

Effecten van SO-IJ op het grondwatersysteem

Modelstudie naar zoutwaterstroming bij IJmuiden



Effecten van SO-IJ op het grondwatersysteem

Modelstudie naar zoutwaterstroming bij IJmuiden

dr.ir. W.J. de Lange
H.P. Bootsma MSc
dr.ir. G.M.C.M. Janssen
dr.ir. G.H.P. Oude Essink

11200215-000

Titel

Effecten van SO-IJ op het grondwatersysteem

Opdrachtgever
RWS

Project
11200215-000

Kenmerk
11200215-000-HYE-0038

Pagina's
26

Trefwoorden

IJmuiden, Verdieping waterbodem, doorsnijding van weerstandslaag, indringing zout in grondwater

Samenvatting

Met een 2-D verticaal model is onderzocht welke effecten de aanleg van een zoutscherm met diepe spleet voor het "selectief onttrekken" van oppervlakte water bij IJmuiden (SO-IJ) heeft op het onderliggende grondwater. Door het doorgraven van een scheidende laag kan mogelijk zoutwater in een omgeving met zoet grondwater zakken en voor effecten in de omgeving zorgen. Het model simuleert eerst de historische ontwikkeling van de zoet-zout verdeling in de ondergrond tot aan 2015. Daarna wordt de ingreep gesimuleerd. De zoutindringing in de ondergrond vanuit de SO-IJ blijkt in de bovenste twee watervoerende pakketten beperkt te blijven tot onder het oppervlakte water bij het sluiscomplex. In het diepe pakket blijft het zout binnen een smalle stroombaan richting de onttrekking bij Tata Steel. De doorstroomde zone is vrijwel ongevoelig voor variatie in bodemparameters en is niet afhankelijk van onzekerheden in bodemparameters. De grondwaterstand komt op termijn circa 15 cm omhoog op een afstand van circa 500 meter van de noord- en zuidoevers en neemt naar buiten af. Bij het beëindigen van de onttrekking bij Tata Steel ontstaat een nieuwe situatie die alsnog moet worden onderzocht.

Referenties

RWS offerteaanvraag "Meerwerk selectieve onttrekking fase 1: 2D grondwatermodellering", zaaknummer 31127958.0002, 9-3-2018;

Deltares offerte 11200215-000-HYE-0036 van 15-3-2018;

RWS opdracht tot uitvoering van het project "Meerwerk Selectieve onttrekking fase 1 – 2D grondwatermodellering", zaaknr. 31127958.0002, kenmerk RWS-2018/10551, van 27-3-2018.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0	Mrt. 2018	W.J. de Lange et al.		L. van der Valk		W.M.K. Tilmans	
1	Mei 2018	W.J. de Lange H.P. Bootsma G.M.C.M. Jansen G.H.P. Oude Essink		L. van der Valk		W.M.K. Tilmans	

Status

definitief

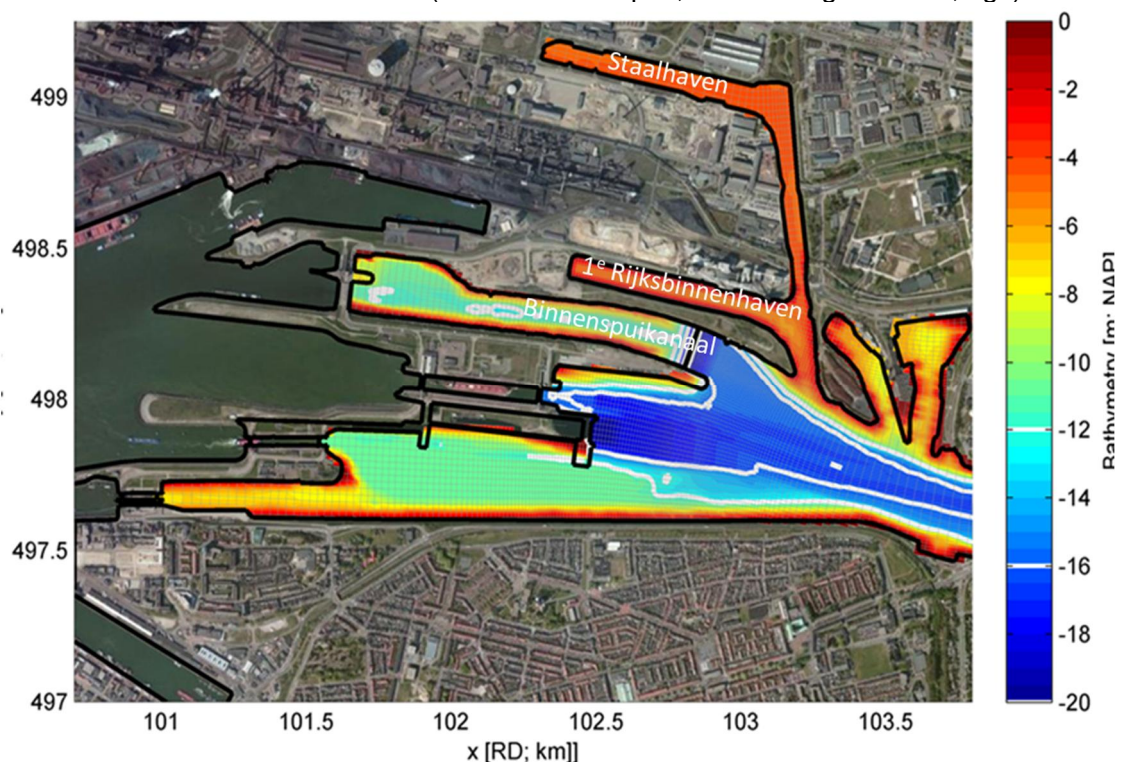
Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 De SO-IJ voor de nieuwe sluis IJmuiden	1
1.2 Potentiële gevolgen van de SO-IJ via grondwater	2
1.3 Doel van dit modelonderzoek	3
1.4 Leeswijzer	4
2 Beschrijving geohydrologie	5
2.1 Historie aan maaiveld	5
2.1.1 Situatie voor 1870	5
2.1.2 Ontwikkeling 1870 - 1927	6
2.1.3 Ontwikkeling 1927 - 1950	7
2.1.4 Ontwikkeling 1950 - 2015	8
2.2 Ondergrond opbouw	8
2.2.1 Bovenste 50 meter uit GeoTOP	8
2.2.2 Bovenste 50 meter uit recent onderzoek bij sluiscomplex	9
2.2.3 Ondergrond dieper dan 50 meter (REGIS)	10
2.2.4 Diepte zoet-zout grensvlak rond 1981	11
2.3 Ingrep SO-IJ	11
3 Opzet 2-dimensionaal verticaal model	13
3.1 Waarom een 2-D model?	13
3.2 Locatie en representatie van het 2-D profiel	13
3.3 Algemene model indeling	14
3.3.1 Bovenrand model	14
3.3.2 Laagindeling en parameterwaarden	15
3.4 Modelleertechniek en bestandsbeheer	16
4 Modelling	17
4.1 Periode 1871 - 1927	17
4.2 Periode 1927- 1950	18
4.3 Periode 1950 -2015	18
4.4 Overzicht van randvoorwaarden historische ontwikkeling	19
4.5 Gevoelighedsanalyse voor parameters in het historisch model	19
4.6 Vertaling van SO-IJ in de modelrand	20
4.7 Parameters voor gevoelighedsanalyse voor de effecten van de SO-IJ	20
5 Analyse van de modelresultaten	22
5.1 Modelresultaten van de historische ontwikkeling	22
5.2 Modelresultaten van de effecten van SO-IJ	23
5.3 Gevoelighedsanalyse gericht op de effecten van SO-IJ	24
5.3.1 Gevoeligheid van effecten van de SO-IJ voor bodemparameters	24
5.3.2 Gevoeligheid voor zoutgehalte van het oppervlakte water	25
5.3.3 Gevoeligheid van de effecten van de SO-IJ voor onttrekking Tata Steel	25
6 Conclusies en aanbevelingen over de effecten van de SO-IJ	27
Literatuur	29

1 Inleiding

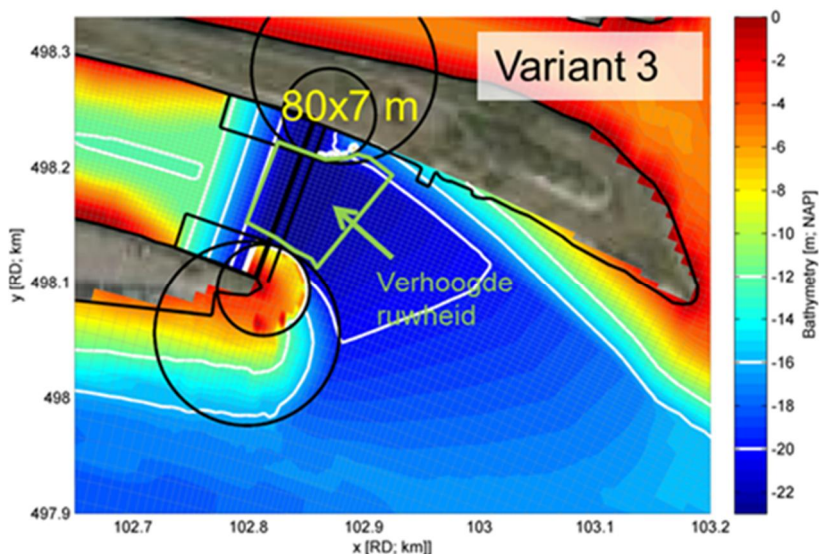
1.1 De SO-IJ voor de nieuwe sluis IJmuiden

Bij IJmuiden wordt een nieuwe grote scheepvaartsluis aangelegd als vervanging van de Noordersluis (einde levensduur) en om de schutcapaciteit te vergroten. Zonder aanvullende maatregelen ontstaat een toename van zoutindringing in het Noordzeekanaal en (verderop) het Amsterdam-Rijnkanaal. Rijkswaterstaat gaat de methode van Selectieve Onttrekking inzetten om de extra zoutindringing ten opzichte van de situatie zonder nieuwe sluis te mitigeren. Selectieve Onttrekking houdt in dat er tussen de Velserkom en het Binnenspuikanaal (BSK) een scherm wordt geplaatst, zie Figuur 1.1 met een diepgelegen opening (spleet), zodat alle afvoer van het spui- en pompcomplex onder uit de Velserkom wordt onttrokken in plaats van uit het relatief zoetere bovenste deel (Bijlsma en Weiler, 2017). Daardoor zal het afgevoerde water een hoger zoutgehalte bevatten dan voorheen, waarmee de extra zoutindringing gemitigeerd kan worden. Het maximale zoutgehalte onderin de Velserkom is dat van het zeewater (saliniteit ca. 30 psu, of chloridegehalte 16,6 g/l).



Figuur 1.1 Bodemligging bij het Sluizencomplex IJmuiden, met de positionering van de Selectieve Onttrekking IJmuiden (SO-IJ) tussen Binnenspuikanaal en Velserkom (Bijlsma en Weiler, 2017).

Voor de goede werking van de Selectieve Onttrekking is het wenselijk de spleet relatief diep aan te leggen. Aanvankelijk is uitgegaan van een spleet tussen -16 en -20 m NAP. Maar omdat er te weinig ruimte was voor een geometrie die een nette aanstroming uit de Velserkom en uitstroming in het BSK kon garanderen, is een variant bedacht die smaller en dieper is maar met eenzelfde doorstroomoppervlak. Het diepste punt van deze variant (SO-IJ Variant 3) is nu -23 m NAP, en vandaar loopt de bodem geleidelijk op tot de diepere delen (ten gevolge van erosie door schroefstralen) van de Velserkom (ca. -17 m NAP), zie Figuur 1.2. Onder het scherm zal een bodemverdediging nodig zijn. Mogelijk wordt met een dergelijke verdieping een ondoorlatende kleilaag in de bodem doorbroken.



Figuur 1.2 Selectieve Onttrekking Variant 3 met bodemligging in detail (Bijlsma en Weiler, 2017)

NB. Als mogelijke adaptieve maatregel voor de toekomst denkt men ook nog aan uitbreiding van de Selectieve Onttrekking met een “Zoutbufferpunt” in de Velserkom, bijv. tot -24 m NAP. De SO-IJ moet dan ook ev. verdiept worden, bijv. tot -25 m NAP.

