

Technische onderbouwing van de Aanvulling Handreiking beoordeling herinrichting diepe plassen

Fase 1: Nabij een rivier gelegen diepe plassen



enabling delta life

Technische onderbouwing van de Aanvulling Handreiking beoordeling herinrichting diepe plassen

Fase 1: Nabij een rivier gelegen diepe plassen

Auteur(s)

Toine Vergroesen

Tess op den Kelder

Wim de Lange

Technische onderbouwing van de Aanvulling Handreiking beoordeling herinrichting diepe plassen

Fase 1: Nabij een rivier gelegen diepe plassen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Elmert de Boer
Referenties	Vergroesen, A.J.J., T. op den Kelder, de Lange W.J., 2020. Technische onderbouwing van de Aanvulling Handreiking beoordeling herinrichting diepe plassen. Fase 1: Nabij een rivier gelegen diepe plassen. Deltares rapport 11205055-000-BGS-0009.
Trefwoorden	Generieke methode, grondwater, diepe plassen, PFAS

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	02-06-2020
Projectnummer	11205055-000
Document ID	11205055-000-BGS-0009
Pagina's	74
Status	definitief

Auteur(s)

	Toine Vergroesen	
	Tess op den Kelder	
	Wim de Lange	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Toine Vergroesen	Timo Kroon	Otto de Keizer	

Voorwoord

Door de dynamiek rond PFAS is toepassing van grond en bagger voor herinrichting, lees gedeeltelijke opvulling, van diepe plassen onder druk komen te staan. De strengere normstelling vraagt om beter te kijken naar de mogelijkheid om "hydrologische isolatie" in te zetten bij vergunningverlening. Daarvoor wordt een aanvulling gemaakt op de bestaande "Handreiking geohydrologische beoordeling bij herinrichting van diepe plassen (Deltares, 2011)". Doel daarvan is om helder te krijgen in welke situaties de beoordeling op basis van een eenvoudig grondwatermodel kan leiden tot goedkeuring dan wel tot afkeuring en in welke situaties meer gedetailleerd onderzoek nodig is.

Bij de beoordeling van milieueffecten bij herinrichting van diepe plassen wordt onderscheid gemaakt tussen plassen die onder invloed staan van een rivier en plassen die door hun grote afstand tot rivieren niet door rivierstanden worden beïnvloed. Het voorliggende rapport behandelt uitsluitend de plassen die onder directe invloed staan van een doorgaans grote rivier waarin sterke fluctuaties van waterstanden en grondwaterstromingen voorkomen. Het raamwerk voor de milieutechnische beoordeling van plassen op grote afstand van rivieren zal worden behandeld in een nog te verschijnen rapport.

Voorliggend rapport beschrijft de hydrologische toetsing van de methode voor milieutechnische beoordeling die voorafgaat aan een vergunning voor het herinrichten van een diepe plas in de nabijheid van een rivier, zoals die is beschreven in de rapportage Aanvulling Handreiking geohydrologische beoordeling bij herinrichting van diepe plassen (Deltares, juni 2020). De beoordelingsmethode wordt getoetst door middel van een groot aantal modelsimulaties, waaruit vervolgens wordt afgeleid in welke situaties deze methode als toereikend mag worden beschouwd.

De toetst is uitgevoerd aan de hand van een concrete situatie, de plas Koornwaard, gelegen ten noorden van Den Bosch langs de zuidoever van de Maas en daarmee in open verbinding staand. Voor deze plas loopt momenteel een vergunningaanvraag voor herinrichting. Deze plas dient tevens als praktijk case om de praktische uitvoerbaarheid van de beoordelingsmethode te toetsen.

Naast de actuele situatie voor de plas Koornwaard zijn met dit model ook diverse fictieve situaties onderzocht. Het betreft situaties die elders in Nederland kunnen voorkomen. De onderzochte scenario's zijn situaties met structureel hogere en structureel lagere waterpeilen van de rivier, zowel voor een aangekoppelde plas als voor een van de rivier losgekoppelde plas.

De aanvulling op de bestaande handreiking is een document dat voor iedereen toegankelijk is. Voorliggende rapportage van de hydrologische toets is een document dat specifiek voor Rijkswaterstaat gemaakt is en alleen via Rijkswaterstaat verder verspreid mag worden.

Inhoud

	Voorwoord	4
1	Inleiding	7
1.1	Probleemstelling	7
1.2	Plas typen en hydrologische situaties	7
1.3	Leeswijzer	9
2	Situatieschets	10
3	Grondwatermodel	12
3.1	Maatgevende situaties	14
3.1.1	Hoogwatersituatie 1 (januari 2011)	14
3.1.2	Hoogwatersituatie 2 (december 2017 – februari 2018)	15
3.2	Principe aanpak met het grondwatermodel	16
3.3	Technische modellering van de plas	17
3.4	Verkennde berekeningen met een versimpeld model	19
3.4.1	Hoogwatersituatie 1	20
3.4.2	Hoogwatersituatie 2	22
3.4.3	Conclusie	25
4	Resultaten grondwatermodel aangekoppelde plas	26
4.1	Simulaties voor de aangekoppelde plas met actuele rivierwaterstanden	27
4.1.1	Stroombanen van waterdeeltjes die direct onder de plasvulling starten	27
4.1.2	Stroombanen van waterdeeltjes die onder de rand van de plas starten	28
4.1.3	Stroombanen van waterdeeltjes die starten op 100 m buiten de plas	28
4.1.4	Samenvatting	30
4.2	Aangekoppelde plas met verlaagde rivierwaterstanden	30
4.3	Aangekoppelde plas met verhoogde rivierwaterstanden	31
4.3.1	Stroombanen van waterdeeltjes die direct onder de plasvulling starten	33
4.3.2	Stroombanen van waterdeeltjes die onder de rand van de plas starten	35
4.3.3	Stroombanen van waterdeeltjes die starten op 100 m buiten de plas	36
4.3.4	Samenvatting	38
4.4	Conclusie aangekoppelde plassen	38
5	Resultaten grondwatermodel losgekoppelde plas	40
5.1	Modelaanpassing	41
5.2	Simulaties voor de losgekoppelde plas met actuele rivierwaterstanden	43
5.3	Losgekoppelde plas met verlaagde rivierwaterstanden	44
5.4	Losgekoppelde plas met verhoogde rivierwaterstanden	46
5.5	Conclusie losgekoppelde plassen	48
6	Onderbouwing tot methode “omhullend vlak”	49
7	Referenties	52
A	Resultaten stroombaanberekeningen aangekoppelde plas	53
A.1	Stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018	53
A.2	Stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar	56

A.3	Stroombanen startend onder de plas rand voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018	59
A.4	Stroombanen startend onder de plas rand voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar	61
A.5	Stationaire stroombanen startend 100 m buiten de plas rand voor de gemiddelde situatie	64
B	Resultaten stroombaanberekeningen losgekoppelde plas	72
B.1	Stationaire stroombanen startend 100 m buiten de plas rand voor de gemiddelde situatie van een losgekoppelde plas	72

1 Inleiding

Door de dynamiek rond PFAS is toepassing van grond en bagger voor herinrichting, lees gedeeltelijke opvulling, van diepe plassen onder druk komen te staan. De strengere normstelling vraagt om beter te kijken naar de mogelijkheid om "hydrologische isolatie" in te zetten bij vergunningverlening. Daarvoor is een aanvulling gemaakt op de bestaande "Handreiking geohydrologische beoordeling bij herinrichting van diepe plassen (Deltares, 2011)". De aanvulling is beschreven in de rapportage "Aanvulling Handreiking geohydrologische beoordeling bij herinrichting van diepe plassen (Deltares, juni 2020)". Doel van deze aanvulling is om helder te krijgen in welke situaties de beoordeling op basis van een eenvoudig grondwatermodel kan leiden tot goedkeuring dan wel tot afkeuring en in welke situaties meer gedetailleerd onderzoek nodig is. Voorliggend rapport beschrijft de hydrologische toetsing van de beoordelingsmethode, die in voornoemde aanvulling is beschreven.

1.1 Probleemstelling

Plassen in open verbinding met een rivier hebben een peil dat onafhankelijk is van de grondwaterstand. Dit veroorzaakt sterkere uitwisseling tussen plas en grondwater dan bij plassen op grotere afstand van een rivier, waarvan het peil vooral door de grondwaterstand wordt beïnvloed. Herinrichting van een diepe plas gaat meestal gepaard met gedeeltelijke opvulling van de plas. Na herinrichting kunnen door neer- en zijwaartse stroming uit de plas milieu-toxische stoffen die in de nieuw ingebrachte opvulling aanwezig zijn via het grondwater verspreid worden. Volgens de Handreiking (Deltares, 2011) dienen de stoffen die zo in het grondwater terecht komen uiteindelijk nabij de bron te blijven of af te stromen met de rivier, waarmee verspreiding en accumulatie in het grondwater wordt voorkomen.

De Aanvulling Handreiking (Deltares, juni 2020) onderzoekt de voorwaarden en omstandigheden waaronder de herinrichting van een diepe plas nabij een rivier aan deze eis voldoet, en in welke situaties dit met een eenvoudig grondwatermodel afdoende kan worden aangetoond. Het uitgangspunt is om hydrologische isolatie aan te tonen, door hydrologisch te bewijzen dat er een ruimtelijke ondergrondse omhulling rond de plas bestaat waar het water dat via de plasbodem infiltreert nimmer buiten kan treden. Voorliggend rapport geeft aan onder welke omstandigheden dit bewijs te leveren is en wat de voorwaarden zijn waaronder een eenvoudig grondwatermodel hiervoor als afdoende gereedschap mag worden gekwalificeerd.

1.2 Plas typen en hydrologische situaties

Diepe nabij rivieren gelegen plassen zijn te verdelen in 2 hoofdtypen:

- Aangekoppelde plassen: plassen langs de rivier, verbonden met de rivier
- Losgekoppelde plassen: plassen langs de rivier, geïsoleerd van de rivier

Deze typen kunnen nader worden verdeeld op basis van de volgende relaties met het grondwater:

- A. Rivier en aangekoppelde plas zijn drainerend (evt. hoogwater periodes uitgezonderd)
- B. Rivier en aangekoppelde plas zijn infiltrerend (evt. laagwater periodes uitgezonderd)
- C. Plas (en evt. ook rivier) zijn door een aanwezig grondwaterverhang aan één zijde drainerend en aan de andere zijde infiltrerend (evt. extreme waterstanden uitgezonderd)

N.B. Losgekoppelde plassen vallen meestal in type c.

In voorliggende rapportage wordt een generieke beoordelingsmethode getoetst, die toepasbaar is in alle genoemde situaties. Hierdoor is het niet noodzakelijk om de actuele situatie op voorhand te kennen.

De beoordelingsmethode wordt getoetst aan de hand van een werkelijke situatie, in dit geval voor de aan de Maas aangekoppelde plas Koornwaard bij Empel, hoofdtype 1 met hydrologische situatie a (combinatie 1a). Daarbij wordt met een grondwatermodel dat deze situatie beschrijft een recente periode van 10 jaar doorgerekend (lopend van 1 april 2008 tot 31 maart 2018). Aansluitend worden door aanpassingen van enkele modelparameters met hetzelfde grondwatermodel fictieve situaties nagebootst om de andere combinaties van hoofdtypen en hydrologische situaties te kunnen toetsen. In dit document worden de resultaten van het toetsen van de beoordelingsmethode beschreven. Het document dient als hydrologische onderbouwing van de aanvulling op de handreiking.

Kanttekeningen bij drainerende rivieren

Een vraag die altijd gesteld moet worden bij een dergelijke analyse is: “Kunnen zich ook in geval van gemiddelde drainerende rivier met aangesloten of nabije plas omstandigheden voordoen, waarbij uit de plasvulling geloogde stoffen zich in het grondwater verspreiden?”.

De eerste gedachte bij een drainerende rivier met aangesloten of nabije plas is dat er permanent grondwater vanuit het achterland naar de plas en rivier stroomt en daarom uiteindelijk altijd met het rivierwater al dan niet via de plas zal worden afgevoerd, zodat geen verspreiding naar het grondwater kan optreden van stoffen die in de plasvulling aanwezig zijn. Het is echter van belang om na te gaan of er wellicht omstandigheden zijn, waarin een dergelijke verspreiding toch mogelijk is. Hieronder worden enkele van zulke situaties geschetst, zonder dat daarbij specifieke plassen in beschouwing worden genomen.

- De drainerende plas impliceert dat oplosbare stoffen uit de plasvulling in de plas terechtkomen, zeker, wanneer de opvulling redelijk doorlatend is, zoals voor midden en hoog Nederland wordt verwacht. Gedurende een hoogwaterperiode zal de stroming omkeren en infiltreert water uit de plas naar het grondwater, waarbij het de stoffen meeneemt die zich tevoren in het plaswater bevonden. De verspreiding van deze stoffen loopt dan niet zozeer via de plasbodem, maar door infiltratie van plaswater. Dat treedt vooral op via de randen van de plas, die zeer doorlatend zullen zijn omdat zich daar minder of zelfs geen plasvulling bevindt. De verspreiding van dit grondwater richting achterland kan dan relatief snel gaan, en kan ertoe leiden dat dit grondwater met de daarin opgeloste stoffen in omgevende waterlopen opkwelt, wordt meegevoerd en wellicht elders weer infiltreert, mogelijk na afloop van de hoogwaterperiode.
- Andere complexe situaties kunnen zich voordoen in een gebied tussen twee rivieren, waarbij de rivierpeilen onafhankelijk van elkaar in de tijd variëren, zoals de Waal naast de Maas, met eventueel de Linge daar nog tussen. In zo'n gebied kan de drainage omslaan in kwel en omgekeerd afhankelijk zijn van de actuele waterstanden in beide rivieren. Zulke peilverschillen zijn dan minimaal een jaarlijks fenomeen. Veranderingen in het peilregime van de rivieren onder klimaatverandering kunnen peilverschillen tussen rivieren vergroten en in de tijd oprekken.
- Mocht bij zeer lage afvoer brak en zelfs zout water de rivier opdringen en een aangekoppelde plas binnendringen, dan zal dit zoute water kunnen infiltreren en zich verspreiden, zelfs in een drainerende situatie. Deze infiltratie is dan beperkt tot het diepste deel van de plas en kan zo via de plasvulling stoffen in het grondwater brengen die niet meer door zoet water kunnen uitgespoeld. Deze situatie is uiteraard erg theoretisch en zal in midden en hoog Nederland (voorlopig) niet voorkomen. Ook zou men bedacht moeten zijn op de mogelijkheid van dichtheidsstroming wanneer het materiaal van de plasvulling vloeistoffen zou kunnen bevatten met een hogere dichtheid dan zoet water, zoals DNAPLS, dan wel zouden die door oplossing in water tot een hogere dichtheid zouden leiden. Dichtheidsstroming laat zich niet vangen met een grondwatermodel dat zich baseert op zoet water. Dit aspect wordt ondervangen door eisen te stellen aan de mate van verontreiniging van de in te brengen grond.

- De grondwaterstroom naar plas en rivier is niet overal even krachtig. Die is afhankelijk van de hoeveelheid water die per strekkende kilometer richting rivier wordt aangevoerd. Deze hoeveelheid is afhankelijk van het waterbeheer verder van de rivier, zoals de hoeveelheid en de hoogte van de waterlopen en drainagesystemen en van de afstand tot de waterscheiding. De afstand tussen rivierarmen is hier van invloed. De afvoer kan zeer variabel zijn in een gebied dat zich tussen een gletsjerrivier en een regenrivier bevindt, zoals de Waal en de Maas. De hoeveelheid af te voeren grondwater bepaalt in sterke mate bij welk rivierpeil de drainage omslaat in infiltratie, en daarmee ook de duur van de infiltratie gedurende hoogwaterepisoden.
- De grondwaterstroom naar de plas hangt uiteraard af van de plek langs de rivier. Hoe westelijker gelegen, hoe minder deze zal zijn. Stroomt de rivier eenmaal door laagland geflankeerd door polders, dan is nog slechts sprake van infiltratie van rivierwater.
- Een volgend aspect dat een rol kan spelen is naburige irrigatie of beregening. Deze zal geconcentreerd zijn in perioden met lage rivierafvoer en lage grondwaterafvoer en grondwaterstanden. Deze irrigatie kan via de daaraan gekoppelde verlaging van de grondwaterstanden water uit plas via het grondwatersysteem aantrekken en dan stoffen uit de plasvulling via het irrigatiewater in het milieu verspreiden.
- Tenslotte kan in de nabije of wijdere omgeving sprake zijn van grondwaterwinning voor de drinkwatervoorziening. Wanneer deze ondiep plaats vindt, wat nauwelijks voorkomt, dan is zij vergelijkbaar met winning voor irrigatie en beregening. Veelal vindt grondwaterwinning plaats vanuit diepere watervoerende pakketten. Dit kan tot gevolg hebben dat de stroming van het grondwater door de scheidende laag onder de plas en rivier neerwaarts is in plaats van opwaarts, ook al draineert het ondiepe pakket. Het is dan niet a priori uitgesloten dat stoffen uit de plasvulling in het diepere watervoerend pakket terecht kunnen komen.

Het valt dus niet zonder meer te zeggen dat een rivier die gemiddeld draineert een absolute garantie is dan nimmer stoffen uit een plasvulling in het grondwater kunnen raken en zich daarin verspreiden; men zal altijd de totale hydrologische situatie in ogenschouw moeten nemen en de risico's die zich daarin kunnen voordoen benoemen, analyseren en wegen voordat men met een eenvoudige benadering kan volstaan die gebaseerd is op een stationair gemiddeld stromingsbeeld.

Om voorafgaand aan de modellering enig gevoel te krijgen voor het effect van een hoogwatergolf op de verspreiding van tijdelijk uittredend grondwater zijn met een versimpeld model enkele verkennende berekeningen uitgevoerd aan twee hoogwatersituaties, zoals die in de Maas bij Empel zijn opgetreden gedurende de rekenperiode lopend van 1 april 2008 tot 31 maart 2018.

1.3 Leeswijzer

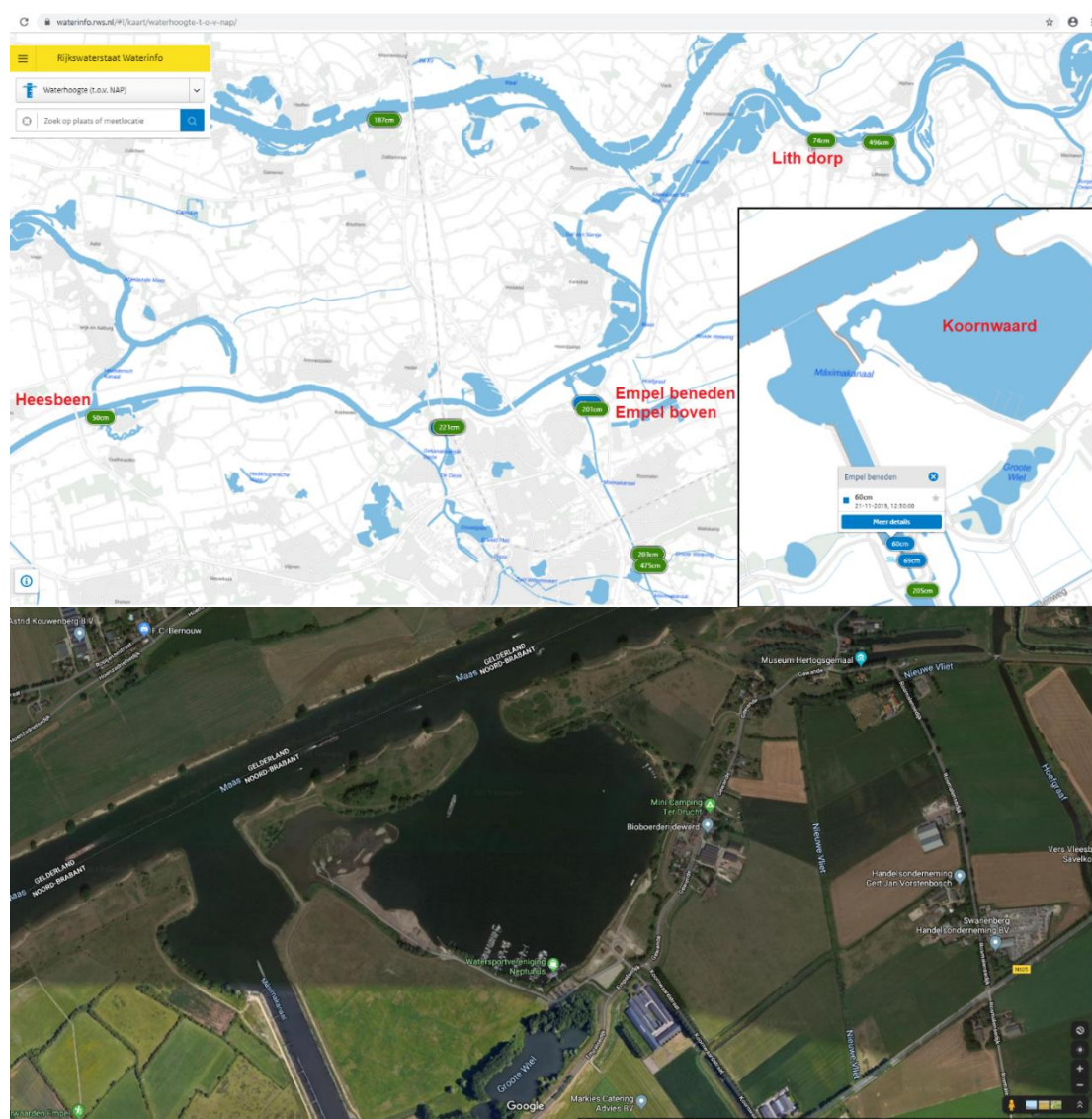
Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de beschouwde situatie. Hoofdstuk 3 behandelt het gebruikte grondwatermodel en beschrijft de verkennende berekeningen met het versimpelde model aan hoogwatergolven. Hoofdstuk 4 analyseert de berekeningsresultaten van hoofdtype 1, aangekoppelde plassen. Hoofdstuk 5 doet hetzelfde voor hoofdtype 2, losgekoppelde plassen. Hoofdstuk 6 analyseert de berekeningsresultaten in het licht van de vraagstelling, het aantonen van een permanente hydrologische omhulling (isolatie) van de plas. Bijlagen A, respectievelijk bijlage B, achterin dit rapport, bevatten alle rekenresultaten voor beide hoofdtypen.

2 Situatieschets

De testen worden uitgevoerd voor de plas Koornwaard. De redenen dat deze plas is gekozen zijn:

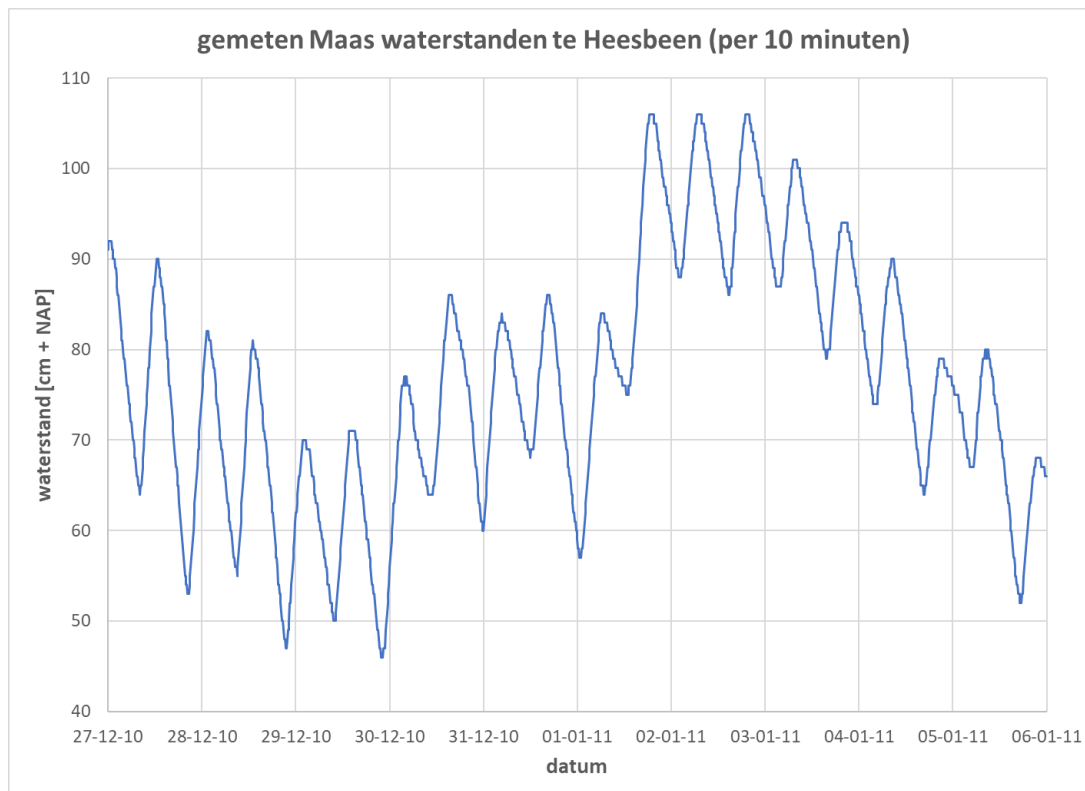
- Een gelijktijdig lopende vergunningaanvraag voor het herinrichten van deze plas is met veel detailinformatie beschikbaar. Hierdoor kan de beoordelingsmethode in de aanvulling op de handreiking direct in praktijk getoetst worden.
- De situatie ter plekke is een veel voorkomende situatie van aan rivier aangetakte plassen.
- De actuele situatie is in het grondwatermodel eenvoudig om te zetten in andere situaties die ook voorkomen bij diepe plassen langs Nederlandse rivieren.

De plas Koornwaard ligt langs de zuidoever van de Maas een paar km ten noordnoordoosten van Den Bosch. De plas is verbonden met de rivier, die het grootste deel van de tijd drainerend is (hoofdtype 1, hydrologische situatie a). Figuur 1 geeft een overzicht van de situatie bij de plas Koornwaard.



Figuur 1 Overzicht van de situatie bij Koornwaard

De plas ligt stroomafwaarts van de stuw bij Lith. Dit pand van de Maas staat in open verbinding met zee en is onder invloed van dagelijkse getij schommelingen, die ter plekke van de plas nog enkele decimeters bedragen (Figuur 2). In het gebruikte model is gerekend met een tijdstap van 1 dag en is voor elke dag de gemiddelde waterstand van die dag gehanteerd als rivierwaterstand. De verwachting is dat het effect van deze beperkte getijbeweging op de grondwaterstroming rond de plas verwaarloosbaar is. Wel van belang is dat onder invloed van deze getijbeweging het water van de plas relatief snel verversd zal worden door instromend rivierwater en uitstromend plas water.



Figuur 2 Getij invloed op de waterstanden in de Maas bij Heesbeen (dubbeldaags)

Een paar honderd meter stroomafwaarts komt het Maximakanaal in de Maas uit. Dit kanaal, officieel geopend in 2015, is voor het toetsen van de beoordelingsmethode niet belangrijk en is daarom niet in het model opgenomen. Omdat we het model ook niet-stationair gebruiken, zou onevenredig veel tijd kosten om dit kanaal alsnog mee te nemen, vooral omdat dit dan gedurende de rekenperiode stapsgewijs in het model zou moeten worden ingebracht. De huidige waterpeilen in dit kanaal komen overeen met de historisch gehanteerde waterpeilen in de omgeving van dit kanaal, waardoor het effect van dit kanaal op de grondwaterstroming in de directe omgeving van de plas relatief beperkt zal zijn.

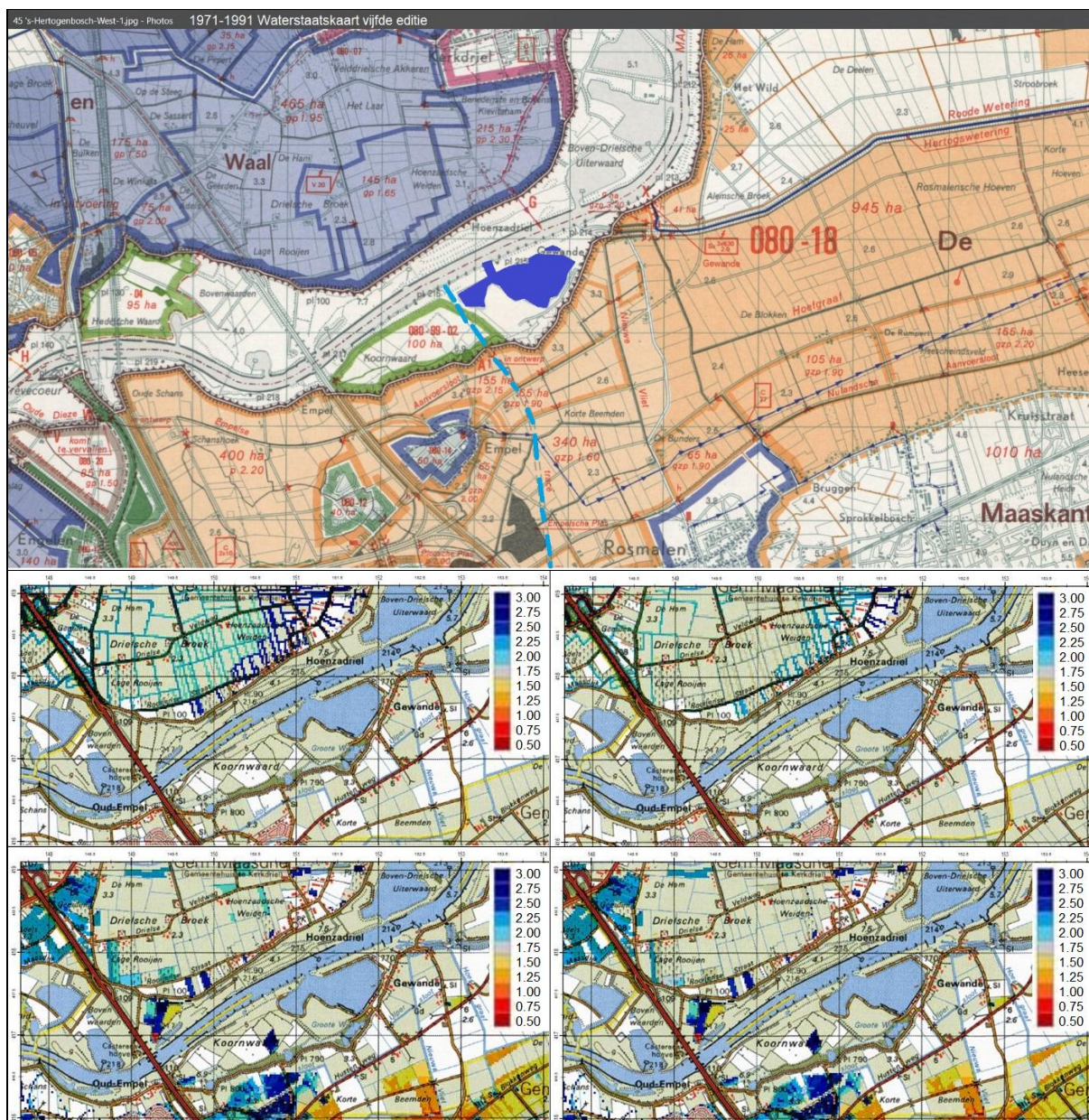
Voor een concrete aanvraag moet het gebruikte model de hydrologische omstandigheden volledig meenemen, dus inclusief kanaal.

3 Grondwatermodel

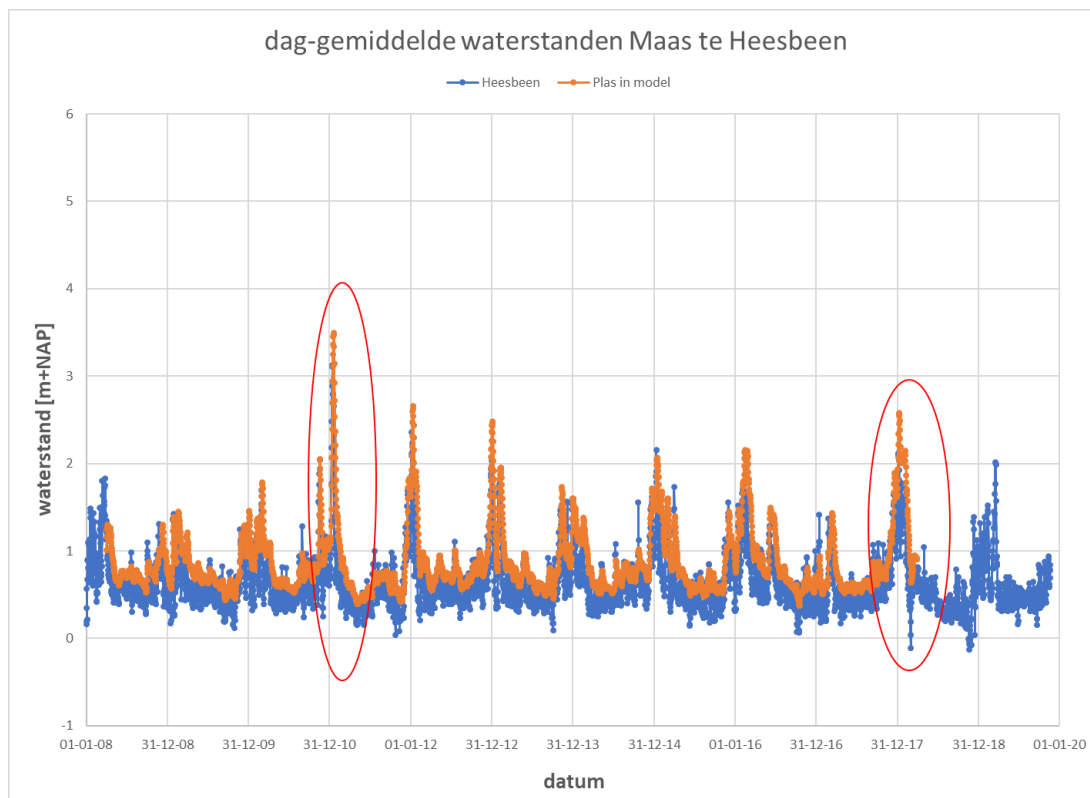
Om de hydrologische isolatie aan te tonen is met het oog op de dynamiek van de rivier een regionaal niet-stationair grondwatermodel onontbeerlijk. Voor het gebied rond de beschouwde plas is een dergelijk model reeds voorhanden (MORIA model, versie 4.5). Dit grondwatermodel is beschikbaar voor een recente periode van 10 jaar, lopend van 1 april 2008 tot 31 maart 2018. De gehanteerde tijdstapgrootte in het model bedraagt 1 dag.

Het model is gecheckt op rivierwaterstanden. Daarbij is de modelinvoer vergeleken met gemeten waterstanden te Heesbeen, dat ongeveer 15 km stroomafwaarts ligt. De in het model gehanteerde rivierwaterstanden ter plekke van de plas liggen gemiddeld enkele decimeters hoger en verlopen vloeiender dan de gemeten Maas waterstanden bij Heesbeen (Figuur 4, Figuur 5 en Figuur 6). Enerzijds wordt dit verschil veroorzaakt doordat de plas 15 km stroomopwaarts van het meetpunt ligt. Anderzijds is dat voor het onderzoeken van een generieke methode van aanpak niet wezenlijk van belang.

De gemiddelde waterstand van de plas in het model is iets lager dan NAP +0.9 m (Figuur 4), de mediaan ligt rond NAP +0.75 m. De gehanteerde drainage niveaus in de omliggende gebieden aan weerszijden van plas en rivier zijn beduidend hoger, orde ruim 1 meter (Figuur 3, midden en onder). Een oude waterstaatskaart (Figuur 3, boven) bevestigt dat. Dat duidt erop dat de plas en de rivier, met uitzondering van hoogwaterperiode op de rivier, grondwater aantrekken uit de omgeving.



Figuur 3 Overzicht waterpeilen omgeving. Boven: oude waterstaatskaart (opname 1985), met de destijds gehanteerde peilen in de gebieden aan weerszijden van de Maas. De blauwe vlek in het midden accentueert de locatie van de plas. Midden: een topografische kaart van voor de aanleg van het Maxima kanaal (datum onbekend) met daarop in kleur de gehanteerde zomer- en winterpeilen in de modelwatergangen. Onder: idem, met de gehanteerde zomer- en winterpeilen in de gemodelleerde gebiedsdrainage.



Figuur 4 Overzicht van de opgetreden daggemiddelde waarden van de waterstand (blauw is Maas te Heesbeen, oranje is de gehanteerde waterstand in het model). De twee rode ellipsen geven de nader beschouwde hoogwaterperioden aan.

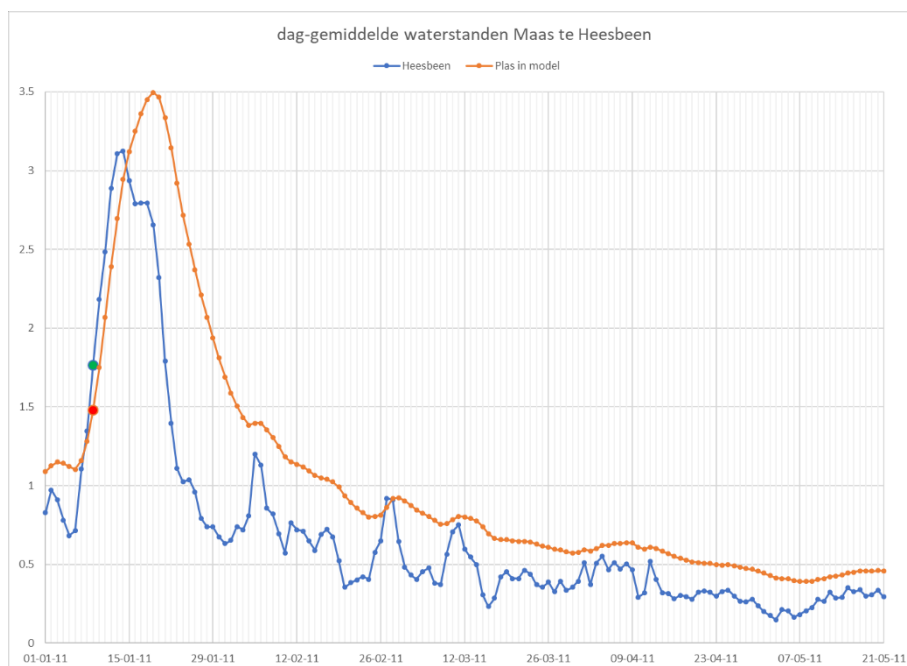
3.1 Maatgevende situaties

Gemiddeld draineren de plas Koornwaard en de Maas ter plekke het grondwater. Alleen bij hoge waterstanden op de Maas kan water via de plasbodem naar het grondwater infiltreren en daarin achterblijven en verspreiden. De ellipsen in Figuur 4 geven de twee hoogwaterperioden aan, die maatgevend zijn voor de beschouwde periode van 10 jaar. Hoogwaterperiode 1 heeft de hoogste waterstanden, hoogwaterperiode 2 heeft de langste duur.

