal rechts daarvan, in de punt van de brakwater zone een vispassage. Deze vispassage heeft de afmetingen van de vispassage besproken in 3.3, nl. 5 x 2 m. Dat is 5 x kleiner dan in variant 4.1.

De Boontjes dient niet meer als vaargeul en wordt daarom voorzien van een aantal drempels om het binnendringen van de zouttong tegen te gaan. De opening van de brakwater zone naar de Waddenzee is echter vrij breed, veel breder dan in variant 3.3. Daarom zal de maximale saliniteit in de punt van de brakwater zone nog vrij hoog zijn. Vermoedelijk 3 ppt in de onderlaag.

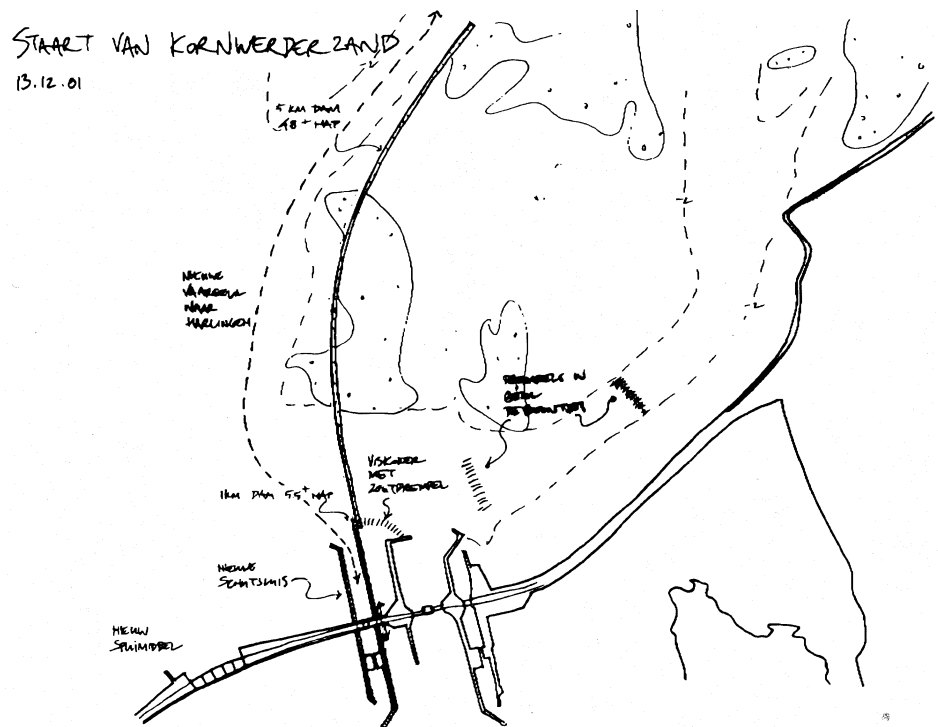
De vispassage wordt daarom enigszins afgeschermd door een drempel, die loopt van de punt van de westelijke geleidingsdam van de spuisluizen naar de afschermingsdam van de brakwater zone.

Het volume dat hierachter geborgen kan worden is ongeveer 300.000 m³. Als de helft hiervan zoet gehouden kan worden, kan hier het beheer van de vispassage op worden afgestemd. Als deze sluit op een buitenwaterstand van + NAP +5 cm, dan is er nog gedurende 1,5 uur instroom vanuit de Waddenzee mogelijk, waarbij ongeveer 150.000 m³ water wordt ingelaten.

6.2.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling

Hiervoor geldt hetzelfde als voor de Staart van Kornwerderzand 10 km (4.1), zij het dat alles in iets mindere mate optreedt. De scheepvaartgeul ten westen van de dam zal alleen dichtbij de nieuwe schutsluis onderhouden hoeven te worden.

De spuicapaciteit van de oude spuisluis neemt aanzienlijk af, terwijl die van het nieuwespuimiddel in de knik weer toeneemt. Het netto resultaat zal equivalent zijn met een verlies van 50 m² doorstroomoppervlak.



Figuur 30 De Staart van Kornwerderzand (6 km)
(Schetsontwerpen Brak, fase 3, 2002)

7 Makkummer Brak

Dit is een binnendijkse variant rond de Makkummer Noordwaard. De brakwater zone wordt afgeschermd van het IJsselmeer door een dam tussen Kornwerderzand en de Makkummerwaard, net ten noorden van de vaargeul. Daar is ook een verbinding met het IJsselmeer, die afsluitbaar is en alleen gesloten wordt als er door windeffecten brak water in het IJsselmeer dreigt te stromen.