1.2 Potentiële gevolgen van de SO-IJ via grondwater

In het vooronderzoek, de Quick-scan risico geohydrologische consequenties van ontwerp voor Selectieve Onttrekking bij IJmuiden (De Lange 2017), zijn de potentiële risico's geïnventariseerd van de SO-IJ, waarin het volgende beeld wordt geschetst.

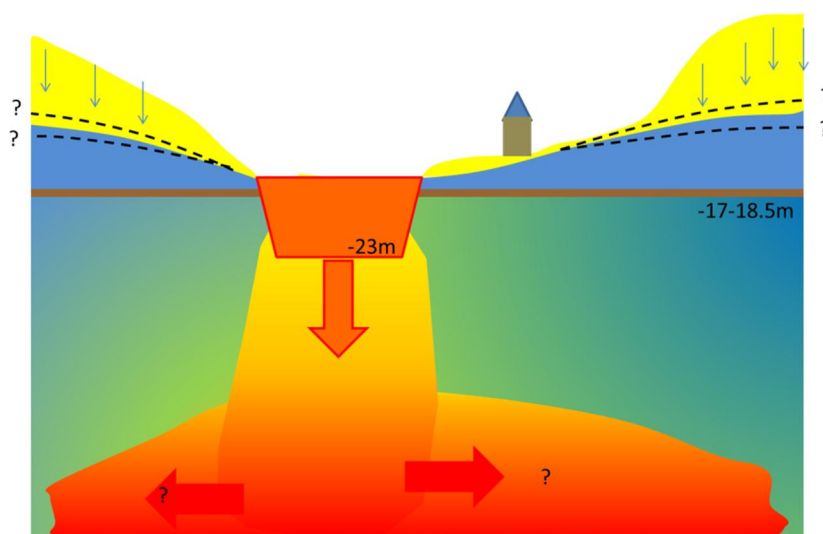
De doorgraving van de duinen bij IJmuiden voor de aanleg van het Noordzeekanaal sinds 1865 (Figuur 1.3) zorgt voor toestroming van grondwater vanuit de hogere duingebieden. Dat betekent dat er sinds meer dan 100 jaar in de bovenste zandlagen zoet water zijdelings door de oevers instroomt naar het kanaal en de sluis. In het midden van het brede watergebied kan zout grondwater inzakken. De hierdoor mogelijk optredende zoutbelasting van het achterliggende Noordzeekanaal is verwaarloosbaar ten opzichte van de zoutbelasting door schutverliezen.

De diepe ondergrond, dus ook onder de zoetwaterlens in de duinen, bevat zout grondwater dat omhoog komt in de lage polders in het achterland. In het gebied van het sluiscomplex wordt op een diepte van circa 100 meter ca 15 g Cl⁻/l aangetroffen. Naar boven wordt het minder zout. Tijdens de aanleg van de sluisen rond 1870 en 1928 is “in den droge” gewerkt tot dicht op of door de kleilaag op circa 18 meter beneden NAP. Daarom is het aannemelijk dat het zoutere grondwater toen lokaal tot nabij de kleilaag omhoog is gekomen.

De situatie in de huidige toestand is dan ook complex: naast de aanstroming van zoet duinwater langs de noord- en zuidoevers, kan in het midden van het gebied inziging van zwaar zoutwater optreden, omdat het zoute oppervlaktewater aanmerkelijk zwaarder is dan zoet water. Bij het weggraven van de eerste ondiepe scheidende laag (kleilaag op circa 18 m onder NAP) ten behoeve van de SO-IJ kan de ondergrond verzilten (Figuur 1.3) als er - zoals nu de plannen van RWS zijn - geen afdekkende folie ter compensatie wordt aangebracht. Deze processen hangen ook af van de stijghoogtes in de diepere lagen en zijn zodanig

gecompliceerd dat modellering nodig is om de effecten van de doorgraving te kunnen beschrijven.

De conclusie van de Quick-scan was dat het risico op toename van zoute kwel van de SO naar de omgeving moeilijk is in te schatten. Door het doorgraven van de kleilaag neemt de weerstand tegen grondwaterstroming af en kan verdere verzilting van de ondergrond optreden. Dit kan de zoetwatervoorraad onder de duinen negatief beïnvloeden, wat met oog op de duinecologie (vanaf 1 km) en de naburige (3 km noordwaarts) drinkwatervoorziening (wateronttrekking, risico van upconing) zorgvuldig moet worden bekeken. In de Quick scan is aanbevolen om dit te kwantificeren met een tweedimensionaal verticaal profiel model.



Figuur 1.3: Schema van probleemstelling: zwaar zout water stroomt naar diepe ondergrond

1.3 Doel van dit modelonderzoek

In vervolg op de Quick-scan (De Lange, 2017) heeft Rijkswaterstaat Deltares verzocht om het risico op toename van zoute kwel naar de omgeving verder te onderzoeken en nader te kwantificeren met een eenvoudig tweedimensionaal verticaal model. Het is de bedoeling van Rijkswaterstaat om het resultaat van dat onderzoek op te nemen in het projectplan Water in het kader van de Waterwet. In dit kader zijn als belanghebbenden aangemerkt:

- het drinkwaterbedrijf PWN
- Natura 2000 duingebieden ten noorden en ten zuiden van IJmuiden

Uiteindelijk zullen daarom ook de ecologische effecten van eventuele veranderingen van de zoetwatervoorraad in de duinen moeten worden beoordeeld. Voorgesteld wordt echter om eerst de hydrologische consequenties nader te kwantificeren, en de beoordeling van de ecologische effecten pas daarna te adresseren als bekend is of er effecten op de grondwaterstand optreden.

Voor de afbakening van het onderzoek is voorts relevant dat als “referentie toestand” de situatie met de Nieuwe zeesluis wordt bedoeld. De huidige studie omvat de analyse van de effecten van de perforatie van de afsluitende laag door de SO-IJ. Een mogelijke toekomstige uitbereiding met een zoutvang in de Velserkom wordt niet onderzocht.

Het doel van het model is om de mogelijke effecten van zoutindringing op de omgeving zo goed mogelijk te kwantificeren; zowel de verzilting van zoet winbaar grondwater als de veranderingen in de freatische grondwaterstanden en/of kwel in duinvalleien.

Het 2D verticaal model is een conceptueel model, dus zonder een uitgebreide parameter optimalisatie op basis van meetreeksen. De historische ontwikkeling van de zoutverdeling in de ondergrond wordt ingezet om modelparameters en randvoorwaarden te kalibreren.

In de evaluatie van de berekende effecten worden onzekerheden in parameters en randvoorwaarden meegenomen die van belang zijn voor de uitspraken. Het model geeft systeem begrip, logische verklaringen en een voorspelling van de effecten zodanig dat het potentiële risico van verzilting redelijkerwijs wordt gevonden of wordt uitgesloten.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het ontstaan van de huidige zout verdeling in het grondwater in de omgeving van het sluizencomplex in IJmuiden en de beoogde ingreep ten gevolge van de aanleg van de SO-IJ.

In hoofdstuk 3 wordt de opzet van het 2-dimensionale geohydrologische model beschreven.

Hoofdstuk 4 beschrijft de modellering van de historische ontwikkeling van de verdeling van zoet en zout grondwater, inclusief de inbreng van de SO-IJ in het model en de parameters waarvan de onzekerheid van invloed op de effecten van de SO-IJ kunnen zijn.

In hoofdstuk 5 worden de effecten van de SO-IJ ten opzichte van de referentietoestand (met de nieuwe sluis) gepresenteerd en geanalyseerd inclusief gevoeligheden voor veranderingen in parameters en in de onttrekking bij Tata Steel.

Hoofdstuk 6 sluit af met de conclusies en aanbevelingen.

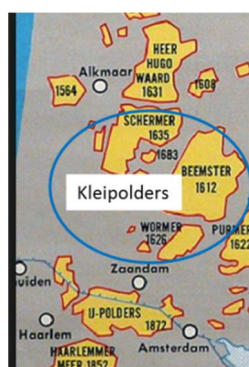
2 Beschrijving geohydrologie

In dit hoofdstuk wordt het ontstaan van de huidige geohydrologische situatie beschreven gericht op het voorkomen en de beweging van het (zoute) grondwater in het gebied van het sluiscomplex IJmuiden.

2.1 Historie aan maaiveld

2.1.1 Situatie voor 1870

Sinds de middeleeuwen (1400) is voor het onderzoeksgebied de groei van jonge duinen en de ontwikkeling van zoetwaterlens het belangrijkste geweest. Voor 1700 zijn er al droogleggingen van meren tot polders uitgevoerd. Door de kleibodem waren deze meren goed met windmolens te bemalen (Figuur 2.1). Deze droogmakerijen hadden daarom ook relatief weinig effect op het grondwater onder de duinen bij IJmuiden.



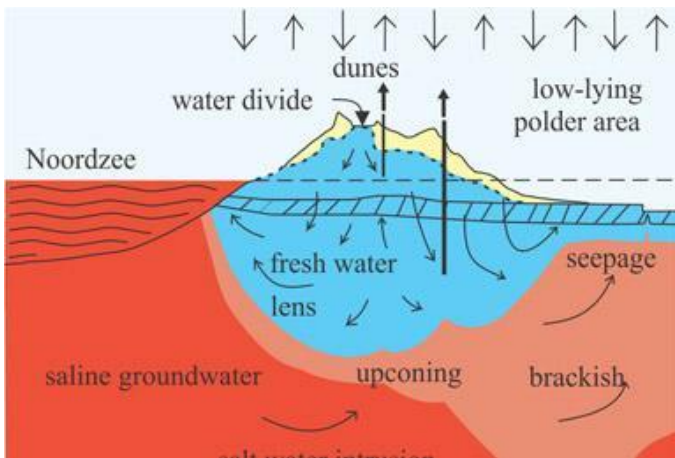
Figuur 2.1 Droogmakerijen in achterland van het gebied "IJmuiden"

Rond 1850 was de duinvallei als natte plek bruikbaar voor landbouw. De vallei werd enigszins gedraineerd. Daardoor wordt de zoetwaterlens afgetopt en beperkt in diepte (zie ook paragraaf 3.3).



Figuur 2.2 Duinvallei ingericht als landbouwgebied rond 1850 (uit Van venetien 1968)

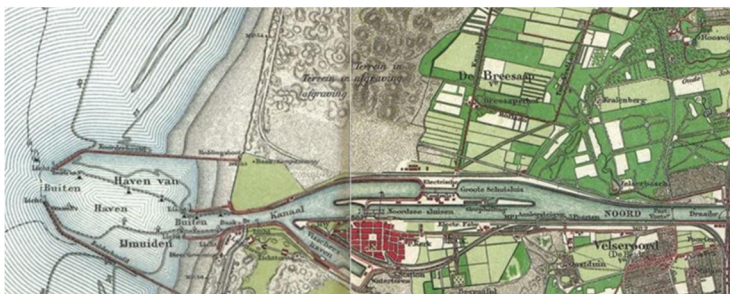
Na 1850 kon met inzet van het stoomgemaal (o.a. Cruquius) de Haarlemmermeer in 1852 worden drooggemaakt. De IJ-polder werd in 1872 drooggelegd tegelijkertijd met de aanleg van het Noordzeekanaal. Deze beide polders geven een significante verlaging grondwaterstand aan de binnenlandse zijde van de duinen (Figuur 2.3) en resulteren in toestroming van zout water van zee richting de polders onder de zoetwaterlens in de duinen.



Figuur 2.3 Schematisch beeld van stroming onder zoetwaterlens (G. Oude Essink)

2.1.2 Ontwikkeling 1870 - 1927

De aanleg van de sluisen - in den droge - en van het Noordzeekanaal hebben de geohydrologie in het gebied rond IJmuiden volledig veranderd. De natte vallei is verdwenen en het sluiscomplex genereert een sterke aanstroming van grondwater naar het oppervlakte water met peil rond zeeniveau.



Figuur 2.4 Situatie 1894 uit Grote Historische Atlas van Nederland (2006)

Het afgraven van de bovenste lagen van de duinen ten noorden van sluisen (Figuur 2.4, rechts) is mogelijk geworden door drainerende werking van het sluiscomplex en kanaal. De hoge opbolling van de zoetwaterlens is er verdwenen ter plaatse van de doorgraving.



