

Van Hondsbossche dijk naar Hondsbossche duinen

Een modelstudie naar de effecten van
een zandsuppletie op het grondwater
regime

M.I.P. Kant



Van Hondsboossche dijk naar Hondsboossche duinen

Een modelstudie naar de effecten van een
zandsuppletie op het grondwater regime

door

M.I.P. Kant

ter verkrijging van de graad van Master of Science
aan de Technische Universiteit Delft,
in het openbaar te verdedigen op vrijdag 30 april 2021 om 10:00 uur.

Student number:	4391497	
Project duration:	1 april 2020 – 30 april 2021	
Thesis commissie:	Prof. dr. ir. M. Bakker,	TU Delft, begeleider
	Dr. ir. M. Bloemendal,	TU Delft
	Dr. ir. B. M. van Breukelen,	TU Delft
	Ir. F. Schaars,	Artesia
	Ir. D. Brakenhoff,	Artesia

Op dit verslag is geheimhouding van toepassing tot en met 30 april 2021.

Een elektronische versie van deze thesis is beschikbaar op <http://repository.tudelft.nl/>.

Voorwoord

Dit rapport is het eindresultaat van mijn thesis voor de master Civiele Techniek in de richting Watermanagement van de Technische Universiteit Delft (TU Delft).

Ik heb veel nieuwe ervaringen opgedaan in dit afstudeerproject. Zo heb ik in de praktijk ervaren hoe een modellering van de werkelijkheid niet als exact kan worden geïnterpreteerd. Bij een grondwatermodel worden veel aannames gedaan op basis van beschikbare geohydrologische kennis, echter is de natuur niet zo rechtlijnig. Hier dient rekening mee te worden gehouden wanneer er gekeken wordt naar de resultaten. Ook heb ik geleerd concessies te doen betreft de kwaliteit en kwantiteit van de eindresultaten. Niet de hele wereld kan opgelost worden in 1 rapport.

Voor de totstandkoming van het rapport zou ik alle betrokken medewerkers van Artesia willen bedanken voor het meedenken over het rapport. In het bijzonder zou ik Frans Schaars en David Brakenhoff willen bedanken voor de intensieve begeleiding vanuit Artesia. Van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier zou ik Rudy Petit en Doeke Dam in het bijzonder willen bedanken. Rudy wil ik bedanken voor de totstandkoming van het contact dat geleid heeft tot mijn betrokkenheid bij dit project. Doeke wil ik bedanken voor de begeleiding van het project vanuit het Hoogheemraadschap en het regelen van de stageplek. Tot slot zou ik Mark Bakker willen bedanken voor de begeleiding van het thesis-traject vanuit de TU Delft.

*M.I.P. Kant
Delft, januari 2021*

Samenvatting

De kuststrook tussen Petten en Camperduin heeft in de winter van 2014 op 2015 een transformatie ondervonden. Een ingreep op dit stuk kuststrook was nodig omdat de Hondsbossche zeewering, die op dit deel van de kust aanwezig is, was aangewezen als één van de zwakste stukken in de stormvloedkering van de Nederlandse kust. Na veelvuldig onderzoek met betrekking tot de veiligheid, de kosten en de ecologische impact van verscheidene varianten voor versterking van deze zeewering is gekozen voor zandsuppletie aan zeezijde van de al aanwezige Hondsbossche dijk. Door de zandsuppletie is de Hondsbossche dijk omgevormd tot een duingebied; de Hondsbossche duinen.

Door de van oudsher directe en indirecte invloed van de Noordzee is het grondwater en oppervlaktewater in de polders achter de Hondsbossche zeewering nagenoeg volledig zout geworden. Mede door dit zoute klimaat is een natuurgebied ontstaan met een bijzondere ecologische waarde. Een groot deel van dit gebied is daarom uitgeroepen tot het Natura-2000 gebied Abtskolk & De Putten. Hiermee is natuurbehoud een groot onderdeel van het bestemmingsplan in dit gebied geworden.

Door de zandsuppletie is er een groot stuk land aan zeezijde van de dijk bijgekomen. Doordat in dit duingebied geen drainage wordt toegepast kan neerslag hier vrij infiltreren. Dit resulteert in de ontwikkeling van een zoetwaterbel onder het duingebied. Door deze zoetwaterbel wordt een deel van de zoute kwel van de zee naar de polder geblokkeerd en vervangen door een zoete kwelstroom van het duin naar de polder. Deze zoete kwel kan op de lange termijn nadelige gevolgen hebben voor de flora en fauna in de polders. Om onomkeerbare schade aan de flora en fauna te voorkomen is het zaak om de ontwikkeling van de verzoeting over tijd tijdig in kaart te brengen. Op deze manier kan doelgericht preventief worden gehandeld om de verzoeting van de polders te beperken.

Twee doorsnedemodellen van de dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming zijn ontwikkeld om de ontwikkeling van de zoetwaterbel en de bijbehorende verzoeting van het polderoppervlak in kaart te brengen. De gekozen doorsnedes betreffen een doorsnede loodrecht op de kustlijn door het meer De Putten en een doorsnede loodrecht op de kustlijn net te zuiden van het meer Abtskolk. Voor beide doorsnedemodellen is een zo goed mogelijke ijking aan de beschikbare stijghoogte en geofysische peilbuismetingen uitgevoerd. Het is echter niet mogelijk gebleken om de modellen zowel aan de stijghoogte als aan de geofysische metingen te ijken. Daarom is ervoor gekozen de focus vooral te leggen op het ijken aan de stijghoogtemetingen. De geijkte modellen zijn 100 jaar doorgerekend om een goed beeld te krijgen van de ontwikkeling van het grondwaterregime in de komende 95 jaar (5 jaar tot nu). Daarnaast zijn enkele variaties op deze twee geijkte doorsnedemodellen ook 100 jaar doorgerekend om de invloed van de individuele uitgangspunten binnen de doorsnedes in kaart te brengen. Daarnaast dienen de variaties op de doorsnedemodellen als opstap om de reikwijdte van de mogelijke veranderingen aan het grondwaterregime voor het gehele gebied in kaart te brengen. De variaties op de doorsnedes kunnen namelijk elders in het gebied heel goed aanwezig zijn.

In de doorsnedemodellen is er voor gekozen om complexiteit in opbouw van de ondergrond en toepassing van andere randvoorwaarden te voorkomen. Dit wil zeggen dat per kleilaag en watervoerende laag de doorlatendheid van de ondergrond gelijk zijn voor de hele laag. Ook heeft het gehele polderoppervlak dezelfde weerstand. Daarnaast zijn de oppervlaktewateren zo in het model gezet dat de invloed op het grondwaterregime voldoet aan wat verwacht wordt met de beschikbare hydrologische kennis. Voor de locatie van het poldermeer is exclusief de doorlatendheid van het oppervlak vergroot zodat grondwater hier gemakkelijker kan uitstromen. Ter plaatse van het duinmeer op doorsnede Abtskolk is de grondwateraanvulling verminderd en is de horizontale doorlatendheid zodanig vergroot dat water hier vrijwel vrij horizontaal kan bewegen.

Uit de resultaten blijkt dat op de lange termijn de verzoeting op doorsnede Abtskolk 50 meter verder de polder in reikt in vergelijking tot doorsnede De Putten. Dit geeft een indicatie van de werking van

het poldermeer direct landinwaarts van het duin op doorsnede De Putten. Dit meer vangt een groot deel van de kwel op en vertraagt zo ook de uitbreiding van de zoete kwelstroom vanuit het duin naar de verder landinwaarts gelegen poldervakken. Voor beide doorsnedes geldt dat de afname van zout kwel over het polderoppervlak het grootst is tussen 5 en 35 jaar vanaf nu (tussen 2026 en 2056). Tot 2036 verschilt de afstand van de verzoeting over het polderoppervlak vrijwel nog niks tussen beide doorsnedemodellen. De zoetwaterbel in doorsnede Abtskolk groeit vanaf 2036 iets sneller aan dan de zoetwaterbel in doorsnede De Putten. De zoetwaterbel op doorsnede De Putten reikt in 2036 1 meter dieper dan de zoetwaterbel op doorsnede Abtskolk. Dit wordt veroorzaakt door het duinmeer op doorsnede Abtskolk. Ter plaatse van dit duinmeer is de grondwateraanvulling kleiner aangenomen omdat er meer gelegenheid is voor verdamping van de neerslag. Uiteindelijk bereikt de zoetwaterbel op beide doorsnedes eenzelfde maximale diepte van -18.4 mNAP.

Uit de modelvariaties blijkt dat de gehandhaafde polderpeilen de meeste invloed hebben op de kwelstroom naar het polderoppervlak. Een poldervak met een lokaal lager gehandhaafd peil in vergelijking tot de aangrenzende poldervakken ontvangt een groter aandeel van de kwelstromen richting de polder. Dit betekent dat de initiële zoutvracht naar deze poldervakken groter is. Deze grotere zoutvracht betekent echter ook een grotere potentiële verzoeting. Hoe dichter bij het duin des te groter de verzoeting over tijd is. Dit geeft aan dat de zoete kwel vanuit het duin voornamelijk de ondiepe zoute kwelstroom vanuit de zee blokkeert en vervangt. De diepere zoute kwelstromen vanuit de zee blijven grotendeels behouden.

De locaties waar oppervlaktewater aanwezig is in de polder, in de vorm van een poldermeer, ontvangen een groter aandeel van de kwel dan de omliggende gebieden. Dit heeft deels te maken met de grotere drainage capaciteit van deze oppervlaktewateren, water kan hier makkelijker wegstromen en verdampen. Daarnaast wordt doorgaans door het lagere maaiveld ter plaatse van het oppervlaktewater een lager polderpeil gehanteerd. Oppervlaktewater in het duin, in de vorm van een duinmeer, heeft beduidend minder invloed op het grondwaterregime op de lange termijn. Het duinmeer zorgt in de eerste paar jaren wel voor een vertraging in de ontwikkeling van de zoetwaterbel door een afname van effectieve neerslag, maar dit effect is klein. Op lange termijn het effect van het duinmeer op de ontwikkeling van de zoetwaterbel en de verzoeting van het polderoppervlak nagenoeg afwezig.

De kleilaag direct onder het duin heeft een duidelijk effect op de aangroei van de zoetwaterbel richting het polderoppervlak op de korte termijn. Wanneer in deze kleilaag een extra doorlatend stuk aanwezig is zal de zoetwaterbel sneller de eerste watervoerende zandlaag bereiken. Hierdoor is voor 2036 een grotere verzoeting van het polderoppervlak te observeren in vergelijking tot de situatie zonder extra doorlatend stuk in deze kleilaag. Op de lange termijn heeft dit extra doorlatende stuk in de kleilaag direct onder het duin echter geen effect op de grootte van de verzoeting van het polderoppervlak. De middelste kleilaag van het model heeft de minste invloed op de modelresultaten. Wanneer de middelste kleilaag op 200 meter vanaf de zee begint wordt een kleine toename van de uiteindelijke diepte van de zoetwaterbel na 100 jaar geobserveerd van ongeveer 0.25 meter.

Gekeken naar de resultaten van beide doorsnedemodellen en alle variaties hierop kan gesteld worden dat de grootste verzoeting tussen 2026 en 2056 verwacht kan worden. De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat het aan te raden is om binnen 10 jaar, voor 2031, maatregelen te treffen tegen de verzoeting van het polderoppervlak. Het is verstandig in een vervolgonderzoek allereerst de meest kritische doorsnedes loodrecht op de zee te identificeren. Het identificeren van de meest doorlatende stukken in de kleilaag onder het duin is hierin een goed begin. Op deze plekken wordt een snellere toename van zoete kwel verwacht. Daarnaast is aangetoond dat het meertje De Putten een grotere verzoeting ondervindt dan aangrenzende gebieden doordat een groter aandeel van de kwel naar dit meertje stroomt. In vervolgonderzoek kan worden gekeken naar andere locaties in het gebied waar een grotere zoute kwel te observeren is. Hier is het effect van een afname in zoute kwel naar alle waarschijnlijkheid ook het grootst. Op de locaties van deze kritische doorsnedes kan dan als eerste worden begonnen met het treffen van verzoetingsbeperkende maatregelen. Met het tijdig en doelgericht toepassen van maatregelen wordt verwacht dat onomkeerbare schade aan de ecologische waarde van de polders voorkomen kan worden.

Een mogelijke maatregel tegen de oprukkende zoetwaterbel zou een serie pompputten direct landinwaarts van de dijk zijn. Deze pompputten zouden de ondiepe zoete kwelstromen vanuit het duin weg kunnen nemen voordat deze de achterliggende polders kunnen bereiken. Dit zal indirect wel beteke-

nen dat het polderpeil direct landinwaarts van de dijk verlaagd wordt doordat continu grondwater wordt weggenomen. Dit lagere peil zal een grotere fractie van de kwelstromen richting de polder aantrekken. Het is zaak om het ideale debiet van de pompputten nader te onderzoeken. Een te groot debiet zal ook leiden tot het onderscheppen van zoute kwelstromen. Hierdoor kan alsnog een afname van zoute kwel in de rest van de polders, en dit is ongewenst.

Summary

The coastline between Petten and Camperduin in the Netherlands has been transformed during the winter of 2014 upon 2015. This transformation was deemed necessary because the Hondsbossche seawall at this location was appointed as one of the weakest links in the flood defenses along the Dutch coast. After elaborate investigation concerning the safety, costs and ecological impact of different variants of the coastline transformation the choice was made to induct sand replenishment at the seaside of the already existing Hondsbossche dike. With this sand replenishment the Hondsbossche dike has been transformed into a dune area; The Hondsbossche dunes.

Due to the long existing direct and indirect influence of the North Sea the groundwater and surface water in the polders behind the Hondsbossche seawall have become almost completely salty. Partly because of this salty climate a habitat with special ecological values has developed in the polder area. Because of the highly appreciated ecological values a big part of this area has been appointed as Natura-2000 area; Abtskolk De Putten. With this appointment the main focus of this area has shifted towards nature preservation.

Because of the sand replenishment a big landmass has been added at the seaside of the dike. In this new dune area no surface water drainage system is present and precipitation can more easily infiltrate here in comparison to the polder system. The result of this is that a freshwater bubble is developing beneath the dune area. This freshwater bubble blocks off a part of the saltwater seepage from the sea towards the polders and replaces it with freshwater seepage. This freshwater seepage can in time have a negative impact on the flora and fauna in the polders and therefore reduce the ecological value of the area. To prevent irreversible damage to the flora and fauna it is recommended to map out the reduction of saltwater seepage over time as soon as possible. This way it is possible to take precise preventive measures to reduce the decline of saltwater seepage.

Two sectional models of the density dependent groundwater flow have been developed to map out the growth of the freshwater bubble and the corresponding decline of saltwater seepage to the polders. The two sections chosen are a section perpendicular to the coastline through the middle of the small lake De Putten and a section perpendicular to the coastline just south of the small lake Abtskolk. Both sectional models have been tested through a calibration process for the measurement data considering the freshwater head and geophysical properties of the groundwater. It has not deemed possible to calibrate the models to both the freshwater head and geophysical data. Therefore it is chosen to prioritize the freshwater head data for the calibration process. From the models the development of the groundwater regime for the coming 95 years has been calculated (100 years in total and 5 years until the present). Besides this the development of the groundwater regime in several sectional variations to the developed sectional models have been investigated as well. This has been done to investigate the impact of certain assumptions in the layout of the sectional models. These variations to the sectional models also are an indication of the range of possible changes to the groundwater regime for the whole area because elsewhere in the area these resulting sections could be present.

It is chosen to minimize the complexity of the layout for the sectional models. This means that the permeability of every clay layer and sand layer are constant for the whole layer and the whole polder surface has the same outflow resistance. The water bodies at the surface are implemented in the model through expert judgement on the expected influence of these water bodies on the groundwater regime. For the small lake De Putten the outflow resistance of the surface has been reduced to increase the possibility for water outflow at this part of the polder. For the small lake in the dunes on the section just south of the small lake Abtskolk this is done through reduction of the groundwater input at this part of the dunes. Also the horizontal permeability has been increased to a point in which free horizontal flow is simulated.

From the results it becomes apparent that in the long term the reduction of saltwater seepage reaches 50 meters further inland on the section just south of Abtskolk in comparison to the section through De Putten. This gives an indication for the impact of the small lake De Putten on the groundwater regime. This small lake attracts a big part of the seepage currents and therefore it slows down the spread of the freshwater seepage originating from the dunes. For both sectional models the results show that the decline of saltwater seepage to the polders is the biggest in between 5 and 35 years from now (in between 2026 and 2056). Until 2036 the reach of the freshwater seepage shows no difference for both sectional models. After 2036 the reach of the freshwater seepage starts growing a little bit faster for sectional model Abtskolk. For sectional model De Putten the freshwater bubble reaches 1 meter deeper before 2036 in comparison to the freshwater bubble on sectional model Abtskolk. Eventually this depth reaches a maximum of -18.4 mNAP for both sectional models after 100 years (after 2121). The smaller growth in depth of the freshwater bubble on section Abtskolk is due to the effect of the small lake in the dunes. The groundwater recharge at the location of this lake is chosen to be less due to a bigger opportunity for evaporation of the precipitation.

The results of the variations to the sectional models show that the maintained polder levels have the biggest influence on the groundwater regime. A polder section with a locally lower maintained groundwater level attracts more seepage than the bordering polder sections. This means that the initial salt flux to these polder section is higher. The bigger salt flux also means that the potential for reduction of saltwater seepage is higher. The closer to the dunes the higher the reduction of saltwater seepage is over time. This indicates that the freshwater seepage from the dunes mainly blocks off the shallow saltwater seepage currents from the sea. The majority of the deeper saltwater seepage currents from the sea remain.

The locations in the polders where larger surface water bodies are present, like lake De Putten, receive a greater share of the seepage in comparison to the surrounding area. This is partly due to the fact that these water bodies have a higher drainage capacity, groundwater can reach the surface more easily and evaporate. Besides this these locations generally have a lower ground level than the surrounding area, therefore normally a lower polder level is maintained here. Surface water bodies in the dunes, like the small lake at section Abtskolk, have less influence on the groundwater regime in the long term. In the first years of growth of the freshwater bubble this small lake hinders the growth of the bubble in depth, although this effect is very small. This effect is caused by the assumption that a bigger part of the precipitation will evaporate in this lake, therefore the groundwater recharge at the location of this lake is less. In the long term the effect of the small lake in the dunes is virtually absent.

The clay layer directly beneath the dunes has a noticeable effect on the growth of the freshwater bubble towards the polders in the short term. When a part of the clay layer is made extra permeable the freshwater bubble reaches the first aquifer sooner. Because of this the reduction of saltwater seepage before 2036 becomes larger in comparison to the situation in which the clay layer has a constant permeability. In the long term an equilibrium is reached and this extra permeable part in the clay layer has no noticeable influence on the reduction of the saltwater seepage anymore. The variation with respect to the second clay layer of sectional model De Putten shows the least difference to the main sectional model. When the middle clay layer starts at 200 meter from the sea, like in the sectional De Putten, the eventual depth after 100 years is observed to be 0.25 meters more than when the clay layers continues through the whole section.

Looking at the results of both sectional models and all model variations the conclusion can be drawn that the biggest reduction of saltwater seepage takes place in the years 2026 till 2056. Therefore it is advised to take action against the reduction of saltwater seepage before 2031. A sensible way of doing this is to firstly identify the most critical sections perpendicular to the sea in the area of interest. A good first step would be to identify the most permeable spots in the clay layer beneath the dunes. In these spots a faster spread of the freshwater bubble is expected. Besides this it is known that the small lake De Putten attracts a bigger fraction of the seepage currents in comparison to the surrounding area. It would be a good idea to investigate where other hotspots for seepage are present in the area. In these areas the reduction of saltwater seepage would most likely be more intense. The identified critical sections would be the best places to start implementing measures against the decline of saltwater seepage. When actions are taken timely and precisely it is expected that the decline of saltwater seepage will remain small and the ecological value of the polders will remain.

A possible measure to reduce the growth of the freshwater bubble would be to place a series of pumping wells perpendicular on the landside of the dike. These pumping wells could take away the shallow freshwater seepage currents originating from the dunes before they could reach the polders. Indirectly this would lead to the lowering of the groundwater level around the pumping wells. This lower groundwater level will increase the attraction of seepage current to this location. Therefore it is necessary to investigate the ideal pumping rate. When the pumping rate is too high also the saltwater seepage currents could be interrupted. This would therefore still lead to a decrease in saltwater seepage in the polders, and this is undesired.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Projectgebied	5
2.1	Gebiedsindeling	5
2.1.1	Geschiedenis	5
2.1.2	Huidige situatie	6
2.2	Geohydrologische opbouw	8
2.2.1	Hydrologisch systeem	8
2.3	Ecologie	12
2.3.1	Natura-2000 gebied Abtskolk & De Putten	12
2.3.2	Flora	12
2.3.3	Fauna	12
2.4	Doorsnedes	14
2.4.1	Doorsnede 1: De Putten	14
2.4.2	Doorsnede 2: De Abtskolk	16
3	Verzamelde meetdata	19
3.1	Type metingen	19
3.1.1	Geofysica	19
3.1.2	Stijghoogtes	20
3.2	Geofysische en stijghoogte profielen	21
3.2.1	Peilbuis meetnet	21
3.2.2	Metingen in doorsnede De Putten	22
3.2.3	Metingen in doorsnede Abtskolk	27
4	Model methode	33
4.1	Opzet model	33
4.1.1	Doel model	33
4.1.2	Basismodel	33
4.1.3	Stroomlijnen	35
4.2	Uitgangspunten doorsnedemodellen	35
4.2.1	Bodemopbouw	35
4.2.2	Grondwateraanvulling, afwatering en grondwaterbegrenzing	35
4.2.3	Oppervlaktewater	36
4.3	Parameteronderzoek basismodel	36
4.3.1	Doorlatendheid ondergrond	37
4.3.2	Diepte eerste kleilaag	38
4.3.3	Anisotropie	39
4.3.4	Weerstand deklaag polder	44
5	Doorsnedemodellen toepassing	47
5.1	Doorsnedemodel: De Putten	47
5.1.1	Toelichting modelparameters	47
5.1.2	Vergelijking met metingen	48
5.1.3	Toekomstige verwachting	49
5.2	Doorsnedemodel: Abtskolk	55
5.2.1	Toelichting modelparameters	55
5.2.2	Vergelijking met metingen	56
5.2.3	Toekomstige verwachting	58

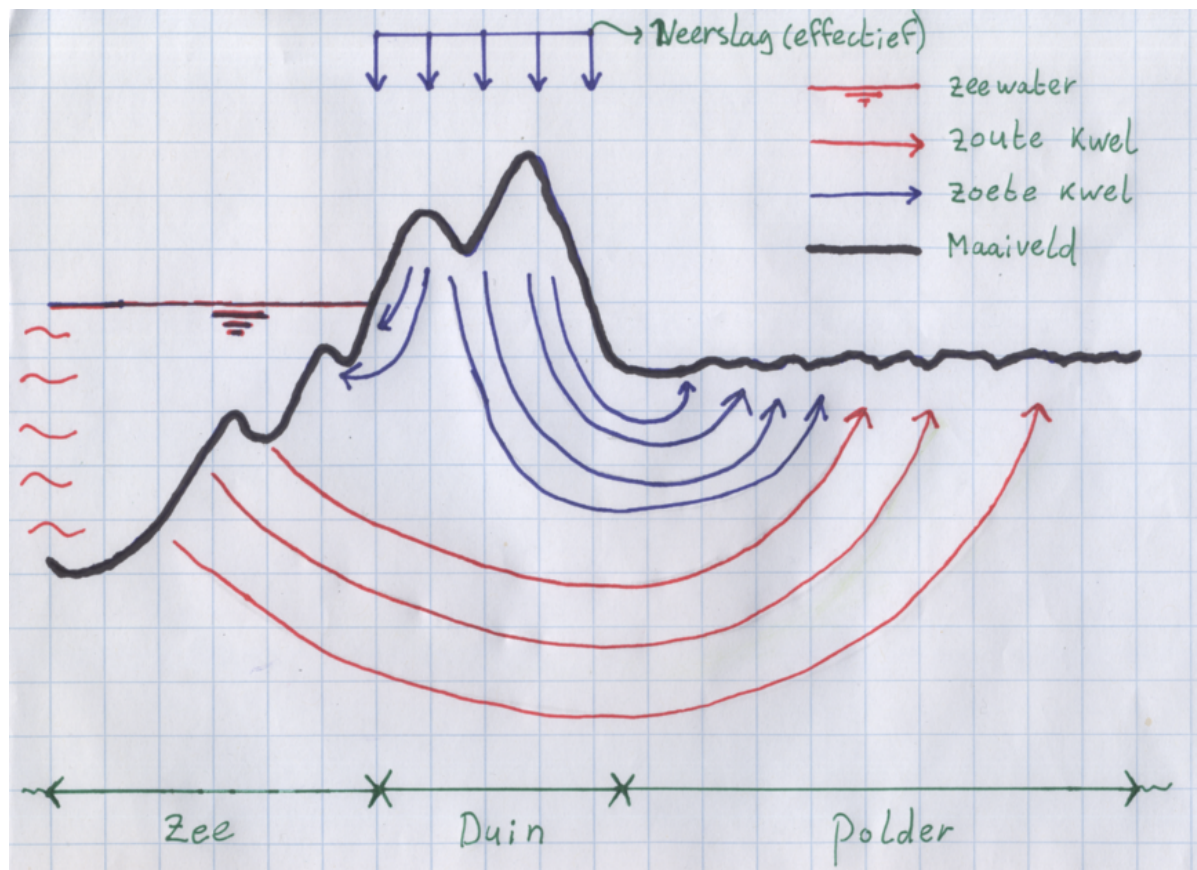
5.3	Doorsnedemodel variaties	62
5.3.1	Variaties doorsnedemodel De Putten	62
5.3.2	Variaties doorsnedemodel Abtskolk	68
5.3.3	Maatgevende variaties	75
6	Conclusies en discussiepunten	79
7	Appendices	83
A	Polderpeilen	85
B	Model resultaten	87
C	Toegepaste python pakketten model	89
C.1	Eindige-differentiemethode	89
C.1.1	Discretisatie modelgrid	89
C.2	MODFLOW pakketten	89
C.3	MT3DMS pakketten	91
C.4	SEAWAT pakketten.	91
D	Verandering laatste tijdstap model	93
E	Filterdieptes	95
	Bibliografie	97

1

Inleiding

In de winter van 2014 op 2015 is kustversterking toegepast op de kustlijn tussen Camperduin en Petten. De reden hiertoe was het verouderde veiligheidsniveau van de dijk op deze kuststrook waardoor een te groot risico van overstroming van het achterland bestond (grote delen van Noord-Holland zouden kunnen overstromen waarmee in extreme omstandigheden ook Amsterdam niet veilig zou zijn). Naar de meest geschikte vorm van kustversterking is grondig onderzoek gedaan. Dit onderzoek richtte zich op het nieuwe veiligheidsniveau, de kosten en de ecologische effecten van verschillende versterkingsstrategieën voor de zeekering (Smit *et al.*, 2005). Uit de resultaten van dit onderzoek is besloten voor zandsuppletie aan de zeezijde van de dijk. Daarnaast zijn een aantal ecologisch bevorderlijke toevoegingen toegepast, een voorbeeld hiervan is een duinmeer. Met deze zandsuppletie is een nieuw duingebied ontstaan tussen Petten en Camperduin. Dit nieuwe duingebied zou zowel voor de veiligheid tegen overstroming van de regio als voor de ecologische waarden van het gebied bevorderlijk moeten zijn.

De laatste jaren is echter gebleken dat er zich een zoetwaterbel vormt onder het duin. Er wordt vermoed dat de zoetwaterbel langzaam de zoutere kwelstromen vanuit de zee weg zal drukken en een zoete kwelstroom naar de polder zal vormen. Hiermee zullen naar alle waarschijnlijkheid de zoutwaarden van het grondwater in de achterliggende Harger & Pettemer polder gaan dalen. In figuur 1.1 worden schematisch de te verwachten kwelstromen onder het duingebied weergegeven. Hier is te zien dat de zoete kwel uit het duin de ondiepe zoute kwel vanuit de zee verdringt. Hierdoor wordt de zoute kwel in het eerste deel van de polder vervangen door een zoete kwelstroom. Omdat de ecologische waarden van de Harger & Pettemer polder erg afhankelijk zijn van het zoute grondwaterregime kan deze verzoeting op lange termijn ingrijpende en onomkeerbare gevolgen hebben voor de aanwezige flora en fauna in het gebied. Deze flora en fauna worden als bijzonder aangemerkt en zijn daarom ook beschermd. Het is van belang het patroon van de verzoeting tijdig in kaart te brengen zodat maatregelen genomen kunnen worden om verdere verzoeting te voorkomen. Zo kan de huidige beschermde flora en fauna worden behouden voor de toekomst.



Figuur 1.1: Schematische weergave kwelstromen rondom duingebied

Zandsuppleties vinden in Nederland al langer plaats bij verschillende waterbouwkundige en watermanagement projecten. In de Oosterschelde is van 2019 op 2020 zand opgespoten om de Roggenplaat te verhogen. Deze zandplaat is een belangrijk ecologisch punt in de Oosterschelde. Door de aanleg van de Oosterscheldekering is de aanvoer van zand naar deze zandplaat afgenomen. Voor het behoud van deze zandplaat was zandsuppletie hierdoor noodzakelijk (Ysebaert *et al.*, 2016). Daarnaast wordt het Nederlandse waddegebied regelmatig onderhouden met behulp van zandsuppleties. Door het wegspoelen van zand uit het waddegebied wordt de kustbescherming hier continu aangetast. Daarnaast wordt met de verwachting van zeespiegelstijging de noodzaak van harde keringen en zandsuppleties steeds noodzakelijker. In de afgelopen jaren is het ecologisch belang van deze kustversterking steeds belangrijker geworden. Met het oog op dit ecologisch belang zijn onderzoeksprojecten opgezet om ecologische expertise in te winnen voor kustverdedigingsstrategieën in en rond het waddegebied. (Wageningen University) Het grootste zandsuppletie project dat in Nederland heeft plaatsgevonden is de zandmotor langs de Delflandse kust. De zandmotor is een in 2011 opgespoten vooroever-schiereiland dat is aangelegd om de natuurlijke aangroei van zand langs de Nederlandse kust te stimuleren. Dit heeft als doel om de kustveiligheid op lange termijn te vergroten en om natuurontwikkeling en recreatie langs de kust te stimuleren door aangroei van land. Daarnaast geldt dit project als pilot voor inwinning van kennis en innovatie in relatie tot kustversterking. (Wijsman and Verduin, 2011)

Na de aanleg in 2015 tot heden is er op een grotere schaal dan voorheen geofysische en stijghoogte data uit het gebied verzameld. Met deze verzamelde data is de verandering van het grondwaterregime door de aanleg van het duin over de afgelopen jaren in kaart gebracht. Naast de fysieke verzameling van informatie zijn ook verscheidene studies naar de te verwachten verandering aan het grondwaterregime over de tijd gedaan. De verzamelde geofysische en stijghoogte data was ten tijden van de eerdere onderzoeken niet zo uitgebreid aanwezig als nu en ijking van de modellen was daarom nog niet mogelijk. Het concept van verandering aan het grondwaterregime na een zandsuppletie is complexer gebleken dan van tevoren gedacht werd en de voorspellingen in deze onderzoeken zijn in meer

of mindere mate niet uitgekomen.

Met de beschikbare geofysische en stijghoogte data kan het model geïjkt worden aan de werkelijkheid. Hiermee worden de resultaten betrouwbaarder. Daarnaast is het zaak dit vervolgonderzoek overzichtelijk en eenvoudig te houden. Hiermee kan een beter inzicht verkregen worden in de effecten van individuele uitgangspunten op het grondwaterregime na een zandsuppletie. Dit rapport zal een eerste stap zetten in het construeren van overzichtelijk en eenvoudig dichtheidsafhankelijk grondwatermodellen die zijn geïjkt aan de beschikbare metingen.

In het verleden is er veel onderzoek gedaan naar het modelleren van het dichtheidsafhankelijke grondwaterregime van een kustgebied. De ontwikkelde modellen verschillen in complexiteit en in scope. Bovendien is er wereldwijd een grote variatie aan de opbouw van de kustgebieden. Hierdoor zijn veel onderzoeken locatie-specifiek en is het moeilijk om voort te bouwen op bestaande onderzoeken. Hieronder worden een paar onderzoeken gegeven om een indruk te krijgen van de ontwikkelingen in het vakgebied van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming.

Smith and Turner (2001) onderzochten de convectionele uitwisseling van zoutgehalte in het water van de Swan-Canning Estuary in West Australië met het grondwaterregime onder het zeegat. Het doel van het onderzoek was het begrijpen hoe fysieke processen de gemiddelde convectionele uitwisseling van zoutgehalte op de lange termijn beïnvloeden. Ze vonden dat de stabiliteit van de convectionele uitwisseling voornamelijk afhankelijk is van twee factoren. Het Buoyancy effect dat afhankelijk is van de in de diepte variërende dichtheid van het grondwater zorgt voor een destabilisatie in de convectionele grondwateruitwisseling. Daartegenover heeft de regionale grondwater uitstroom een stabiliserende werking op de convectionele grondwateruitwisseling.

Giambastiani *et al.* (2007) betrokken hun onderzoek op het dennenbos van San Vitale in Italië. Door menselijk handelen is het aandeel zoute kwel in dit bos vergroot en waardoor nog maar een kleine lens aan zoet water onder het oppervlak aanwezig is. Om te onderzoeken hoe dit menselijk handelen geleid heeft tot de huidige situatie hebben ze een numeriek model opgesteld. Er is aangetoond dat kunstmatige verlaging van het landschap en de grote hoeveelheid grondwateronttrekking geleid hebben tot de toename van zoute kwel. Daarnaast is de voorspelling dat de flux van zoute kwel in de komende jaren groter zal worden.

In een onderzoek van Paldor *et al.* (2019) werd het effect van grondwateronttrekking op de zoute kwelstromen onderzocht. Als onderzoeksgebied werd de Judea Group Aquifer in Israël genomen. In deze aquifer langs de kust is een ongewenste verlaging van de grondwaterstand door overmatige grondwateronttrekking waargenomen. Uit de resultaten is gebleken dat de zoute kwel sneller landinwaarts trekt bij het oppompen van grondwater uit een volledig begrensde aquifer in vergelijking tot een semi-begrensde aquifer. Om toename van zoute kwel te beperken is het dus aan te raden om in een semi-begrensde aquifer grondwater te onttrekken.

Het project in dit rapport heeft een duidelijk verschil met vele andere dichtheidsafhankelijke grondwaterstudies in kustgebieden. Veelal leidt verzilting van het kustgebied tot problemen voor het bestemmingsplan. Verzilting kan bijvoorbeeld leiden tot verlies van agrarisch gebied of problemen bij de onttrekking van grondwater als drinkwatervoorziening. In de case-studie van dit rapport is een afname in zoute kwel resulterend in verzoeting van het gebied het probleem. Daarnaast is het grondwater in het gebied bij aanvang van de modelberekening volledig zout. Deze twee aspecten maken de case-studie uniek binnen het onderzoeksgebied van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming.

Het doel van deze studie is het in kaart brengen van de verzoeting van het polderoppervlak in twee 2-dimensionale doorsnedemodellen met inachtneming van de beschikbare peilbuismetingen op de desbetreffende doorsnedes. Hierbij wordt gekeken naar de uitgangspunten aanwezig in de doorsnedes en wat deze uitgangspunten individueel betekenen voor de verandering aan het grondwaterregime. Met de combinatie van de geïjkte doorsnedemodellen en de kennis van de invloed van individuele uitgangspunten op het grondwaterregime kan een uitspraak worden gedaan over de bandbreedte van de verzoeting over tijd in verschillende delen van de polders.

Om de kwaliteitsverandering van het grondwater voor de komende jaren in kaart te brengen zijn er in dit rapport twee Modflow/Seawat doorsnedemodellen gepresenteerd en worden de resultaten toegelicht. De twee doorsnedes betreffen een doorsnede door het meer De Putten en een doorsnede net ten zuiden van het meer Abtskolk. Deze doorsnedemodellen zijn geïjkt aan de beschikbare peilbuis-

metingen met betrekking tot zoetwaterstijghoogte en geofysica. Vervolgens is per doorsnedemodel een voorspelling voor de toekomstige verandering aan het grondwaterregime gedaan. In het bijzonder wordt de afname van zoutvracht naar verschillende delen van het polderoppervlak bekeken. De afname van deze zoutvracht duidt namelijk aan waar de verzoeting het grootst is. Om een compleet beeld te krijgen van de invloed van de diverse uitgangspunten aanwezig in de doorsnedemodellen worden variaties op de doorsnedemodellen geïntroduceerd en doorgerekend.

Met de doorsnedemodellen kunnen de volgende vragen worden beantwoord:

1. Hoe verandert de zoutvracht naar de achterliggende polders met inachtneming van de beschikbare peilbuismetingen op een doorsnede door het meer De Putten?
2. Hoe verandert de zoutvracht naar de achterliggende polders met inachtneming van de beschikbare peilbuismetingen op een doorsnede ten zuiden van het meer Abtskolk?
3. Welke uitgangspunten op de doorsnedes hebben een significante impact op de verandering van de zoutvracht naar de achterliggende polders en is het mogelijk deze impact te kwantificeren?

Met het beantwoorden van deze drie vragen kan een uitspraak over de verzoeting van het grondwater worden gedaan voor het gehele gebied. Deze voorspelling omvat een bandbreedte voor de mogelijke verzoeting van verschillende delen van de polders in de tijd. Ook kunnen extra gevoelige plekken worden aangewezen aan hand van de invloed van de uitgangspunten. Met deze voorspellingen wordt de urgentie voor maatregelen tegen de verzoeting van het grondwater voor verschillende delen van de polder duidelijker. Aan de hand hiervan kan gericht vervolgonderzoek worden uitgevoerd om tijdig in te kunnen grijpen bij de kritische plekken van verzoeting in de polders.

Na deze introductie is in hoofdstuk 2 een introductie van het gebied achter de Hondsbossche zee-wering gegeven. Ook zijn hier de twee gekozen doorsnedes geïntroduceerd en is de keuze voor deze doorsnedes toegelicht. Hoofdstuk 3 geeft een samenvatting van de beschikbare stijghoogte en geofysische data die van belang zijn voor de doorsnedemodellen. Daarnaast is de methode van datacollectie beschreven en is er aangegeven hoe de doorsnedemodellen aan deze data geijkt zijn. In hoofdstuk 4 is de totstandkoming van de doorsnedemodellen toegelicht. Ook zijn in dit hoofdstuk enkele modelonderzoeken gedaan naar de invloed van verscheidene modelparameters op de modelresultaten. In hoofdstuk 5 zijn de modelresultaten gepresenteerd. Er is aangetoond dat de doorsnedemodellen na 5 jaar doorrekenen voldoen aan de metingen. Daarnaast zijn de doorsnedemodellen en variaties op deze doorsnedemodellen 100 jaar doorgerekend om een voorspelling van de bandbreedte van de verandering van het grondwaterregime in de toekomst te kunnen doen.

2

Projectgebied

In dit hoofdstuk wordt het projectgebied geïntroduceerd. Allereerst wordt de geschiedenis van het gebied samengevat en wordt de huidige gebiedsindeling getoond. Hierna wordt per polder in het gebied een korte beschrijving gegeven om een idee te krijgen van de verschillen en overeenkomsten tussen deze polders. Daarna wordt er een introductie gegeven over de ecologie van het gebied. Hiermee wordt het belang tot behoud van dit natuurgebied aangetoond. Vervolgens wordt de geohydrologische opbouw van het gebied beschreven om een idee te krijgen van de huidige hydrologische kringloop in het gebied. Tot slot worden twee doorsnedes geïntroduceerd die in dit rapport nader zijn onderzocht. Van beide doorsnedes is verderop in dit rapport een doorsnedemodel met betrekking tot de grondwaterstroming gemaakt. Per doorsnede is een korte omschrijving gegeven. Ook wordt per doorsnede een schematisering van de geologische opbouw van de ondergrond gegeven.

2.1. Gebiedsindeling

Het beschouwde gebied betreft alle polders die hydrologisch beïnvloed worden door de Hondsbossche zeewering. De huidige invloed is indirect en in de vorm van zoute kwel. Maar met de veranderingen aan de zeewering door de jaren heen is deze invloed wel eens ingrijpender geweest. In deze paragraaf wordt zowel de geschiedenis van het gebied als de huidige indeling beschreven. Daarnaast zal per polder een kleine introductie worden gegeven.

2.1.1. Geschiedenis

De indeling van de polders in dit gebied is vrijwel niet veranderd sinds de Middeleeuwen, dit wil zeggen dat het huidige slootjes-patroon in deze polders uit deze tijd stamt. Dit slootjes-patroon is beschermd en het verleggen van deze slootjes is verboden.

De Hondsbossche zeewering is over de jaren heen meerdere malen grondig veranderd, zowel door menselijk handelen als door natuurlijke invloeden. In de 15^e eeuw werd het volledige duingebied langs de 5.5 kilometer lange kuststrook weggespoeld door de Sint-Elisabethvloed. Hierdoor ontstond een open verbinding tussen het achterland en de zee. Na deze gebeurtenis werd een deel van het duin hersteld maar in de jaren hierna bleek veel onderhoud nodig te zijn om de erosie van dit nieuwe duin tegen te gaan. In de 16^e eeuw werden maatregelen genomen om erosie van de kust te verminderen. Er werden palen geslagen langs de gehele zeewering om het zand beter vast te houden. Daarnaast werden golfbrekers geplaatst om de kracht van de zee op de kust te verminderen. Ondanks deze extra maatregelen kon toch niet voorkomen worden dat de zeewering opnieuw bezweek. De Allerheiligenvloed van 1570 spoelde de zeewering opnieuw volledig weg. Ook werd tijdens deze vloed het achterliggende bos genaamd Hondsbosch weggespoeld. Dit bos lag op de plek van de huidige dijk en vormt de oorsprong van de naam Hondsbossche zeewering. Onder andere door deze vloed werd uiteindelijk besloten de geplaatste palen en golfbrekers op te geven en de kustlijn landinwaarts te verplaatsen. In 1880 werd het duin op deze nieuwe kustlijn versterkt door de vegetatie op het duin te vervangen door blokken basalt. Hiermee leek de nu dijk bestand tegen de stormvloeden. In 1981 werd de dijk verhoogd tot 11.5 mNAP om te voldoen aan de wettelijk gestelde minimum hoogte.

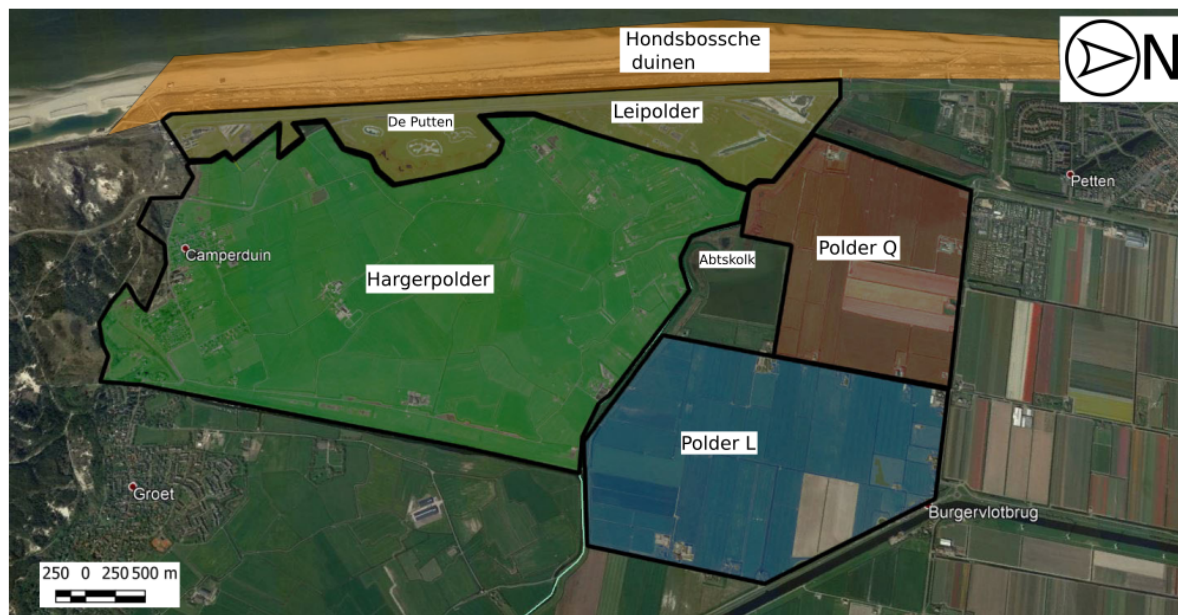
Sinds 1990 onderhoudt Rijkswaterstaat de gehele Nederlandse kustlijn actief door het toepassen van zandsuppleties op vooraf gedefinieerde zwakke plekken. Ook onderzoekt Rijkswaterstaat de effecten van dit onderhoud om in het vervolg nog beter te begrijpen op welke manier de beste effecten te behalen zijn (Rijkswaterstaat). Dit intensieve programma van zandsuppletie is geïntroduceerd omdat de stranden en duinen langs de Nederlandse kust de eerste en meest belangrijke verdedigingslijn zijn tegen stormvloed. Maar omdat zeestroming en wind dit landschap voortdurend veranderen en daarom de veiligheid van deze verdedigingslijn verlagen is het nodig deze gebieden nauwlettend in de gaten te houden en te onderhouden. Door de stijgende zeespiegel verdwijnen grote delen strand langzaam in zee waardoor de zee dichterbij het duin komt te liggen wat de erosie vergroot. Door het tactisch storten van nieuw zand op de bestaande duinen kan het gehele veiligheidsniveau van de Nederlandse kustverdediging gewaarborgd worden (Rijkswaterstaat).

In 2015 is de Hondsbossche zeewering versterkt door middel van zandsuppletie. Voor die tijd was bepaald dat dit deel van de Nederlandse kustlijn behoorde tot de minst veilige stukken in de gehele kustlijn en dat hier iets aan moest gebeuren. Omdat de oude Hondsbossche zeewering alleen bestond uit een dijk waren meer drastische maatregelen nodig, hierdoor werd besloten de gehele kering zeewaarts uit te bereiden en het in een duingebied om te vormen. Hiertoe werd 30 miljoen kubieke meter zand zeewaarts van de oude dijk opgespoten en zijn de Hondsbossche duinen ontstaan (Ecoshape). Deze nieuwe duinen hebben niet alleen de veiligheid van deze kuststrook verbeterd maar hebben ook geleid tot extra natuurontwikkeling in de vorm van een nieuw habitat met het duingebied. Daarnaast is er extra ruimte gekomen voor recreatie met het nieuwe strand en het duin.

2.1.2. Huidige situatie

In het gebied zijn vier polders aanwezig; De Leipolder, polder-Q, polder-L en de Hargerpolder. Voor dit onderzoek worden alle vier polders beschouwd aangezien de effecten van de vorming van de zoetwaterbel invloed kunnen hebben op het grondwaterregime van elk deze polders.

Elk van deze vier polders wordt in deze paragraaf kort beschreven om een idee te krijgen van de verschillen en overeenkomsten tussen deze gebieden. In figuur 2.1 wordt een kaart van de ligging van de polders in het projectgebied getoond. Ook is hier de locatie van de Hondsbossche duinen aangegeven. Figuur 2.2 laat zien waar het projectgebied in Nederland gelegen is.



Figuur 2.1: Indeling polders in het projectgebied

Leipolder

De Leipolder begrenst een groot deel van de Hondsbossche duinen. De Leipolder is altijd in nauw contact geweest met de Noordzee. Tegenwoordig is dit contact in de vorm van een grote flux van zoute kwel die in deze polder uitstroomt. Hierdoor is het grondwater en oppervlaktewater in deze polder bijna even zout als het Noordzeewater. Dit brakke tot zilte klimaat is essentieel voor de aanwezige flora en fauna.

Een belangrijk onderdeel van de Leipolder is het meertje De Putten. Dit meertje geldt als centraal punt voor de natuur in deze polder en de aangrenzende polders. Het meertje is ontstaan door kleiwinning in de jaren 50 en 70 waardoor de toplaag van klei hier dunner is. Door de dunnere toplaag van klei ter plaatse van dit meertje is deze in nauwer contact met de eerste watervoerende laag. Hierdoor eindigt een groter aandeel van de zoute kwel in dit meertje. Dit is aan te tonen met het feit dat het zoutgehalte met ongeveer 6000 mg/L in het meer groter is dan elders in het gebied (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit).