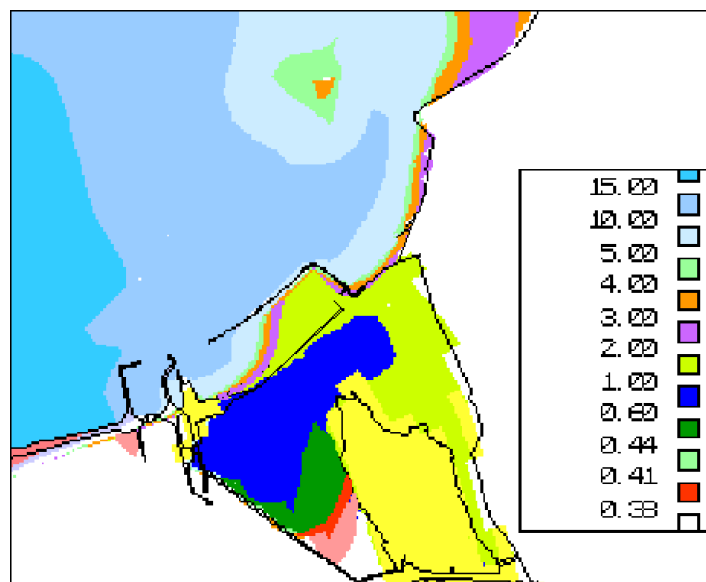
In de Afsluitdijk is een vispassage, die bij opkomend water vrij lang open blijft staan, zodat er een heel geringe getijdewerking in de brakwater zone ontstaat met een getijverschil van minder dan 10 cm.

De uitwisseling met de Waddenzee is zo klein, dat de zone slechts licht brak is (oligohalien).

Er zijn twee varianten doorgerekend. Eén met de verbinding (= vispassage) naar de Waddenzee ten noorden van de Makkummer Noordwaard (zie fig. 31, variant oost), en één met de verbinding met de Waddenzee rechts van de schutsluis bij Kornwerderzand (zie fig. 32, variant west).

Voor beide is de vispassage 5 m breed en 2 m diep met een μ coëfficiënt van 1.

Er wordt 's zomers geopend en gesloten op buitenwaterstand + 35 cm, dus er wordt gedurende 3 uur per getij water ingelaten en gedurende 4 uur water uitgelaten.



Figuur 31

Berekende saliniteiten in ppt in de onderste waterlaag tijdens hoogwater voor de variant Makkummer Brak oost.

De netto afvoer door de vispassage is $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (opening 10 m^2).

De getijgemiddelde afvoer door de bestaande spuisluizen is $340 \text{ m}^3/\text{s}$ (spuiopening 247 m^2). Deze afvoer verloopt niet door de brakke zone.

7.1 Makkummer Brak Oost

Variant Makkummer Brak oost is aan de buitenzijde voorzien van een slurfje waarin zoetwater achterblijft. Dit werkt voldoende als zoetwaterreservoir. Aan beide zijden van de vispassage is de maximale saliniteit ongeveer 2 ppt. De saliniteitsverdeling in de brakwater zone valt af te leiden uit figuur 31. Hierbij moet bedacht worden dat in de berekening de achtergrondsaliniteit in het IJsselmeer 0,36 ppt is. Dat staat gelijk met 200 mg Cl/l. Er treedt geen stratificatie op, omdat de vispassage aansluit op een zeer ondiep gebied.

Ook buitendijks is de diepte gering en ook daar treedt geen stratificatie op. Per getijperiode gaat er 750.000 m³ water naar buiten en komt er 450.000 m³ van de Waddenzee naar de brakwater zone. Het netto uitgaande zoetwaterdebiet is 6,8 m³/s getijgemiddeld.