1. Periode startend 9 januari 2011:
 - a) 2 à 3 weken lang een situatie met infiltratie in de plas
 - b) Hoogste gemeten waterstanden, dus grootste potentiële infiltratie
2. Periode startend 17 december 2017:
 - a) 2 maanden lang een situatie met infiltratie in de plas
 - b) Langste hoogwaterperiode, dus grootste potentiële verspreiding

3.1.1 Hoogwatersituatie 1 (januari 2011)

Figuur 5 toont de waterstanden in de plas gedurende deze hoogwaterperiode. De dikke rode punt in de figuur geeft het begin van de periode aan dat de plas in het model infiltreert, de groene punt geeft het gemiddelde aan van de gemeten waterstanden van die dag bij de Maas te Heesbeen. Voor een directe vergelijking moeten de gemeten waterstanden van het 15 km stroomafwaarts gelegen Heesbeen met ca. 25 cm worden verhoogd om die bij Koornwaard weer te geven. Gedurende deze hoogwaterperiode was de waterstand in de Maas twee weken lang hoger dan het grondwater nabij de plas. Door de korte duur van deze episode en de geringe stroomsnelheid van het grondwater ter plekke (enkele cm per dag) blijft de indringing van geïnfilterd water beperkt tot hooguit enkele meters.

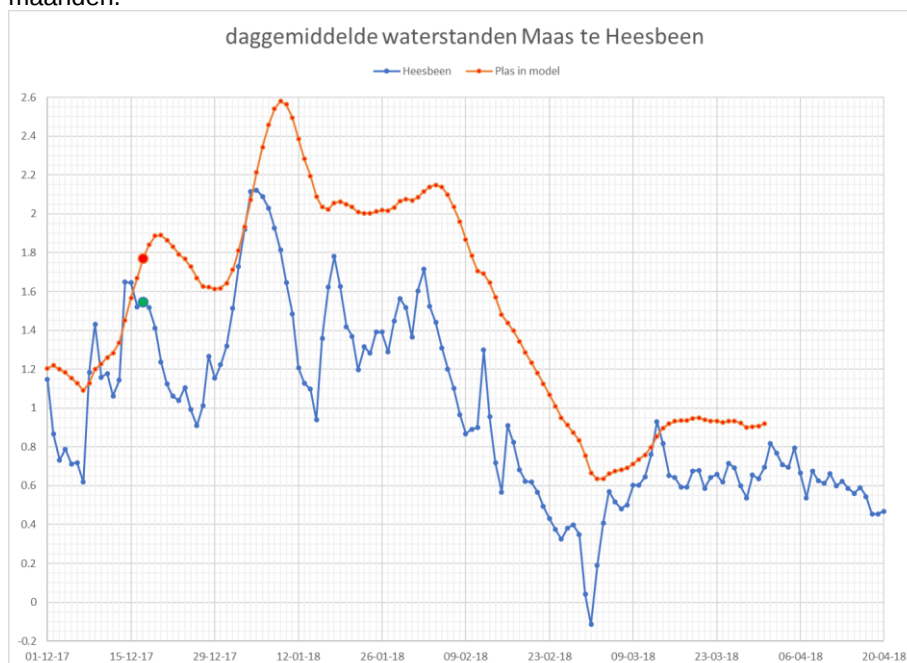


Figuur 5 Gemiddelde dag-waterstanden tijdens hoogwatersituatie 1: januari 2011, met in blauw de gemeten waterstanden op de Maas te Heesbeen en in oranje de gemodelleerde waterstanden in de plas. De rode stip geeft de dag aan dat de plas in het model begon te infiltreren, de groene stip de op die dag gemeten gemiddelde rivierwaterstand te Heesbeen.

3.1.2

Hoogwatersituatie 2 (december 2017 – februari 2018)

Figuur 6 geeft een overzicht van de waterstanden in de plas voor deze hoogwaterperiode. De dikke rode punt in deze figuur geeft het begin van de periode aan dat de plas in het model infiltreert. De waterstanden in de plas stegen in deze periode tot maximaal 70 cm boven de waterpeilen in de watergangen in de omgeving; de infiltratieperiode duurde echter bijna twee maanden.



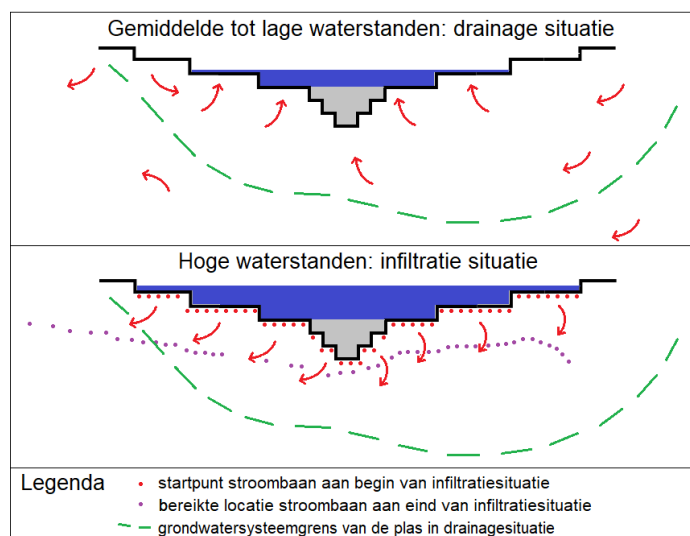
Figuur 6 Gemiddelde dag-waterstanden tijdens hoogwatersituatie 2: december 2017 – februari 2018, met in blauw de gemeten waterstanden op de Maas te Heesbeen en in oranje de gemodelleerde waterstanden in de plas. De rode stip geeft de dag aan dat de plas in het model begon te infiltreren, de groene stip de op die dag gemeten gemiddelde rivierwaterstand te Heesbeen.

Het model laat zien dat de verspreiding vanuit de plasbodem gedurende veel langere hoogwaterperiode 2 groter is dan die tijdens hoogwaterperiode 1. De tweede hoogwaterperiode wordt gezien als de meest ongunstige situatie en daarom als maatgevend voor de analyse. Daarom is de verdere analyse beperkt tot de langere hoogwaterperiode 2 uit de winter van 2017-2018.

3.2 Principe aanpak met het grondwatermodel

Met het grondwatermodel zal de mogelijke verspreiding worden geanalyseerd van water dat gedurende de maatgevende hoogwaterperiode uit de plasbodem naar het grondwater kon stromen. De verspreiding wordt aangedreven door de in de tijd variërende waterstanden. De mogelijke verspreiding vanuit de plasbodem wordt bepaald door het modelmatig volgen van waterdeeltjes vanaf de grens tussen de plasbodem en de top van het watervoerende pakket gedurende en na de hoogwaterperiode. Dit gebeurt met een tijdsafhankelijke stroombaanberekening met een tijdstapgrootte van 1 dag. Het eindpunt van een stroombaan na dag 1 is het startpunt van diezelfde stroombaan aan het begin van dag 2. De berekening volgt de waterdeeltjes tot zij op elk op een voor elk deeltje specifieke plaats en tijd het grondwatersysteem hebben verlaten, meestal door uittreding in de rivier, dan wel tot het einde van de door te rekenen periode is bereikt.

Gedurende de rekenperiode veranderen de peilen voortdurend en daarmee ook de stroomsnelheden en, bij wisseling tussen een drainerende en infiltrerende situatie, keert ook de stroomrichting om. Zolang de plas infiltreert, stroomt het grondwater van de plas weg; zolang de plas draineert, stroomt het grondwater naar de plas toe. Figuur 7 geeft dit schematische aan. Omdat de plas gemiddeld draineert, kan alleen water definitief uit de plas ontsnappen, dat aan het eind van de maatgevende infiltratieperiode tot buiten de grondwatersysteemgrens van de plas (bij drainage) is geraakt. In veel gevallen zal dat water naar de dan weer drainerende rivier stromen. Alleen water dat aan het eind van de maatgevende infiltratieperiode ook tot buiten de grondwatersysteemgrens van de rivier is geraakt, kan zich via het grondwater verder verspreiden.



Figuur 7 Schematische weergave van de analyse. Boven: Doorsnede van de plas in de drainerende situatie, hierbij stroomt het grondwater naar de plas en kan het niet worden verontreinigd. Onder: Infiltrerende situatie: De rode puntjes is water dat aan het begin van de infiltratieperiode uit de plasbodem het grondwatersysteem instroomt. Dit water bereikt gedurende de infiltratieperiode de grens die met paarse puntjes is aangegeven. De groene streepjeslijn geeft de grondwaterscheiding in de drainagesituatie weer. Water boven deze lijn stroomt naar de plas.

De beoordeling van de geohydrologische situatie wordt vastgesteld op basis van modellering van de omhullende stroombanen, berekend voor de gemiddelde geohydrologische toestand over 10 jaar. De modellering heeft tot doel te controleren of de berekende stroombanen binnen een "omhullende" blijven. Om die gemiddelde toestand te bepalen wordt een niet-stationaire berekening uitgevoerd met tijdstappen van 1 dag. Daarna wordt voor het gemiddelde van de berekende tijdsafhankelijke situaties (3652 dagen) een stationaire stroombaanberekening uitgevoerd. Deze stationair berekende stroombanen starten op 100 m afstand van de rand van de plas op diverse dieptes. Begonnen wordt op een diepte overeenkomstig de helft van de maximale (opgevulde) plasdiepte. Afhankelijk van het resultaat volgen er meerdere stroombaan berekeningen op dieptes variërend tussen de grondwaterstand en de maximale plasdiepte.

De eindpunten van de stroombanen vormen tezamen een vlak in het grondwatersysteem dat de plas omhult. Waterdeeltjes en stoffen die uit de plasbodem lekken zullen altijd binnen deze omhulling blijven. Waar dit omhullende vlak zich precies bevindt wordt uiteraard bepaald door het tijdvak dat is beschouwd, in dit geval de 10 jaar tussen 01-04-2008 en 31-03-2018.

Om deze methode te toetsen, is met behulp van tijdsafhankelijke stroombaanberekeningen onderzocht tot waar uit de plas uittredende stroombanen komen, gedurende de maatgevende infiltratieperiode. Dit is doorgezet voor de drainagesituatie gedurende de kleine twee maanden daarna tot het eind van de beschikbare rekenperiode. Deze resultaten zijn geanalyseerd en vervolgens is vanaf de eindpunten van de stroombanen de 10-jaar gemiddelde situatie stationair doorgerekend om te zien waar de stroombanen uiteindelijk uitkomen. Er is voor deze werkwijze gekozen omdat 10 jaar (of langer) niet-stationair doorrekenen met elke infiltratieperiode weer nieuw startende stroombanen onevenredig veel tijd en geheugenruimte zou vergen en de meerwaarde ervan naar onze inschatting gering tot nihil is.

3.3 Technische modellering van de plas

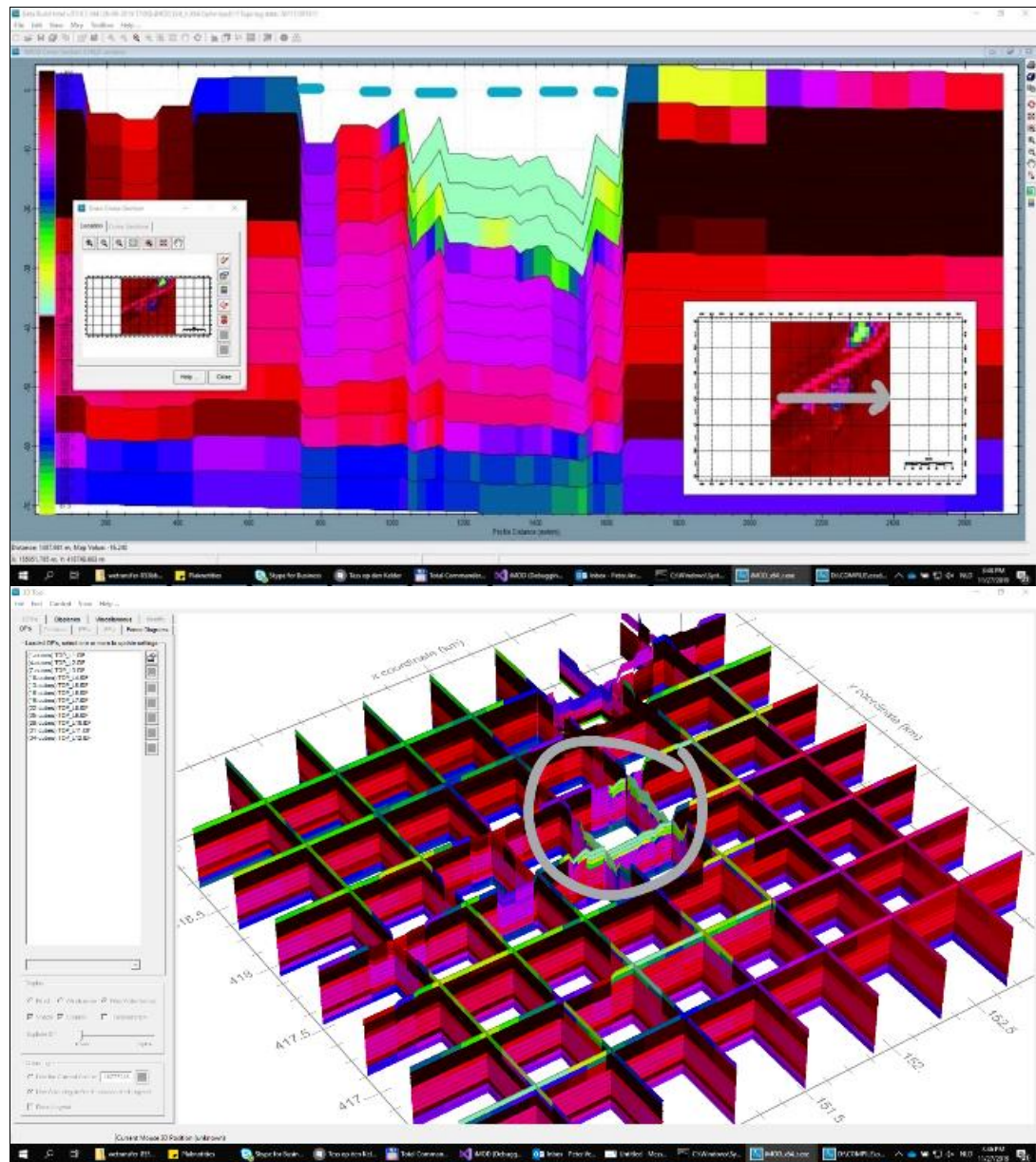
Uit het beschikbare regionale grondmodel (MORIA, versie 4.5) is een deelmodel gesneden van 3 bij 3 km, waarin de onderzochte plas centraal ligt. De afstand van de plas tot de modelrand bedraagt ruim 1 km. Dat is ongeveer 2 keer de spreidingslengte ($\lambda = \sqrt{kDc}$) die in de omgeving van de plas geldt. Omdat de randvoorwaarden van het uitgesneden deelmodel afkomstig zijn uit het regionale model, is dit op zich niet bezwaarlijk. Het kan echter wel aanleiding geven tot twijfel aan de modelresultaten, omdat een afstand van 3 keer de spreidingslengte of meer van de rand van het onderzoeksgebied tot de modelrand een algemeen geaccepteerde norm is bij grondwatermodellering. Om discussie hierover te vermijden wordt in de Aanvulling op de Handreiking een modelgrootte van minimaal 5 bij 5 km aanbevolen voor diepe plassen in midden en hoog Nederland. In laag Nederland waar de dikte en weerstand van de deklaag vaak enkele ordes groter zijn, zullen de aanbevolen modelafmetingen nog groter zijn.

Het uitgesneden deel model bevat cellen van 25x25 m en 12 lagen van gelijke dikte voor het ongeveer 60 m dikke eerste watervoerend pakket. De onderzochte plas maakt technisch gezien deel uit van het eerste watervoerende pakket. De beoogde eindsituatie van de plas (na herinrichting) is gedetailleerd ingebracht in het uitgesneden deelmodel. De bodem van de plas in de beoogde eindsituatie van de plas is geschematiseerd als de top van het bovenste (1^e) watervoerend pakket. De opvulling van de plas is het verschil tussen de oorspronkelijke bodem van de zandwinplas en de bodem in de eindsituatie. Deze bedraagt maximaal ongeveer 25 m. Aan de opvulling is in het model een k-waarde van 0.1 m/d toegekend, redelijkerwijs ongeveer overeenkomend met die van het ingebrachte fijnzandige slib. Voor de rest van de watervoerende pakketten in het model zijn de k-waarden uit het regionale model aangehouden.

Voor iedere modelcel is per watervoerend pakket de kD-waarde bepaald op basis van de dikte van de opvulling in het betreffende pakket en de k-waarde uit het regionale model.

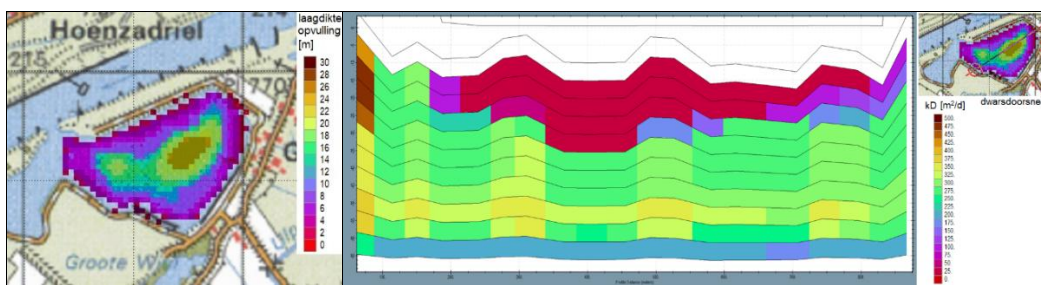
Ter illustratie: zo krijgt een watervoerend pakket met een dikte van 6 m in een modelcel die geheel uit opvulling bestaat een kD -waarde van $0.6 \text{ m}^2/\text{d}$ ($6 \text{ m} \times 0.1 \text{ m/d}$) en een onderliggend watervoerend pakket in dezelfde modelcel waarin de bovenste 4 m uit opvulling bestaat en de onderste 2 m uit oorspronkelijk watervoerend pakket met een k -waarde van 20 m/d bestaat een kD -waarde van $40.4 \text{ m}^2/\text{d}$ ($4 \text{ m} \times 0.1 \text{ m/d} + 2 \text{ m} \times 20 \text{ m/d}$).

De laagopbouw is zichtbaar gemaakt in Figuur 8. Deze schematisatie wordt verondersteld voldoende fijnmazig te zijn om de deeltjes in detail in 3 dimensies te volgen, en om eventuele variaties in eigenschappen van de bodem en de plaats van randvoorwaarden voldoende accuraat in model te brengen.



Figuur 8 Plas in het uitgesneden deelmodel. Boven: Oost-west doorsnede van het model door de hartlijn van de plas (zie ingebodde kaartje). De lijntjes geven de boven- en onderzijde van de afzonderlijke modellagen aan. De kleuren geven doorlatendheid van de lagen aan. Onder: Lattenrooster met modeldoorsneden waarin de plaats van de plas zichtbaar is binnen de grijze cirkel.

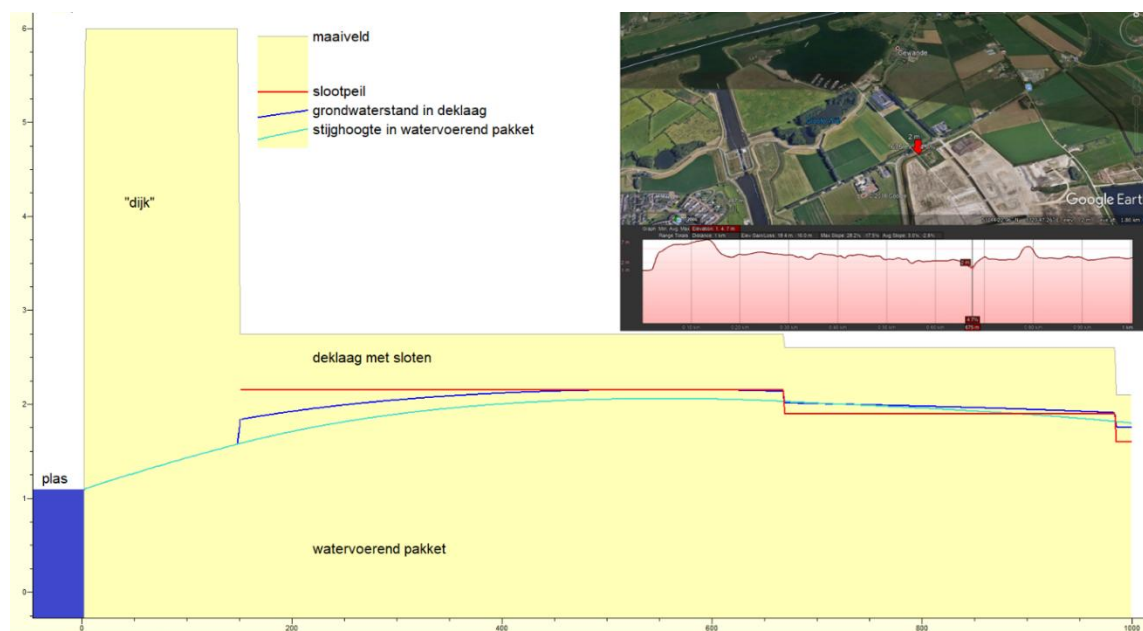
Het diepere deel van de plas is opgevuld met fijn materiaal wat resulteert in modellagen met een duidelijk lager doorlaatvermogen dan in de modellagen van het onderliggende watervoerend pakket (Figuur 9).



3.4 Verkennende berekeningen met een versimpeld model

Ter voorbereiding van de uitgebreide gedetailleerde berekeningen is eerst met een versimpeld model een tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd. Doel daarvan is om een gevoel te krijgen hoever gedurende een hoogwaterperiode uit een plas uittredend water zich in het grondwater kan verspreiden, en hoe lang dit uitgetreden water er over doet om na de hoogwaterperiode weer terug naar die plas te stromen. Om hierbij dichtbij de realiteit te blijven, is hiervoor de situatie in de omgeving van de plas Koornwaard, zij het sterk vereenvoudigd, toegepast. De resultaten van deze vingeroefening hebben mede de strategie van de modellering met het grondwatermodel bepaald.

Het versimpelde model beslaat een raai van 1 km loodrecht op de rivier vanuit de rand van de plas met cellen van 2 m (Figuur 10). Het model heeft 1 laag tot op een diepte van NAP -20 m, met daarboven een drainagesysteem met een vast slootpeil. Conform de situatie ter plekke verloopt het vaste slootpeil naarmate de afstand tot de plas toeneemt van NAP + 2.15 m in het gebied direct naast de dijk in twee stappen naar een lager niveau (NAP + 1.90 m en NAP + 1.60 m). Alle drie deze slootpeilen zijn duidelijk hoger dan het gemiddelde peil in rivier en plas (NAP + 0.90 m), wat impliceert dat de plas gemiddeld gezien de omgeving draineert. De drainageweerstand van het slootstelsel is aangehouden op 100 dagen. Voor de hydraulische weerstand tussen de deklaag en het watervoerend pakket is op basis van expert judgement een waarde van aangenomen van 100 dagen. Dat is voor deze situatie een realistische inschatting.



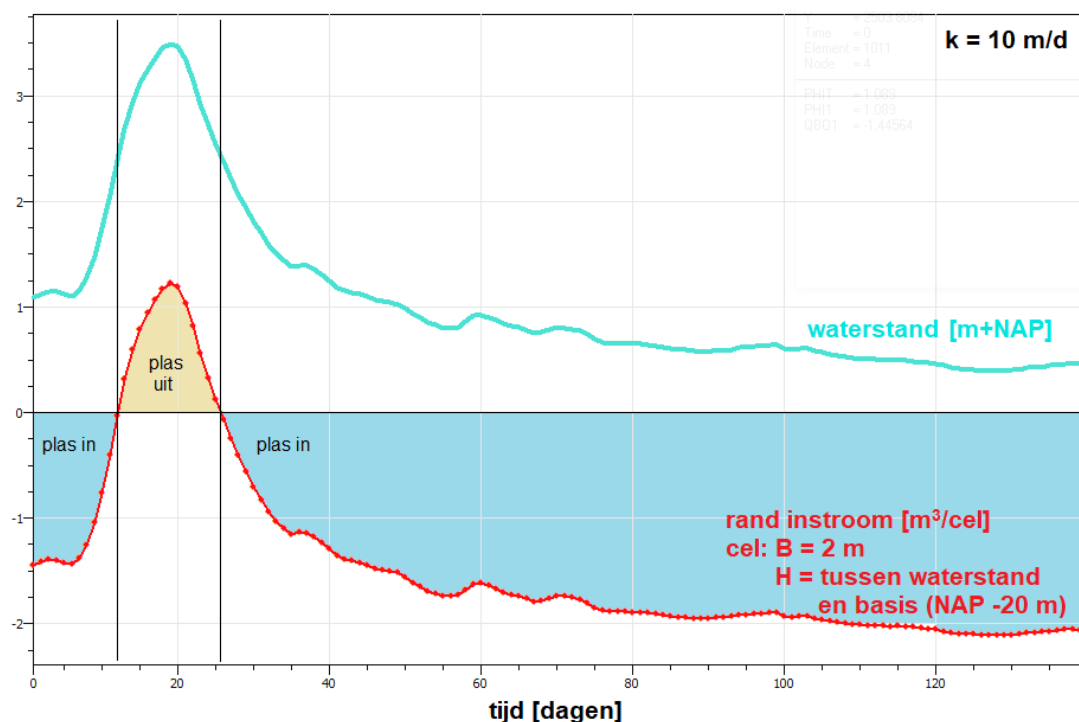
Deze eenvoudige modellering leent zich veel beter om de gevoeligheid van de verspreiding van water uit de plas naar het grondwater voor de doorlatendheid van het watervoerend pakket en de effectieve porositeit te onderzoeken dan een tijdsafhankelijk driedimensionaal grondwatermodel. Natuurlijk kan de gevoeligheid voor deze parameters ook daarmee onderzocht worden, maar dat vergt veel meer tijd en inspanning dan met bovenbeschreven versimpeld model.

3.4.1 Hoogwatersituatie 1

Het peil van de plas varieert conform het plaspeil in Figuur 5. In het model is het waterpeil in de plas ingevoerd als een stijghoogterand. Met dit model is de periode uit Figuur 5 doorberekend met tijdstappen van een dag. Daarbij is uitgegaan van een constante grondwateraanvulling (neerslagoverschot) van 1 mm/dag.

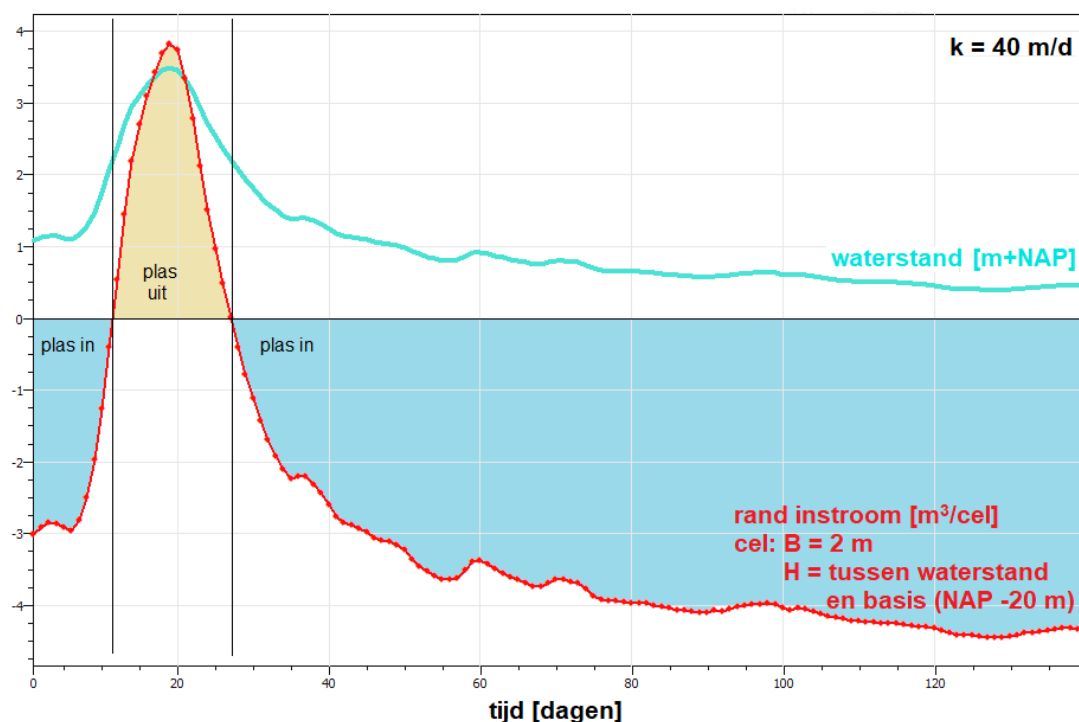
Figuur 11 geeft een overzicht van het berekeningsresultaat voor een watervoerend pakket met een doorlatendheid van 10 m/d (fijn tot matig fijn zand). De blauwe lijn geeft het verloop van de stijghoogte in m +NAP in de modelcel aan de rand van het model, die nagenoeg gelijk is aan de waterstand in de plas. De rode lijn geeft de berekende stroming over de rand van het model in m^3/d (door een oppervlak met een breedte van 2 m en een hoogte van de berekende waterstand + 20 m) waarbij de punten de afzonderlijke dagen representeren. Een waterstand van 3 m + NAP betekent een doorstroomd oppervlak van 46 m^2 (2 m breed en 3 +20 m hoog). Een daarbij horende stroming van $1 \text{ m}^3/\text{d}$ is dus een stroomsnelheid van $1 / 46 \text{ m/d}$. Dat is ruim 2 cm/dag. Voor de afgelegde afstand in het watervoerend pakket moet dit nog gedeeld worden door de effectieve porositeit.

Waarden groter dan nul duiden op stroming uit de plas naar het grondwater, waarden kleiner dan nul op stroming van grondwater naar de plas. In de figuur is het volume van uitstromend plaswater naar het grondwater met een bruine kleur aangegeven (boven de 0-lijn) en het volume instromend grondwater naar de plas met een blauwe kleur (onder de 0-lijn).



Figuur 11 Resultaat hoogwatersituatie 1 met raai-model voor een zandpakket met een doorlatendheid van 10 m/d. De blauwe lijn is de berekende grondwaterstand in de cel direct naast de plasrand. De rode lijn is de berekende stroming over de rand van de plas naar het grondwater in m^3/d over een oppervlak met een breedte van 2 m en een hoogte van de waterstand + 20 m.

Figuur 12 geeft op vergelijkbare wijze het resultaat van een zelfde berekening voor een watervoerend pakket met een 4 keer zo hoge doorlatendheid (grof zand). De periode dat water de plas uitstroomt duurt 2 dagen langer dan bij de situatie met de lagere doorlatendheid (Figuur 11) en de het uitgestroomde volume is een stuk groter. Dat betekent dat de stroomsnelheid een stuk groter is en dat bij vergelijkbare effectieve porositeit het water uit de plas een stuk verder het grondwater binnendringt dan bij een lagere doorlatendheid.



Figuur 12 Resultaat hoogwatersituatie 1 met raai-model voor een zandpakket met een doorlatendheid van 40 m/d. De blauwe lijn is de berekende grondwaterstand in de cel direct naast de plasrand. De rode lijn is de berekende stroming over de rand van de plas naar het grondwater in m^3/d over een oppervlak met een breedte van 2 m en een hoogte van de waterstand + 20 m.

Voor beide doorlatendheden van het omliggende zandpakket ($k = 10$ en 40 m/d) zijn op basis van de gradiënten in de cel naast de plas de afgelegde afstanden berekend. De gradiënten zijn daarbij gemiddeld over de duur van de uitstroomperiode en over de duur van de instroomperiode. Dit is gedaan voor een effectieve porositeit van 0.3 en 0.2.

Tabel 1 geeft de resultaten van deze berekeningen, waarbij:

Afgelegde afstand [m] = duur [d] x doorlatendheid [m/d] x gradiënt [m/m] / porositeit [-].

Tabel 1 Berekende afgelegde afstanden voor Hoogwatersituatie 1, startend vanaf het moment dat de plas infiltreert en opnieuw startend vanaf het moment dat de plas weer draineert.

Doorlatendheid m/d	effectieve porositeit -	Gradiënt m/km	duur van de toestand dagen	afgelegde afstand m
10	0.3	2.00000	13	0.87
		-2.89167	24	-2.31
10	0.2	2.00000	13	1.30
		-2.89167	24	-3.47
40	0.3	1.53333	15	3.07
		-1.43750	24	-4.60
40	0.2	1.53333	15	4.60
		-1.43750	24	-6.90

Negatieve waarden duiden op gradiënten richting plas en afgelegde afstand naar de plas toe.

De afgelegde afstand van water dat de plas uitstroomt blijft beperkt tot enkele meters. Dat water stroomt binnen enkele weken weer terug de plas in.

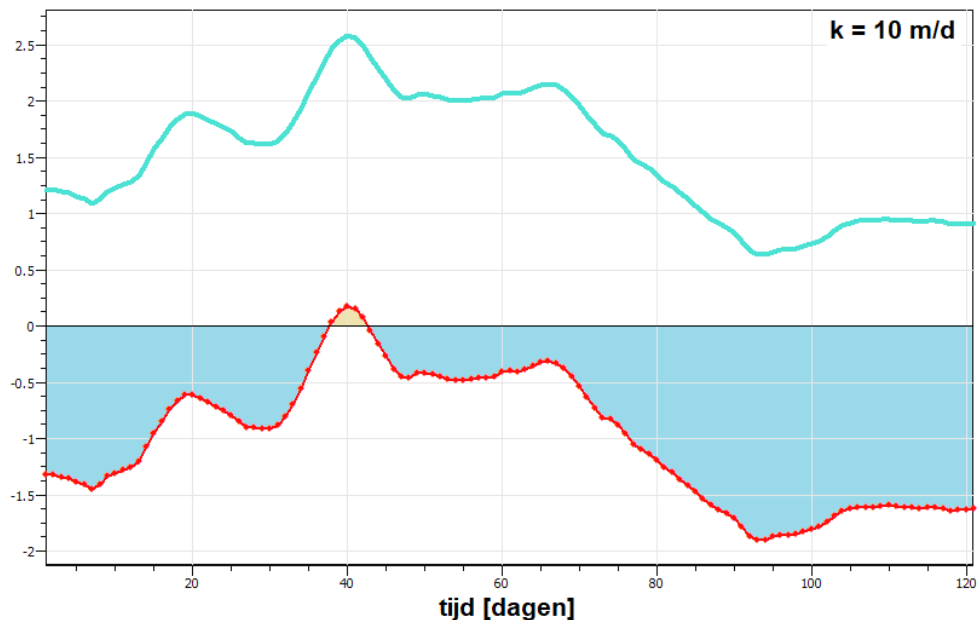
De berekeningsresultaten laten zien dat de infiltratiestroom tijdens de hoogwaterperiode is veel groter bij een doorlatendheid van 40 m/d dan bij een doorlatendheid van 10 m/d. De afstand tot waar het geïnfiltreerde plaswater zich in het grondwater verspreidt, is bij een 4 keer zo hoge doorlatendheid ongeveer 3,5 keer zo groot. Daarbij moet worden aangetekend dat de periode van infiltratie bij een 4 keer zo hoge doorlatendheid ongeveer 15% langer is. Naarmate de effectieve porositeit kleiner is, kan het water zich verder verspreiden. In alle gevallen blijkt echter dat voor deze hoogwaterperiode de indringing beperkt blijft tot slechts enkele meters en dat dit water binnen enkele weken nadat de drainagesituatie weer is hersteld terugstromen naar de plas.

3.4.2 Hoogwatersituatie 2

Het peil van de plas varieert conform het plaspeil in Figuur 6. In het model is het waterpeil in de plas ingevoerd als een stijghoogterand. Met dit model is de periode uit Figuur 6 doorerekend met tijdstappen van een dag. Daarbij is uitgegaan van een constante grondwateraanvulling (neerslagoverschot) van 1 mm/dag.

Figuur 13 geeft een overzicht van het berekeningsresultaat voor een watervoerend pakket met een doorlatendheid van 10 m/d (fijn tot matig fijn zand). De blauwe lijn geeft het verloop van de stijghoogte in m +NAP in de modelcel aan de rand van het model, die nagenoeg gelijk is aan de waterstand in de plas. De rode lijn geeft de berekende stroming over de rand van het model in m³/d (door een oppervlak met een breedte van 2 m en een hoogte van de berekende waterstand + 20 m) waarbij de punten de afzonderlijke dagen representeren.

Waarden groter dan nul duiden op stroming uit de plas naar het grondwater, waarden kleiner dan nul op stroming van grondwater naar de plas. In de figuur is het volume van uitstromend plaswater naar het grondwater met een bruine kleur aangegeven (boven de 0-lijn) en het volume instromend grondwater naar de plas met een blauwe kleur (onder de 0-lijn).

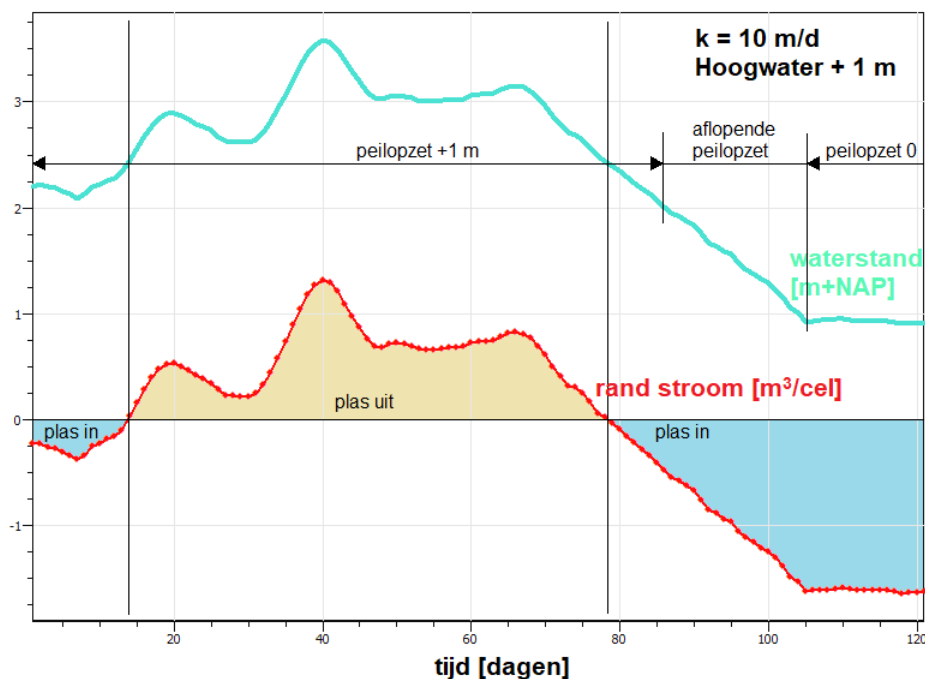


Figuur 13 Resultaat hoogwatersituatie 2 met raai-model voor een zandpakket met een doorlatendheid van 10 m/d. De blauwe lijn is de berekende grondwaterstand in de cel direct naast de plasrand. De rode lijn is de berekende stroming over de rand van de plas naar het grondwater in m³/d over een oppervlak met een breedte van 2 m en een hoogte van de waterstand + 20 m.