Polders Q & L

De polders Q & L zijn de twee polders die in het meest noordelijk deel van dit gebied liggen. In deze polders is, met een aantal bedrijven en landerijen, meer menselijke activiteit dan in de overige twee polders. Door de ligging aan het meer de Abtskolk is natuur in deze twee polders ook een belangrijk aspect. Het meer de Abtskolk geldt als centraal punt voor de natuur in de omliggende polders. Veel diersoorten maken zowel gebruik van het meer als de omliggende (zilte) graslanden.

Hargerpolder

De Hargerpolder is de grootste polder in dit projectgebied. Het ligt ten westen van de Leipolder en ten zuiden van polder Q & L en de Abtskolk. Hoewel deze polder niet direct grenst aan de Hondsbossche duinen wordt verwacht dat het grondwater regime van dit gebied verandert door de aanleg van het Hondsbossche duingebied. Bovendien grenst de Hargerpolder zowel aan De Putten als aan de Abtskolk wat dit gebied een grote ecologische waarde geeft. Het zuidelijk deel van de Hargerpolder grenst direct aan de Schoorlse duinen. Door het hogere maaiveld in deze duinen komt hier een zoete kwelflux van regenwater de polder binnen. Hierdoor is het water in dit zuidelijk deel van de Hargerpolder (en een deel van de Leipolder) minder zout en zijn er andere flora en fauna te vinden.



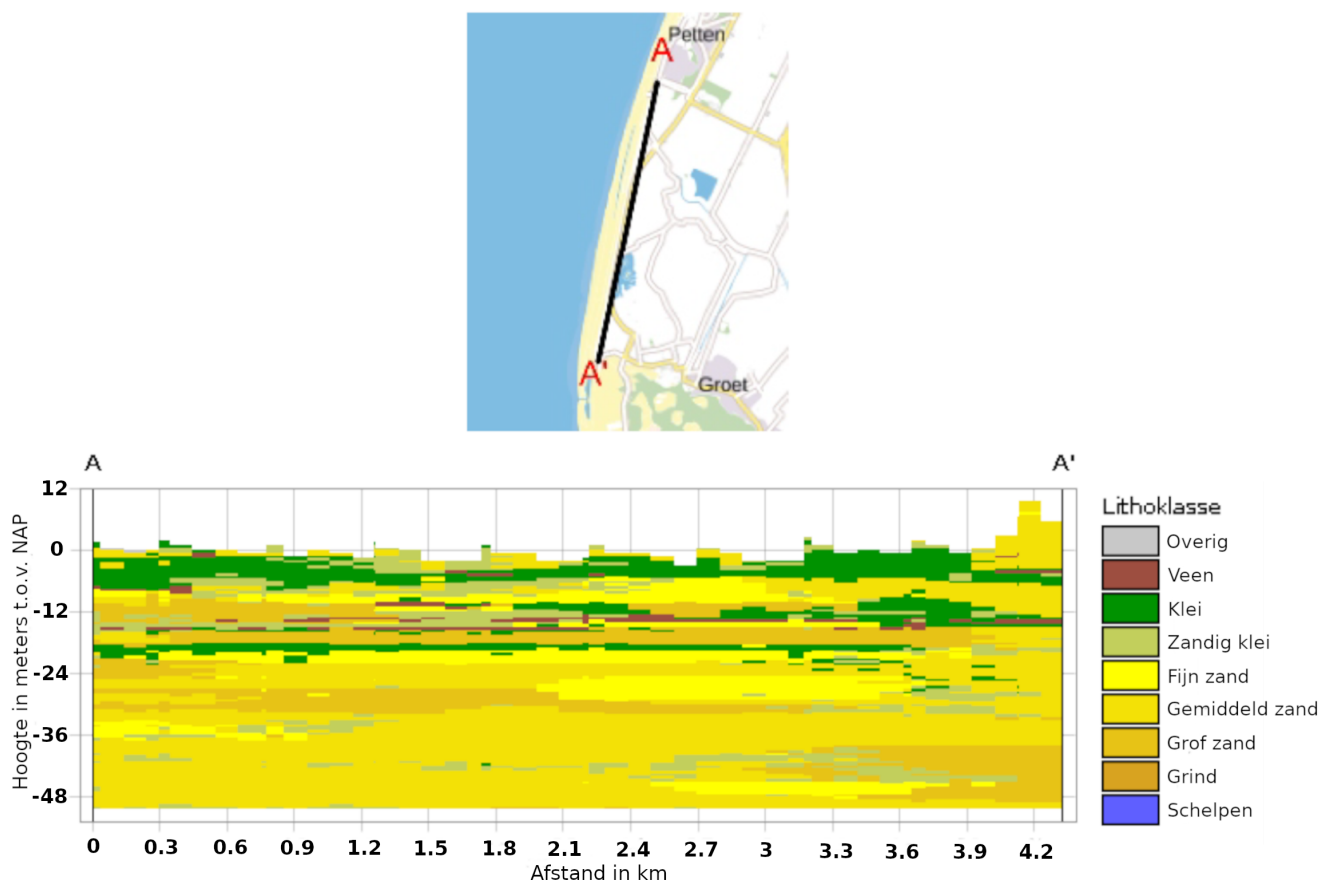
Figuur 2.2: Ligging projectgebied in Nederland

2.2. Geohydrologische opbouw

In deze paragraaf wordt ten eerste de algemene geologische opbouw van de ondergrond van het gebied beschreven. Hierna wordt een beschrijving gegeven van het hydrologische systeem van het gebied.

Geologische opbouw ondergrond

In figuur 2.3 is een doorsnede van de ondergrond van het zuidelijk tot noordelijk punt parallel aan de Hondsbossche duinen te zien. De ondergrond van het gebied bestaat uit een afwisseling van zandlagen en kleilagen. Lokaal is er ook veengrond te vinden. Voor de effecten op de grondwaterstroming wordt ervan uitgegaan dat veen een gelijksoortige invloed heeft als klei. Over vrijwel de gehele doorsnede zijn tot -50 mNAP drie doorlopende kleilagen te onderscheiden; De toplaag aan maaiveld, de middelste op ongeveer -12 mNAP, en de onderste laag op ongeveer -20 mNAP. In de zandlagen zal het grondwater zich gemakkelijker horizontaal kunnen bewegen dan in de kleilagen. In de kleilagen zal het grondwater zich vrijwel alleen verticaal bewegen. In de polder ligt de top-kleilaag aan maaiveld. Dit doet vermoeden dat de grondwaterstand hier begrensd is. Dit wil zeggen dat de grond hier verzadigd is tot aan het maaiveld en dat de stijghoogte van het grondwater boven het maaiveld uitkomt. Dit is voor de rest van het rapport aangenomen. In het duin is dit niet het geval omdat de eerste meters onder maaiveld hier uit zand bestaan. Hier geldt een freatische grondwaterstand.



Figuur 2.3: Doorsnede geologische opbouw Hondsbossche duinen (Dinoloket)

2.2.1. Hydrologisch systeem

In een polderstelsel wordt het hydrologisch systeem voornamelijk bepaald door de polderpeilen die zijn vastgesteld door het verantwoordelijke hoogheemraadschap. Deze polderpeilen worden gehandhaafd door stuwen en duikers zo in de polders te plaatsen zodat ze zo effectief mogelijk in de verschillende

poldervakken de afwatering kunnen beïnvloeden. Daarnaast bevat elke polder minimaal één gemaal dat het overtollige water uit de polder pompt naar een ander hoger gelegen polder of een boezem. In figuur A.1 in appendix A wordt een kaart met de gehandhaafde polderpeilen in het gebied gepresenteerd. Deze polderpeilen zijn vastgesteld door het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK).

Het geohydrologische systeem kenmerkt zich in dit gebied voornamelijk door verschillende kwelstromen vanuit de zee en de omliggende duinen naar de polder. Door het hogere maaiveld van de duinen ten opzichte van de polder is hier een hogere freatische grondwaterstand aanwezig dan de gehandhaafde peilen in alle peilvakken. Hierdoor ontstaan zoete kwelstromen van de duingebieden naar de polders. Het gemiddeld peil van de Noordzee is 0 mNAP, dit is hoger dan de gehandhaafde peilen in alle poldervakken. Hierdoor ontstaat een zoute kwelstroom van de zee naar de polder.

Het zeewater van de Noordzee bevat ongeveer 35 gram zout per liter. De Noordzee heeft een langdurig en constante invloed op het gebied gehad. Zoals al beschreven in paragraaf 2.1.1 heeft het gebied lange tijd vrijwel in direct contact gestaan met de Noordzee en hierdoor is de zoute grondwaterkwaliteit tot ver in het gebied gedrongen. De invloed van de zee is nog steeds merkbaar in het gebied. Vanuit de Noordzee loopt een zoute kwelstroom naar de achterliggende polders. Het meertje De Putten heeft een hoger zoutgehalte dan de het overige oppervlaktewater in het gebied. Dit geeft aan dat het grootste deel van de zoute kwelstroom hier uitstroomt (Groen *et al.*, 2005). Het systeem van sloten ontvangt ook een deel van dit zoute kwelwater. Het oppervlaktewater in de Leipolder is hierdoor over het algemeen erg zout. In de Hargerpolder neemt de zoutconcentratie van het oppervlaktewater landinwaarts geleidelijk af. Een indicatie voor de zoutgehalten in het oppervlaktewater en het grondwater is de aanwezige flora en fauna. Veel van de soorten in de zoute delen van de polders komen enkel in gebieden met een zout klimaat voor.

Vanuit de Schoorlse duinen ten zuiden van het gebied is een zoete kwelstroom aanwezig. Deze kwelstroom ontstaat door aanvulling van neerslag op het hoger gelegen duingebied, in het duin is geen polderpeil aanwezig dus neerslag kan hier vrij infiltreren. Hierdoor bestaat een hogere stijghoogte in dit duingebied. Door deze hogere stijghoogte ontstaat een grondwaterstroming vanuit dit duin naar de lager gelegen poldergebieden.

Vanuit de boezemkanalen komen ook kwelstromen het gebied binnen. De twee boezemkanalen in dit gebied zijn de Hondsbossche vaart en de Hargervaart. Deze kwelstromen zijn brak door de hoge zoutgehalten in deze boezems (Vrije Universiteit Amsterdam en Acacia Water, 2015).

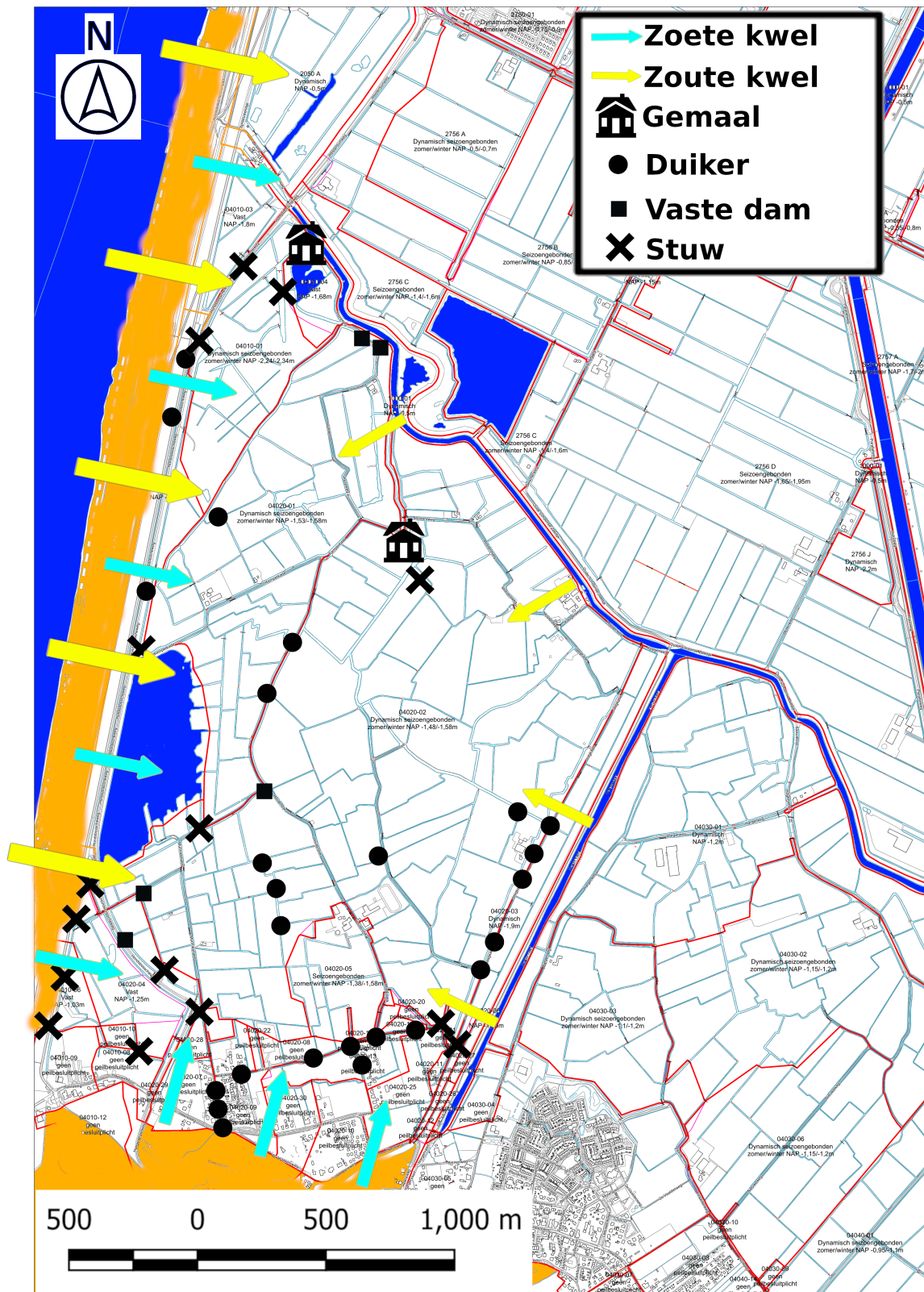
In figuur 2.4 wordt een schematische weergave van de kwelstromen in het gebied gepresenteerd. In dit figuur worden ook de aanwezige waterwerken die het oppervlaktewatersysteem beïnvloeden getoond. In figuur 2.5 wordt het netwerk van sloten met de gemeten EC-waarde in de Leipolder en Hargerpolder weergegeven. Hoe hoger de EC-waarde des te hoger de zoutconcentratie.

Invloed Dijk

De oude dijk die voorheen de enige afscheiding was tussen het poldergebied en de zee is nooit afgebroken en ligt nog op dezelfde plek als voorheen. Deze dijk ligt tegenwoordig verder landinwaarts omdat de Hondsbossche duinen aan de zeezijde zijn opgespoten. Omdat een van de belangrijkste aspecten van een dijk stabiliteit betreft is het ook aannemelijk dat deze dijk invloed heeft op de grondwaterstroming. Er kan van worden uitgegaan dat een dichter grondpakket onder de dijk aangebracht is om de stabiliteit te vergroten. Een dichter grondpakket betekend ook dat de doorlatendheid van de ondergrond kleiner is. Dit minder doorlatende grondpakket beïnvloedt de grondwaterstroming van het duingebied naar de polder en zal de uitbreiding van de zoetwaterbel richting de polder tegenwerken.

Invloed Duin

In de situatie voor de zandsuppletie was er nauwelijks land aan de zeezijde van de dijk. Met de zandsuppletie is er een omvangrijk duingebied ontstaan aan de zeezijde van de dijk. Dit heeft niet alleen de veiligheid van de polder achter de dijk gewaarborgd maar veroorzaakt ook een significant verschil in het hydrologisch systeem van het gebied. Door het aanbrengen van een groot stuk zandgrond aan de zeezijde van de dijk en het feit dat dit gebied niet op een vast peil wordt gehouden door middel van drainage, zoals in de polder het geval is, is het mogelijk voor neerslag om hier te infiltreren. Verder is door het hoger gelegen maaiveld in het duin hier sprake van een freatische grondwaterspiegel (de grondwaterstand is lager dan het maaiveld). Er ontstaat een opbolling in de grondwaterstand. Door deze opbolling zal de geïnfilterde neerslag naar beneden stromen en het zoute grondwater in de diepere lagen langzaam verdrijven. Hierdoor ontstaat een zoetwaterbel onder het duin.



Figuur 2.4: Schematische weergave kwelstromen en waterwerken in Leipolder en Hargerpolder



Figuur 2.5: EC-waarde metingen slotensysteem Leipolder en Hargerpolder (Vrije Universiteit Amsterdam en Acacia Water, 2015)

2.3. Ecologie

Het bestemmingsplan voor het projectgebied wordt nagenoeg volledig bepaald door de ecologische waarde van het gebied. Menselijke ondernemingen zijn zeldzaam in het gebied en de enkele landerijen en bedrijven die er zijn hanteren strenge regels voor natuurbehoud. Door de grote ecologische waarde wordt er veelvuldig gediscussieerd over de toekomstige ontwikkeling van dit gebied. Het is essentieel dat de veiligheid van de zeewering in het gebied wordt gehandhaafd, ook met het oog op zeespiegelstijging. Daarnaast is het van belang dat de zilte tot zoute waterkwaliteit in bepaalde delen van het gebied gewaarborgd blijft. Beide zaken komen samen in het onderzoek van dit rapport, de veiligheid van de zeewering is verbeterd met de komst van het nieuwe duin maar dit zou mogelijk op de lange termijn invloed kunnen hebben op de zilte waterkwaliteit van het gebied. In de komende paragraaf wordt het belang voor het behoud van de ecologische waarden in het gebied beschreven.

2.3.1. Natura-2000 gebied Abtskolk & De Putten

Het projectgebied bestaat voor een groot deel uit het Natura-2000 gebied Abtskolk & De Putten. Zie voor de begrenzing van dit gebied figuur 2.6. Dit gebied heeft de status van Natura-2000 gebied gekregen door de aanwezigheid van zeldzaam zilt grasland waarin veel bijzondere planten voorkomen. Daarnaast liggen in dit gebied de twee zilte meren Abtskolk en De Putten, deze zijn door kleiwinning in de jaren '50 en jaren '70 ontstaan (Groot, a). De combinatie van het zilte grasland en de zoute meren maakt dit Natura-2000 gebied een veelbezochte plek voor verschillende soorten trekvogels. Door het zoute klimaat in de meren zijn deze een goede voedselbron voor vogels. Zo komt er in De Putten onder andere een zoutwater-garnaal voor. Deze garnalen zijn groter dan het voedsel dat vogels kunnen vinden in zoete oppervlaktewateren. Daarnaast zijn de meren ondiep wat de moeite van het vangen van prooien vermindert. Op de zilte graslanden grenzend aan de meren is veel rust te vinden door de afgelegen ligging en het gebrek aan menselijke activiteit. Hierdoor kunnen de vogelsoorten hier in alle rust broeden of rusten voor hun lange trektocht.

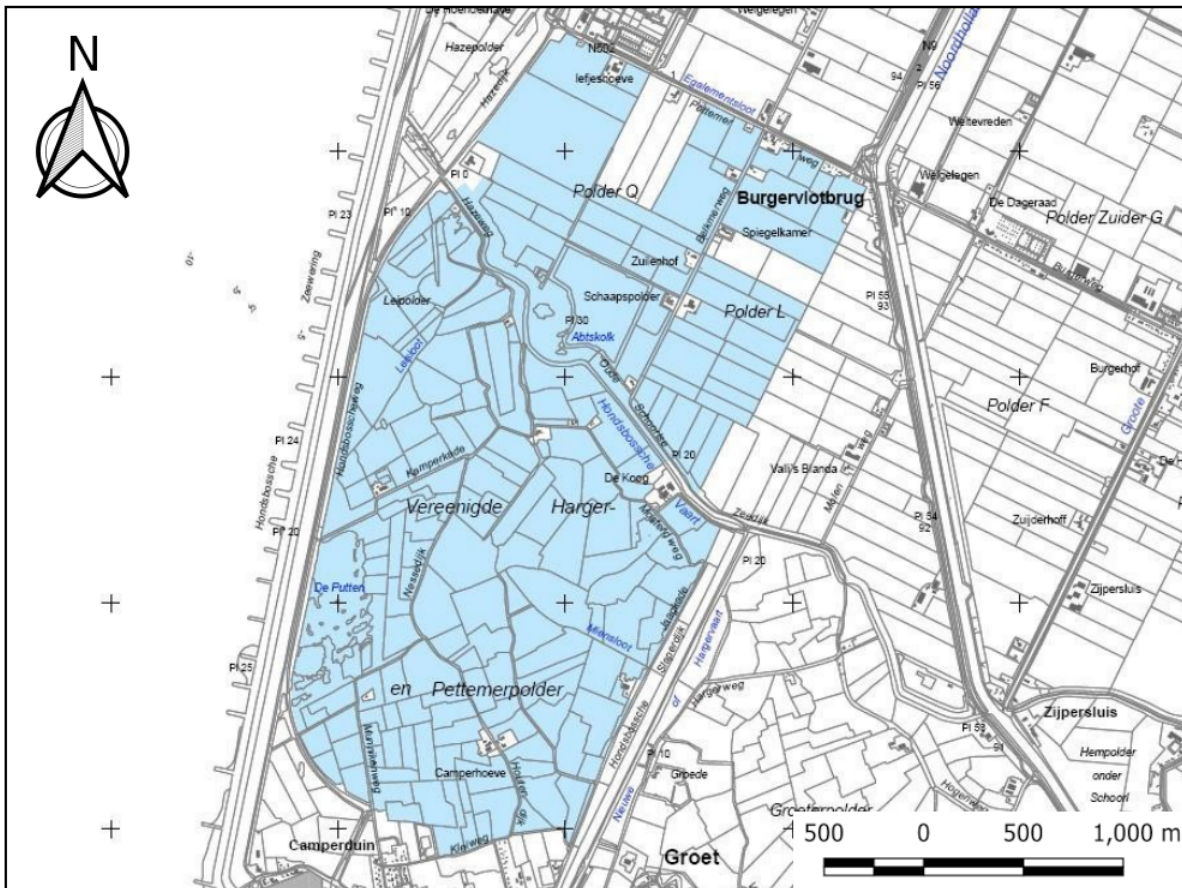
2.3.2. Flora

De zilte graslanden bevatten enkele bijzondere plantensoorten. Op de laagst gelegen delen dicht bij het meertje De Putten is veel zeekraal te vinden, zowel langarige als kortarige zeekraal. Op de iets hoger gelegen delen is kweldergras, Zeeaster, Klein schorrekruid en Gerande schijnspurrie te vinden. En op de hoogst gelegen delen van de zilte graslanden kunnen verschillende soorten van het verbond Engels gras worden gevonden waaronder Zilte rus, Melkkruid, Rood zwenkgras en Fioringras. Daarnaast is in 2006 een exemplaar van de zeldzame bijen-soort Schorzijdebij waargenomen, een extra indicatie van het belang van deze planten voor de ecologie van het gebied (Groot, a).

In het systeem van sloten is de invloed van zoute kwel zichtbaar door de aanwezigheid van veel brakwatervegetatie. Deze brakwatervegetatie is de afgelopen jaren afgenomen maar desalniettemin zijn er nog een aantal brakwater plantensoorten te vinden. Om de sloten heen is nog veel Zeebies te vinden, en in de sloten kan Schedefonteinkruid worden aangetroffen. Ook wordt een deel van het systeem van sloten in het zuidelijk deel van de Hargerpolder beïnvloed door zoete kwel van de Schoorlse duinen. Hier worden onder andere Klimopwaterranonkel, Holpijp, Paarbladig fonteinkruid en Beekpunge gevonden.

2.3.3. Fauna

De meeste vogel-activiteit is te vinden bij het meertje De Putten. In het voorjaar wordt dit meertje voornamelijk bezocht door de kluut en de tureluur. In de herfst maken lepelaars een tussenlanding in dit gebied voor hun grote trek naar Afrika. En in de winter komen smienten, kolganzen en dwergganzen overwinteren in dit gebied (Groot, b). De dwerggans gebruikt de graslanden rond De Putten als een rustplaats tijdens de wintermaanden. Deze ganzensoort is een bedreigde diersoort en de West-Europese populatie is erg klein. De reden van het bezoek van deze zeldzame ganzensoort tijdens de wintermaanden is een introductie-project vanuit Zweden geweest wat heeft plaatsgevonden tussen 1981 en 1991. In deze jaren zijn eieren van de dwerggans uit nesten in Azië verplaatst naar nesten van Brandganzen in Zweden. Daardoor zijn de jonge dwergganzen die zijn geboren in Zweden hun ouders



Figuur 2.6: Begrenzing Natura-2000 gebied Abtskolk & De Putten (Provincie Noord-Holland, 2015)

gevolgd op de nieuwe migratieroute. Deze nieuwe route was veiliger dan de oude migratieroute van de dwergganzen over de Dode Zee omdat hier met grote waarschijnlijkheid veel op de dieren werd gejaagd. Omdat de nieuwe migratieroute ook over het gebied achter de Hondsbossche zeewering kwam zijn de dwergganzen hier met toeval neergestreken. Het gebied bleek voor de dwergganzen een perfecte plek te zijn om de wintermaanden door te komen door de aanwezigheid van zilte graslanden en de zoute meren. Tegenwoordig komt deze populatie dwergganzen jaarlijks naar de polders achter de Hondsbossche zeewering om te overwinteren. Door de aanwezigheid van de vele verschillende vogelsoorten door het jaar heen en de beschermde status van enkele van deze soorten is begin 2006 een ontwerpbesluit om dit gebied om te vormen tot een Vogelrichtlijngebied geïntroduceerd. Uiteindelijk is op 17 februari 2010 dit gebied officieel uitgeroepen tot Vogelrichtlijngebied (met een verplichte inspraakprocedure tot 1 april 2010) (Groot, a).

Naast de vele vogelsoorten is in het zilte water van De Putten ook het zeldzame mosdiertje palingbrood te vinden. De kolonies van deze soort kunnen zo groot worden dat ze een soort koraal vormen. Deze koralen van palingbrood werken positief voor de waterkwaliteit omdat ze leven van plankton en deze uit het water halen (Fortuin, 2010).

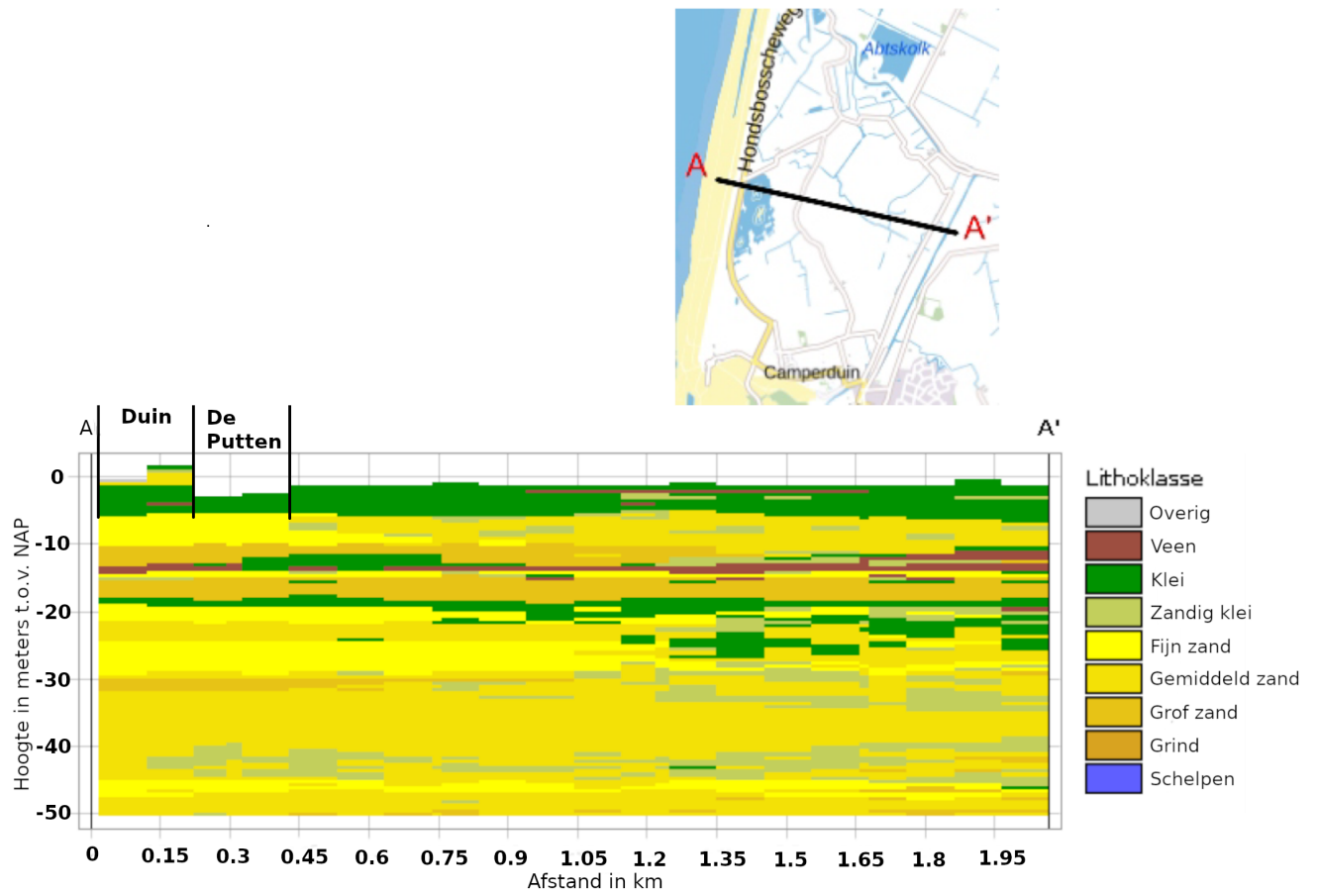
2.4. Doorsnedes

In deze paragraaf worden twee doorsnedes geïntroduceerd waarvan in het rapport een grondwaterstromingsmodel wordt gemaakt. Per doorsnede zal een beschrijving worden gegeven van de geologische opbouw en de belangrijkste randvoorwaarden voor het hydrologisch systeem. Daarnaast zal worden beschreven waarom de doorsnede is gekozen voor verdere analyse. Deze paragraaf gaat niet in op de wijze van het modelleren zelf, dit zal worden beschreven in hoofdstuk 4. Voor dit rapport zijn doorsnedes in de polders gekozen die minder onder invloed zijn van de kwelstromen in Noord-Zuidelijke richting. Daarom voldoet een model van een 2D verticale doorsnede hier als eerste stap van onderzoek aan het grondwaterregime.

2.4.1. Doorsnede 1: De Putten

De eerste doorsnede betreft een lijn haaks op de kust die door het meertje De Putten loopt. De reden om deze doorsnede als eerste te behandelen is het feit dat op deze doorsnede de meeste meetpunten zijn gevestigd. Zo kan een goed en compleet beeld van het grondwater stijghoogte- en geofysisch profiel worden verkregen. Daarnaast is het meertje De Putten een interessante randvoorwaarde voor het grondwaterregime. Het meertje ligt namelijk dicht bij de oude dijk en daarmee dus ook dicht bij het nieuwe duin. Een verandering van het grondwater regime zou kunnen resulteren in een verstoring van de zoute kwelstroom. Omdat dit meertje een groot aandeel van deze zoute kwel onvangt zou dit grote invloed kunnen hebben op de waterkwaliteit. Dit effect zou een grote en onomkeerbare impact hebben op de ecologie in en rond dit meertje.

In figuur 2.7 wordt het geologisch profiel van deze doorsnede gepresenteerd. De geologische opbouw van de ondergrond in deze doorsnede wordt voornamelijk gekenmerkt door kleilagen afgewisseld met zandlagen. In totaal zijn drie kleilagen te onderscheiden. Plaatselijk is een klein pakket van veen te vinden op de diepte van de kleilagen. Direct onder het maaiveld in de polders is een groot pakket klei te vinden. Ook ligt het maaiveld van de polders lager dan het zeepil en het maaiveld van het duin. Daarom kan er van worden uitgegaan dat de stijghoogte in de polder onder druk boven het maaiveld uit kan komen. Het duin en het meertje De Putten zijn in dit figuur ook goed te zien aan de hand van de hoogte van het maaiveld. Het duin wordt aangegeven door het stuk tussen 0.15 en 0.225 kilometer waar het maaiveld boven de 0 meter NAP uitkomt. Het meertje de putten is te onderscheiden tussen 0.225 en 0.45 kilometer door de lagere ligging van het maaiveld ten opzichte van de rest van de polder. Figuur 2.7 geeft de meest waarschijnlijk litho-klasse aan, dus dit wil niet zeggen dat de opbouw van de grond er letterlijk zo uit ziet. Voor het doorsnedemodel De Putten zal dan ook niet letterlijk de geologische opbouw overgenomen worden. Wel zal op basis van figuur 2.7 een inschatting worden gemaakt van de aanwezige kleilagen op de doorsnede.

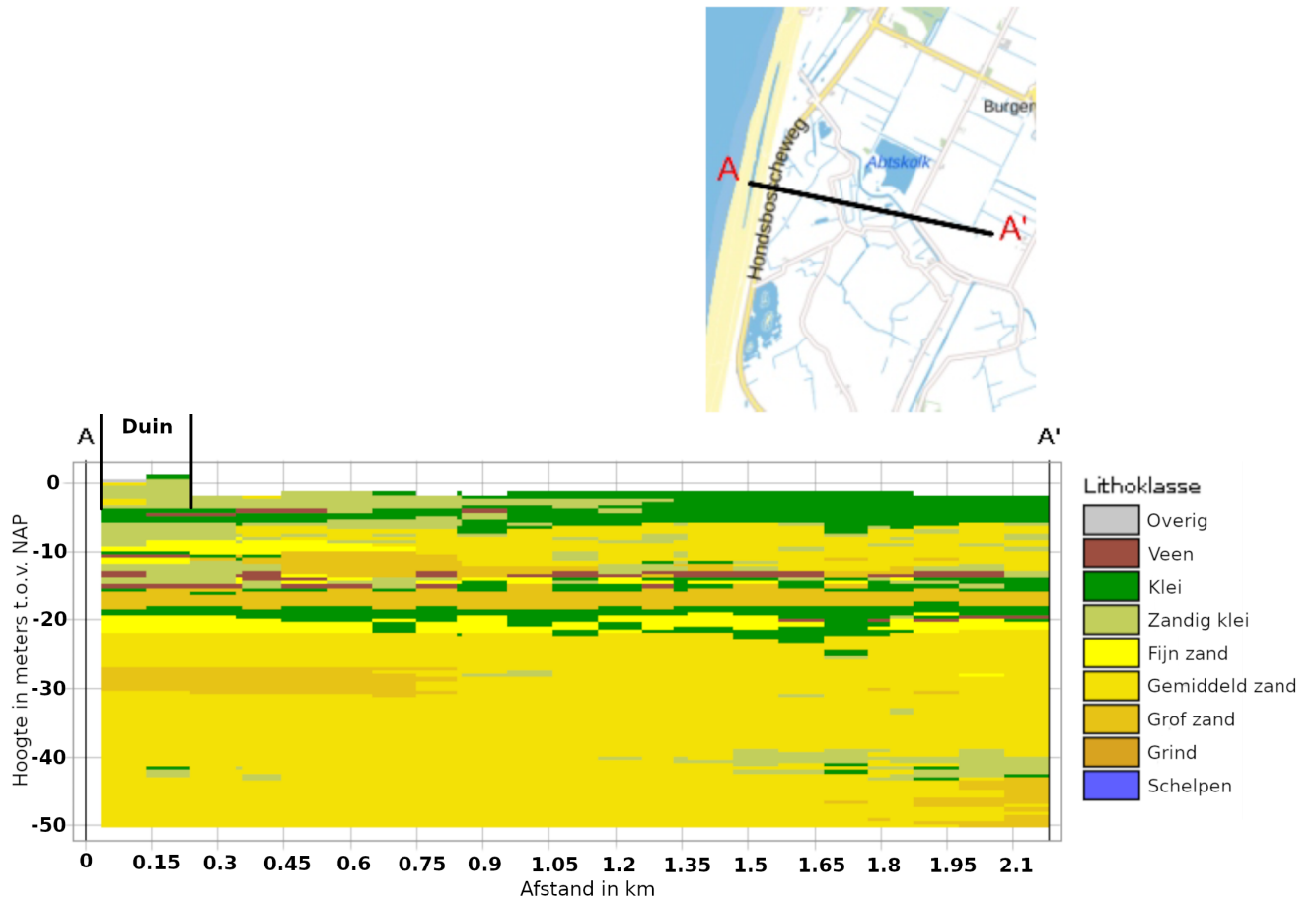


Figuur 2.7: Meest waarschijnlijk geologische opbouw doorsnede De Putten (Dinoloket)

2.4.2. Doorsnede 2: De Abtskolk

De tweede doorsnede betreft de lijn haaks op de kust ten zuiden van het meertje de Abtskolk. Op deze doorsnede licht een tweede raai met meetpunten waardoor ook hier een goed en compleet beeld van de grondwater stijghoogte-en geofysische profielen verkregen kan worden. Daarnaast is op deze doorsnede een langgerekt meertje in het duin aanwezig. Dit meertje is hier aangelegd voor natuurontwikkeling. Direct na aanleg van het duin was het meertje zout. Over tijd is de waterkwaliteit in dit meertje veranderd en momenteel is het meertje bijna volledig zoet. Het grondwaterpeil in dit meertje is niet constant maar fluctueert met de neerslag. Hierdoor kan aangenomen worden dat het peil van het meertje nagenoeg gelijk aan de freatische stijghoogte van het grondwater. Dit meertje zou daarom het grondwater regime in het duin maar ook daarbuiten kunnen beïnvloeden.

In figuur 2.8 is het geologisch profiel van deze doorsnede weergegeven. De geologische opbouw van de ondergrond in deze doorsnede wordt voornamelijk gekenmerkt door kleilagen afgewisseld met zandlagen. Plaatselijk is een klein pakket van veen te vinden in de lijn van de kleilagen. Dit veen gedraagt zich met betrekking tot grondwaterstroming vergelijkbaar als klei en wordt ook zo in het model gezet. De middelste kleilaag wordt dicht bij de zee steeds meer vervangen door zandig klei en veen. Dit doet vermoeden dat de doorlatendheid van de middelste kleilaag hier groter is dan die van de rest van deze kleilaag. Door het grote pakket van klei direct onder het maaiveld van de polder kan er van worden uitgegaan dat hier sprake is van een begrensde grondwaterstand. Dit betekent dat de grond tot aan maaiveld verzadigd is en dat de stijghoogte boven het maaiveld uit komt. Dit is aannemelijk omdat zowel het zeepeil als de grondwaterstand in het duin hoger zijn dan het maaiveld in de polders. Echter wordt de toplaag richting het duin steeds zandiger. Dit geeft de indruk dat de doorlatendheid van de toplaag in dit deel van de doorsnede groter is en dat hier meer contact is met de watervoerende zandlaag daaronder. Figuur 2.8 geeft de meest waarschijnlijk litho-klasse aan, dus dit wil niet zeggen dat de opbouw van de grond er letterlijk zo uit ziet. Voor het doorsnedemodel Abtskolk zal dan ook niet letterlijk de geologische opbouw overgenomen worden.



Figuur 2.8: Meest waarschijnlijke geologische opbouw doorsnede Abtskolk (Dinoloket)

3

Verzamelde meetdata

In dit hoofdstuk worden de beschikbare metingen gepresenteerd. Allereerst worden de twee verschillende soorten data van belang voor het in kaart brengen van de dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming geïntroduceerd. Ook wordt voor beide soorten data de methode van meting in het gebied kort uitgelegd. Daarna worden de locaties van de peilbuizen in het gebied wordt gegeven en er wordt aangegeven welke van deze peilbuizen zijn gebruikt voor de ijking van de doorsnedemodellen. Van deze peilbuizen die gebruikt worden voor ijking wordt de beschikbare verzamelde data getoond en geanalyseerd.

3.1. Type metingen

In het projectgebied zijn verscheidene metingen verricht die samen een beeld geven van de grondwaterkwaliteit- en kwantiteit door de tijd. Voor de validatie (via ijking) van het model zal voor dit rapport exclusief gebruik worden gemaakt van de beschikbare peilbuis metingen. De reden hiertoe is dat de peilbuis metingen over het algemeen het meest nauwkeurig zijn. Bovendien is het netwerk van meetputten uitgebreid waardoor er genoeg data beschikbaar is om de doorsnedemodellen aan te ijken. In deze paragraaf wordt een introductie gegeven voor de methode waarmee de grondwaterkwaliteit- en kwantiteit wordt gemeten in de peilbuizen in dit gebied.

3.1.1. Geofysica

De geofysische metingen hebben betrekking op de elektrische weerstand van de ondergrond. Met deze weerstanden kunnen onder andere veranderingen in zoutgehalte van het grondwater worden bepaald. Zout water heeft een lagere elektrische weerstand dan zoet water. Momenteel loopt er veel onderzoek naar het koppelen van elektrische weerstandsmetingen in de ondergrond aan het zoutgehalte van het grondwater (Acacia Water, 2017) (Haitjema B.V., 2015). Dit onderzoek richt zich onder andere op het verschil in elektrische weerstand van de grondlagen zelf. Klei heeft over het algemeen een lagere elektrische weerstand dan zand en dit verschil beïnvloedt de metingen. Hierdoor is het lastig te bepalen welk aandeel van het verschil in elektrische weerstand wordt veroorzaakt door het zoutgehalte en welk deel door de grondsoort. De metingen dienen daarom momenteel voornamelijk als indicatie van veranderingen in de grondwater kwaliteit. Aan deze verandering kan nog geen grootte aan worden gegeven in de vorm van verschil in zoutconcentratie. Bovendien zal uit sommige grondlagen van het diepteprofiel geen informatie kunnen worden gehaald. Het verschil in weerstand van een grondlaag kan de effecten van een deviatie in zoutconcentraties overschaduwden waardoor een verschil in zoutconcentratie in een zoutlaag onopgemerkt blijft.

Om de elektrische weerstand te meten wordt in de peilbuizen een EM-sonde neergelaten en weer omhoog gehaald. Deze EM-sonde meet tijdens het neerlaten en ophalen de elektrische weerstand tot circa 1 meter diameter rond de peilbuis. Ook wordt bij deze methode de gammastraling gemeten. Met deze gammastraling kunnen de kleilagen worden onderscheiden van de zandlagen. Kleilagen produceren namelijk een grotere gamma straling dan zandlagen. Met deze identificatie van de kleilagen kan een inschatting worden gemaakt van de invloed van de kleilaag op de gemeten weerstand en zodoende kan een beter beeld van het zoutgehalte van het grondwater worden gemaakt. Maar zoals

hierboven beschreven is zitten er nog onzekerheden in de methode en zijn de metingen voornamelijk een indicatie van verandering en niet van exact zoutgehalte.

3.1.2. Stijghoogtes

De zoetwaterstijghoogtes worden in dit projectgebied en in de omliggende polders gemeten met een netwerk van peilbuizen. Omdat de polders een vast, dynamisch of seizoensgebonden peil hebben is het voor het Hoogheemraadschap belangrijk om de grondwaterstanden (stijghoogte aan maaiveld) goed bij te houden en tijdig de afwatering aan te passen om het gestelde peil te behalen. Om het volledige stromingsregime van het grondwater in kaart te brengen wordt de zoetwaterstijghoogte op verschillende filterdieptes gemeten.

Voor dit modelonderzoek zijn voornamelijk de peilbuizen langs de in paragraaf 2.4 gedefinieerde doorsnedes van belang. De gemeten zoetwaterstijghoogteprofielen dienen als referentie voor de berekende zoetwaterstijghoogteprofielen van de doorsnedemodellen. Voor de ijking van de modelresultaten wordt een gemiddelde waarde van de gemeten zoetwaterstijghoogte per filterdiepte genomen. Deze gemiddelde waarde is gebaseerd op de data van 1 maart 2020 tot en met 31 augustus 2020. Deze reeks van data betreft de meest recente data tijdens handhaving van het zomerpeil. Voor het model zelf wordt namelijk ook het zomerpeil gebruikt.

Zoetwaterstijghoogte

Er bestaan verschillende methoden om grondwaterstijghoogtes te representeren. De verschillende methoden hebben allen een andere kijk op het interpreteren van de dichtheidsafhankelijke component van de stijghoogte. De waterbron-stijghoogte ("Point water head") neemt als dichtheid de gemeten dichtheid van het grondwater op het punt van meting aan. De zoetwaterstijghoogte ("Fresh water head") neemt als dichtheid de waarde van $1000 \frac{kg}{m^3}$ aan, dit is de waarde van de dichtheid van zoet water. De Omgevings-stijghoogte ("Environmental head") is de stijghoogte die het dichtst bij de echte stijghoogte in de buurt komt. Deze methode van stijghoogte berekenen houdt rekening met de variatie van dichtheid over de diepte van de peilbuis. In figuur 3.1 zijn de representaties van de bovengenoemde soorten stijghoogtes gepresenteerd.

In de metingen van dit project worden alle stijghoogtes omgerekend naar de zoetwaterstijghoogtes in meters ten opzichte van NAP zodat ze met elkaar vergeleken kunnen worden. In het gebied is een grote variatie aan zoutgehalte in het grondwater, zowel in het horizontale vlak als over de diepte. Hierdoor varieert de dichtheid van het grondwater sterk. Door het omrekenen naar zoetwaterstijghoogte wordt de gemeten druk op verschillende diepte in alle peilbuizen omgerekend met eenzelfde dichtheid en referentieniveau. Hierdoor is de zoetwaterstijghoogte niet langer afhankelijk van dichtheidsveranderingen. Een nadeel van de zoetwaterstijghoogte is dat de "echte" stijghoogte hier niet mee berekend kan worden, de zoetwaterstijghoogte is altijd groter of gelijk aan deze "echte" stijghoogte. Dit is voor de horizontale grondwaterstroming echter niet belangrijk. Hiervoor is het verschil in grondwaterdruk belangrijk, en deze is af te leiden uit de zoetwaterstijghoogte in combinatie met de dichtheid van zoet water.

In vergelijkingen 3.1 en 3.2 zijn de formules voor horizontale en verticale stroming getoond. De k-factor representeert de doorlatendheid van de ondergrond (m^2), de μ -factor representeert de dynamische viscositeit (kg/m/s) van het grondwater en de P staat voor de grondwaterdruk. De horizontale grondwaterstroming is alleen indirect afhankelijk van de dichtheid van het grondwater met betrekking tot de druk P. De verticale grondwaterstroming is naast de indirecte afhankelijkheid middels de grondwaterdruk ook direct afhankelijk van de dichtheid van het grondwater. Dit heeft te maken met de zwaartekracht-term die zijn intrede maakt in deze vergelijking.

Met formule 3.3 kan de berekende stijghoogte uit het model omgerekend worden naar de zoetwaterstijghoogte. Dit is belangrijk om de modelresultaten te kunnen vergelijken met de metingen. Om de gemeten stijghoogtes om te rekenen naar zoetwaterstijghoogtes wordt de dichtheid van het grondwater op de locatie van de meting ook gebruikt, in de formule is dit $\rho_{gemeten}$. Omdat alle stijghoogtewaarden ten opzichte van eenzelfde referentiepunt (0 mNAP) worden bekeken wordt z geïntroduceerd. Z is het verschil tussen het punt van meting en het referentiepunt (0 mNAP). De dichtheid van zoet water is aangenomen als $1000 \frac{kg}{m^3}$.