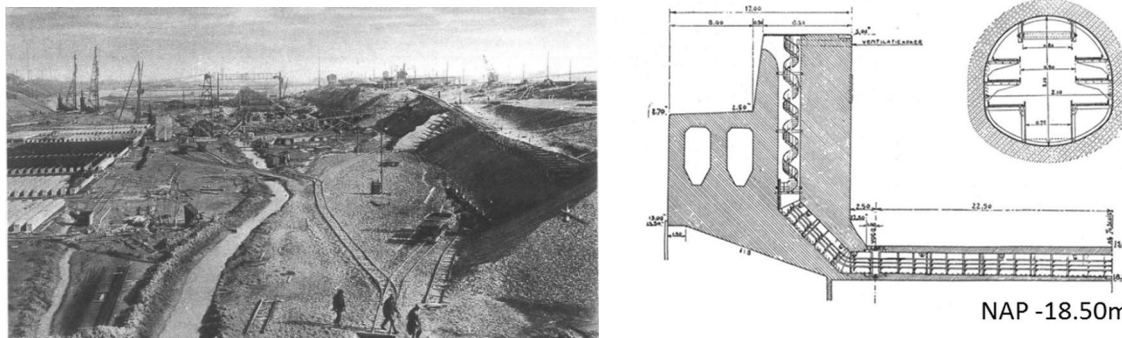
Figuur 2.5. Rode lijn is ongeveer NAP in ingekleurde litho door J.C. Greve van in aanbouw zijnde sluis rond 1870 (uit Van Venetien, 1968).

Tijdens de aanleg rond 1870 is de grondwaterstand in bouwput verlaagd tot circa -8 m NAP met behulp van open water drainage (Figuur 2.5). De bouw duurde circa 2 jaar. Daarna heeft

vrij continue verbreding van het Noordzeekanaal plaatsgevonden tot 36 m, en verdieping tot -9.50 m NAP.

2.1.3 Ontwikkeling 1927 - 1950

De bouw van de Noordersluis in 1927-1928 heeft tot grote verlaging van de grondwaterstand geleid door de open bemaling (Figuur 2.6): op circa NAP -16 m voor de sluiskolk.



Figuur 2.6 Foto van de bouwplaats rond 1927 (Uit Arends, 2001)

Tijdens de bouw van de sluishoofden is gelijktijdig een grondwaterstandsverlaging tot circa -20 m NAP gerealiseerd door (zoetwater) onttrekking onder de weerstandbiedende laag op zowel -18 m NAP als onder de laag op -40 m NAP om opbarsten in de (rondom gesloten) bouwput te voorkomen.



Figuur 2.7 Links: Verlagingen (in meters) in de freatische grondwaterstand over de periode 1850 - 1981, rechts stijghoogte patroon in zout grondwater (NAP -100 m) rond 1981 (Stuyfzand, 1993).

2.1.4 Ontwikkeling 1950 - 2015

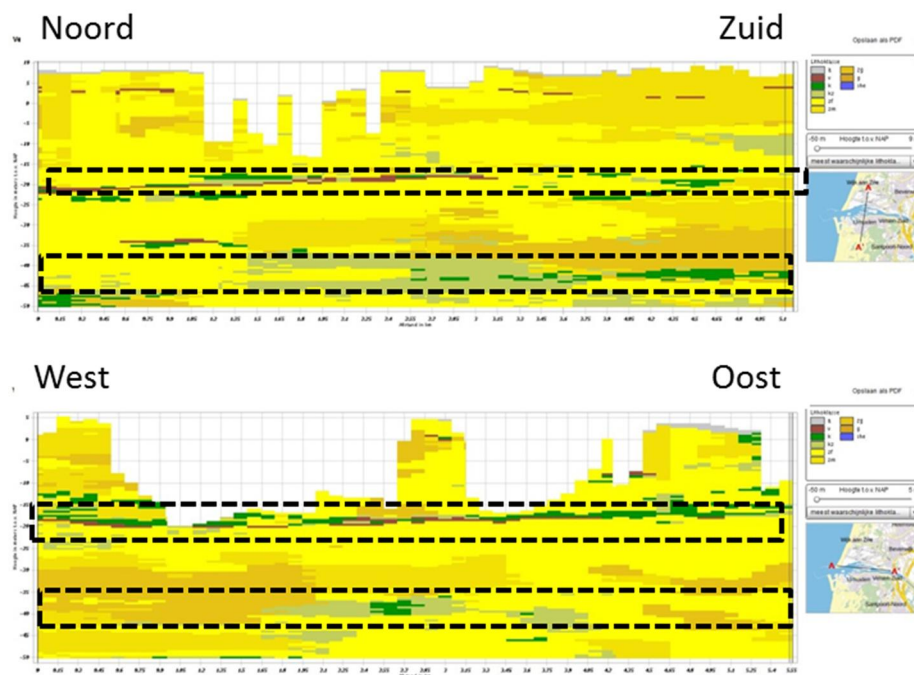
De uitbreidingen van het Noordzeekanaal leiden tot verdieping tot -15.50 m NAP en verbreding tot 370 m van de waterbodem. Deze verdieping en verbreding zijn echter geohydrologisch beperkt belangrijk. Het waterpeil blijft gelijk en de bodembreedte klein vergeleken met bij de sluis waar de duinen het sterkst worden gedraineerd.

De onttrekking van Hoogovens / Tata Steel is significant geweest, in de orde van $10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ over een periode van 10-tallen jaren aan het eind van de vorige eeuw. Uit het isohypsebeeld in het zoute grondwater van rond 1981 uit Stuyfzand (1993) (Figuur 2.7 rechts) blijkt dat een verlagingconus met een stijghoogte van -5 m NAP in een cirkel met diameter van circa 1 km rond de winning wordt gemeten.

2.2 Ondergrond opbouw

2.2.1 Bovenste 50 meter uit GeoTOP

Voor de bovenste 50 meter is GeoTOP (<https://ww.dinoloket.nl>) beschikbaar (Figuur 2.8).



Figuur 2.8 Doorsnedes uit GeoTOP boven: noord-zuid en onder: west-oost

Gecombineerd met de kennis uit Stuyfzand (1993) leidt dit tot de volgende karakterisering:

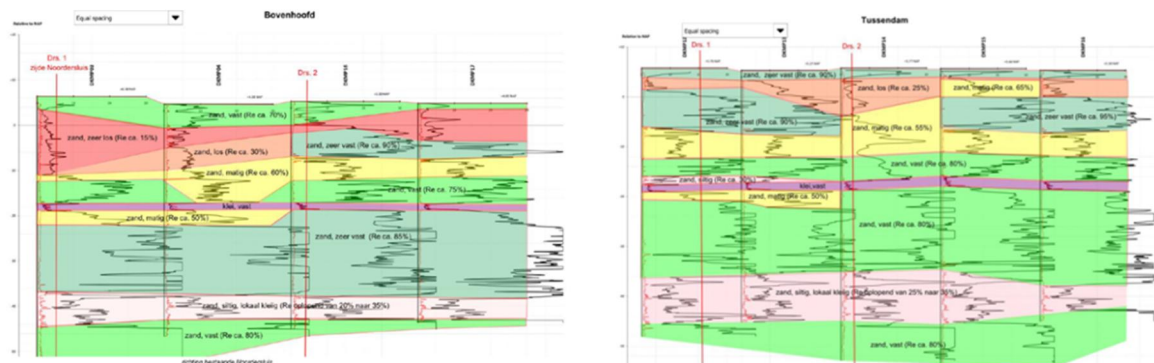
- De bovenste lagen bestaan uit eolische, fijnzandige afzettingen.
- Rond NAP komen veenlagen voor als lokale platen. Deze worden niet in het model meegenomen, omdat deze op de schaal van het profiel een verwaarloosbare rol spelen in de grondwaterstroming.
- Op circa -18 m wordt een dunne (circa 1 meter) zandige klei- en veenlaag aangetroffen (bovenste rechthoeken in profielen in Figuur 2.8) in het gebied van het sluiscomplex. Deze laag wordt in GeoTOP in het noorden niet aangegeven, mogelijk mede vanwege de weinige boringen. Op basis van de vele sonderingen wordt een continue laag

verwacht in het gebied van het sluiscomplex (zie volgende paragraaf) en wordt de laag aangehouden in het hele modelgebied.

- Op circa -40 m -tot - 60 m komen kleien van de Formatie van Drenthe voor ten noorden en zuiden van de locatie van de voormalige “natte vallei”. Daartussen, dus het huidige sluiscomplex, ligt een dikke, fijnzandige lemige laag op circa NAP -40 m diepte (onderste rechthoeken in profielen in Figuur 2.8).

2.2.2 Bovenste 50 meter uit recent onderzoek bij sluiscomplex

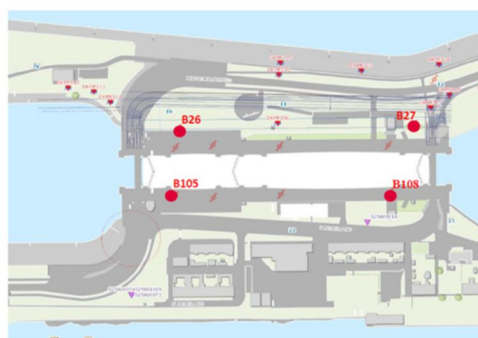
In voorgaande onderzoeken van Deltares (Stoevelaar en Verweij, 2013; Stoevelaar et al 2013) is de ondergrond bij het nieuwe sluiscomplex in detail onderzocht en zijn profielen gepresenteerd (Figuur 2.9).



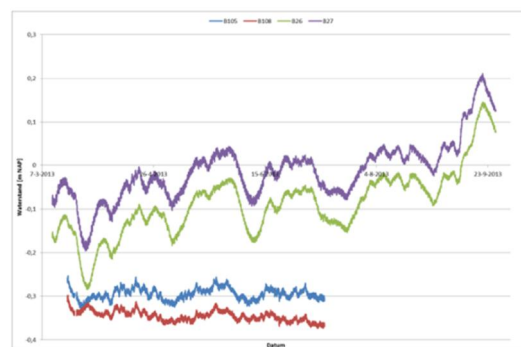
Figuur 2.9 Twee profielen als voorbeeld uit eerder Deltares onderzoek (zie tekst).

Op circa -18 m NAP blijkt ter plaatse van het sluiscomplex de klei/veenlaag in alle profielen aaneengesloten te zijn.

Midden in het sluiscomplex zijn grondwaterstanden boven en onder de laag op NAP -18m gemeten. De grondwaterstanden onder de laag vertonen een sterke demping van het getij en liggen ongeveer op niveau van het peil in het Noordzeekanaal (Figuur 2.10).



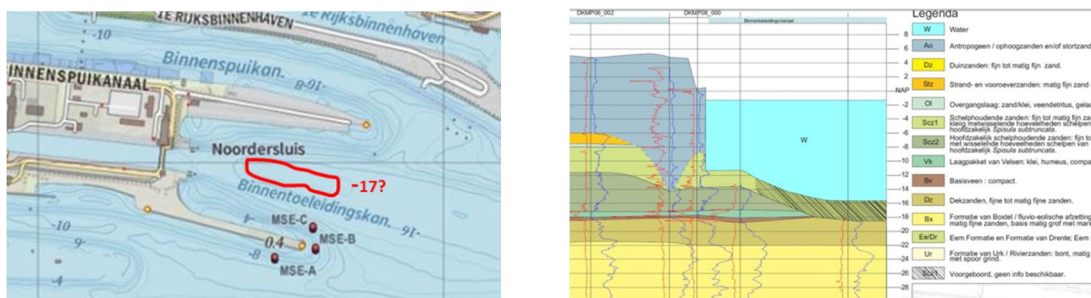
Figuur 45 Locaties geïllustreerde peilbuismetingen



Figuur 46 Freatische waterstanden midden sluis

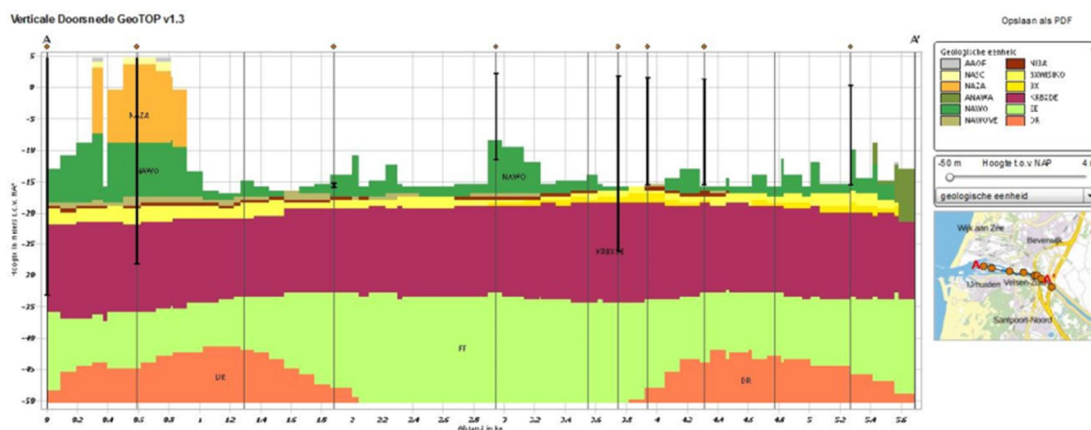
Figuur 2.10 Gemeten variatie in grondwaterstanden in centrum van sluiscomplex (paars en groen in eerste watervoerend pakket, rood en blauw freatisch pakket).