Hoogwatersituatie 2 is een hoogwater voor de rivier, maar ten opzichte van de gehandhaafde slootpeilen aan de andere kant van de dijk (NAP +2.15 m) is het hoogteverschil tijdens dit hoogwater klein. Figuur 13 laat dan ook zien dat hoogwatersituatie 2 resulteert in slechts een geringe periode (5 dagen) van stroming uit de plas. Ook het volume van het uitgestroomde water (het bruine oppervlak in de figuur) is gering.

Om toch iets te kunnen zeggen over situaties met langer aanhoudende periodes van uitstroming van plaswater naar het grondwater, is een fictieve hoogwatersituatie gecreëerd door het hoogwater in deze periode met 1 meter te verhogen. Na afloop van deze fictieve hoogwatersituatie is de verhoogde waterstand geleidelijk weer teruggebracht naar de normale waterstanden. Figuur 14 geeft een overzicht van dit fictieve peilverloop en van het berekeningsresultaat voor deze fictieve situatie.

Aldus is een situatie gecreëerd waarbij gedurende ruim 2 maanden water infiltreert uit de plas naar het grondwater.



Figuur 14 Resultaat hoogwatersituatie 2 plus extra peilopzet van 1 m met raai-model voor een zandpakket met een doorlatendheid van 10 m/d. De blauwe lijn is de berekende grondwaterstand in de cel direct naast de plasrand. De rode lijn is de berekende stroming over de rand van de plas naar het grondwater in m³/d over een oppervlak met een breedte van 2 m en een hoogte van de waterstand + 20 m.

Ook voor deze fictieve situatie is op basis van de gradiënten in de cel naast de plas de afgelegde afstand berekend. De gradiënten zijn daarbij gemiddeld over de duur van de uitstroomperiode en over de duur van de instroomperiode. Dit is gedaan voor een doorlatendheid van het zandpakket van 10 m/d en voor een effectieve porositeit van 0.3 en 0.2. Tabel 2 geeft de resultaten van deze berekening, waarbij:

Afgelegde afstand [m] = duur [d] x doorlatendheid [m/d] x gradiënt [m/m] / porositeit [-].

Tabel 2 Resultaten raai-model hoogwatersituatie 2 met 1 m extra peilopzet

Doorlatendheid m/d	effectieve porositeit -	Gradiënt m/km	duur van de toestand dagen	afgelegde afstand m
10	0.3	1.47692	65	3.20
		-2.77209	43	-3.97
10	0.2	1.47692	65	4.80
		-2.77209	43	-5.96

Negatieve waarden duiden op gradiënten richting plas en afgelegde afstand naar de plas toe

De afgelegde afstand van water dat de plas uitstroomt is wel duidelijk groter dan bij het korter durende hoogwater 1, maar blijft ook nu beperkt tot enkele meters. Dat water stroomt binnen enkele weken nadat het hoogwater voorbij is weer terug de plas in.

Uit de berekeningen voor hoogwatersituatie 1 bleek dat een 4 keer zo hoge doorlatendheid van het watervoerend pakket leidt tot ongeveer 3.5 keer zo grote afgelegde afstanden. Ervan uitgaande dat hier een vergelijkbare verhouding geldt, betekent dat ook bij een 4 keer zo hoge doorlatendheid de afgelegde afstand vanuit de plas dus beperkt blijft (ca 11 m, resp. 17 m.).

Conclusie

De berekeningen tonen aan dat een tijdelijk hoogwater op een gemiddeld drainerende rivier wel kan leiden tot infiltratie van water uit de plas naar het grondwater, maar dat de indringing van dit plaswater beperkt blijft tot een zone dichtbij de plasrand en dat dit water na afloop van het hoogwater relatief snel weer terugstroomt naar de plas.

Het variëren van de rivierstand ten opzichte van het achterland toont aan dat met een hoger peil en een langere duur daarvan een langere infiltratiesituatie kan worden gegenereerd. Dit geeft de mogelijkheid om het omslagpunt van plassen tussen drainerende naar infiltrerende situaties op eenvoudige wijze te testen.

4 Resultaten grondwatermodel aangekoppelde plas

Om de potentiële verbreiding van water uit de plasbodem voor en na beide hoogwatersituaties te onderzoeken zijn voor een veelvoud van hydrologische omstandigheden de stroomlijnen van uit de plasbodem getreden water berekend. De resultaten van al deze berekeningen zijn te vinden in bijlage A. In voorliggend hoofdstuk worden alleen de belangrijkste daarvan voor het voetlicht gebracht. De onderzochte hydrologische omstandigheden variëren van een situatie met een gemiddeld sterk infiltrerende tot een situatie met een gemiddeld sterk drainerende plas.

Zoals in het voorgaande hoofdstuk is vermeld, is met het grondwatermodel een tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd voor een periode van 10 jaar (1-4-2008 tot 31-03-2018) met daarin de twee eerder besproken hoogwaters. Na analyse van de resultaten van deze berekening bleek dat tijdens hoogwaterperiode 2 infiltratie uit de plas gedurende een veel langere tijd optrad dan tijdens hoogwaterperiode 1. Daarom is hoogwaterperiode 2 maatgevend voor de verspreiding van geïnfiltreerd plaswater naar het grondwater. De infiltratie van water uit de plas tijdens deze hoogwaterperiode begint in het model op 17-12-2017.

De hierna te bespreken situaties zijn als volgt:

- A. De periode tussen 1-4-2008 en 31-03-2018 met de werkelijk opgetreden rivierwaterstanden gedurende die periode.
- B. Als A, maar waarbij het rivierpeil over de gehele periode is verlaagd met respectievelijk 0.5, 1.0 en 2.0 m.
- C. Als A, maar waarbij het rivierpeil over de gehele periode is verhoogd met respectievelijk 0.5, 1.0 en 2.0 m

Voor deze situaties zijn de volgende stroombaanberekeningen uitgevoerd:

- 1. Waterdeeltjes starten direct onder de plas en worden gevolgd tussen 17-12-2017 (het begin van de maatgevende hoogwaterperiode) en 31-03-2018 (het eind van de rekenperiode)
- 2. Als 1, maar de simulatie wordt nog 10 jaar stationair doorgezet met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018
- 3. Als 1, maar de waterdeeltjes starten onder de plasrand
- 4. Als 2, maar de waterdeeltjes starten onder de plasrand
- 5. Waterdeeltjes starten 100 m buiten de plasrand en worden stationair gevolgd tot hun eindpunt met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018

De figuren in dit hoofdstuk geven een overzicht van de resultaten van een aantal relevante stroombaanberekeningen met het grondwatermodel. In deze figuren geeft de linkerhelft steeds een 3D aanzicht en de rechter helft een bovenaanzicht. De bolletjes zijn de start punten van de stroombanen. De legenda geeft een overzicht over de diepte van de stroombanen in m +NAP of van de reistijden van de stroombanen in jaren vanaf hun vertrekpunten (de bolletjes). Losliggende punten in het rechterdeel van deze figuren duiden op voornamelijk verticaal gerichte stroming.

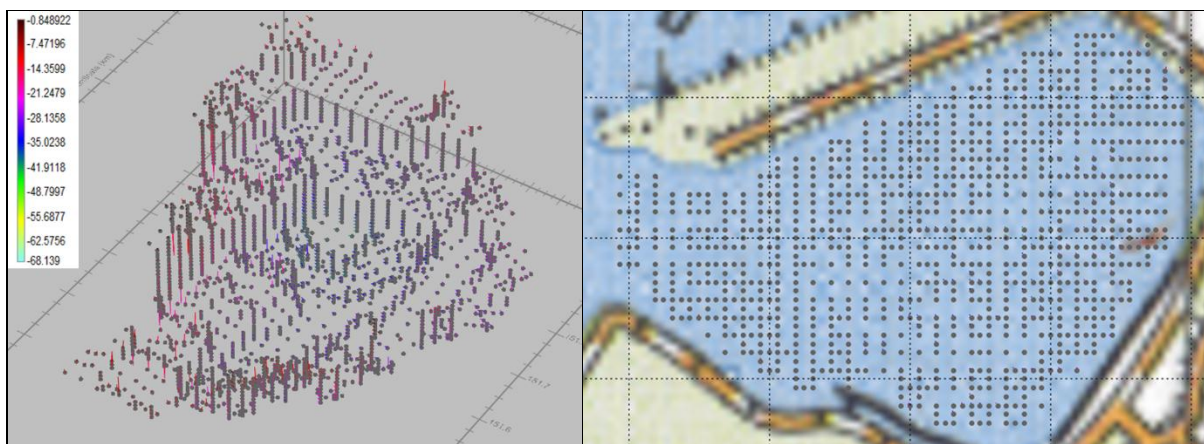
4.1 Simulaties voor de aangekoppelde plas met actuele rivierwaterstanden

In de actuele situatie zijn de waterpeilen in de Maas en in de plas het grootste deel van de tijd beduidend lager dan het gehanteerde waterpeil van de watergangen in de regio. Daarom betreft het hier in de plas en de rivier een gemiddeld drainerende situatie, die slechts bij hoogwater op de Maas en in de plas tijdelijk omslaat in een infiltrerende situatie. Afhankelijk van de duur van deze infiltrerende situatie kunnen waterdeeltjes uit de plas tijdelijk, dan wel definitief uit de plas verdwijnen en via het grondwater wegstromen naar de directe omgeving of mogelijk zelfs verder.

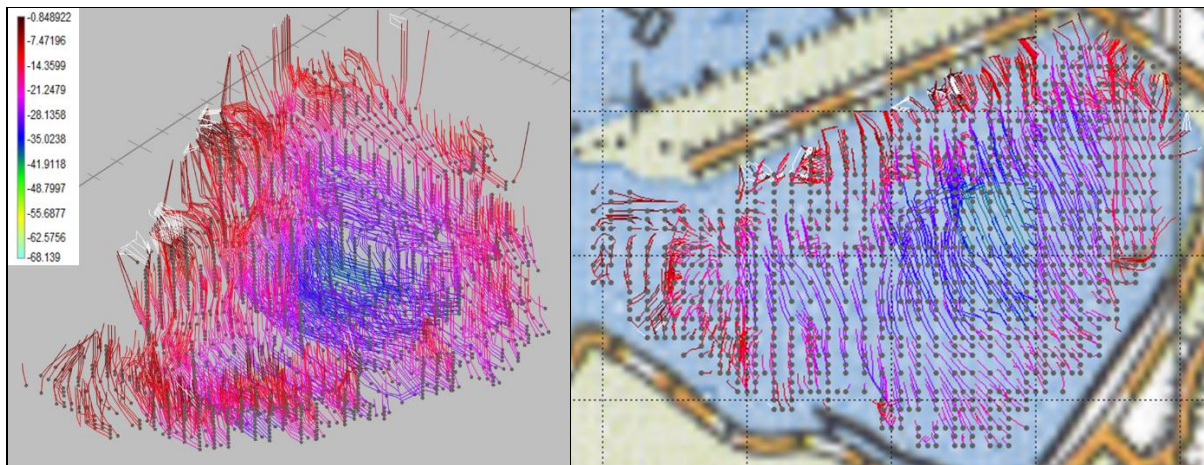
4.1.1 Stroombanen van waterdeeltjes die direct onder de plasvulling starten

Dit betreft stroombanen die boven in het watervoerend pakket starten direct onder de opvulling van de plas op het moment dat het hoogwater op in de plas begint.

Figuur 15 laat zien dat de waterdeeltjes gedurende het maatgevende hoogwater nauwelijks horizontaal verplaatsen. Figuur 16 laat zien dat al het water dat gedurende de maatgevende hoogwatersituatie uit de plasopvulling in het watervoerende pakket terecht kwam uiteindelijk weer terugstroomt naar de plas als gevolg van de gemiddeld drainerende situatie.



Figuur 15 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018

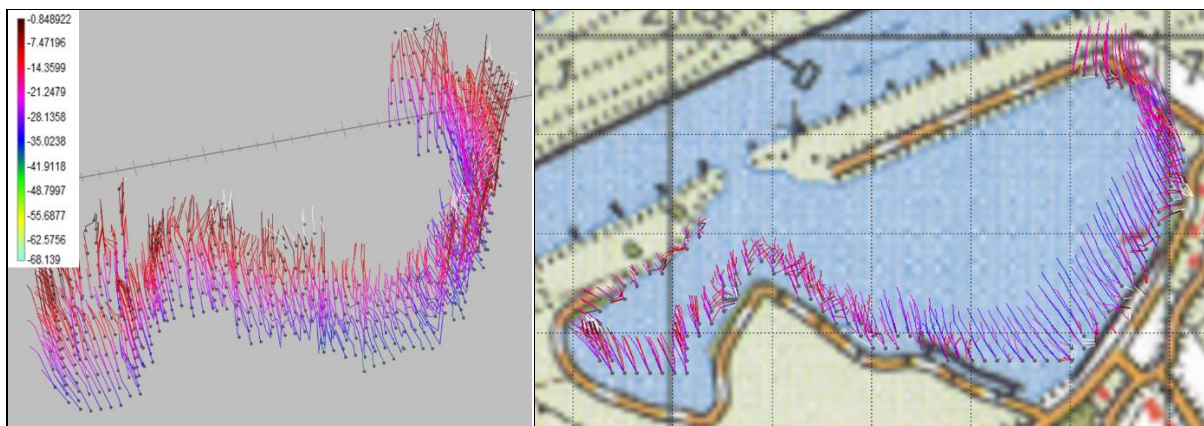


Figuur 16 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018

4.1.2 Stroombanen van waterdeeltjes die onder de rand van de plas starten

Dit betreft stroombanen die boven in het watervoerend pakket starten aan de rand van de plas waar de opvulling minimaal is op het moment dat het hoogwater op in de plas begint.

Om dezelfde reden als hiervoor, blijkt uit de modellering (Figuur 17) dat ook water dat aan de rand van de plas bij het maatgevende hoogwater uit de plas treedt op termijn weer geheel terug te stromen naar de plas.

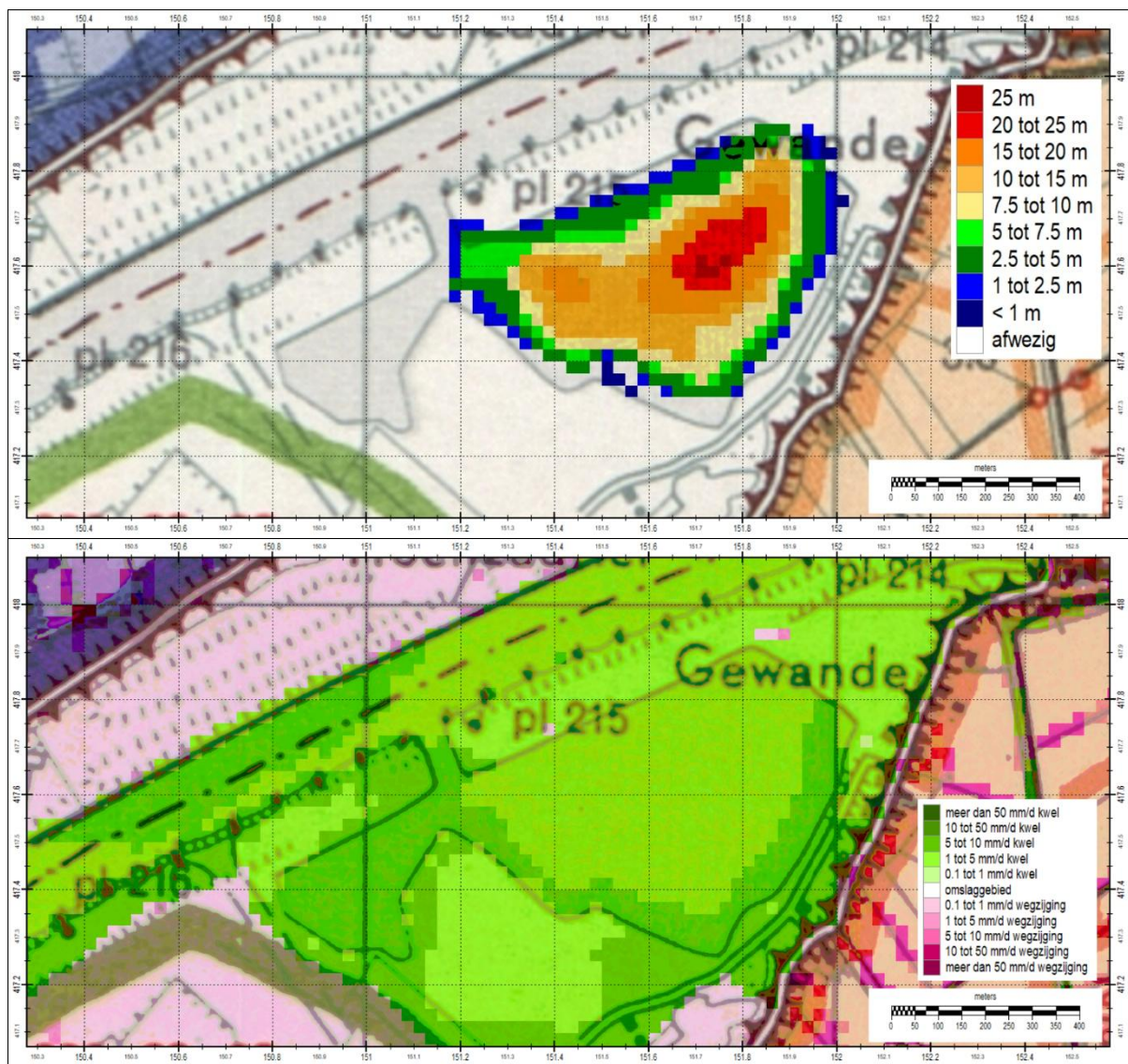


Figuur 17 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de plas rand voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018

4.1.3 Stroombanen van waterdeeltjes die starten op 100 m buiten de plas

Deze stroombanen zijn alleen berekend voor de gemiddelde situatie over de 10 beschouwde jaren, waarbij de stroombanen op zekere diepte in het watervoerend pakket starten op ca. 100 m buiten de rand van de plas. Hiervan wordt aangenomen dat de ondergrond niet is aangetast door de ontgraving en dat de oorspronkelijke geohydrologische situatie dus nog in tact is.

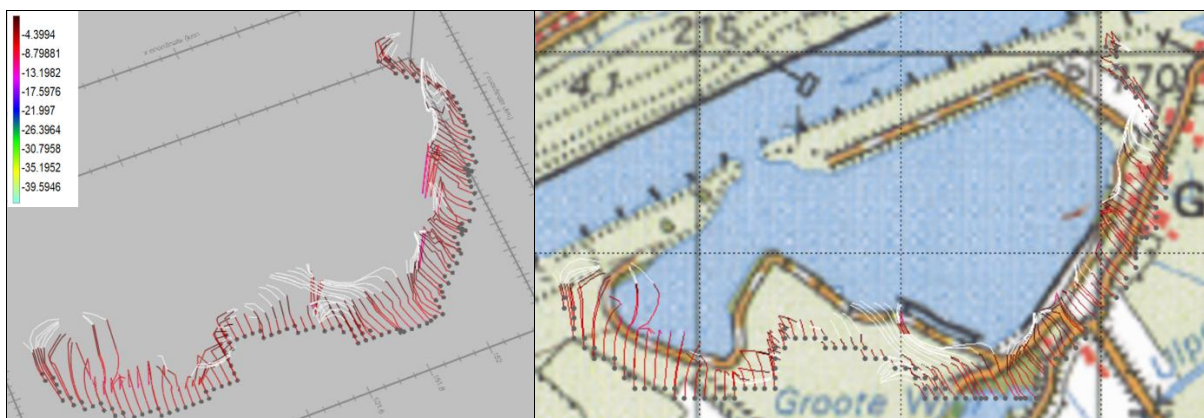
Het plaatje boven in Figuur 18 laat zien waar de opvulling van de plas zich bevindt en wat de dikte daarvan is. Het plaatje onder in deze figuur geeft voor de naaste omgeving van de plas een overzicht van de gemiddelde verticale stroomsterkte aan de top van het eerste watervoerend pakket, en dus aan de onderzijde van de plas en de rivier. De rode kleuren duiden op infiltratie, de groene kleuren op kwel. Gemiddeld stroomt er grondwater naar de plas en de rivier. Deze toestroom bedraagt gemiddeld enkele mm per dag en kan aan de randen van de plas oplopen tot meer dan 10 mm/dag. Duidelijk is dat de gehele plas gemiddeld gezien grondwater aantrekt (kwelt).



Figuur 18 Gemiddelde kwel / wegzijging rond de plas Koornwaard voor de periode 01-04-2008 tot 31-03-2018 (onder) en een overzicht van de dikte van de ingebrachte opvulling (boven)

De met het model berekende totale hoeveelheid kwel naar de plas bedraagt gemiddeld ruim 0.7 miljoen m³/jaar. Dat komt overeen met een gemiddelde hoeveelheid voor het gehele plasoppervlak van bijna 1.6 m per jaar. Het model resulteert op geen enkele plaats in de plas in uitstromend water (wegzijging).

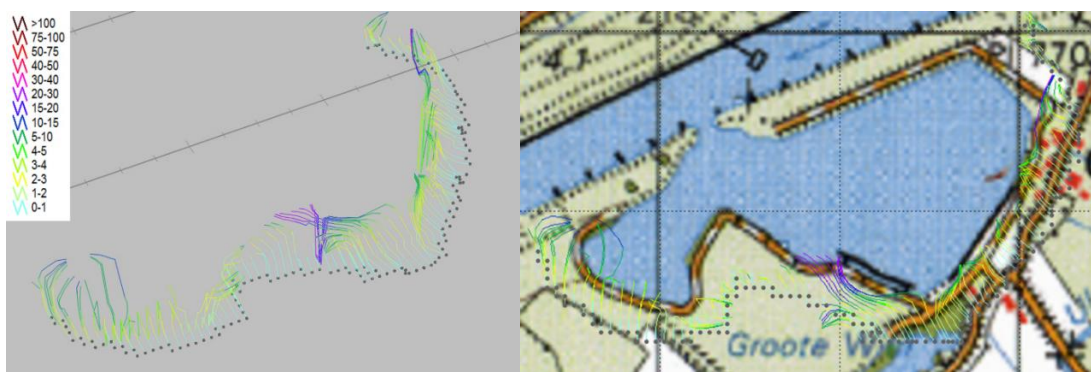
Figuur 19 geeft het resultaat van een berekening met stroombanen die starten op ca. de halve diepte van de opgevulde plas (10 m diep). Uit de figuur blijkt dat voor de huidige situatie alle stroombanen uiteindelijk in de plas uitkomen. Iets dat op grond van Figuur 18 ook verwacht mocht worden.



Figuur 19 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend op 10 m diepte langs de buitenrand van de plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie

Figuur 20 geeft de verblijftijden voor deze stroombanen. Hieruit blijkt dat de meeste stroombanen binnen 10 jaar in de plas uitkomen.

Het model berekent dat de plas gemiddeld ruim 0.7 miljoen m³/jaar grondwater draineert, overeenkomende met een opwaartse verticale flux van gemiddeld 1.6 m/jaar. De figuur laat zien dat het water vanaf de omhullende overall richting plas of rivier stroomt; er vindt dus geen verspreiding via het grondwater naar de omgeving plaats.



Figuur 20 Verblijftijden in jaar van de stroombanen startend op 10 m diepte langs de buitenrand van de plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie

4.1.4 Samenvatting

Bij hoogwater in de Maas en dus ook in de plas stroomt water uit de plasbodem het eerste watervoerend pakket binnen, maar nadat het Maaspeil weer rond zijn gemiddelde schommelt, en de plas daardoor opnieuw draineert, stroomt al dit water weer terug naar de plasbodem. Omdat de drainagesituatie veel langer duurt dan het sporadische hoogwater, blijft er op langere termijn geen uit de plasbodem gestroomd water in het grondwater achter.

4.2 Aangekoppelde plas met verlaagde rivierwaterstanden

Deze situatie is fictief omdat de het peil van de Maas nu kunstmatig is verlaagd met respectievelijk 0.5, 1.0 en 2.0 m. In deze fictieve scenario's is de drainage sterker en de infiltratie bij hoogwater zwakker. De berekeningen laten dan ook zien al het water dat tijdens de maatgevende hoogwatersituatie uit de plasbodem treedt weer daarin terugstroomt. De resultaten van deze exercities zijn daarom hier verder niet beschreven en zijn terug te vinden in bijlage A.

De met het model berekende totale hoeveelheid kwel naar de plas neemt voor die situaties van gemiddeld 0.7 miljoen m³/jaar voor de actuele situatie toe naar 1.2 miljoen m³/jaar bij een 0.5 m lager peil, 1.7 miljoen m³/jaar bij een 1 m lager peil en 2.7 miljoen m³/jaar bij een 2 m lager peil (zie ook Tabel 3).

De hoeveelheid kwel door het opgevulde deel van de plas (Figuur 9) neemt voor die situaties van gemiddeld een kleine 0.4 miljoen m³/jaar voor de actuele situatie toe naar 0.7 miljoen m³/jaar bij een 0.5 m lager peil, 0.9 miljoen m³/jaar bij een 1 m lager peil en 1.5 miljoen m³/jaar bij een 2 m lager peil (zie ook Tabel 4).

4.3 Aangekoppelde plas met verhoogde rivierwaterstanden

Ook deze situatie is fictief omdat het peil van de Maas nu kunstmatig is verhoogd met respectievelijk 0.5, 1.0 en 2.0 m. In deze fictieve scenario's is, naarmate het peil verder verhoogd is, de gemiddelde drainage steeds zwakker en de infiltratie tijdens hoogwater relatief steeds sterker dan bij de werkelijk opgetreden rivierwaterstanden. Bovendien duren de hoogwaterperiodes ook steeds langer. Bij een peilverhoging van de Maas en de plas met 2.0 m zouden beide meestentijds infiltreren.

Tabel 3 geeft de berekende in- en uitstroom van de plas voor de boven beschreven 6 Maaspeilsenario's als gemiddelde over de beschouwde periode van 10 jaar. De modellering is uitgevoerd met gemiddelde dagwaarden van de peilen. De grafiek van het dagelijks peil bij Heesbeen (Figuur 2) laat zien dat het peil binnen de dag ook aan getijden onderhevig is. De veranderingen die zo binnen een dag optreden hebben geen wezenlijk effect op de verbreiding van stoffen omdat de verplaatsingen die hierdoor optreden in het millimeterbereik liggen. Wel kan de dispersie hierdoor enigszins toenemen, maar ook dat wordt voor de verspreiding van stoffen in het grondwater rond een gemiddeld drainerende plas verwaarloosbaar geacht.

Tabel 3 Berekende gemiddelde instroom en uitstroom voor de verschillende peilsenario's met aangekoppelde plas

Peil scenario m	Bodem in m ³ /jaar	Bodem uit m ³ /jaar	Areaal in m ²	Areaal uit m ²
0 (actueel)	705531	0	448750	0
+ 0.5	200426	1361	440000	6875
+ 1.0	0	308299	0	448750
+ 2.0	0	1326809	0	448750
– 0.5	1212207	0	448750	0
– 1.0	1718365	0	448750	0
– 2.0	2728935	0	448750	0

Het betreft bij Tabel 3 alleen de verticale stroming van en naar het onderliggende grondpakket. Omdat het waterdeel van de aangekoppelde plas niet als watervoerend pakket in het model is opgenomen, is deze benadering correct. In het model is de plaswaterstand per rekentijdstap constant en identiek aan de rivierwaterstand. Dat betekent feitelijk dat de waterbalans van de plas voor elke rekentijdstap wordt gesloten door uitwisseling tussen plas en rivier via het oppervlaktewater. Deze uitwisseling van oppervlaktewater tussen plas en rivier, die in het model dus potentieel eindeloos groot is, is in deze tabel niet verdisconteerd.

Tabel 4 geeft de berekende stroming door de plasvulling, waarbij opvulling in het model is gedefinieerd als een laag dikker dan 1 cm. Deze plasvulling beslaat 70% van het plasoppervlak.

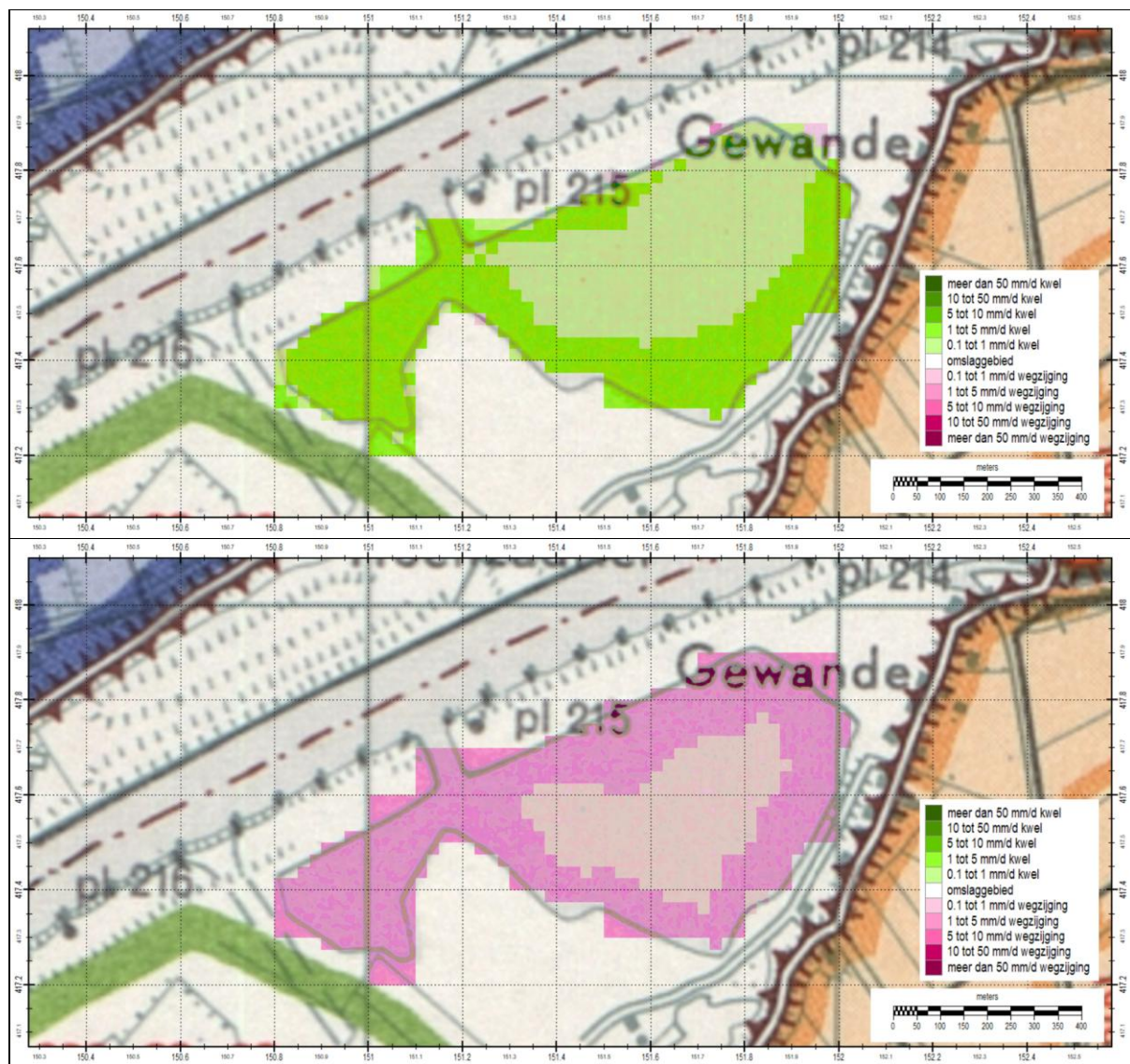
Tabel 4 Berekende gemiddelde instroom en uitstroom door de opvulling van de plas voor de verschillende peilscenario's met aangekoppelde plas

Peil scenario m	Plas in m3/jaar	Plas uit m3/jaar	Areaal in m	Areaal uit m2
0 (actueel)	383435	0	306250	0
+ 0.5	114160	354	304375	1250
+ 1.0	0	156313	0	306250
+ 2.0	0	698999	0	306250
- 0.5	653084	0	306250	0
- 1.0	922296	0	306250	0
- 2.0	1459781	0	306250	0

Vergelijking van Tabel 3 en Tabel 4 leert dat de meeste uitwisseling met grondwater door de plasbodem optreedt aan de randen van de plas. In peilscenario 0 gaat grofweg de helft van de stroming gaat door de opvulling, die 70% van het oppervlak beslaat. De andere helft gaat dus door het niet opgevlude deel aan de randen van de plas, die 30% van het oppervlak beslaat. De oorzaken daarvoor zijn dat aan de randen de hydraulische weerstand tussen plaswater en grondwater het kleinst is (geen opvulling met fijn sediment) en dat daar de gradiënt tussen de waterstand in de plas en de stijghoogte van het grondwater het grootst is. Datzelfde geldt voor de stroming door de opvulling, die naar het midden toe in dikte en weerstand toeneemt (Figuur 9).

Over 10 jaar gemiddeld stroomt in de actuele situatie over de gehele bodem water de plas in (kwel). In de scenario's met verlaagde waterstanden in rivier en plas blijft dat zo en neemt de hoeveelheid kwel toe naarmate de waterstanden verder stijgen. In de scenario's met verhoogde rivier en plas waterstanden slaat deze kwel om naar wegzijging. Bij een verhoging met 0.5 m is die omslag voor de gehele plas net begonnen (1.5%), terwijl in het gehele opgevlude deel van de plas dan nog kwel optreedt. Bij een verhoging met 1.0 m is die omslag voor de gehele plas en dus ook voor de opvulling compleet.

Figuur 21 geeft voor beide scenario's een overzicht van de berekende gemiddelde kwel / wegzijging. Bij 0.5 m hogere waterstanden treedt in bijna de gehele plas gemiddeld nog kwel op, zei het veel minder dan in de actuele situatie (Figuur 18). Bij 1.0 m hogere waterstanden is in de gehele plas de kwel omgeslagen naar wegzijging, waarbij met name op de randen al behoorlijk hoge fluxen zijn ontstaan.



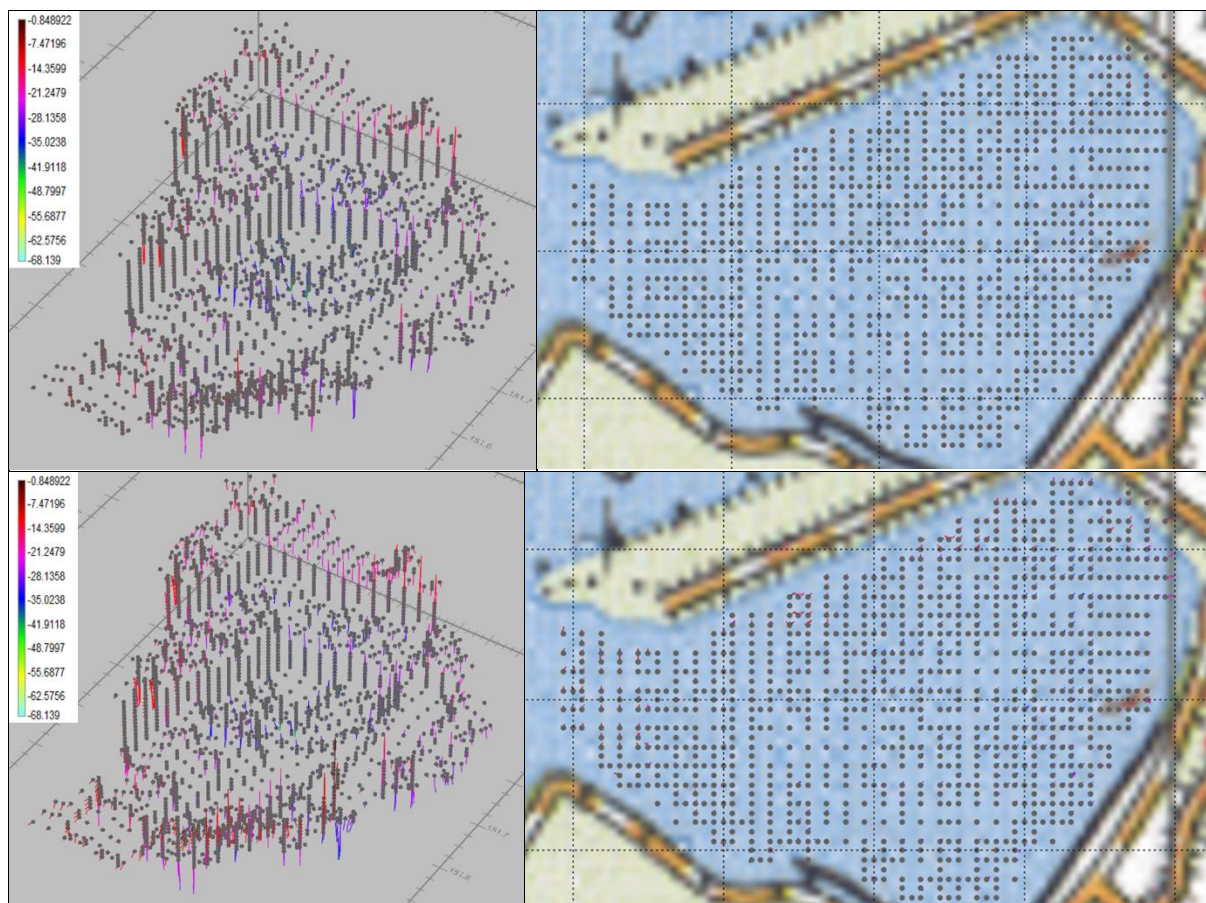
Figuur 21 Berekende gemiddelde kwel (+) / wegzijging (-) voor de situaties met verhoogd Maas- en plas peil van 0.5 m (boven) en 1.0 m (onder)

Nader onderzoek is vooral relevant voor situaties rond het omslagpunt van drainerende naar infiltrerende situaties. Daarom zijn hieronder alleen de resultaten van de stroombaanberekeningen voor de scenario's met een waterstandsverhoging van 0.5 m en 1 m beschouwd. De resultaten van alle andere berekeningen zijn terug te vinden in bijlage A.