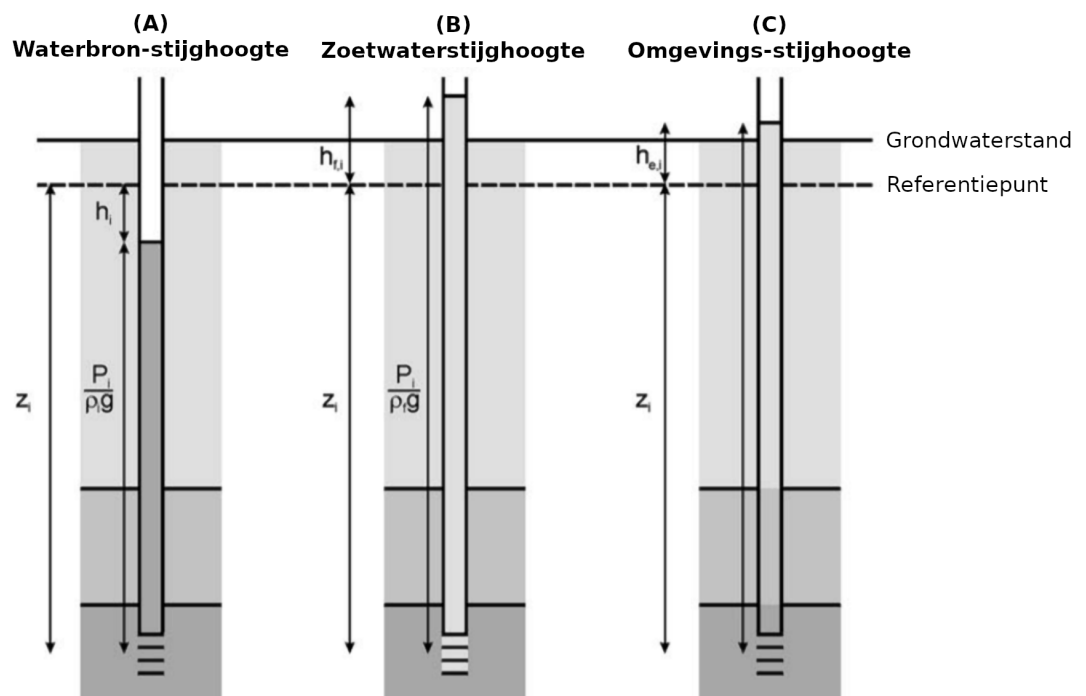
$$q_{\text{horizontaal}} = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\delta P}{\delta x}$$

$$q_{\text{verticaal}} = -\frac{k}{\mu} \cdot \left(\frac{\delta P}{\delta z} + \rho \cdot g \right) \quad (3.1)$$

$$q_{\text{horizontaal}} = -\frac{k \cdot \rho_{\text{zoet}} \cdot g}{\mu} \cdot \frac{\delta h_{\text{zoet}}}{\delta x}$$

$$q_{\text{verticaal}} = -\frac{k \cdot \rho_{\text{zoet}} \cdot g}{\mu} \cdot \left(\frac{\delta h_{\text{zoet}}}{\delta z} + \left(\frac{\rho - \rho_{\text{zoet}}}{\rho_{\text{zoet}}} \right) \right) \quad (3.2)$$

$$h_{\text{zoet}} = z + \frac{\rho_{\text{zoet}}}{\rho_{\text{gemeten}}} \cdot (h_{\text{gemeten}} - z) \quad (3.3)$$



Figuur 3.1: Representatie van verschillende soorten stijghoogtes (Post *et al.*, 2007)

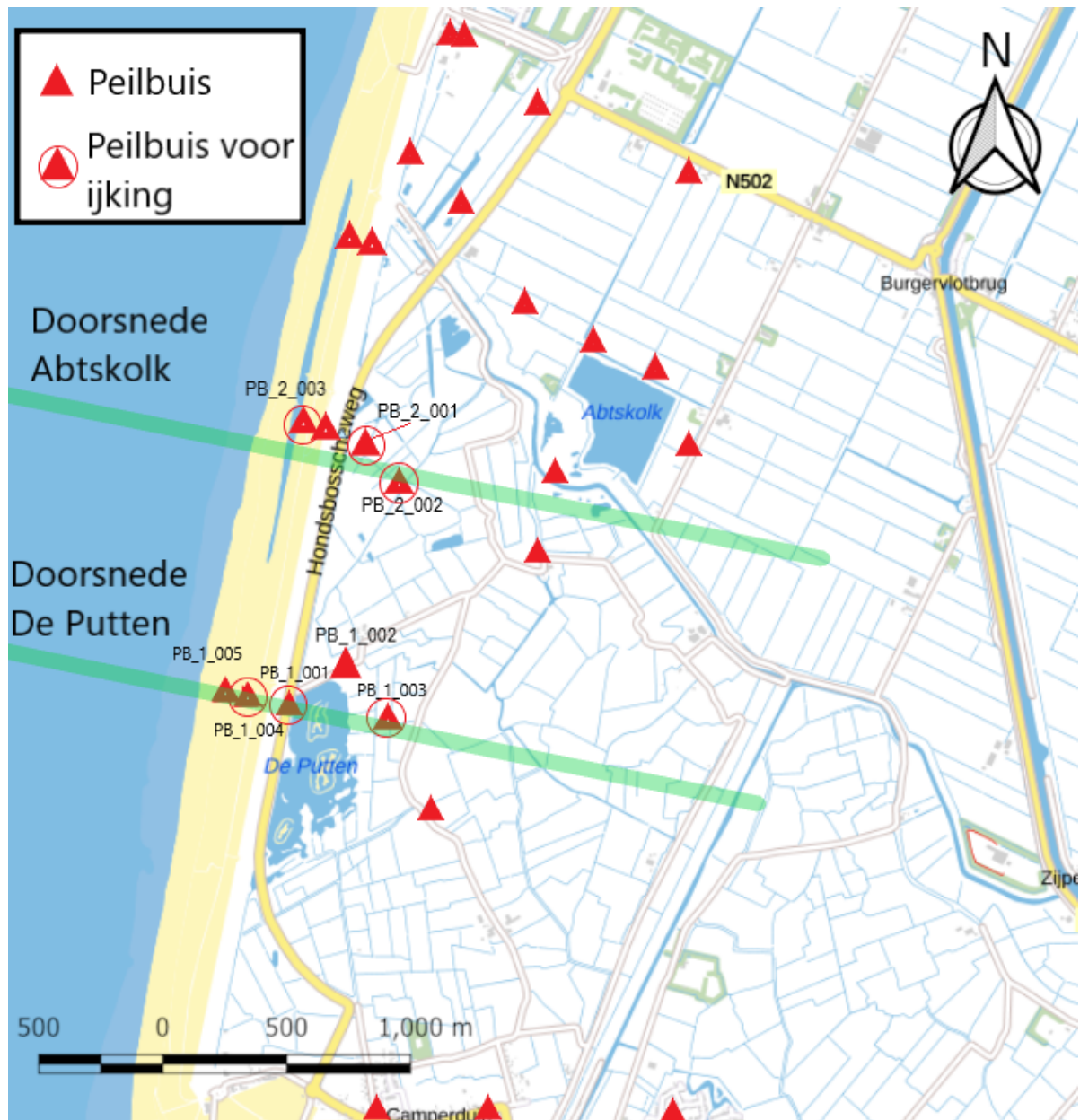
3.2. Geofysische en stijghoogte profielen

De metingen afkomstig van de peilbuizen worden in diepteprofielen uitgezet. Voor de geofysische metingen is dit een continu profiel en voor de stijghoogte metingen wordt op een aantal filterdieptes de zoetwaterstijghoogte gemeten. In deze paragraaf is het netwerk van peilbuizen gepresenteerd. Daarnaast is aangegeven welke peilbuizen van belang zijn voor de beoogde doorsnedes. Van deze peilbuizen zijn de geofysische-en stijghoogteprofielen gegeven.

3.2.1. Peilbuis meetnet

Op de Hondsbossche duinen en het gebied hierachter ligt een uitgebreid netwerk van peilbuizen. Veel van deze peilbuizen liggen in het verlengde van elkaar op verscheidene lijnen loodrecht op de kustlijn,

zogenoemde raaien. In figuur 3.2 is een plattegrond van het netwerk van peilbuizen in het gebied getoond. In dit figuur wordt ook de positie aangegeven van de peilbuismetingen die worden meegenomen voor het ijken van de doorsnedemodellen. Enkele andere peilbuizen die ook op of dichtbij de doorsneden liggen zijn niet meegenomen in de ijking omdat de data hiervan niet beschikbaar is gekomen tijdens dit project.

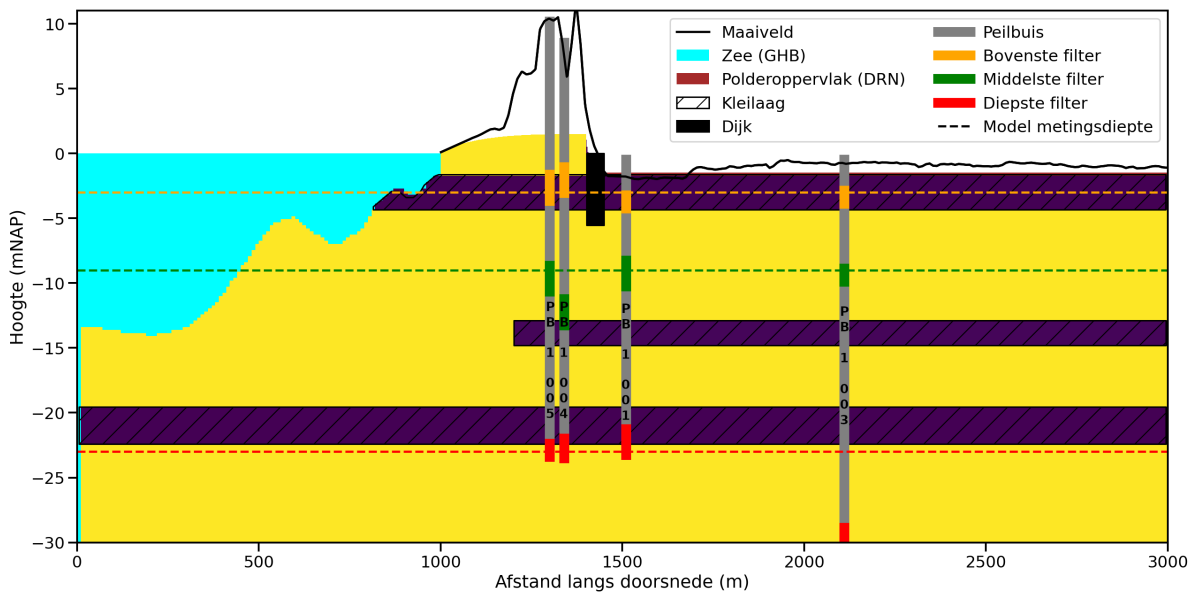


Figuur 3.2: Aanwezige peilbuizen in gebied

3.2.2. Metingen in doorsnede De Putten

Vier peilbuizen liggen direct in lijn met een doorsnede dwars door De Putten. Hiervan worden er drie gebruikt voor het ijken van het doorsnedemodel. De drie peilbuizen waarvan de metingen worden meegenomen in het ijken van het doorsnedemodel zijn; PB_1_001, PB_1_003 en PB_1_004. Peilbuis PB_1_005 wordt ook getoond in de modelresultaten maar is niet meegenomen in de ijking. De reden hiertoe is de onbetrouwbaarheid van de metingen in deze peilbuis. In figuur 3.3 zijn de locaties van de peilbuizen in de doorsnede getoond. De dieptes van de filters zijn aangegeven en hierbij zijn de gekozen dieptes voor ijking van het model getoond. Verderop in dit hoofdstuk onder het kopje "De

Putten: Stijghoogte profielen is dit verder toegelicht.



Figuur 3.3: Peilbuizen met filterdieptes en ijkingsdieptes model op doorsnede De Putten

De Putten: Geofysische profielen

In figuur 3.4 zijn de geofysische metingen van doorsnede De Putten gepresenteerd. De Elektrische weerstand op de x-as is in de logaritmische schaal geplott om een beter beeld te krijgen van de verandering door de jaren heen.

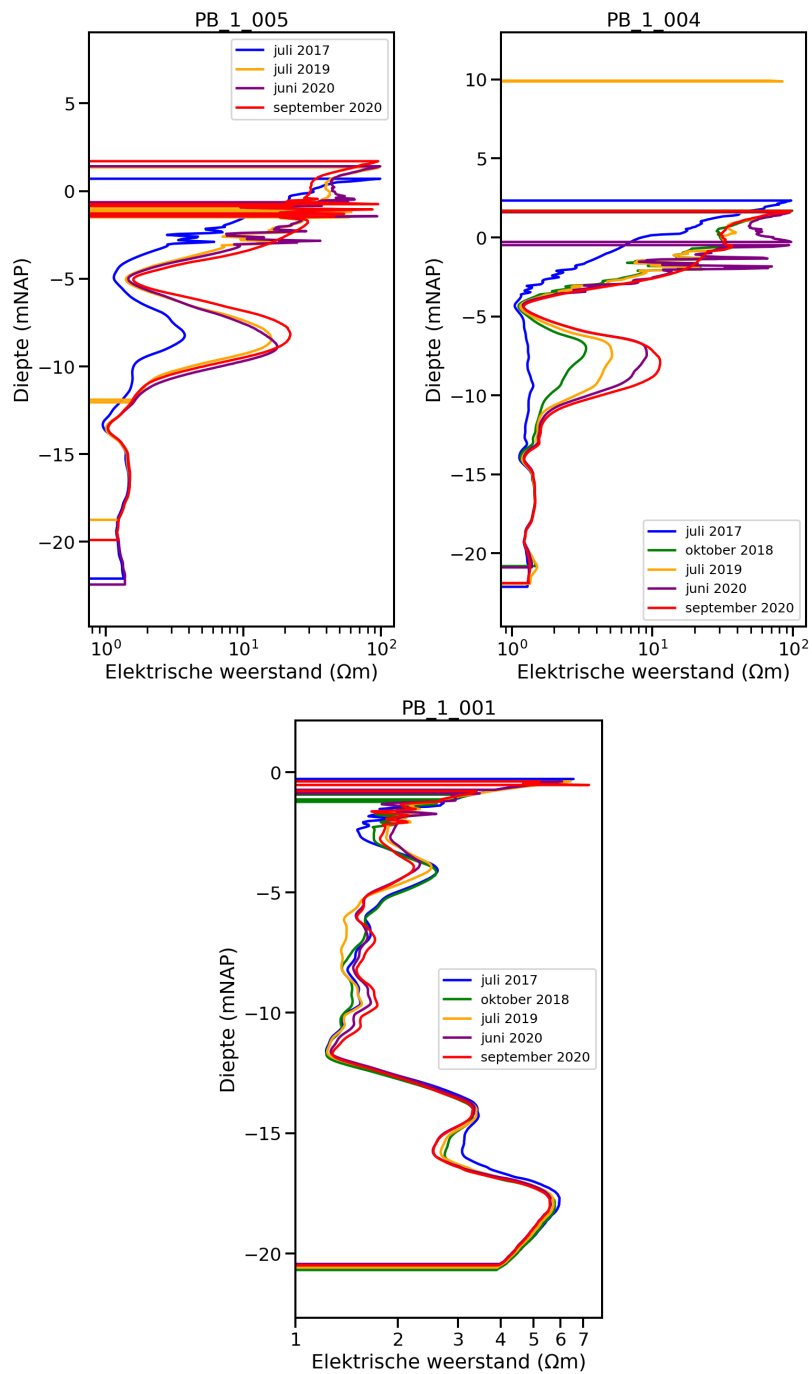
De metingen in het duin van peilbuis PB_1_004 en PB_1_005 laten een grotere toename van elektrische weerstand zien in vergelijking tot de meting in de polder van peilbuis PB_1_001. Voor zowel peilbuis PB_1_004 als PB_1_005 is een toename van elektrische weerstand in de tijd te zien tot ongeveer -10 mNAP. Dit duidt op verzoeting van het grondwater. Echter is rond -5 mNAP de toename van de elektrische weerstand plaatselijk een stuk kleiner. Deze verminderde toename van de elektrische weerstand kan door een lokale geologische opbouw worden veroorzaakt of kan het resultaat zijn van de weerstandsvariatie van de kleilaag zelf op deze diepte.

De Putten: Stijghoogte profielen

In figuur 3.5 en 3.6 zijn de gemeten zoetwaterstijghoogtes voor de peilbuizen op doorsnede De Putten weergegeven. Er is een verschil te zien in de gemeten zoetwaterstijghoogtes in de zomer en in de winter voor alle peilbuizen. Echter is deze variatie voor peilbuis PB_1_001 minder duidelijk. Dit komt door het feit dat deze peilbuis in het peilvak van het meer De Putten ligt. In dit peilvak geldt een vast peil wat betekent dat deze niet verandert met het seizoen. In figuur A.1 in de Appendix is te zien dat de gehandhaafde zomerpeilen over het algemeen hoger liggen dan de gehandhaafde winterpeilen. Dit patroon is omgekeerd ten opzichte van de gemeten zoetwaterstijghoogtes. Blijkbaar is het effect van de afname van de effectieve neerslag in de zomer bepalender dan de verminderde afwatering door verhoging van het polderpeil.

Voor peilbuizen PB_1_001 en PB_1_003 in de polder is de gemeten zoetwaterstijghoogte van de dieper gelegen watervoerende laag hoger dan de gemeten zoetwaterstijghoogte in de eerste watervoerende laag. Dit betekent dat het grondwater hier omhoog stroomt. Voor peilbuis PB_1_004 in het duin is de gemeten zoetwaterstijghoogte van de dieper gelegen watervoerende laag lager dan de gemeten zoetwaterstijghoogte in de eerste watervoerende laag. Dit betekent dat het grondwater hier naar beneden stroomt. Samengevat betekent dit dat het grondwater in het duin overwegend naar beneden stroomt en in de polder overwegend naar boven. In figuur 3.7 en 3.8 zijn ter verduidelijking van dit verschil in stromingsrichting tussen het duin en de polder de metingen van de individuele peilbuizen PB_1_001 en PB_1_004 getoond.

In tabel 3.1 zijn de gemiddeld gemeten zoetwaterstijghoogtes van 1 maart 2020 tot en met 31 augustus 2020 voor de peilbuizen op doorsnede De Putten gepresenteerd. Hiervoor zijn vaste dieptes



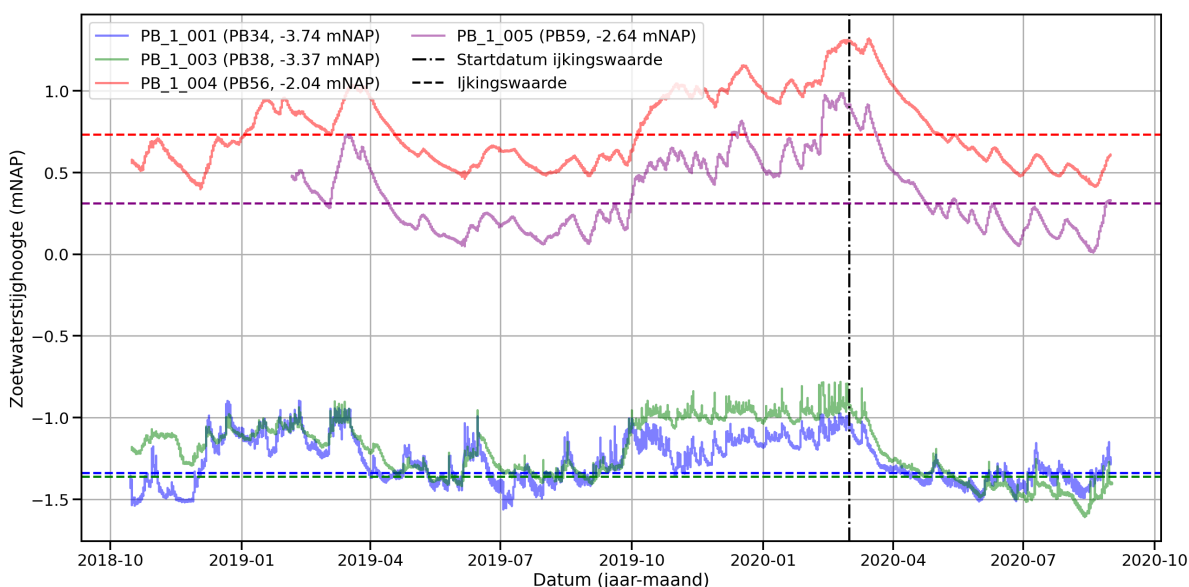
Figuur 3.4: Geofysische profielen peilbuizen doorsnede De Putten

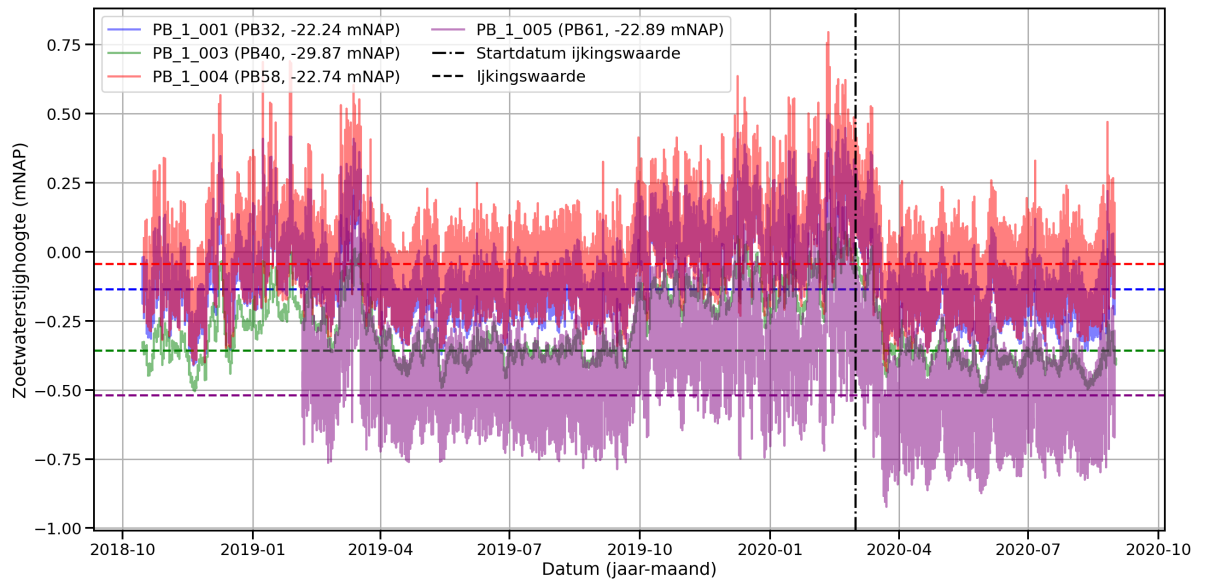
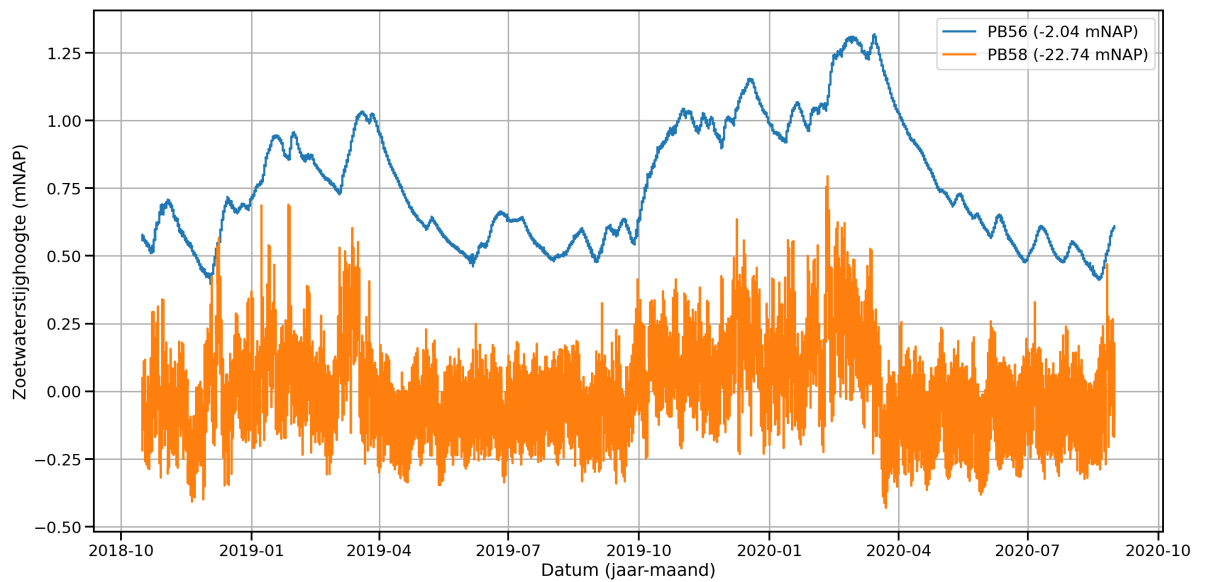
Tabel 3.1: Gemiddeld gemeten zoetwaterstijghoogte van de peilbuizen op doorsnede De Putten in de periode van 01-03-2020 t/m 31-08-2020

	PB_1_005	PB_1_004	PB_1_001	PB_1_003
Afstand vanaf zee (m)	300	340	510	1110
Zoetwaterstijghoogte (mNAP):				
1e watervoerende laag (-3 mNAP)	0.31	0.73	-1.34 ¹	-1.36
3e watervoerende laag (-23 mNAP)	-0.52	-0.04	-0.14	-0.36 ²

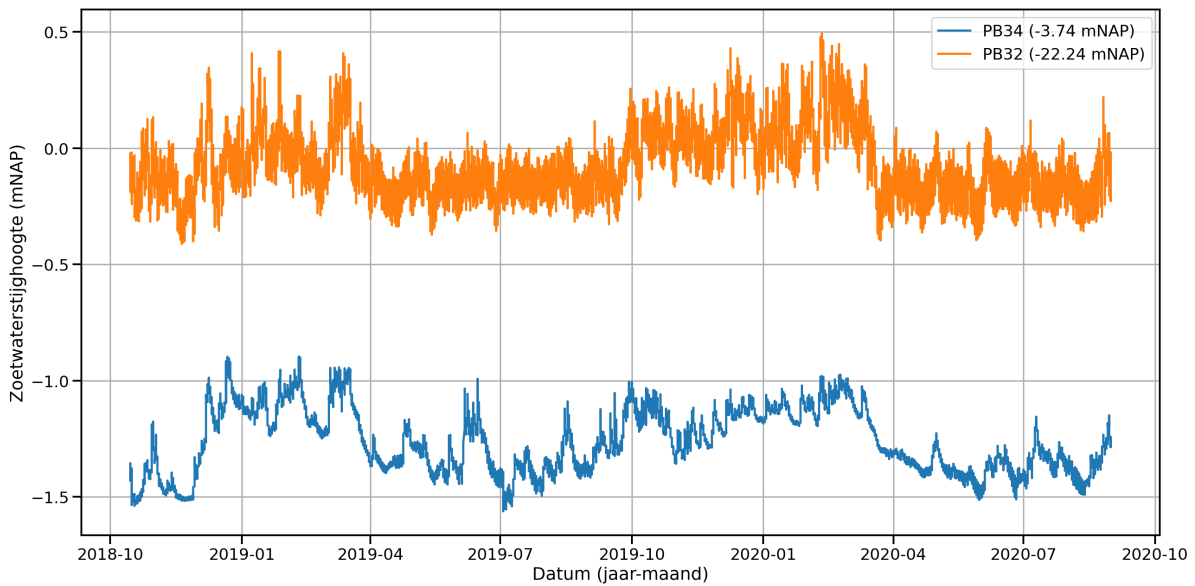
van -3 en -22 meter genomen voor alle peilbuis-metingen zodat de waarden met elkaar vergeleken kunnen worden. Deze dieptes zijn zo gekozen dat ze voor vrijwel elke peilbuis tussen de boven-en onderkant van het filter waarin gemeten wordt liggen. Uitzonderingen zijn de meting in de bovenste watervoerende laag van peilbuis PB_1_001 en de meting in de diepste watervoerende laag van peilbuis PB_1_003. Voor de meting in de bovenste watervoerende laag van peilbuis PB_1_001 is dit verschil erg klein (0.24 m) en dit wordt niet als een probleem gezien. Voor de meting in de diepste watervoerende laag van peilbuis PB_1_003 is het verschil groter (6.87 m), maar omdat beide filterdieptes in dezelfde watervoerende laag liggen en het verschil in zoetwaterstijghoogte binnen deze diepe laag minimaal is wordt aangenomen dat de waarde als representatief kan worden beschouwd. In figuur 3.3 zijn de afwijkingen tussen de filterdieptes en de gekozen ijkingsdieptes ook goed te zien.

De zoetwaterstijghoogtes worden kleiner met toenemende afstand van de zee. Dit valt te verklaren door het hogere peil van de zee ten opzichte van de polderpeilen. Bij de zoetwaterstijghoogtes van PB_1_004 ten opzichte van de zoetwaterstijghoogtes van PB_1_005 is dit tegenovergesteld. Een verklaring voor deze observatie in het zoetwaterstijghoogteprofiel zou een plaatselijk grotere doorlatendheid in de bovenste kleilaag onder het duin kunnen zijn. Hierdoor daalt de stijghoogte plaatselijk doordat er meer grondwater via dit deel van de kleilaag naar de dieper gelegen watervoerende laag kan stromen. Dit fenomeen is nader onderzocht in een variatie op het doorsnedemodel. De resultaten van deze variatie zijn te vinden in hoofdstuk 5.3.1.

Figuur 3.5: Zoetwaterstijghoogte 1^e watervoerende laag¹Meting tussen -3.24 mNAP en -4.24 mNAP²Meting tussen -28.87 mNAP en -30.87 mNAP

Figuur 3.6: Zoetwaterstijghoogte 3^e watervoerende laag

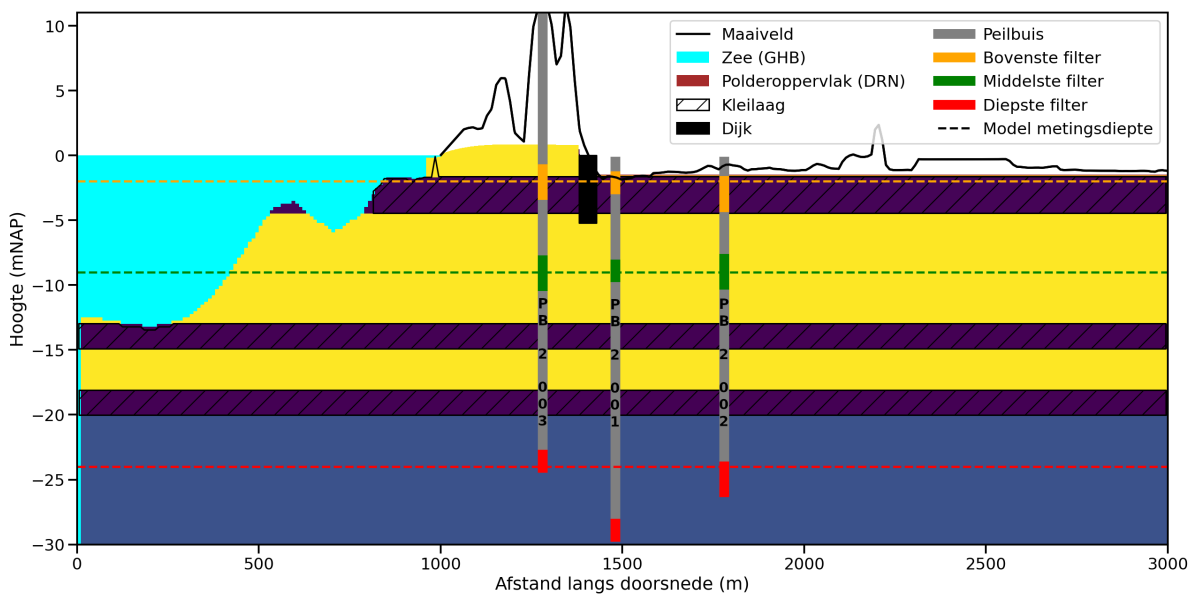
Figuur 3.7: Zoetwaterstijghoogte in peilbuis PB_1_004 (peilbuis in duin)



Figuur 3.8: Zoetwaterstijghoogte in peilbuis PB_1_001 (peilbuis in polder)

3.2.3. Metingen in doorsnede Abtskolk

De locatie van de doorsnede Abtskolk was bedoeld om door het meertje Abtskolk te lopen. Maar omdat de metingen uit de peilbuizen rond dit meer niet toereikend waren (metingen reikten maar tot -10 mNAP) is besloten de doorsnede iets zuidelijker te kiezen. Hier ligt een raai peilbuizen waarvan de metingen wel geschikt zijn. In deze peilbuizen is een kortere tijdreeks aan data beschikbaar omdat deze peilbuizen zijn aangelegd na de zandsuppletie. Maar de filters van deze peilbuizen liggen dieper zodat over de gehele diepte van het doorsnedemodel kan worden geijkt. Omdat het model is gebaseerd op de verandering van het grondwater regime na de zandsuppletie is de kortere tijdreeks geen probleem. De geselecteerde peilbuizen zijn hiermee PB_2_001, PB_2_002 en PB_2_003. In figuur 3.9 zijn de locaties van deze peilbuizen op de doorsnede getoond. De dieptes van de filters zijn aangegeven en hierbij zijn de gekozen dieptes voor ijking van het model getoond. Verderop in dit hoofdstuk onder het kopje "Abtskolk: Stijghoogte profielen" is dit verder toegelicht.



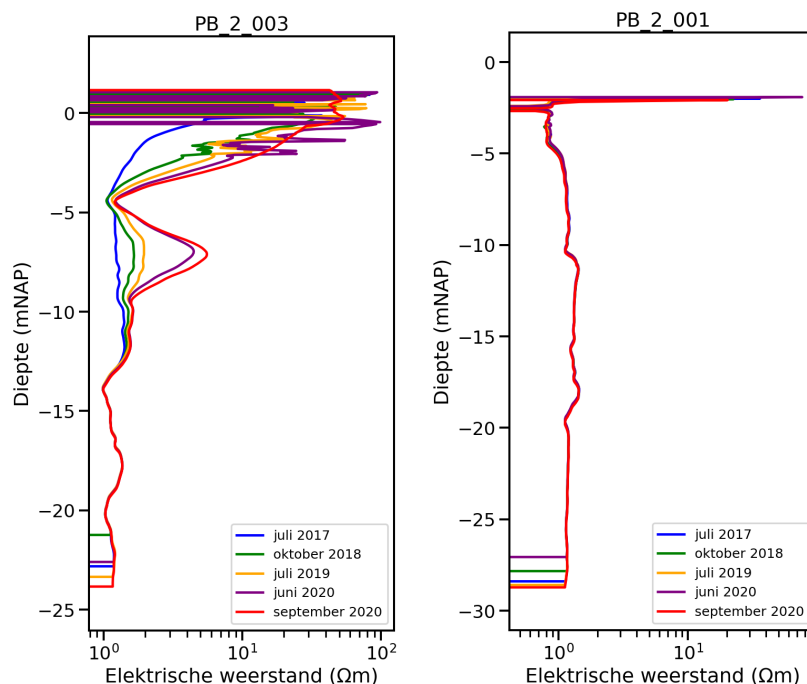
Figuur 3.9: Peilbuizen met filterdieptes en ijkingdieptes model op doorsnede Abtskolk

Abtskolk: Geofysische profielen

In figuur 3.10 zijn de geofysische profielen van peilbuis PB_2_001 en PB_2_003 getoond. Deze peilbuizen liggen beide op de gedefinieerde doorsnede Abtskolk.

Peilbuis PB_2_001 ligt in de polder. In het geofysisch profiel van deze peilbuis is nauwelijks tot geen toename van de elektrische weerstand te zien over de gehele diepte. Rond -2 mNAP is een kleine piek te zien. Dit kan duiden op een klein laagje zoet water dat hier aanwezig is direct onder het maaiveld. Dit kan echter ook een meetfout zijn door aanwezigheid van een geleidbaar materiaal in de peilbuis op deze diepte.

Peilbuis PB_2_003 ligt in het duin. In het geofysisch profiel van deze peilbuis is een toename in elektrische weerstand over de tijd te zien op de eerste 10 meter vanaf het maaiveld. Deze toename in weerstand duidt op een verzoeting van het grondwater (zoet water heeft een grotere elektrische weerstand dan zout water). Echter is rond -5 mNAP deze toename in elektrische weerstand nagenoeg afwezig. Op deze diepte is een kleilaag aanwezig. Er is nog geen uitsluitel gevonden of deze dip in weerstandstoename te maken heeft met de invloed op de elektrische weerstand van kleilagen zelf of het feit dat de verzoeting van het grondwater niet plaatsvindt in deze kleilaag.



Figuur 3.10: Geofysische profielen peilbuizen doorsnede Abtskolk

Abtskolk: Stijghoogte profielen

De gemeten zoetwaterstijghoogtes in de peilbuizen voor de doorsnede direct ten zuiden van de Abtskolk zijn gepresenteerd in figuur 3.11 en 3.12. Voor elke peilbuis is een verschil te zien tussen het gemeten grondwaterpeil in de zomer en in de winter. Over het algemeen is het gemeten zomerpeil lager dan het winterpeil. Voor peilbuis PB_2_003 in het duin is dit te verklaren door het feit dat er in de zomer over het algemeen minder effectieve neerslag infiltreert. Hierdoor zal er in de zomer maanden minder neerslag infiltreren en zal het grondwaterpeil dalen. Voor peilbuizen PB_2_001 en PB_2_002 in de polder is naast deze daling van de effectieve neerslag ook het gehandhaafde polderpeil van belang. Interessant om te zien is dat dit gehandhaafde polderpeil in de zomer voor bijna alle peilvakken hoger ligt dan in de winter. Toch is er een lager gemeten grondwaterpeil te observeren in de zomers. Blijkbaar is de daling van de effectieve neerslag zo sterk dat zelfs met een hoger gehandhaafd peil, en dus minder afwatering, het grondwaterpeil daalt. Enkel de zoetwaterstijghoogtes van peilbuis PB_2_003 komen boven 0 mNAP. Dit valt te verklaren doordat deze peilbuis direct naast het duinmeer ligt en het peil in het duinmeer boven maaiveld ligt.

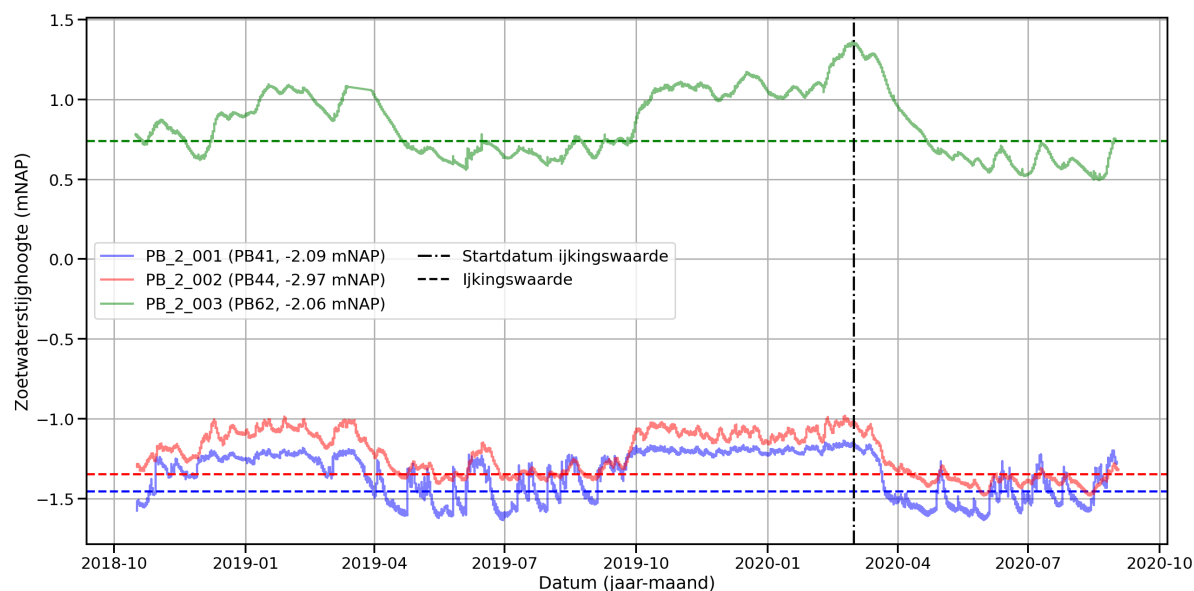
Bij de peilbuizen PB_2_001 en PB_2_002 is het gemeten grondwaterpeil hoger in de diepere water-

Tabel 3.2: Gemiddeld gemeten zoetwaterstijghoogte in de peilbuizen op doorsnede Abtskolk in de periode van 01-03-2020 t/m 31-08-2020

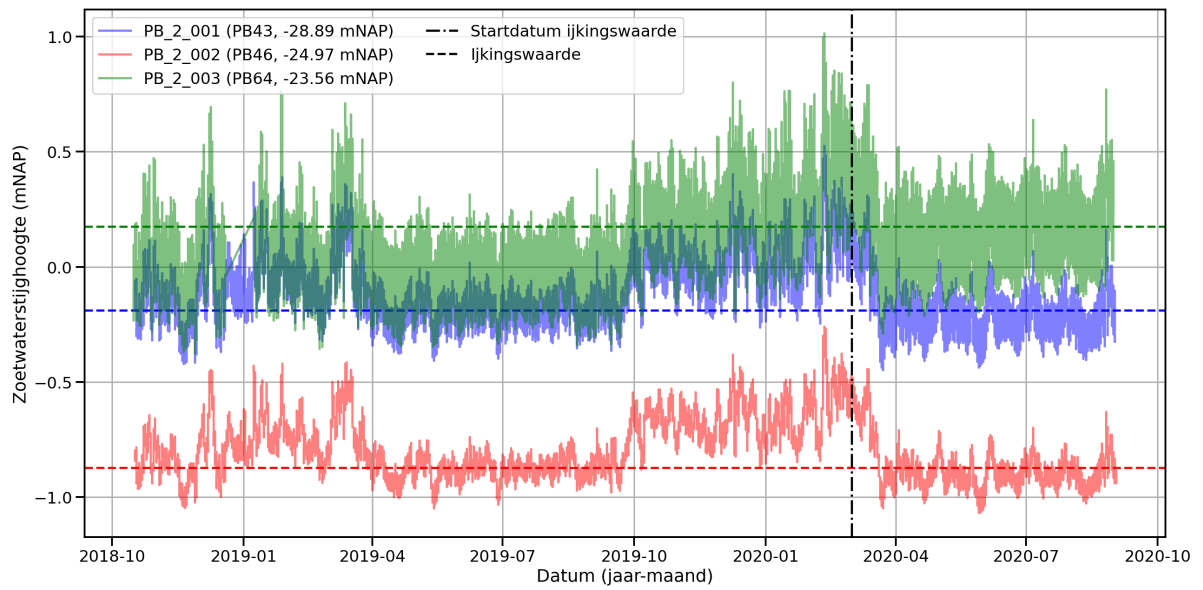
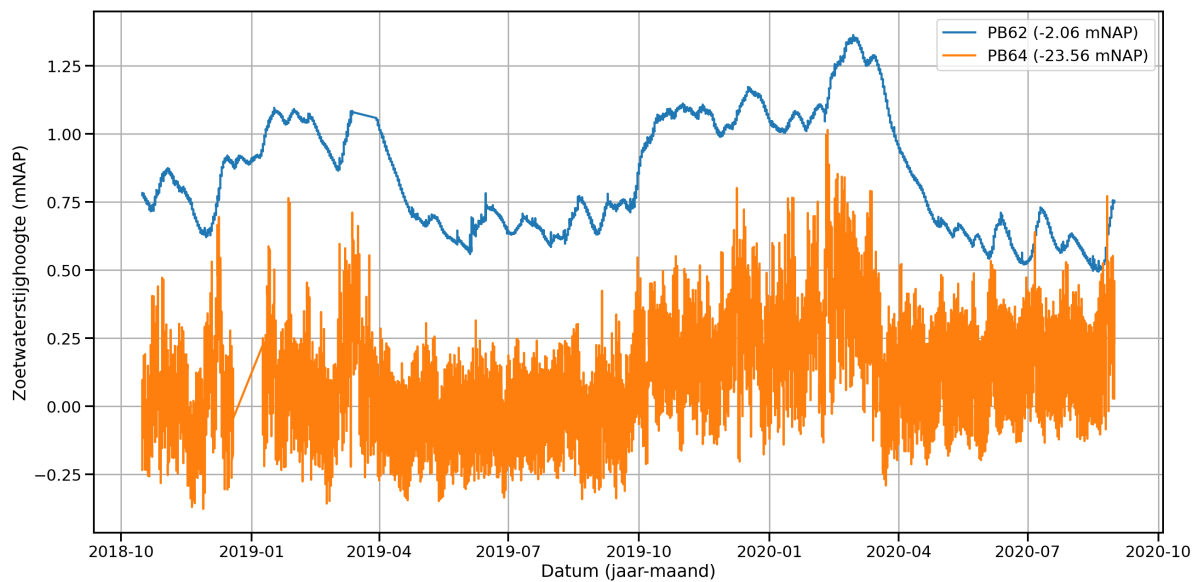
	PB_2_003	PB_2_001	PB_2_002
Afstand vanaf zee (m)	280	480	780
Zoetwaterstijghoogte (mNAP):			
1 ^e watervoerende laag (-2 mNAP)	0.74	-1.45	-1.35
3 ^e watervoerende laag (-24 mNAP)	0.18	-0.19	-0.87

voerende laag. Dit betekent dat het grondwater hier omhoog stroomt. In peilbuis PB_2_003 is het gemeten grondwaterpeil lager in de diepere watervoerende laag. Dit betekent dat het grondwater hier omlaag stroomt. Hiermee kan geobserveerd worden dat het grondwater in het duin voornamelijk omlaag stroomt en in de polder voornamelijk omhoog. In figuur 3.13 en 3.14 zijn ter verduidelijking van dit verschil in stromingsrichting tussen het duin en de polder de metingen van de individuele peilbuis PB_2_001 in de polder en peilbuis PB_2_003 in het duin getoond.

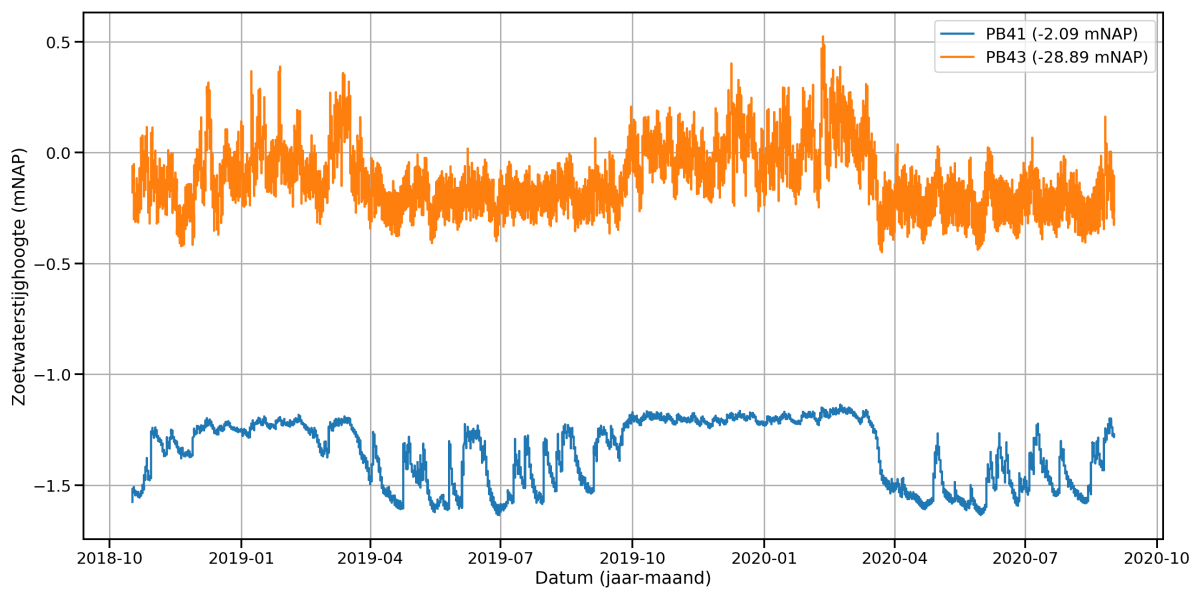
In tabel 3.2 zijn de gemiddeld gemeten zoetwaterstijghoogtes van 1 maart 2020 tot en met 31 augustus 2020 voor de peilbuizen op doorsnede de Abtskolk gepresenteerd. Hiervoor zijn vaste dieptes van -2 en -24 meter genomen voor alle peilbuis-metingen zodat de waarden met elkaar vergeleken kunnen worden. Deze dieptes zijn zo gekozen dat ze voor bijna elke peilbuis tussen de boven- en onderkant van het filter waarin gemeten wordt liggen. Een uitzondering is de meting van peilbuis PB_2_001 in de diepste watervoerende laag. De diepte van deze meting wijkt 4.39 m af van de gestelde waarde. Dit wordt niet als een probleem gezien aangezien beide dieptes in dezelfde watervoerende laag liggen. Ook kan er worden aangenomen dat de zoetwaterstijghoogte in deze diepe laag nauwelijks verandert over de diepte. In figuur 3.9 is deze afwijking tussen de filterdiepte en de gekozen ijkingsdiepte ook goed te zien.