Ten oosten van de Noordersluis is een verdieping ontstaan door de werking van scheepschroeven van grote schepen (Figuur 2.11). Uit verslag van duikers (mondelijke mededeling K.J. Bakker, 8 maart 2017) blijkt dat de klei/veenlaag tussen -17 m en -18 m NAP verstoord is. Het gat is waarschijnlijk deels gevuld met slibachtig materiaal (aangevoerd vanuit het Markermeer), zie Figuur 2.11 rechts.



Figuur 2.11. Dieptekaart (links) en geologisch profiel (rechts), waarin de aanwezigheid van het slib door de geoloog-profielmaker is afgeleid uit de sondering.

Analyse: De gedempte variërende stijghoogte onder de laag op -18 m NAP op ongeveer Noordzeekanaalpeil wijst op dat er direct contact is tussen oppervlaktewater en grondwater ten oosten van de sluis. Dat betekent dat het mogelijk is dat de verdieping ten oosten van de Noordersluis een zwakte in de klei-veenlaag heeft veroorzaakt, maar het contact zou ook verder oostelijk kunnen liggen waar de leemlaag onder het kanaal in diverse trajecten afwezig is (beige en rood-paarse lagen op circa 18m -NAP in Figuur 2.12). Het is daarom ook mogelijk dat nog een weerstand resteert in de verdieping naast de Noordersluis.



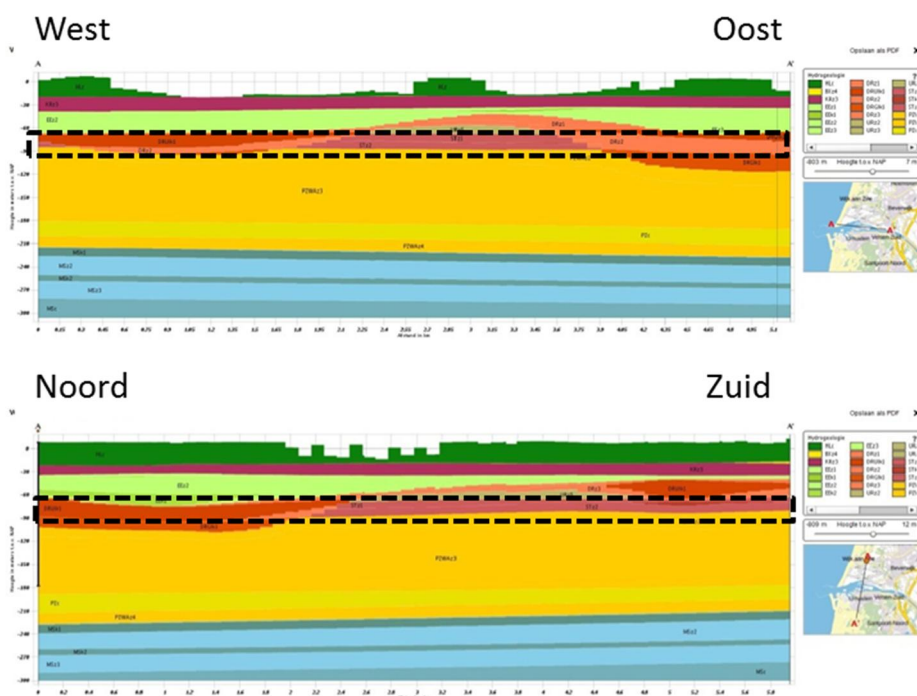
Figuur 2.12 Doorsnede door Noordzeekanaal uit GeoTOP

2.2.3 Ondergrond dieper dan 50 meter (REGIS)

Voor lagen dieper dan 50 meter zijn profielen uit REGIS (<https://ww.dinoloket.nl>) gepresenteerd (Figuur 2.13).

Op basis van REGIS en Stuyfzand (1993) is de volgende schematisering van de ondergrond opgesteld:

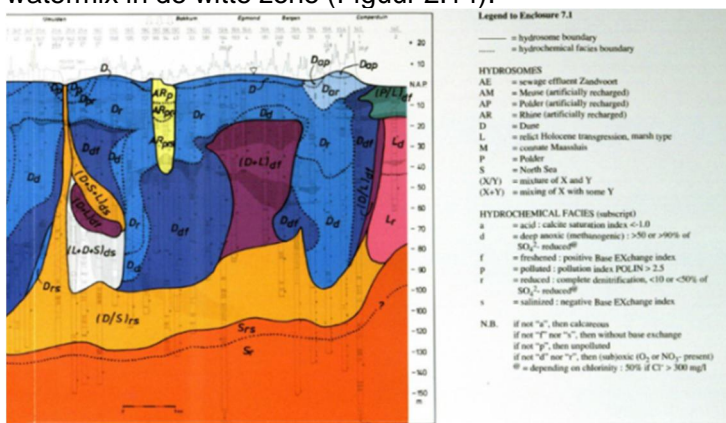
- De zanden onder de Drenthe klei, dieper dan - 40 à 60 m NAP zijn grof.
- Diepe basis van het systeem ligt op circa – 200 m NAP.



Figuur 2.13 Profielen (boven: oost-west, onder: noord-zuid) uit REGIS.

2.2.4 Diepte zoet-zout grensvlak rond 1981

Uit de toestand van 1981 uit Stuyfzand (1993) blijkt sprake van het optrekken van het grensvlak door de doorsnijdingen door de duinen bij IJmuiden. De invloed van de onttrekking van Hoogovens / Tata Steel in het zoute water is mogelijk aangegeven in de typering van de watermix in de witte zone (Figuur 2.14).



Figuur 2.14 Snede uit Stuyfzand (1993, bijlage 3). Zoet (blauw) en zout (rood) karakterisering van het grondwater onder de duinen in een profiel langs de kust.

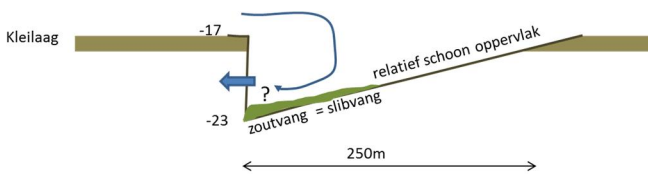
2.3 Ingreep SO-IJ

De SO-IJ is weergegeven in Figuur 1.2. Het oppervlak van doorsnijding varieert met diepte, en ter plaatse van de klei-veenlaag tussen -17 m en -18 m NAP is het oppervlak ongeveer 80 m breed en 250 m lang (Figuur 2.15).



Figuur 2.15. Variatie van de oppervlakte van de doorsnijding van de bodemligging van SO-IJ Variant 3 met diepte, afgeleid uit het gedetailleerde stromingsmodel van het Noordzeekanaal bij IJmuiden (Bijlsma en Weiler, 2017).

Het is duidelijk dat voor de SO-IJ de scheidende laag over een groot oppervlak wordt doorsneden. Door de sterk geforceerde stroming langs de bodem (Figuur 2.16) is het neerslaan van slibachtige laag niet waarschijnlijk. Wel is het mogelijk dat slib in de poriën van de onderliggende zandlaag komt. De lokale weerstand voor het inzijgende zoute water is waarschijnlijk dan ook relatief laag.



Figuur 2.16 Schematische doorsnede van SO-IJ gericht op grondwaterstroming

Het huidige gemiddelde zoutgehalte bij de bodem van de Velserkom is circa 13.8 g/l. Dat gehalte geldt ook voor het toekomst scenario waarin de extra zoutlast van de nieuwe sluis wordt gemitigeerd door de werking van de SO-IJ (Bijlsma en Weiler, 2017). Daarom wordt voor de berekening 13.8 g/l aangehouden als veilige gemiddelde waarde.

3 Opzet 2-dimensionaal verticaal model

In dit hoofdstuk wordt de achtergrond van het 2-D verticaal model beschreven.

3.1 Waarom een 2-D model?

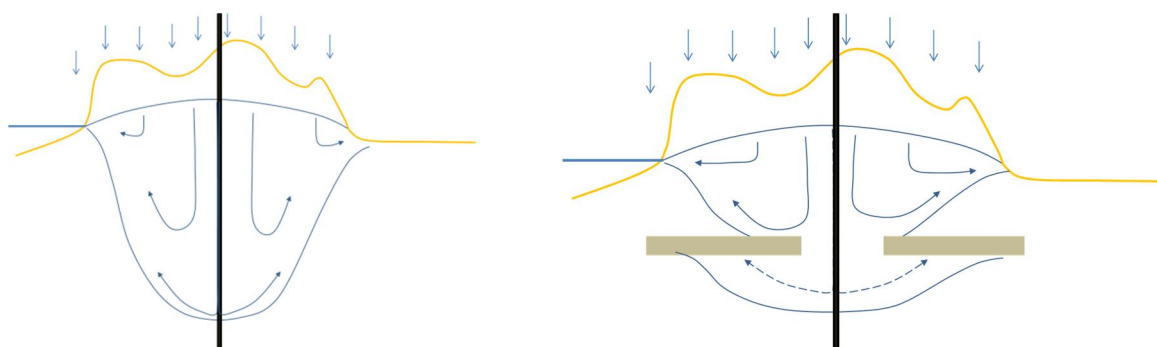
Waarom is voor een 2-D model gekozen, en is het goed genoeg? Hiervoor zijn de volgende redenen:

- Gekozen is niet voor een 3-D model omdat daarvoor de inzet vele malen groter is (meer gegevens, zwaardere, meer complexe berekeningen, meer historische onbekendheden, etc.).
- Ook is een symmetrisch of axiaal-symmetrisch model niet inzetbaar omdat meerdere randvoorwaarden die de zoutverdeling bepalen moeten worden opgenomen, zoals de onttrekking van Hoogovens / Tata Steel, de bestaande verdieping in de bodem bij de Noordersluis, de verdieping door de SO-IJ en de verdieping voor de nieuwe sluis. Al deze randvoorwaarden kunnen globaal in een 2-D zone worden opgenomen (zie ook Figuur 3.3). De stroming tussen de SO-IJ en de onttrekking bij Hoogovens / Tata Steel volgt een relatief smalle stroombaan (zie figuur 5.3) en is daarom ongeveer 2-D.

Uit eerder onderzoek (De Lange, 1986) is gebleken dat zoutbewegingen in een 2-D model sneller gaan dan in een 3-D (dus ook radiaal-symmetrisch) model, omdat de remming in de derde dimensie wordt verwaarloosd in 2-D. Mits de situatie zich daartoe leent zijn de berekende effecten in het 2-D model voldoende representatief, maar de snelheden van de veranderingen kunnen een overschatting zijn. Bij de vertaling van de modelresultaten naar de verwachte effecten wordt een interpretatie in de 3-D ruimte opgenomen.