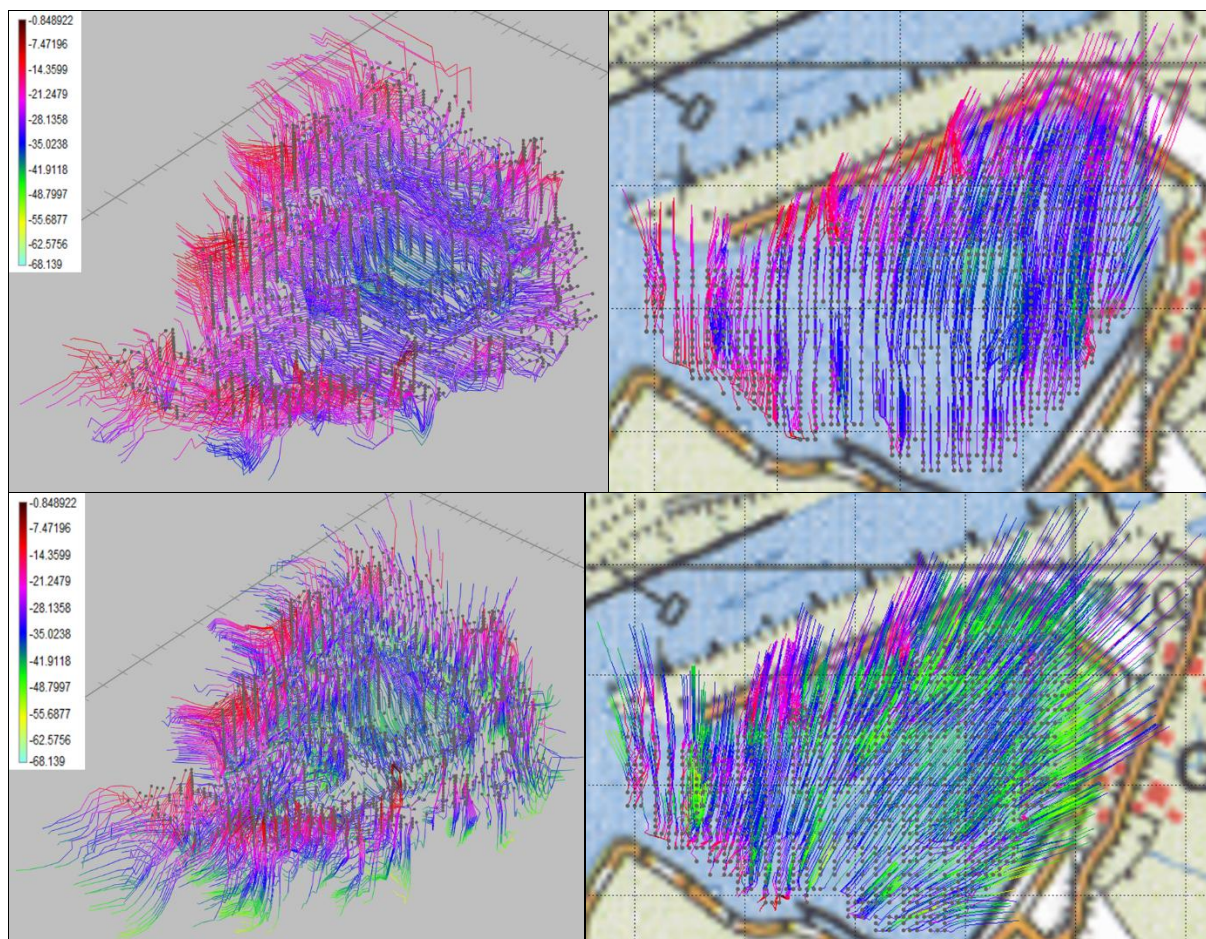
4.3.1 Stroombanen van waterdeeltjes die direct onder de plasvulling starten

Dit betreft stroombanen die boven in het watervoerend pakket starten direct onder de opvulling van de plas op het moment dat het hoogwater op in de plas begint.

Figuur 22 laat zien dat de waterdeeltjes gedurende de hoogwaterperiode (en de periode daar direct na) in beide situatie maar weinig van plaats veranderen in horizontale richting en vooral dieper het watervoerend pakket in stromen. Figuur 23 laat zien dat op termijn (10 jaar) in de situatie met 0.5 m hoger peil nagenoeg alle waterdeeltjes weer terug naar de plas of naar de rivier stromen. In de situatie met 1 m hoger peil is dat niet meer het geval. Een relevant deel stroomt dan dieper het watervoerend pakket in. De kleuren van de lijnen in deze figuren geven de diepte van de stroombanen weer in m +NAP. Losliggende punten in het rechterdeel van de figuren duiden op verticaal gerichte stroming.



Figuur 22 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m (boven) en 1.0 m (onder)



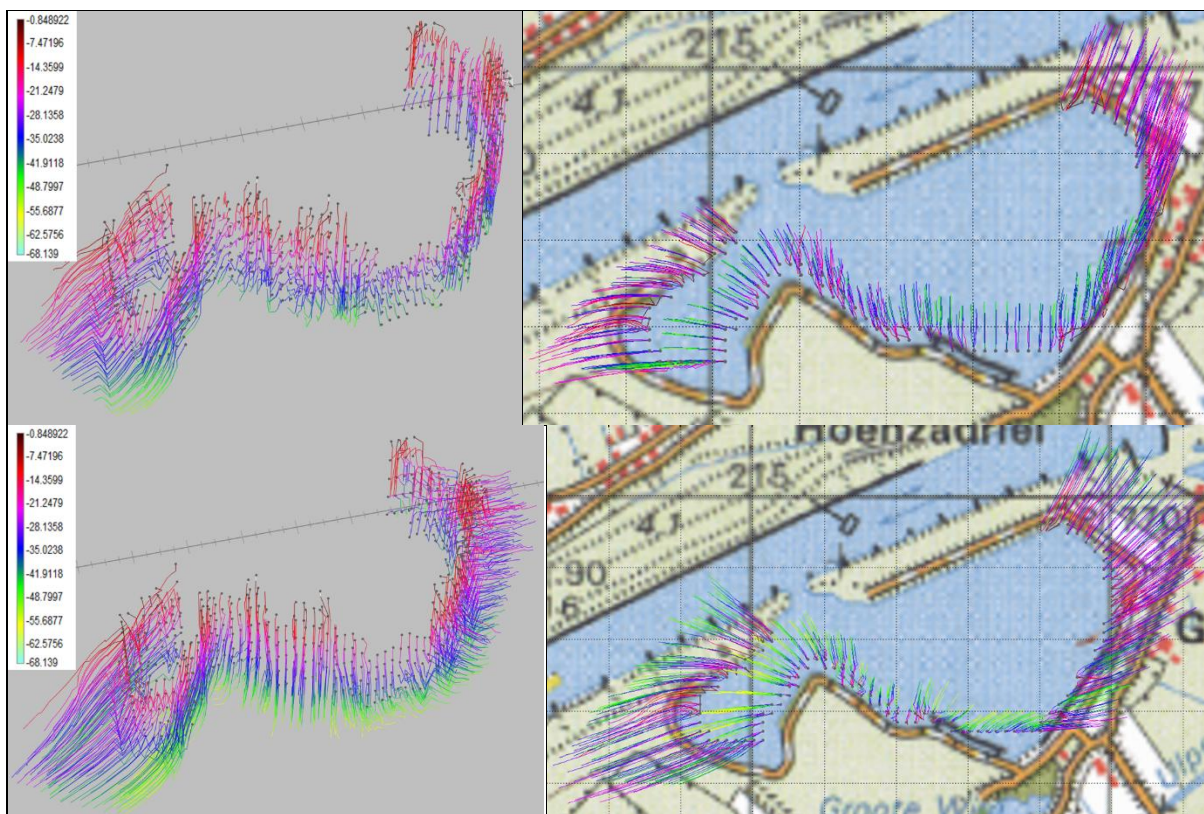
Figuur 23 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m (boven) en 1.0 m (onder)

4.3.2

Stroombanen van waterdeeltjes die onder de rand van de plas starten

Dit betreft stroombanen die boven in het watervoerend pakket starten aan de rand van de plas waar de opvulling minimaal is op het moment dat het hoogwater op in de plas begint.

Figuur 24 laat zien dat in een fictieve situatie met 0.5 m hoger peil een deel van het water de plas uitstroomt en ook niet door de rivier worden afgevangen. Bij een 1 m hoger peil is dat aandeel nog veel groter en gaat het water ook dieper de grond in.



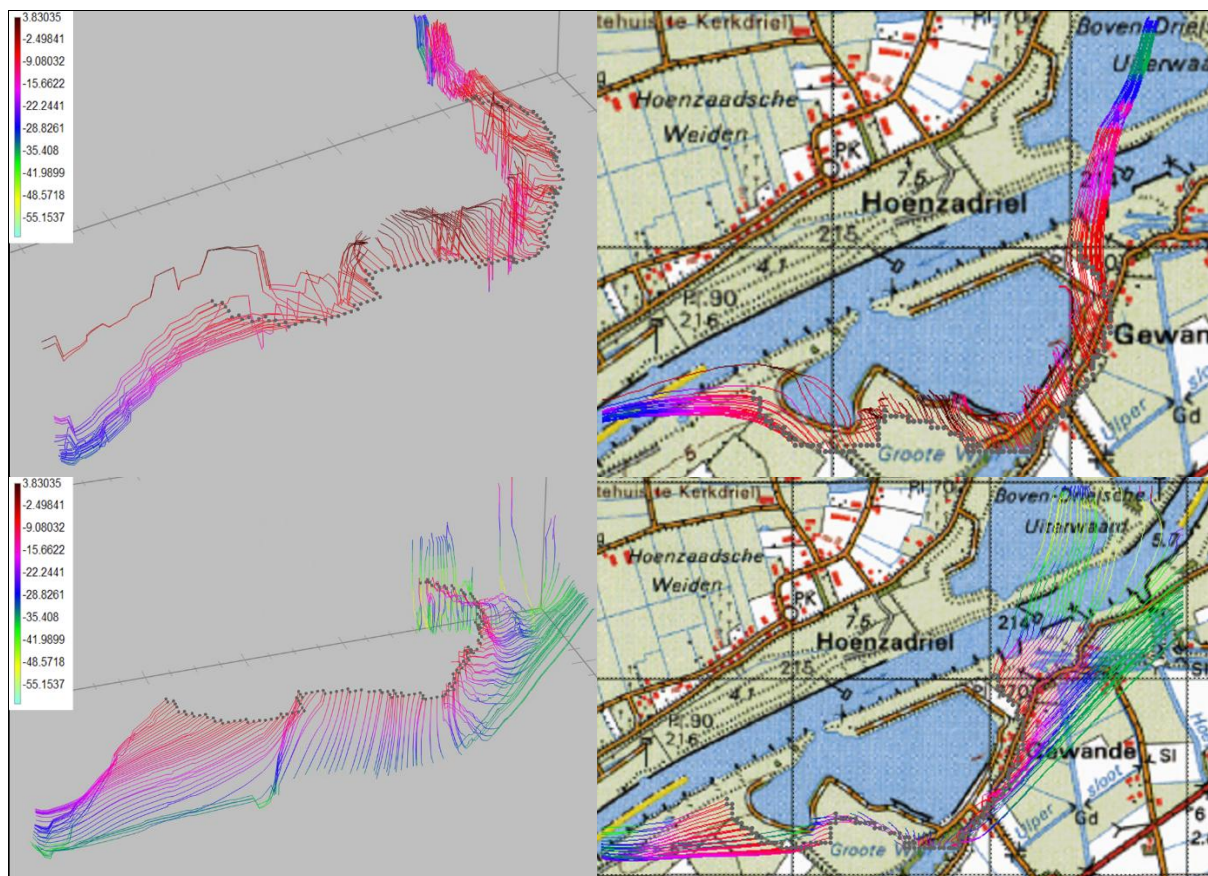
Figuur 24 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de plas rand voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m (boven) en 1.0 m (onder)

4.3.3

Stroombanen van waterdeeltjes die starten op 100 m buiten de plas

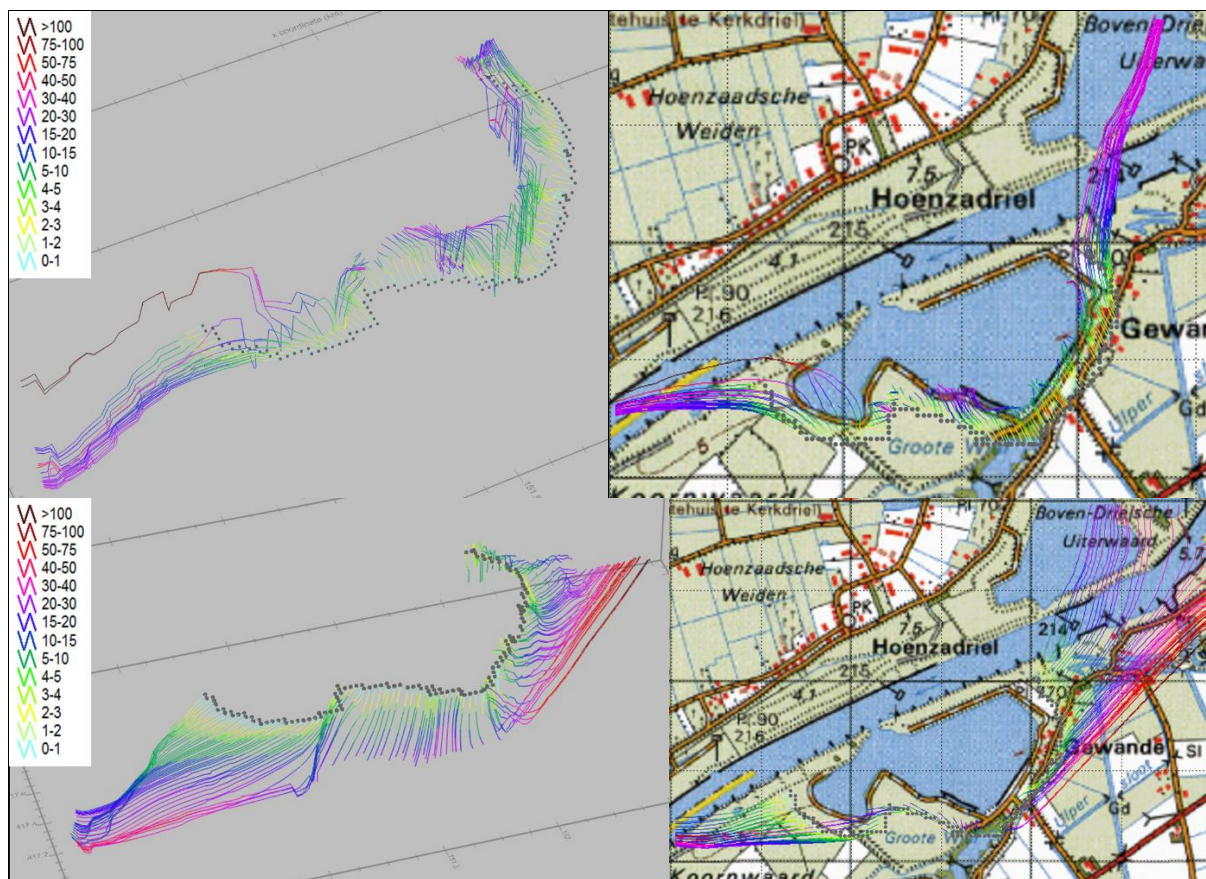
Deze stroombanen zijn alleen berekend voor de gemiddelde situatie over de 10 beschouwde jaren, waarbij de stroombanen op zekere diepte in het watervoerend pakket starten op ca. 100 m buiten de rand van de plas. Hiervan wordt aangenomen dat de ondergrond niet is aangetast door de ontgraving en dat de oorspronkelijke geohydrologische situatie dus nog in tact is.

Figuur 25 geeft het resultaat van een berekening met stroombanen die starten op ca. de halve diepte van de opgevlude plas (10 m diep). Uit de figuur blijkt dat voor de fictieve situatie met 0.5 m hogere rivierpeilen een groot deel van de stroombanen naar de plas of de rivier toe stromen, maar ook een deel onder de rivier door stroomt. In de situatie met 1 m hoger peil is dit laatste aandeel aanzienlijk groter.



Figuur 25 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend op 10 m diepte langs de buitenrand van de plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m (boven) en 1.0 m (onder)

Figuur 26 geeft de verblijftijden voor de stroombanen van beide situaties. Hieruit blijkt dat de meeste stroombanen tientallen tot honderden jaren onderweg zijn.



Figuur 26 Verbliftijden in jaar van de stroombanen startend op 10 m diepte langs de buitenrand van de plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie., met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m (boven) en 1.0 m (onder)

4.3.4

Samenvatting

Voor de situaties met verhoogde waterstanden in rivier en plas blijkt dat de stroombanen bij hoogwater de plas uitstromen. Nadat het waterpeil in de rivier en plas weer rond de normale (verhoogde) waarden schommelen stroomt dit “ontsnapte” water slechts ten dele weer terug naar de plas. Naarmate de waterstanden in rivier en plas relatief hoger worden en de rivier en plas dus relatief steeds langer gaan infiltreren, neemt het aandeel water dat terugstroomt naar plas of rivier steeds verder af.

4.4

Conclusie aangekoppelde plassen

Indien al het tijdens de maatgevende hoogwaterperiode geïnfiltreerde water in tien jaar binnen de contour op 100 m rond de plas blijft, mag als aangetoond worden beschouwd dat al het ooit uit de plasvulling getreden water in de buurt van de plas blijft, dan wel via de rivier wordt afgevoerd. Omgekeerd mag ook als aangetoond worden beschouwd dat lek uit de plasbodem nabij de bron blijft, dan wel met het rivierwater wordt afgevoerd, indien al het water dat zich op enig moment op een contour bevindt op 100 m rond de plas zich na tien jaar nog steeds binnen deze contour bevindt of met de rivier is afgevoerd.

Het stroombanenpatroon dat ontstaat door het traceren over tien jaar van water dat zich op enig moment (aan het begin van de maatgevende hoogwaterperiode) aan de onderzijde van de plas bevindt, bepaalt de contour waarbinnen al het potentieel uit de plasbodem gelekte water blijft en daarmee of wordt voldaan aan de wettelijke eis dat het lekwater nabij de bron blijft. Als criterium voor het begrip “nabij de bron” wordt een contour rond de plas op 100 m van de plasrand genomen als praktische waarde.

Stroombaan berekeningen startend op 100 m vanaf de rand van de plas op 10 m diepte gebaseerd op de gemiddelde niet-stationaire situatie tonen aan of er water uit de plas kan verdwijnen of niet. Indien alle stroombanen in de plas uitkomen, kan er van uitgegaan worden dat er geen water uit de plas via het grondwater naar de omgeving verdwijnt. Indien nagenoeg geen stroombanen naar de plas toestromen, kan er van uitgegaan worden dat er veel water via het grondwater naar de (wijde) omgeving verdwijnt. Indien er groot deel, maar niet alle stroombanen naar de plas toestromen, zijn niet-stationaire stroombaanberekeningen nodig om een betrouwbare uitspraak te kunnen doen over de verspreiding van eventueel in de opvulling aanwezige verontreinigingen.

5 Resultaten grondwatermodel losgekoppelde plas

Een losgekoppelde plas onderscheidt zich van een aangekoppelde plas daarin dat het waterpeil in de plas het waterpeil in de rivier slechts indirect via het grondwater volgt. Het waterpeil in de plas wordt ook beïnvloed door gehanteerd waterpeilen (of drainage niveaus) van de gebieden die aan de plas grenzen. Tenzij er in de plas een maximum peil gehandhaafd wordt, zal een van de rivier losgekoppelde plas in Nederland gemiddeld altijd licht infiltreren. Dat komt omdat de hoeveelheid neerslag in Nederland gemiddeld groter is dan de hoeveelheid verdamping en het overschot aan water de plas alleen via de bodem kan verlaten.

In de meeste gevallen zal er grondwater aan een zijde van de plas instromen (kwel) en zal er aan de andere zijde van de plas water uit de plas naar het grondwater stromen (infiltratie). In geval van een drainerende rivier (de meest voorkomende situatie) zal de stroming gemiddeld naar de rivier gericht zijn en zal er grondwater uit de omgeving, deels via de plas, naar de rivier stromen. In geval van een infiltrerende rivier (een situatie die ook voorkomt) zal de stroming vanaf de rivier gericht zijn en zal er rivierwater, deels via de plas, naar het grondwater in de omgeving stromen. Bij wisselende rivierwaterstanden, bv. door een hoogwaterperiode op een gemiddeld drainerende rivier, kan deze stroming tijdelijk omkeren.

De grootte van de stroming via de plas en daarmee ook de hoeveelheid water die uit de plas infiltreert, zal afhangen van de bodemweerstand van de plas en van de variatie daarin over de plas en dus van de mate van doorlatendheid en de laagdikte van de opvulling. Op plekken waar de laagdikte van de opvulling relatief dun is zal er meer water de plas kunnen verlaten dan op plekken waar deze laag relatief dik is. Daartegenover staat dat op plekken waar de opvulling dunner is er ook minder vervuild materiaal in de bodem van de plas aanwezig is.

Voor het analyseren van losgekoppelde plassen is gebruik gemaakt van hetzelfde model als bij de analyse voor aangekoppelde plassen. Daarbij zijn enkele noodzakelijke modelaanpassingen gedaan om een situatie met een losgekoppelde plas te kunnen creëren.

De resultaten van de berekeningen voor de aangekoppelde plas tonen aan dat voor het bepalen van de omhullende van de plas volstaan kan worden met stroombaanberekeningen, startend langs de rand van de plas, voor de hydrologische toestand, bepaald over een recente periode van 10 jaar. Daarom hebben we ons voor de losgekoppelde plas beperkt tot deze berekeningen, waar de volgende situaties zijn beschouwd:

- A. De periode tussen 1-4-2008 en 31-03-2018 met de werkelijk opgetreden rivierwaterstanden gedurende die periode.
- B. Als A, maar waarbij het rivierpeil over de gehele periode is verlaagd met respectievelijk 0.5, 1.0 en 2.0 m.
- C. Als A, maar waarbij het rivierpeil over de gehele periode is verhoogd met respectievelijk 0.5, 1.0 en 2.0 m

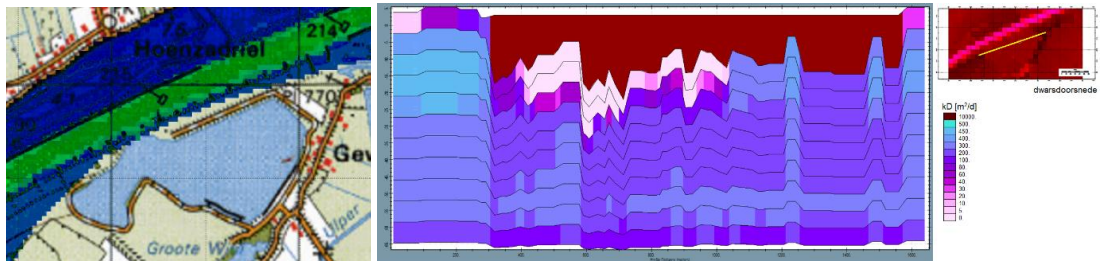
Voor deze situaties zijn de volgende stroombaanberekeningen uitgevoerd:

- 1. Waterdeeltjes starten 100 m buiten de plasrand op een diepte van NAP –5 m worden stationair gevolgd tot hun eindpunt met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018
- 2. Als 1, maar de waterdeeltjes starten op een diepte van NAP –10 m;
- 3. Als 1, maar de waterdeeltjes starten op een diepte van NAP –20 m.

Er zijn diverse stroombaanberekeningen uitgevoerd. De resultaten van al deze berekeningen zijn terug te vinden in bijlage B achter in dit rapport. In dit hoofdstuk worden alleen de meest relevante resultaten kort besproken.

5.1 Modelaanpassing

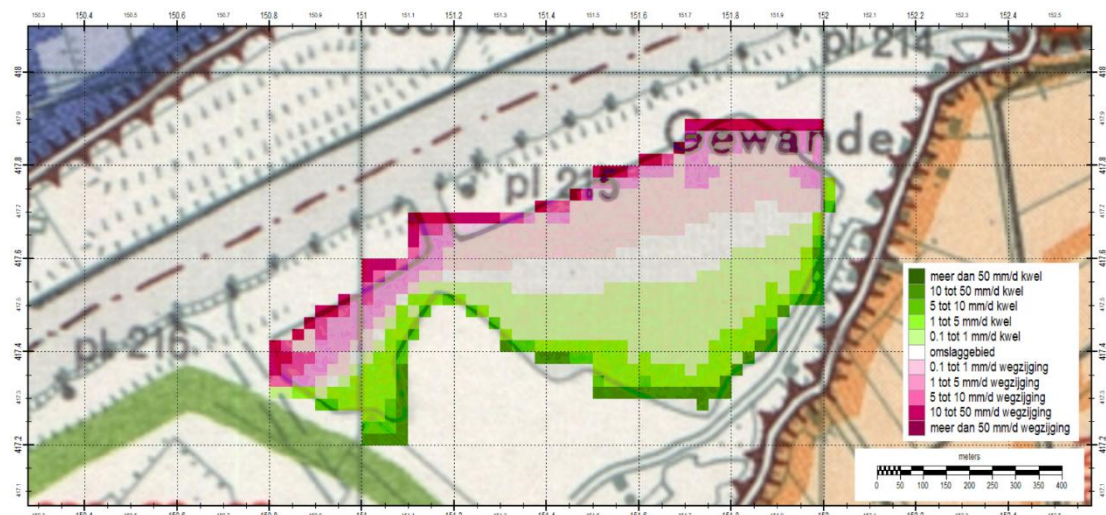
De losgekoppelde plas kan in model worden gerepresenteerd als een zone met extreem hoge doorlatendheid (het donkerrode vlak in Figuur 27). Dit heeft tot gevolg dat het model in de gehele zone nagenoeg dezelfde waarde voor de stijghoogte (i.c. de plaswaterstand) berekent. Ook wordt de (freatische) bergingscoëfficiënt van de cellen in deze zone worden aangepast. De cellen in de bovenste laag van de “plas” krijgen een bergingscoëfficiënt gelijk aan 1. Met deze aanpassingen gedraagt deze zone zich als een van de rivier losgekoppelde plas.



Figuur 27 Losgekoppelde plas (links) en kD-waardes in de modellagen in en onder de plas (rechts)

Hierdoor kan er in het model naast verticale uitwisseling tussen grondwater en plaswater over de bodem van de plas ook horizontale uitwisseling plaatsvinden over de wanden van de plas. De potentieel ongelimiteerde uitwisseling met de rivier, via het oppervlaktewater, is in deze situatie niet meer mogelijk.

Het peil van de losgekoppelde plas beweegt nog slechts vertraagd en gedempt mee met dat van de rivier. De plas kan worden gezien als dagzomend grondwater, waarvan de stand uiteraard wel sterk door het peil van de nabijgelegen rivier wordt bepaald. Opstuwefecten door wind zijn beperkt en in de tijd willekeurig; zij kunnen daarom worden verwaarloosd. Er is wel een zeker effect door neerslag en verdamping. Al met al zal de losgekoppelde plas gemiddeld aan de landzijde draineren en aan de rivierzijde draineren; terwijl dat in hoogwaterperiodes juist andersom zal zijn. De drainage en infiltratieflux is altijd het sterkst aan de plasranden, maar zal ook deels via de plasvulling verlopen. Figuur 28 geeft een beeld van ruimtelijke verdeling over de plas van de over 10 jaar gemiddelde kwel en infiltratie. Tabel 5 geeft de getallen.



Figuur 28 Gemiddelde kwel / wegzijging voor de losgekoppelde plas Koornwaard voor de periode 01-04-2008 tot 31-03-2018

In de gepresenteerde modelresultaten zijn in Figuur 28 voor de randcellen van de plas de door het model berekende verticale en horizontale uitwisseling met het grondwater onder en naast de plas gecombineerd tot één netto in- of uitstroom. In Tabel 5 is wel onderscheid gemaakt tussen de berekende verticale en horizontale uitwisseling met het grondwater. De reden daarvoor is enerzijds dat het zuiver de modelresultaten weergeeft en anderzijds dat het een indruk geeft van de verhouding van wateruitwisseling langs de plasrand en over de rest van de plas.

Uit de figuur blijkt dat er in ongeveer de helft van de plas, de zuidelijke helft, water de plas instroomt en in de andere helft water de plas uitstroomt. Tabel 5 laat zien dat er in de situatie met actuele rivierwaterstanden gemiddeld net iets meer water de plas uitstroomt dan instroomt. Omgerekend over het totale oppervlak van de plas komt dat neer op een berekende netto uitstroom van ruim 21 mm op jaarbasis.

Tabel 5 Berekende gemiddelde instroom en uitstroom over de gehele plas voor de verschillende peilscenario's met losgekoppelde plas

Peil scenario m	Bodem in m3/jaar	Bodem uit m3/jaar	Wand in m3/jaar	Wand uit m3/jaar	Totaal in m3/jaar	Totaal uit m3/jaar
0 (actueel)	132765	126945	149669	165050	282434	291995
+ 0.5	62840	124019	115565	9340	178404	186951
+ 1.0	11279	139443	121610	1004	132888	140447
+ 2.0	10325	272248	265676	62932	276001	281588
– 0.5	209099	136068	183723	267333	392822	403401
– 1.0	288975	148585	217528	369396	506502	517981
– 2.0	454724	179289	284836	573614	739560	752903

In deze tabel zijn ook de berekeningsresultaten van de 6 peilscenario's opgenomen. Voor alle scenario's blijkt de berekende totale uitstroom iets groter dan de berekende instroom. De berekende jaarlijkse netto uitstroom varieert daarbij van iets meer dan 21 mm tot bijna 30 mm en bedraagt gemiddeld ongeveer 1.6% van het totaal uitgewisselde watervolume tussen plaswater en grondwater.

Tabel 6 geeft een overzicht van de waterstromen door de opvulling van de plas.

Tabel 6 Berekende gemiddelde instroom en uitstroom door de opvulling van de plas voor de verschillende peilscenario's met losgekoppelde plas

Peil scenario m	Kwel m3/jaar	Wegzijging m3/jaar	Areaal in m2	Areaal uit m2
0 (actueel)	35165	32783	153750	152500
+ 0.5	16239	37090	124375	181875
+ 1.0	2461	46533	48750	257500
+ 2.0	147	90635	2500	303750
– 0.5	57136	31418	175000	131250
– 1.0	80650	31537	186875	119375
– 2.0	129645	33618	199375	106875

Uit Tabel 6 blijkt dat de opvulling van de losgekoppelde plas voor de actuele rivierwaterstanden uit twee bijna even grote helften bestaat. Een helft waar water de plas in stroomt (kwel) en een helft waar water de plas uit stroomt (wegzijging). In tegenstelling tot bij de totale plas (Tabel 5) is de uitstroom over de opvulling iets kleiner dan de instroom.

De met het model berekende totale hoeveelheid kwel naar de plas bedraagt gemiddeld bijna 0.3 miljoen m³/jaar (Tabel 5). Dit treedt op over iets minder dan de helft van de plas. Dat komt overeen met een gemiddelde hoeveelheid voor het kwellende deel van het plasoppervlak van 1.27 m per jaar. Het model berekent een iets groter areaal waar wegzijging optreedt. De totale berekende gemiddelde wegzijging is met een kleine 0.3 miljoen m³/jaar net wat groter dan de berekende gemiddelde kwel. De gemiddelde berekende wegzijging bedraagt daarmee 1.29 m per jaar. Voor het opgevulde deel van de plas gelden voor wat de oppervlaktes kwel en wegzijging betreft iets andere verhoudingen dan voor de gehele plas (Tabel 6). Het oppervlak kwel is hier in de situatie met actuele rivierwaterstanden iets groter dan het oppervlak met wegzijging. De totale hoeveelheden van beide fluxen zijn met resp. 0.23 m/jaar kwel en 0.21 m/jaar wegzijging veel kleiner. De fluxen zijn ook beduidend kleiner dan die bij de aangekoppelde plas (Tabel 3 en Tabel 4), terwijl de relatieve verschillen tussen fluxen over opvulling en fluxen over de gehele plasbodem groter zijn dan die bij de aangekoppelde plas. De oorzaak daarvan is dat er bij de losgekoppelde plas voor alle peil scenario's een omslagzone van kwel naar wegzijging door de plas loopt.

De hoeveelheid water die via het opgevulde deel van de plas stroomt en die via de rest van de plas stroomt hangt mogelijk sterk af van de doorlatendheid van de opvulling. De verspreiding van deeltjes of het nabij de bron houden, zal waarschijnlijk nauwelijks afhangen van de doorlatendheid van de opvulling. Wat wel van deze doorlatendheid afhangt, is de hoeveelheid water die er doorheen stroomt en dus de mate van potentiële vervuiling van de plas vanuit de opvulling.

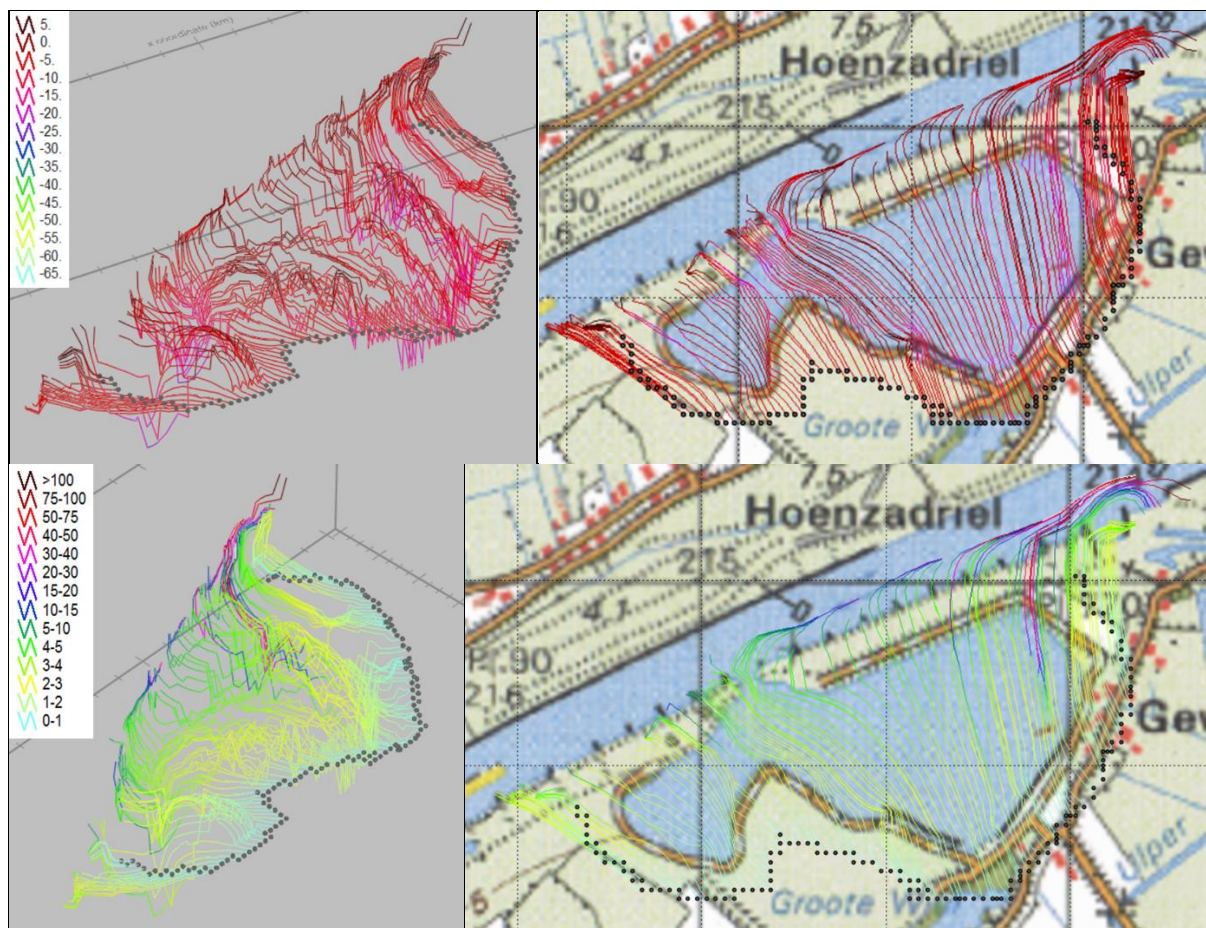
Onderstaande figuren, Figuur 29 en verder, geven een overzicht van de resultaten van een aantal relevante stroombaanberekeningen met het grondwatermodel. In deze figuren geeft de linkerhelft steeds een 3D aanzicht en de rechter helft een boven aanzicht. De bolletjes zijn de start punten van de stroombanen. De legenda geeft een overzicht over de diepte van de stroombanen of van de reistijden van de stroombanen vanaf hun vertrekpunten (de bolletjes).

5.2 Simulaties voor de losgekoppelde plas met actuele rivierwaterstanden

In de actuele situatie zijn de waterpeilen in de Maas het grootste deel van de tijd beduidend lager dan het gehanteerde waterpeil van de watergangen in de regio. Daarom betreft het hier in de rivier een gemiddeld drainerende situatie, die slechts bij hoogwater op de Maas tijdelijk omslaat in een infiltrerende situatie.

De stroombanen in deze berekeningen op verschillende dieptes in het watervoerend pakket starten op ca. 100 m buiten de rand van de plas, waarvan aangenomen wordt dat de ondergrond niet is aangetast door de ontgraving en waar dus de oorspronkelijke geohydrologische situatie nog in tact is.

Figuur 29 geeft het resultaat van een berekening met stroombanen die starten op ca. de halve diepte van de opgevulde plas (10 m diep). Uit de figuur blijkt dat voor de actuele situatie met huidige rivierpeilen en losgekoppelde plas alle stroombanen naar de plas of de rivier toe stromen. Feitelijk gaan alle stroombanen richting rivier, waarvan een deel via de plas. De berekende tijd, die het water nodig heeft om de rivier te bereiken, ligt voor de meeste stroombanen in de orde van 3 tot 10 jaar. Het water dat via de plas naar de rivier stroomt, heeft eigenlijk twee verblijftijden, waarvan de verblijftijd van plas tot rivier maatgevend is voor de uitspoeling van potentieel verontreinigd plaswater.