Figuur 3.11: Zoetwaterstijghoogte 1^e watervoerende laag

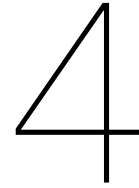
¹Meting tussen -28.39 m en -29.39 m

Figuur 3.12: Zoetwaterstijghoogte 3^e watervoerende laag

Figuur 3.13: Zoetwaterstijghoogte in peilbuis PB_2_003 (peilbuis in duin)



Figuur 3.14: Zoetwaterstijghoogte in peilbuis PB_2_001 (peilbuis in polder)



Model methode

In dit hoofdstuk wordt de opbouw van het grondwatermodel beschreven en toegelicht. Allereerst wordt het basismodel beschreven. Hierna worden de verschillende randvoorwaarden voor het grondwaterregime in de gekozen doorsnedes gepresenteerd. Hierbij zal uitleg worden gegeven over hoe deze randvoorwaarden in de doorsnedemodellen opgenomen worden. Tot slot zullen een paar onderzoeken worden verricht om te kijken wat de invloed van het aanpassen van individuele parameters in het basismodel is op de stijghoogtes en de vorming van de zoetwaterbel over tijd. Deze kennis zal uiteindelijk gebruikt worden om de doorsnedemodellen te ijken aan de metingen.

4.1. Opzet model

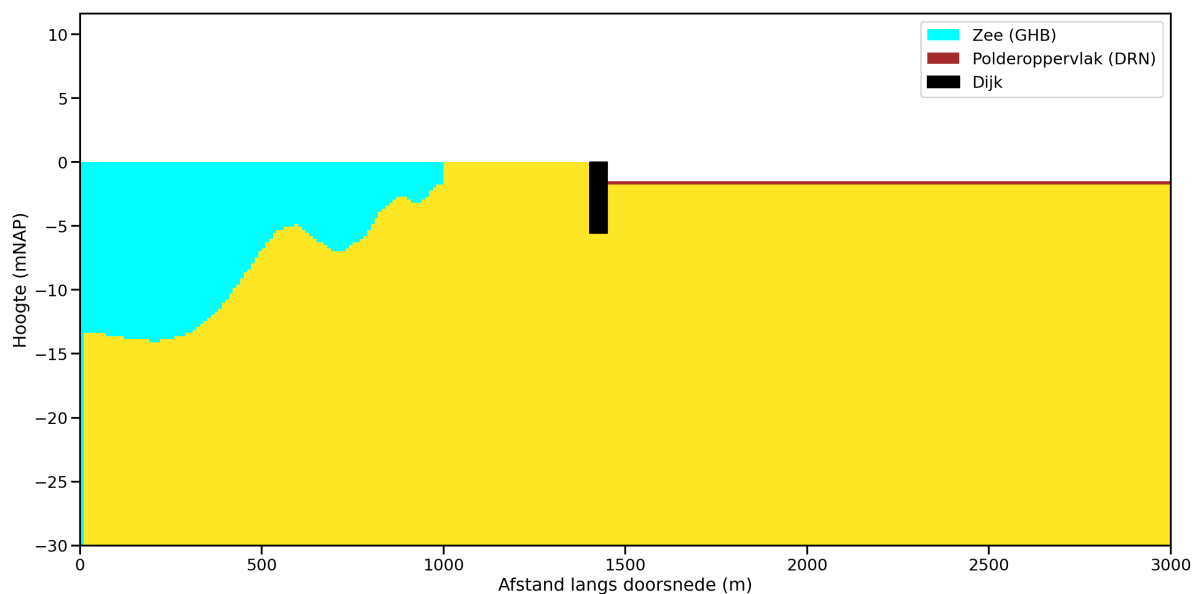
In deze paragraaf zal worden geschetst wat het doel van het model is. Daarna zal het basismodel worden geïntroduceerd dat dient als basis voor alle verdere doorsnedemodellen.

4.1.1. Doel model

Het model betreft een representatie van de dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming in een polder en duingebied grenzend aan een zee. Het betreft een 2 dimensionaal doorsnedemodel. Het doel van het model is om te begrijpen hoe verschillende geohydrologische randvoorwaarden invloed hebben op de vorming van een zoetwaterbel onder een nieuw aangelegd duingebied tussen een polder en de zee. Door het hogere maaiveld en een freatische stijghoogte in het duin vormt de neerslag een zoetwaterbel onder het duin. Deze zoetwaterbel beïnvloedt de zoute kwelstroom van de zee naar de polder. Hiermee worden delen van het oppervlaktewater in de polder verzoet. Deze verzoeting kan nadelige gevolgen hebben voor de natuurwaarde van het gebied. Dit is het geval voor de polders achter de Hondsbossche zeewering. Door de verzoeting kunnen hoog gewaardeerde flora en fauna in het Natura-2000 gebied verloren gaan. Dit model brengt deze verzoeting in kaart. Met deze informatie kan beter begrepen worden welke geologische randvoorwaarden invloed hebben op de verdeling van de zoetwater uitstroom in de polder. Door dit beter te begrijpen kan er doelgerichter en effectiever worden ingegrepen om de verzoeting van het polderoppervlak te verminderen.

4.1.2. Basismodel

Het basismodel vormt de basis voor beide doorsnede-modellen. De hoofdlijnen van de modelstructuur worden in dit basismodel bepaald en zijn gelijk voor alle doorsnede-modellen. De standaard randvoorwaarden zijn zo op een eenduidige manier in de modellen verwerkt. Deze standaard randvoorwaarden zijn de zee, de discretisatie van de ondergrond (nog geen grondtypes), de polder, het duingebied en de oude dijk. Met deze basis kan een goede vergelijking tussen de doorsnede-modellen gemaakt worden. In paragraaf 4.3 wordt het basismodel gebruikt om het effect van verschillende randvoorwaarden te testen. Met deze informatie kan het basismodel gemakkelijker omgezet worden in een doorsnedemodel die overeenkomt met de gemeten peilbuisdata. Om een idee te krijgen van de opbouw van de code in Python worden in appendix C kort de verschillende pakketten geïntroduceerd en zal worden toegelicht waar deze pakketten voor dienen binnen het model. In figuur 4.1 wordt het basismodel gepresenteerd.



Figuur 4.1: Basismodel

Correctie freatische stijghoogte

Grondwaterstroming is begrensd door de grondwaterstand (freatische stijghoogte) of door het maaiveld. De vorm van deze begrenzing heeft te maken met de stijghoogte van het grondwater ten opzichte van het maaiveld. Als de stijghoogte in de grondlagen tot boven het maaiveld uitkomt betekent dit dat de toplaag van de ondergrond relatief ondoorlatend is (denk aan een dicht kleipakket), hiermee komt het water in de ondergrond onder druk te staan. Bij het ontbreken van een ondoorlatende toplaag zal de stijghoogte een variërende freatische vorm aannemen.

Voor het model wordt aangenomen dat de stijghoogte van het grondwater in de polder begrensd is door een kleilaag op maaiveld niveau. Voor het duingebied wordt een freatische grondwaterstand aangenomen. Een freatische grondwaterstand betekent dat maar een deel van het model doorstroomt wordt. De doorlatendheid is dus afhankelijk van de grondwaterstand. Hiermee is het numeriek lastiger om op te lossen. Voor het model is daarom een correctie nodig voor de grondwaterstand in het duingebied. In de doorsnedemodellen wordt de grondwaterstroming begrensd door de top van het model. Voor de polder wordt deze top op het gemiddelde maaiveld-niveau gezet (-1.5 mNAP). In het duin wordt de initiële top op het gemiddelde peil van de zee gezet (0 mNAP). Voor het duingebied wordt een correctie voor de freatische stijghoogte toegepast. Het model wordt herhaaldelijk doorgerekend waarbij de vorige berekende stijghoogte in het duingebied als top van het model, en dus als begrenzing van de grondwaterstroming, wordt gebruikt. Voor dit model is 2 tot 3 keer doorrekenen voldoende afhankelijk van de gebruikte parameters.

Zout-concentratie

De polders grenzend aan de Hondsbossche duinen hebben voorheen in nauw contact gestaan met de zee en zijn ook meerdere malen overstroomd zoals beschreven in paragraaf 2.1.1. Daarnaast is door het verschil in peil tussen de zee en de polder een kwelstroom aanwezig. Deze kwelstromen voeden de achterliggende polders constant met zout water. Voor dit model wordt aangenomen dat de polders volledig zout zijn bij het begin van de modelberekening (net na de aanleg van het duin).

Daarom wordt in het model voor elke cel een beginwaarde van 35 g/L zout ingevoerd. Dit is het zoutgehalte van de Noordzee. Voor de GHB-cellen die de zee representeren wordt de zoutconcentratie vastgezet. Dit betekent dat de concentratie in deze cellen niet kan veranderen tijdens het doorrekenen van het model. Hier is voor gekozen omdat er wordt aangenomen dat de zoutconcentratie in het Noordzeewater overal gelijk is. Daarnaast heeft de Noordzee een groot volume waardoor verandering in zoutconcentratie door de neerslag-infiltratie vanuit het duin uitgesloten is.

Tabel 4.1: Modelparameters grondsoorten

Grondsoort	Horizontale doorlatendheid [m/d] (grondwaterformules.nl, 2020)	Anisotropie-factor [-]
Zand	1 - 100	0.5
Klei/veen	0.0001 - 0.05	0.1

4.1.3. Stroomlijnen

Om een duidelijker beeld te verkrijgen van de richting van de grondwaterstroming in de modeldoorsnedes zijn stroomlijnen toegevoegd aan de modelplots met betrekking tot zoutconcentratie van het grondwater. Tussen elke twee opeenvolgende stroomlijnen stroomt eenzelfde debiet aan grondwater. Des te dichter de stroomlijnen bij elkaar liggen des te groter het debiet grondwaterstroming in dit deel van de modeldoorsnede.

In het model is dit voor de gewenste tijdstap uitgerekend door de stroming aan de bovenzijde en onderzijde van elke laag cellen te berekenen. Met deze data is een contour-plot gemaakt. De opeenvolgende lijnen van deze contour-plot hebben een gelijk verschil in debiet ten opzichte van elkaar. Dit zijn de stroomlijnen.

4.2. Uitgangspunten doorsnedemodellen

Om het basismodel te transformeren in een doorsnedemodel zullen de randvoorwaarden aanwezig op de doorsnede die het grondwater regime in het doorsnedemodel kunnen beïnvloeden moeten worden toegevoegd. Extra uitleg over de pakketten gebruikt voor het simuleren van deze randvoorwaarden is te vinden in appendix C.

4.2.1. Bodemopbouw

De opbouw van de ondergrond bepaald voor een groot deel het gedrag van de grondwaterstroming in het doorsnedemodel. De twee belangrijkste parameters van de bodemopbouw met betrekking tot de grondwaterstroming zijn de horizontale doorlatendheid en anisotropie. Uit de vermenigvuldiging van deze twee parameters volgt de verticale doorlatendheid.

Grondsoorten

Voor het model wordt aangenomen dat er twee soorten grond aanwezig zijn in de doorsnedes; Zand en klei. Deze twee grondsoorten hebben verschillende parameter waarden wat betreft de horizontale doorlatendheid en anisotropie. De mogelijke bandbreedtes voor de parameters van de verschillende grondsoorten zijn gegeven in tabel 4.1. De anisotropie-factor is de factor waarmee de horizontale doorlatendheid vermenigvuldigd wordt om de verticale doorlatendheid te krijgen. Dit anisotrope gedrag van grond is het resultaat van de structuur waarin de korrels liggen. Kleinere korrels betekenen over het algemeen dat de grondsoort een groter anisotropisch gedrag vertoont.

Dijk

De oude dijk is na de zandsuppletie onderdeel geworden van het duingebied. In de doorsnedemodellen is de dijk 50 meter breed en bevindt zich op het meest landinwaartse deel van het duingebied. Er wordt verwacht dat de doorlatendheid van de grondlagen onder de dijk een stuk lager zullen zijn dan in de omliggende grondlagen ten behoeve van de stabiliteit van de dijk. Daarom zijn de cellen direct onder de dijk tot een diepte van -4 m NAP vrijwel ondoorlatend gemaakt.

4.2.2. Grondwateraanvulling, afwatering en grondwaterbegrenzing

De effectieve neerslag in het model wordt via het recharge-pakket (RCH) opgegeven in het model (zie voor uitleg pakketten appendix C). Deze effectieve neerslag betreft alleen de hoeveelheid water die infiltreert in de ondergrond. Dit betekent dat de fractie verdamping en afstromend water hier van af is getrokken. Voor het model is een grondwateraanvulling van 1 mm/d aangenomen.

Polder

In een polder wordt het hydrologisch systeem voornamelijk bepaald door de gehandhaafde polderpeilen in het gebied. Deze polderpeilen kunnen vast (zo dicht mogelijk bij een bepaald peil) of flexibel

(binnen twee uiterste peilen) zijn en worden in deze polders strikt door het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) gehandhaafd. Dit wil zeggen dat de stijghoogte voor de top-cellen ter plekke van de polder gelijk aan het gehandhaafd peil in het desbetreffende peilvak wordt aangenomen. Om het polderpeil vast te leggen in het model zijn drains (DRN-pakket) aangebracht (zie voor uitleg pakketten appendix C). Per doorsnede is gekeken naar het peil dat wordt gehandhaafd in de achterliggende polders. Dit peil varieert over de doorsnede door de aanwezigheid van peilvakken in de polders. Ook varieert het peil per seizoen. Voor het model wordt het zomerpeil gebruikt en wordt gebruik gemaakt van figuur A.1 in appendix A voor het bepalen van het peil in de drains. Omdat de neerslag die in de polder valt via het poldersysteem snel wordt afgevoerd wordt de neerslag op de polder uitgezet. De slootjes worden te klein geacht om individueel op te nemen in het model. De drains die het polderpeil handhaven fungeren bovendien hetzelfde als het systeem van sloten over het grote geheel.

Duin

De grondwateraanvulling wordt alleen op het duingebied gezet omdat wordt aangenomen dat de neerslag op de polder direct wordt afgevoerd door het drainage systeem van sloten. Ook wordt aangenomen dat neerslag op de oude dijk direct afstroomt en niet infiltreert. De doorlatendheid in het duingebied wordt gecorrigeerd om rekening te houden met het feit dat de grondwaterstand hier freatisch is (zie paragraaf 4.1.2 voor verdere toelichting).

4.2.3. Oppervlaktewater

In het model zijn drie verschillende types oppervlaktewateren te onderscheiden. De zee, een poldermeer en een duinmeer. Zoals beschreven in paragraaf 4.2.2 wordt het netwerk van sloten niet letterlijk in het model gezet maar gezien als onderdeel van het drainagesysteem van de polder.

Zee

Voor het simuleren van de zee wordt het General Head Boundary (GHB) pakket toegepast op de cellen die de zee representeren (voor specificatie van de pakketten zie appendix C). In deze cellen staat de stijghoogte over de gehele modelberekening vast. De vaste stijghoogte wordt gezet op gemiddeld Noordzee-peil (0 mNAP). De horizontale doorlatendheid van deze cellen is groot aangenomen met een waarde van 1000 m/d. Hier is voor gekozen omdat zeewater zich in de zee vrijwel vrij kan bewegen. In de zee-cellen wordt een zoutconcentratie van 35 g/L genomen die niet kan variëren over de tijd. In de cellen van de meest linker kolom van het model wordt ook een vast peil aangenomen door middel van het GHB-pakket. Hier is voor gekozen omdat wordt aangenomen dat ver de zee in de stijghoogte over de gehele diepte van het model gelijk is aan het zee-peil.

Poldermeer

Er wordt aangenomen dat de poldermeren in het gebied in nauwer contact staan met de 1^e watervoerende laag. De waterkwaliteit in deze meren is namelijk erg zout en dit duidt op een toevoer van zoute kwel. Om dit gedrag goed in het model te kunnen simuleren is er voor gekozen om de weerstand (c-waarde) van de DRN-cellen ter plekke van het meer te verkleinen. Hierdoor kan grondwater hier gemakkelijker uit het model stromen in vergelijking tot de rest van het polderoppervlak.

Duinmeer

Het duinmeer ontstaat doordat de freatische stijghoogte in het duin boven het maaiveld uitkomt. Voor het stijghoogteprofiel betekent dit dat de stijghoogte ter plaatse van het meer boven het maaiveld uit mag komen. Daarnaast zal de stijghoogte van het grondwater ter plaatse van het meer overal nagenoeg hetzelfde zijn, wat betekent dat hier geen horizontale stroming is. Om het gedrag van het grondwater ter plaatse van een duinmeer te simuleren is de horizontale doorlatendheid vergroot zodat er geen stijghoogteverschil is over het duinmeer. Ook is de neerslag op het duinmeer verkleind met een factor 0.75. Dit is gedaan omdat er wordt aangenomen dat er vanuit het duinmeer meer verdamping plaatsvindt dan elders in het duin.

4.3. Parameteronderzoek basismodel

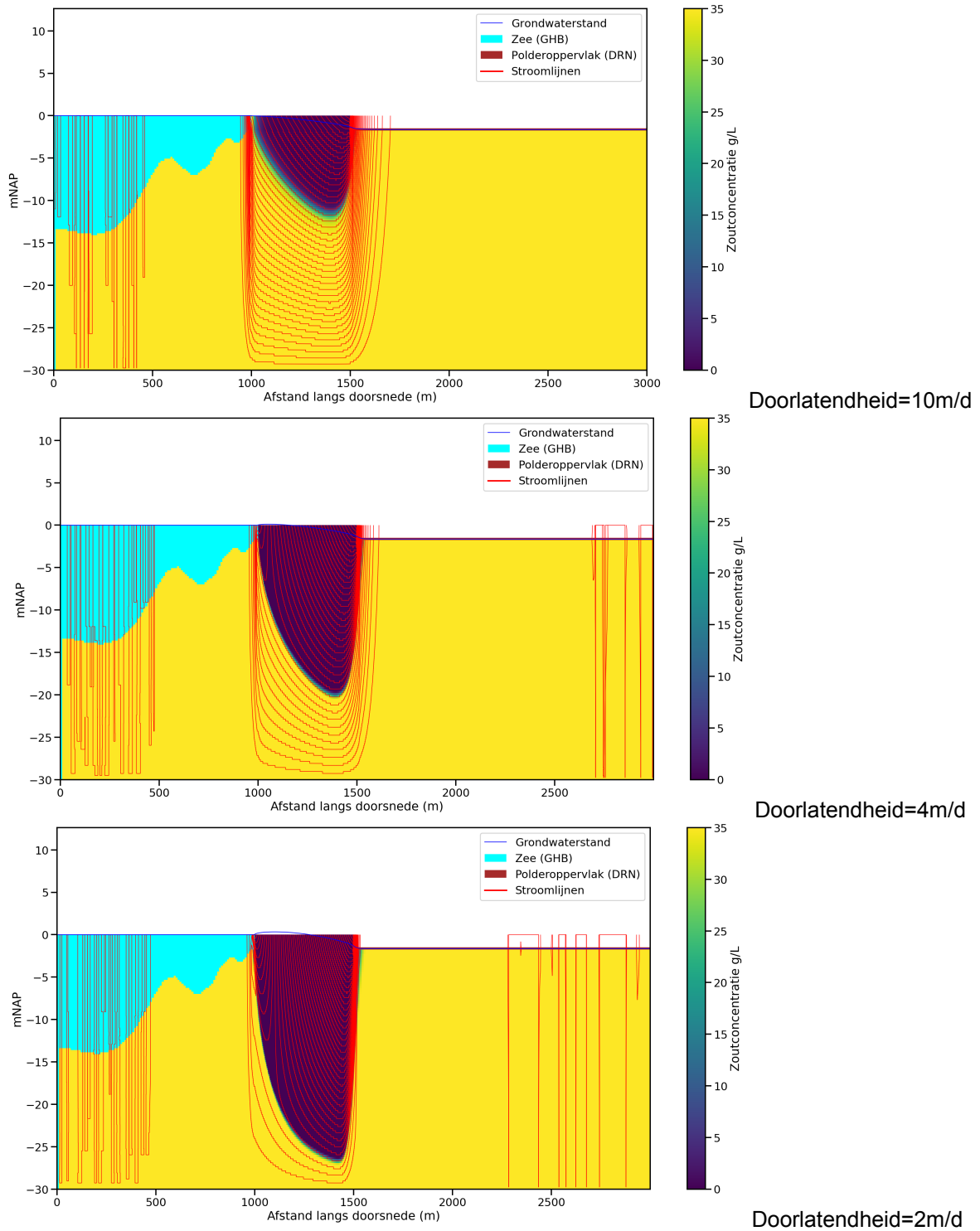
Om te begrijpen hoe het basismodel zich gedraagt zijn binnen het basismodel een aantal parameters gevarieerd om de invloed op de ontwikkeling van de zoetwaterbel te onderzoeken. Door het model

goed te begrijpen kan uiteindelijk het doorsnede-model beter geïjkt worden aan de metingen. In dit parameter onderzoek is in het basismodel de invloed van de dijk weggelaten. Dit heeft als invloed dat de drains die het polderoppervlak representeren nadrukkelijker invloed hebben op de grondwaterstroming. Door het weglaten van de dijk is er namelijk een meer directe verbinding tussen de polder en het duingebied ontstaan. Daarnaast wordt in deze onderzoeken geen gebruik gemaakt van de freatische grondwaterstand in het duingebied. Dit is gedaan om exclusief het effect van de variatie in één modelparameter te onderzoeken zonder inmenging van indirecte veranderingen aan het grondwaterregime. In deze paragraaf zullen een aantal onderzoeken naar het variëren van een parameter in het basismodel zonder dijk worden uitgevoerd. De resultaten worden hierna besproken.

4.3.1. Doorlatendheid ondergrond

Om de invloed van de doorlatendheid van de ondergrond te onderzoeken is het basismodel zonder dijk met een homogene doorlatendheid voor de grondcellen meermaals 100 jaar doorgerekend met variërende doorlatendheid.

In figuur 4.2 zijn de resultaten met betrekking tot de concentratie van het grondwater na 100 jaar bij de verschillende doorlatendheid gegeven. Een hogere doorlatendheid zorgt ervoor dat de zoetwaterbel minder diep komt. De verklaring hiervoor is dat met een grotere doorlatendheid het grondwater gemakkelijker richting de polder kan stromen. De stijghoogtes in het duin worden kleiner waardoor er minder druk opbouwt in de bovenste lagen van het model. Hierdoor is het drukverschil met de onderliggende lagen kleiner en stroomt er minder water naar deze dieper liggende lagen. Het diepste punt van de zoetwaterbel ligt dicht bij de polder dan bij de zee. Dit is te verklaren door het feit dat de polder een lager peil heeft dan de zee en er daarom grondwaterstroming van de zee naar de polder plaatsvindt. Deze stroming drukt de zoetwaterbel enigszins richting de polder.



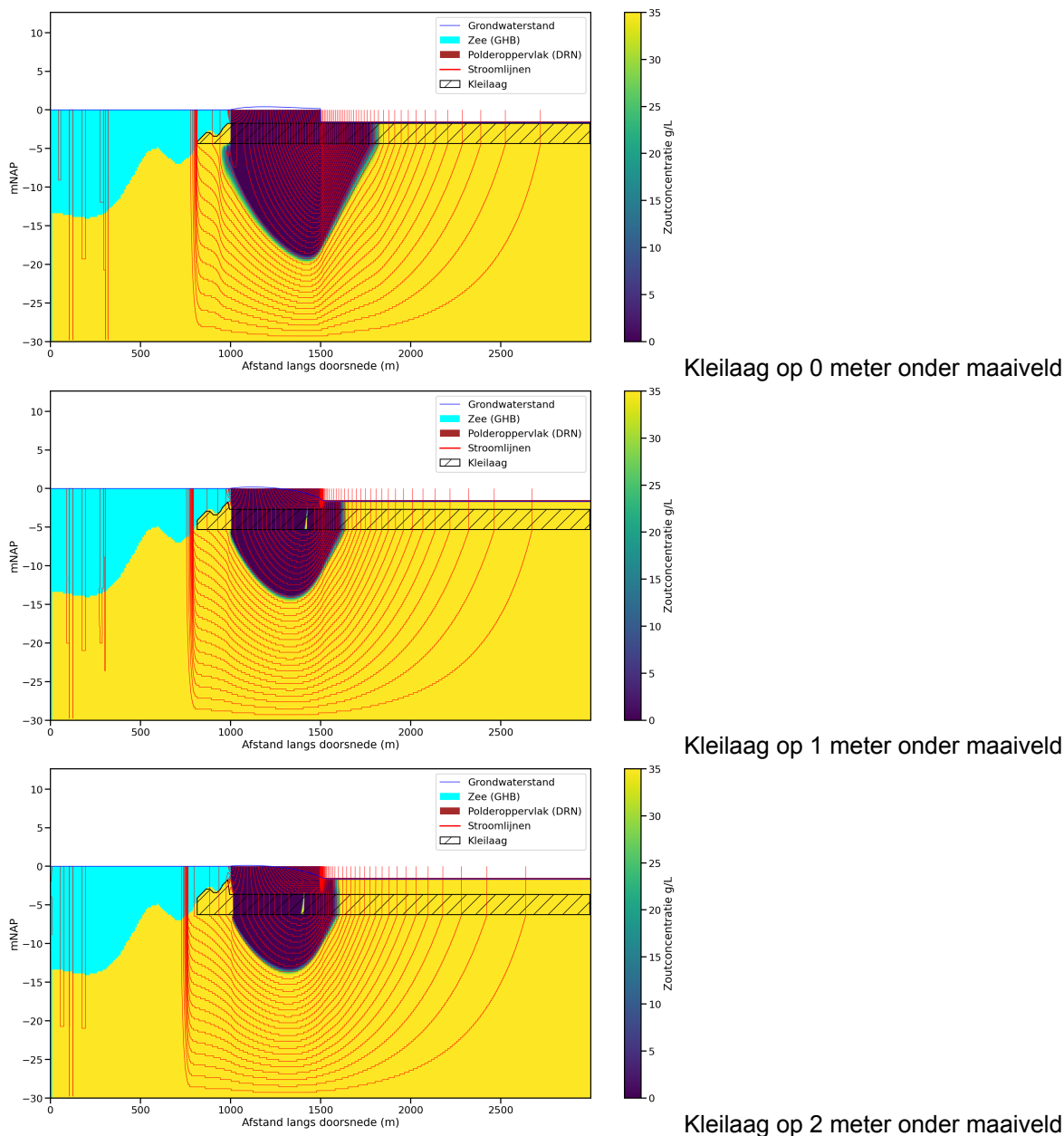
Figuur 4.2: Profiel van de zoutconcentratie bij verschillende K-waarden

4.3.2. Diepte eerste kleilaag

De diepte van de eerste kleilaag is een ander aspect van de ondergrond dat de grondwaterstroming beïnvloedt. In het basismodel zonder dijk wordt een kleilaag van 3 meter dik toegevoegd. Deze kleilaag wordt in elk scenario dieper gelegd, op 0, 1 en 2 meter onder maaiveld. Voor zand wordt een doorlatendheid van 10 m/d gebruikt en voor klei een waarde van 0.005 m/d.

In figuur 4.3 zijn de resultaten van de variërende diepte van de kleilaag in het model gegeven. Wanneer de kleilaag direct aan maaiveld grenst wordt vrijwel het gehele polderoppervlak afgesloten van

de watervoerende zandlagen. Dit leidt ertoe dat de geïnfiltreerde neerslag minder makkelijk weg kan stromen en de stijghoogte in het duingebied oploopt. Hierdoor wordt de zoetwaterbel groter dan in de situatie zonder kleilaag, zowel in de breedte als in de diepte (zie voor vergelijking bovenste sub-figuur van figuur 4.2). Op het moment dat de top van de bovenste kleilaag lager ligt wordt de zoetwaterbel kleiner. Interessant om te zien is dat er een zout punt in het midden van de zoetwaterbel ontstaat. Dit zoute punt laat zien dat hier geen stroming is en het vermoeden bestaat dat alle geïnfiltreerde neerslag om dit punt heen naar de drainage cellen stroomt. Dit zoute punt bevindt zich in de kleilaag en beweegt mee naar beneden wanneer de kleilaag dieper gelegen is.



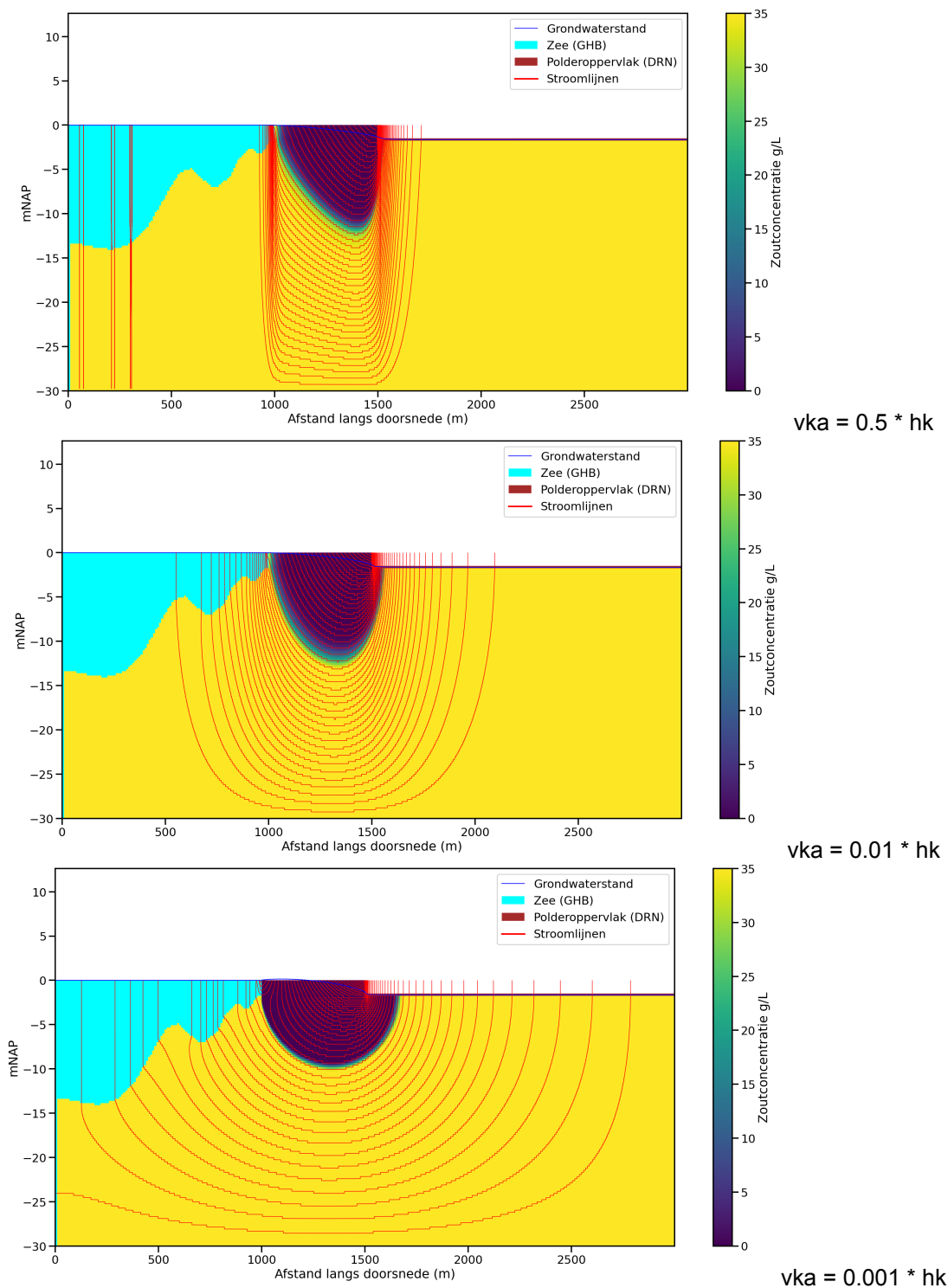
Figuur 4.3: Profiel van de zoutconcentratie voor verschillende dieptes top kleilaag

4.3.3. Anisotropie

Een materiaal is isotroop als de materiaaleigenschappen gelijk zijn in alle richtingen. Wanneer dit niet het geval is wordt het materiaal anisotroop genoemd. Verscheidene grondsoorten zijn over het algemeen anisotroop wat betreft doorlatendheid voor grondwaterstroming. De verticale doorlatendheid is doorgaans minder dan de horizontale doorlatendheid, maar de gradatie hiervan varieert sterk per

grondsoort. Voor het model worden twee verschillende grondsoorten onderscheiden, namelijk zand en klei. Over het algemeen heeft klei een groter anisotropisch gedrag dan zand. Om te testen of anisotropie een effect heeft op de modelresultaten worden twee testen uitgevoerd. Allereerst wordt een basismodel zonder dijk met een homogene horizontale doorlatendheid van 10 m/d genomen. Hierin worden variërende factoren voor de verticale doorlatendheid ten opzichte van de horizontale doorlatendheid toegepast. In een tweede test wordt in het basismodel zonder dijk een kleilaag met een horizontale doorlatendheid van 0.005 toegevoegd op 2 meter diepte. In deze kleilaag wordt de factor tussen de verticale en horizontale doorlatendheid gevarieerd om een beeld te krijgen wat anisotropisch gedrag in een kleilaag doet met de vorming van de zoetwaterbel.

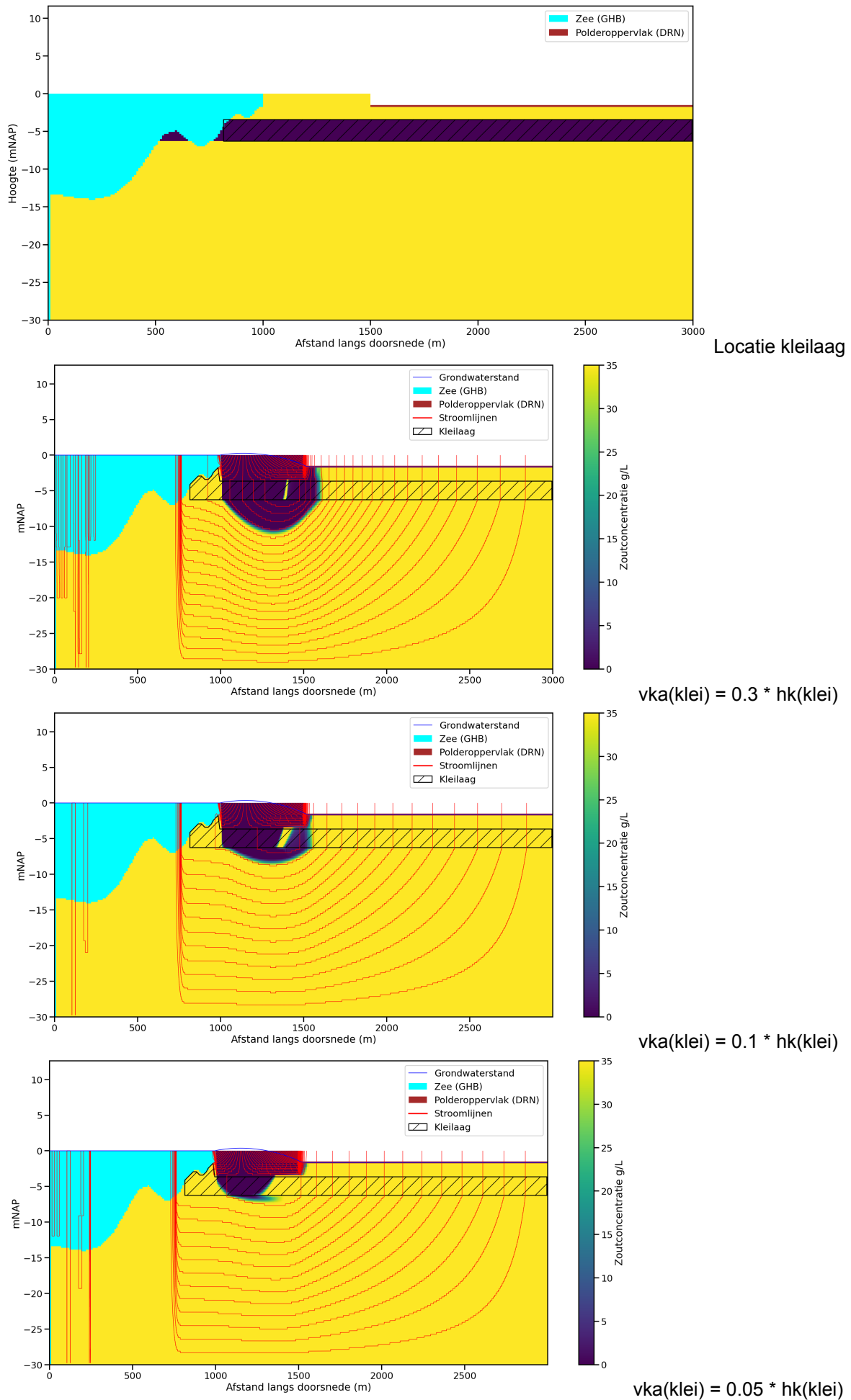
In figuur 4.4 zijn de resultaten van de variërende anisotropie in het homogene basismodel gegeven. In het homogene model is te zien dat met een grotere anisotropie de gevormde zoetwaterbel meer symmetrisch wordt. Ook reikt de zoetwaterbel tot verder in de polder bij oplopende anisotropie. De verklaring hiervoor is dat het grondwater met oplopende anisotropie steeds minder makkelijk verticaal kan stromen in verhouding tot de horizontale stroming. Hierdoor kiest een groter deel van dit grondwater voor de makkelijkste weg horizontaal richting het polderoppervlak.



Figuur 4.4: Concentratie profiel variërende anisotropie

In figuur 4.5 zijn de resultaten van de variërende anisotropie in een kleilaag gegeven. In het model met de anisotrope kleilaag is te zien dat met een oplopende anisotropie de gevormde zoetwaterbel minder diep komt. Daarnaast wordt het zoute punt in de kleilaag waar geen stroming is groter bij een oplopende anisotropie. Bij de anisotropie factor van 0.05 wordt dit punt zo groot dat het deel van de zoetwaterbel vanaf de polder-zijde helemaal niet meer door de kleilaag heen dringt. Dit verschijnsel is te verklaren met het feit dat het grondwater met een oplopende anisotropie in de kleilaag steeds minder makkelijk in deze laag kan stromen. Een steeds groter deel van dit grondwater stroomt via de

makkelijke weg direct horizontaal door de zandlaag af naar het polderoppervlak. De verzoeting in de kleilaag wordt dus steeds kleiner met een oplopend anisotropisch gedrag van de kleilaag.

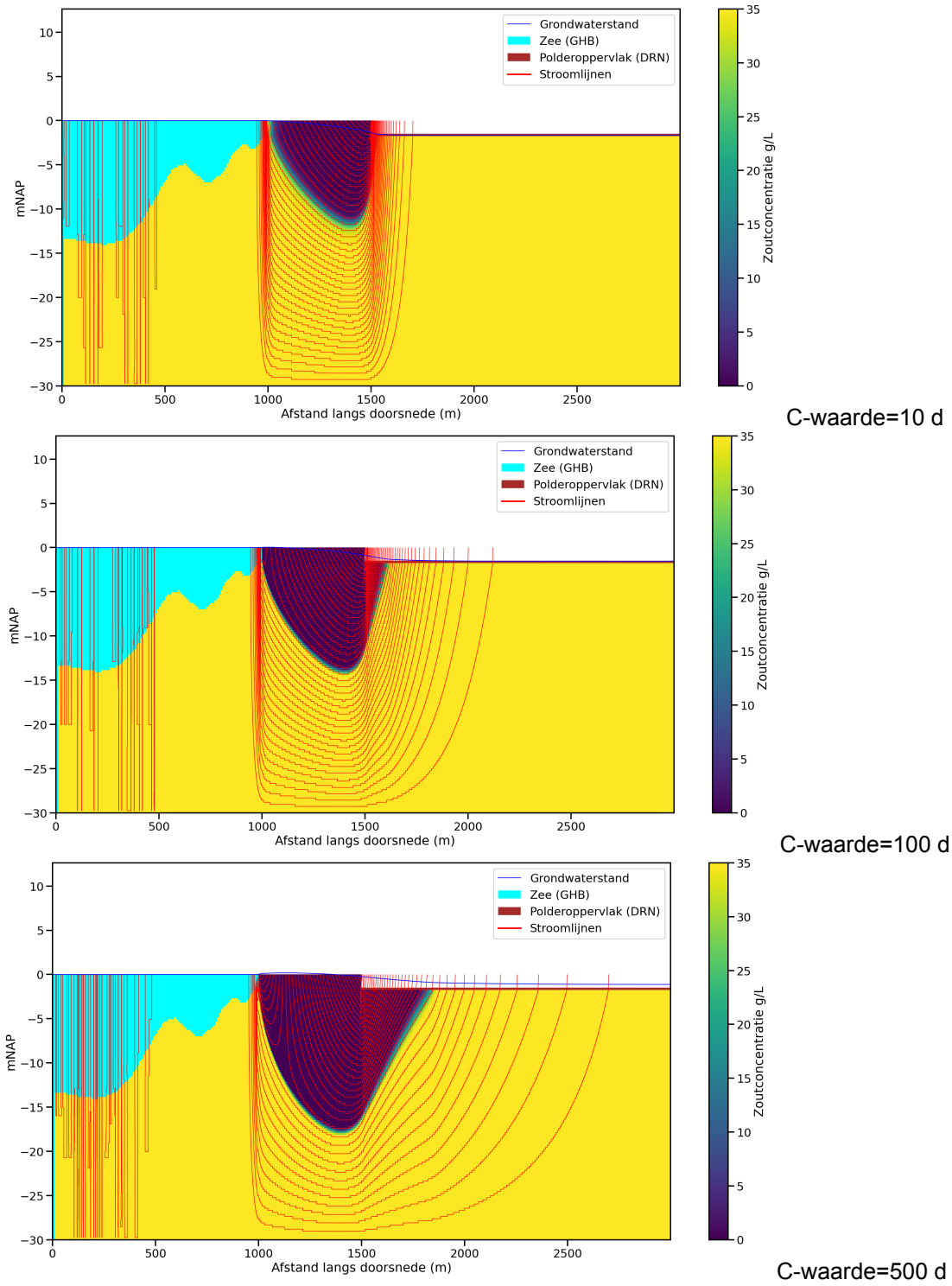


Figuur 4.5: Concentratie profiel variërende anisotropie kleilaag

4.3.4. Weerstand deklaag polder

De weerstand van het polderoppervlak bepaald hoe makkelijk het grondwater naar de polder kan stromen. Als vuistregel voor deze weerstand in polders wordt vaak de afstand tussen de drainage sloten gebruikt. In de polders achter de Hondsbossche zeewering is geen eenduidige afstand te bepalen door het variabele slootjespatroon. Er kan echter gesteld worden dat de afstand tussen de individuele sloten tussen de 50 en 200 meter is (en dus een weerstand tussen de 50 en 200 dagen). Om te testen wat het effect van deze weerstand is wordt het basismodel zonder dijk met een homogene doorlatendheid van 10 m/d gebruikt. Hierin wordt de weerstand van de drains gevarieerd.

In figuur 4.6 zijn de resultaten van de variërende weerstand van het polder oppervlak gegeven. Met een grotere weerstand van het polderoppervlak reikt de gevormde zoetwaterbel dieper in de ondergrond. Daarnaast komt de gevormde zoetwaterbel verder de polder in. Er kan dus gesteld worden dat de zoetwaterbel zowel in horizontale als verticale richting groter wordt met een grotere weerstand van het polderoppervlak. De verklaring hiervoor is dat door de hogere weerstand van het polderoppervlak het moeilijker wordt voor het grondwater om via het polderoppervlak weg te stromen. Per meter polder wordt de uitstroom flux daarom lager. Hierdoor neemt de stijghoogte langs een groter deel van het polderoppervlak toe en doet een groter deel van de polder mee om het grondwater af te voeren.



Figuur 4.6: Profiel van de zoutconcentratie bij verschillende C-waarden

5

Doorsnedemodellen toepassing

In dit hoofdstuk zijn de definitieve doorsnedemodellen gepresenteerd. Per doorsnedemodel zijn de toegepaste randvoorwaarden toegelicht en is een lijst van gebruikte geologische parameters getoond. Hierna zijn de modelresultaten na 5 jaar doorrekenen gepresenteerd en is er aangetoond in hoeverre deze resultaten de stijghoogte en geofysische metingen benaderen na een ijking. Het doel van de ijking is om met de modelresultaten de metingen zo goed mogelijk te benaderen. De periode van 5 jaar is gekozen omdat tussen de gebruikte meetresultaten van 1 maart 2020 tot en met 31 augustus 2020 en het opleveren van de Hondsbossche duinen op 6 maart 2015 ongeveer 5 jaar zit. Tot slot zijn de resultaten na 100 jaar doorrekenen gepresenteerd.

5.1. Doorsnedemodel: De Putten

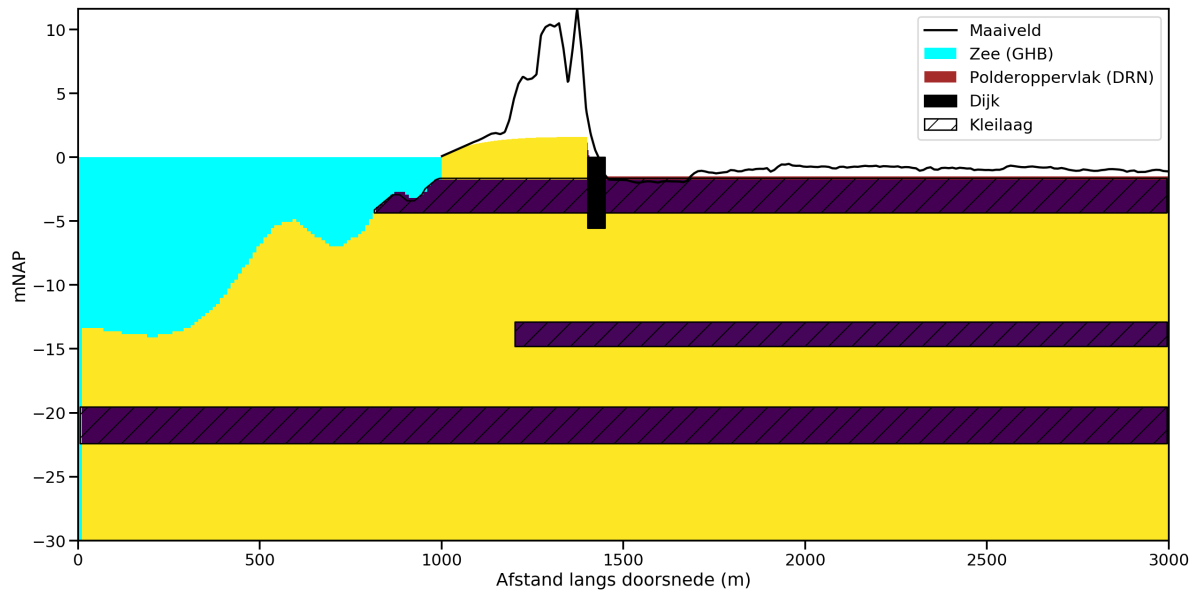
In deze paragraaf is het definitieve doorsnedemodel De Putten gepresenteerd. In figuur 5.1 is de layout van het doorsnedemodel te zien. Er is naar aanleiding van de verzamelde geologische data in figuur 2.7 gekozen voor 3 kleilagen. Daarnaast is ervoor gekozen om de middelste kleilaag op 200 meter vanaf de zee te laten beginnen. Dit is gedaan omdat in de verzamelde geologische data de kleilaag tussen 0 en 1200 meter langs de doorsnede zandiger is dan voor de rest van de doorsnede (het land begint op 1000 meter langs de doorsnede). Ook is hiermee een extra variabele gecreëerd om te onderzoeken. In paragraaf 5.3.1 wordt een variatie van doorsnedemodel De Putten doorgerekend waarin de middelste kleilaag doorloopt over de gehele doorsnede.

5.1.1. Toelichting modelparameters

Om het doorsnedemodel De Putten te ijken aan de gemeten stijghoogte en geofysische diepteprofielen zijn bepaalde keuzes gemaakt voor de opbouw van het doorsnedemodel. In deze paragraaf zijn deze keuzes toegelicht en zijn de gebruikte modelparameters gepresenteerd.

Lithologische parameters

De lithologische opbouw heeft veel variabelen en speelt een belangrijke rol in de ijking van het doorsnedemodel. In tabel 5.1 zijn de na ijking gedefinieerde lithologische parameters getoond. Al deze parameters liggen binnen de gedefinieerde reikwijdtes van tabel 4.1. De kleilagen hebben een veel kleinere horizontale doorlatendheid dan de zandlagen. Hiermee kan gesteld worden dat het grondwater zich alleen verticaal zal verplaatsen in de kleilagen. In de 3 watervoerende zandlagen zal het grondwater zich ook horizontaal bewegen. De doorlatendheid van de diepste kleilaag is veel kleiner dan de doorlatendheid van de andere twee kleilagen. Hiermee kan bij de ijking worden voldaan aan de diepste stijghoogtemetingen. De diepste watervoerende zandlaag is hierdoor voornamelijk onder invloed van de zee. De middelste kleilaag is het meest doorlatend en het minst dik. Ook begint deze kleilaag op een afstand van 1200 meter langs de doorsnede. Deze keuzes zijn te motiveren met figuur 2.7. Hier is duidelijk te zien dat de middelste kleilaag minder dik en op veel plekken zandiger is.