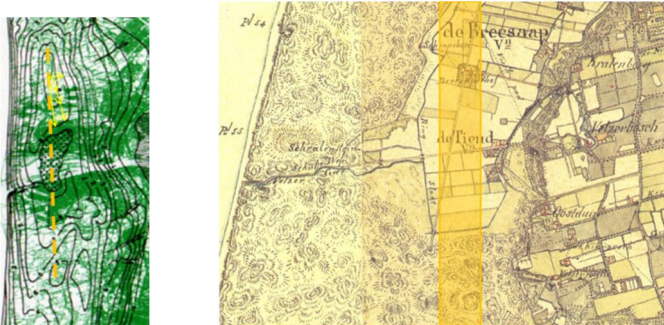
3.2 Locatie en representatie van het 2-D profiel

Het 2-D profiel ligt in de historische situatie (voor 1872) ongeveer op de waterscheiding in de zoetwaterlens (Figuur 3.1) in de duinen vrijwel in noord-zuid richting (Figuur 3.2). De diepte van het zoet-zout grensvlak wordt in dit geval ook bepaald door de aanwezigheid van scheidende lagen (leem, klei, veen) en gaten daarin (Figuur 3.1). Door het model op de waterscheiding te leggen is de afstand tot zee en ontwatering aan landzijde maximaal, waardoor het effect van (damping door) deze randen minimaal is (Figuur 3.2) waardoor veranderingen van het freatisch vlak minimaal gedempt worden. De veranderingen worden vanzelfsprekend wel gedempt door de drainerende oevers van het oppervlaktewater rond het sluiscomplex.



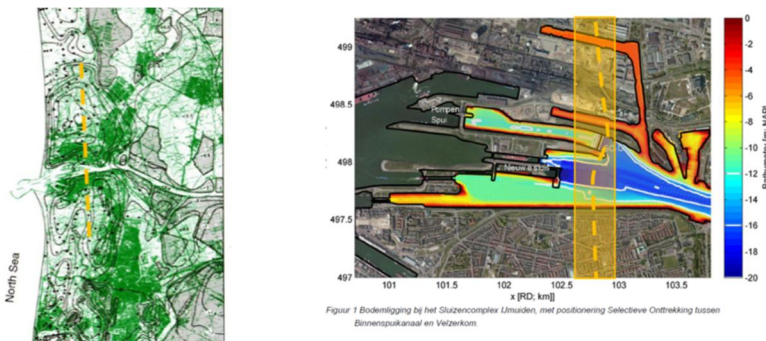
Figuur 3.1 Schema van zoetwaterlens met en zonder weerstandslaag.

Ter plaatse van het huidige sluiscomplex lag voor 1870 een natte duinvallei, de Breesaap (Figuur 3.2). Deze is als drainerend gebied ter plaatse van de waterscheiding in het model opgenomen.



Figuur 3.2 Positie 2-D profiel voor 1870 over ontwaterde duinvallei (de Breesaap), links uit Stuyfzand (1993), rechts uit Van Venetien (1968).

Met de aanleg van het kanaal en het sluiscomplex rond 1870 verdwijnt de natte vallei en wordt ten noorden van de doorgraving een groot deel van de duinen afgegraven omdat dit droog komt te liggen. Na de aanleg stroomt grondwater over de hele duinbreedte richting het nieuwe oppervlaktewater. Na 1870 is het 2-D profiel oostwaarts verschoven (Figuur 3.3) over het gebied waarin de SO-IJ, de 1^e Rijksbinnenhaven en de Staalhaven liggen (benamingen, zie figuur 1.1).



Figuur 3.3 Positie 2-D profiel na 1870, zie beschrijving in tekst

3.3 Algemene model indeling

3.3.1 Bovenrand model

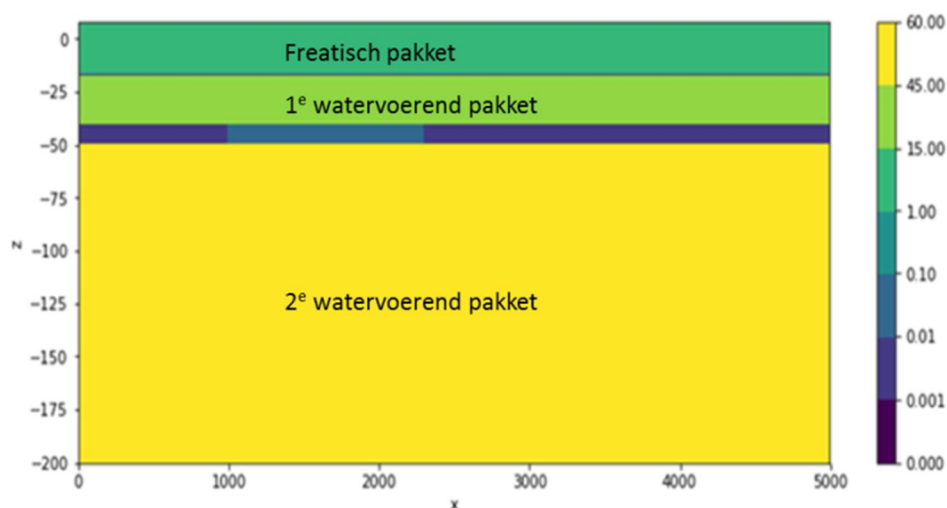
De bovenrand van het model verandert over de verschillende tijdvakken.

- Voor 1870 stond de natte duinvallei vaak onder water op ongeveer +6.5m NAP. De ontwatering was niet zeer intensief. Daarom schatten we een drainageweerstand van 10 dagen (zandgrond).
- Uit de gradiënt in de freatische grondwaterstand in Figuur 3.3 kan worden afgeleid dat in de situatie voor 1870 circa 30% van het grondwater in het bovenste pakket naar de duinvallei stroomt. Daarom wordt voor de grondwateraanvulling die afstroomt in het noord-zuid profiel van het model in de ongestoorde duinen van 0.4 mm/d opgenomen.
- Na 1872 verandert de gradiënt richting de doorgraving bij de sluisen en komt de grondwaterstand dieper onder maaiveld te liggen op de plaats waar eerst de duinvallei lag. In het afgegraven gebied wordt de grondwateraanvulling van 1.2 mm/d opgenomen, die voor dit model voldoende indicatief is voor zandgrond met diepe grondwaterstand.

- De hydrologische vertaling van de ingrepen, dus de aanleg en opeenvolgende toestanden van het sluiscomplex, na 1870 wordt beschreven in hoofdstuk 4.

3.3.2 Laagindeling en parameterwaarden

De in paragraaf 2.2 onderscheiden lagen zijn als volgt ingedeeld in drie watervoerende pakketten en twee scheidende lagen in het model (Figuur 3.4).



Figuur 3.4 Modellagen met doorlatendheid (kleur kolom legenda in m/d)

Tabel 3.1 Parameters van modellagen

modellaag	Naam	k_h (m/d)	c (d)	bovenkant (m NAP)
1	Freatisch pakket	10		8
2	1 ^e scheidende laag		2000	-17
3	1 ^e watervoerend pakket	40		-18
4	2 ^e scheidende laag		4000/400	-40
5	2 ^e watervoerend pakket	50		-50
	Basis van model			-200

- Het freatisch pakket is matig doorlatend (10 m/d) en matig anisotroop ($k_v=k_h/3$)
- De eerste scheidende laag bestaat uit zandige leem/klei/veen laag op circa NAP -18m. Deze is dun maar wordt overal in het sluiscomplex gebied aangetroffen (weerstand ca 2000 dagen).
- Het eerste watervoerende pakket onder eerste scheidende laag bestaat uit matig grof zand (40m/d)
- De tweede scheidende laag op circa NAP -40m tot -50m bestaat uit de Formatie van Drenthe kleien in noorden en zuiden (4000 d) en ter plaatse van IJmuiden uit meer zandige klei/leem (400 d).
- Het tweede watervoerende pakket bestaat uit grof zand (50m/d) tot aan de basis op NAP -200m.

3.4 Modelleertechniek en bestandsbeheer

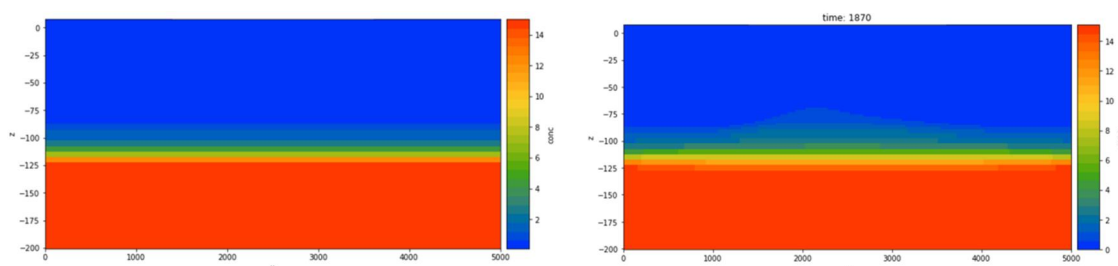
Het model is ontworpen in Python scripts en is berekend met iMOD-SEAWAT (<https://www.deltares.nl/nl/software/imod-2>) als een verticaal model met een breedte van 1 meter dat de zwaartekrachtstroming door dichtheidsverschillen meeneemt in de berekening.

De invoer bestanden bestaan uit Pythonscripts voor elke modelrun en worden opgeslagen in de projectmap en centraal beheerd, zodat het model ook na langere tijd reproduceerbaar is.

4 Modelling

Dit hoofdstuk beschrijft de modellering van de historische ontwikkeling van de verdeling van zoet en zout grondwater in aanvulling op de beschrijving van hoofdstuk 3.

Het model start met een initiële zoutverdeling in 1200 (Figuur 4.1 links), waarna ongeveer 7 eeuwen wordt doorgerekend. Het effect van de ontwatering in de natte duinvallei, de Breesaap (Figuur 3.2) is dat het zout langzaam optrekt (Figuur 4.1, rechts).

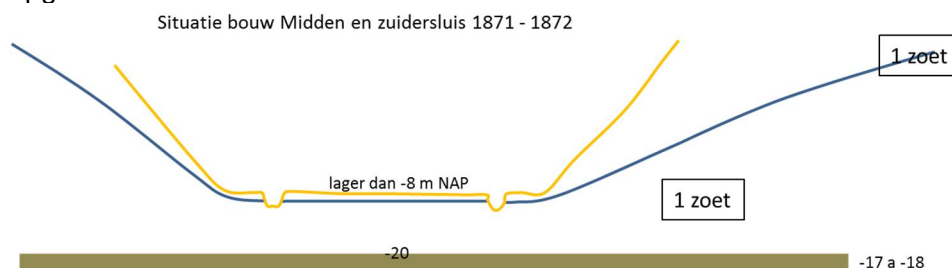


Figuur 4.1 Initiële zoutverdeling (links) en de verdeling na ca. 7 eeuwen doorrekenen (rechts)

Deze zoutverdeling wordt aangenomen te zijn opgetreden bij de aanvang van de bouw in 1870. Vanaf dat moment wordt ook de verlaging van de diepe stijghoogte door aanleg van de droogmakerijen in het model opgenomen.

4.1 Periode 1871 - 1927

Tijdens de bouw in 1871 (Figuur 2.5) wordt afgegraven tot dieper dan NAP -8m en wordt ontwaterd met behulp van watergeulen. In het model wordt dat in onderstaand schema opgenomen.



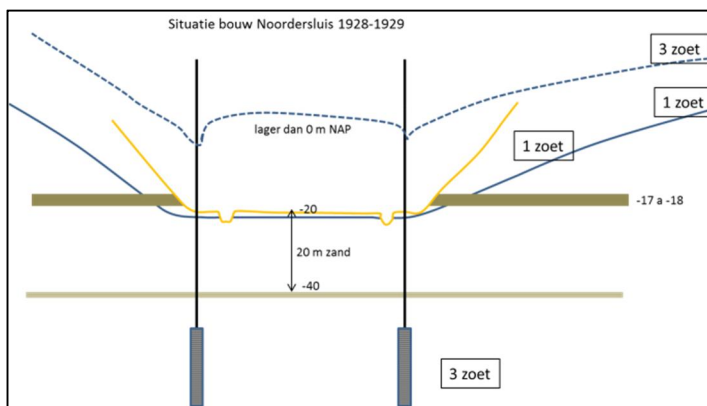
Figuur 4.2 Schematisatie van de bovenrand tijdens aanleg 1871-1872 in (gele lijn is de bodemligging, blauwe lijn is het freatisch vlak na ontgraving in modellaag 1 zoet)

De overgang in de grondwatertoestand is niet-stationair: door de daling van het freatisch vlak is er bergingsverandering. Dit is voor de verandering in de zoet-zout verdeling in de ondergrond echter niet relevant. Daar is vooral de verticale aanstroming vanuit de diepte van belang. Daarom kan met een model zonder bergingsverandering (stationair model) worden gerekend waarin de stromingssituatie over een jaar gemiddeld wordt.