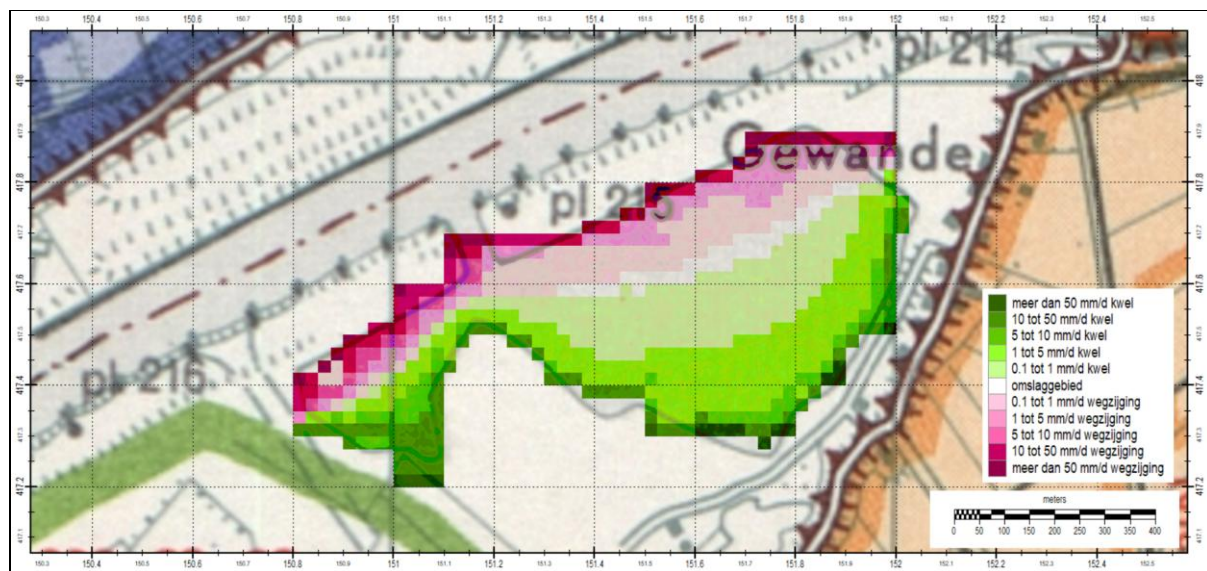
Figuur 29 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op NAP –10 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

De resultaten van de stroombaanberekeningen, startend op dieptes van 5 en van 20 m geven een vergelijkbaar beeld (bijlage B).

5.3 Losgekoppelde plas met verlaagde rivierwaterstanden

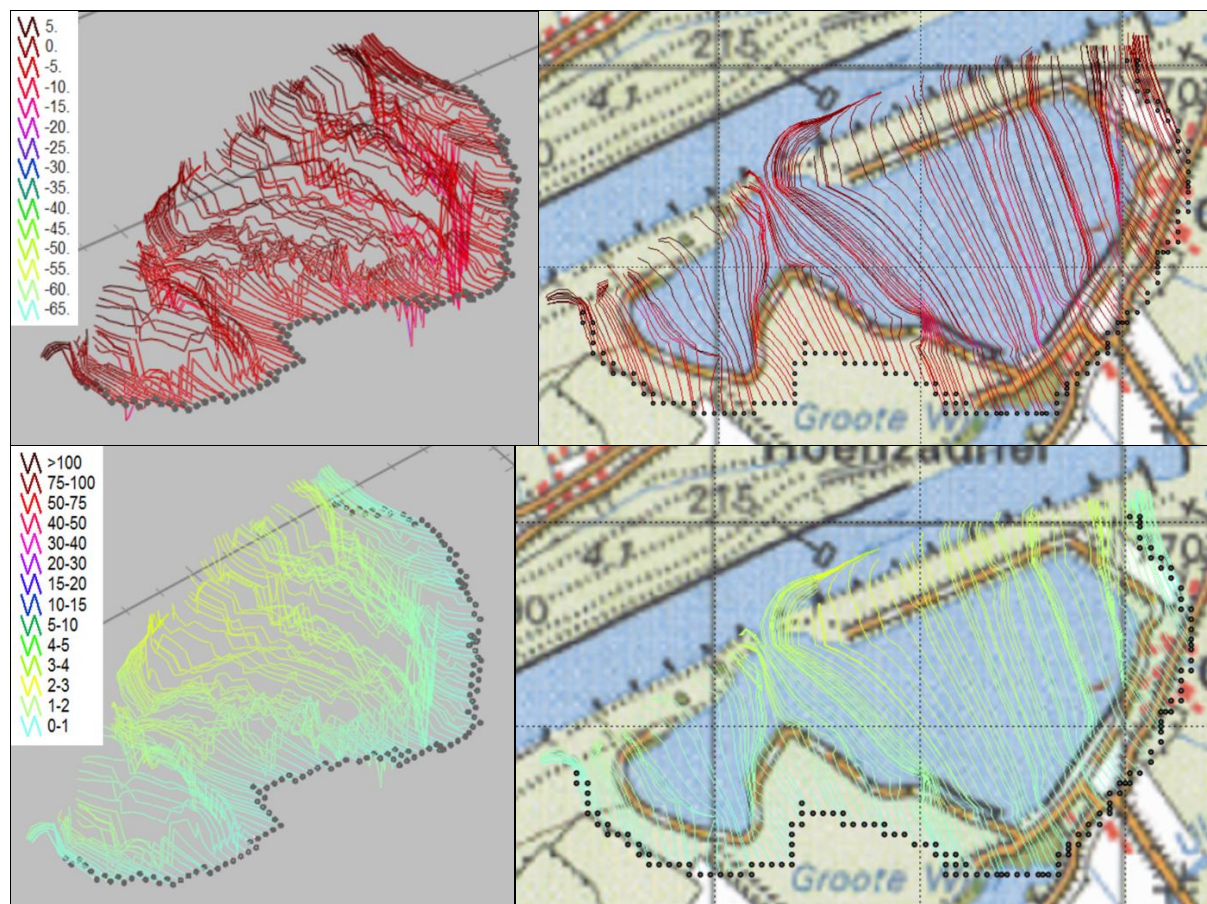
Met het model zijn 3 fictieve peilsituaties doorgerekend, waarbij het waterpeil van de Maas in het model voor alle tijdstappen met respectievelijk 0.5 m, 1 m en 2 m is verlaagd. Ten opzichte van de situatie met actuele rivierwaterstanden neemt het areaal van de plas waar kwel optreedt geleidelijk toe naarmate de rivierwaterstanden verder verlaagd worden. Hier worden daarom alleen de resultaten van de met 2 meter verlaagde rivierwaterstanden beschreven. De resultaten van de overige exercities zijn terug te vinden in bijlage B.

In de situatie met 2 meter verlaagde rivierwaterstanden is het areaal waar nog wegzijging optreedt verkleind tot ruim een derde deel van de plas. Figuur 30 laat zien dat de rivier ook wezenlijk meer draineert dan in de situatie met actuele rivierwaterstanden (Figuur 28).



Figuur 30 Kwel (+) / wegzijging (-) voor de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas peil van 2.0 m

Figuur 31 laat zien dat de stroombanen in het algemeen minder diep gaan dan in de situatie met actuele rivierwaterstanden (Figuur 29). Ook zijn de verblijftijden nu duidelijk kleiner, orde 1 tot 3 jaar.

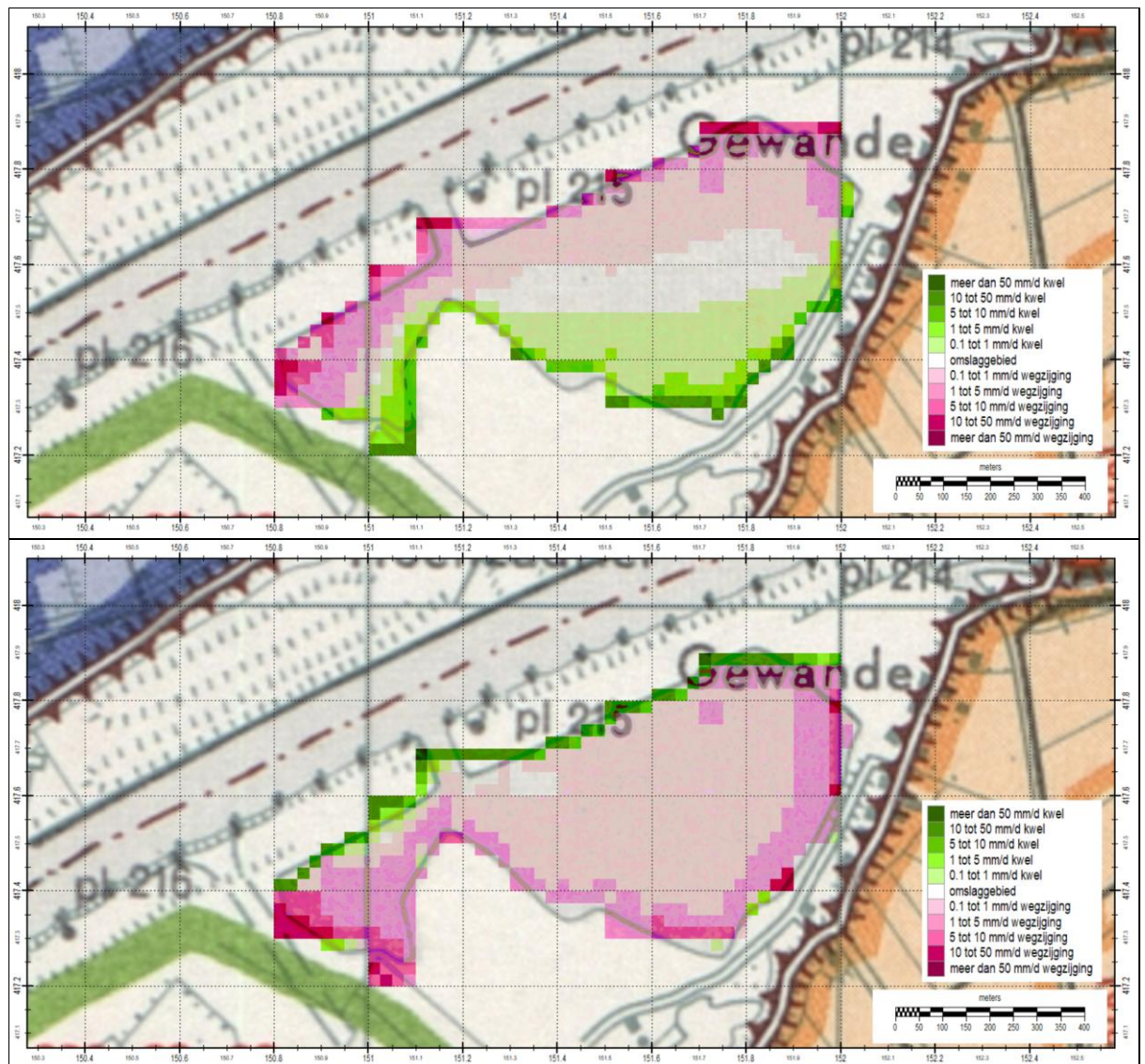


Figuur 31 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verlaagd Maas peil van 2.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

5.4 Losgekoppelde plas met verhoogde rivierwaterstanden

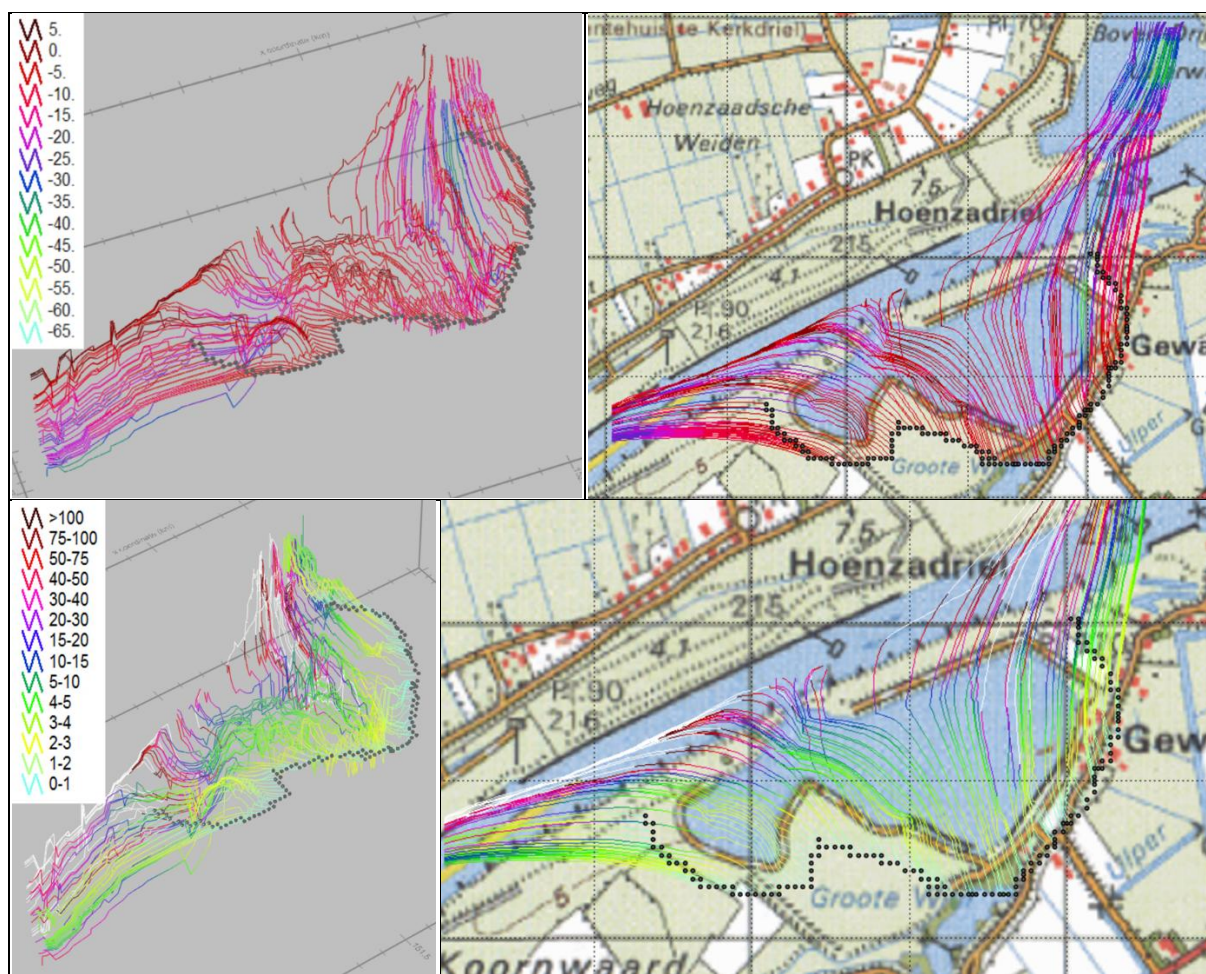
Met het model zijn 3 fictieve peilsituaties doorgerekend, waarbij het waterpeil van de Maas in het model voor alle tijdstappen met respectievelijk 0.5 m, 1 m en 2 m is verhoogd. Ten opzichte van de situatie met actuele rivierwaterstanden neemt het areaal van de plas waar kwel optreedt vrij snel af naarmate de rivierwaterstanden verder verhoogd worden. Door de hogere rivierwaterstanden gaat ook de waterstand in de plas steeds verder omhoog. Daardoor slaat ook de stroomrichting van het grondwater om van stroming naar de rivier toe in de situatie met huidige rivierwaterstanden naar stroming van de rivier af bij 2 m hogere rivierwaterstanden. De locatie waar kwel in de plas optreedt, slaat daarbij ergens om van ver van de rivier af naar vlakbij de rivier (Figuur 32).

In deze situatie is het areaal waar nog kwel optreedt verkleind tot een smalle strook langs de noordrand van de plas, de rand die parallel aan de rivier loopt. De tegenoverliggende rand is omgeslagen van kwellend in de situatie met actuele rivierwaterstanden, naar infiltrerend in de situatie met 2 m verhoogde rivierwaterstanden. De rivier zelf is daarbij ook omgeslagen van overwegend drainerend naar overwegend infiltrerend.



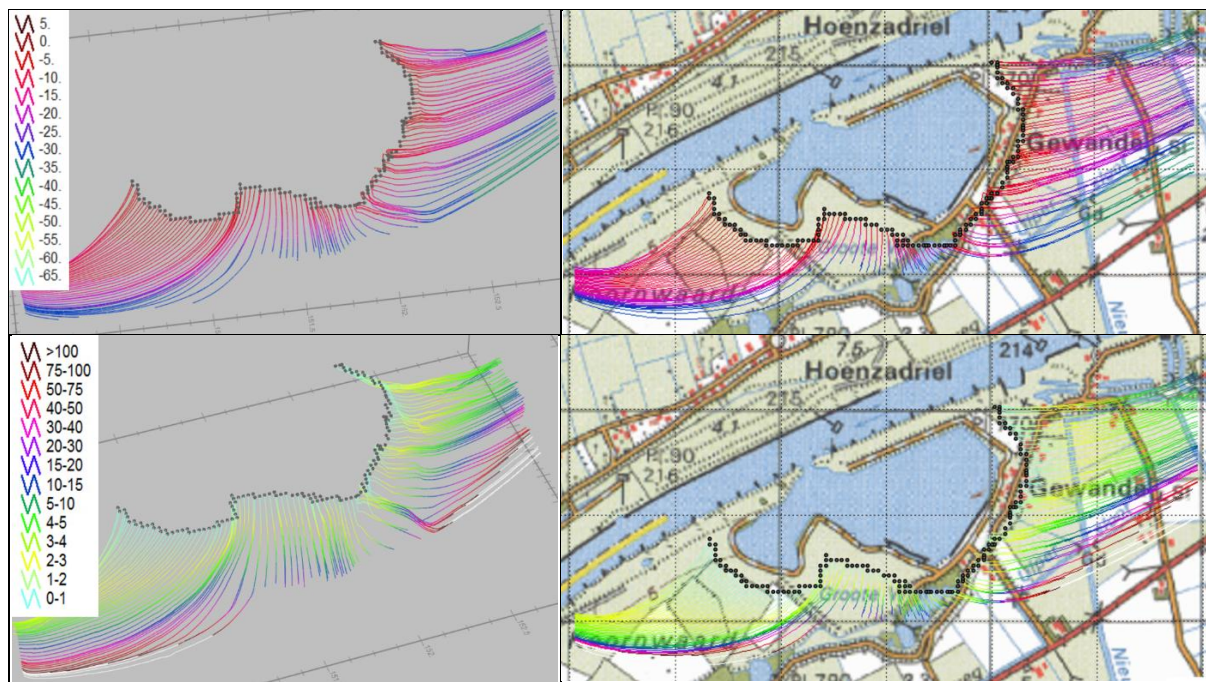
Figuur 32 Kwel (+) / wegziging (–) voor de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas peil van 0.5 m (boven) en 2.0 m (onder)

De stroombanen, die in de situatie met de actuele waterstanden allemaal in de rivier uitkomen, stromen in de situaties waarbij de rivierwaterstanden met 0.5 en met 1.0 m zijn verhoogd gedeeltelijk onder de rivier door (Figuur 33). De verblijftijden nemen daarbij ook toe tot vele tientallen jaren.



Figuur 33 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas peil van 0.5 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Bij een verdere stijging van de rivierwaterstanden (+ 2.0 m) gaat het grondwater een andere kant uit stromen (Figuur 34). Er lijken dan geen stroombanen meer richting de rivier te gaan.



Figuur 34 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas peil van 2.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

5.5 Conclusie losgekoppelde plassen

Stroombaan berekeningen startend op 100 m vanaf de rand van de plas op 10 m diepte gebaseerd op de gemiddelde situatie over een periode van 10 jaar geven een goede indicatie of er water uit de plas kan verdwijnen of niet. Indien alle stroombanen in de rivier uitkomen (nabij de plas), kan worden aanvaard dat is aangetoond dat geen lekwater uit de plasbodem via het grondwater naar de omgeving verdwijnt. Indien nagenoeg geen stroombanen in de rivier uitkomen, moet er van uitgegaan worden dat er veel water naar de (wijde) omgeving verdwijnt. Indien een groot deel van de stroombanen, maar niet alle stroombanen in de rivier uitkomen, zijn niet-stationaire stroombaanberekeningen nodig om een betrouwbare uitspraak te kunnen doen over de verspreiding van eventueel in de opvulling aanwezige verontreinigingen.

6 Onderbouwing tot methode “omhullend vlak”

De volgende redenering, die mede gebaseerd is op de uitgevoerde scenario berekeningen, ligt ten grondslag aan de methode van het omhullend vlak.

- In het grondwatersysteem geraakte stoffen uit de plasbodem verspreiden zich niet als het uit de plas geïnfiltreerde grondwater terugstroomt naar de plas of uitstroomt in de rivier.
- In perspectief van plasmagrootte, beheerterrein en operationele ruimte is 100 meter een bruikbare afstand rond de plas waar de beïnvloeding (door tijdelijk infiltrerend plaswater) binnen moet blijven.
- Een representatieve riviersituatie is een recente periode van 10 jaar waarin 1 of meerdere maatgevende hoogwatergolven zijn opgetreden. Deze periode wordt gebruikt om een gemiddelde stromingssituatie te bepalen.
- Als vanaf de omhullende op 100 m rond de plas al het grondwater zich richting plas of rivier verplaatst, is er geen verspreiding buiten deze zone mogelijk, en voldoet de situatie aan de eis dat geen verspreiding vanuit de plas buiten een beperkte zone kan plaatsvinden.

Samenvatting van de methode

Bij een gemiddeld drainerende rivier kan gedurende een hoogwater periode tijdelijk (tot enkele maanden) infiltratie naar het grondwater optreden. De infiltratie gebeurt dan ook in een aanliggende plas en in de vulling daarin. Na de hoogwater periode stroomt het geïnfiltreerde water terug naar de drainerende rivier. Als het maximaal beïnvloede gebied een beperkte grootte heeft, is dat toelaatbaar voor het criterium "beïnvloed grondwater blijft bij de bron". De grens ligt op 100 meter rond de plasrand en is gebaseerd op de uitvoeringspraktijk, de realiteit van grondgebruik en de nauwkeurigheid waarop de beoordeling in de methode kan plaatsvinden.

Voor de beoordeling maken we gebruik van het bestaan van een “omhullend vlak”. Een omhullend vlak is een 3 dimensionale begrenzing waarbinnen de beïnvloeding vanuit de plasvulling beperkt blijft. Bestaat zo'n vlak binnen een grens op 100 meter van de plas-rand dan wordt voldaan aan het criterium dat "het potentieel beïnvloed grondwater nabij de bron blijft".

Het bestaan van een omhullend vlak wordt aangetoond op basis van stroomlijnen in het grondwater startend op 100 meter rond de plas in een 10 jaar gemiddelde situatie. Wanneer alle waterdeeltjes gevolgd vanaf 100 m rond de plas in de rivier afstromen, bestaat er een omhullend vlak binnen 100 m van de plas. In een situatie die robuust is voor toekomstige en onbekende veranderingen moet de regionale grondwaterstroming gemiddeld over een periode van 10 jaar significant en stabiel richting de rivier zijn. Dat wordt aangetoond als de berekende waterdeeltjes binnen beperkte tijd afstromen.

Beschrijving uitvoering van de methode "omhullend vlak"

Daarvoor worden twee stappen doorlopen (zie ook de handreiking):

Stap 1 – Maak een lokaal model op basis van een beschikbaar, regionaal grondwater model.

- Snijd een deelmodel uit een regionaal model:
 - Neem langs de rivier een lengte van 5 km, met de plas in het centrum.
 - Gebruik de rivier daarbij als modelrand en leg de tegenover liggende rand op ca 5 km afstand.
 - Zorg dat de celgrootte 25 bij 25 m is en neem de cel-diktes van het regionale model.

- Controleer de schematisatie en de parameterwaarden van het oppervlaktewatersysteem in de omgeving van de plas aan de hand van de werkelijke situatie en pas waar nodig aan met oog op (potentieel) drainerende systemen die lokale stroming beïnvloeden.
- Controleer de bathymetrie van de plas in de model-schematisatie met het inrichtingsontwerp op de volgende onderdelen en pas zo nodig het model aan:
 - de ligging van de plasrand in de eindsituatie.
 - de eerste scheidende laag mag niet boven de plasbodem liggen: in dat geval is de methode niet bruikbaar.
- Voor aangetakte plassen: zorg dat het plaspeil met het rivierpeil meebeweegt in de modelrandvoorwaarde. Voor niet-aangetakte plassen: zorg dat het waterniveau in de plas wordt berekend (in plaats van opgegeven) en dat ook de hoogwatersituatie juist wordt gemodelleerd.
- Geef een geohydrologische samenvatting van de grondwaterstroming bij de rivier ter plaatse van de plas.
- Identificeer en verdisconteer bekende hydrologisch-significante ontwikkelingen in de komende 10 jaar.

Stap 2 – Bepaal of het omhullend vlak binnen de grens van 100 meter bestaat.

- Voer met het model uit stap 1 een niet-stationaire modelberekening uit waarbij de rivierwaterstanden per dag zijn ingevoerd voor een zo recent mogelijke periode van 10 jaar. De periode wordt bepaald door de beschikbaarheid van gemeten rivierwaterstanden.
- Presenteer een figuur met de berekende stijghoogte in de infiltrerende fase aan het begin van een hoogwater en beschrijf de plausibiliteit.
- Reken voor iedere model cel (horizontaal en verticaal) de gemiddelde stijghoogte over die periode van 10 jaar uit.
- Construeer een model dat de 10-jaar-gemiddelde situatie representeert:
 - Verwijder alle randvoorwaarden, onttrekkingen, etc. in het model behalve de oorspronkelijke k-waarde verdeling (en behoud natuurlijk wel de cel afmetingen).
 - Geef iedere cel de gemiddelde stijghoogte met de GHB (general head boundary) randvoorwaarde en een zeer hoge conductance ($kD = 10.000 \text{ m}^2/\text{d}$).
 - Reken dit model stationair door.
- Voer met dit model stroombaan berekeningen uit, startend op 100 meter van de buitengrens van de plas in de begin situatie en 10 meter onder maaiveld (of 10 m onder gemiddelde plas waterstand, indien dat relevant lager is) en onderling op (cel-) afstand van 25 meter.
- Kleur de verblijftijd langs de stroombanen: tot 10 jaar blauw, tot 25 jaar groen, tot 50 jaar geel, tot 100 jaar oranje tot 250 jaar en langere verblijftijden rood.
- Presenteer de figuur met legenda voor verblijftijden.

Toelichting Stap 1:

Langs de rivieren zijn regionale grondwater modellen gebouwd door regionale consortia. Deze worden voortdurend verbeterd en vormen een geaccepteerd uitgangspunt voor detailstudies. Voor elke detail studie moet de lokale situatie worden gecontroleerd en bijgesteld, met name de parameters en de ligging van het oppervlaktewater en de drainage. De plasomvang is belangrijk met het oog op de stroming van grondwater en de ligging van relevante kleilagen moet juist in het model zijn opgenomen. Als de plas een kleilaag doorsnijdt is de methode niet toepasbaar. De samenstelling van de vulling is niet belangrijk voor de beoordeling van de modelresultaten.

De grootte van 5 bij 5 km is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

1. De rand ligt op meer dan 3 maal de spreidingslengte, De maximale, realistische spreidingslengte van 1700 meter is gebaseerd op zandwinputten langs grote rivieren die liggen in pakketten van ten hoogste 50 meter dikte met een gemiddelde doorlatendheid van hoogstens 60 meter per dag met een deklaag die in de uiterwaarden niet meer dan 1000 dagen weerstand zal hebben. In bijzondere gevallen zal hierop aanpassing nodig kunnen zijn.
2. Nabij de rivier is de regionale stroomrichting van het grondwater vrijwel loodrecht op de rivier.
3. De rivier vormt een waterscheiding in het beschouwde zandpakket omdat hij significant draineert als het resultaat van de methode aan de eisen voldoet. Indien dit niet het geval is (bijvoorbeeld bij diepe polders aan de overzijde van de rivier) moet het model daarop zijn aangepast.
4. De plas ligt nabij de rivier en heeft een omvang in de orde van 1 km².
5. De buitenste omvang van de vulling en de plas in de eindsituatie zal gelijk zijn aan de plasomvang in de beginsituatie. Dit bepaalt de grens van 100 meter waar stroombanen starten.

In de rapportage moet worden aangegeven dat aan deze uitgangspunten wordt voldaan.

Bij punt 2 en 3: als de situatie niet voldoet aan deze uitgangspunten zal met deze methode blijken dat dan ook niet wordt voldaan aan het criterium.

Toelichting Stap 2:

Het gebruik van de gemiddelde situatie over de 10-jaar-periode vereenvoudigd het beoordelen en berekenen van stroombanen. De gemiddelde snelheden in het model worden berekend met behulp van de gemiddelde stijghoogtes op de rekenpunten.

Als alle stroombanen gemiddeld over 10 jaar duidelijk richting de rivier en plas stromen, zal al het eventueel tijdelijk uit de plasvulling komende water "afstromen nabij de bron". De figuur met gekleurde stroomlijnen levert het bewijs voor dat de stroming uit de plas binnen een omhullend vlak met beperkte omvang optreedt. De figuur toont direct of de gemiddelde stroming richting de rivier en de plas is (of niet = afkeuring). De kleuring met blauw, groen en beperkt (<5%) geel en oranje toont aan of de situatie hydrologisch stabiel is. Als een significant aantal (>1%) stroomlijnen rood kleurt doet het grondwater er op die plaats 100 of meer jaar over om de afstand van 100 meter tot de rivier of plas af te leggen. Dan kunnen kleine veranderingen in het rivier regiem tot omslag van de gemiddelde stromingsrichting leiden Deze situatie is hydrologisch niet robuust en moet nader worden beoordeeld.

7 Referenties

De Lange, W.J., 2011. Handreiking geohydrologische beoordeling bij herinrichting van diepe plassen, Rapport 1203224, Deltares Utrecht.

Deltares, juni 2020. Methode voor de geohydrologische beoordeling van het met zandig materiaal verondiepen van plassen in uiterwaarden (aanvulling in kader van PFAS). Deltares rapport 11205055-000-BGS-0012.

A Resultaten stroombaanberekeningen aangekoppelde plas

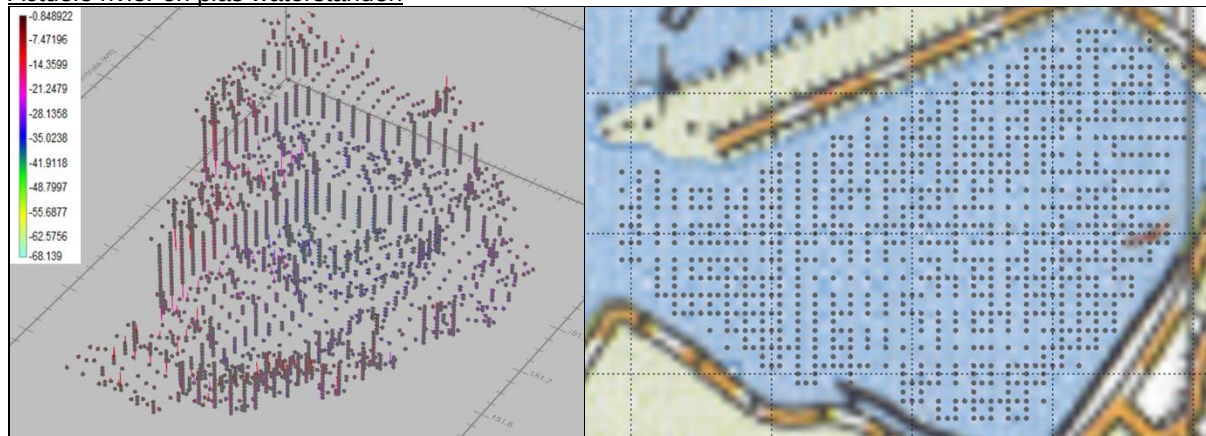
De figuren in deze bijlage geven een overzicht van de resultaten van de stroombaanberekeningen met het grondwatermodel voor situaties waarbij de plas met de rivier verbonden is (aangekoppeld) en het waterpeil in de plas dus meebeweegt met het waterpeil van de rivier.

Voor de figuren in deze bijlage geldt dat de linker helft steeds een 3D aanzicht geeft en de rechter helft een boven aanzicht. De bolletjes zijn de start punten van de stroombanen. De legenda geeft een overzicht over de diepte van de stroombanen.

A.1 Stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018

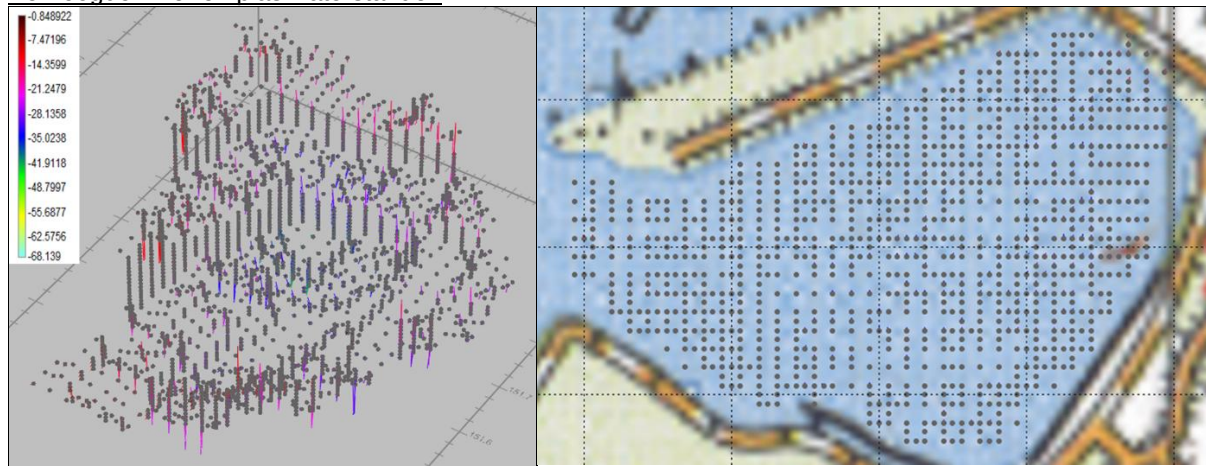
Hierbij starten de stroombanen bovenin het watervoerend pakket direct onder de opvulling van de plas aan het begin van de infiltratie periode. De stroombanen lopen door tot het eind van de rekenperiode, waarbij het hoogwater op de rivier ruimschoots voorbij is en er weer normale waterstanden in de rivier en de plas heersen.