Figuur 5.1: Doorsnedemodel De Putten

Tabel 5.1: Geologische parameters doorsnedemodel De Putten na ijking

	Horizontale doorlatendheid [m/d]	Anisotropiefactor [-]
Zand	4.5	0.5
Kleilaag top	0.015	0.1
Kleilaag midden	0.05	0.1
Kleilaag onder	0.0009	0.1

Grondwateraanvulling en afwatering

De grondwateraanvulling van het doorsnedemodel De Putten bevindt zich exclusief in de bovenste laag van het duin. Deze aanvulling is uitgezet voor het kleine stukje dijk dat ook in het duingebied ligt omdat wordt aangenomen dat de neerslag hier niet infiltreert. De aanvulling is homogeen voor dit gehele gebied met een waarde van 0.001 m/d.

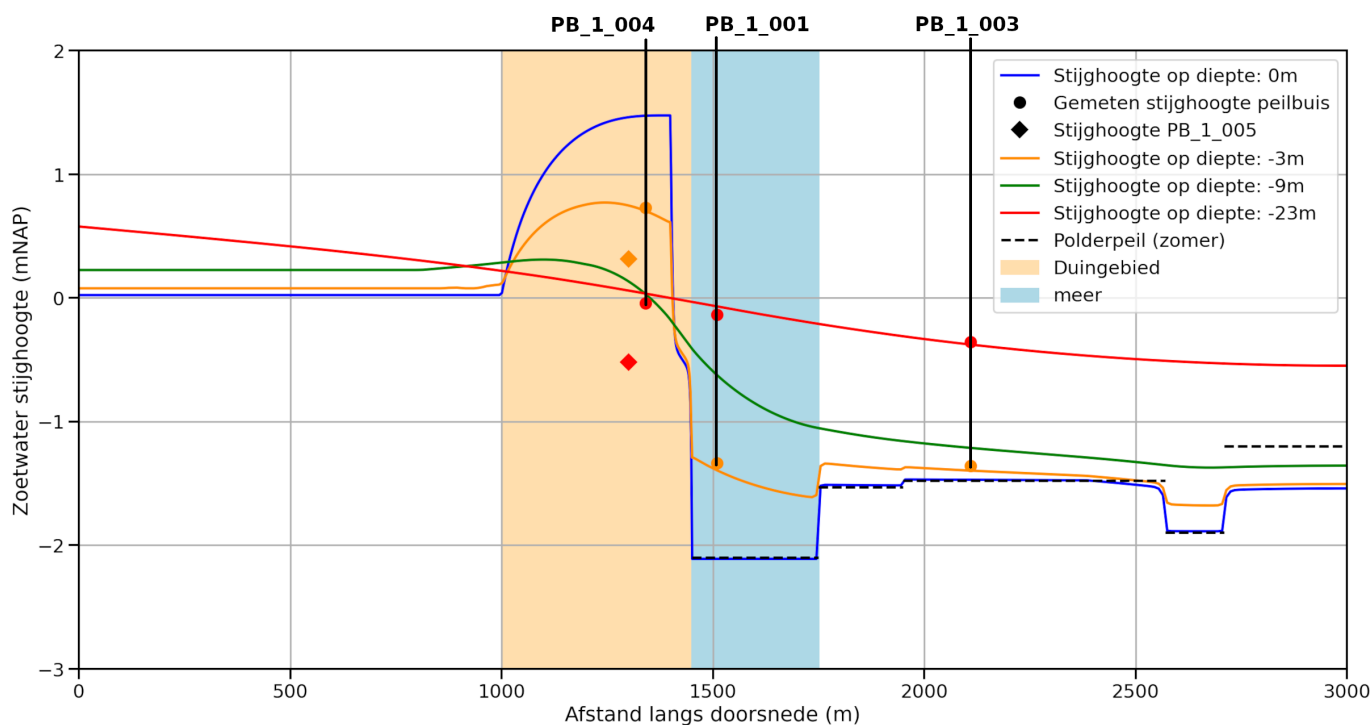
De afwatering van het model wordt verzorgd door de drains die het polderoppervlak representeren. Deze drains hebben een weerstand die bepaald hoe gemakkelijk grondwater uit het model kan stromen. Voor het deel van de polder waar het meer zich bevindt is een kleinere weerstand gebruikt. De definitieve waarden voor het doorsnedemodel zijn voorgekomen uit het ijkingsproces. De uiteindelijk gekozen waarden voor dit doorsnedemodel zijn 100 dagen voor het algemene polderoppervlak en 0.1 dagen voor het poldermeer. De kleinere waarde voor het poldermeer komt voort uit het feit dat het meer is ontstaan door het afgraven van de kleilaag. Hierdoor is aangenomen dat grondwater hier gemakkelijker naar het oppervlak kan stromen.

5.1.2. Vergelijking met metingen

In figuur 5.2 zijn de zoetwaterstijghoogtes op verschillende dieptes uitgezet tegen de stijghoogte metingen op dezelfde filterdieptes. Zie voor de dieptes van de filters in verhouding tot de ijkingsdiepte figuur 3.3. De modelresultaten voor beide filterdieptes komen goed overeen met de meetresultaten. De metingen van peilbuis PB_1_005 zijn ook in het figuur te zien. Deze metingen zijn voor de ijking van het model ingewikkeld gebleken. Een lokale hogere doorlatendheid in de top-kleilaag zou een verklaring kunnen zijn voor de meting van PB_1_005 op -3 m maar voor de meting van -23 m is geen verklaring kunnen vinden. Met deze reden zijn de metingen van deze peilbuis niet meegenomen voor de ijking van het doorsnedemodel.

Aan de stijghoogtelijnen is te zien dat op een diepte van -23 meter het grondwater over de gehele doorsnede richting de polder stroomt. De stijghoogte neemt hier namelijk af met een grotere afstand vanaf de zee. Hoe kleiner de metingsdiepte hoe groter de fractie van grondwater in het duin dat richting de

zee stroomt. Dit komt door de opbolling van de stijghoogtes op -3 en -9 meter in het duingebied. Deze opbolling ontstaat door de grondwateraanvulling in het duin. Op diepte van de freatische grondwaterstand in het duin is er vrijwel geen grondwaterstroming richting de polder.



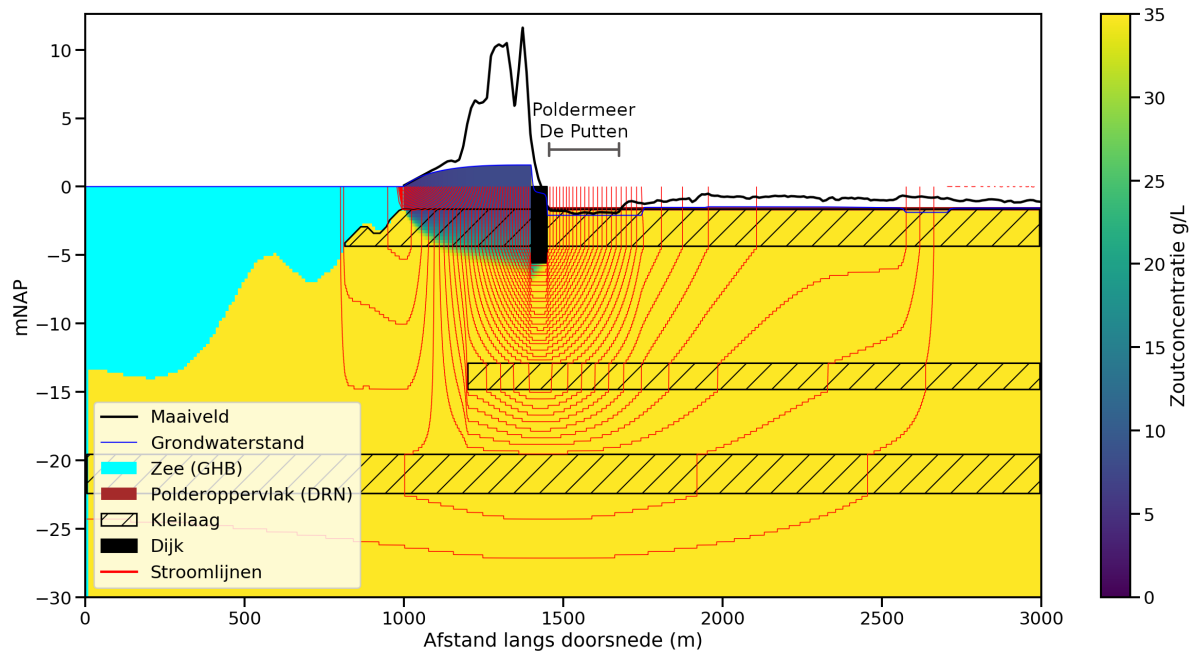
Figuur 5.2: Ijking doorsnedemodel De Putten aan stijghoogte-peilbuismetingen

In figuur 5.3 is het modelresultaat van de zoutconcentratie van het grondwater na 5 jaar doorrekenen gepresenteerd. De zoetwaterbel reikt tot net onder de eerste kleilaag en begint onder het dijklichaam door te stromen. In de polder zelf is nog nauwelijks tot geen verzoeting te bekennen. De stroomlijnen laten zien dat het grootste deel van de grondwaterstroming richting de polder uitstroomt in de eerste 300 meter van de polder. In dit deel van de polder ligt het meer De Putten.

In figuur 5.4 zijn de concentratie profielen op de locaties van de peilbuizen na 5 jaar doorrekenen gepresenteerd. De concentratieprofielen hebben niet dezelfde vorm als de EM-metingen van paragraaf 3.2.2. De verzoeting van het model reikt minder diep in vergelijking tot de metingen. Volgens de metingen is er verzoeting van het grondwater te zien tot ongeveer -15 meter NAP. De verzoeting van het doorsnedemodel De Putten komt echter niet dieper dan -7 meter NAP. Het is uiteindelijk niet mogelijk gebleken om het doorsnedemodel aan zowel de stijghoogtemetingen als aan de EM-metingen te ijken. Omdat de EM-metingen meer onzekerheid met zich mee brengen is besloten voornamelijk te focussen op het ijken van het model aan de stijghoogtemetingen. In paragraaf 5.3.1 is een variatie van het doorsnedemodel doorgerekend met een extra doorlatend stuk, een gat, in de kleilaag onder het duin. Hier voldoet de vorm van de concentratie profielen wel aan de EM-metingen. Echter voldoet de stijghoogte in het duin hier niet aan de metingen.

5.1.3. Toekomstige verwachting

Om een voorspelling te kunnen doen van de toekomstige ontwikkeling van de zoetwaterbel langs doorsnede De Putten is het in paragraaf 5.1.2 gepresenteerde geijkte model 100 jaar doorgerekend. Het model is na deze tijd doorrekenen vrijwel in evenwicht en deze resultaten kunnen dus als uiteindelijke situatie worden beschouwd. In figuur D.1 van Appendix D wordt dit aangetoond. Bovendien wordt er verwacht dat als er maatregelen tegen de verzoeting worden genomen dit in de komende 100 jaar zal gebeuren.



Figuur 5.3: Zoutconcentratie grondwater in doorsnede De Putten na 5 jaar

Stijghoogte

In figuur 5.5 is het resultaat van het stijghoogteverschil in doorsnedemodel De Putten tussen 5 en 100 jaar getoond. In en rond het duin is de stijghoogte iets toegenomen in deze 95 jaar. Dit geeft aan dat er verwacht kan worden dat de freatische grondwaterstand in het duin nog iets zal stijgen. Ook zal de zoete kwel hiermee iets toenemen. Direct boven de diepste kleilaag tussen 1150 en 1550 m langs de doorsnede is een afname in zoetwaterstijghoogte te zien. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de vorming van de zoetwaterbel. Deze zoetwaterbel drukt de zoute kwelstroom weg. Hierdoor wordt deze kwelstroom nu tussen de diepste kleilaag en de onderkant van de zoetwaterbel door gedrukt zodat de stijghoogte hier plaatselijk daalt.

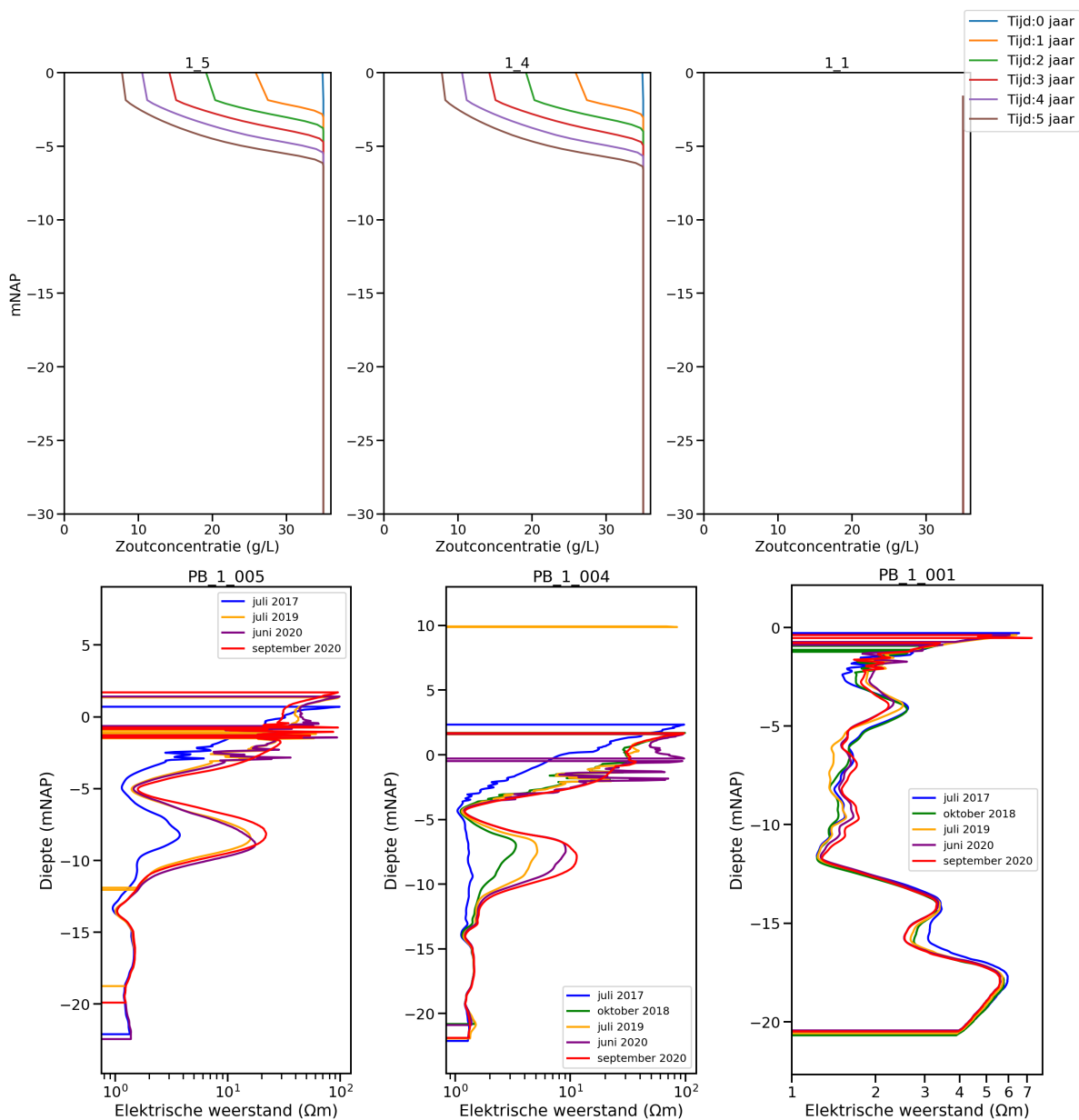
Zoutconcentratie grondwater

In figuur 5.6 is het resultaat van de zoutconcentratie van het grondwater na 100 jaar getoond. De zoetwaterbel is een stuk groter geworden met respect tot de situatie na 5 jaar. De zoetwaterbel reikt tot een diepte van ongeveer 18 meter en komt ongeveer 250 meter de polder in. In de middelste kleilaag ontstaat een zout stagnatiepunt. Dit betekent dat alle grondwaterstroming zich hier omheen beweegt. In realiteit is dit minder waarschijnlijk aangezien er ook grondwaterstroming loodrecht op de doorsnede is. Onder de eerste 100 meter zee vanaf het duin is het grondwater ook volledig verzoet. In werkelijkheid zal dit effect minder groot zijn doordat het grondwater hier constant wordt gemengd met zeewater.

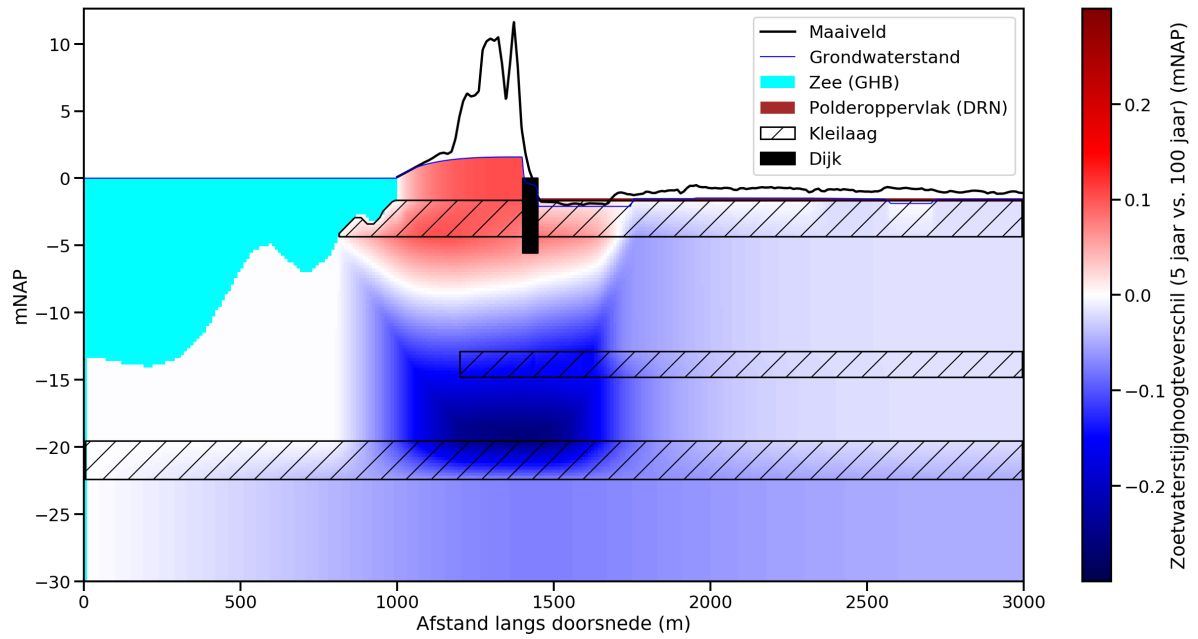
In figuur 5.7 is de zout-uitstroom flux langs het polderoppervlak van doorsnede De Putten in gram per vierkante meter per dag gegeven. De resultaten van verschillende tijdstippen zijn bij elkaar geplot om een idee te krijgen van de verandering van zoutvracht naar verschillende delen van de polder in de tijd. Hiermee kan een inschatting worden gemaakt van de daadwerkelijke verzoeting van verschillende delen van de polder.

De waarde van de zout-uitstroom flux is berekend aan de hand van de uitstroom-flux van de drainage cellen in de polder op de desbetreffende tijdstap. Deze flux is vermenigvuldigd met de zoutconcentratie van de drainage cel van dezelfde tijdstap.

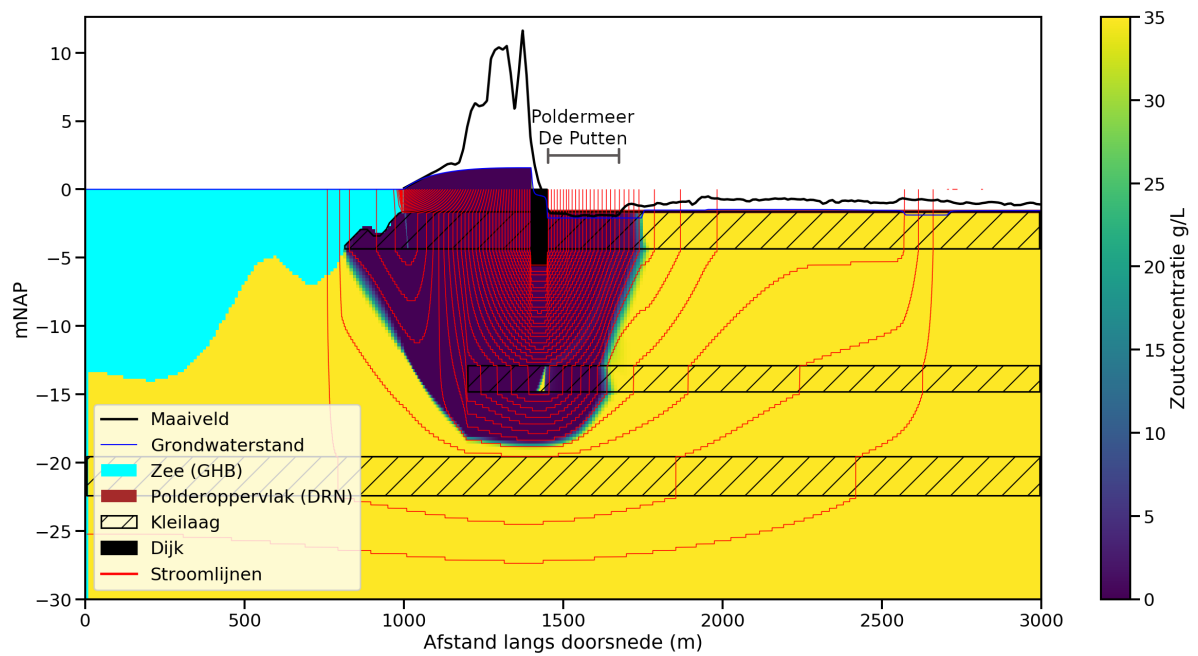
Er kan duidelijk worden gezien dat de initiële zoutvracht het grootst is naar het meer De Putten. Dit geeft aan dat dit meer het grootste aandeel van de kwelstromen vanuit de zee en het duin naar de polder ontvangt. Dit is naar verwachting aangezien het meer De Putten een hogere zoutconcentratie heeft in vergelijking tot het overige oppervlaktewater in de polder. Tussen 2550 en 2700 meter langs de doorsnede is ook een piek te zien in de zout-uitstroom. Hier bevindt zich een peilvak waar een lager



Figuur 5.4: Concentratieprofielen van doorsnedemodel De Putten voor locaties peilbuizen na 5 jaar doorrekenen vergeleken met geofysische metingen



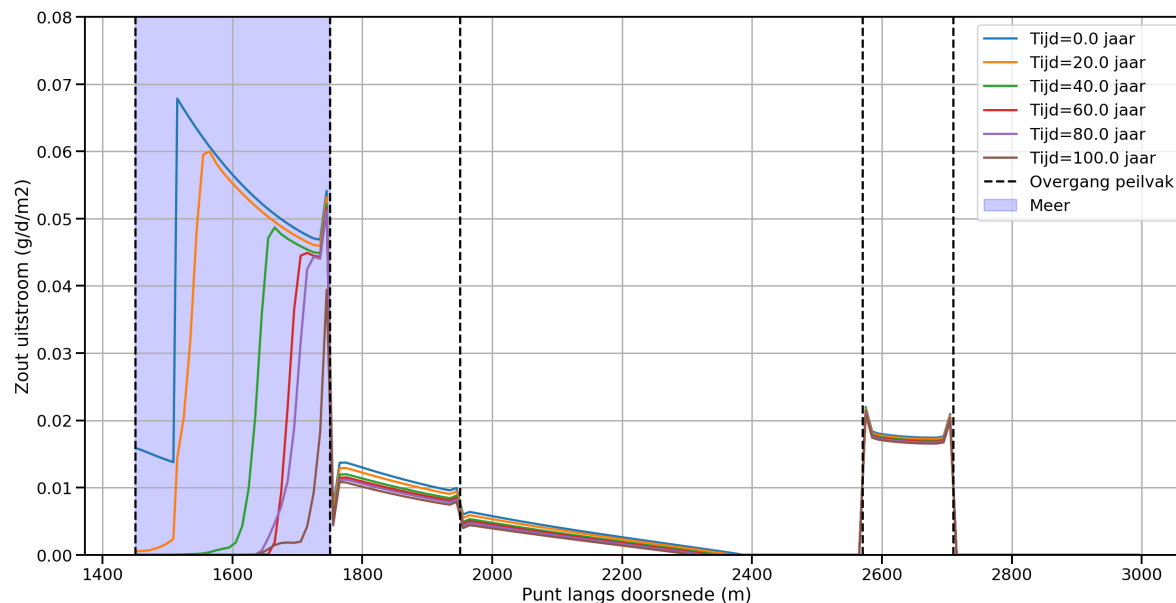
Figuur 5.5: Zoetwaterstijgtoete verschil doorsnede De Putten; 5 jaar vs. 100 jaar



Figuur 5.6: Zoutconcentratie grondwater in doorsnede De Putten na 100 jaar

peil gehandhaafd wordt dan in de omliggende peilvakken. Door dit lokaal lager gehandhaafd peil wordt een groter deel van de kwelstroom naar dit deel van de polder getrokken.

In het meer De Putten is de meeste verzoeting te zien. In de eerste 50 jaar wordt de eerste 100 meter van de kwelstroom richting de polder, en hiermee een groot deel van het meer De Putten, volledig zoet. In de 50 jaar hierna gaat de verzoeting gestaag door totdat vrijwel alle kwel richting het meer De Putten volledig verzoet is.



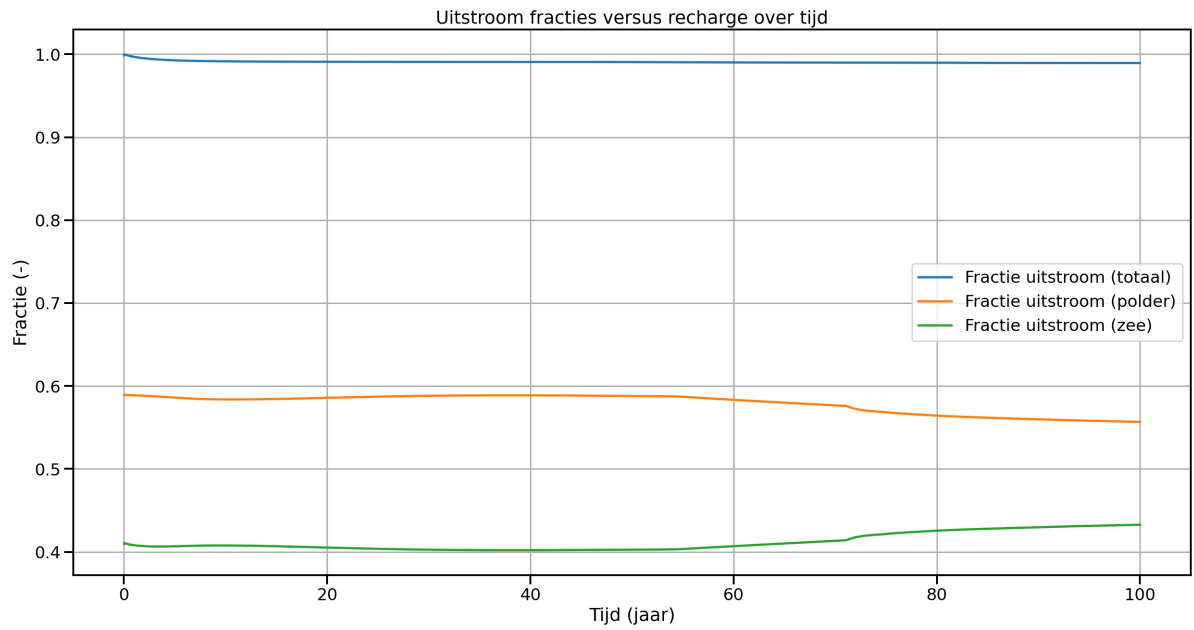
Figuur 5.7: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van doorsnede De Putten door de jaren heen

Grondwateruitstroom fracties

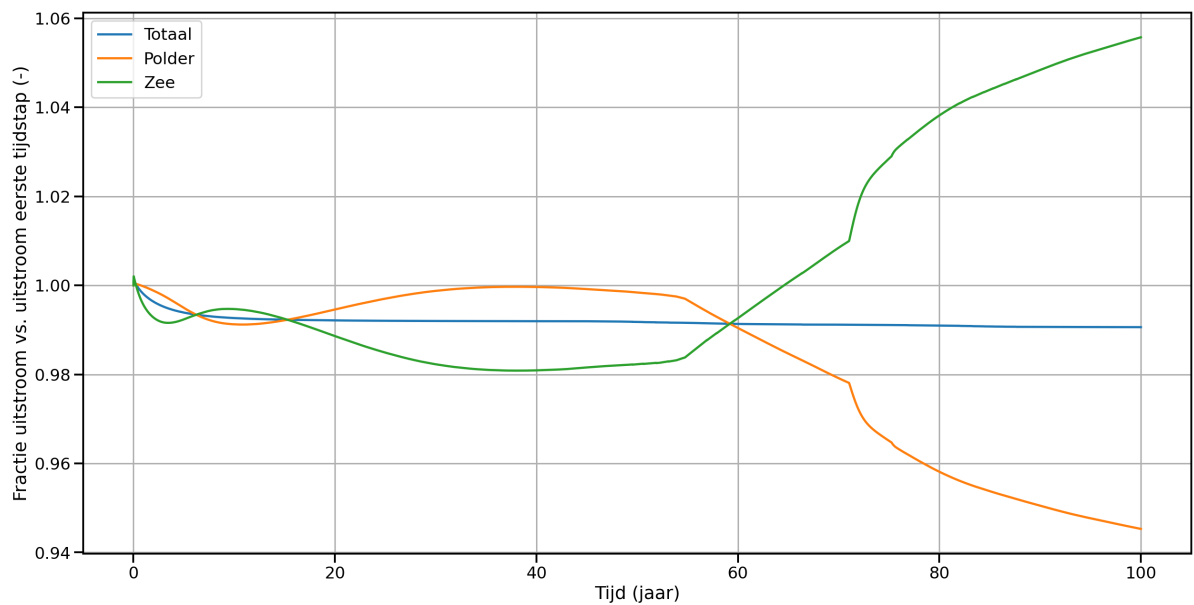
De geïnfiltreerde neerslag moet ook weer ergens in de doorsnede uitstromen om aan de volumebalans te voldoen. In het doorsnedemodel De Putten kan het grondwater op twee plekken uitstromen, in de zee of richting het polderoppervlak.

In figuur 5.8 zijn de uitstroomfracties over tijd getoond. In het begin van de modelberekening stroom ongeveer 60 procent van het grondwater uit in de polder tegen 40 procent in de zee. Deze percentages lopen dichterbij elkaar toe in de tijd tot na 100 jaar ongeveer 55 procent van het grondwater uitstroomt in de polder en 45 procent in zee. Door de toename van de zoete kwelstroom wordt de uitstroomrichting naar de zee steeds prominenter. Er kan indirect worden gesteld dat de zoute kwelstroom afneemt door een ommekeer van stroomrichting rondom de zee door de toestroom van zoete kwel. Alleen de diepere kwel vanuit de zee blijft zo bestaan.

De uitstroomfracties veranderen toch iets over de tijd, om dit duidelijk zichtbaar te maken zijn in figuur 5.9 de veranderingen in uitstroom fracties ten opzichte van de beginsituatie gepresenteerd. Na ongeveer 22000 dagen veranderd de verdeling van de grondwateruitstroom permanent. Een steeds groter deel van het grondwater stroomt uit in zee. Dit is een indicatie dat de zoetwaterbel richting de diepte van de diepste kleilaag gaat. Hierdoor wordt een steeds groter deel van de zoute kwel naar de polder geblokkeerd. Daardoor zal meer grondwater richting de zee stromen omdat dit de route met de minste weerstand wordt. Rond 27000 dagen is een knik te zien in de polder en zee-fracties waarbij de fractie grondwateruitstroom naar de zee groter wordt ten koste van de fractie naar de polder. Dit is het punt dat de zoetwaterbel daadwerkelijk de diepste kleilaag bereikt. Op dit moment wordt de zoute kwelstroom in de 1^e en 2^e watervoerende lagen volledig geblokkeerd en kan de zoute kwel alleen nog via de 3^e watervoerende laag de polder bereiken. Aan het einde van de modelberekening lijken de lijnen van de fractieveranderingen nagenoeg horizontaal te lopen. Dit betekent dat het grondwaterregime hier praktisch in evenwicht is.



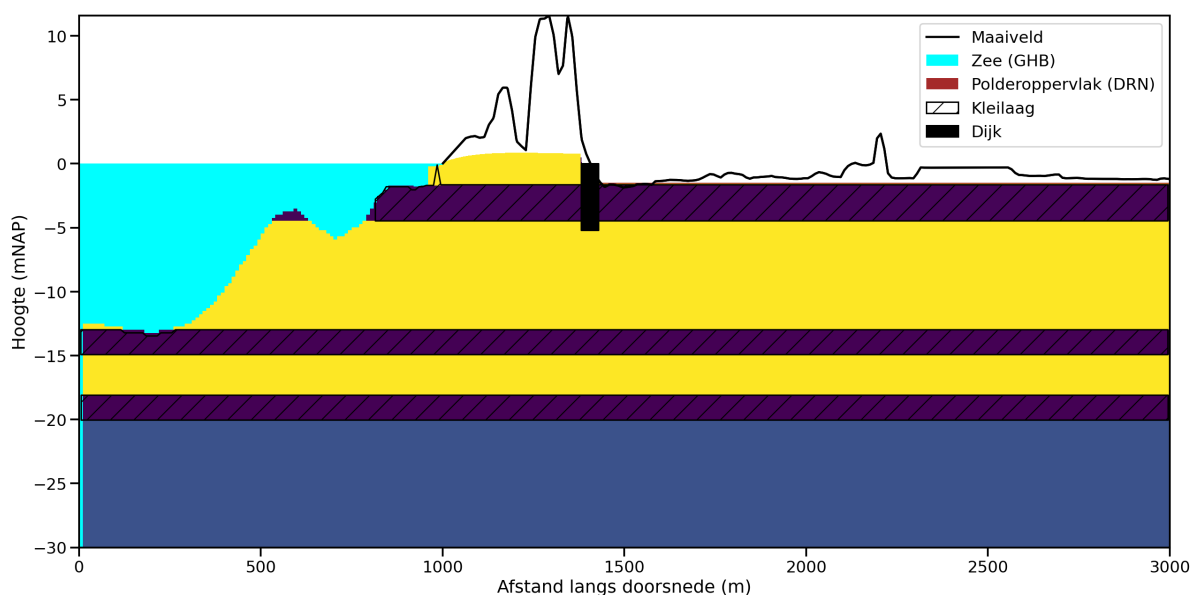
Figuur 5.8: Uitstroomfracties doorsnedemodel De Putten ($fractie_{totaal} = fractie_{polder} + fractie_{zee}$)



Figuur 5.9: Fractieverandering uitstroom doorsnedemodel De Putten

5.2. Doorsnedemodel: Abtskolk

In deze paragraaf is het doorsnedemodel Abtskolk gepresenteerd. In figuur 5.10 is de opbouw van het doorsnedemodel getoond. De opbouw wordt in paragraaf 5.2.1 toegelicht en er wordt aangetoond dat het model hiermee is geijkt aan de metingen. Tot slot wordt het geijkte doorsnedemodel 100 jaar doorgerekend.



Figuur 5.10: Doorsnedemodel Abtskolk

5.2.1. Toelichting modelparameters

Het doorsnedemodel Abtskolk is geijkt aan de peilbuismetingen van paragraaf 3.2.3. Hiervoor is het doorsnedemodel meermaals 5 jaar doorgerekend met variërende modelparameters en zijn de resultaten vergeleken met de metingen. In deze paragraaf zijn de geoptimaliseerde modelparameters gepresenteerd en toegelicht.

Lithologische parameters

Een verandering van de doorlatendheid van zand in het model beïnvloedt de grondwaterstrooming. Deze doorlatendheid bepaald hoe gemakkelijk het grondwater door de grond kan stromen en hiermee indirect hoeveel stijghoogte er wordt opgebouwd door een aanvulling van het grondwater.

In tabel 5.2 zijn de geijkte lithologische modelparameters voor doorsnedemodel Abtskolk gepresenteerd. Alle parameters liggen binnen de reikwijdtes van tabel 4.1 en voldoen hiermee aan logische waarden.

Het zand in de eerste twee watervoerende lagen van het doorsnedemodel Abtskolk is iets minder doorlatend gebleken dan het zand van het doorsnedemodel De Putten. Daarnaast is er voor gekozen om de diepste watervoerende zandlaag een nog kleinere doorlatendheid te geven in vergelijking tot de andere twee watervoerende zandlagen. Hier is voor gekozen om het verval in zoetwaterstijghoogte langs de doorsnede op -24 meter te kunnen ijken aan de metingen.

De top-kleilaag en de onderste kleilaag zijn doorlatender dan de middelste kleilaag. Voor de top-kleilaag is dit voortgekomen uit het proces om de stijghoogte ter plaatse van het duinmeer op een waarde te krijgen die binnen een meter boven het maaiveld uitkomt. Bij de onderste kleilaag is het contact tussen de twee aangrenzende watervoerende lagen belangrijk voor de diepste metingen. Door een grotere doorlatendheid van deze kleilaag is het verschil in stijghoogte tussen deze watervoerende lagen beperkt.

Voor het duinmeer zijn parameters gekozen op basis van het te verwachten gedrag rondom een duinmeer. De stijghoogte moet ter plaatse van dit meer boven het maaiveld uitkomen en over het gehele meer gelijk zijn. Het water kan in dit meer vrij horizontaal bewegen en daarom is er gekozen voor een erg hoge doorlatendheid van 1000 m/d. De verticale doorlatendheid is identiek genomen aan de

verticale doorlatendheid van zand omdat er geen reden is waarom het water hier minder gemakkelijk of gemakkelijker naar beneden de grond in kan stromen.

Tabel 5.2: Geologische parameters doorsnedemodel Abtskolk na ijking

	Horizontale doorlatendheid [m/d]	Anisotropiefactor [-]
Zand (1 ^e en 2 ^e watervoerende laag)	3	0.5
Zand (3 ^e watervoerende laag)	1	0.5
Kleilaag top	0.03	0.1
Kleilaag midden	0.005	0.1
Kleilaag onder	0.05	0.1
Duinmeer	1000	0.0015

Grondwateraanvulling en afwatering

De grondwateraanvulling wordt exclusief op de bovenste laag van het duingebied gezet. Deze grondwateraanvulling heeft een waarde van 0.001 m/d. De grondwateraanvulling ter plaatse van de dijk wordt uitgezet omdat wordt aangenomen dat alle neerslag hier afstroomt voordat het kan infiltreren. Omdat er aangenomen is dat ter plaatse van het duinmeer een grotere verdamping plaatsvindt is de grondwateraanvulling hier teruggebracht tot 0.00075 m/d (een factor 0.75 van het origineel).

De afwatering van de polder wordt in het model bepaald door de weerstand van het polderoppervlak. Deze weerstand is na ijking voor het doorsnedemodel Abtskolk vastgesteld op 1200 dagen. Deze waarde is relatief hoog voor een polder. Toch is deze waarde een belangrijk onderdeel voor de ijking omdat anders aan de stijghoogtemetingen op -2 meter niet kan worden voldaan. Door de hogere weerstand van het polderoppervlak wordt de stijghoogte net onder het oppervlak hoger. Hiermee wordt beter voldaan aan de stijghoogtemetingen op -2 meter in de polder.

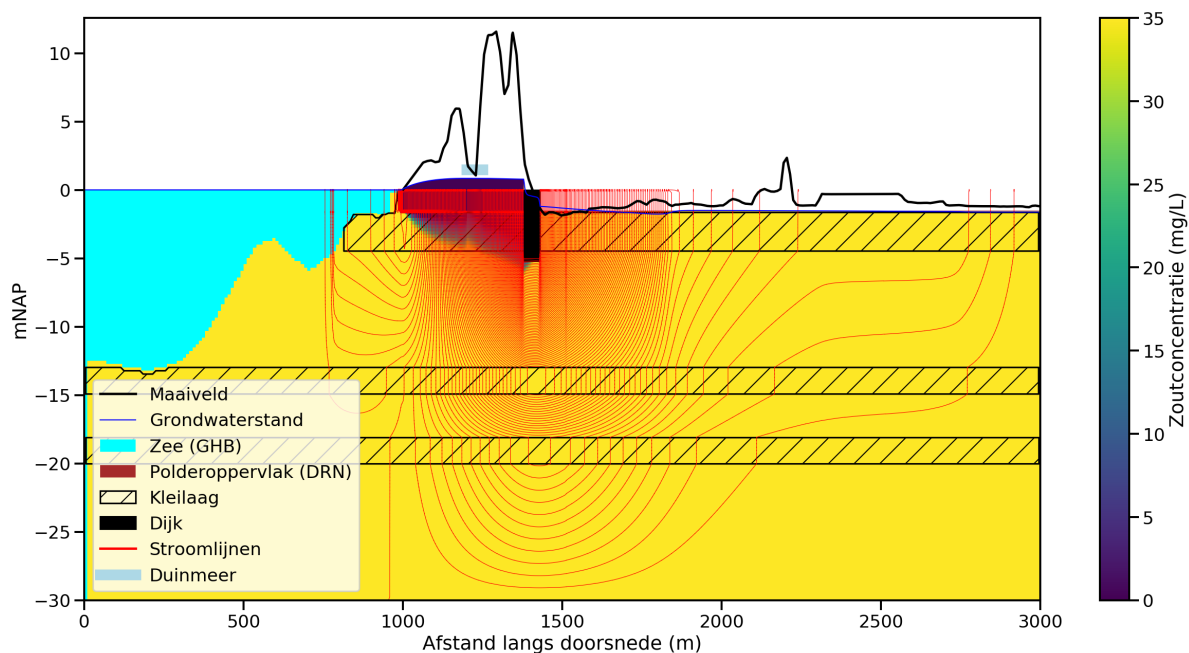
5.2.2. Vergelijking met metingen

In figuur 5.11 is de zoutconcentratie van het grondwater na 5 jaar doorrekenen gepresenteerd voor doorsnede Abtskolk. De invloed van het duinmeer is te zien aan de vorm van de zoetwaterbel. Onder het duinmeer vlakt de doordringing in de kleilaag van de zoetwaterbel af. Dit kan het gevolg zijn van de verminderde grondwateraanvulling ter plaatse van het duinmeer. De zoetwaterbel is na 5 jaar nog niet onder de dijk doorgedrongen de polder in. Aan de stroomlijnen is te zien dat de stroming direct onder de dijk horizontaal verloopt maar dat hieromheen de grondwaterstroming geen duidelijk voorkeursrichting heeft. Wel is te zien dat de diepere zoute kwel naar het verste punt in de polder stroomt.

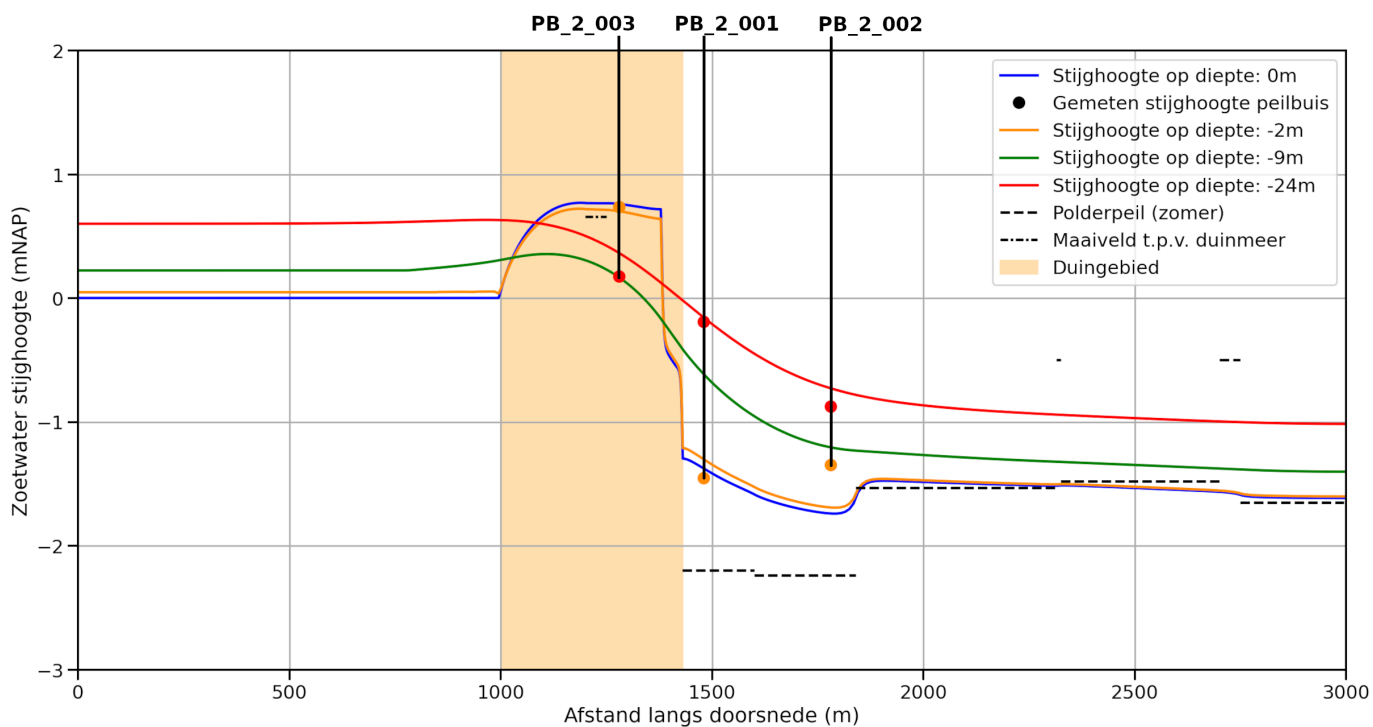
In figuur 5.12 zijn de ijkingsresultaten met betrekking tot de zoetwaterstijghoogtes getoond. Bijna alle metingen liggen dicht bij de stijghoogtelijnen van het doorsnedemodel na 5 jaar maar de resultaten zijn iets minder passend dan bij de ijking van doorsnedemodel De Putten. De meting op -2 mNAP van de peilbuis die het verst de polder in ligt (PB_2_002) komt het minst overeen. Echter is een paar meter verder langs de doorsnede de zoetwaterstijghoogte wel op dit niveau en kan het dus zijn dat de peilbuis in werkelijkheid iets verder weg van het duin ligt. Ook kan het zijn dat een lokale grondeigenschap hier de zoetwaterstijghoogte sneller doet veranderen naar het polderpeil van het aangrenzende peilvak. De stijghoogte op -24 meter volgt het juiste patroon over de doorsnede vergeleken met de metingen. Echter is de stijghoogte een klein beetje te hoog, maar dit is niet significant en wordt niet gezien als een probleem voor de resultaten van het doorsnedemodel.

Aan de vorm van de lijnen van de zoetwaterstijghoogte is te zien dat op zowel -2 als -9 mNAP het grondwater aan zeezijde van het duinmeer naar de zee stroomt. Dit is te zien aan de afname in stijghoogte naar de zee toe op deze dieptes. Op de diepte van -24 mNAP is nauwelijks afname van stijghoogte richting de zee te zien, een kleine opbolling lijkt er wel plaats te vinden. Er kan worden gesteld dat het grondwater op deze diepte over de gehele doorsnede van de zee af stroomt. De stijghoogtelijnen in de eerste twee peilvakken liggen duidelijk boven het gehandhaafde polderpeil. In deze twee peilvakken wordt met deze reden veel kwel verwacht.