Na de bouw rond 1872 ligt de gemiddelde waterstand aan de binnenlandse zijde van het sluiscomplex vast op NAP -0.40m. Het ondiepe zoete grondwater uit de duinen stroomt door de noord en zuid taluds naar het gegraven oppervlaktewater. De potentiaal in het diepe watervoerend pakket, het zoute pakket, is verlaagd tot -2 m NAP als gevolg van de aanleg van de polders in het achterland.

4.2 Periode 1927- 1950

Rond 1927-1928 wordt de Noordersluis gebouwd in een droge put (gele lijn in Figuur 4.3) met oppervlakkige ontwatering op -16m (blauwe lijn (1 zoet) Figuur 4.3). Voor de sluishoofden is een rondom gesloten damwand geplaatst tot aan de tweede scheidende laag op -40m waaronder zoet grondwater is onttrokken tot circa NAP -20m (blauwe stippellijn (3 zoet) Figuur 4.3) om opbarsten te voorkomen (Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Schematisch profiel over sluiscomplex tijdens bouw 1927 – 1928.

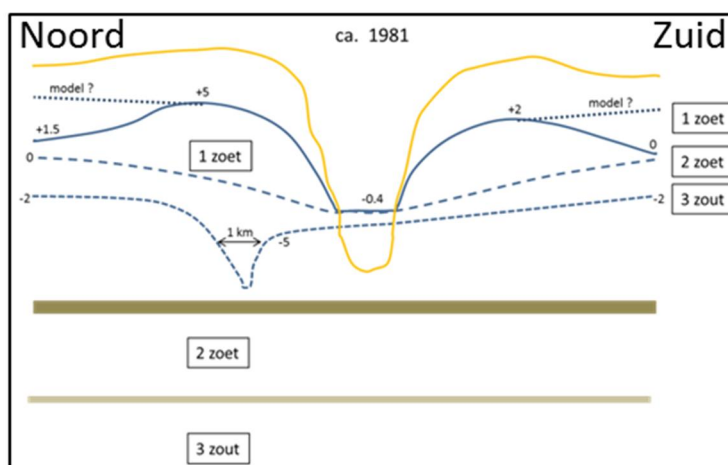
Na de bouwperiode is de toestand voor het model vergelijkbaar met ervoor behoudens de verbreding van de toeleidingskanalen.

4.3 Periode 1950 -2015

Vanaf 1950 heeft de vergroting van de schepen tot gevolg dat bij de Noordersluis een lokale verdieping tot NAP -17 m ontstaat door scheepschroefwerking. Het is waarschijnlijk dat de scheidende laag tussen NAP -17 m en -18 m daardoor is verstoord. Voor het model is aangenomen dat desondanks daar enige weerstand achterblijft omdat of de scheidende laag nog deels in tact is, of de poriën gevuld zijn met slibachtig materiaal (zie paragraaf 2.2.2).

Voorzover bekend is de onttrekking van zout koelwater bij Hoogovens / Tata-staal, in de jaren 50 begonnen met een omvang van rond $10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Deze onttrekking wordt in het 2-D model gegenereerd door een daarop passende grootte. Deze is bepaald op basis van de gradiënt in de diepe grondwaterstand rond 1981 weergegeven in Figuur 2.7 rechts.

De model condities op de zijranden voor de periode 1950 -2015 in Figuur 4.4 (zie uitleg in paragraaf 4.3, hier: grove stippellijn (2 zoet) is stijghoogte in eerste watervoerend pakket) zijn afgeleid uit interpretatie van stijghoogtes voor rond 1981 in bijlage 3 van Stuyfzand (1993).



Figuur 4.4 Geschematiseerde grondwaterstanden rond 1981 uit Stuyfzand (1993, bijlage 3)

4.4 Overzicht van randvoorwaarden historische ontwikkeling

De historische ontwikkeling van de grondwaterstroming wordt dan ook gesimuleerd door opeenvolgende randvoorwaarden aan de bovenzijde van het model (tabel 4.1).

Tabel 4.1 Parameterwaarden voor de onderscheiden tijdvakken (d = dagen)

	Lokatie	Sluis complex: bouwput				Manoeuvreerkolk oost				Diepe onttrekking	
		Omschrijving	Peil	weerstand	Breedte	Omschrijving	Peil	weerstand	Breedte	Omschrijving	Stijghoogte
1200	Breesaap	niet in model				Vallei	+6.5m	c0 = 10 d	2000m		
1870	Zuidersluis	sluishoofd gesloten kuip	-11.0m	c0 = 10 d	80 m	vallei vervalst; niet in model					
1872	Middensluis	niet in model				Kolk voor M+Z.sluis	-0.40 m	c0 = 100 d	300 m		
1923	Noordersluis	sluishoofd sluis-kolk	-20.5m -8.0m	c0 = 10 d c0 = 50 d	30 m +70 m	kolk blijft buiten bouwput	-0.40 m	c0 = 100 d	300 m (-100m)	Spannings bemaling 1e en 2e wvp	-20.5 m
1928	+ Spuisluis, Hoogovenhaven	niet in model				+Binnenhaven Staalhaven Noord	-0.40 m	c0 = 100 d	+ 800 m 80m op 600m		
1950	Geen effect	niet in model				+ verdieping scheepsstroom	-0.40 m	c0= 100 d	+ 30 m	Hoogovens bemaling 2e wvp	gradient 1981
2015	Nieuwe sluis	niet in model				verdieping oost van nieuwe sluis	-0.40 m	c0= 100 d	+ 80 m	Onttrekking blijft in model	

4.5 Gevoeligheidsanalyse voor parameters in het historisch model

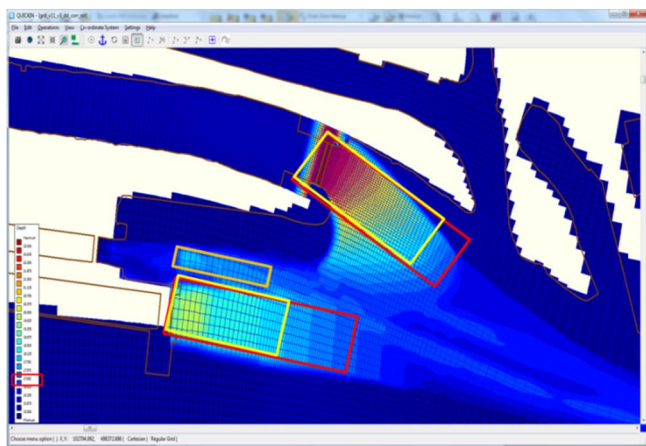
Tijdens de simulaties van de historische ontwikkeling zijn alle modelparameters (behalve de laagdiktes) onderzocht om een ontwikkeling van de zoutverdeling te simuleren, die aansluit bij de informatie van Stuyfzand (1993). Daarbij is de ontwikkeling van 1200 tot 1870 gebruikt om de doorlatenheden en weerstanden in het model te bepalen. De resulterende parameter set is in tabel 3.1 weergegeven. Deze parameterwaarden van de ondergrond sluiten goed aan bij de karakterisering van de lagen in GeoTOP en REGIS.

De weerstand van de in 1870 gegraven waterbodem (100 d, tabel 4.1) is afgeleid uit de simulatie tijdens de bouw van de Noordersluis in 1927 toen er drinkwater is geleverd aan de omliggende dorpen en het onttrokken water dus zoet moet zijn geweest.

De grootte van de onttrekking bij Tata Steel is gevarieerd tijdens de vertaling van radiale stroming in het 2-D model. Zolang de onttrekking werkt, blijkt de grootte ervan nauwelijks een rol te spelen op de effecten van de SO-IJ (zie hoofdstuk 5).

4.6 Vertaling van SO-IJ in de modelrand

In onderstaande Figuur zijn de contouren van doorsnijding van de eerste scheidende laag aangegeven van de verdiepingen bij Noordersluis, Nieuwe sluis en SO-IJ. Voor het model wordt uitgegaan van de breedte van de doorsnijdingen in ongeveer noord-zuidrichting langs het 2-D profiel. Dat is circa 80 m voor beide nieuwe verdiepingen en 30 m voor de bestaande geul.



Figuur 4.5 Contouren van doorsnijdingen van de klei-veenlaag tussen NAP -17 m en -18 m op basis van de bodem uit het Delft3D detailmodel uit Bijlsma en Weiler (2017).

4.7 Parameters voor gevoeligheidsanalyse voor de effecten van de SO-IJ

De belangrijkste onzekere parameters voor de effecten van de SO-IJ zijn de weerstanden in de directe omgeving van de ingreep. Daarvan is de onzekerheid over het al dan niet dichtslaan van de waterbodem het grootst. De volgende scenario's (tabel 4.2) worden doorgerekend om de afweging van de effecten van de SO-IJ, ook ten opzichte van de effecten van de nieuwe sluis, te ondersteunen.

B.1: Het realistische worst-case scenario gaat uit van grote dynamiek in de waterbeweging over de bodem bij de SO-IJ met weinig gelegenheid om slib tot neerslag te laten komen (weerstand 10 d). In de verdieping bij de nieuwe sluis ontstaat op diepte in de bodemmatrix een sliblaagje door slib dat wordt meegevoerd met de neerwaartse stroming van het zoute water door de bodembedekking (weerstand 100 d). In dit geval overheerst de instroom bij de SO-IJ de zoutindringing in het grondwater.

B.2: Uit het milieukundig onderzoek aan de waterbodem (RoyalHaskoningDHV, 2014) blijkt dat aan de oostzijde van het sluiscomplex klasse A en B (slib) wordt aangetroffen afkomstig vanuit het oosten (Markermeer). Het is daarom mogelijk dat de ingedaalde sliblaag aangroeit tot enkele centimeters dikte in de bovenste poriën.

B.3: In de zone ongeveer onder het sluisgebied is de weerstand van de 2^e scheidende laag een tiende van die in de rest van het model (zie Figuur 4.3). Dit geeft in het model relatief sterke neerwaartse stroming in het sluisgebied en dus sterke zout indringing. Verhoging van de weerstand geeft vermindering van indringing en mogelijk meer ondiepe verspreiding en effect op de freatische waterstand. Het is realistisch dat deze weerstand factor 2.5x hoger kan zijn. Daarom wordt een simulatie met 1000 d in plaats van 400 d uitgevoerd.

Tabel 4.2 Parameterwaarden in gevoeligheidsanalyses voor SO-IJ

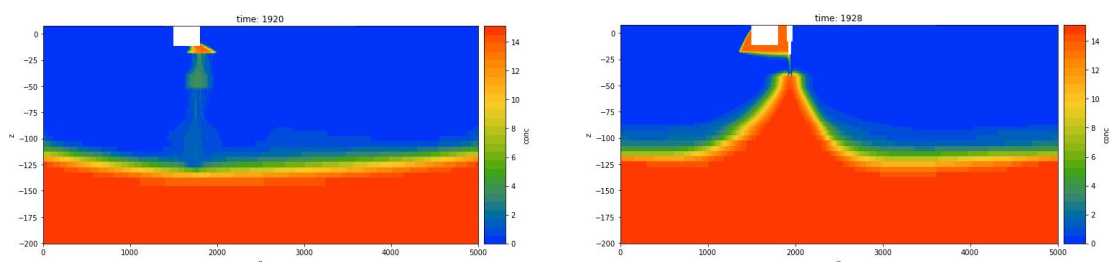
Scenario		Gat SO-IJ		Gat Nieuwe Sluis	
Meest waarschijnlijk	B.1	NAP-18m	c1=10	NAP-18m	c1=100
SO-IJ meer slib	B.2	NAP-18m	c1=100	NAP-18m	c1=100
2e scheidende laag	B.3	c=1000d ipv 400d			

5 Analyse van de modelresultaten

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de berekeningen van de uitgangssituatie en de analyse van de effecten van de SO-IJ met de daarbij behorende parameters beschreven in respectievelijk paragraaf 4.6 en 5.2.