Actuele rivier en plas waterstanden

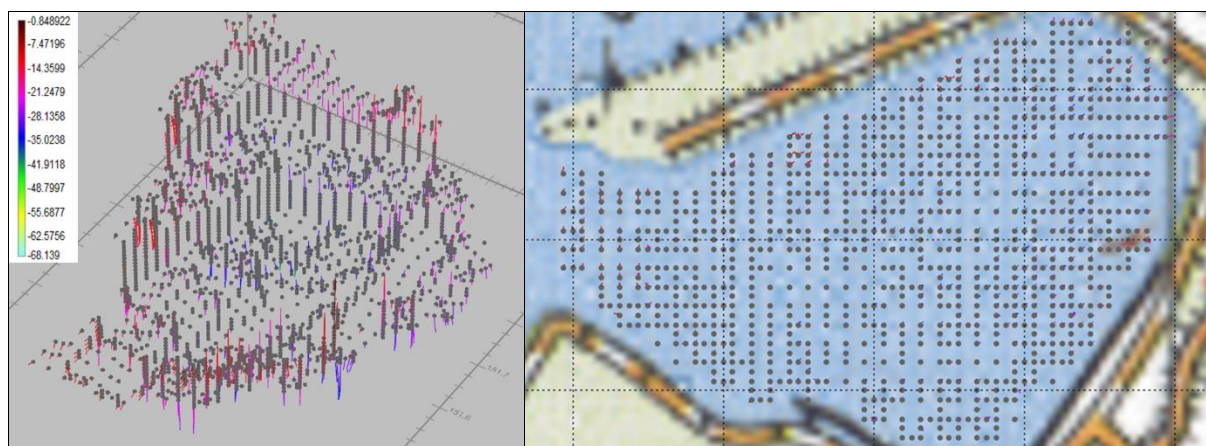


Figuur A.1 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018

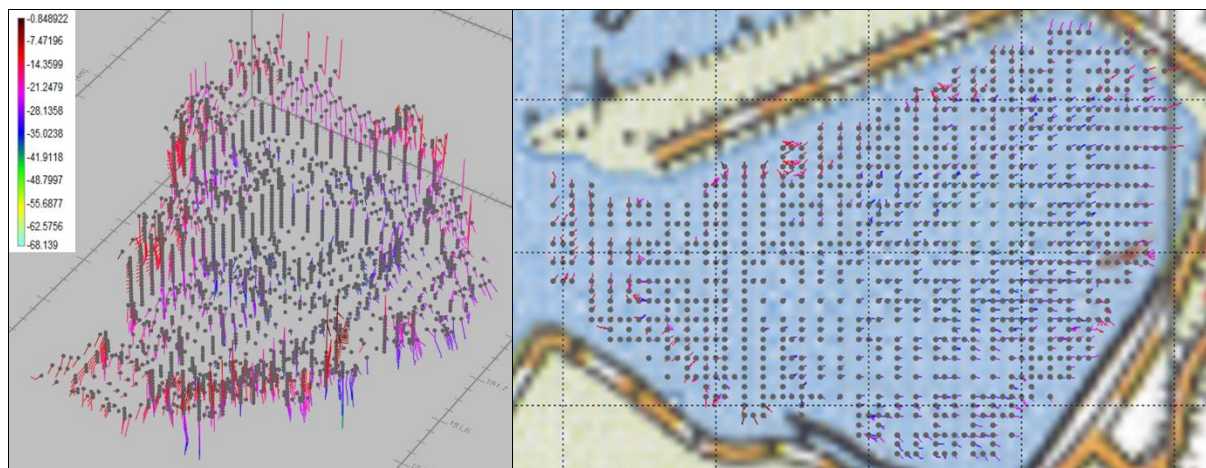
Verhoogde rivier en plas waterstanden



Figuur A.2 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m

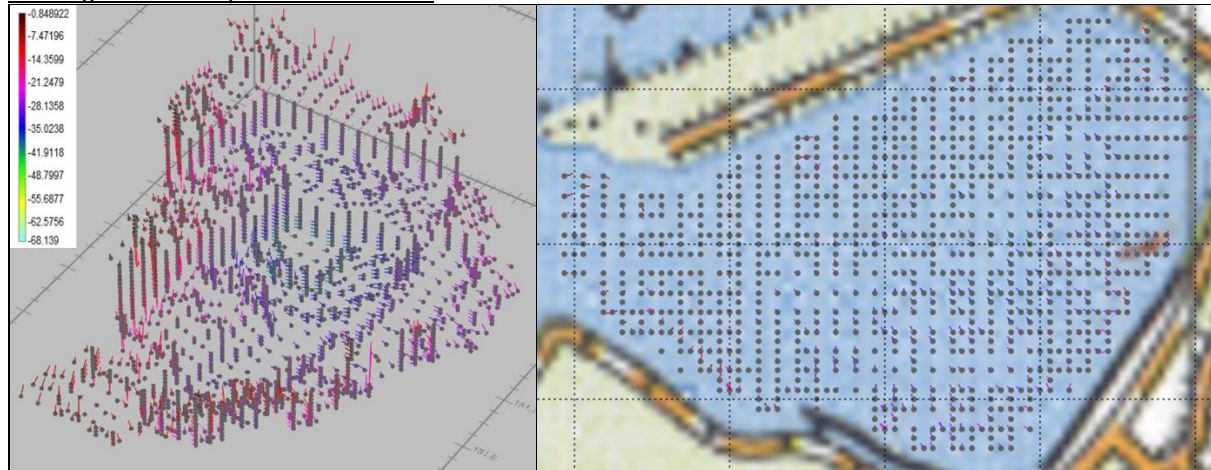


Figuur A.3 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verhoogd Maas en plas peil van 1.0 m

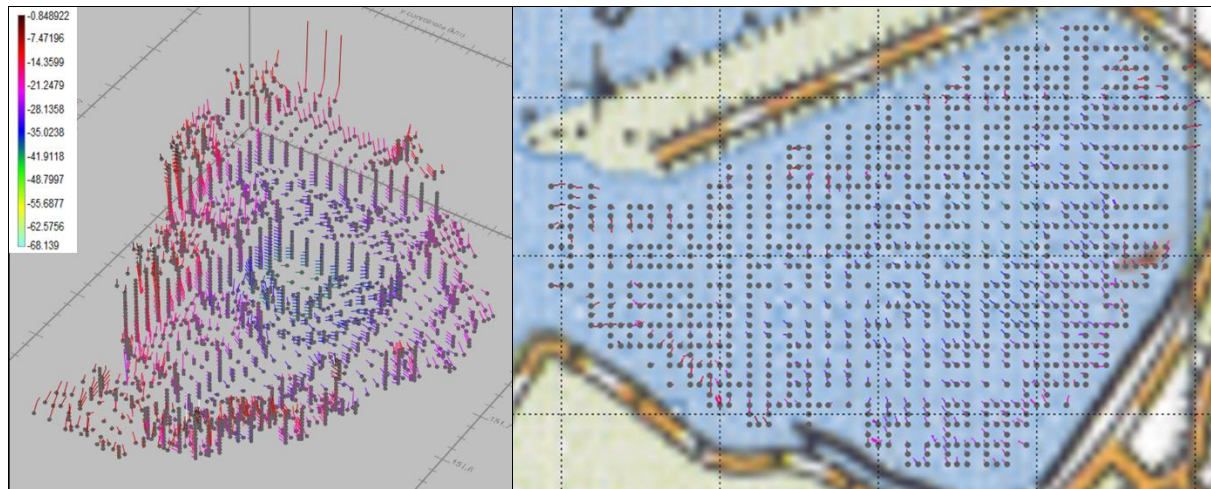


Figuur A.4 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verhoogd Maas en plas peil van 2.0 m

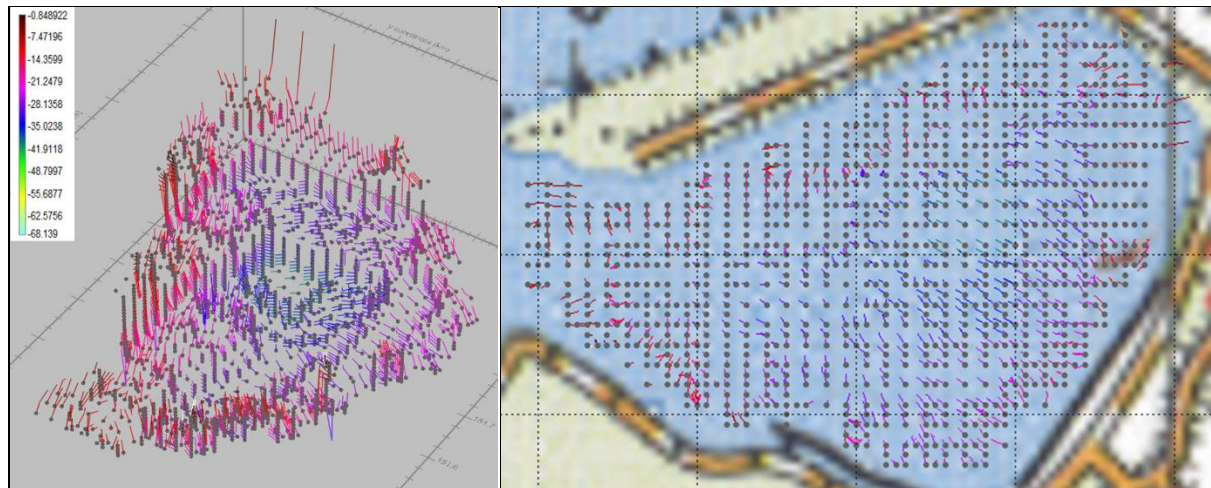
Verlaagde rivier en plas waterstanden



Figuur A.5 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verlaagd Maas en plas peil van 0.5 m



Figuur A.6 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verlaagd Maas en plas peil van 1.0 m

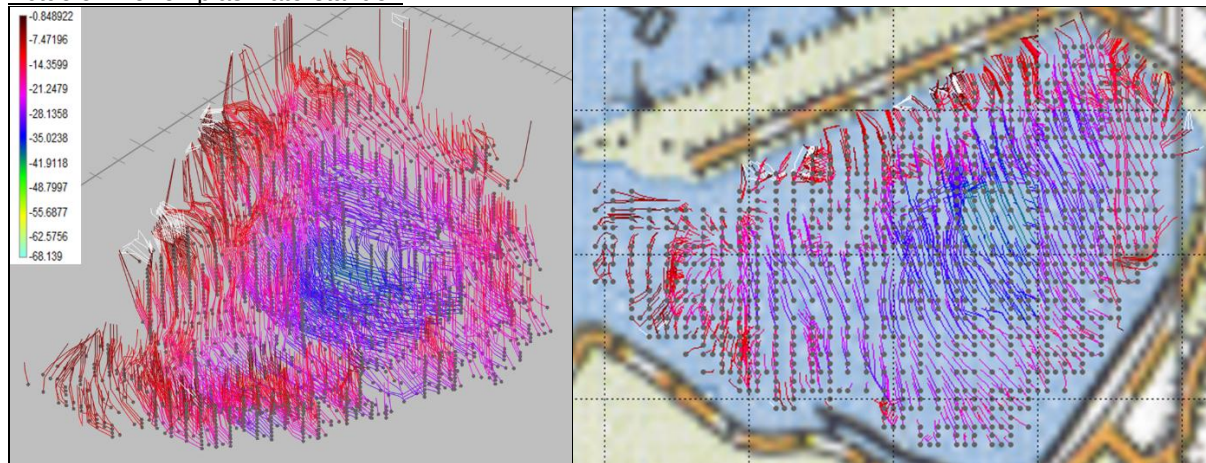


Figuur A.7 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verlaagd Maas en plas peil van 2.0 m

Stroombanen startend onder de opvulling voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar

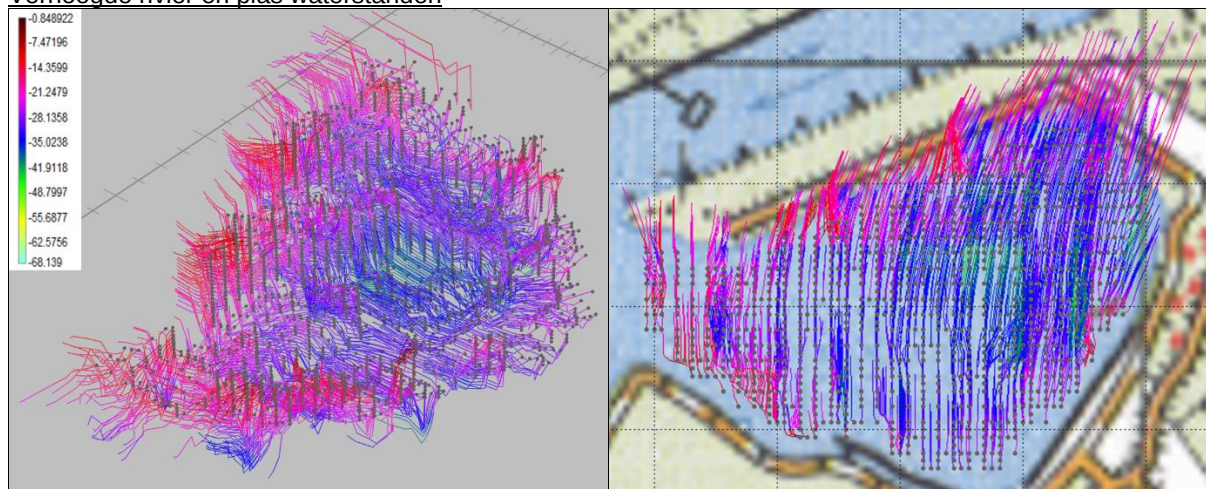
Hierbij zijn de stroombaan berekeningen 10 jaar stationair doorgezet met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018 vanaf de hydrologische situatie aan het eind van de niet-stationaire berekeningen, die van 31-03-2018. Het zijn dus feitelijk verlengde berekeningen van Figuur A.1 tot en met Figuur A.7.

Actuele rivier en plas waterstanden

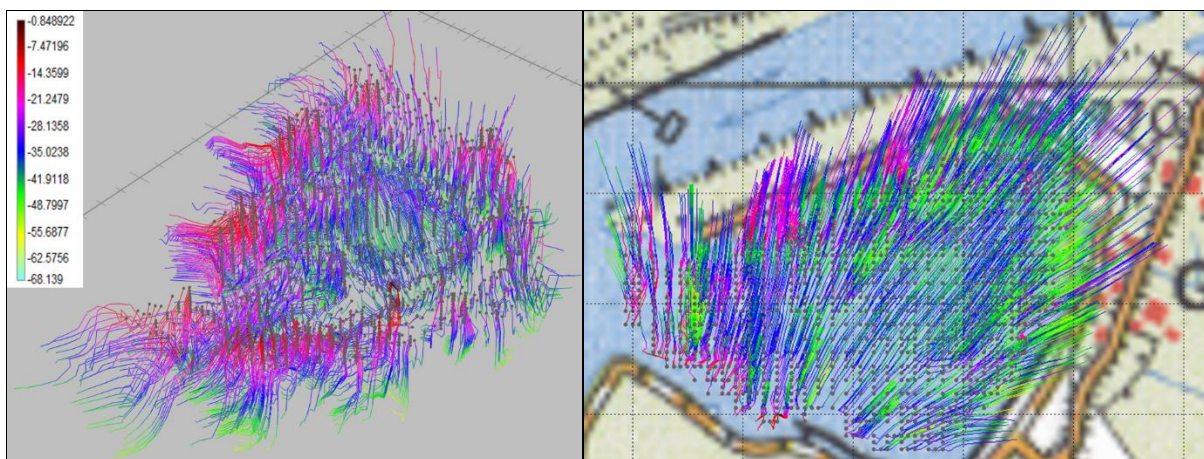


Figuur A.8 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018

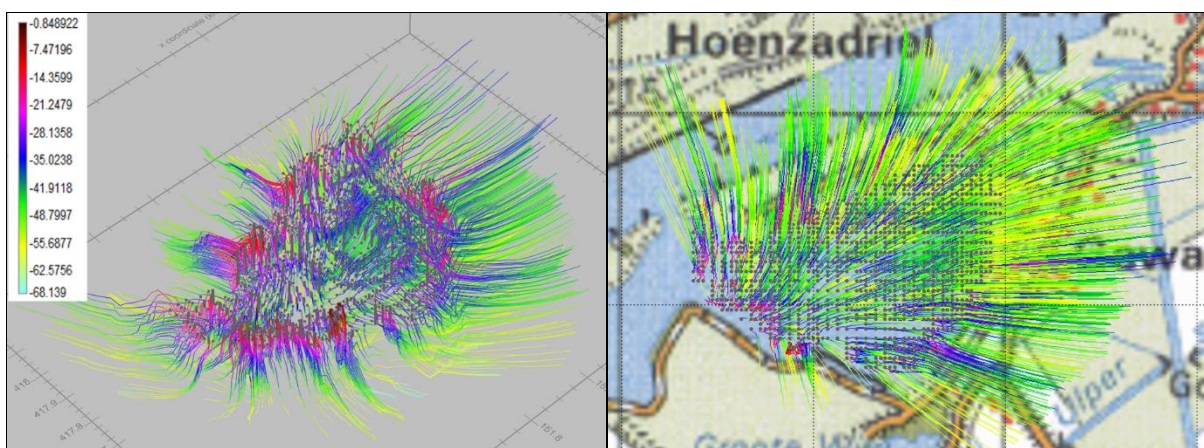
Verhoogde rivier en plas waterstanden



Figuur A.9 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m

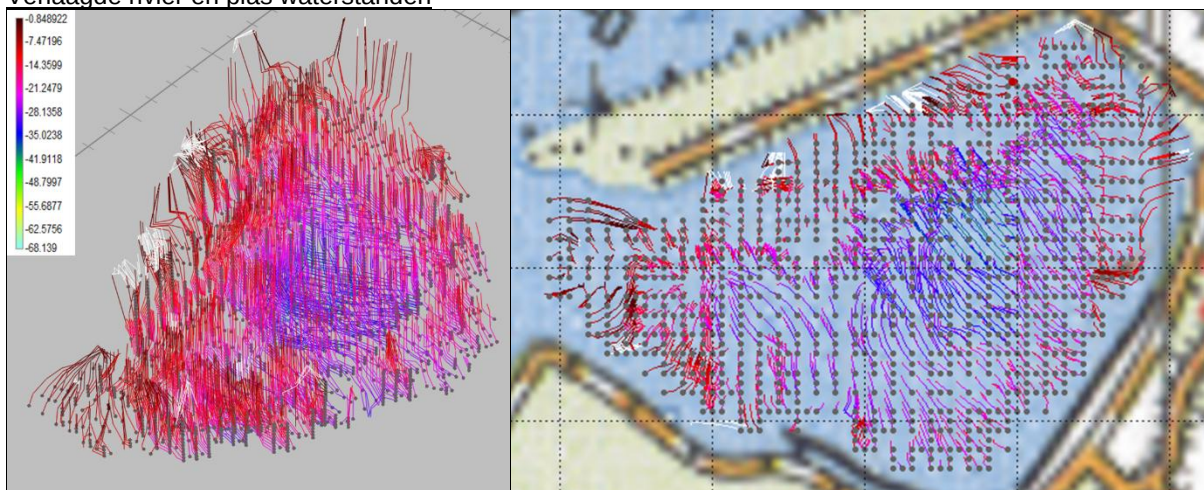


Figuur A.10 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 1.0 m

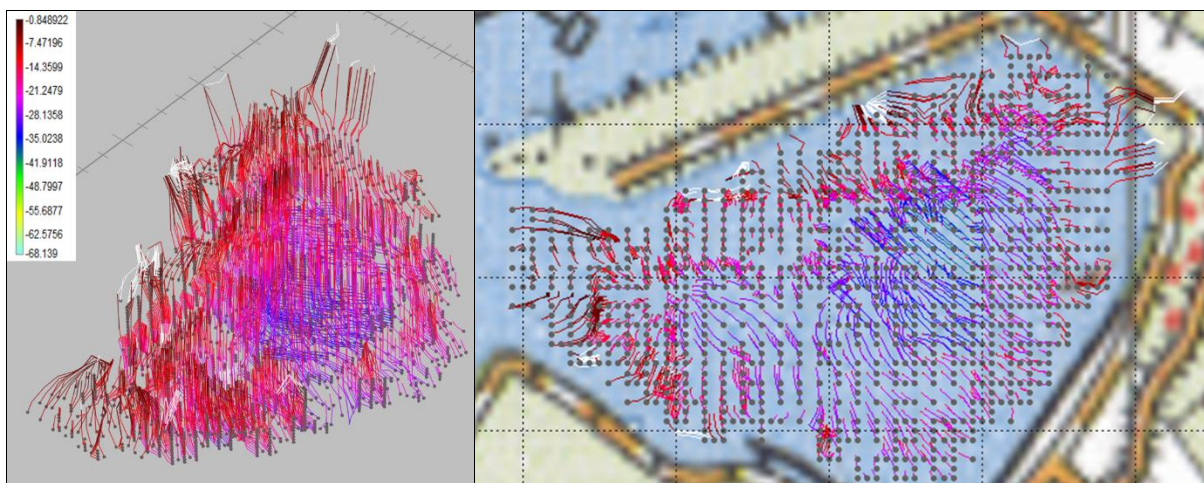


Figuur A.11 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 2.0 m

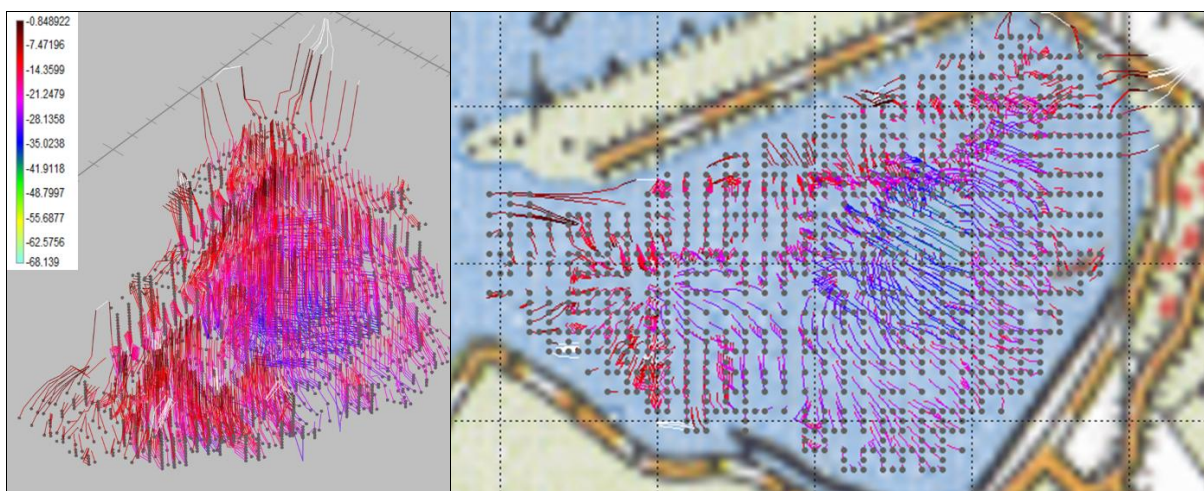
Verlaagde rivier en plas waterstanden



Figuur A.12 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 0.5 m



Figuur A.13 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 1.0 m

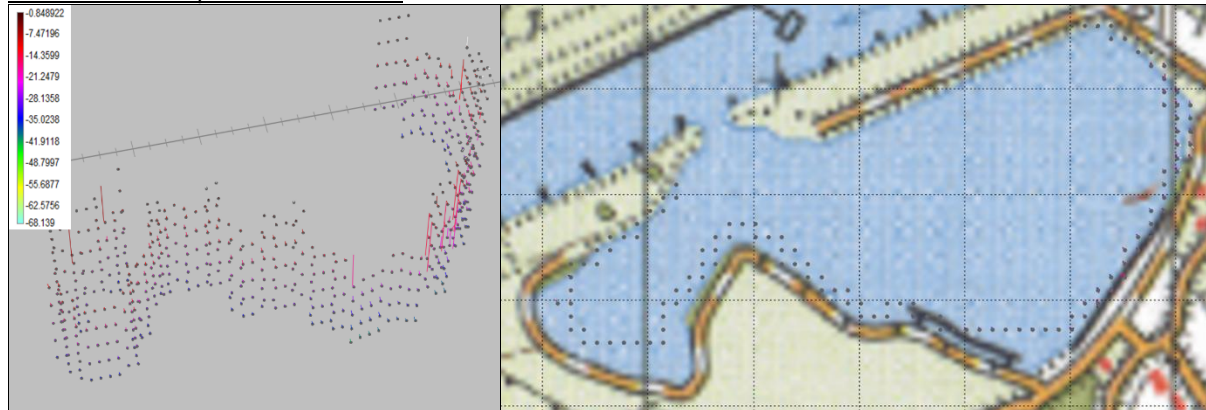


Figuur A.14 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de opvulling van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 2.0 m

Stroombanen startend onder de plas rand voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018

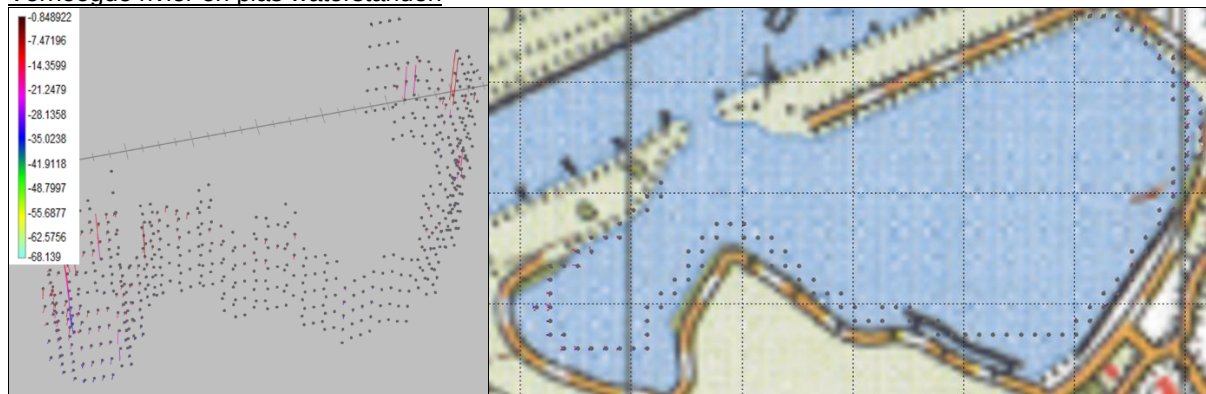
Hierbij starten de stroombanen bovenin het watervoerend pakket direct onder de opvulling van de plas aan het begin van de infiltratie periode. De stroombanen lopen door tot het eind van de rekenperiode, waarbij het hoogwater op de rivier ruimschoots voorbij is en er weer normale waterstanden in de rivier en de plas heersen.

Actuele rivier en plas waterstanden

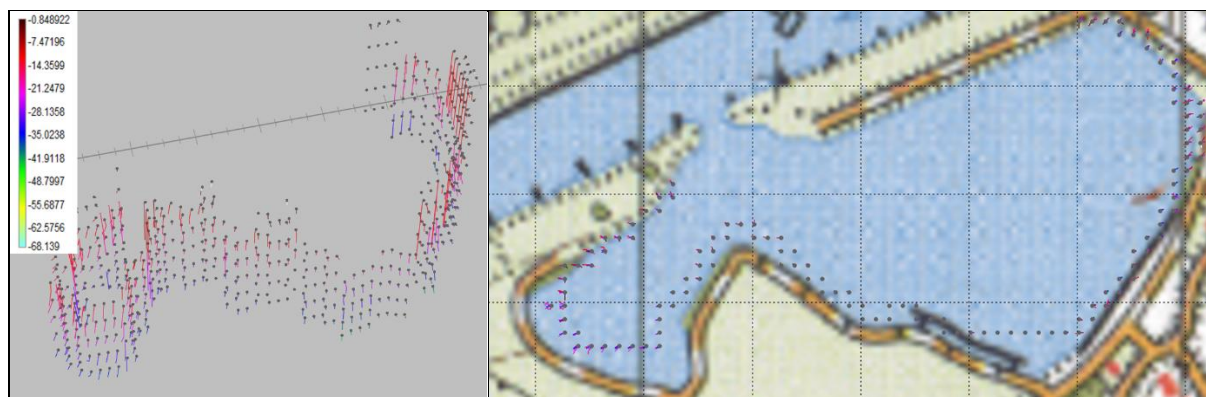


Figuur A.15 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018

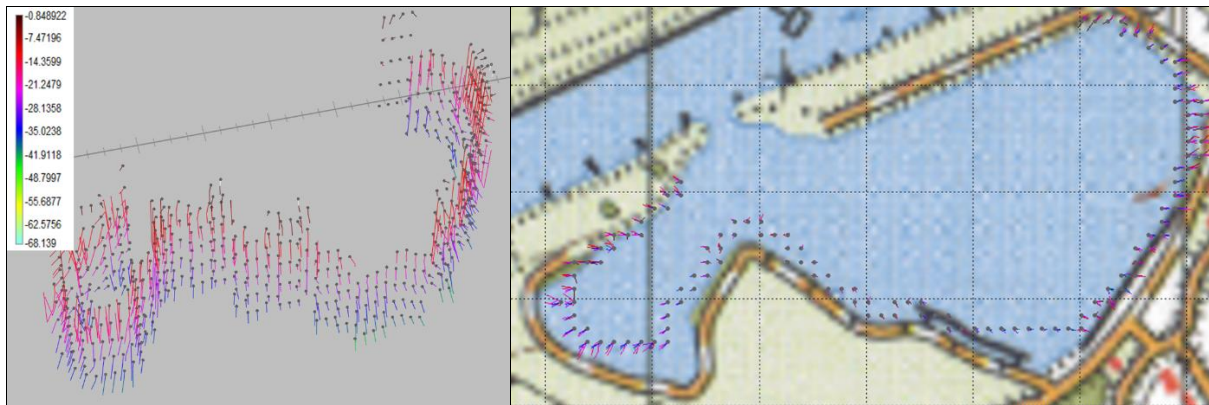
Verhoogde rivier en plas waterstanden



Figuur A.16 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m

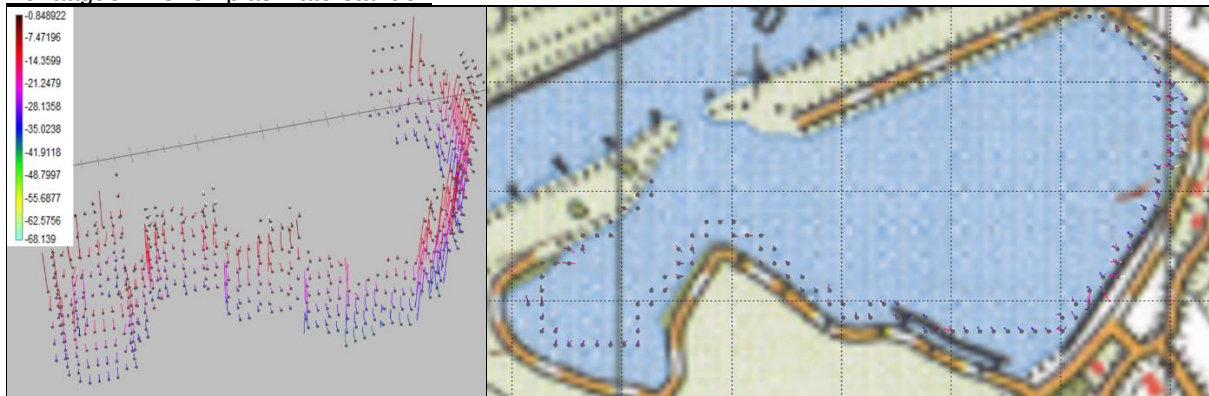


Figuur A.17 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verhoogd Maas en plas peil van 1.0 m

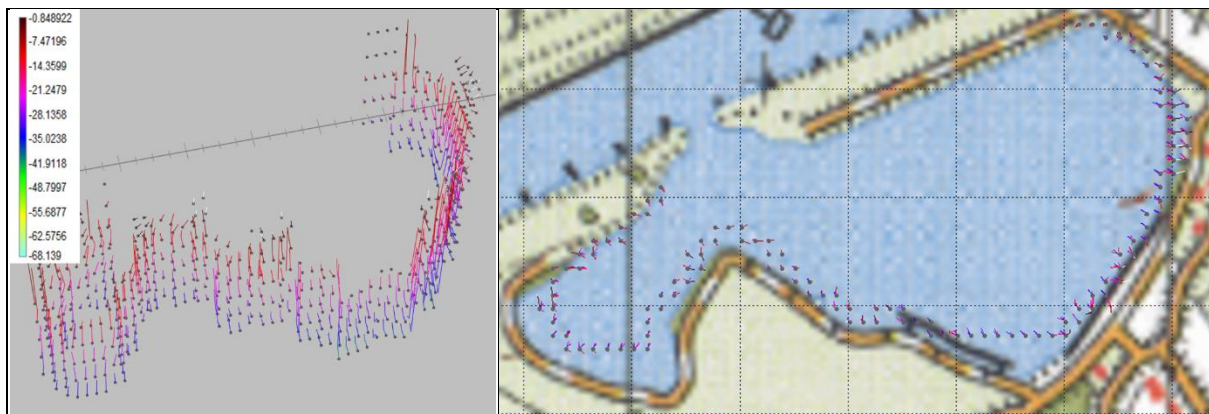


Figuur A.18 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verhoogd Maas en plas peil van 2.0 m

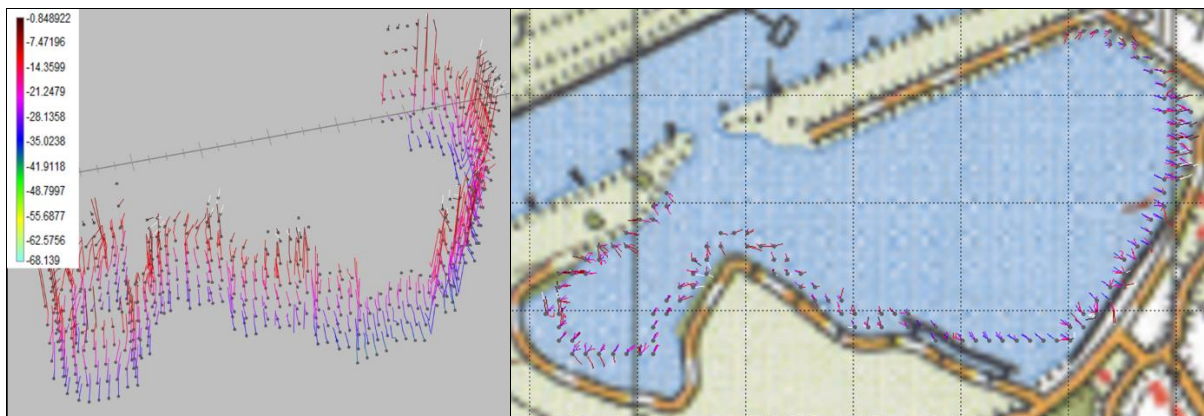
Verlaagde rivier en plas waterstanden



Figuur A.19 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verlaagd Maas en plas peil van 0.5 m



Figuur A.20 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verlaagd Maas en plas peil van 1.0 m

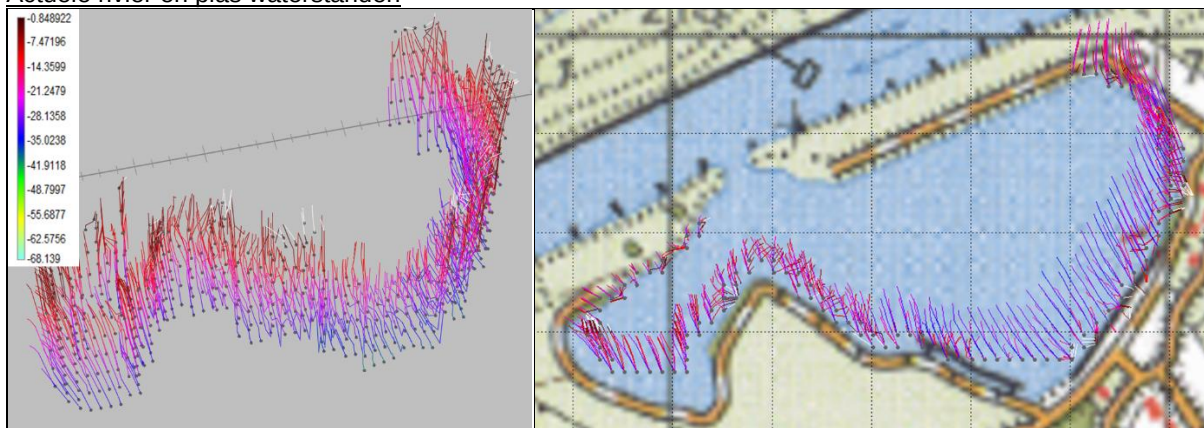


Figuur A.21 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018, met verlaagd Maas en plas peil van 2.0 m

A.4 Stroombanen startend onder de plas rand voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar

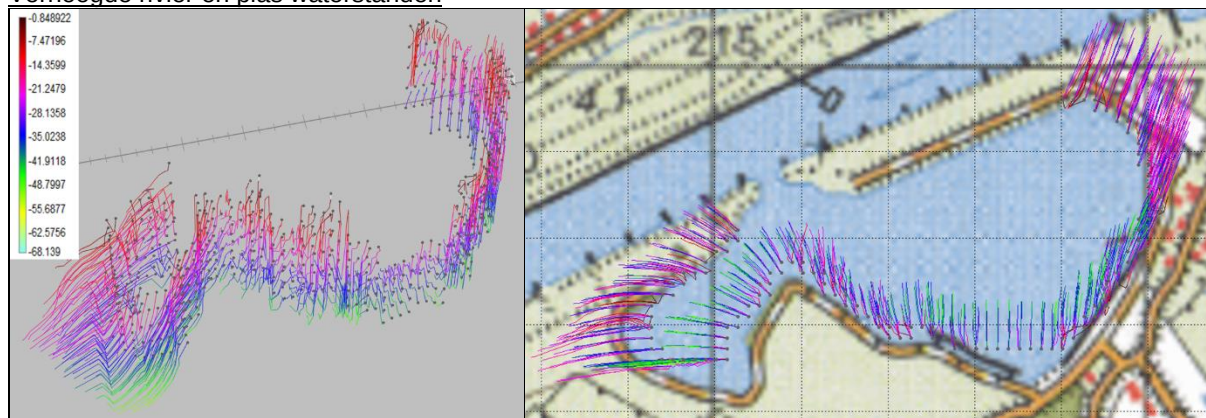
Hierbij zijn de stroombaan berekeningen 10 jaar stationair doorgezet met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018 vanaf de hydrologische situatie aan het eind van de niet-stationaire berekeningen, die van 31-03-2018. Het zijn dus feitelijk verlengde berekeningen van Figuur A.15 tot en met Figuur A.21.