In figuur 5.13 zijn de concentratie-profielen over de diepte van het doorsnedemodel Abtskolk op de locaties van de peilbuizen getoond. De verzoeting in peilbuis PB_2_003 die in het duin ligt reikt minder diep na 5 jaar in vergelijking tot peilbuis PB_1_004 van doorsnedemodel De Putten. Echter is de intensiteit van de verzoeting in peilbuis PB_2_003 wel groter, de zoutconcentratie daalt in de eerste



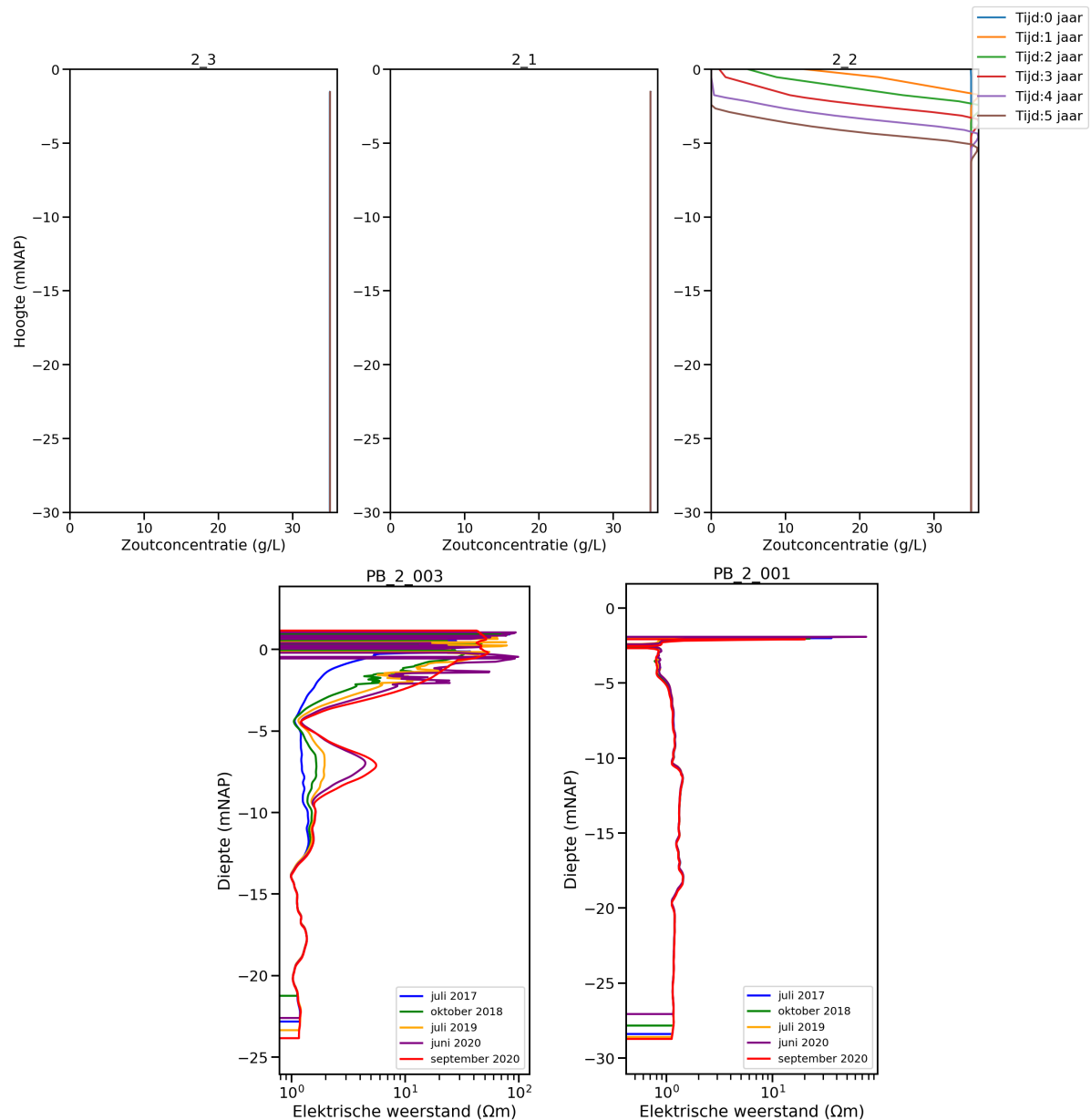
Figuur 5.11: Zoutconcentratie grondwater in doorsnede Abtskolk na 5 jaar



Figuur 5.12: Ijking doorsnedemodel Abtskolk aan stijghoogte-peilbuismetingen

paar meter zelfs tot 0 g/L. Dit is te verklaren door het feit dat deze peilbuis naast het duinmeer ligt, dit duinmeer bevat ook volledig zoet water.

In de andere twee peilbuizen PB_2_001 en PB_2_002 die in de polder liggen is geen verzoeting te zien na 5 jaar. Dit is te verwachten omdat de zoete kwel na 5 jaar nog niet zo ver de polder in is getrokken. De resultaten van peilbuis PB_2_003 die uit het model komen lijken overeen te komen met de metingen van deze peilbuis. Er is een afname in EM te observeren op de eerste 5 meter van deze peilbuis net zoals er een afname in zoutconcentratie te zien is op deze plek in de modelresultaten van deze peilbuis. Echter kan er niet bepaald worden of de letterlijke afname van zoutconcentratie correct is aangezien de EM-metingen alleen een verandering in zoutconcentratie kunnen aanduiden.



Figuur 5.13: Concentratieprofielen van doorsnedemodel Abtskolk voor locaties peilbuizen na 5 jaar doorrekenen vergeleken met geofysische metingen

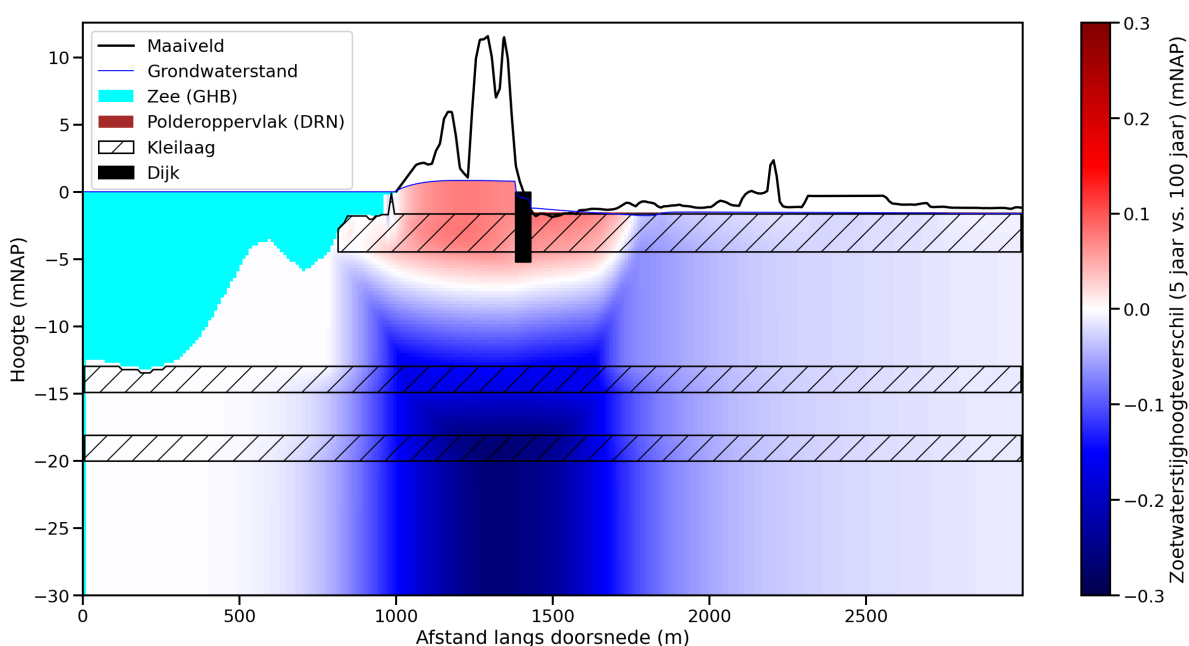
5.2.3. Toekomstige verwachting

Om een voorspelling te kunnen doen van de toekomstige ontwikkeling van de zoetwaterbel langs doorsnede Abtskolk is het geijkte doorsnedemodel 100 jaar doorgerekend. Het model is na deze tijd doorre-

kenen vrijwel in evenwicht en deze resultaten kunnen dus als uiteindelijke situatie worden beschouwd. In figuur D.2 van Appendix D wordt dit aangetoond. Er wordt verwacht dat de verandering aan het grondwaterregime dat hierna plaatsvindt van een kleine orde is.

Stijghoogte

In figuur 5.14 is het verschil in zoetwaterstijghoogte tussen de modelresultaten na 5 en na 100 jaar weergegeven. Ter plaatse van het duin en de eerste paar 100 meter van het polderoppervlak is de zoetwaterstijghoogte met ongeveer 5 centimeter gestegen in de tijd-span van 95 jaar. In het duin wordt dit veroorzaakt door de continue grondwateraanvulling. In de eerste paar 100 meter van de polder komt dit stijghoogteverschil door de combinatie van de grondwateraanvulling in het duin en de weerstand van het polderoppervlak. De toegenomen hoeveelheid grondwater kan niet makkelijk uitstromen door de weerstand van het polderoppervlak. Hierdoor neemt de zoetwaterstijghoogte direct onder dit polderoppervlak toe zodat deze weerstand wordt overkomen en het grondwater wel kan uitstromen. Direct rondom de aangegroeide zoetwaterbel en in het deel van de 3^e watervoerende laag direct onder deze zoetwaterbel is de zoetwaterstijghoogte afgenomen. Deze afname duidt op de nieuwe route van de kwel van de zee naar het polderoppervlak.

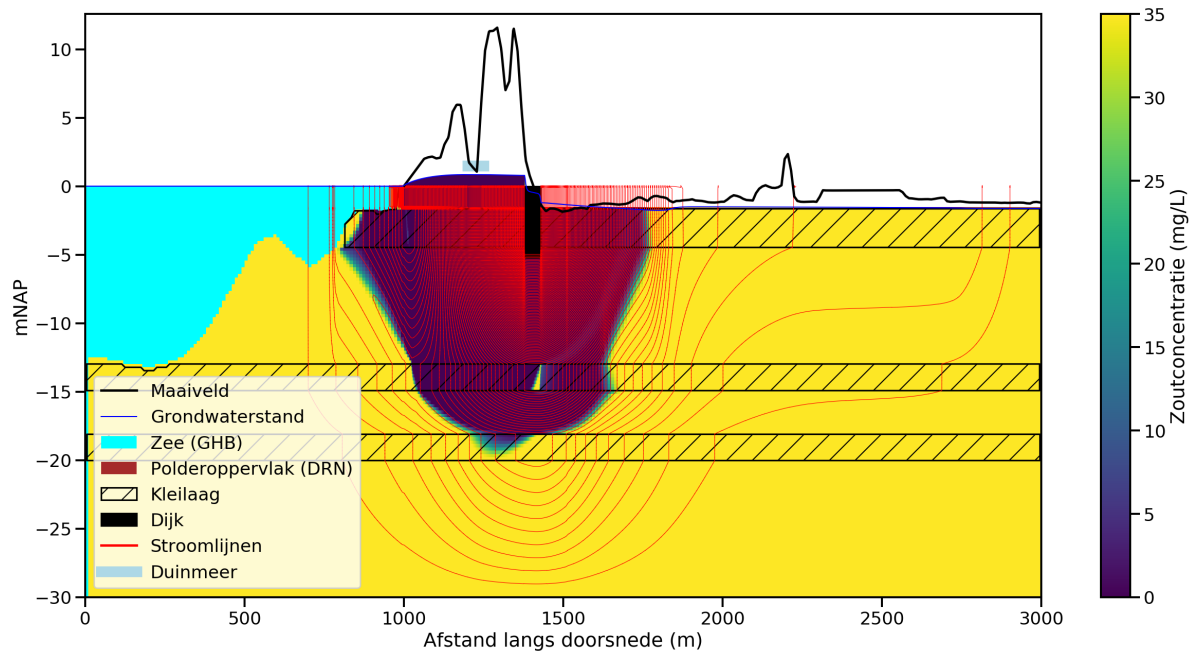


Figuur 5.14: Zoetwaterstijghoogte verschil doorsnede Abtskolk; 5 jaar vs. 100 jaar

Zoutconcentratie grondwater

In figuur 5.15 is de zoutconcentratie van het grondwater van het doorsnedemodel Abtskolk na 100 jaar gepresenteerd. De zoetwaterbel is zowel in horizontale als verticale richting groter geworden vergeleken met de situatie na 5 jaar gepresenteerd in figuur 5.11. De zoetwaterbel is door alle drie de kleilagen heen gedrongen en vormt in de middelste kleilaag een zout stagnatiepunt. Aan de stroomlijnen te zien begint zich ook in de diepste kleilaag een zout stagnatiepunt te ontwikkelen. De uiteindelijke verzoeting na 100 jaar dringt door tot ongeveer 250 meter de polder in en beperkt zich daarmee tot de eerste twee peilvakken. Onder de eerste 100 meter zee vanaf het duin is ook een volledige verzoeting te zien. In werkelijkheid zal deze verzoeting minder zijn door de constante inmenging van zout zeewater in dit deel van de ondergrond.

In figuur 5.16 wordt de zoutvrucht naar het polderoppervlak op verschillende tijdstippen van de modelberekening gepresenteerd. In dit figuur valt wederom goed te zien dat de verzoeting van de polder voornamelijk plaatsvindt in de eerste 250 meter polder vanaf het duin. Het grootste deel van de initiële



Figuur 5.15: Zoutconcentratie grondwater in doorsnede Abtskolk na 100 jaar

zoute kwelstroom richting de polder stroomt uit in de eerste 300 meter van het duin. Een lager gehandhaafd polderpeil in een peilvak vergeleken met het gehandhaafde polderpeil in de aangrenzende peilvakken leidt tot een toename van kwelstromen richting dit peilvak. Dit is te zien aan de verschillen in zout-vracht verder de polder in. De verzoeting verder van het duin af is echter wel een stuk kleiner en zal geen groot verschil maken voor de zoutconcentratie van het oppervlaktewater in dit deel van de polder. Hoe verder een punt langs de doorsnede van het duin af ligt des te kleiner de verzoeting over tijd is.

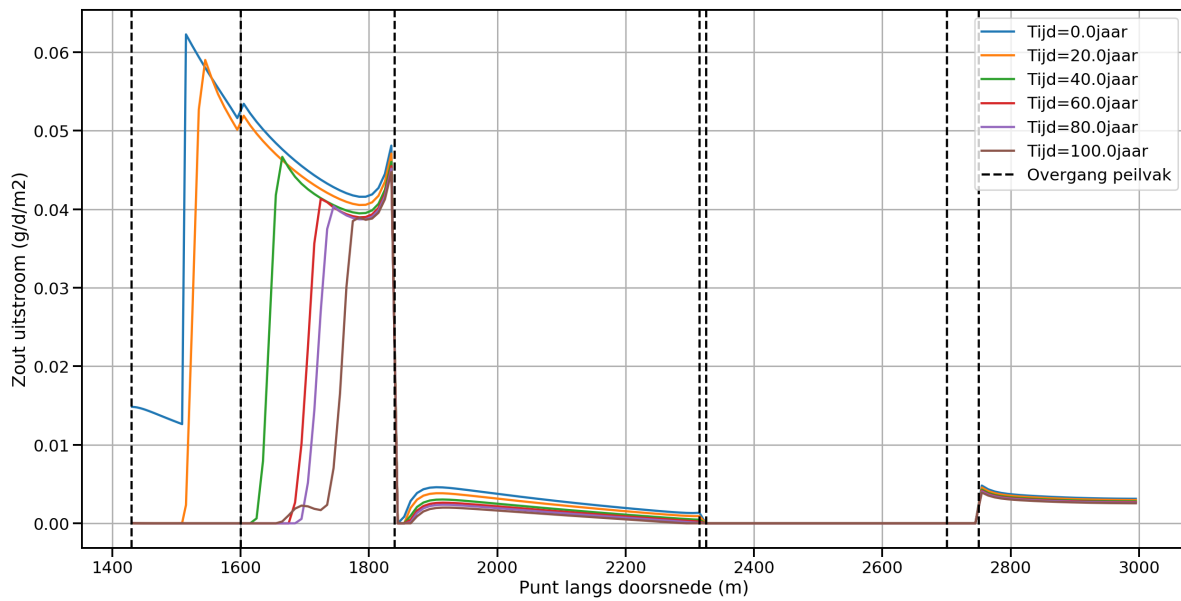
Grondwateruitstroom fracties

De geïnfiltreerde neerslag moet ook weer ergens in de doorsnede uitstromen om aan de volumebalans te voldoen. In het doorsnedemodel Abtskolk kan het grondwater op twee plekken uitstromen, in de zee of richting het polderoppervlak.

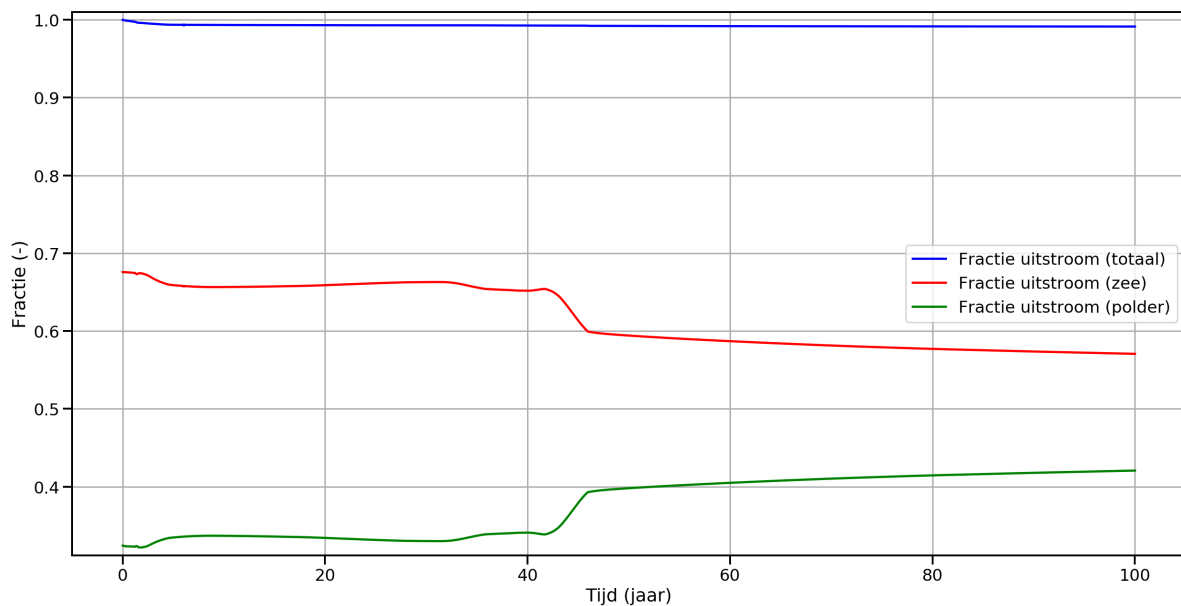
In figuur 5.17 zijn de uitstroomfracties over tijd getoond. In de beginsituatie is de uitstroomfractie naar de polder ongeveer 68 procent tegenover 32 procent uitstroom naar de zee. Deze fracties komen over de tijd heen stapsgewijs steeds iets dichter naar elkaar toe. Op het tijdstip van ongeveer 16000 dagen is een grotere verandering te zien van ongeveer 5 procent ten gunste van de uitstroom naar de zee. Dit is het punt waarop de zoete kwel de diepste kleilaag nadert. Op dit moment wordt de kwelstroom vanaf zeezijde van dit punt richting de polder geblokkeerd. De kwelstroom vanuit de zee neemt hierdoor af en wordt vervangen door een omgekeerde zoete kwelstroom vanuit het duin naar de zee.

In figuur 5.18 zijn de veranderingen in uitstroom fracties ten opzichte van de beginsituatie gepresenteerd. Vrijwel vanaf het begin neemt de uitstroom naar de zee toe ten opzichte van de beginsituatie. De twee grotere veranderingen zijn de momenten waarop de zoetwaterbel respectievelijk de middelste kleilaag nadert en later ook bereikt. In eerste instantie wordt de kwelstroom vanaf de zeezijde van dit punt steeds meer gehindert. Maar op een gegeven moment kan de zoute kwelstroom vanuit de zee alleen nog via de 3^e watervoerende laag de polder bereiken omdat de gehele 2^e watervoerende laag wordt geblokkeerd door de zoetwaterbel met een hogere zoetwaterstijghoogte.

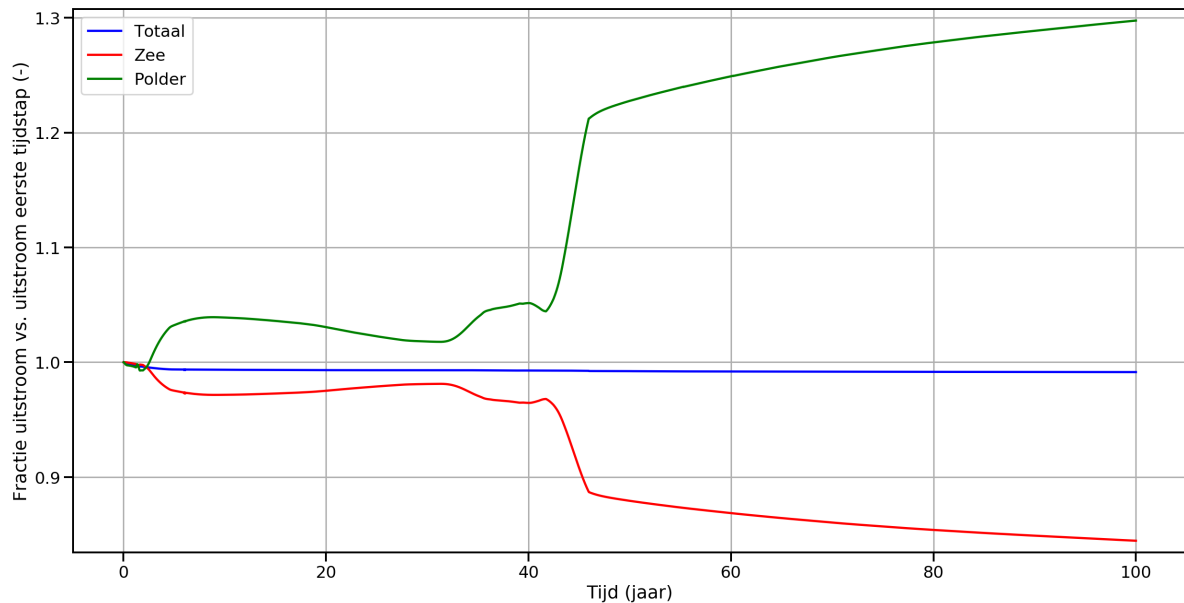
De lijnen van de veranderingen van de uitstroomfracties lopen aan het einde van de modelberekening praktisch horizontaal. Dit betekent dat het model op dit moment nagenoeg in evenwicht is.



Figuur 5.16: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van doorsnede Abtskolk door de jaren heen



Figuur 5.17: Uitstroomfracties doorsnedemodel Abtskolk



Figuur 5.18: Fractieverandering uitstroom doorsnedemodel Abtskolk

5.3. Doorsnedemodel variaties

Om een beeld te krijgen van de impact van lokale veranderingen in de beschouwde doorsnedes zijn variaties op deze doorsnedemodellen bedacht. Het doel van deze variaties is inzicht verschaffen in de mogelijke vormen die de zoetwaterbel kan aannemen in een soortgelijke doorsnede met een variërend uitgangspunt en het verzoetingsprofiel dat hierbij hoort. Deze informatie is belangrijk aangezien de ondergrond niet homogeen is. Lokale veranderingen in samenstelling van de grond, aanwezigheid van oppervlaktewater en afwatering kunnen de verwachte verzoeting voordelig of nadelig beïnvloeden. Naast deze lokale benadering is algemene kennis over de impact van randvoorwaarden in een polder-duingebied op het grondwaterregime ook belangrijk. Deze kennis kan meegenomen worden in soortgelijke onderzoeken. En met het oog op de toenemende interesse voor zandsuppletie-projecten is kennis over de effecten op het grondwaterregime een belangrijk gegeven.

In deze paragraaf worden voor beide doorsnedemodellen enkele belangrijk en interessant geachte variaties doorgerekend. Tot slot wordt een samenvatting gegeven van de geobserveerde veranderingen aan het grondwaterregime van de modelvariaties ten opzichte van de doorsnedemodellen. Hieruit worden de maatgevende modelvariaties voor specifieke veranderingen met betrekking tot de verzoeting en kwelstromen duidelijk.

5.3.1. Variaties doorsnedemodel De Putten

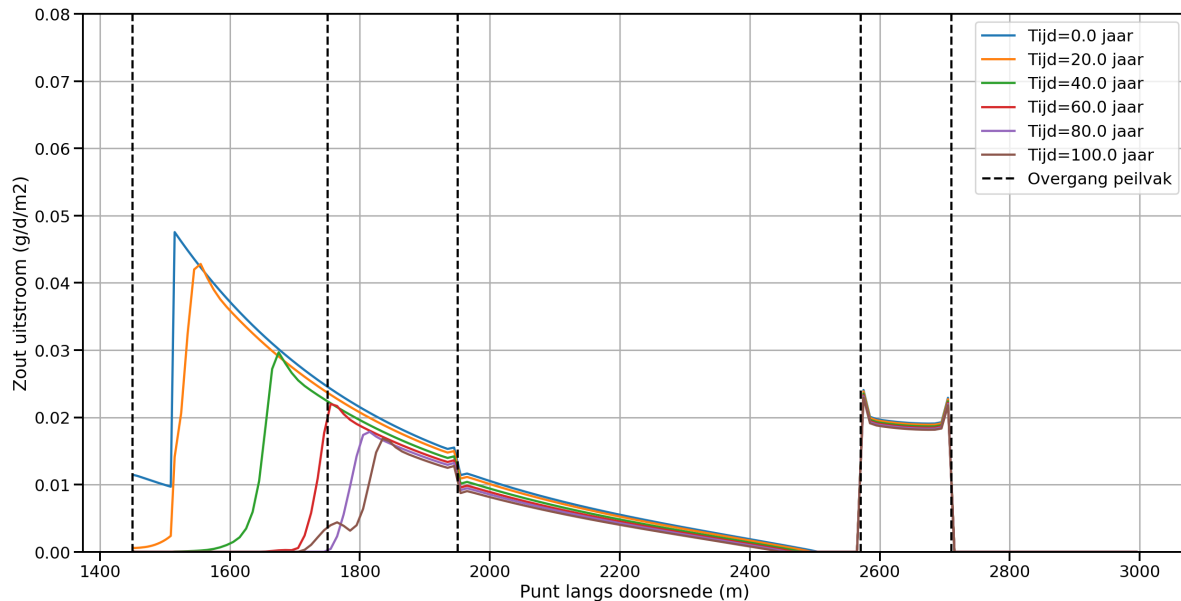
In deze paragraaf worden twee variaties op het doorsnedemodel De Putten geïntroduceerd en 100 jaar doorgerekend. Met deze variaties wordt een overzicht verkregen van andere mogelijke vormen van de zoetwaterbel en de bijbehorende verandering van de zoutvracht naar de polder. Zo kan een indruk gegeven worden van de mogelijke andere vormen van de zoetwaterbel op soortgelijke doorsnedes in het gebied. Door de heterogene opbouw van de ondergrond is de aanwezigheid van deze variaties op de doorsnede in het gebied goed mogelijk.

Zonder poldermeer

Uit de resultaten van doorsnedemodel De Putten is naar voren gekomen dat de grootste uitstroom van kwel plaatsvindt in het meer De Putten. Om te onderzoeken welke invloed dit meer specifiek heeft op het grondwaterregime in deze doorsnede wordt een variatie op het doorsnedemodel doorgerekend waar dit meer ontbreekt. Het peil van het stuk polder waar het meer lag is gelijk gesteld aan het aangrenzende peilvak. Dit peil is een belangrijk onderdeel van de werking van dit poldermeer. Door het lagere maaiveld wordt ter plaatse van het poldermeer een lager peil gehandhaafd. Voor deze variatie

wordt in gedachte genomen dat het maaiveld wordt opgehoogd ter plaatse van het meer, en hierbij hoort ook een hoger polderpeil. Daarnaast wordt de weerstand van het polderoppervlak ter plaatse van het meer verhoogd tot dezelfde waarde als de rest van het polderoppervlak, van 0.1 dagen naar 100 dagen.

In figuur 5.19 zijn de resultaten van de zoutvracht naar het polderoppervlak gepresenteerd voor deze variant. De kwel verdeelt zich gelijkmatiger over het polderoppervlak. Dit wil zeggen dat er minder kwel is in de eerste paar 100 meter van de doorsnede maar dat de kwel verder het gebied indringt. De verzoeting dringt in deze nieuwe situatie verder de polder in. Hiermee beweegt de verzoeting mee met de verandering van de initiële zoute kwelstroom. Er kan dus gesteld worden dat het poldermeer de verzoeting richting de polder enigszins opvangt zodat de verzoeting verder landinwaarts beperkt blijft.



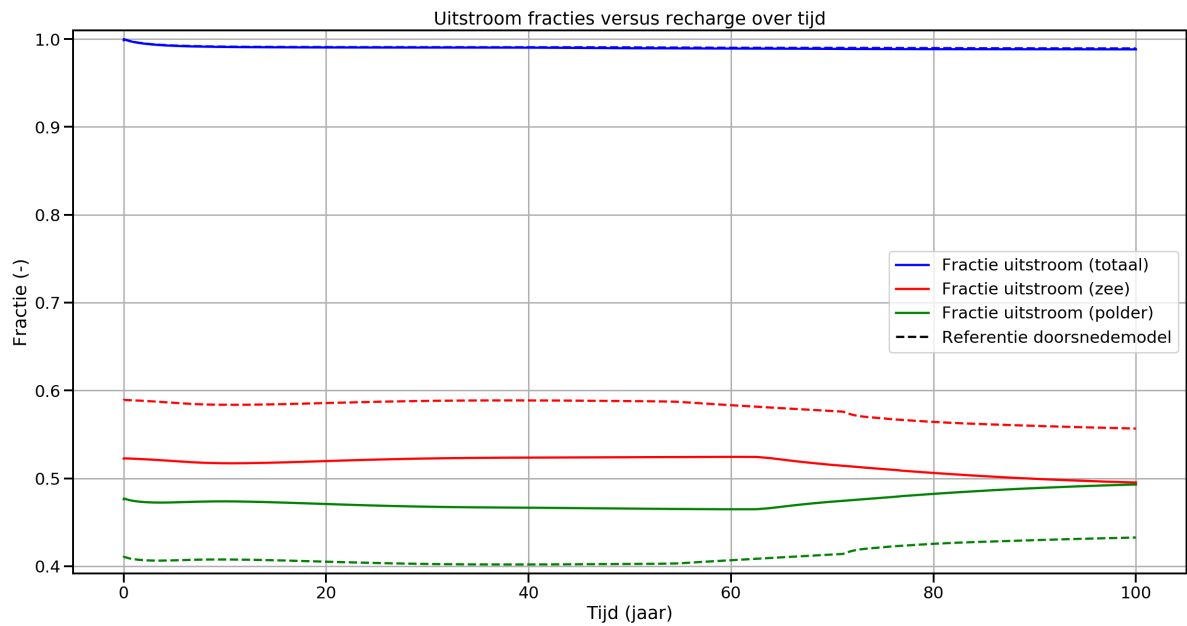
Figuur 5.19: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van variatie zonder meer van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen

In figuur 5.20 zijn de uitstroomfracties van het model zonder poldermeer gepresenteerd. In het begin van de modelberekening stroomt iets meer dan de helft van het grondwater uit in de polder. Na 23000 dagen trekken de fracties echter naar elkaar toe totdat er een bijna gelijke uitstroomverdeling ontstaat na 100 jaar. Door de afwezigheid van het poldermeer en de bijbehorende verhoging van het polderpeil op deze plek zal dus minder kwel naar de polder stromen. De kwel vanuit de zee stroomt beperkt zich alleen nog tot de diepere watervoerende lagen en stroomt verder in de polder uit in vergelijking tot de situatie met meer. De zoete kwel vanuit het duin kan minder gemakkelijk uitstromen in de polder. Hierdoor stroomt in vergelijking tot de situatie met poldermeer een grotere fractie van deze zoete kwel uit in de zee.

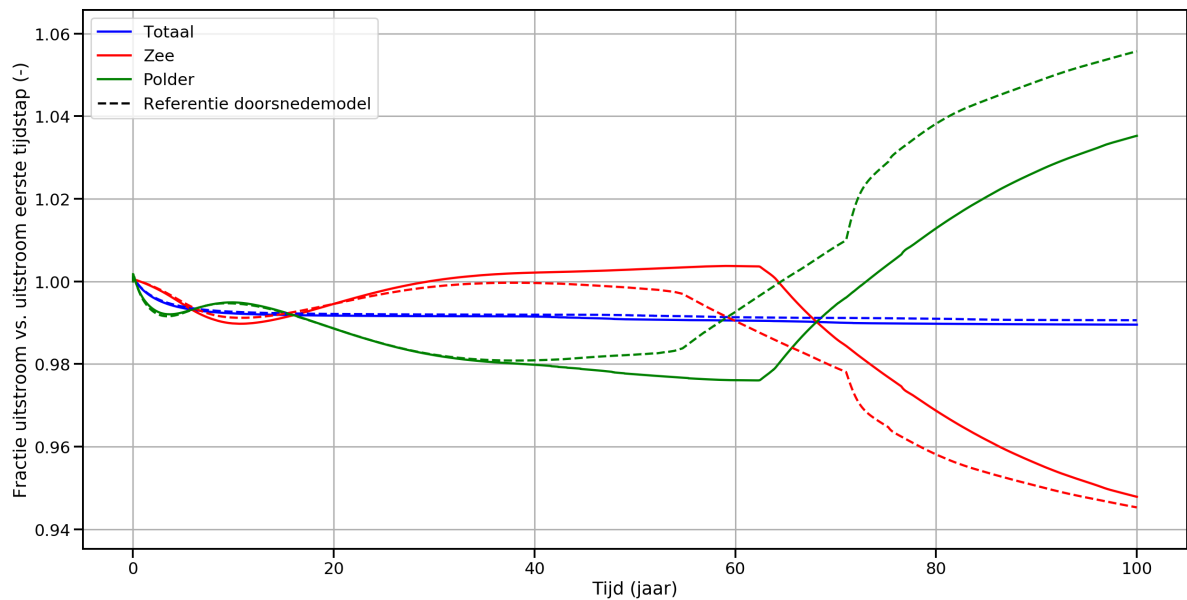
In figuur 5.21 zijn de veranderingen van de uitstroomfracties naar de zee en de polder gepresenteerd. Het duidelijkste verschil in vergelijking met de variatie in de uitstroomfracties van doorsnedemodel De Putten is het ontbreken van de knik op 26000 dagen. Ook zijn de relatieve fractieveranderingen kleiner dan bij doorsnedemodel De Putten. Aan het einde van de modelberekening lopen de lijnen van de fractieveranderingen nog niet helemaal horizontaal. Het model is dus nog niet in evenwicht.

Gat in kleilaag onder duin

Een tweede uitgangspunt van doorsnedemodel De Putten is het vermoeden van een mogelijk lokale grotere doorlatendheid in de kleilaag onder het duin. Dit vermoeden komt voort uit de stijghoogtemetingen van peilbuis PB_1_005 (figuur 5.2) en de geofysische metingen van peilbuizen PB_1_005 en PB_1_004 (figuur 3.4). Het doorsnedemodel De Putten kon deze metingen niet simuleren. Om te onderzoeken welke invloed een lokale grotere doorlatendheid van de kleilaag onder het duin heeft op het



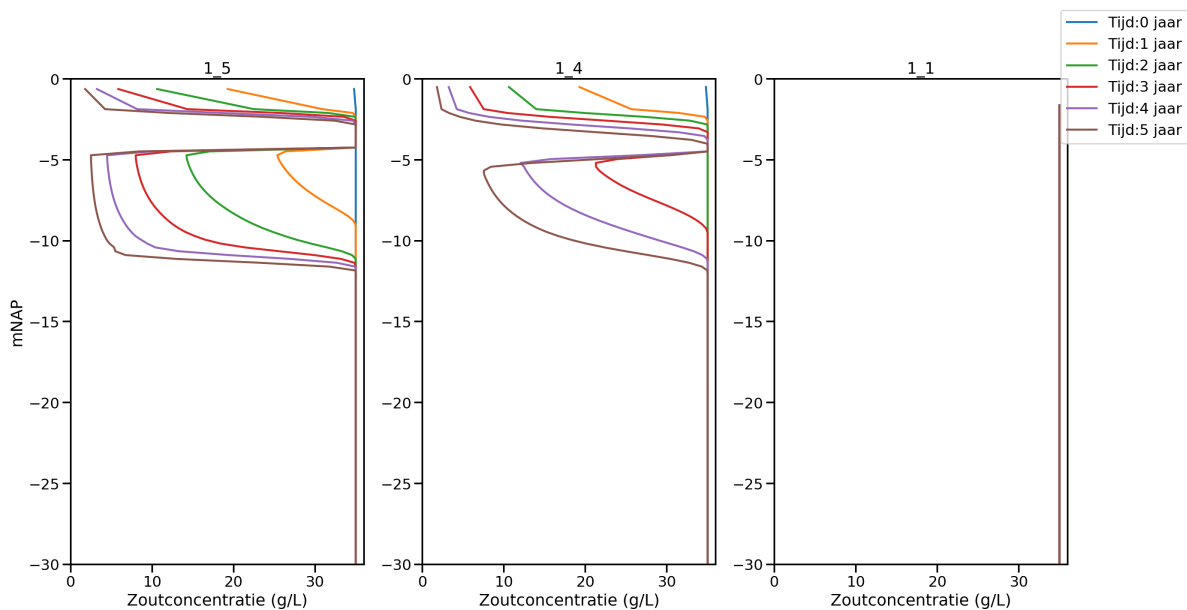
Figuur 5.20: Uitstroomfracties van variatie zonder meer van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen



Figuur 5.21: Uitstroomfractie verandering van variatie zonder meer van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen

grondwaterregime wordt een variatie op het doorsnedemodel doorgerekend met een gat in de kleilaag onder het duin.

In figuur 5.22 zijn de concentratie-profielen op de locaties van de peilbuizen langs doorsnede De Putten gegeven voor deze variatie. Er is goed te zien dat de verkregen zoutprofielen van peilbuizen PB_1_005 en PB_1_004 beter voldoen aan de metingen van figuur 3.4 dan de verkregen zoutprofielen van doorsnede De Putten. De verzoeting komt tot een diepte van ongeveer -10 meter en er is een dip in de verzoeting te zien op ongeveer -4 meter diepte. Beide verschijnselen zijn ook te zien in de metingen van figuur 3.4. Het is hierom mogelijk dat ter plekke van peilbuizen PB_1_004 en PB_1_005 een lokale grotere doorlatendheid in de kleilaag onder het duin aanwezig is. Echter is hiermee nog geen verklaring gegeven voor de gemeten stijghoogte van peilbuis PB_1_005.

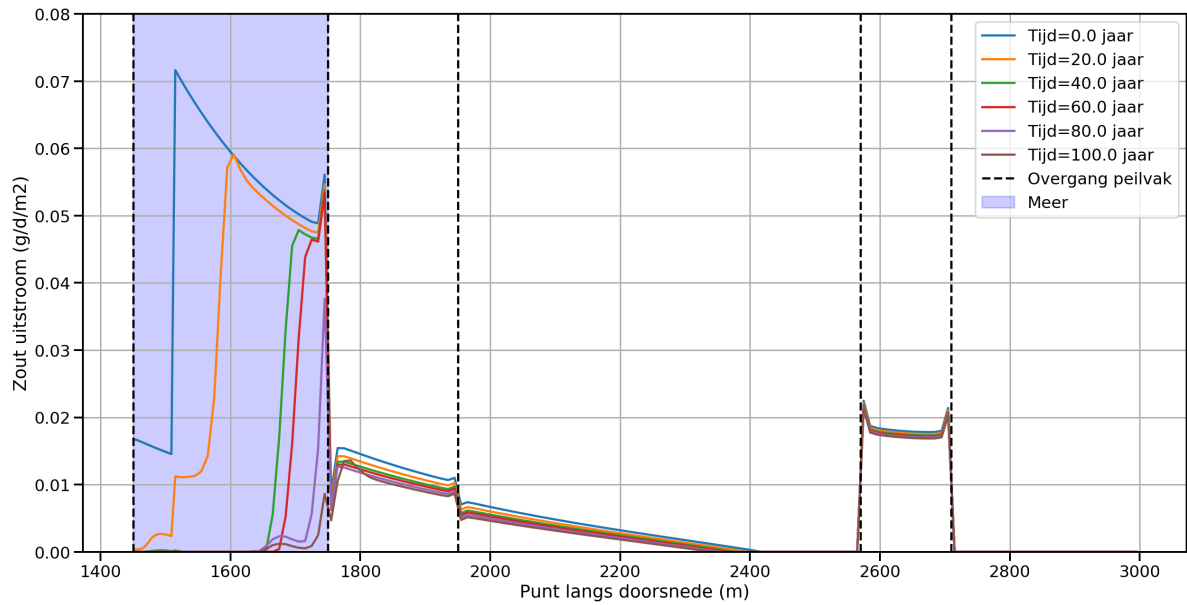


Figuur 5.22: Zoutconcentratie-profielen peilbuizen De Putten voor variatie van doorsnedemodel met gat in kleilaag onder duin

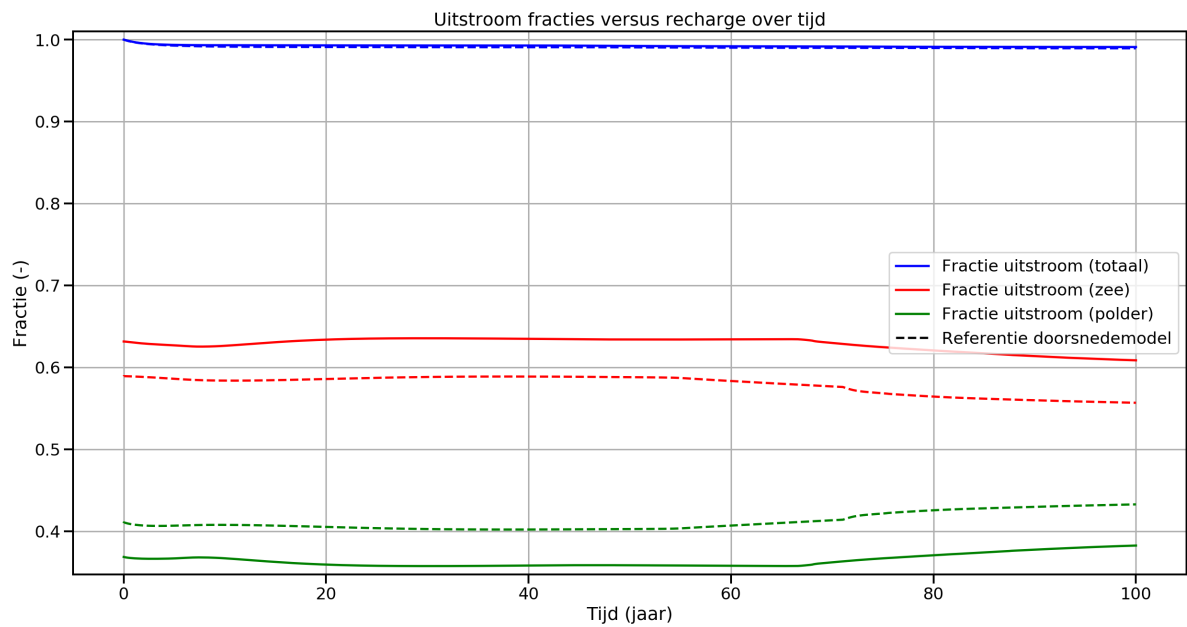
In figuur 5.23 is de zout-vracht naar het polderoppervlak door de jaren heen getoond. Er is te zien dat de verzoeting in de eerste 40 jaar verder gevorderd is dan bij het doorsnedemodel De Putten. Dit is te verklaren omdat de zoete grondwateraanvulling op het duin door het gat in de kleilaag makkelijker de 1^e watervoerende laag kan bereiken. Daardoor zal de zoetwaterbel hier sneller aangroeien en zich sneller richting de polder uitbreiden. Uiteindelijk ontstaat er een evenwicht en is de afname van zout-uitstroom langs het polderoppervlak na 100 jaar gelijk aan de afname bij doorsnedemodel De Putten.

In figuur 5.24 zijn de uitstroomfracties van de variatie met gat in kleilaag van doorsnedemodel De Putten gegeven. In vergelijking met doorsnedemodel De Putten is de fractie van het grondwater dat naar zee stroomt over de gehele modelberekening iets kleiner. Dit heeft te maken met het feit dat de zoete kwel door het gat in de kleilaag makkelijker de 1^e watevoerende laag kan bereiken. Daardoor wordt de uitstroomroute naar het polderoppervlak onder de ondoorlatende dijk door gemakkelijker. Net zoals bij doorsnedemodel De Putten lopen de fracties aan het einde van de modelberekening iets naar elkaar toe. Deze verandering start iets later in in vergelijking tot doorsnedemodel De Putten, ongeveer 5000 dagen. Over het algemeen kan dus gesteld worden dat een groter deel van de kwel naar de polder stroomt wanneer er een gat in de kleilaag onder het duin aanwezig is.

In figuur 5.25 is de verandering te zien van de uitstroomfracties naar de zee en de polder door de jaren heen. Vergeleken met de onbewerkte versie van doorsnedemodel De Putten is te zien dat de fracties eerst tegenovergesteld veranderen na ongeveer 5000 dagen en dat er meer grondwater uitstroomt in de polder dan bij de beginsituatie. Dit is het effect van het meer directe contact van het duin met de 1^e watervoerende laag, hierdoor kan de zoete kwel gemakkelijker via deze watervoerende

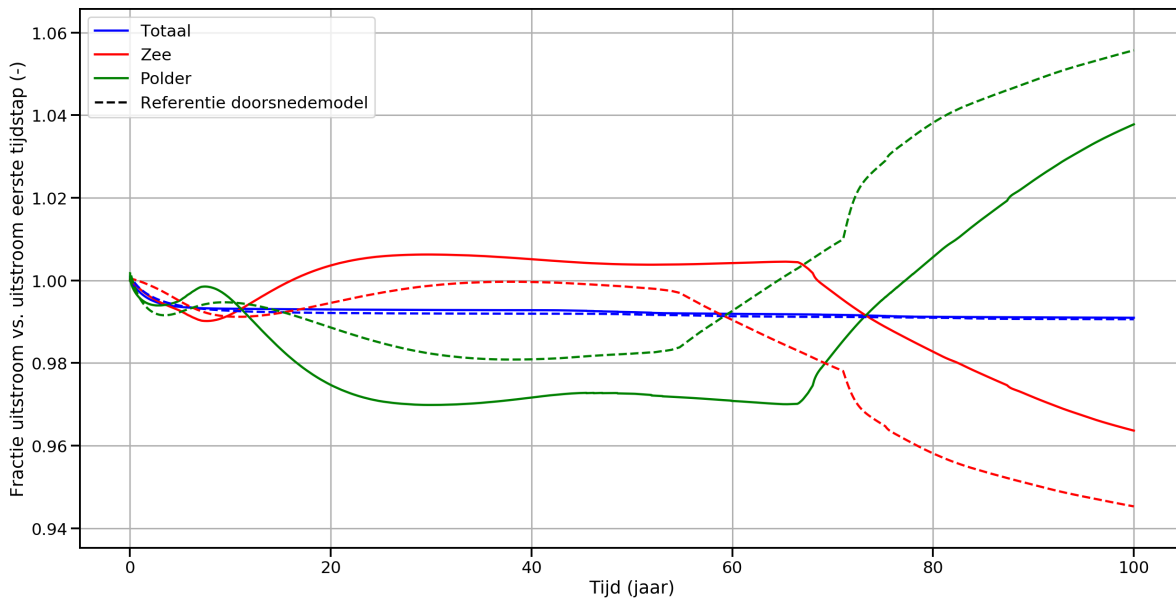


Figuur 5.23: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van variatie met gat in kleilaag van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen



Figuur 5.24: Uitstroomfracties van variatie met gat in kleilaag onder duin van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen

laag naar de polder stromen. Na 28000 dagen draait dit echter weer om en schiet de fractie van het grondwater dat in de zee uitstroomt scherp omhoog. Dit is het punt waarop de zoetwaterbel de diepste kleilaag nadert en zo de kwel vanaf de zeezijde van dit punt naar de polder blokkeert. Na 100 jaar is deze doorsnedevariatie nog niet in evenwicht. De lijnen van de relatieve fractieveranderingen lopen nog niet horizontaal. De grondwaterstroming zal na deze 100 jaar dus nog iets veranderen.