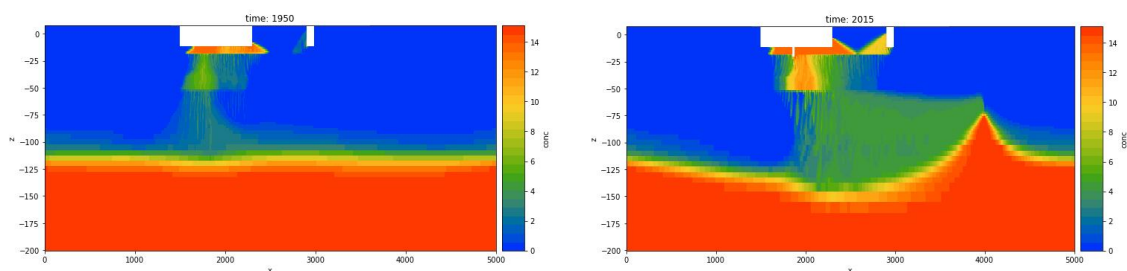
5.1 Modelresultaten van de historische ontwikkeling

Vanaf de startsituatie rond 1200 is tot rond 1870 de zoutbeweging in de diepe ondergrond doorgerekend (zie Figuur 4.1) zonder rekening te houden met droogmakerijen. Die worden in de berekeningen vanaf 1870 meegenomen door de diepe stijghoogte (in het tweede watervoerend pakket) met 2 meter te verlagen. Tijdens de aanleg rond 1870 blijkt de zoutverdeling in de ondergrond nauwelijks te wijzigen in het model. Na 50 jaar, rond 1920 (Figuur 5.1 links) is in de directe omgeving verzilting opgetreden. Het gebied in het bovenste watervoerend pakket wordt beperkt door de permanente kwelstroom van zoet duinwater naar de oevers van de doorsnijding. In het eerste watervoerend pakket is de verzilte zone ook beperkt. Daar heerst een neerwaartse stroming - hoofdzakelijk via de zone met verlaagde weerstand van 400 d - naar het tweede pakket waarin de stijghoogte rond 2 meter onder NAP ligt door de droogmakerijen. In het tweede watervoerend pakket daalt het zout tot de diepte waarin de dichtheid gelijk is aan dat van het aanwezige zoute water.



Figuur 5.1 Situatie zoutverdeling berekend voor 1920 (links) en 1928 (rechts), witte insnijding is sluis / haven.

Tijdens de aanleg rond 1928 wordt op een diepte van ca. 40 meter zoet water onttrokken om het opbarsten van de bodem binnen een diepe bouwput te voorkomen. In het model geeft dit een opgetrokken zoutverdeling tot in de winning (Figuur 5.1 rechts). Dat is waarschijnlijk een overdrijving omdat het model een lange rij van putten (2-D) simuleert in plaats van een groep rond een bouwput (radiaal). Het opgetrokken zout verdwijnt binnen 10 jaar in het model en is daarom voor de vervolg van de berekeningen niet belangrijk. In de periode tot ca. 1950 (Figuur 5.2 links) is het gebied waarin zout is ingezakt groter dan rond 1920 en volgt hetzelfde patroon als in vorige alinea beschreven is.



Figuur 5.2 Situatie zoutverdeling berekend voor 1950 zonder Tata-Steel onttrekking (links) en 2015 (rechts) met Tata-Steel onttrekking, witte insnijding is sluis / haven.

De onttrekking bij Hoogovens / Tata Steel is vanaf 1951 in het model opgenomen. De zoutverdeling heeft in 2015 een stabiele situatie bereikt in het model (Figuur 5.2 rechts). Door de extra verlaging door de onttrekking in het tweede watervoerend pakket verplaatst het zout vanuit de doorsnijding zich sneller en richting onttrekking. De zones in het eerste en tweede watervoerend pakket zijn gelijk qua vorm als in 1950 maar verder ontwikkeld (Figuur 5.2 links). De zone in het tweede watervoerend pakket is ook verder ontwikkeld asymmetrisch begrensd en is verschoven in de richting van de onttrekking. Van bovenaf gezien is de zone tussen de lekkage uit de sluiscomplex wateren en de onttrekking een smalle stroombaan (Figuur 5.3). De stroming is ongeveer 2-D.

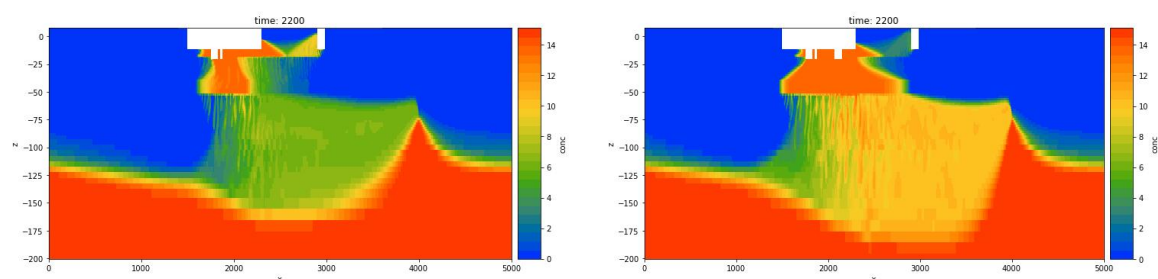


Figuur 5.3 Stroombaan op basis van hydrologische situatie rond 1981 (links) en beïnvloedingszones in tweede (blauwe lijn) en derde (geel) watervoerend pakket vanuit positie van de SO-IJ richting onttrekking (Hoogovens / Tata Steel).

In de huidige situatie (2015) beschrijft het model dat (mogelijke) verzilting vanuit het oppervlakte water in een besloten en beperkt gebied plaatsvindt. Dat verklaart waarschijnlijk waarom er veelal zoet water wordt aangetroffen in het grondwater in de directe omgeving van het sluiscomplex.

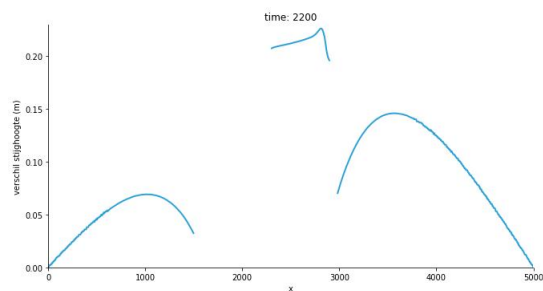
5.2 Modelresultaten van de effecten van SO-IJ

De doorsnijdingen van de eerste scheidende laag door de beide nieuwe ontwikkelingen in het sluisgebied zijn bepalend voor de hydrologie in de toekomst. In Figuur 5.4 is links de situatie in 2200, de relevante eindsituatie, met de doorsnijding bij de Nieuwe Sluis (weerstand 100 d) aangegeven en rechts met daarbij de SO-IJ (weerstand 10d). Door de lagere weerstand van de SO-IJ-bodem in het model neemt de zoutconcentratie in dat geval in laag 3 toe van licht brak naar licht zout en is de zone in laag 2 vergroot in het gebied $x = 2500 - 2700$ m. Het geheel blijft een besloten volume, vergelijkbaar met de huidige situatie, zie Figuur 5.2 rechts.



Figuur 5.4 Berekende zoutverdeling in 2200. Links met Nieuwe Sluis met bodemweerstand 100 d en rechts met daarbij SO-IJ met bodemweerstand 10 d, witte insnijding is sluis / haven.

De verschil-verandering door de SO-IJ in de freatische grondwaterstand op 500 m van de doorsnijdingen ligt in de orde van 0.15 m (Figuur 5.5). De maximale verhoging van meer dan twee decimeter treedt op in het centrum van Figuur 5.5 ter plaatse van het sluiscomplex. Ter plaatse van het oppervlakte water treedt in het model geen verandering op (discontinuïteiten tussen 1500-2500 en bij 3000 op de x-as in Figuur 5.5). Nabij het oppervlaktewater wordt de verandering door het uitstroombepalende peil gedempt. De verhoging ontstaat doordat het zoute water meer gewicht inbrengt in het oorspronkelijke zoete gebied boven de oorspronkelijke zoutverdeling. Opgeteld in de verticaal zorgt dat voor een diepe zoetwaterstijghoogte die in het centrum van de zoutinfiltratie enkele decimeters hoger wordt dan voorheen. Het diepe zoute water wordt weggedrukt (zie het rode gebied in Figuur 5.4). In een vergelijkbaar geval met een zoetwaterlens boven dat zoute water kan dat wegdrücken alleen als de freatische grondwaterstand hoger wordt. Dit is wat er nu, maar dan met een "zoutige waterlens", gebeurt in het model. De verhoging is begrensd in grootte door de begrenzing van de zoutconcentratieverandering (Figuur 5.4), die niet wordt gedempt door de randvoorwaarden.



Figuur 5.5 Verhoging grondwaterstand rond 2200 voor de situatie Figuur 5.4 rechts ten opzichte van Figuur 5.4 links.

De stijging van de freatische grondwaterstand dempt uit met de afstand tot de SO-IJ. In het model wordt de stijging op de rand gedempt. In de werkelijkheid gebeurt de demping door de verandering van de afvoer van het duinwater aan de kust en de lage gebieden aan de duinvoet en de polders aan de binnenlandse zijde. Om dit nader te bepalen zou een 3D model nodig zijn. De grootte en richting van de verandering zijn echter zodanig dat geen relevante effecten worden verwacht voor de natuur in het omliggende duingebied.

5.3 Gevoeligheidsanalyse gericht op de effecten van SO-IJ

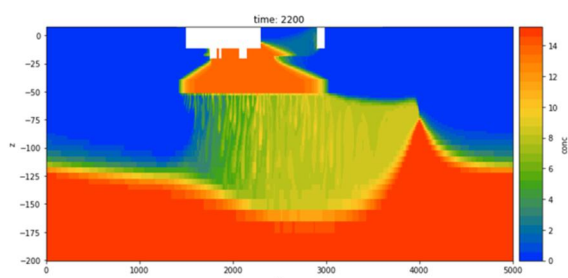
De onzekerheid rond de effecten van de SO-IJ is in twee categorieën in te delen: onbekendheid van de ondergrond, en wijziging in de onttrekking van Tata Steel (menselijk ingrijpen). De effecten van deze onzekerheden worden hier apart beschreven, gebaseerd op berekeningen en hydrologische analyse van de situatie. De beschrijving is gebaseerd op berekeningen en hydrologische analyse van de situatie.

5.3.1 Gevoeligheid van effecten van de SO-IJ voor bodemparameters

De bodemweerstand bij ieder van de twee doorsnijdingen van de eerste scheidende laag kan lager of hoger zijn dan beschreven in paragraaf 5.2 (Figuur 5.4). Een weerstand van 100 dagen representeert een sliblaag (in westelijk Nederland) van een tot enkele centimeters (De Lange, 2011). Een waarde van 10 dagen treedt op als slib in de poriën komt en is waarschijnlijk de minimaal-realistische waarde. Een waarde van 1000 dagen ontstaat als er een sliblaag van orde decimeter kan worden vastgesteld bijvoorbeeld bij monsternamen. Uit Figuur 5.4 blijkt dat het verschil tussen 10 en 100 dagen een significant grotere instroom van

zout genereert. Dit verschil geldt ook voor de doorsnijding bij de Nieuwe Sluis. Zonder de SO-IJ zal de zoutverdeling in het tweede watervoerend pakket ongeveer gelijk zijn aan dat in Figuur 5.4 rechts. Als de weerstand van de SO-IJ rond 100 d is zal het totale effect van beide doorsnijdingen ongeveer gelijk zijn aan Figuur 5.4 links. Een hogere weerstand zal leiden tot lagere zoutgehalten in dezelfde zone. Kortom, de zoutgehalten zullen variëren bij variatie van de bodemweerstand maar de omvang van het beïnvloede gebied nauwelijks.

Verhoging van de weerstand van de 2^e scheidende laag onder het sluisgebied heeft meer effect in de bovenste lagen. Figuur 5.6 laat zien dat de zone in de bovenste watervoerende pakketten nauwelijks breder wordt dan in Figuur 5.4 rechts. Dat komt door de blijvende aanstroming van zoet water vanuit de hoge duinen naar de noordoever.



Figuur 5.6 Zout verdeling in 2200 bij verhoging weerstand van 2^e scheidende laag 1000 d.