Actuele rivier en plas waterstanden

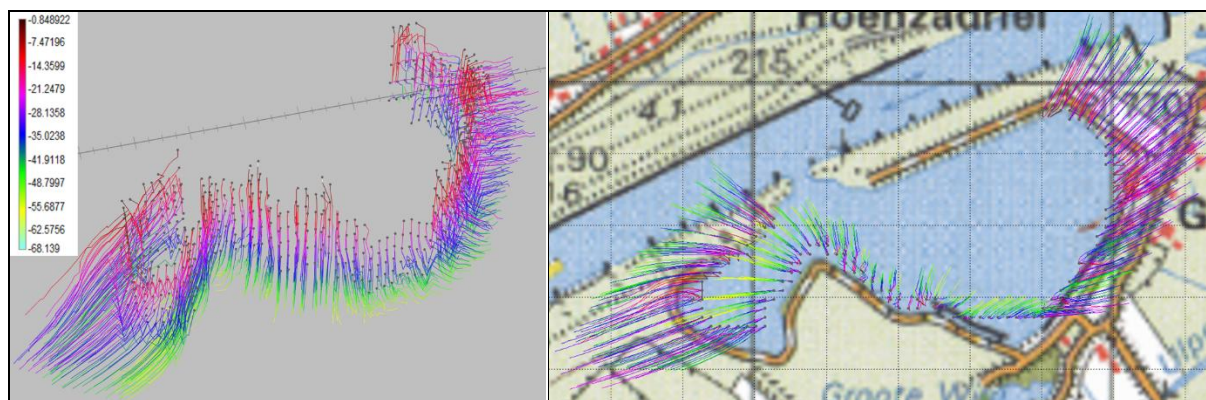


Figuur A.22 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet met de gemiddelde omstandigheden tussen 01-04-2008 en 31-03-2018

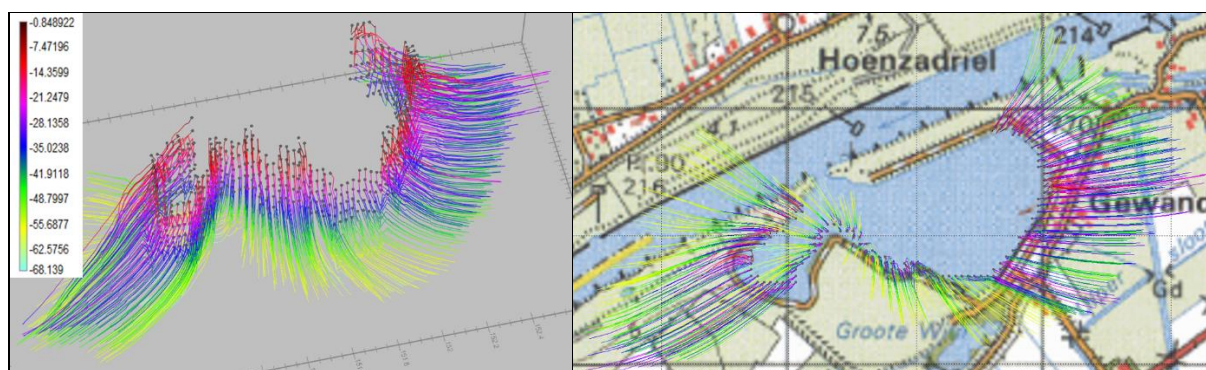
Verhoogde rivier en plas waterstanden



Figuur A.23 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m

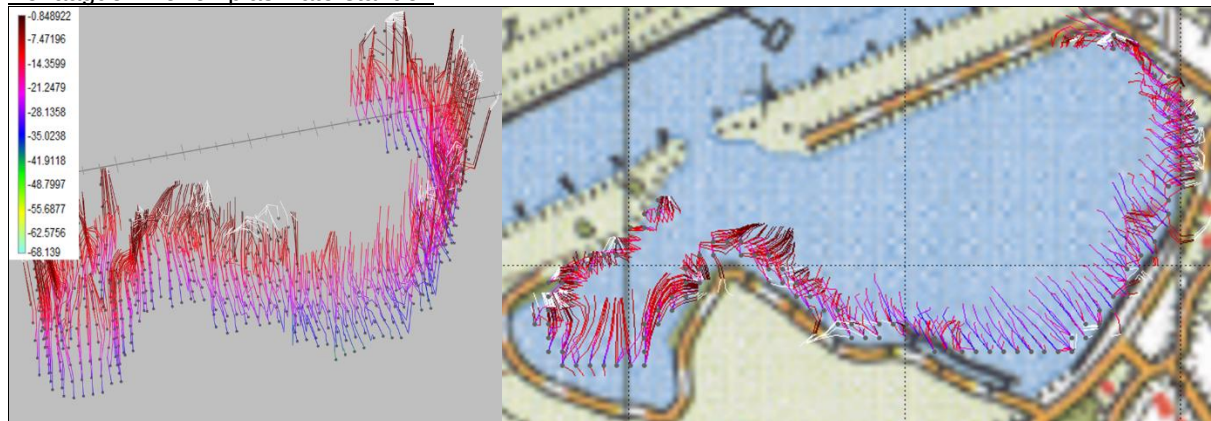


Figuur A.24 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 1.0 m

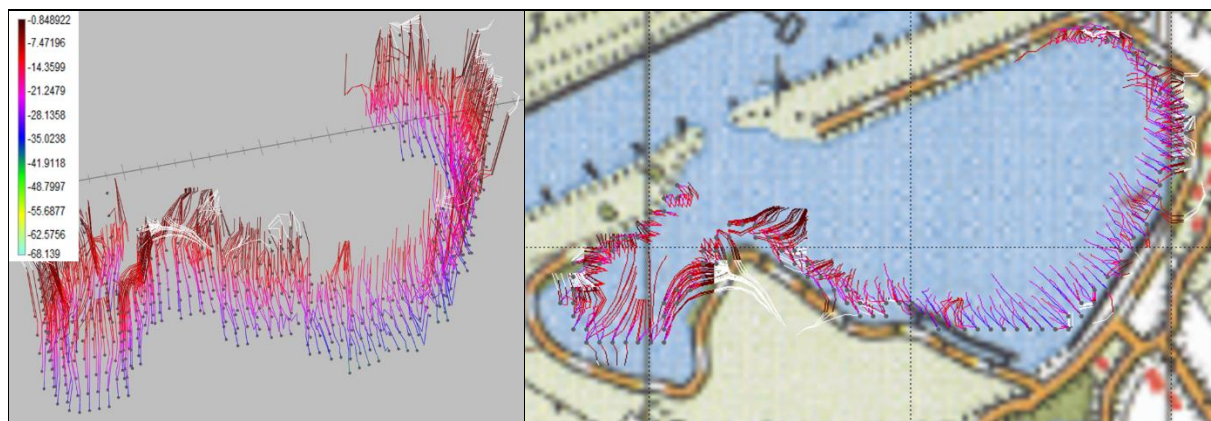


Figuur A.25 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 2.0 m

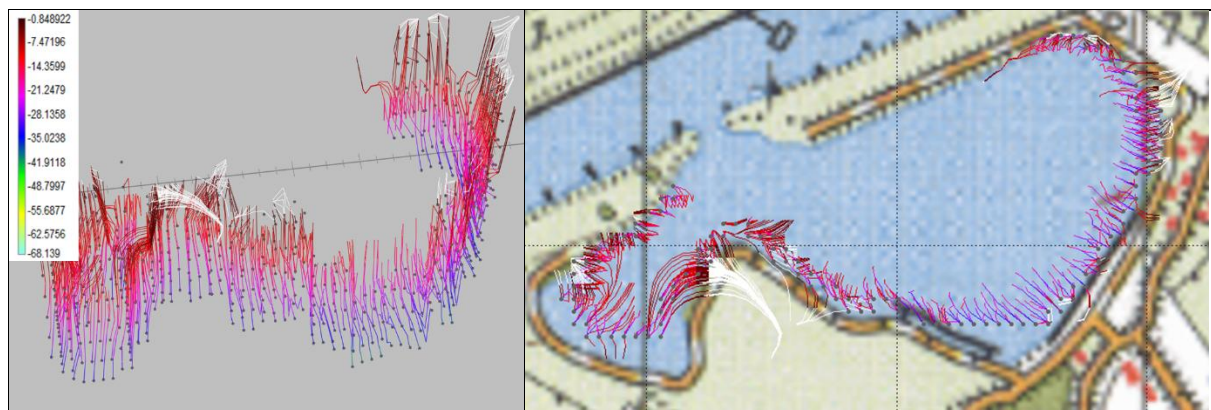
Verlaagde rivier en plas waterstanden



Figuur A.26 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 0.5 m



Figuur A.27 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 1.0 m



Figuur A.28 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend onder de rand van de aangekoppelde plas voor de periode 17-12-2017 tot 31-03-2018 plus 10 jaar stationair doorgezet voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 2.0 m

A.5 Stationaire stroombanen startend 100 m buiten de plas rand voor de gemiddelde situatie

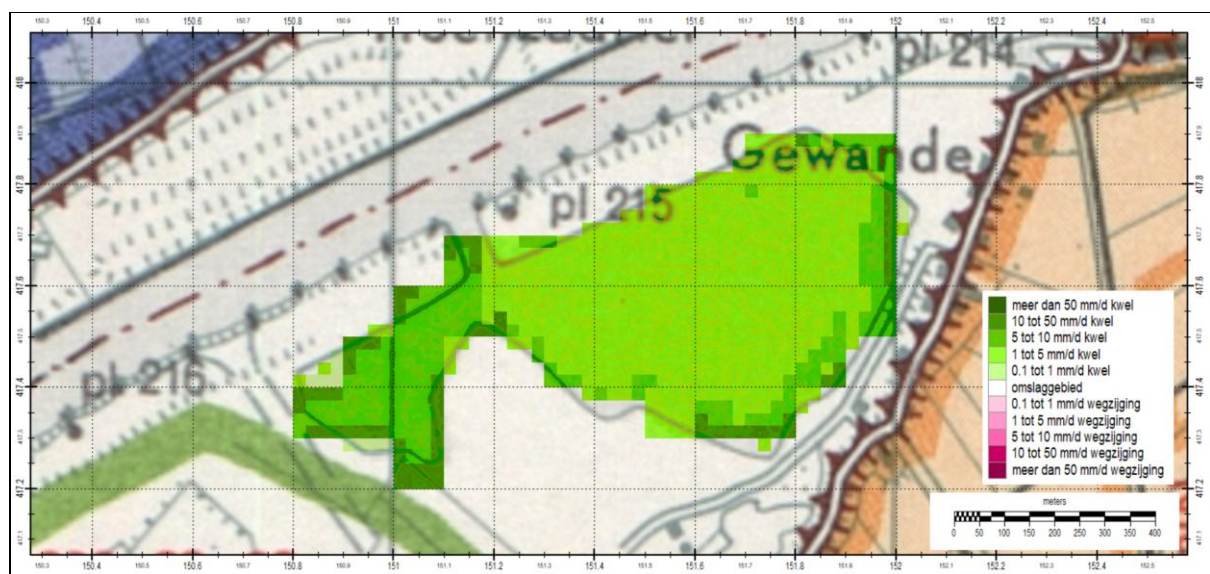
Hierbij starten de stroombanen op verschillende dieptes in het watervoerend pakket op een afstand van ongeveer 100 m buiten de plas rand. De stroombanen lopen door tot ze hun eindpunt bereiken, ongeacht hoe lang dat duurt. De gemiddelde situatie is bepaald uit het gemiddelde van alle 3652 dagen van de doorgerekende 10 jaar te nemen.

Voor de stroombanen startend op 10 m diepte zijn ook de totale verblijftijden bepaald vanaf het startpunt van de stroombaan tot waar de stroombaan eindigt. Dit is gedaan voor de actuele situatie, maar ook voor de fictieve situaties met verhoogde respectievelijk verlaagde rivier en plas peilen.

De kleuren van de stroombanen in deze figuren geven de reistijden van de stroombanen vanaf hun vertrekpunten (de bolletjes).

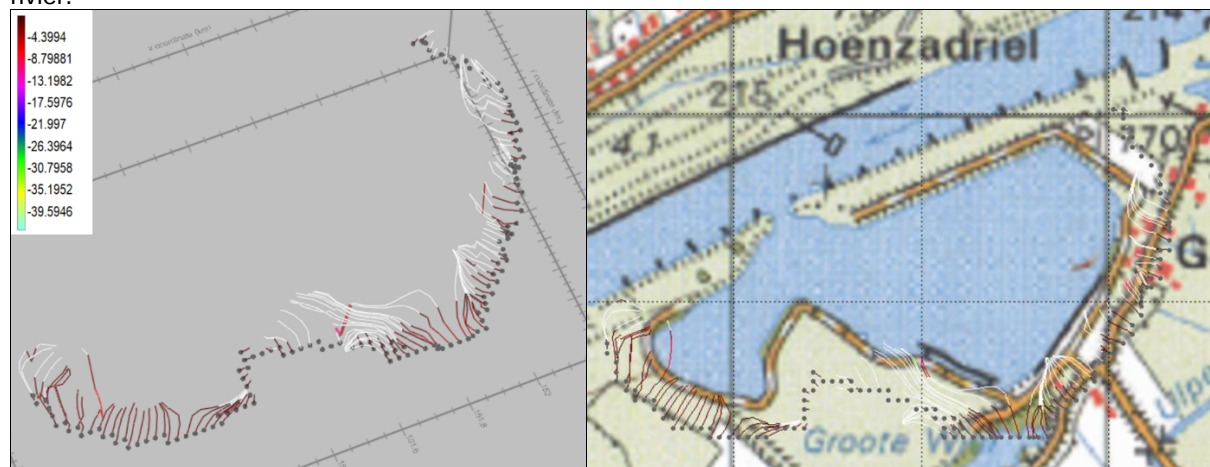
Actuele rivier en plas waterstanden

In de gemiddelde situatie treedt er overal in de plas en in de rivier kwel op en in de omgeving daarvan wegzijging.

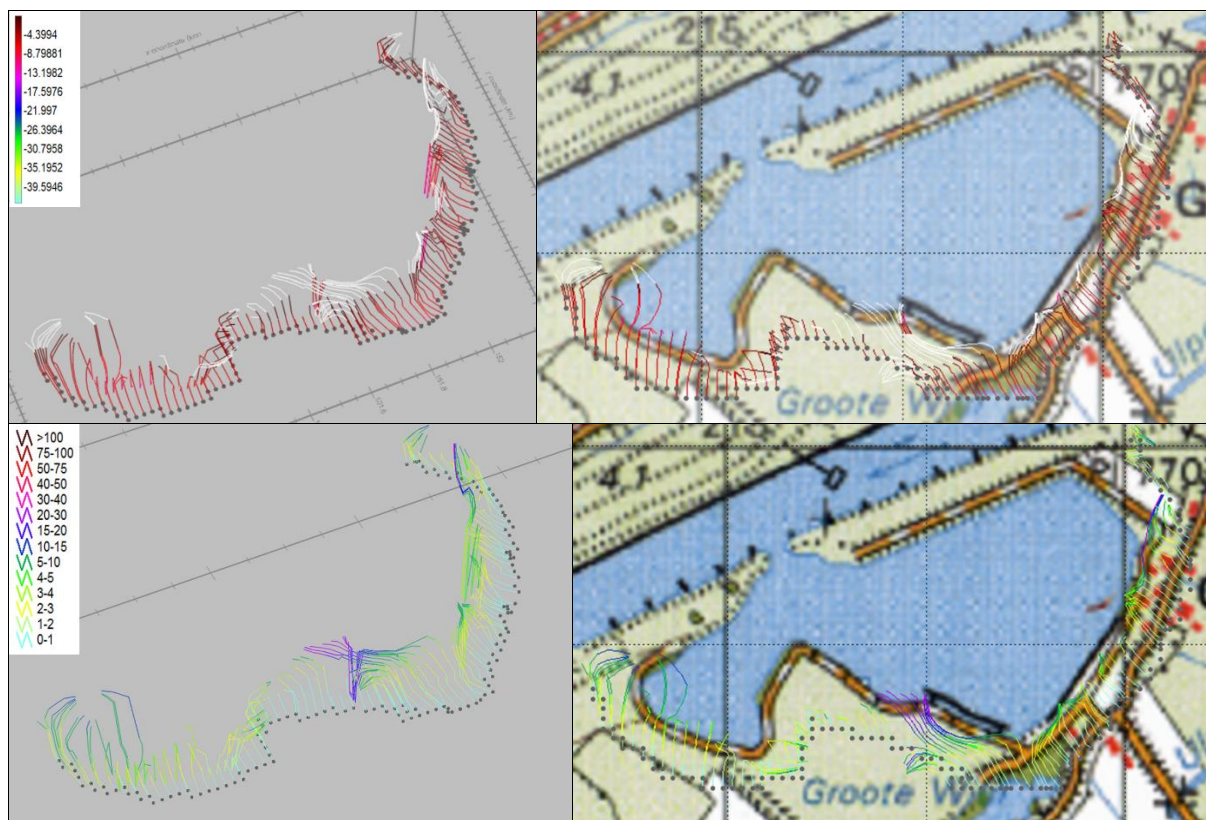


Figuur A.29 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie

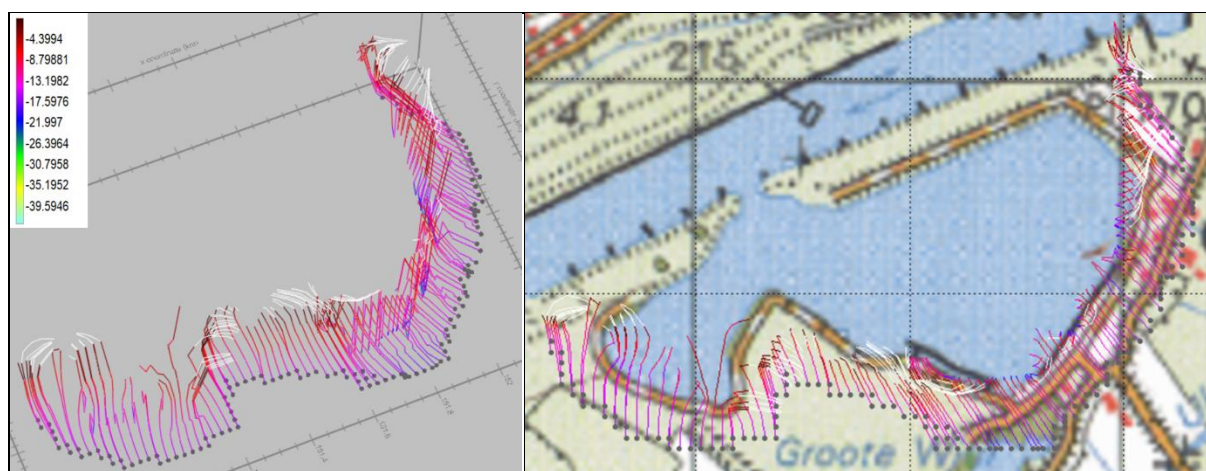
De stroombanen startend op dieptes van 5, 10 en 20 meter eindigen allemaal in de plas of de rivier.



Figuur A.30 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 5 m diepte



Figuur A.31 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

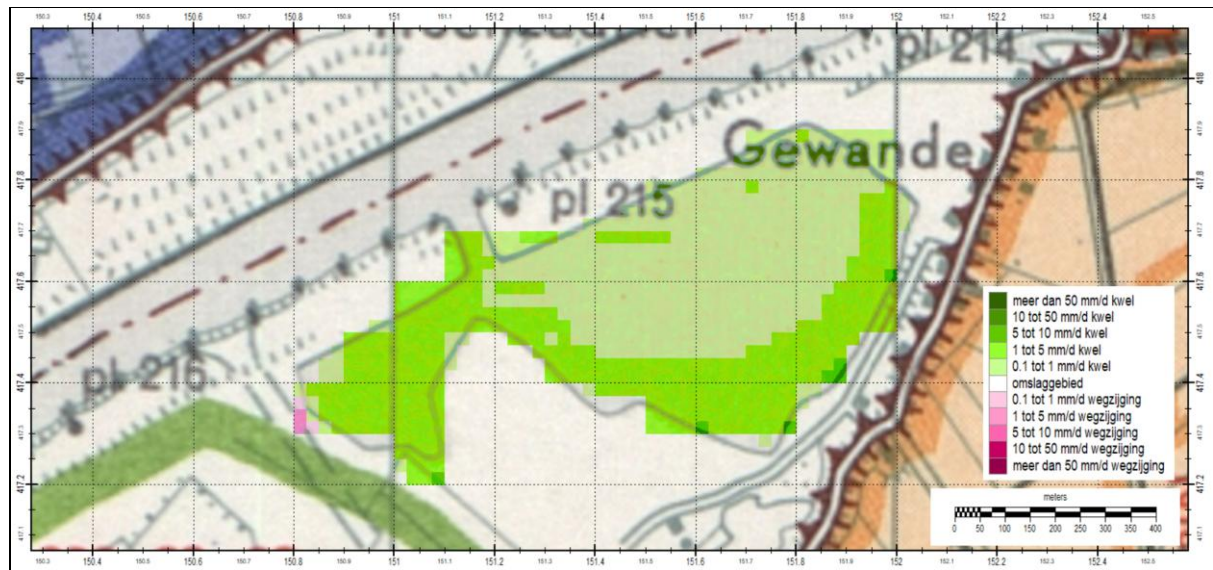


Figuur A.32 Diepte in m +NAP van de berekende stroombanen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 20 m diepte

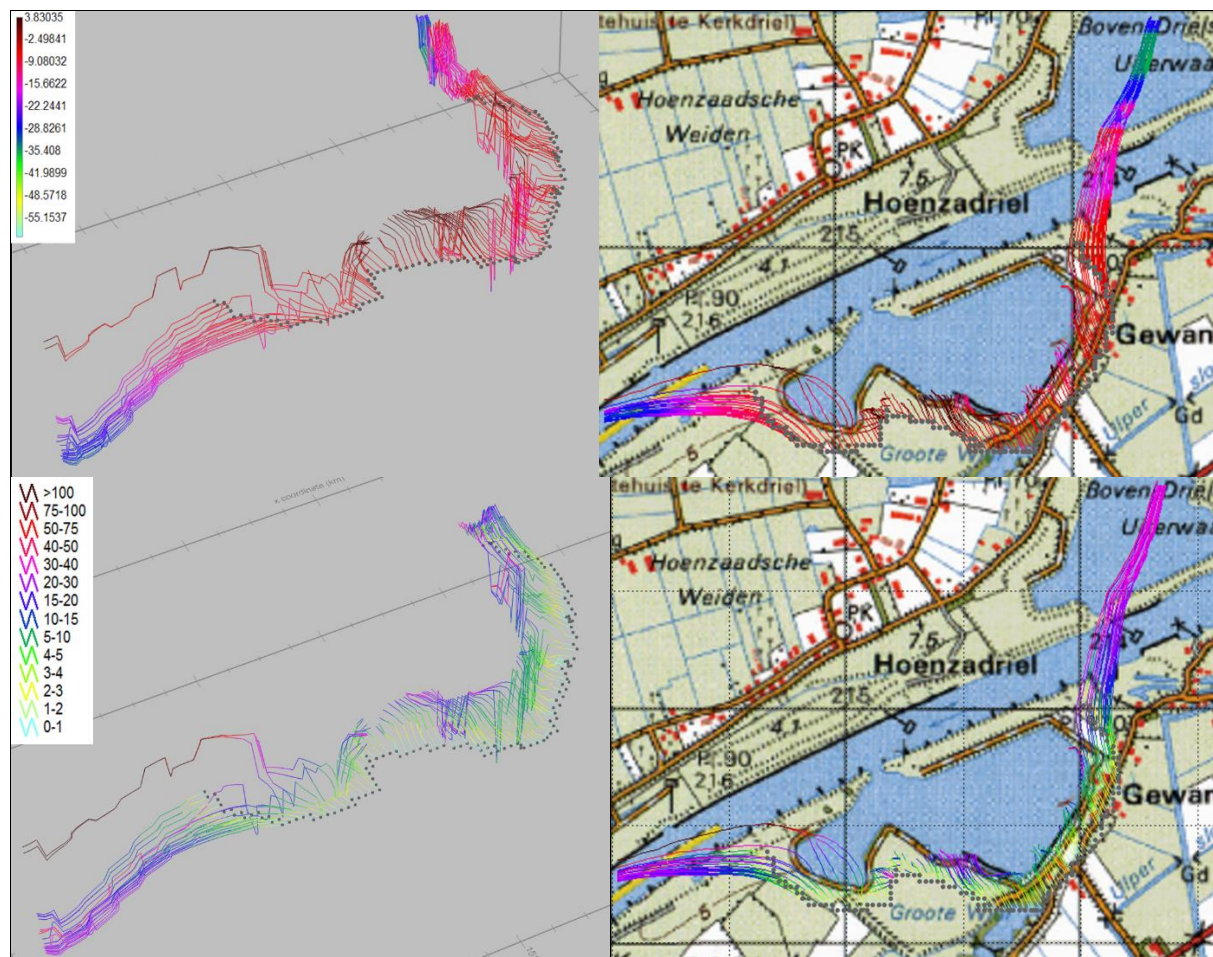
Voor de stroombanen startend op 10 m diepte voor de 10 jaar gemiddelde situatie zijn ook de fictieve situaties bepaald met verhoogde respectievelijk verlaagde rivier en plas peilen. Voor deze situaties is ook de gemiddelde kwel / wegzijging bepaald.

Rivier en plas waterstanden + 0.5 m

In deze situatie treedt er op enkele plekken in de plas (0.7% van het oppervlak) al wegzijging op.



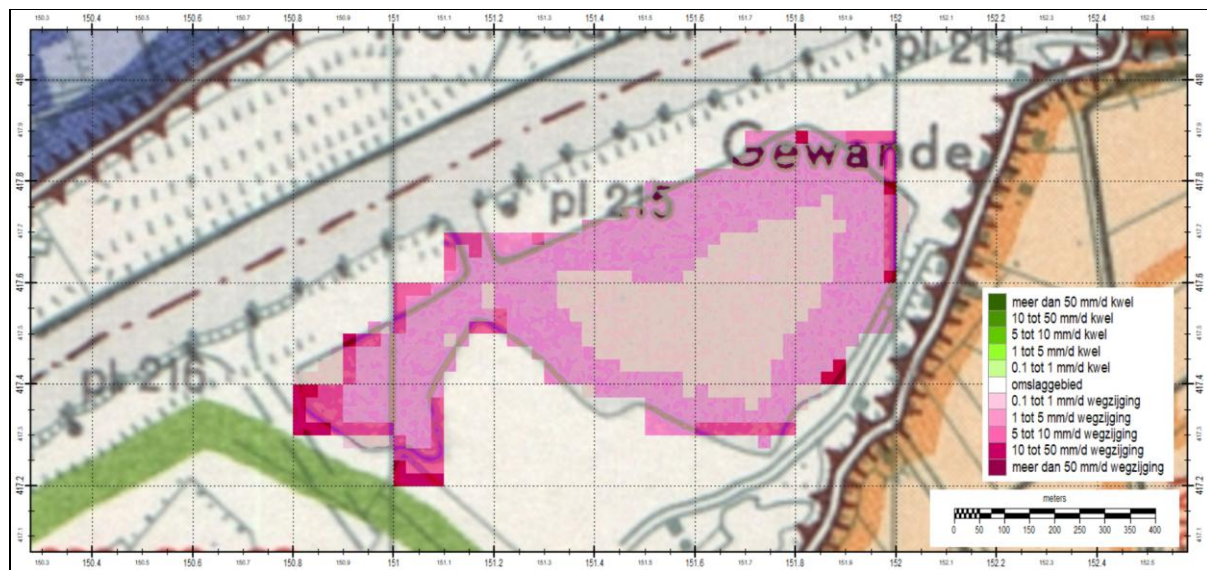
Figuur A.33 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m



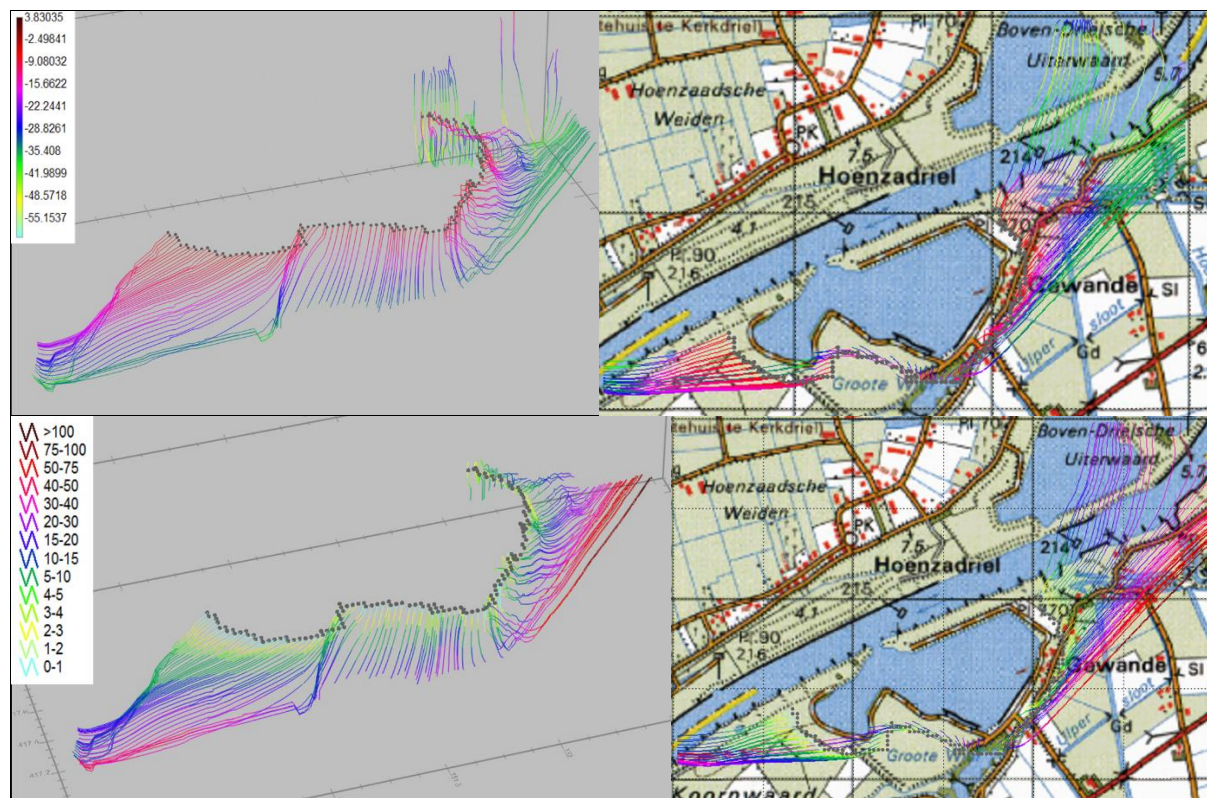
Figuur A.34 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas en plas peil van 0.5 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier en plas waterstanden + 1.0 m

In deze situatie treedt er in de gehele plas wegzijging op.



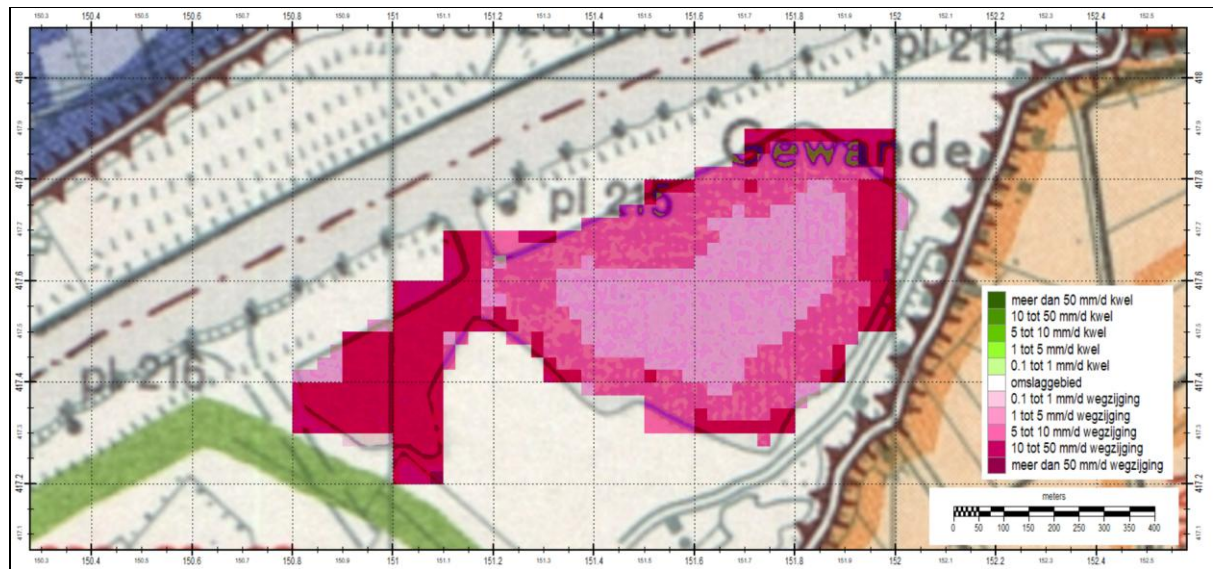
Figuur A.35 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 1.0 m



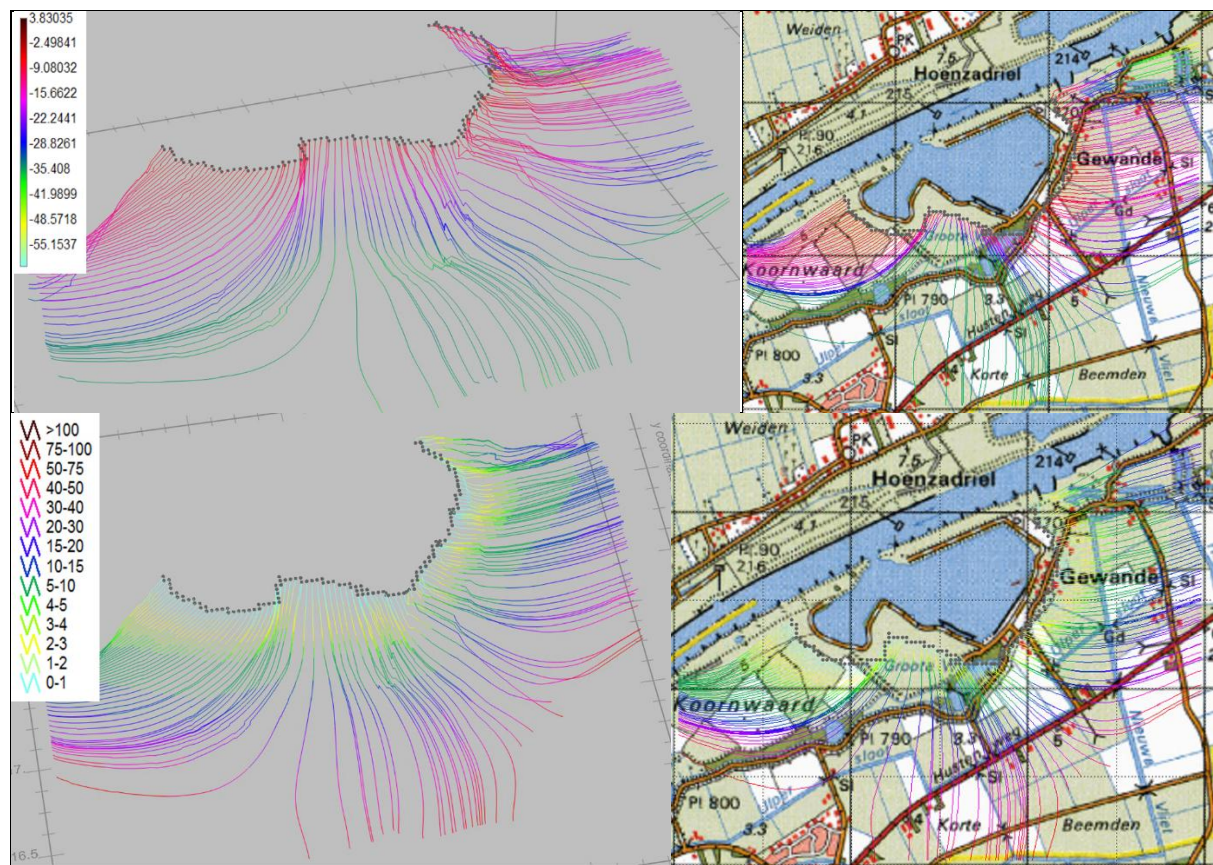
Figuur A.36 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas en plas peil van 1.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier en plas waterstanden + 2.0 m

In deze situatie treedt er in de gehele plas wegzijging op. De wegzijging is groter dan bij een verhoging van de waterstanden met 1 m.



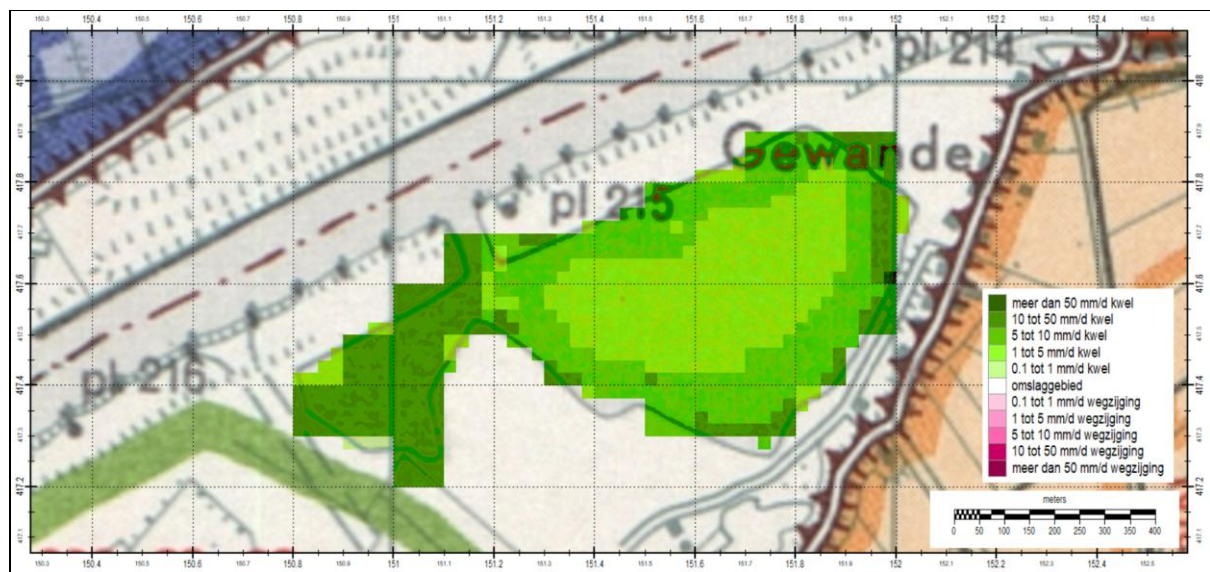
Figuur A.37 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas en plas peil van 2.0 m



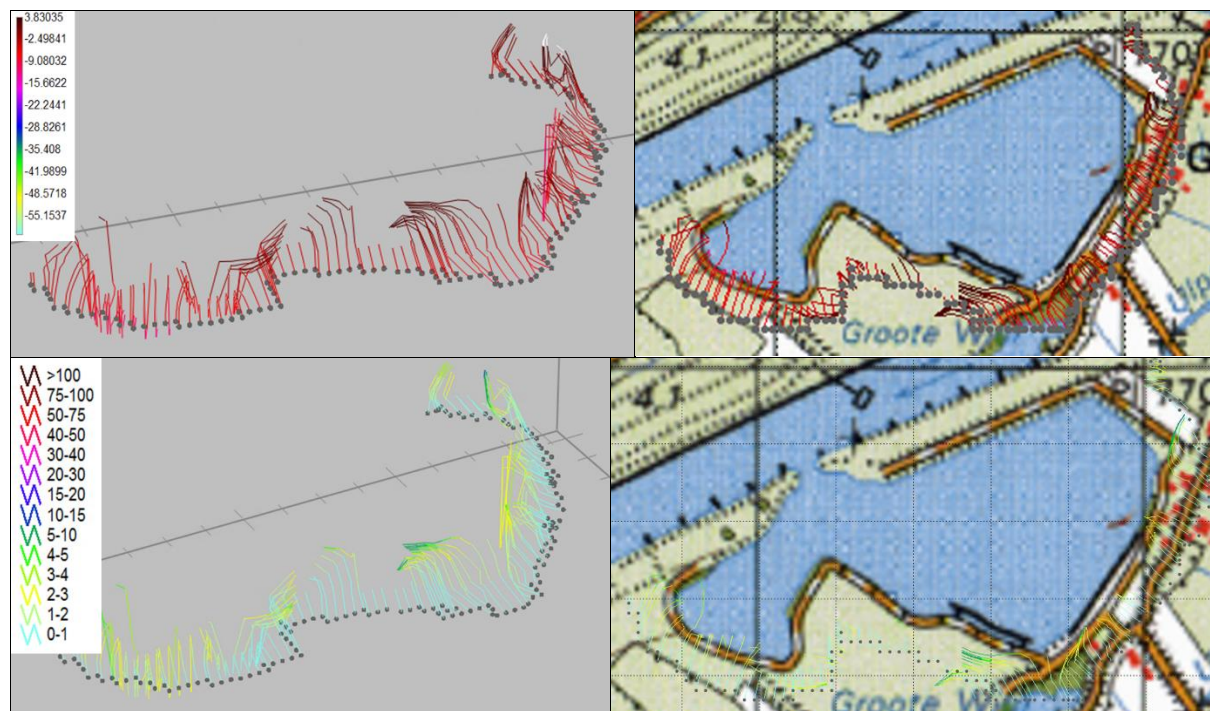
Figuur A.38 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas en plas peil van 2.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier en plas waterstanden – 0.5 m

In deze situatie treedt er in de gehele plas kwel op. De kwel is groter dan in de situatie met actuele waterstanden.