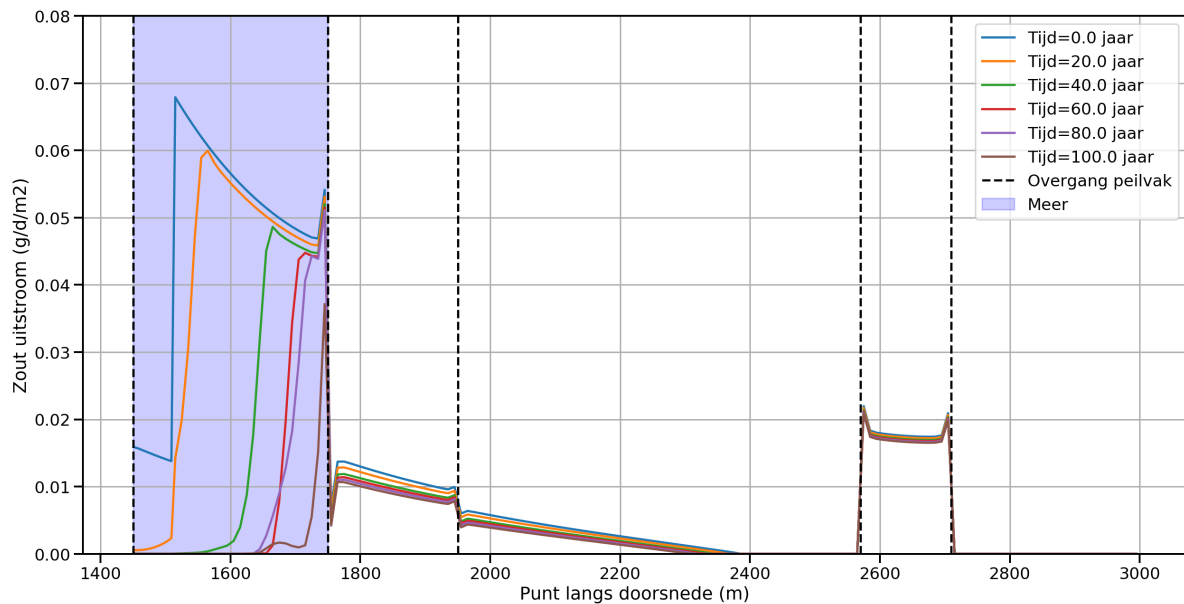
Figuur 5.25: Uitstroomfractie verandering van variatie met gat in kleilaag onder duin van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen

Met doorlopende middelste kleilaag

Om te onderzoeken wat het effect van de onvolledige middelste kleilaag op doorsnedemodel De Putten is wordt een variatie doorgerekend waarin de middelste kleilaag over de hele doorsnede doorloopt. In figuur 5.26 is de zoutvracht naar het polderoppervlak op verschillende momenten van de modelberekening gepresenteerd. In vergelijking tot de resultaten van doorsnedemodel De Putten is geen verschil te zien. Er kan dus gesteld worden dat het wel of niet volledig over de doorsnede doorlopen van de middelste kleilaag geen invloed heeft op de zoutvracht naar het polderoppervlak.

In figuur 5.27 zijn de fracties van uitstroom van het grondwater naar de zee of de polder over tijd getoond. Er is geen duidelijk verschil te zien in vergelijking tot de resultaten van doorsnedemodel De Putten. Toch zijn er kleine verschillen te ontdekken. In figuur 5.28 zijn de relatieve veranderingen van de uitstroomfracties over tijd gepresenteerd. In vergelijking tot de resultaten van doorsnedemodel De Putten variëren de uitstroomfracties in de eerste 14000 dagen een stuk minder. Na deze 14000 dagen vindt een grotere verandering plaats en neemt het aandeel van het grondwater dat naar de zee stroomt toe. Deze grotere verandering vindt bij doorsnedemodel De Putten pas na ongeveer 22000 dagen plaats. De reden voor deze verandering is dat de zoetwaterbel hier steeds dichterbij de diepste kleilaag komt. Daardoor ontstaat er een opbouw van stijghoogte aan de onderkant van de zoetwaterbel en zal meer grondwater richting de zee gaan stromen. De knik in de fractielijnen op 26000 dagen is het punt waarop de zoetwaterbel daadwerkelijk in de diepste kleilaag begint door te dringen. Dit is op hetzelfde tijdstip als in de resultaten van doorsnedemodel De Putten. Het effect van het doorlopen van de kleilaag is dus dat de fractie van het grondwater dat naar de zee stroomt eerder stijgt doordat er meer stijghoogte opgebouwd wordt bij de doorlopende middelste kleilaag. Bij doorsnedemodel De Putten waar de kleilaag op 1200 meter langs de doorsnede begint kan deze stijghoogteopbouw zich langs de kleilaag naar beneden verdelen waardoor de stijghoogte minder snel op het punt komt waardoor de fractie zee-uitstroom omhoog gaat.

Na 100 jaar lopen de relatieve fractieveranderingen vrijwel horizontaal, dit betekent dat het grondwa-



Figuur 5.26: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van variatie met doorlopende middelste kleilaag van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen

terregime zo goed als in evenwicht is.

5.3.2. Variaties doorsnedemodel Abtskolk

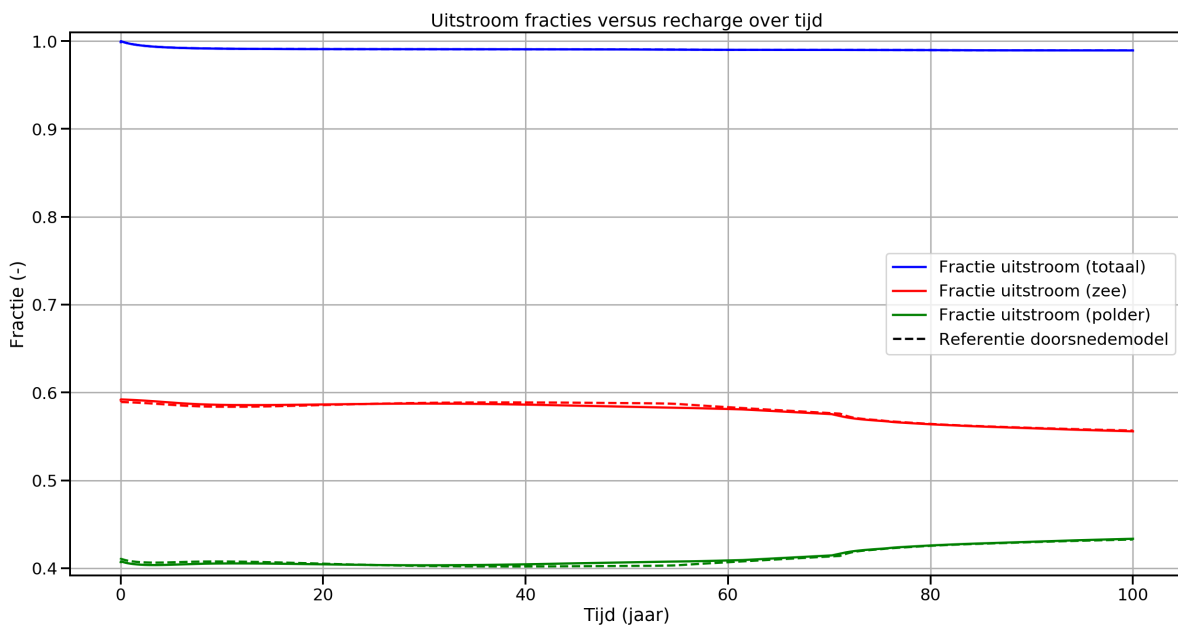
In deze paragraaf worden drie variaties op het doorsnedemodel Abtskolk geïntroduceerd en 100 jaar doorgerekend. Met deze variaties wordt een overzicht verkregen van andere mogelijke vormen van de zoetwaterbel en de bijbehorende verandering van de zoutvracht naar de polder op soortgelijke doorsnedes als doorsnede Abtskolk. Daarnaast wordt er algemene informatie opgedaan over de invloed van bepaalde randvoorwaarden op soortgelijke doorsnedes.

Met meer aan voet van het duin

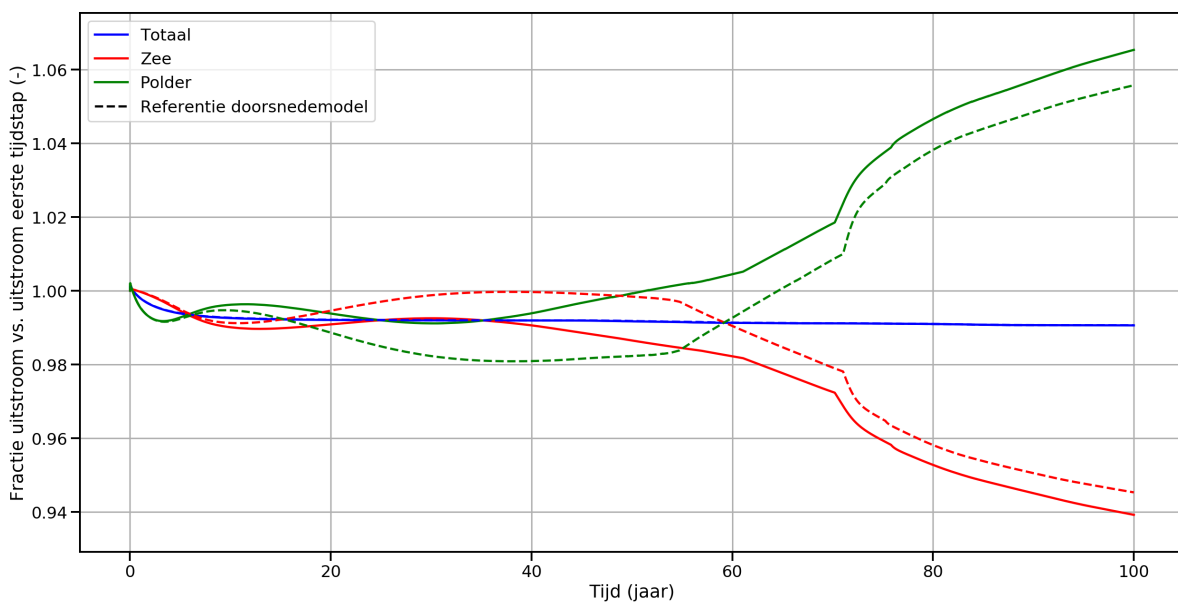
Om te onderzoeken hoe een meer zoals De Putten in combinatie met een duinmeer het grondwaterregime veranderen wordt een variatie op doorsnedemodel Abtskolk met een meer aan de voet van het duin doorgerekend. Dit meer krijgt hetzelfde polderpeil en afmetingen als het meer De Putten. Ook wordt de weerstand van het polderoppervlak verlaagd naar 0.1 dagen. Met deze variatie wordt indirect ook een indicatie worden gegeven van een duinmeer op doorsnede De Putten. Echter verschillen de gehanteerde polderpeilen in de poldervakken op beide doorsnedes. Ook verschillen de lithologische en afwateringsparameters van deze doorsnedes van elkaar.

In figuur 5.29 is de zoutvracht langs het polderoppervlak over tijd getoond. In het begin is er een piek in de zoutvracht in de eerste meters van het meer vanaf de duinen. Deze piek is te verklaren door de plotselinge overgang van doorlatendheid van het polderoppervlak. Doordat het meer op dezelfde plek langs de doorsnede ligt als bij doorsnedemodel De Putten ontstaat er een klein stukje polder tussen het duin en het poldermeer (het duin is op deze doorsnede iets minder breed dus er is een paar meter extra polder). Door de kleinere doorlatendheid van het polderoppervlak in vergelijking tot het poldermeer zal een groot deel van de kwel van deze eerste paar meter uitstromen in de eerste paar meter van het meer. Daarnaast is te zien dat vrijwel alle kwel uitstroomt in de eerste paar 100 meter van de polder, het poldermeer vangt dus bijna alle kwel op. De afstand die de verzoeting de polder in reikt en de verandering van deze verzoeting over de tijd zijn vergelijkbaar met de resultaten van doorsnedemodel Abtskolk.

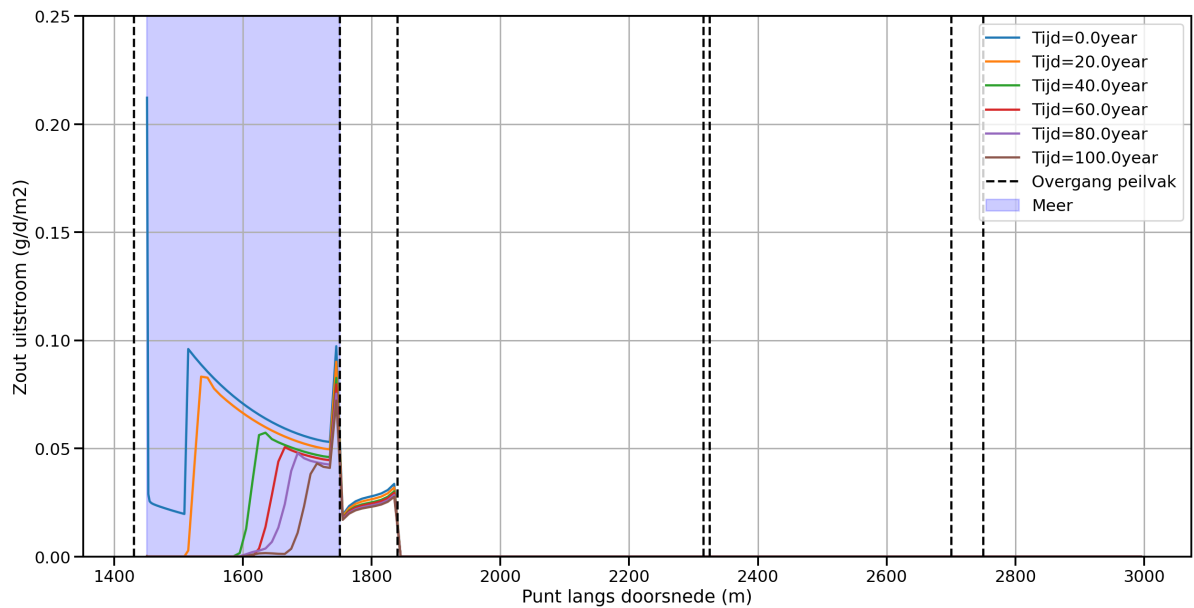
In figuur 5.30 zijn de grondwater uitstroomfracties over tijd weergegeven. De fractie van het grondwater dat naar de polder uitstroomt is voor het gehele tijdverloop van het model hoger dan die van doorsnedemodel Abtskolk. Dit is te verklaren doordat het meer een lagere oppervlakteweerstand heeft waardoor het grondwater hier makkelijker kan uitstromen. Daarnaast wordt er nu een lager polderpeil



Figuur 5.27: Uitstroomfracties van variatie met doorlopende middelste kleilaag van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen

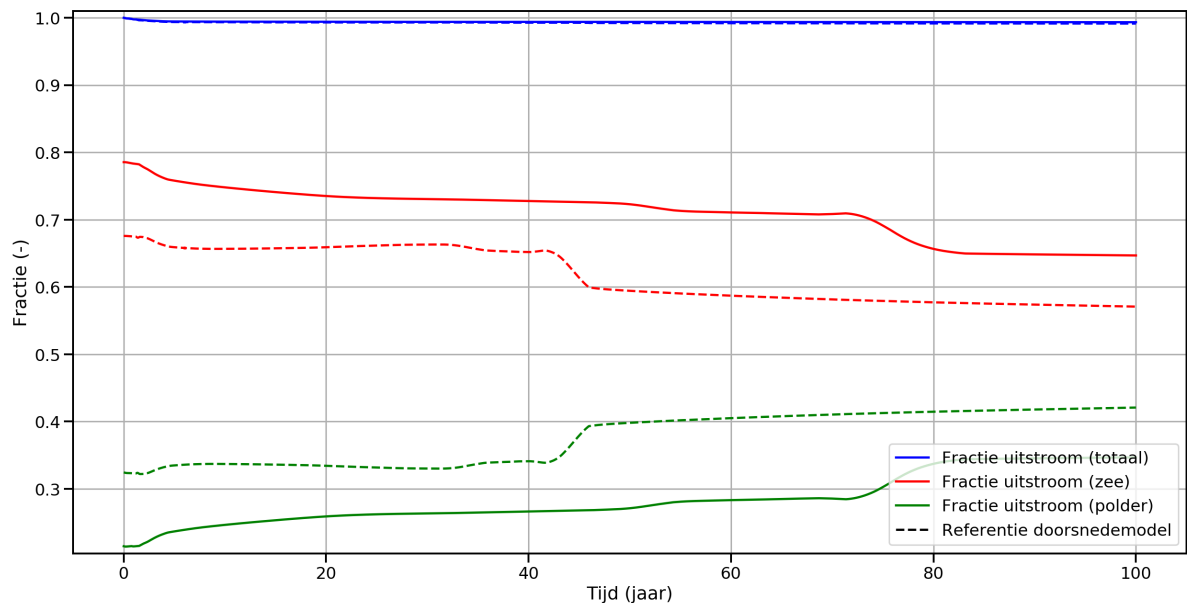


Figuur 5.28: Uitstroomfractie verandering van variatie met doorlopende middelste kleilaag van doorsnedemodel De Putten door de jaren heen



Figuur 5.29: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van variatie met poldermeer van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen

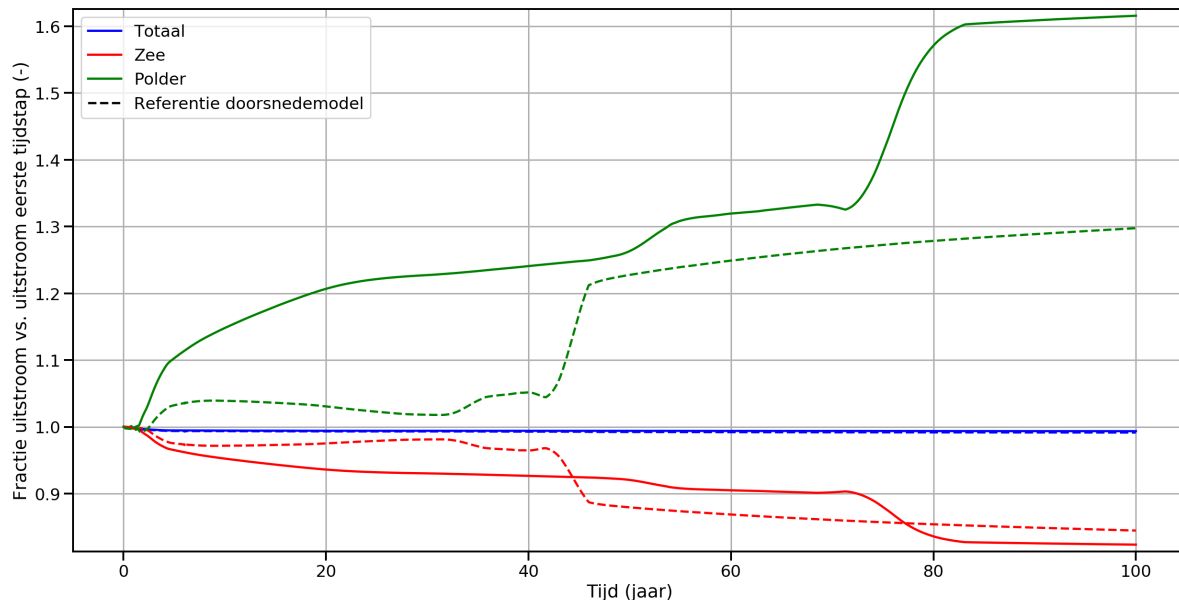
gehanteerd in het eerste poldervak vanaf het duin waardoor de kwelstroom hier meer naar toe wordt getrokken. Een grotere kortstondige verandering van de fracties vindt plaats rond 27000 dagen, dit is later dan voor doorsnedemodel Abtskolk waar dit rond 16000 dagen plaatsvindt. Deze knik geeft het punt aan waarop de zoetwaterbel de diepste kleilaag bereikt. Op dit moment wordt de kwelstroom van de zee naar de polder in de eerste twee watervoerende lagen geblokkeerd. Dit punt komt bij deze variatie met poldermeer later omdat de stijghoogte-opbouw naar beneden langzamer gaat. Doordat grondwater gemakkelijker kan uitstromen in het poldermeer neemt de stijghoogte op grotere diepte ook af. Daardoor komt deze knik in de fractielijnen later.



Figuur 5.30: Uitstroomfracties van variatie met poldermeer van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen

In figuur 5.31 zijn de relatieve veranderingen van de uitstroomfracties gepresenteerd. De relatieve

veranderingen nemen gelijkmatiger toe in vergelijking tot deze van doorsnedemodel Abtskolk. Dit komt voort uit het feit dat het grondwater makkelijker weg kan stromen via het poldermeer. Daardoor is de stijghoogteopbouw in de ondergrond geleidelijker en verloopt de verandering van het grondwaterregime ook geleidelijker. Ook is hier de knik rond 27000 dagen te zien die het naderen van de zoetwaterbel naar de diepste kleilaag aangeeft. Na 100 jaar lopen de lijnen van de relatieve fractieverandering vrijwel horizontaal. Dit wil zeggen dat de uitstroomfracties bijna niet meer veranderen en er kan gesteld worden dat het grondwaterregime nagenoeg in evenwicht is.



Figuur 5.31: Uitstroomfractie verandering van variatie met poldermeer van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen

Zonder duinmeer

Het belangrijkste en unieke aspect van doorsnede Abtskolk is het duinmeer. Om te onderzoeken wat het effect van het duinmeer expliciet is op het grondwaterregime in doorsnede Abtskolk wordt een variatie op het doorsnedemodel doorgerekend waarin het duinmeer ontbreekt.

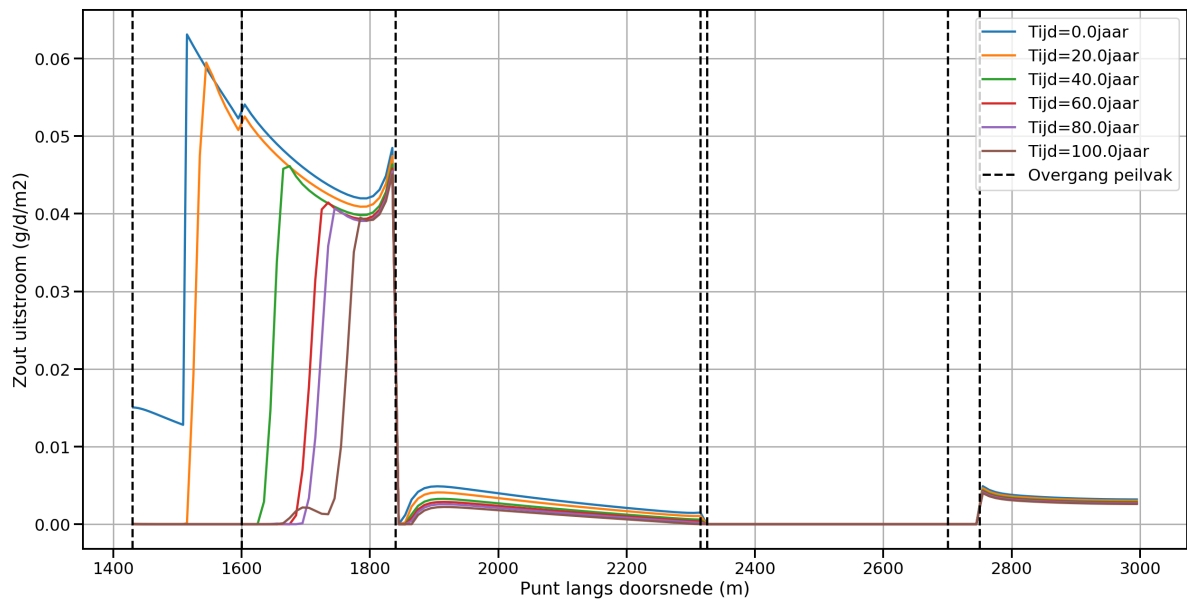
In figuur 5.32 is de zoutvracht naar het polderoppervlak over tijd gepresenteerd. Er is geen verschil te zien met de resultaten van doorsnedemodel Abtskolk. Er kan dus gesteld worden dat het duinmeer in het doorsnedemodel Abtskolk geen invloed heeft op de verzoeting van het polderoppervlak op de lange termijn.

In figuur 5.33 en 5.34 zijn de uitstroomfracties en hun respectievelijke veranderingen over tijd getoond. Beide hebben nauwelijks verschil met de resultaten van doorsnedemodel Abtskolk. Er is echter een klein verschil te zien in de respectievelijke veranderingen na 100 jaar van 0.05 in voordeel van de fractie naar de polder. Dit is echter erg klein en ook niet duidelijk terug te zien in de uitstroomfracties zelf.

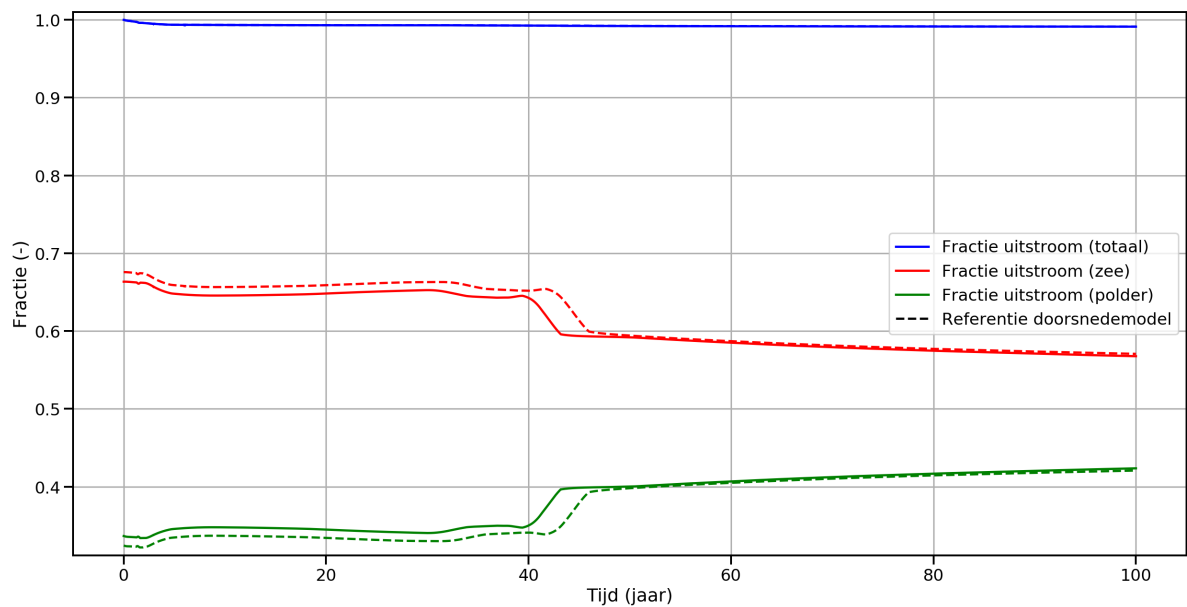
Er kan dus gesteld worden dat het duinmeer zoals toegevoegd in doorsnedemodel Abtskolk geen invloed heeft op het grondwaterregime in de doorsnede op de lange termijn. Uit de resultaten van doorsnedemodel Abtskolk na 5 jaar is wel een plaatselijke verandering te zien in de ontwikkeling van de zoetwaterbel in vergelijking tot de resultaten van doorsnedemodel De Putten na 5 jaar. Een kleine dip in de diepte van de zoetwaterbel onder het duinmeer is hier te observeren. Echter heeft dit op de lange termijn geen merkbare invloed op de vorming van de zoetwaterbel.

Vast peil in geheel poldergebied met laag peilvak aan einde polder

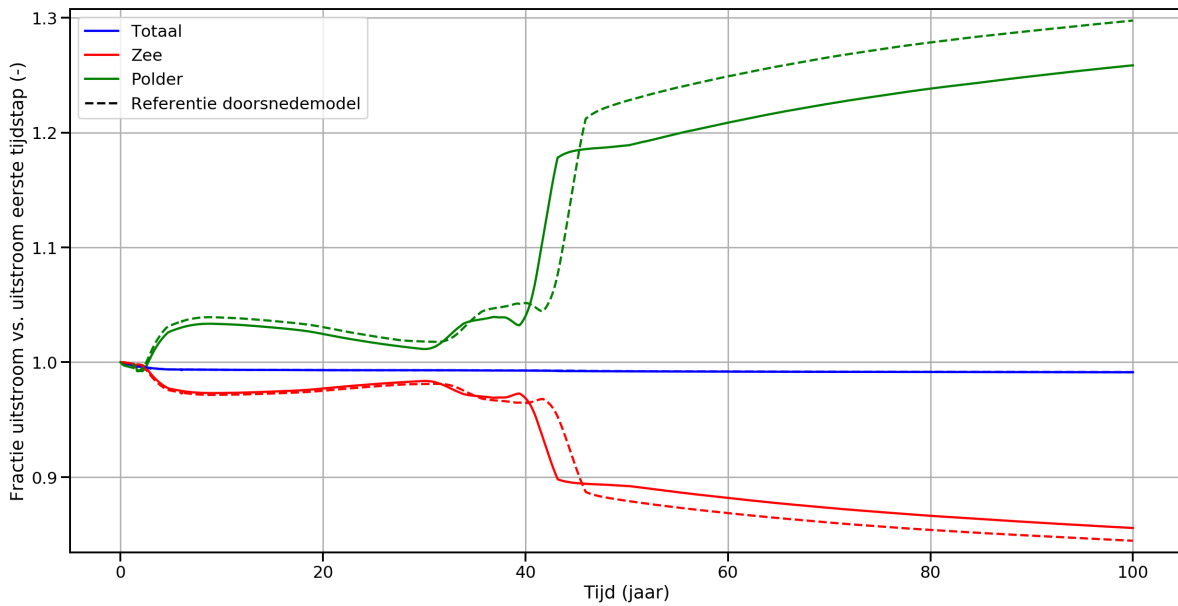
De invloed van de polderpeilen op de kwelstromen blijkt uit de resultaten van de doorsnedemodellen erg groot te zijn. Een lager gehandhaafd peil ten opzichte van aangrenzende gehandhaafde peilen leidt



Figuur 5.32: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van variatie zonder duinmeer van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen



Figuur 5.33: Uitstroomfracties van variatie zonder duinmeer van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen



Figuur 5.34: Uitstroomfractie verandering van variatie zonder duinmeer van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen

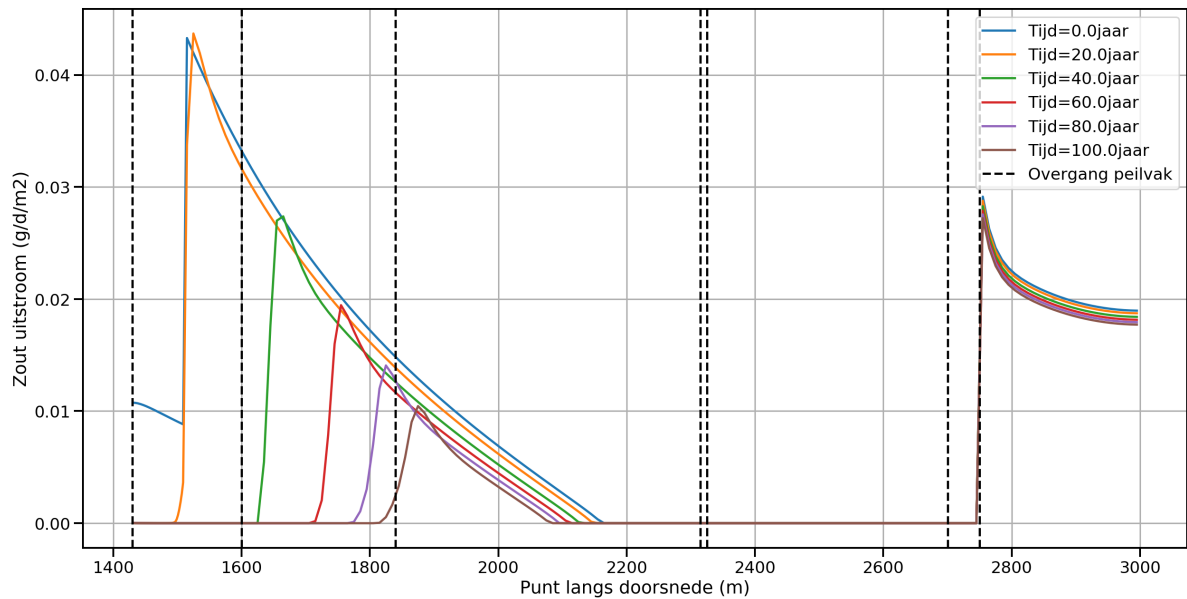
tot een toename van kwel naar dit peilvak. Om te onderzoeken hoe deze kwelstromen zich zouden verhouden als het peil voor het gehele poldergebied gelijk wordt getrokken is een variatie van doorsnedemodel Abtskolk doorgerekend. Hierin geldt een polderpeil voor (bijna) het gehele polderoppervlak. Dit polderpeil moet uiteraard wel onder het zeepeil liggen om kwel uit de zee plaats te laten vinden. Het gekozen polderpeil is -1.5 meter. Om te kijken hoe een lager polderpeil verder in de polder de kwel beïnvloed is gekozen om het laatste peilvak een lager peil mee te geven. Dit peil is gezet op -2.5 meter.

In figuur 5.35 is de zoutvracht naar het polder op verschillende tijdstippen van de berekening gepresenteerd. De zoutvracht is door het gelijktrekken van het polderpeil van alle poldervakken, met uitzondering van het laatste peilvak, gelijkmatiger verdeeld over het gehele polderoppervlak. De kwel dringt dieper door in de polder maar de kwantiteit van de kwel neemt af. In vergelijking tot doorsnedemodel Abtskolk dringt de verzoeting ook iets verder door in de polder. Na 100 jaar is de eerste 400 meter van de polder geheel verzoet. Overall waar kwel uitstroomt vindt verzoeting plaats, echter neemt de verzoeting verder van het duin af in intensiteit.

Het poldervak het verst van het duin af waar het polderpeil een meter lager ligt dan in de overige poldervakken ontvangt duidelijk meer kwel dan het aangrenzende poldervak. Dit poldervak ontvangt per vierkante meter ongeveer de helft van wat het poldervak het dichtst bij het duin ontvangt in de beginsituatie. In het poldervak het verst van het duin af vindt echter nauwelijks verzoeting plaats. En van de verzoeting die te zien is is het niet duidelijk of dit komt door zoete kwel, een afname van zoute kwel of een numerieke afwijking.

Er kan dus gesteld worden dat een peilvak in de eerste 1600 meter van de polder met een lokaal lager gehandhaafd polderpeil altijd meer kwel aantrekt dan de omliggende poldervakken. Voor de verder in de polder gelegen poldervakken is dit waarschijnlijk de dieper stromende zoute kwel uit de zee.

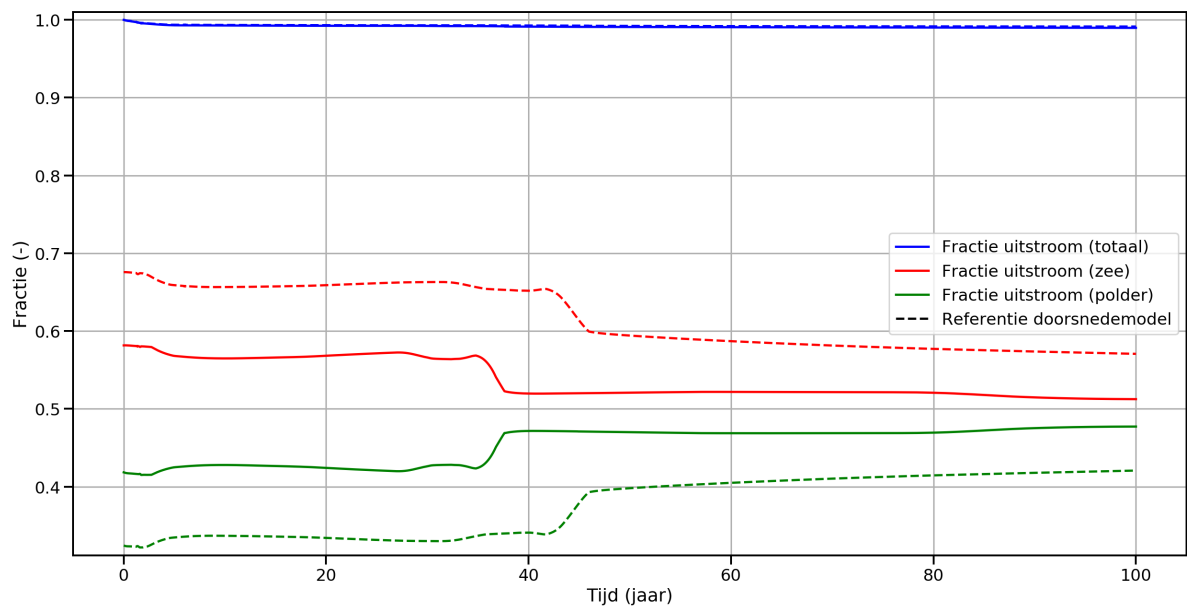
In figuur 5.36 zijn de uitstroomfracties over tijd getoond. De uitstroomfractie naar de polder is kleiner in vergelijking tot die van doorsnedemodel Abtskolk. Ook neemt deze fractie eerder af met een knik in de fractielijn op ongeveer 13000 dagen. Deze knik vindt bij doorsnedemodel Abtskolk plaats op ongeveer 16000 dagen. De verklaring voor deze eerdere steile daling is de kleinere grondwateruitstroom in de eerste paar 100 meter van de polder. Door het hoger gehanteerde peil in deze variatie in vergelijking tot doorsnedemodel Abtskolk in het eerste peilvak van de polder, -1.5 mNAP tegen -2.2 mNAP, kan grondwater in deze variatie hier minder gemakkelijk uitstromen. Hierdoor bouwt de stijghoogte in de ondergrond op en nadert de zoetwaterbel sneller de diepste kleilaag. Door de kleine doorlatendheid van deze kleilaag ontstaat hier veel stijghoogteopbouw waardoor een groter deel van het grondwater naar zee zal uitstromen. De route van de zoute kwel van de zee naar de polder wordt voor de toenemende zoete kwel uit het duin deels en uiteindelijk geheel geblokkeerd in de eerste twee



Figuur 5.35: Zout-vracht van de kwel langs het polderoppervlak van variatie met vast peil van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen

watervoerende lagen.

De uitstroomfracties naar de zee en naar de polder zijn na 100 jaar nagenoeg gelijk. Dit betekent dat ongeveer de helft van het grondwater uitstroomt in de zee en de helft in de polder.

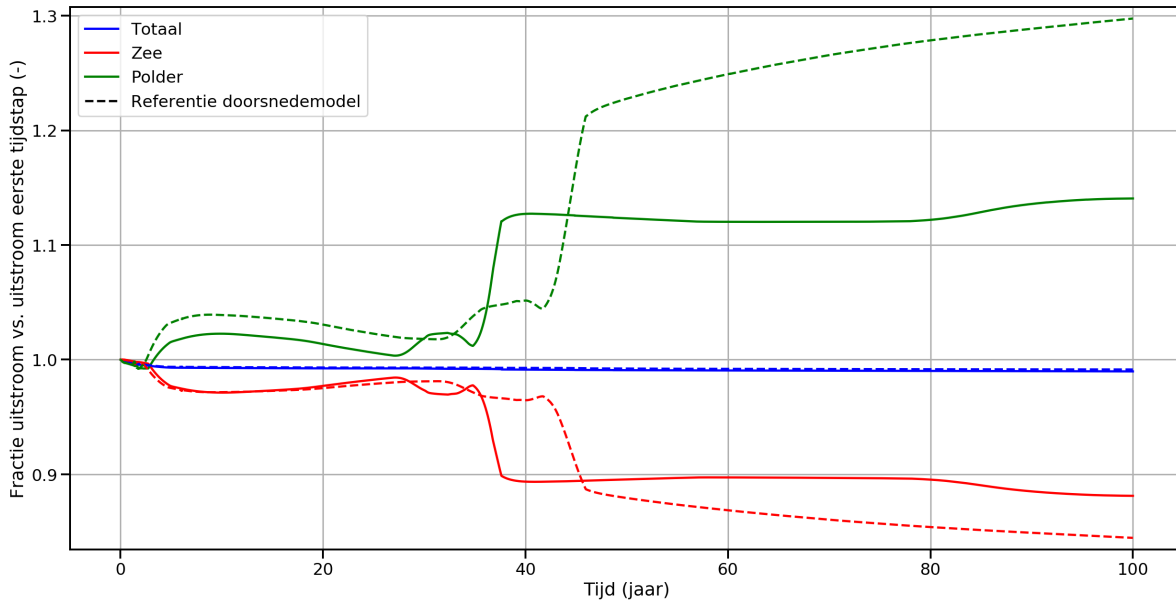


Figuur 5.36: Uitstroomfracties van variatie met vast peil van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen

In figuur 5.37 zijn de relatieve fractieveranderingen ten opzichte van de beginsituatie getoond. In vergelijking met de fractieveranderingen van doorsnedemodel Abtskolk zijn de uiteindelijke relatieve fractieveranderingen hier kleiner. Dit komt door het feit dat de initiële uitstroomfracties minder ver uit elkaar liggen. Daardoor komt het model sneller in evenwicht rond de gelijke verdeling van 50 procent uitstroom naar zee en 50 procent naar de polder. Zoals ook in figuur 5.36 te zien is de sprong in de fractieveranderingen rond 13000 dagen, dit is 3000 dagen eerder dan bij doorsnedemodel Abtskolk. Na 100 jaar lopen de lijnen van de fractieveranderingen nagenoeg horizontaal. Dit geeft aan dat er bijna geen veranderingen aan het grondwaterregime plaatsvinden en dat het model zo goed als in

evenwicht is.

Het veranderen en gelijktrekken van de polderpeilen in doorsnede Abtskolk zorgt voor een stabiel grondwaterregime. Ook worden de kwelstromen door deze ingreep beter verdeeld over het polderoppervlak.



Figuur 5.37: Uitstroomfractie verandering van variatie met vast peil van doorsnedemodel Abtskolk door de jaren heen

5.3.3. Maatgevende variaties

Uit de resultaten van de doorsnedemodellen en de variaties op deze doorsnedemodellen is gebleken dat de zoutvracht naar de polder veel verschillende vormen aan kan nemen afhankelijk van de aanwezige randvoorwaarden en gebruikte modelparameters in de doorsnede. Ook is gebleken dat de initiële uitstroomfracties en de ontwikkeling van deze fracties over de tijd grote verschillen kunnen tonen bij variaties op de doorsnedemodellen. In deze paragraaf zijn de maatgevende resultaten samengevat om een voorspelling te kunnen maken van de boven en ondergrens aan de verzoeting van het polderoppervlak.

In tabel 5.3 zijn de modelobservaties met betrekking tot de vorming van de zoetwaterbel voor de twee basis-doorsnedemodellen en de variaties hierop getoond. De maximale waarden voor de grootte van de zoetwaterbel zijn getoond in het rood. En de minimale waarden voor de grootte van de zoetwaterbel zijn getoond in het blauw. Voor verzoeting is een zoutgehalte van onder de 34.5 g/L aangenomen, dit komt neer op een afname van 0.5 g/L. Deze waarde is gekozen om een idee te krijgen van de volledige theoretische verzoeting. Een kleinere grenswaarde zou de aangroei van de zoetwaterbel kunnen onderschatten. Een grotere grenswaarde zou numerieke fouten met zich mee kunnen brengen.

Voor de variaties op doorsnede De Putten is op de korte termijn te verwachten dat de zoetwaterbel het snelst groeit bij de variatie met een gat in de kleilaag onder het duin. Na respectievelijk 60 en 100 jaar zal bij de variatie zonder poldermeer de zoetwaterbel verder reiken in de polder en dieper komen dan voor de variatie met het gat in de kleilaag onder het duin. De zoetwaterbel groeit het minst snel en komt uiteindelijk het minst diep voor de variatie met de doorlopende middelste kleilaag.

Voor de variaties op doorsnede Abtskolk wordt de zoetwaterbel uiteindelijk het grootst, zowel in de breedte als in de diepte, voor de variatie met een constant peil van -1.5 mNAP in het gehele poldergebied. De groei van de zoetwaterbel gaat wel langzamer dan bij de rest van de modellen en pas na 60 jaar wordt de zoetwaterbel duidelijk groter. Bij de variatie zonder duinmeer groeit de zoetwaterbel net zo snel in de diepte. Echter zal na 60 jaar de reiking van de verzoeting in de polder niet groter zijn dan die van het doorsnedemodel Abtskolk. De zoetwaterbel blijft uiteindelijk het kleinst voor de variatie met duinmeer. Hier kan het grondwater gemakkelijker uitstromen waardoor een groter deel van de

zoetwaterbel afstroomt via het polderoppervlak. Hierdoor groeit de zoetwaterbel minder hard.

Model	Diepte zoetwaterbel (mNAP)			Afstand verzoeting in polder (m)		
	20 jaar	60 jaar	100 jaar	20 jaar	60 jaar	100 jaar
De Putten	-13.1	-17.4	-18.4	105	255	295
Zonder Poldermeer	-14.6	-17.6	-18.875	95	305	385
Gat in kleilaag onder duin	-15.1	-18.1	-18.6	145	265	325
Doorlopende middelste kleilaag	-11.3	-16.9	-18.1	105	255	295
Abtskolk	-12.1	-17.7	-19.7	105	285	345
Met poldermeer	-12.1	-17.2	-18.4	105	235	275
Zonder duinmeer	-12.3	-18	-20.1	105	295	345
Constant peil (-1.5 mNAP)	-12.1	-18	-20.1	85	315	435

Tabel 5.3: Model resultaten van de zoetwaterbel (Rood = Maximale waarde, Blauw = Minimale waarde)

In tabel 5.4 zijn de modelobservaties met betrekking tot de uitstroompercentages voor de twee basis-doorsnedemodellen en de variaties hierop getoond. De maximale waarden voor de grootte van de zoetwaterbel zijn getoond in het rood. En de minimale waarden voor de grootte van de zoetwaterbel zijn getoond in het blauw.

Voor doorsnede De Putten is bij de variatie met het gat in de kleilaag onder het duin het uitstroompercentage naar de zee het grootst over de gehele modelberekening. Dit is naar verwachting omdat door het gat in de kleilaag een directere verbinding met de 1^e watervoerende laag wordt gecreëerd. Hierdoor kan de zoete kwel makkelijker via deze watervoerende laag het polderoppervlak bereiken. Het kleinste uitstroompercentage in de polder is te zien bij de variatie zonder poldermeer. Door het ontbreken van het poldermeer wordt het polderpeil in de eerste paar 100 meter van de polder verhoogt en wordt de weerstand van het polderoppervlak hier groter. De combinatie van deze twee aanpassingen zorgen voor meer weerstand tegen grondwateruitstroom in de polder. Hierdoor stroomt een groter deel van dit grondwater uit in zee.

Voor doorsnede Abtskolk is bij de variatie met het poldermeer het grootste percentage grondwateruitstroom in de polder te zien. Dit is te verklaren door het feit dat het de weerstand van het polderoppervlak in de eerste paar 100 meter van de polder is verlaagd om het meer te simuleren. Door deze aanpassing kan het grondwater makkelijker uitstromen in dit deel van de polder. Hierdoor groeit het uitstroompercentage van het grondwater richting de polder. Het kleinste uitstroompercentage in de polder is te zien bij de variatie met een constant peil van -1.5 mNAP. Door het polderpeil op -1.5 mNAP te zetten wordt het polderpeil in de eerste twee peilvakken verhoogd. Door deze verhoging wordt een groter deel van het grondwater toch richting de zee getrokken en stroomt hier uit.