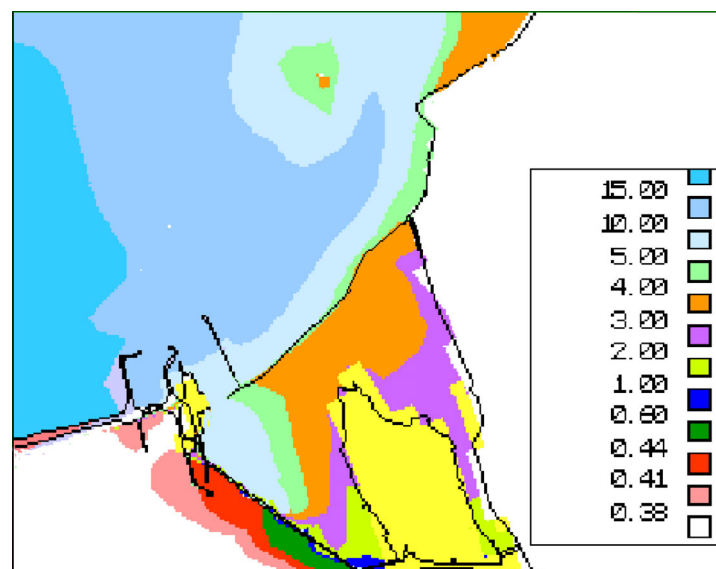
Het getijverschil in de brakwater zone is minder dan 10 cm.

7.2 Makkummer Brak west

De variant Makkummer Brak west heeft de vispassage naast de schutsluis. Ook hier is in de Waddenzee een dam aangelegd voor de zoetwaterretentie, maar deze is veel korter dan in de oost-variant. Er treedt in een klein gebiedje rond de passage stratificatie op (figuur 32). Er stroomt veel zouter water naar binnen dan in de variant oost, omdat het slurfje in de Waddenzee veel kleiner is. Hier vindt weinig zoetwaterretentie plaats. De maximale saliniteit in de brakwater zone is hoger dan 6 ppt en er stroomt ook zout het IJsselmeer op, waar heel lokaal een verhoging tot 0,6 ppt valt waar te nemen.

De saliniteit valt makkelijk te verlagen door de vispassage bij een lagere waterstand te sluiten. De inlaatduur zou b.v. tot 2 uur verkort kunnen worden.

Ook kan de vormgeving van het slurfje zodanig gewijzigd worden, dat de opening naar de Waddenzee kleiner is en de zoetwaterretentie er beter is.



Figuur 32

Berekende saliniteiten in ppt in de onderste waterlaag tijdens hoogwater voor de variant Makkummer Brak west. Het netto zoetwaterdebiet door de vispassage is 4 m³/s getijgemiddeld.

Het is hierdoor mogelijk de maximale saliniteit in de brakwater zone onder alle omstandigheden onder de 5 ppt te houden. Het uitgaande volume is 643.500 m³ per getijperiode en het ingaande volume is 460.000 m³. Het netto uitgaande zoetwaterdebiet is 4 m³/s getijgemiddeld. De uitstraling naar de omgeving is te verwaarlozen. Noch in het IJsselmeer noch in de Waddenzee zal een merkbare verandering van saliniteiten optreden. Ten noord-westen van de dam in de Waddenzee zullen de stroomsnelheden toenemen, waardoor de Boontjes lokaal mogelijk iets dieper wordt.

7.2.1 Stroomsnelheden, aanslibbing, spuicapaciteit, uitstraling. (beide varianten)

In de slurf naar de vispassage zijn de stroomsnelheden laag, behalve in een smalle geul die direct aansluit op de vispassage. De aanslibbing zal misschien vergelijkbaar zijn met die in de havenkom, die lokaal enkele meters per jaar bedraagt. Aangezien het hier om een veel groter oppervlak gaat bij een veel geringere diepte, zal het niet zo snel gaan, maar in principe moet er wel met enkele dm per jaar worden rekening gehouden.

In het luwe gebied ten noord-oosten van het slurfje mogelijk zal op den duur een klein kweldertje ontstaan.

In het binnendijkse gebied zijn de stroomsnelheden zeer laag.

De aanslibbingsnelheid is hier waarschijnlijk minder dan enkele mm per jaar.

Er is nauwelijks import van slib vanuit de Waddenzee omdat de getijslag minimaal is.

Er treedt geen rondstroming rond de Makkumer Noordwaard meer op, zodat er ten oosten van de Noordwaard een iets verhoogd opslibbing zal optreden.

Ten gevolge van het aanleggen van de afschermingsdam zullen de golfhoogten in de brakwater zone drastisch afnemen wat gevolgen heeft voor de westoever van de Makkummer Noordwaard. Er is echter geen invloed op de spuicapaciteit van nabijgelegen spuinmiddelen.

De vispassages dragen ook niet bij aan de spuicapaciteit.