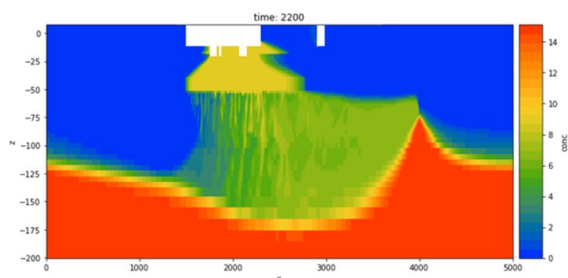
Bij lagere weerstand van de 2^e scheidende laag in dit gebied zal de verticale stroming naar het tweede watervoerend pakket toenemen en de breedte van de zone in het eerste pakket iets afnemen. Het beïnvloede gebied in de tweede laag verandert daardoor echter niet en wordt iets kleiner in het tweede watervoerende pakket.

De breedte van de zone langs de stroombaan naar de onttrekking bij Tata Steel / Hoogovens blijft beperkt door het overige aanstromende zoete water vanuit de duinen en omgeving van de onttrekking.

De variatie van de weerstand van de tweede scheidende laag geeft dus niet een significant andere uitkomst van de verspreiding.

5.3.2 Gevoeligheid voor zoutgehalte van het oppervlakte water

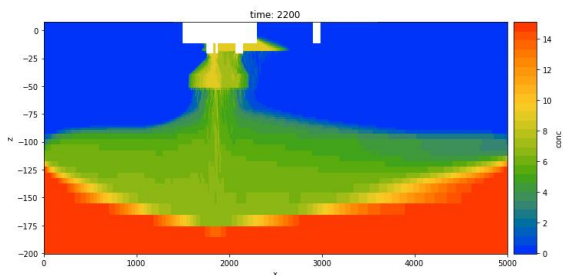
Bij een lager zoutgehalte van het oppervlakte water van 9 gr/l verandert de concentratie van het grondwater evenredig maar verandert het beïnvloede gebied niet (Figuur 5.7).



Figuur 5.7 Zout verdeling in 2200 bij verlaging zoutgehalte oppervlakte water tot 9 g/l.

5.3.3 Gevoeligheid van de effecten van de SO-IJ voor onttrekking Tata Steel

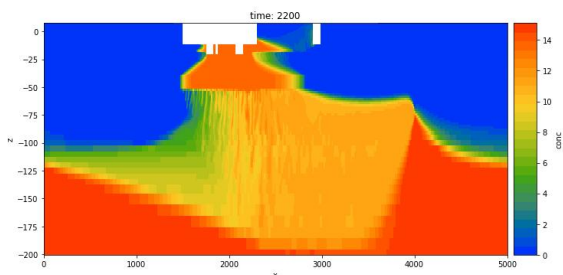
Berekening van de effecten in 2200 in de situatie zonder de onttrekking bij Tata Steel geeft een zoutverdeling als onderstaand in Figuur 5.8.



Figuur 5.8. Berekende zoutverdeling in 2200 in situatie met Nieuwe Sluis met bodemweerstand 100d, zonder SO-IJ en zonder onttrekking bij Tata Steel.

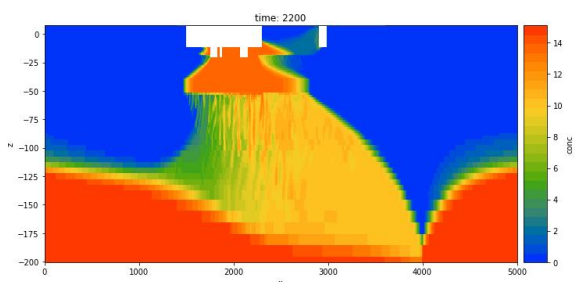
De verspreiding van het zout in Figuur 5.8 in het tweede watervoerend pakket is symmetrisch en gaat tot in de zijranden van het model. Het is duidelijk een niet begrensde zone. Het model is in dit geval een overdrijving van de werkelijkheid omdat de stroming vanuit de doorsnijing niet is begrensd zoals in Figuur 5.3, maar waarschijnlijk in meer richtingen uitwaaiert. Het model is niet geschikt om er de grootte van deze spreiding te bepalen. Wel is duidelijk dat de begrenzing van de zone in het tweede watervoerend pakket zoals dat optreedt in de situatie van Figuur 5.4 hier niet zal optreden.

Verlaging van het debiet met 35% heeft geen significant effect op de omvang en concentratie van het beïnvloede gebied zoals kan worden afgeleid uit Figuur 5.9.



Figuur 5.9. Berekende zoutverdeling in 2200 in situatie in Figuur 5.4 rechts en 35% reductie onttrekking bij Tata Steel.

Diepe (NAP - 180 m) positie van de onttrekking heeft significante invloed op de vorm van de zoutwater zone en is niet waarschijnlijk gezien de gemeten zoutgehalten in Stuyfzand (1993). De zone van beïnvloeding door de SO-IJ in Figuur 5.10 is dieper komen te liggen, maar heeft geen significant andere omvang van het beïnvloede gebied dan die in de standaard berekening van Figuur 5.4.



Figuur 5.10. Berekende zoutverdeling in 2200 in situatie van in Figuur 5.4 rechts en diepe onttrekking op 180 m bij Tata Steel.

6 Conclusies en aanbevelingen over de effecten van de SO-IJ

Op basis van de modelresultaten beschreven in hoofdstuk 5 worden hier conclusies en aanbevelingen gegeven over de effecten van de SO-IJ op het grondwatersysteem. Uitgangspunt is continuïteit van de winning bij Tata Steel / Hoogovens en van de toekomstige situatie inclusief de nieuwe grote sluis.

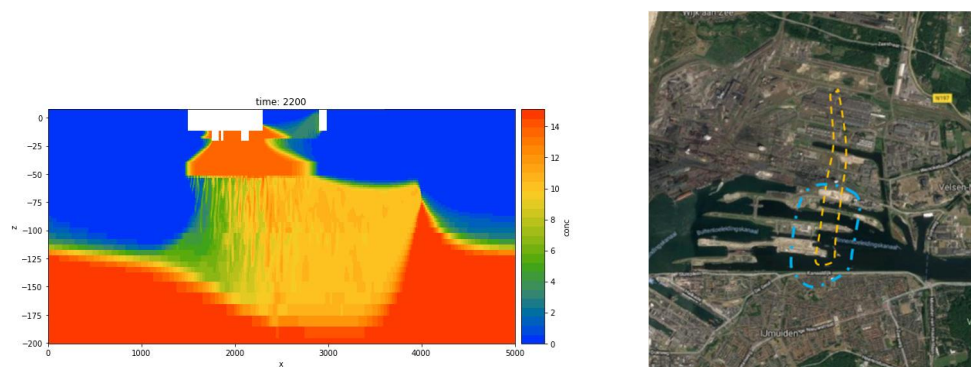
Ter plaatse van de SO-IJ is de situatie in de ondergrond historisch bepaald. Door het aanleggen van de grote polders in het achterland is een infiltratie situatie onder het gebied van het sluiscomplex ontstaan. De ondergrond is op dit moment al deels verzilt (ten opzichte van de situatie voor 1870) door de volgende oorzaken:

- Via de buitenhaven dringt zout zeewater in de ondergrond (Stuyfzand, 1993) tot nabij het sluisen complex, omdat de voormalige duinwaterlens, die tegendruk genereerde met hoge grondwaterstanden, is verdwenen.
- De onttrekking bij Hoogovens / Tata Steel genereert al decennia lang een zoutkegel van ongeveer 50 meter hoogte tot aan circa 50 meter beneden maaiveld (Figuur 6.1, links en Stuyfzand, 1993). Als deze onttrekking significant vermindert of verdwijnt, ontstaat een nieuwe situatie, die alsnog moet worden geëvalueerd.

Vanuit de SO-IJ treedt mogelijk verzilting van de ondergrond op. Dat geldt ook voor de bestaande situatie bij de Noordersluis en de toekomstige situatie bij de nieuwe sluis. Zolang grondwater wordt onttrokken bij Tata Steel, is de zone waarbinnen het zoute water wordt verspreid, begrensd en vrijwel ongevoelig voor de onzekerheden in de modelparameters van de ondergrond. (Figuur 6.1).

Ten opzichte van deze toekomstige situatie zal de freatische grondwaterstand buiten het havengebied circa 0.15 m kunnen stijgen, waarbij het maximum op ongeveer 500 meter van de noordoever ligt. Daarbuiten neemt het effect af.

De relatieve toename van het zoutgehalte door de SO-IJ wordt hoofdzakelijk bepaald door het relatieve verschil in de weerstand van de waterbodem ten opzichte van die van de beide andere bronnen van mogelijke verzilting. Bij een schone waterbodem met weerstand 1 dag treedt er een grote inzijging op en zal zowel de toename van de zoutconcentratie als de gebiedsomvang maximaal zijn. Dat geldt zowel voor de omvang in het profiel als dat van de breedte van de stroombaan naar de onttrekking bij Tata Steel (Figuur 6.1). Ervan uitgaande van dat de verzilting vanuit de andere zones optreedt, maakt de SO-IJ weinig verschil in de grootte van het potentieel verziltend volume en neemt de zoutconcentratie in laag 3 toe van licht brak naar licht zout en is de zone in laag 2 vergroot. Het geheel blijft een besloten volume, vergelijkbaar met de huidige situatie.



Figuur 6.1 Beïnvloed gebied in diepte (links) is begrensd (rechts) binnen blauwe zone voor bovenste watervoerende pakketten en bij gele zone in diepe watervoerend pakket

De zone waarin beïnvloeding plaatsvindt (Figuur 6.1) is bebouwd en/ of industrieel in gebruik. In het gebied erbuiten worden geen significante effecten verwacht zolang de onttrekking bij Tata Steel werkt.

Omdat de grondwaterstroming in de huidige situatie sterk wordt bepaald door de onttrekking bij Tata Steel wordt aanbevolen om een nieuwe evaluatie te doen op het moment dat de winning wordt beëindigd. Door middel van meting in het grondwater kan op termijn worden vastgesteld of en hoever verzilting daadwerkelijk plaatsvindt. De effecten van de SO-IJ op grondwater kunnen bij aanleg worden gemitigeerd door het aanbrengen van een folie onder de bodembescherming. In dat geval is de onttrekking bij Tata Steel niet meer van belang.

Literatuur

Arends G.J., 2001, Sluizen en gemalen in het Noordzeekanaal, Anderhalve eeuw ontwerpen, bouwen en vernieuwen, Stichting Matrijs, Utrecht

Bijlsma, A.C. en O.W. Weiler, 2017. Selectieve onttrekking IJmuiden - Fase 1: Studie naar hydraulische eisen en verificatie. Deltares, eindrapport 1120215-000-HYE-0020, september 2017. In opdracht van Rijkswaterstaat

De Lange W.J., 1986, Application of the boundary integral element method to analyse the behaviour of a fresh water salt water interface calculating three dimensional groundwater flow, in: Proceedings of the 9th salt water intrusion meeting, Delft.

De Lange W.J., 2011, Geohydrologische analyse van stroming uit met slib gevulde zandwinputten, Deltares rapport 1202368-000

De Lange, W.J., 2017, Quick-scan risico geohydrologische consequenties van ontwerp voor Selectieve Onttrekking bij IJmuiden, Deltares Memo 11200215-000HYE-0015.

Grote Historische Atlas van Nederland, 2006, Uitgeverij Nieuwland.

Royal Haskoning DHV, 2014, Zeetoegang IJmond, Deelrapport Bodem en Waterbodem, dossier BB3986-11-100

Stoevelaar R., W.J. Post, E.H. van Waardenburg, V. Hopman, A. Verweij, 2013, Nieuwe Zeesluis IJmuiden, Veldmetingen, Deltares rapport 1206941-000

Stoevelaar R. en A. Verweij, 2013, Nieuwe Zeesluis in IJmuiden, Geotechnische inventarisatie en risicoanalyse, Deltares rapport 1209641-001

Stuyfzand, P.J., 1993, Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands, PhD-thesis, KIWA, Nieuwegein

Van Venetien, J, 1968, Hart van Kennemerland, Uitgegeven bij 50 jarig bestaan van Koninklijke Hoogovens en Staalfabrieken te IJmuiden