Model	Percentage uitstroom polder				Percentage uitstroom zee			
	0 jaar	20 jaar	60 jaar	100 jaar	0 jaar	20 jaar	60 jaar	100 jaar
De Putten	58.89	58.57	58.33	55.67	40.98	40.52	40.68	43.27
Zonder Poldermeer	52.25	51.97	52.45	49.53	47.62	47.08	46.48	49.3
Gat in kleilaag onder duin	62.88	62.89	63	60.88	37.11	36.36	36.16	38.19
Doorlopende middelste kleilaag	59.18	58.64	58.13	55.58	40.69	40.44	40.88	43.35
Abtskolk	67.57	65.89	58.7	57.07	32.42	33.41	40.49	42.07
Met poldermeer	78.54	73.51	71.07	64.67	21.46	25.89	28.31	34.67
Zonder duinmeer	66.34	64.82	58.5	56.77	33.65	34.48	40.67	42.35
Constant peil (-1.5 mNAP)	58.15	56.82	52.18	51.25	41.84	42.41	46.87	47.72

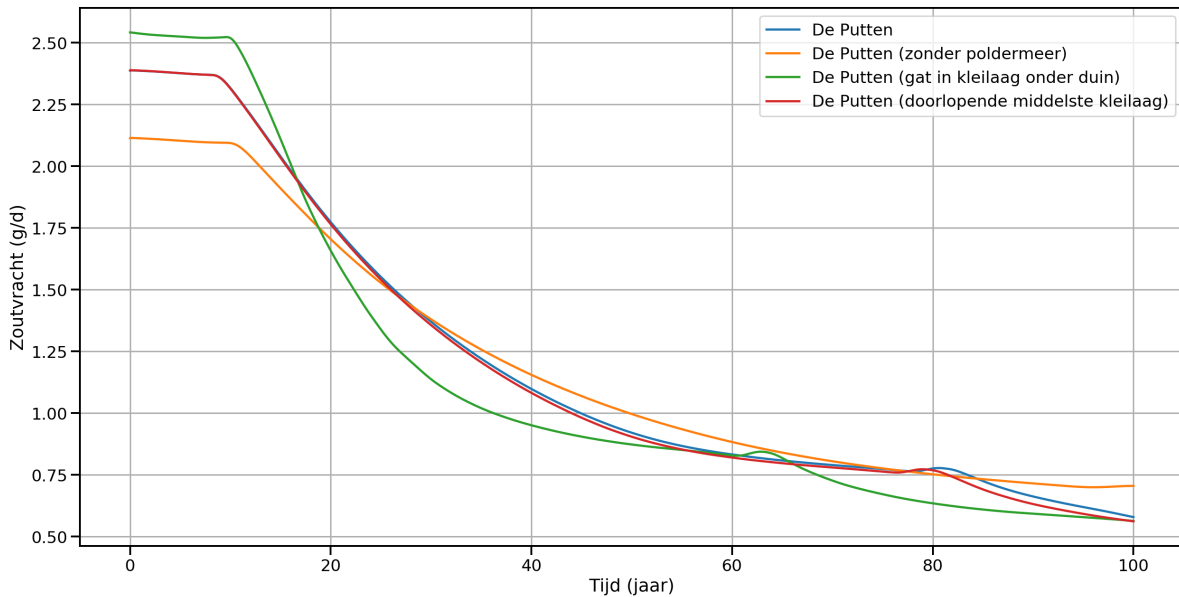
Tabel 5.4: Model resultaten van de uitstroomfracties (Rood = Maximale waarde, Blauw = Minimale waarde)

In figuur 5.38 en 5.39 is de totale zoutvracht dat uitstroomt via het polderoppervlak van de modellen over tijd gepresenteerd. In doorsnede Abtskolk is een grotere totale afname van zoutvracht te observeren in vergelijking tot doorsnede De Putten, alhoewel dit verschil klein is.

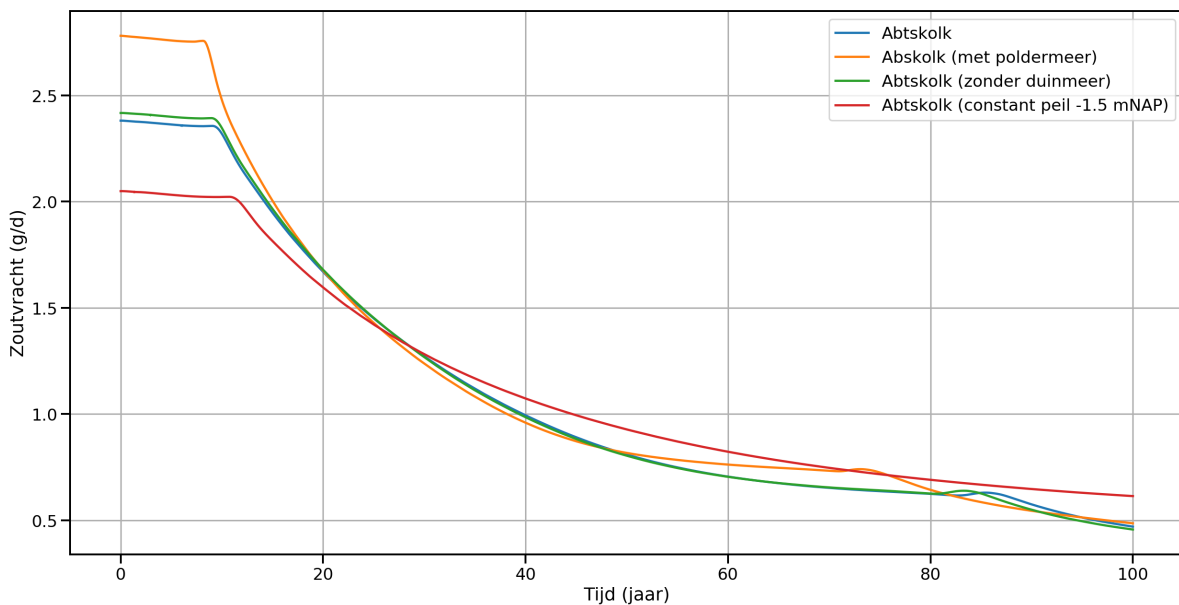
In de variaties op doorsnedemodel De Putten is duidelijk te zien dat de afname van zoute kwel in de eerste 40 jaar modelberekening groter is voor de variatie met een gat in de kleilaag onder het duin. Ook is te zien dat de verzoeting bij de aanwezigheid van een poldermeer groter is. De initiële zoutvracht

naar het polderoppervlak is door de aanwezigheid van het poldermeer groter en de uiteindelijke zoutvracht na 100 jaar kleiner dan de situatie zonder poldermeer. De Middelste kleilaag heeft nauwelijks tot geen invloed op de zoutvracht in de tijd.

In de variaties op doorsnedemodel Abtskolk valt wederom op dat de verzoeting bij aanwezigheid van een poldermeer groter is. Het verschil met doorsnede De Putten is dat de uiteindelijke zoutvracht na 100 jaar voor de doorsnede met en de doorsnede zonder poldermeer nagenoeg gelijk zijn. Ook is goed te zien dat de polderpeilen een grote invloed hebben op de zoutvracht naar het polderoppervlak. In de variant waarin een constant peil van -1.5 mNAP wordt gehanteerd is de afname van zoute kwel het kleinst. De initiële zoutvracht is kleiner dan in doorsnedemodel Abtskolk maar de uiteindelijke zoutvracht na 100 jaar is groter. De aanwezigheid van het duinmeer heeft geen of nauwelijks invloed op de zoutvrachten in de tijd.



Figuur 5.38: Totale zoutvracht naar polderoppervlak door de jaren heen voor doorsndemodel De Putten en variaties



Figuur 5.39: Totale zoutvracht naar polderoppervlak door de jaren heen voor doorsndemodel Abtskolk en variaties

6

Conclusies en discussiepunten

In dit rapport zijn twee verschillende doorsnedemodellen ontwikkeld om de verandering van het grondwaterregime onder de Hondsbossche duinen in kaart te brengen. De doorsnedemodellen voldoen aan de peilbuismetingen met betrekking tot de stijghoogte. Wat betreft de geofysische metingen is er meer onderzoek nodig naar de relatie tussen de elektrische weerstand van de ondergrond en de zoutconcentratie van het grondwater. Momenteel gelden de geofysische metingen alleen als indicatie voor een verandering aan de elektrische conductiviteit, en dus indirect aan de zoutconcentratie, van het grondwater. Ijking aan zowel de geofysische metingen als de stijghoogte is niet mogelijk gebleken. Omdat aan het begin van het project is aangenomen dat de stijghoogtemetingen een grotere betrouwbaarheid hebben is de ijking van de modellen vooral op deze data gefocust. De twee doorsnedemodellen voldoen aan de stijghoogtemetingen. Daarom kan een conclusie voor de verandering van het grondwaterregime getrokken worden uit de modelresultaten. Deze conclusie betreft een bandbreedte van de te verwachten veranderingen in de komende 100 jaar.

Om een idee te krijgen van de verzoeting van de polders landinwaarts van de Hondsbossche duinen is een duidelijk criterium nodig om de verzoeting in kaart te brengen. Bij dit onderzoek is de afname van zoutvracht naar verschillende delen van het poldergebied als voornaamste criterium voor de verzoeting genomen. Omdat beide doorsnedemodellen geheel zout beginnen kan worden gesteld dat de zoutvracht van de eerste tijdstap de situatie voor de zandsuppletie voorstelt. Met de afname van de zoutvracht over het polderoppervlak van de doorsnedemodellen kan de verzoeting kwalitatief worden aangetoond. Een tweede criterium is de verandering in de fractie van het grondwater dat uitstroomt in de polder. Omdat in het model maar twee plekken voor uitstroom van het grondwater aanwezig zijn, de zee en het polderoppervlak, duidt een verandering in de ene fractie indirect op een tegenovergestelde verandering in de andere fractie. Een verandering in deze fracties duidt zo op een veranderende richting van de verschillende kwelstromen in het gebied.

De effecten op de ecologische waarde van het gebied worden in dit onderzoek niet expliciet onderzocht. De resultaten van het onderzoek geven een kwantitatieve en kwalitatieve verandering van de zoutvracht naar het polderoppervlak aan. De toelaatbare ondergrens van de zoutvracht voor het behoud van de ecologische waarden wordt niet in beschouwing genomen. Naar de daadwerkelijke effecten op de ecologische waarden van het gebied zal aan hand van de resultaten uit dit rapport meer onderzoek moeten worden gedaan.

Op doorsnede De Putten neemt de zoutvracht naar het polderoppervlak voornamelijk af in de eerste 300 meter polder vanaf het duin. Hier is het meer De Putten gelegen. De grootste verzoeting is te verwachten tussen 5 en 35 jaar vanaf nu (10 en 40 jaar voor het model). In de komende 15 jaar zal de eerste 105 meter van de polder verzoeten. Aangezien dit een deel van de kwel naar het meer betreft is de verwachting dat dit effect heeft op de zoutconcentratie in het meer. Het is dan ook aan te bevelen om in de komende 10 jaar preventieve maatregelen te nemen tegen de oprukkende zoete kwel die de zoute kwel verdrijft. Op deze manier zal de verzoeting van het meer De Putten gering blijven en zal de flora en fauna in en rond dit meer het minst aangetast worden.

Het vermoeden bestaat dat er op doorsnede De Putten een plaatselijk doorlatender stuk grond in de kleilaag onder het duin aanwezig is. Dit vermoeden komt voort uit de geofysische metingen op deze

doorsnede. Op basis hiervan is een variatie op het doorsnedemodel De Putten doorgerekend waar een gat in de kleilaag onder het duin aanwezig is. De verzoeting van het polderoppervlak rukt door dit gat in de kleilaag sneller op de polder in. Over 35 jaar is een even grote afstand van het polderoppervlak verzoet als over 55 jaar bij doorsnedemodel De Putten. Ook reikt de verzoeting over 15 jaar 40 meter verder de polder in dan bij doorsnedemodel De Putten (145 meter). De noodzaak om maatregelen te nemen in de komende 10 jaar neemt hiermee toe.

Achteraf gezien zou er ook voor gekozen kunnen zijn om de variatie op het doorsnedemodel De Putten met het gat in de kleilaag onder het duin als basis doorsnedemodel te gebruiken. Uit de geofysische metingen van peilbuizen PB_1_004 en PB_1_005 in het duin is gebleken dat het grondwater hier verzoet tot ongeveer -10 mNAP. Dit is alleen mogelijk gebleken met een beter doorlatend stuk in de kleilaag onder het duin. Daarnaast is er een onzekerheid ontstaan over de stijghoogtemetingen van peilbuizen PB_1_004 en PB_1_005 doordat volgens de metingen over een kleine afstand een stijghoogteverschil van 0.5 meter zou bestaan. Deze plaatselijke gradiënt van de stijghoogte wordt heel onwaarschijnlijk geacht. Als er voor gekozen zou zijn om de variant met het gat in de kleilaag onder het duin als model voor ijking te gebruiken zouden enkele parameters wellicht anders geïkt zijn. Dit zou de modelresultaten kunnen beïnvloeden. Echter is het effect van een mogelijk gat in de kleilaag wel onderzocht. Hiermee is de reikwijdte van de verzoeting door de tijd voor beide scenario's gevonden en is de impact van het gat in de kleilaag aangetoond. Het is goed mogelijk dat in het 3 dimensionale vlak plaatselijk beter doorlatende delen in de kleilaag onder het duin bestaan. Het doorsnedemodel De Putten en de variatie met het gat in de kleilaag onder het duin zijn in dit 3 dimensionale vlak beide aanwezig. Een logische vervolgstap zou zijn om verder onderzoek te doen naar de invloed van de heterogene compositie van de grondlagen in een 3 dimensionaal model.

Op de doorsnede net ten zuiden van het meer Abtskolk is eenzelfde verzoetingspatroon te zien als op doorsnede De Putten. Tussen 5 en 35 jaar vanaf nu (10 en 40 jaar voor het model) vindt de grootste verzoeting van het polderoppervlak plaats. Voor doorsnede de Abtskolk is de afstand waarover de verzoeting de polder in reikt iets groter dan voor doorsnede De Putten. In de komende 15 jaar is dit echter nog niet het geval. Het is daarom net zoals voor doorsnede De Putten aan te raden om binnen 10 jaar maatregelen te nemen tegen de verzoeting om grote schade aan de flora en fauna te voorkomen.

De fractie van het grondwater dat uitstroomt in de polder is in de eerste 60 jaar van de modelberekening beduidend groter dan die van doorsnedemodel De Putten. Maar waar de fractie voor uitstroom in de polder van doorsnedemodel De Putten rond de 0.58 blijft hangen neemt deze fractie bij doorsnedemodel Abtskolk af van 0.68 tot 0.59 na 60 jaar. De kwelstroom vanuit de zee wordt dus in doorsnede Abtskolk meer gehinderd door de vorming van de zoetwaterbel.

De ijking aan de zoetwaterstijghoogtes voor het doorsnedemodel Abtskolk is lastiger gebleken dan de ijking voor doorsnedemodel De Putten. Het resultaat is minder passend en één van de gekozen parameters onwaarschijnlijker. De weerstand van het polderoppervlak is gekozen op 1200 dagen. Dit is een relatief hoge weerstand voor een polderoppervlak. Toch bleek deze hoge weerstandswaarde benodigd om een betere ijking te verkrijgen voor de eerste paar meter onder het polderoppervlak.

Over het algemeen zou de ijking met de kennis verkregen tijdens het doorlopen van dit project achteraf beter kunnen zijn gedaan. Echter zijn concessies gedaan naar aanleiding van de onzekerheid van de beschikbare data en tijdsdruk. Een ijking kan vrijwel altijd nog beter, het is alleen de vraag of deze kleine verbetering ook daadwerkelijk de modelresultaten betrouwbaarder maakt. Door de onzekerheid van de data is besloten dat de ijking voldoende was wanneer de zoetwaterstijghoogte-lijnen het patroon van de zoetwaterstijghoogtemetingen volgden. Bij doorsnedemodel De Putten is dit erg goed gelukt en worden vrijwel alle zoetwaterstijghoogtemetingen doorkruist door de desbetreffende zoetwaterstijghoogte-lijn. Bij doorsnedemodel Abtskolk worden de zoetwaterstijghoogtemetingen niet letterlijk doorkruist. Maar hier volgen de zoetwaterstijghoogte-lijnen wel het juiste patroon en benaderen ze de zoetwaterstijghoogtemetingen tot enkele centimeters.

In vervolgonderzoek zal de betrouwbaarheid van de metingen verbeteren en zullen meer metingen beschikbaar zijn. Een suggestie voor het uitbreiden van het netwerk van peilbuizen zou zijn om in raai 2, op doorsnede Abtskolk, een extra peilbuis te plaatsen in het stuk duin tussen het duinmeer en de zee. Het is interessant om te zien hoe het grondwater hier beweegt tussen het zoete duinmeer en de zoute zee. Daarnaast is het interessant om nauwer te kijken naar de invloed van de dijk op de grondwaterstroming. Voor de doorsnedemodellen is aangenomen dat de dijk vrijwel volledig ondoorlatend is, een waarde van 0.00001 m/d is aangenomen. De invloed van de dijk is aangenomen tot -5 mNAP. Deze

aanname is gebaseerd op het vermoeden van een dichter grondpakket tot deze diepte om stabiliteit van de dijk te garanderen. Er is bekend dat de grondwaterstand drastisch zakt van het duin naar de polder. Echter is niet bekend hoe het grondwater zich onder het dijklichaam door beweegt. Met een peilbuis dichtbij of in het dijklichaam kan de diepte van de invloed van het dijklichaam op de grondwaterstroming nader worden bekeken. Hiermee worden de voorspellingen voor verzoeting van de polder voornamelijk op de korte termijn betrouwbaarder. Op de korte termijn zoekt de zoete kwel namelijk allereerst een weg onder het dijklichaam door richting het polderoppervlak. De snelheid van het bereiken en uitbreiden van deze zoete kwelstroom hangt dus grotendeels af van de diepte waarover het dijklichaam invloed heeft op de grondwaterstroming.

Gekeken naar de invloed van uitgangspunten aanwezig in de doorsnedemodellen is gebleken dat de polderpeilen veruit het meeste invloed op de zoutvracht naar het polderoppervlak hebben. Een poldervak met een lager gehandhaafd polderpeil in vergelijking tot aangrenzende poldervakken ontvangt meer kwel dan de aangrenzende poldervakken. Deze grotere kwelstroom betekent ook een grotere potentiële verzoeting. Hoe dichter een poldervak bij het duin ligt hoe groter deze verzoeting over tijd is. Dit geeft aan dat de diepere kwelstromen vanuit de zee minder worden verstoord door de verzoeting vanuit het duin. Deze diepere kwelstromen stromen namelijk verder landinwaarts in de polder uit.

De oppervlaktewateren hebben afhankelijk van de locatie op de doorsnede minder of meer ingrijpende effecten op het grondwaterregime. De aanwezigheid van een poldermeer direct naast het duin zorgt op de lange termijn voor een afname van van ongeveer 80 meter waarover de verzoeting de polder in reikt. Het poldermeer trekt echter wel een groter aandeel van de kwel aan waardoor de fractie van het grondwater dat uitstroomt in de polder toeneemt. Het poldermeer direct naast het duin zorgt dus voor minder verzoeting in het achterliggende poldergebied maar ondervindt hierdoor zelf des te meer verzoeting. Bij het duinmeer is het effect op het grondwaterregime erg klein. Het duurt het iets langer voordat de verzoeting door de eerste kleilaag heen komt door de verdamping van een deel van de neerslag in het duinmeer. Op de langere termijn, na ongeveer 50 jaar, heeft dit echter nauwelijks tot geen effect op de vorming van de zoetwaterbel.

De invloed van de middelste kleilaag op de verzoeting van het polderoppervlak is het kleinst van alle toegepaste variaties. Het beginpunt langs de doorsnede van de middelste kleilaag heeft alleen een merkbare invloed op de uiteindelijke diepte van de zoetwaterbel na 100 jaar. Wanneer de middelste kleilaag deels of helemaal ontbreekt onder het duingebied komt de zoetwaterbel iets dieper, ongeveer 0.25 meter. Dit geeft aan dat de middelste kleilaag de diepgang van de zoetwaterbel of tegenhoudt of vertraagt.

De parameters voor de toepassing van de uitgangspunten binnen het basismodel zijn op basis van "expert judgement" gekozen. Deze parameters zijn vooral bedoeld om de effecten van de uitgangspunten ten opzichte van het basismodel te kwantificeren. De absolute waarde van deze parameters moet kritisch beschouwd worden in een vervolgonderzoek.

Om het poldermeer te simuleren is in dit onderzoek de weerstand van de drains ter plaatse van het meer verlaagd naar 0.1 dagen. Hierdoor wordt de grondwateruitstroom hier gemakkelijker. Er is daarnaast gebleken dat de effecten van het poldermeer ook indirect beïnvloed worden door het gehandhaafde polderpeil op deze plek, door het lagere maaiveld bij een meer is over het algemeen het polderpeil ook lager. Hierdoor zal meer kwel in dit deel van de polder uitstromen. Dit polderpeil is dan ook als kenmerk van het meer aangenomen in dit rapport, dit wil zeggen dat bij het weglaten van het poldermeer het polderpeil hier ook is verhoogd. Over de gekozen weerstandswaarde en het toepassen van het polderpeil als kenmerk van het poldermeer is nog onzekerheid. In vervolgonderzoek is het aan te raden nader onderzoek te doen naar welke kenmerken van een poldermeer het grondwaterregime in meer of mindere mate beïnvloeden. Hiermee kan in een volgend model een betere representatie van het poldermeer worden gegeven.

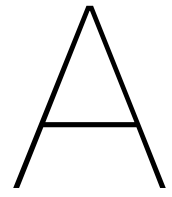
Er is aangenomen dat ter plaatse van het duinmeer het grondwater vrij horizontaal kan stromen omdat het boven het maaiveld uit komt. Daarnaast is een factor van 0.75 op de plaatselijke grondwateraanvulling aangenomen om de extra mogelijkheid tot verdamping te simuleren. Deze laatste factor is niet nader onderzocht en brengt een discussie met zich mee over hoe de waterbalans van het duinmeer werkt. Het zou goed kunnen dat bij een grotere hoeveelheid neerslag in een korte tijd het duinmeer als een reservoir dient voor afstromend water van hoger gelegen delen in het duin. Hiermee zou tijdelijk de grondwateraanvulling in het duinmeer groter zijn dan in de omliggende delen van het duin. Omdat in dit rapport wordt gekeken naar de gemiddelde toestand zijn deze situaties niet meegenomen. In vervolgonderzoek zou hier meer onderzoek aan verricht kunnen worden.

Samengevat kan er geconcludeerd worden dat om ingrijpende gevolgen aan de flora en fauna te voorkomen er binnen 10 jaar vanaf nu, voor 2031, maatregelen tegen de verzoeting vanuit het duin genomen moeten worden. Een mogelijke maatregel is het plaatsen van pompputten op tactische locaties langs de dijk. Één van deze tactische locaties zou bijvoorbeeld tussen het duin en het meer De Putten kunnen zijn, hier wordt namelijk veel zoete kwel verwacht. Met het plaatsen van de pompputten zal indirect het polderpeil op deze locatie dalen door het wegnemen van grondwater. Hierdoor wordt een grotere fractie van de kwelstromen aangetrokken naar dit gebied. Ook kan er langs de dijk meer oppervlaktewater worden aangelegd waarvan het peil laag gehouden wordt. Dit idee is gebaseerd op de aantrekkende kracht van het meer De Putten op de kwelstromen. Het oppervlaktewater met een laag peil zou de zoete kwelstromen voor een groot deel kunnen afvangen, hiermee wordt dit water zelf ook zoet. De werking van dit oppervlaktewater is vergelijkbaar met de werking van de pompputten, echter wordt het zoete grondwater in deze variant op een natuurlijke wijze naar het oppervlak geleid en hier afgevoerd. Een nadeel van deze variant is dat het meer ruimte in beslag neemt en dat het minder controleerbaar is.

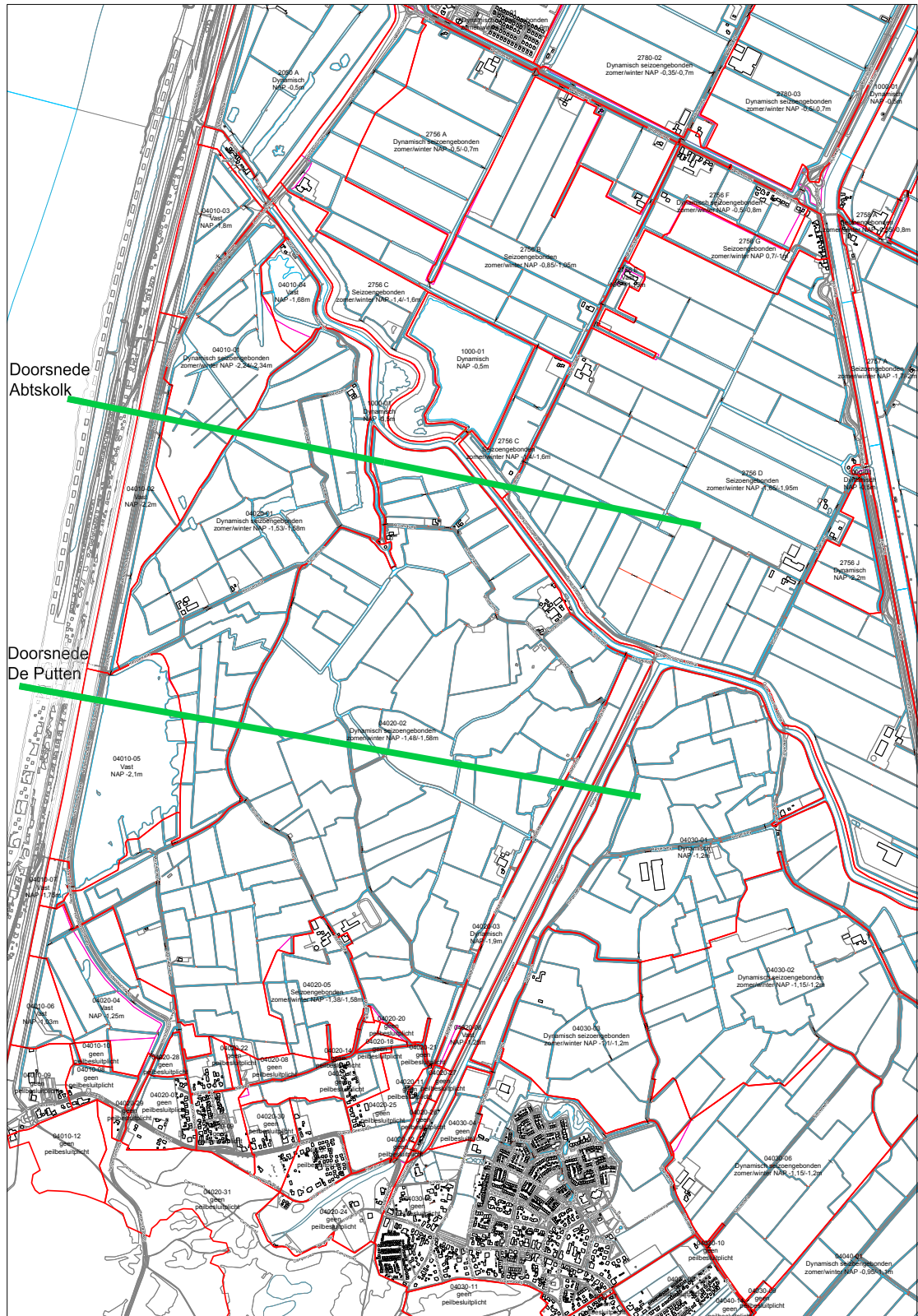
Naar de specifieke werking en effectiviteit van het plaatsen van de pompputten, het aanleggen van extra oppervlaktewater langs de dijk of het toepassen van andere verzoetingsbeperkende maatregelen moet nog meer onderzoek worden gedaan. Een te grote onttrekking van grondwater door middel van pompputten kan ook leiden tot de afvang van zoute kwelstromen naar de achterliggende polders, en dit is ongewenst. Daarnaast is het aan te raden om in een vervolgonderzoek de modellen gepresenteerd in dit rapport om te vormen tot 3D-modellen. Hiermee kan ook het effect van kwelstromen loodrecht op de doorsnede onderzocht worden. Met de uiteindelijke resultaten met betrekking tot de afname van de zoutvracht naar de verschillende delen in de polder en de hiermee voorspelde effecten op de ecologische waarden van het gebied kan een kosten-baten analyse worden uitgevoerd. Hiermee kan een weloverwogen besluit worden genomen over het toekomstige onderhoudsplan van het gebied.

7

Appendices



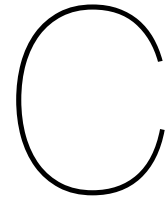
Polderpeilen



Figuur A.1: Polderpeilen projectgebied (HNK)

B

Model resultaten



Toegepaste python pakketten model

C.1. Eindige-differentiemethode

Het model maakt gebruik van de eindige-differentiemethode om de transportvergelijkingen binnen de modeldoorsnede op te lossen. Deze methode maakt gebruik van een netwerk van coördinaten die samen een netwerk van punten binnen de doorsnede vormen. Rond deze coördinaten worden oppervlakten gevormd zodat de interface tussen deze oppervlaktes precies tussen de aangrenzende coördinaten liggen. Voor het oplossen van de transportvergelijkingen zijn verschillende numerieke methoden mogelijk. Via iteratieve berekeningen worden per tijdstap de stijghoogten en concentraties voor elk coördinaat berekend. Deze iteratieve berekeningen gaan door tot de verschillen tussen de antwoorden van de opvolgende berekeningen binnen een vooraf gedefinieerde waarde komen.

Voor dit model wordt er gebruik gemaakt van een 2 dimensionale doorsnede. Dit betekent dat er een netwerk van x-en z-coördinaten langs de oppervlakte van het doorsnedemodel is gedefinieerd. Bij het kiezen van dit netwerk van coördinaten is een afweging tussen nauwkeurigheid en rekenkracht benodigd. Hoe fijner het netwerk van coördinaten is des te meer rekenkracht er nodig is om de vergelijking op te lossen, en dus hoe langer het duurt voordat het model doorgerekend is.

C.1.1. Discretisatie modelgrid

Voor dit model is er gekozen om de afstand tussen de x-coördinaten 10 meter te maken buiten het duingebied +/-10 meter, en 2 meter binnen het duingebied +/-10 meter. De afstand tussen de z-coördinaten wordt gezet op 0.25 meter. Voor de kleinere afstand tussen x-coördinaten in het duingebied is gekozen aangezien hier de grootste transport-input van het model in de vorm van neerslag plaatsvindt. Om de vorming van de zoetwaterbel goed in beeld te krijgen is het daarom wenselijk hier een fijnere x-coördinaat afstand te gebruiken. De kleinere afstand tussen de z-coördinaten komt voort uit het feit dat enkele model-inputs beter tot hun recht komen met een fijnere z-coördinaat afstand.

Voor het model van Abtskolk worden de bovenste z-coördinaten in het duingebied verschoven om drie verschillende lagen in het duin mogelijk te maken. Dit is gewenst omdat er een onderscheid gemaakt moet worden tussen de grondwater regimes van het duinmeer, de zandlaag in het duin en de kleilaag net onder het duin.

C.2. MODFLOW pakketten

MODFLOW bestaat uit verschillende pakketten die ieder een (geo)hydrologisch proces beschrijven. De pakketten die gebruikt zijn in deze modelstudie zijn hieronder toegelicht. MODFLOW wordt gezien als de internationale standaard voor grondwater modellering en modellering van de interactie tussen grond-en oppervlaktewater. Over de jaren heen zijn steeds meer pakketten ontwikkeld met drie verschillende focus gebieden; Discretisatie en indeling, randvoorwaarden en rekenmethoden (solvers). Zo zijn binnen het MODFLOW model steeds meer hydrologische modellering-mogelijkheden gekomen waardoor de modelmethode steeds meer afzet heeft gevonden.

DIS-pakket

De DIS-pakket is het discretisatie pakket welke voor elk MODFLOW model noodzakelijk is. In dit pakket wordt het aantal cellen in x-richting (columns), y-richting (rijen) en z-richting (lagen) bepaald alsmede de grote van deze cellen. Daarnaast wordt de tijds discretisatie van het model bepaald met behulp van het aantal door te rekenen tijdsperiodes en de lengte van deze periodes. Ook kunnen de eenheden met betrekking tot tijd en afstand worden veranderd in dit pakket, voor het model voor dit rapport worden de default eenheden van meter en dagen gebruikt.

BAS-pakket

De BAS-pakket is het basis pakket welke voor elk MODFLOW model noodzakelijk is. In dit pakket wordt voor de in het DIS-pakket gedefinieerde array van cellen bepaald of deze actief of inactief zijn, dit wil zeggen of de cellen meedoen in de stijghoogte berekening van het gehele model of niet (de inactieve cellen kan ook een stijghoogte mee worden gegeven maar deze doet niet mee in de berekening, deze is bedoeld om te voorkomen dat er nan's in de data komen en om deze inactieve data uit de resultaten te filteren). Ook kan een cel aangewezen worden als een actieve cel maar met een vooraf gedefinieerde stijghoogte die niet kan veranderen. Daarnaast kan in dit pakket de initiële stijghoogte voor elke cel worden bepaald van waaruit de berekening voor het gehele model start.

PCG-pakket

Het PCG-pakket voluit is het preconditioned conjugate-gradient pakket. Dit pakket is de meestgebruikte rekenmethode voor MODFLOW modellen, en wordt na testen met andere rekenmethode-pakketten ook het beste geacht voor dit model. Deze rekenmethode is een iteratieve methode en om aan te geven wanneer de iteratie voldoende geacht wordt voor de resultaat van het model dient een waarde opgegeven te worden welke het maximale verschil tussen de twee opeenvolgende iteraties representeert (de standaard waarde hiervoor is 10^{-5} , voor het model van dit rapport wordt een waarde van 10^{-8} genomen).

OC-pakket

Het OC-pakket is het output control option pakket. In dit pakket kan bepaald worden welk deel van de stijghoogte, en budget-data moet worden opgeslagen en op welke manier dit moet worden opgeslagen. Dit pakket is belangrijk omdat het soms niet verstandig is alle resultaten van een model op te slaan omdat dit tijd en ruimte kost, het is daarom goed om te kijken welke data nodig is om de gewenste resultaten te visualiseren.

RCH-pakket

Het RCH-pakket is het recharge pakket. Dit pakket definieert een aanvulling van buiten het model in vooraf bepaalde cellen van het model, over het algemeen vindt deze aanvulling plaats in de bovenste cellen van het model tenzij dit expliciet wordt veranderd in de pakket-code. Over het algemeen wordt dit pakket gebruikt om neerslag op het model te simuleren, variërende neerslag kan zo bijvoorbeeld via een csv-file worden ingeladen in het model.

DRN-pakket

Het DRN-pakket maakt het mogelijk om bepaalde cellen in het model in drain-cellen te transformeren. Deze drain-cellen hebben als eigenschap dat als de stijghoogte in de cel onder een vooraf gedefinieerd niveau komt de flux van deze cel naar andere model-cellen naar nul wordt gezet. Hiermee kan een vast peil goed worden gesimuleerd aangezien er continu een positieve waterafvoer flux in deze cellen is totdat het gewenste peil is bereikt. Voor het model gemaakt voor dit rapport worden deze celtypes gebruikt om het polderpeil in de polder te simuleren.

GHB-pakket

Het GHB-pakket maakt het mogelijk om bepaalde cellen in het model in "general head boundary-cellen te transformeren. In deze cellen is de stijghoogte altijd gelijk aan een vooraf gedefinieerde stijghoogte en wordt de flux van deze cel tot aangrenzende model-cellen bepaald aan hand van de stijghoogte in deze aangrenzende cellen en de vaste stijghoogte van deze GHB-cel. Voor het model gemaakt voor dit rapport worden deze celtypes gebruikt om de zee met het zee-peil te simuleren, er wordt namelijk

aangenomen dat de gemiddelde stijghoogte van de zee in de huidige situatie ongeveer rond 0 meter Normaal Amsterdams Peil (N.A.P.) ligt.

LPF-pakket

Het LPF-pakket is voluit het "Layer Property Flow"pakket. Dit pakket wordt gebruikt om de cellen van het model extra flux-controlerende randvoorwaarden mee te geven zoals de doorlatendheid en wateropslag-capaciteit van de cellen. Ook kan er in dit pakket een onderscheid worden gemaakt tussen de horizontale en verticale doorlatendheid van een cel, hierdoor kan het verschijnsel van anisotropie in het model worden verwerkt. In dit pakket is het ook mogelijk om lagen van het model als onbegrensd te interpreteren, dit wil zeggen dat de stijghoogte onder de top van de model-laag ligt. Voor het model gemaakt voor dit rapport wordt dit niet meegenomen aangezien de stijghoogte in de bovenste laag van dit model op het duin na vast ligt, bovendien is er voor het onbegrensde gedrag in het duin een andere benadering mogelijk beschreven in hoofdstuk 4.1.2.

C.3. MT3DMS pakketten

MT3DMS is het kader voor het modelleren van een transport-model voor verschillende soorten additieven in grondwater. Het model-kader kan advection, dispersie en chemische reacties van deze additieven binnen het MODFLOW model simuleren en doorrekenen en geeft de uiteindelijke concentraties per cel in dit MODFLOW model. Voor het model ontwikkeld voor dit rapport is wordt het zout als enige additief aan het grondwater gezien. In werkelijkheid zijn er meer additieven in het grondwater te vinden maar deze vallen buiten de scope van dit onderzoek en zouden het model onnodig ingewikkelder maken.

BTN-pakket

Het Btn-pakket is basis transport pakket en is essentieel voor alle transport modellen. In dit pakket worden de parameters voor concentratie-uitwisseling tussen de cellen bepaald zoals bijvoorbeeld de porositeit van de grondsoort per individuele cel. Ook worden de beginwaarden van de concentraties per cel aangegeven en wordt per cel bepaald of deze actief of inactief is voor de concentratie-uitwisseling en of de concentratie in de cel kan veranderen over tijd. Daarnaast wordt de tijds-discretisatie van de berekening aan de concentraties gegeven alsmede welke van deze uitgerekenende waardes opgeslagen moeten worden.

ADV-pakket

Het ADV-pakket berekent per additief de veranderingen in concentratie door advection in alle cellen. Verscheidene methodes voor berekening kunnen in dit pakket worden gekozen, en een weloverwogen keuze tussen nauwkeurigheid en rekentijd zal hierin moeten worden gemaakt.

GCG-pakket

Het GCG-pakket is voluit het "Generalized Conjugate Gradient Solver-pakket. Dit pakket berekent de uiteindelijk concentraties per gedefinieerde tijdstip (gedefinieerd in het BTN-pakket) voor de impliciete oplossing van de transport berekening.

SSM-pakket

Het SSM-pakket is voluit het "Sink Source Mixing-pakket. Dit pakket bepaald de concentratie van alle niet generieke cellen (dus in het model voor dit rapport de GHB en DRN cellen) en berekent de uitwisseling van concentratie tussen deze cellen en de andere cellen van het model. Dit wil zeggen dat de array voor het SSM-pakket de informatie voor de concentratieberekening voor alle niet generieke cellen bevat met de initiële concentratie en het type cel.

C.4. SEAWAT pakketten

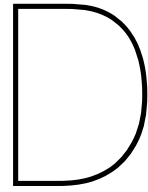
SEAWAT is een groep met pakketten waarmee de MODFLOW en MT3DMS pakketten aan elkaar gelinkt kunnen worden. Om SEAWAT te kunnen gebruiken dient een seawat-executable te worden gedownload. Met SEAWAT, MODFLOW en MT3DMS kan hierna een 3-dimensionaal, dichtheidsafhankelijk, verzadigd grondwatermodel worden geconstrueerd.

SWT-pakket

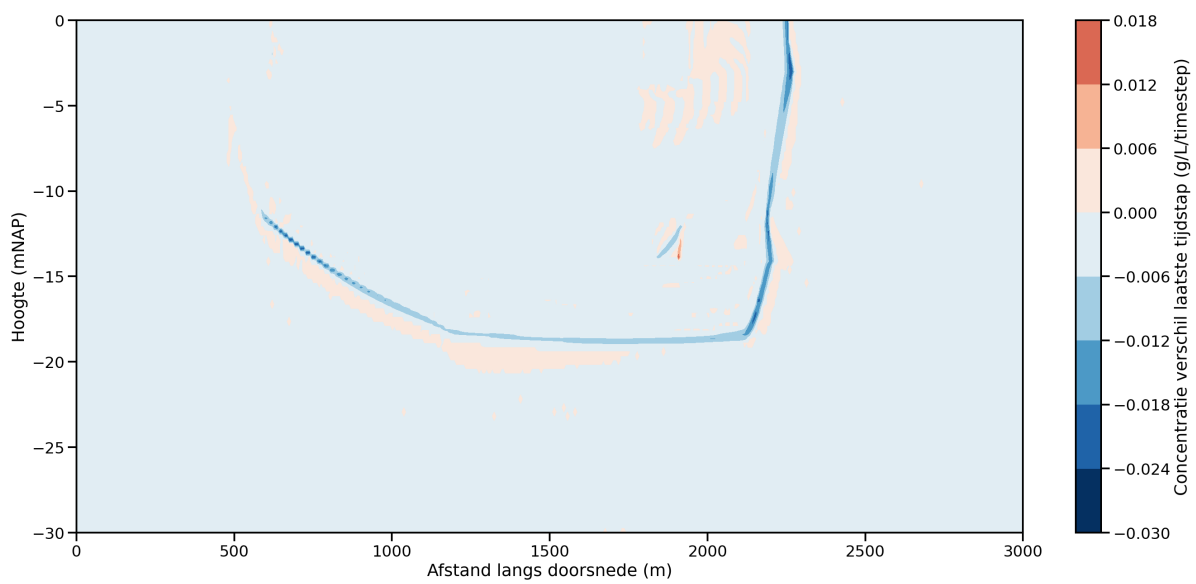
Het SWT-pakket is noodzakelijk voor elk model waarbij gebruik wordt gemaakt van een SEAWAT pakket. In dit pakket wordt de seawat executable ingeladen en wordt een naam gegeven aan het model, ook kan worden aangegeven waar de model data moet worden opgeslagen.

VDF-pakket

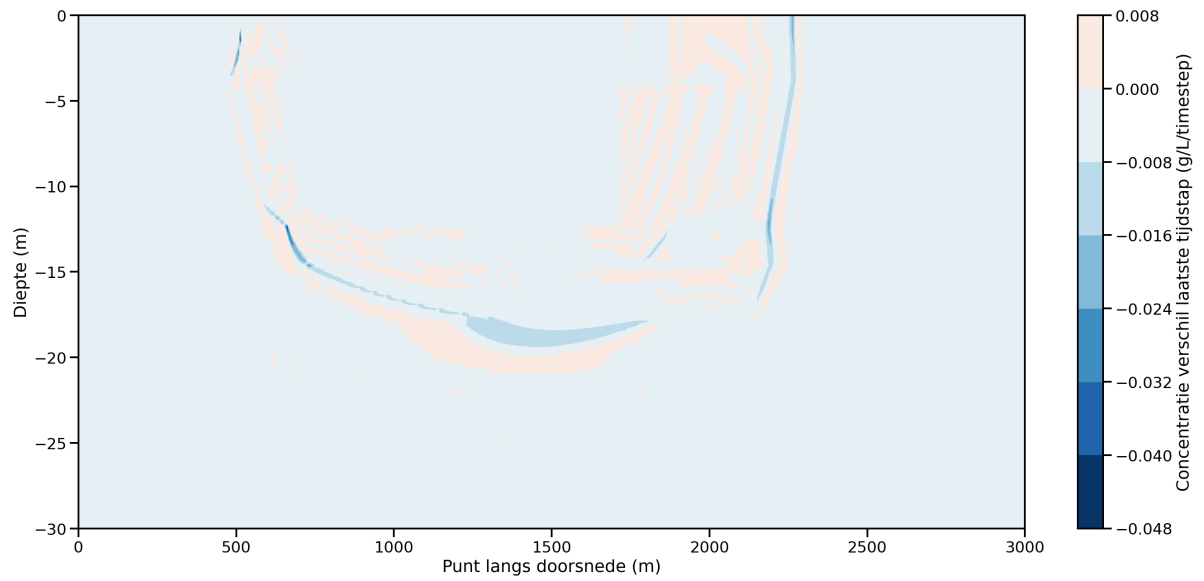
Het VDF-pakket is voluit het "Variable Density Flow-pakket. In dit pakket worden de dichtheden van de verschillende additieven in het grondwater, geïntroduceerd in de MT3DMS pakketten, gegeven. Ook kunnen er waarden voor de maximale, minimale en referentie-dichtheid van het model worden gegeven. Deze referentie-dichtheid is de dichtheid van het grondwater wanneer er geen additieven in aanwezig zouden zijn (voor het model gemaakt voor dit rapport is dit 1000 g/L).



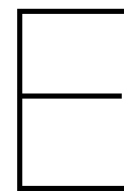
Verandering laatste tijdstap model



Figuur D.1: Concentratie verschil laatste tijdstap model De Putten



Figuur D.2: Concentratie verschil laatste tijdstap model Abtskolk



Filterdieptes

	Peilbuizen								
	PB_1_001			PB_1_002			PB_1_003		
Filter	PB32	PB33	PB34	PB35	PB36	PB37	PB38	PB39	PB40
Top	-21.24	-8.24	-3.24	-3.25	-9.25	-24.25	-2.87	-8.87	-28.87
Bodem	-23.24	-10.24	-4.24	-4.25	-10.25	-26.25	-3.87	-9.87	-30.87

	Peilbuizen					
	PB_1_004			PB_1_005		
Filter	PB56	PB57	PB58	PB59	PB60	PB61
Top	-1.04	-11.24	-21.99	-1.64	-8.64	-22.39
Bodem	-3.04	-13.24	-23.49	-3.64	-10.64	-23.39

Tabel E.1: Filterdieptes peilbuizen doorsnede De Putten (mNAP)

Filter	Peilbuizen								
	PB_2_001			PB_2_002			PB_2_003		
	PB41	PB42	PB43	PB44	PB45	PB46	PB62	PB63	PB64
Top	-1.59	-8.39	-28.39	-1.97	-7.97	-23.97	-1.06	-8.06	-23.06
Bodem	-2.59	-9.39	-29.39	-3.97	-9.97	-25.97	-3.06	-10.06	-24.06

Tabel E.2: Filterdieptes peilbuizen doorsnede Abtskolk (mNAP)

Bibliografie

- C. Smit, W. van Duin, R. Henkens, and P. Slim, *Casus Hondsbossche zeewering; een verkenning van de ecologische effecten van verschillende kustverdedigingsvarianten in de omgeving van de Vereenigde Harger-en Pettemerpolder*, Tech. Rep. (Alterra, 2005).
- T. Ysebaert, J. v. d. Werf, M. Boersema, R. Schrijvershof, J. Stronkhorst, L. d. Vet, A. O. Debrot, and T. Bouma, *T-0 Rapportage Roggenplaat Suppletie*, Tech. Rep. (CENTRE OF EXPERTISE DELTA TECHNOLOGY, 2016).
- Wageningen University, "Zandsuppleties (wadden)," website, <https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksprojecten-LNV/Expertisegebieden/kennisonline/Zandsuppleties-Wadden.htm>.
- J. Wijsman and E. Verduin, *T-0 monitoring Zandmotor. Delflandse kust: benthos ondiepe kustzone en natte strand*, Tech. Rep. (IMARES Wageningen UR, 2011).
- A. J. Smith and J. V. Turner, *Hydrological Processes* **15**, 2595 (2001).
- B. M. Giambastiani, M. Antonellini, G. H. O. Essink, and R. J. Stuurman, *Journal of Hydrology* **340**, 91 (2007).
- A. Paldor, E. Shalev, O. Katz, and E. Aharonov, *Hydrogeology Journal* **27**, 1611 (2019).
- Rijkswaterstaat, "Kustonderhoud," <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/kustonderhoud>. Geraadpleegd op 12-07-2020.
- Ecoshape, "Hondsbossche duinen," <https://www.ecoshape.org/nl/projecten/hondsbossche-en-pettemer-zeewering/>. Geraadpleefd op 12-07-2020.
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, "Abtskolk & de putten," <https://www.natura2000.nl/gebieden/noord-holland/abtskolk-de-putten>. Geraadpleefd op 12-07-2020.
- K. Groen, J. Oosterwijk, and J. Velstra, *Referentiemeting Hondsbossche zeewering*, Tech. Rep. (Alterra, 2005).
- Vrije Universiteit Amsterdam en Acacia Water, *Kustverbreding Hondsbossche Zeewering: hydrologische referentiesituatie, verwachte binnendijkse verzoeting en mitigerende maatregelen*, Tech. Rep. (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 2015).
- M. Groot, "Natura-2000 abtskolk de putten," (a).
- Provincie Noord-Holland, "Beheerplan natura 2000 abtskolk de putten," Beheerplan (2015).
- M. Groot, "Over het gebied," (b), <https://www.natuurmonumenten.nl/natuurgebieden/harger-en-pettemerpolder>. Geraadpleegd op 10-07-2020.
- A. Fortuin, Neerslag (2010).
- Acacia Water, *Geofysica metingen HBZW*, Tech. Rep. (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 2017).
- Haitjema B.V., "Verdeling van zoet, brak en zout grondwater nabij de hondbosscheweg, schoolr," Boorgatmeting (2015), onderzoek gedaan voor Deltares.
- V. Post, H. Kooi, and C. Simmons, *Ground water* **45**, 664 (2007).
- grondwaterformules.nl, "doorlatendheid k," Website (2020).