De uitstraling naar de omgeving is te verwaarlozen. Noch in het IJsselmeer noch in de Waddenzee zal een merkbare verandering van saliniteiten optreden. Ten noord-westen van de dam in de Waddenzee zullen de stroomsnelheden toenemen, waardoor de Boontjes lokaal mogelijk iets dieper wordt.

8 Conclusies

Uit berekeningen met een 3D model en met een kombergingsmodel naar de waterbeweging en de saliniteitsverdeling in mogelijk aan te leggen brakwater zones rond de Afsluitdijk komt het volgende naar voren :

- In alle doorgerekende inrichtingsvarianten voldoet de saliniteitsverdeling aan de gestelde eis, dat de saliniteit per getijperiode niet meer dan 10 PSU mag variëren. In het zoetste gedeelte van de brakwater zone is de saliniteit nooit hoger dan 4 PSU.
De zoetwatergradiënten zijn voldoende stabiel en zijn altijd gericht naar het uitstroompunt van zoetwater.
- Wat betreft de mogelijkheden voor visintrek scoren de in het IJsselmeer gelegen varianten beter dan die, welke in de Waddenzee zijn gelegen.
- Van de buitendijkse varianten biedt de variant "Brakke Boontjes 1" de beste mogelijkheden voor visintrek.
- In de varianten "Brakke Boontjes 1" en "Breezand Brak" is het mogelijk om per getijperiode onder normale omstandigheden 2 miljoen m³ water van uit de brakwater zone in het IJsselmeer in te laten zonder dat dit tot een waarneembare toename van de saliniteit van het IJsselmeer leidt. Met dit water kunnen passief migrerende organismen, zoals vislarven het zoete milieu binnen komen.
- In de variant "Brakke Boontjes 3" is de hoeveelheid binnen te laten water 10 x zo klein, maar dat is voor visintrek nog steeds een redelijke hoeveelheid.
- De varianten onder de naam "Staart van Kornwerderzand" zijn zonder aanvullende inrichtingsmaatregelen niet geschikt voor visintrek.
Een aanvullende maatregelen zou kunnen zijn : het aanleggen van een apart afgeschermd zoetwaterretentiebekken binnen de brakke zone met een volume bij laag water van minimaal 200.000 m³.
- Tijdelijke stratificatie treedt in alle varianten op, bij de een meer dan bij de ander. Deze stratificatie duurt nooit langer dan een getijperiode, behalve bij de binnendijkse varianten, waar zonder speciale inrichtingsmaatregelen de kans bestaat op meer langdurige stratificatie.
- Door de aanleg van de oostelijk gelegen buitendijkse varianten "Staart van Kornwerderzand en "Brakke Boontjes" neemt de spuiefficiëntie toe van de zuid-westelijk ervan gelegen spuismiddelen, waaronder het eventueel nieuw aan te leggen spuismiddel in de "knik" van de Afsluitdijk.
De efficiëntie van de spuismiddelen, die uitmonden in de brakwater

zone, is echter niet optimaal of neemt af ten opzichte van de huidige situatie.

- Geen van de besproken varianten heeft een belangrijke uitstraling buiten zijn directe omgeving wat betreft getij, saliniteitsverdeling of morfologische ontwikkeling.
- Binnen de buitendijkse brakwater zones zal versnelde aanslibbing plaatsvinden met mogelijk op lange termijn lokaal kweldervorming.
- De "Staart van Breehorn" zal de bestaande zoutlast op het IJsselmeer ten gevolge van het schutten van schepen met ruwweg de helft doen afnemen, omdat de saliniteit voor de schutsluis in deze variant gemiddelde de helft lager is dan in de huidige situatie.

9 Gebruikte rapportages

Alkyon - Modellerings estuarium IJsselmeer. Rapport A726. RIKZ, 2001.

Alkyon - Modellerings vispassages en zoutdoordringing. Rapport A726R2. RIKZ, 2001.

Waterloopkundig Laboratorium – Brakke zone Afsluitdijk. Rapport Z3230, RIKZ, 2001.

[ES]2- Afsluitdijk - Schetsontwerpen Brak, Fase 3 Inrichtingsschetsen, Ontwerp Team Brak, RIZA/RIKZ, 2002.

de Leeuw, CC, Backx, J.J.G.M. – Naar een herstel van estuariene gradiënten in Nederland. RIKZ/RIZA/2000.044.