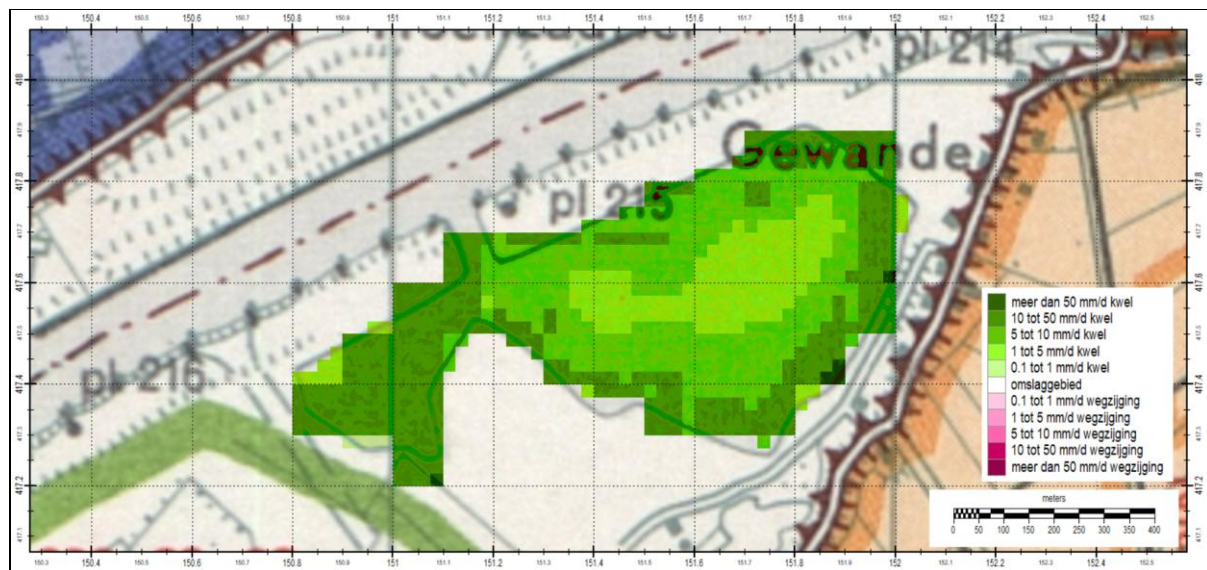
Figuur A.39 Kwel (groen) / wegzijing (rood) in de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 0.5 m



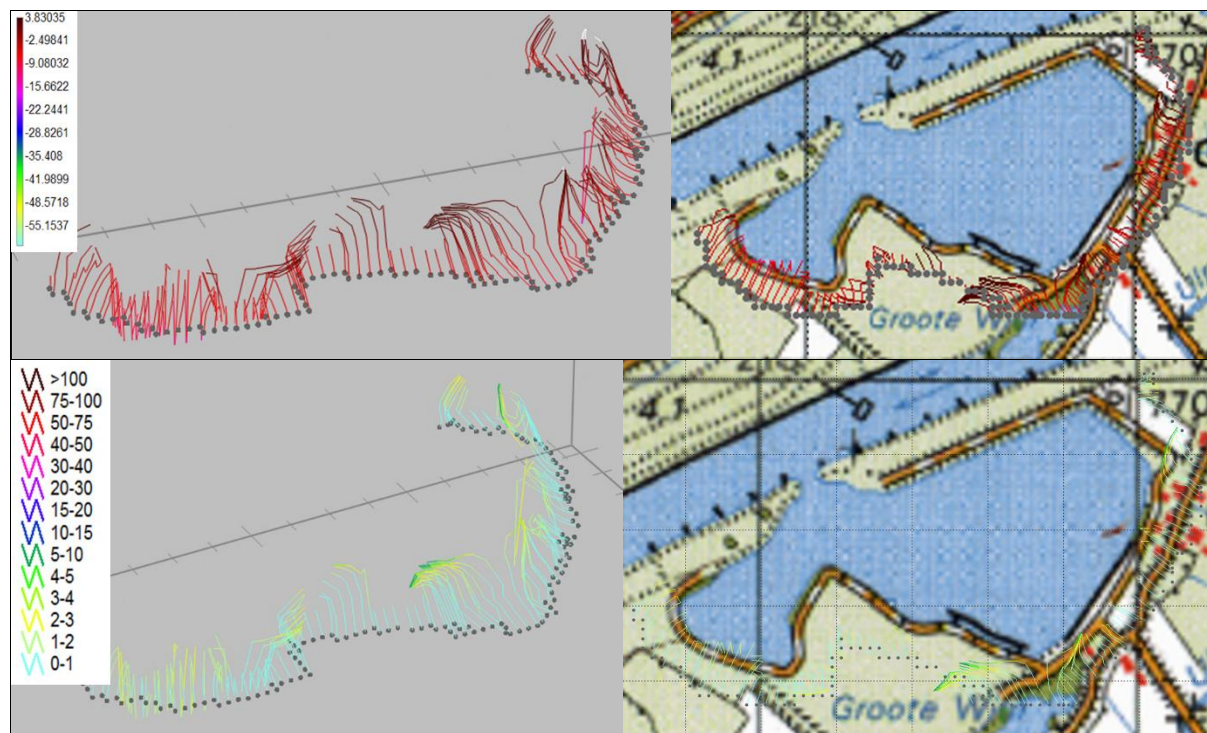
Figuur A.40 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verlaagd Maas en plas peil van 0.5 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier en plas waterstanden – 1.0 m

In deze situatie treedt er in de gehele plas kwel op. De kwel is nog verder toegenomen.



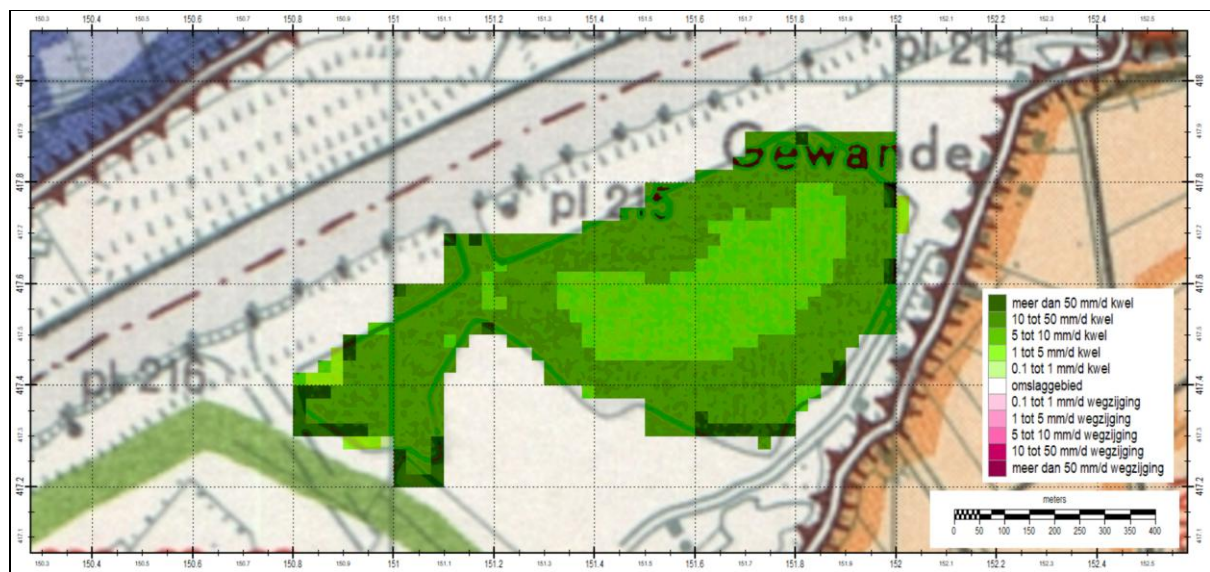
Figuur A.41 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 1.0 m



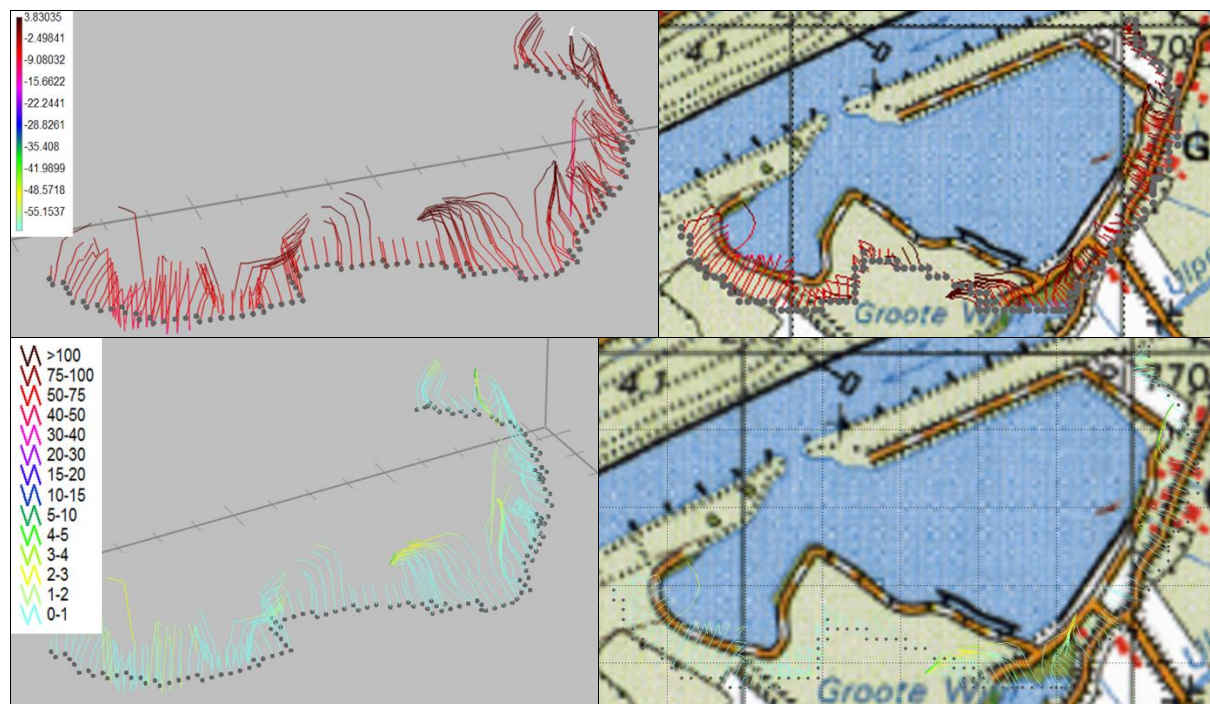
Figuur A.42 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verlaagd Maas en plas peil van 1.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier en plas waterstanden – 2.0 m

In deze situatie treedt er in de gehele plas kwel op. De kwel is nog groter dan bij een verhoging van de waterstanden met 1 m.



Figuur A.43 Kwel (groen) / wegzijing (rood) in de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas en plas peil van 2.0 m



Figuur A.44 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de aangekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verlaagd Maas en plas peil van 2.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

B Resultaten stroombaanberekeningen losgekoppelde plas

De figuren in deze bijlage geven een overzicht van de resultaten van de stroombaanberekeningen met het grondwatermodel voor situaties waarbij de plas niet met de rivier verbonden is (losgekoppeld) en het waterpeil in de plas dus niet meebeweegt met het waterpeil van de rivier, maar met het grondwaterpeil in de directe omgeving van de plas.

Voor de figuren in deze bijlage geldt dat de linker helft steeds een 3D aanzicht geeft en de rechter helft een boven aanzicht. De bolletjes zijn de start punten van de stroombanen. De legenda geeft een overzicht over de diepte van de stroombanen of van de reistijden van de stroombanen vanaf hun vertrekpunten (de bolletjes).

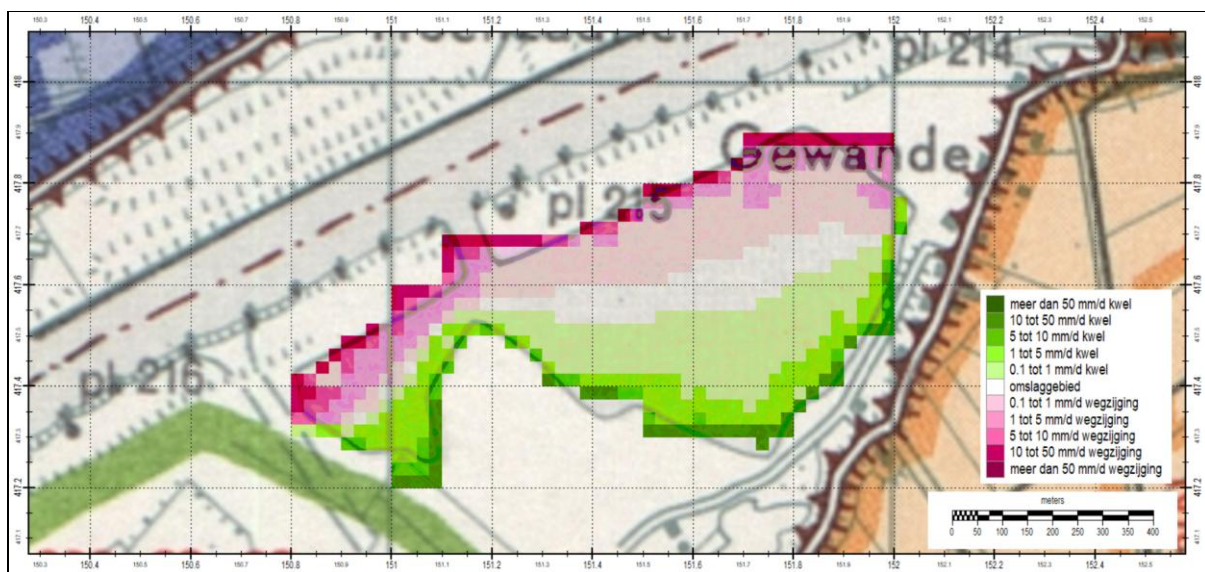
B.1 Stationaire stroombanen startend 100 m buiten de plas rand voor de gemiddelde situatie van een losgekoppelde plas

Hierbij starten de stroombanen op verschillende dieptes (NAP –5, –10 en –20 m) in het watervoerend pakket op een afstand van ongeveer 100 m buiten de plas rand. De stroombanen lopen door tot ze hun eindpunt bereiken, ongeacht hoe lang dat duurt. De gemiddelde situatie is bepaald uit het gemiddelde van alle 3652 dagen van de doorgerekende 10 jaar te nemen.

Actuele rivier en plas waterstanden

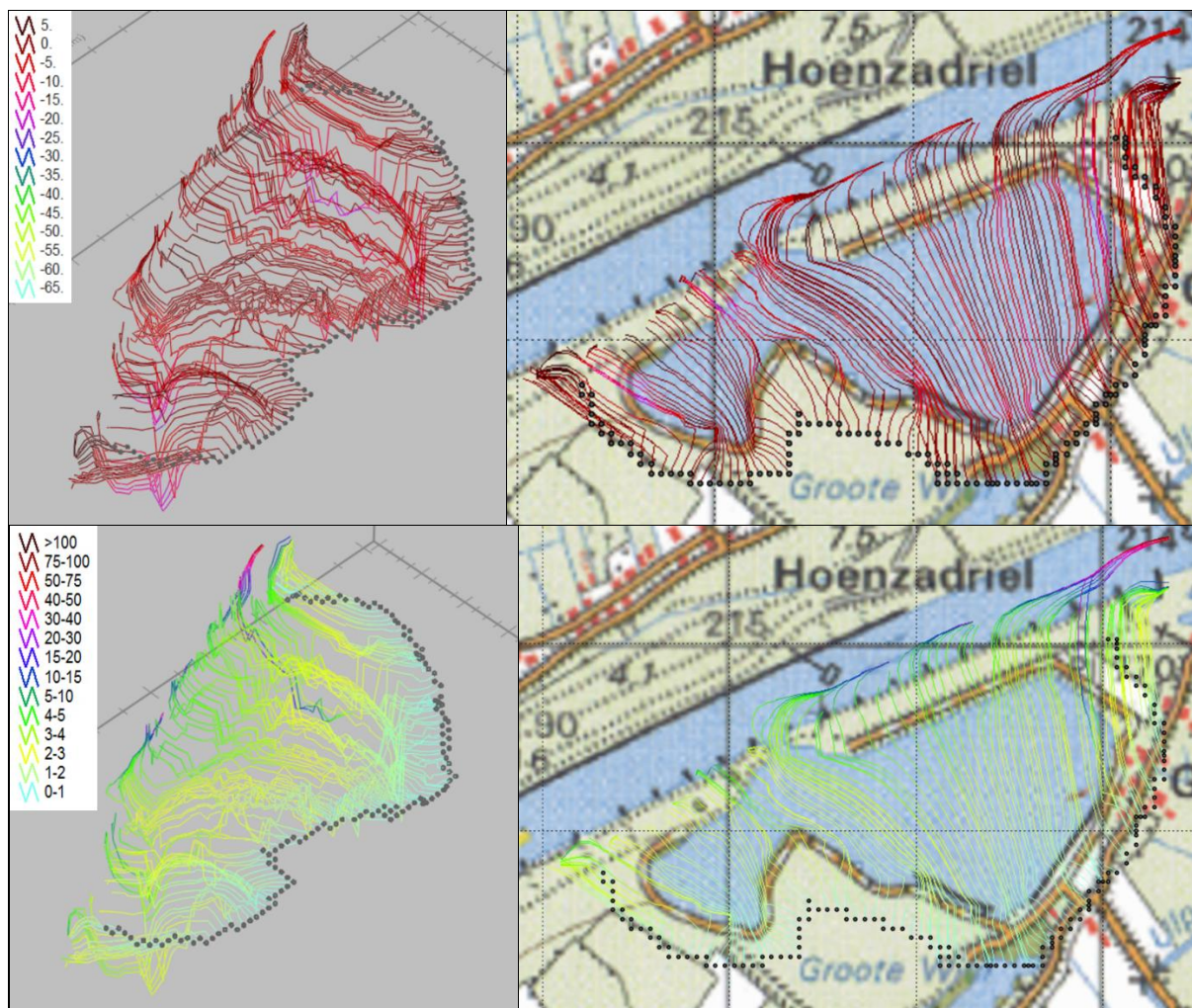
In de gemiddelde situatie treedt er in de rivier kwel op en in de omgeving daarvan wegzijging.

Zoals verwacht treedt er in de losgekoppelde plas in ca. de helft aan de rivier zijde wegzijging op en in de andere helft kwel.

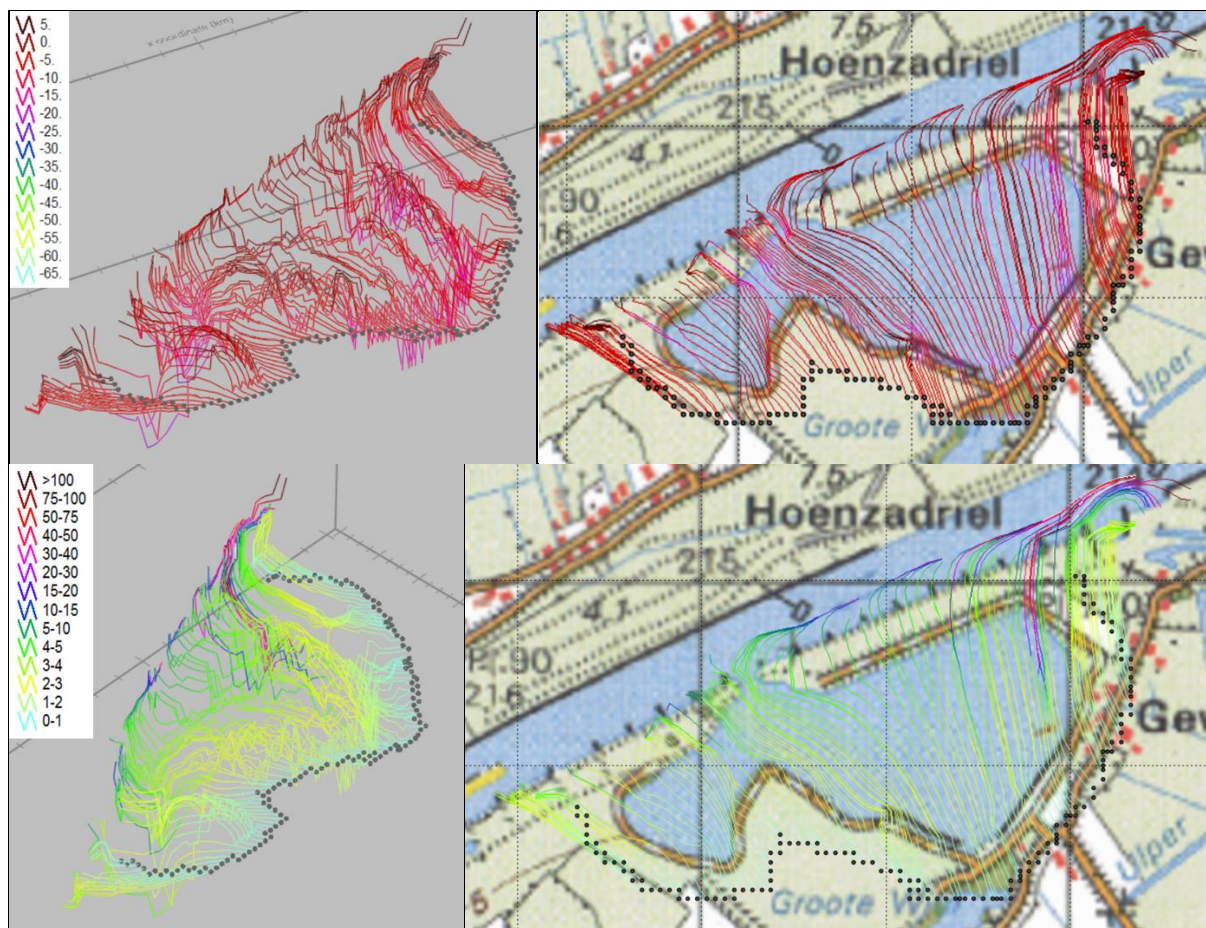


Figuur B.1 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie

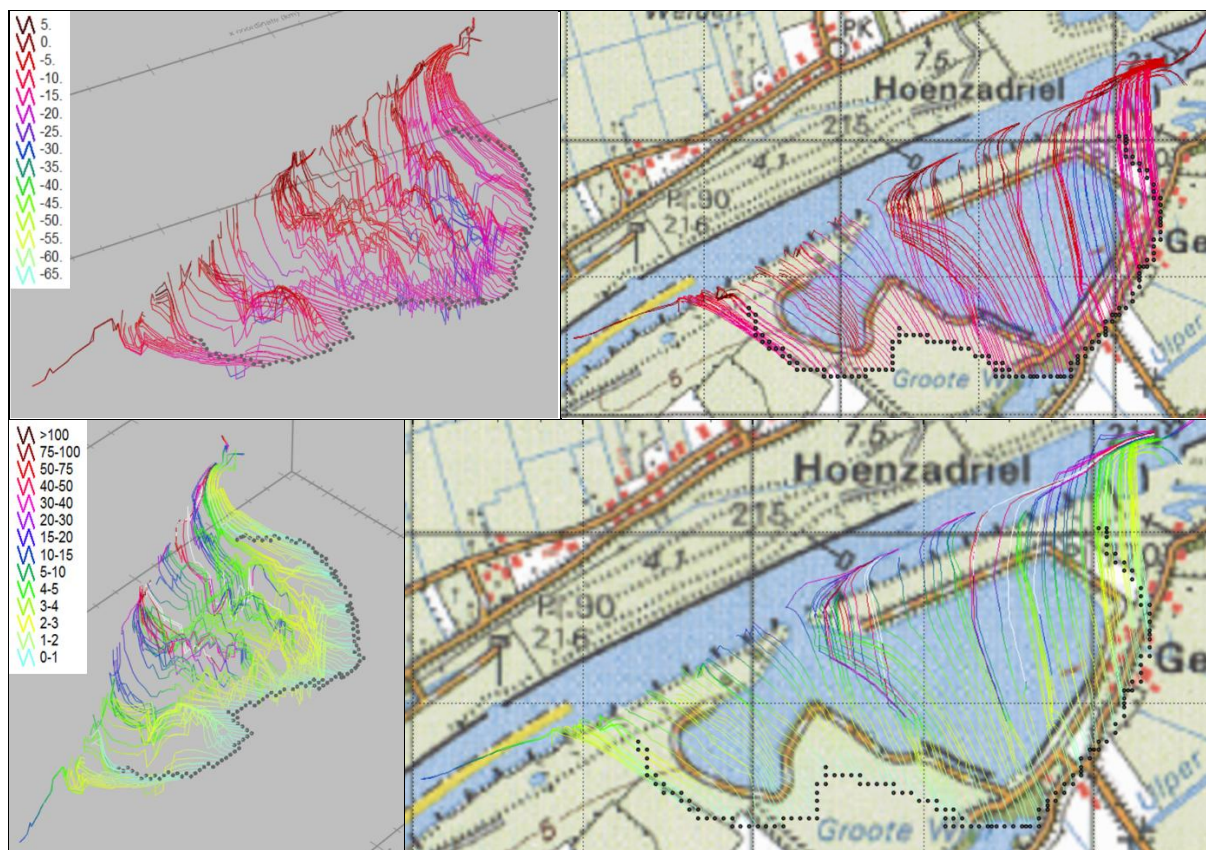
De stroombanen gaan allemaal naar de rivier, de meesten via de plas. Omdat de plas nu als watervoerend pakket in het model zit, eindigen de stroombanen die de plas instromen niet in de plas, maar stromen door de plas naar de rivier.



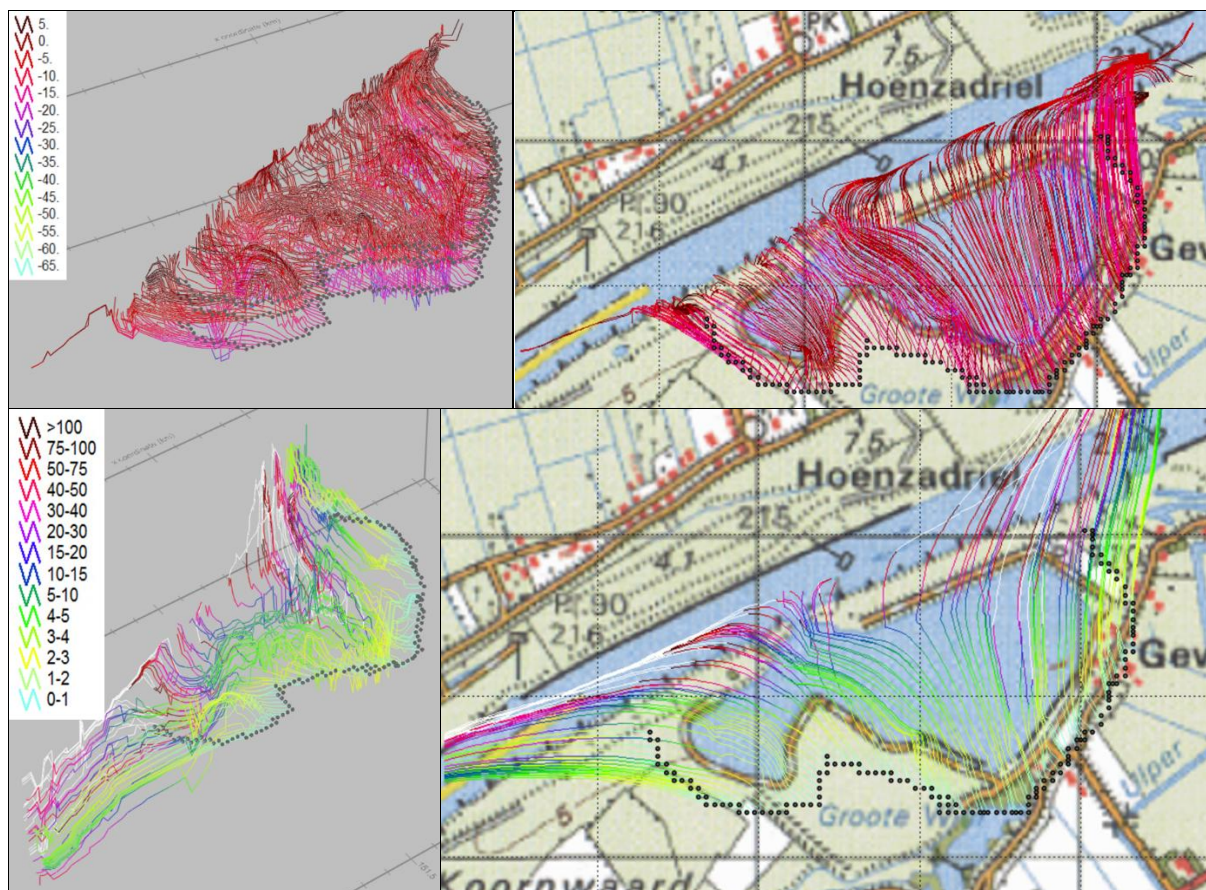
Figuur B.2 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op NAP -5 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]



Figuur B.3 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op NAP –10 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]



Figuur B.4 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op NAP -20 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

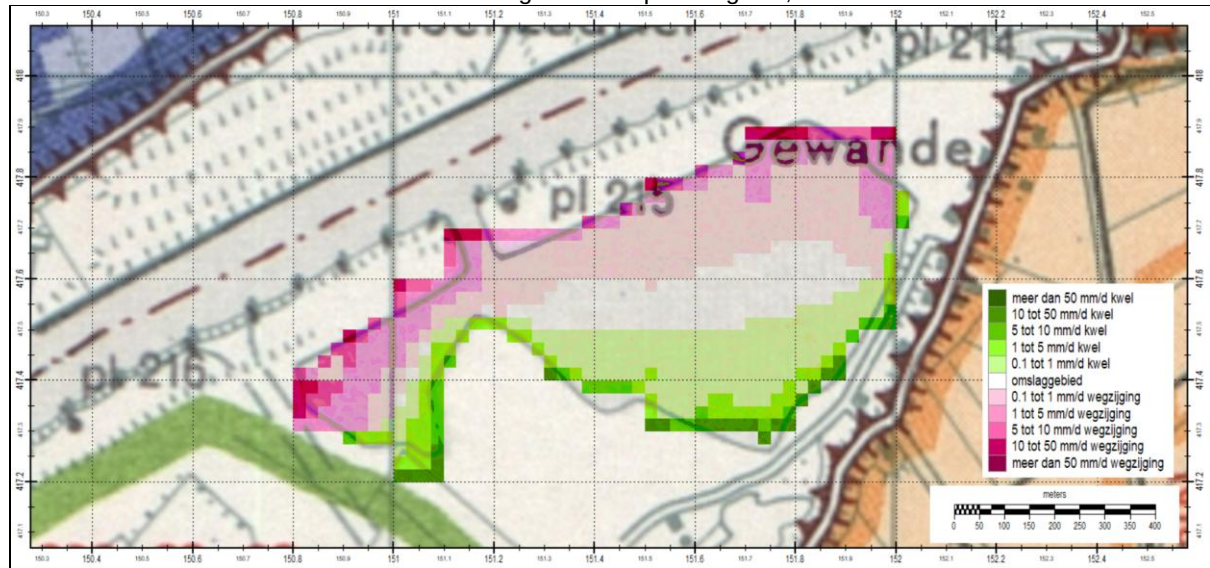


Figuur B.5 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op NAP –5, –10 en –20 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

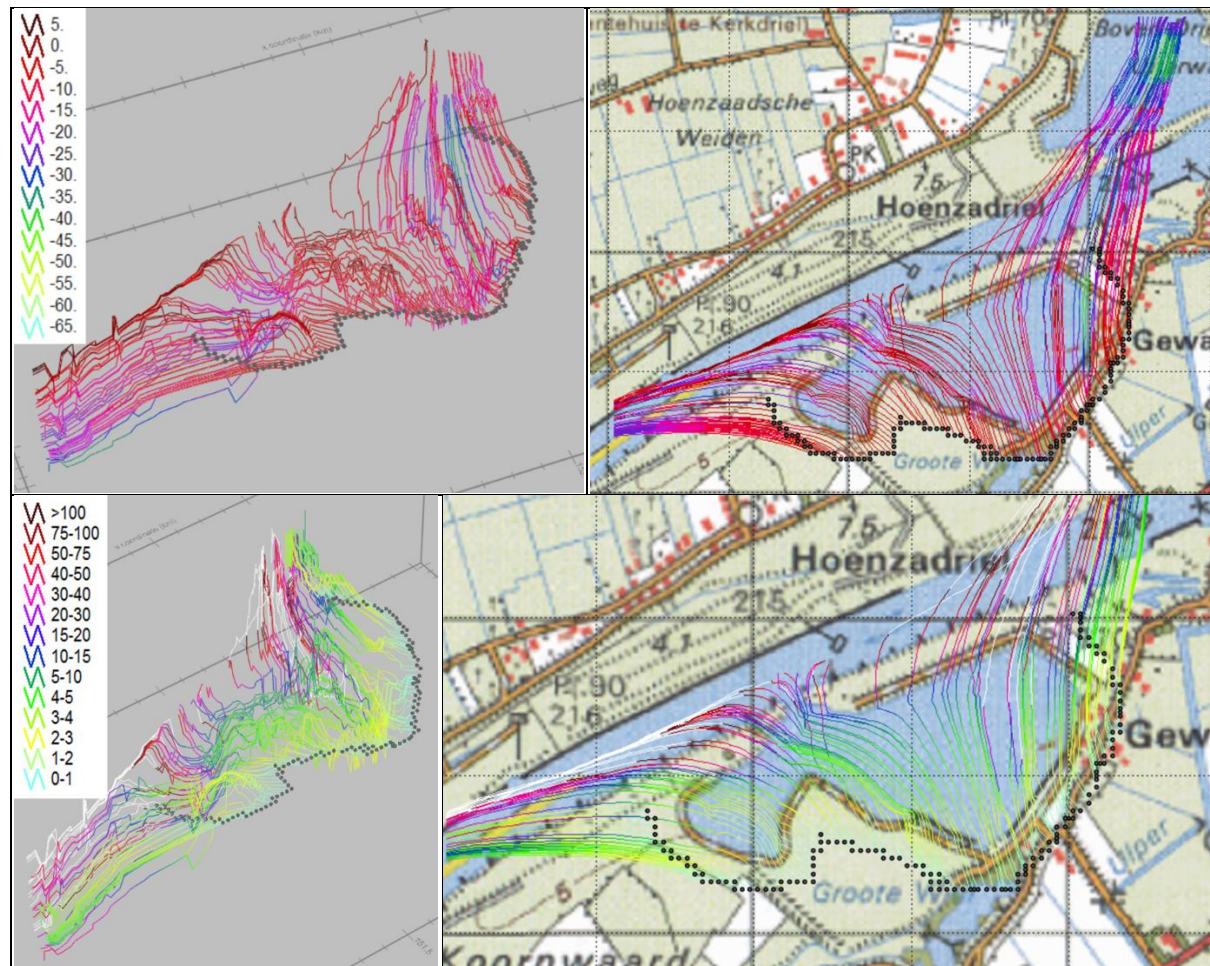
Voor de stroombanen startend op 10 m diepte voor de 10 jaar gemiddelde situatie zijn ook de fictieve situaties bepaald met verhoogde respectievelijk verlaagde rivier en plas peilen. Voor deze situaties is ook de gemiddelde kwel / wegzijging bepaald.

Rivier waterstanden + 0.5 m

In deze situatie is het areaal waar wegzijging optreedt wat groter dan in de situatie met actuele rivierwaterstanden. De rivier draineert ter hoogte van de plas nog wel, maar een stuk minder sterk.



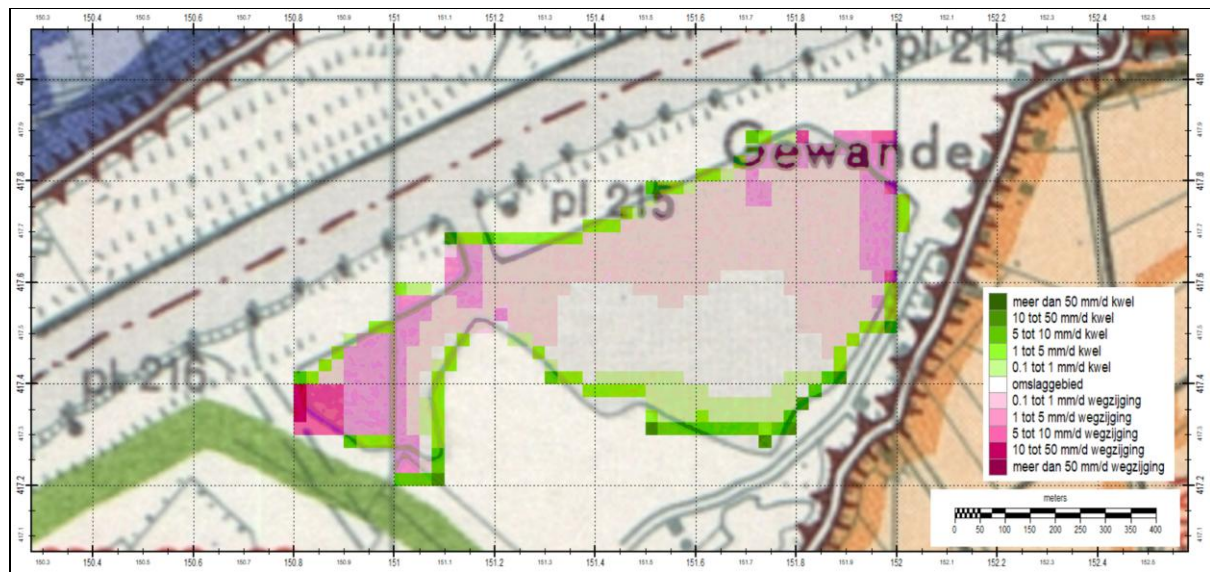
Figuur B.6 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas peil van 0.5 m



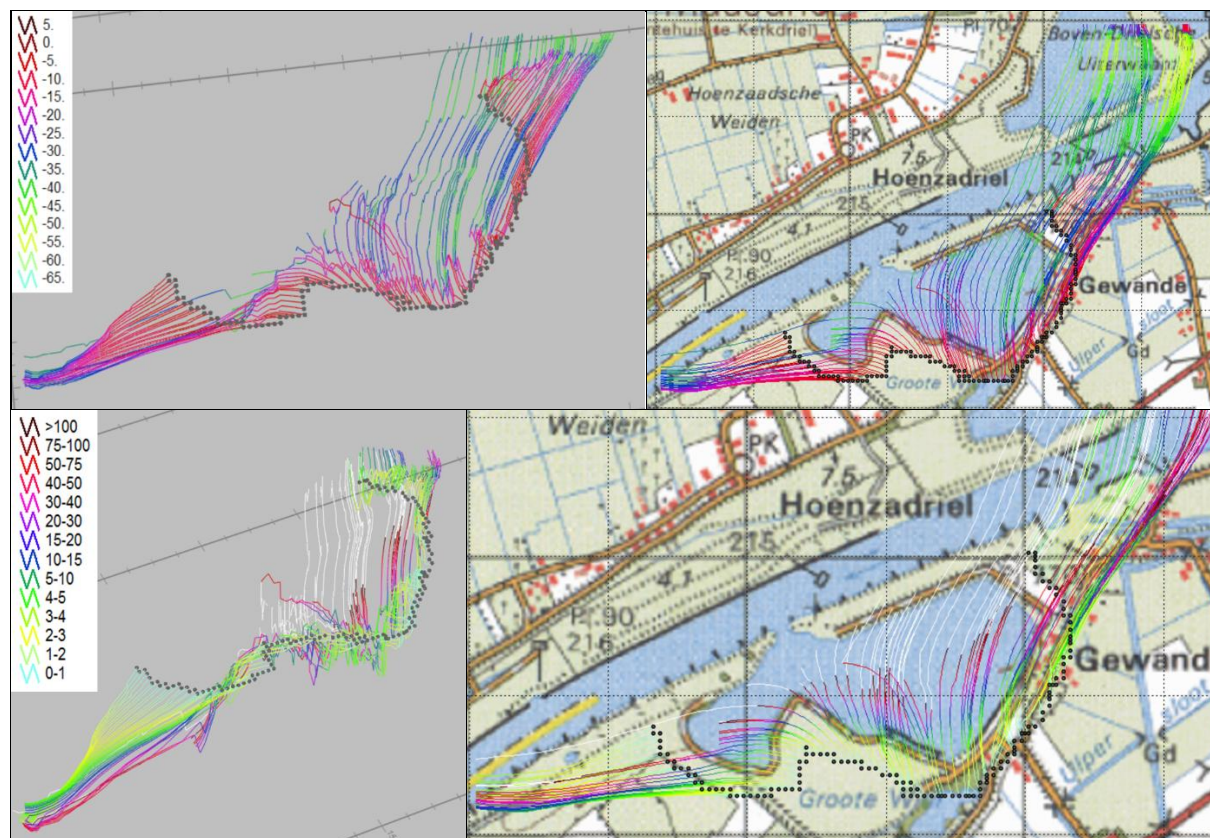
Figuur B.7 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas peil van 0.5 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier waterstanden + 1.0 m

In deze situatie is het areaal waar wegzijging optreedt veel groter dan in de situatie met actuele rivierwaterstanden. De rivier draineert gemiddeld niet meer. Dit leidt tot kwel in de rand van de plas die het dichtst bij de rivier ligt.



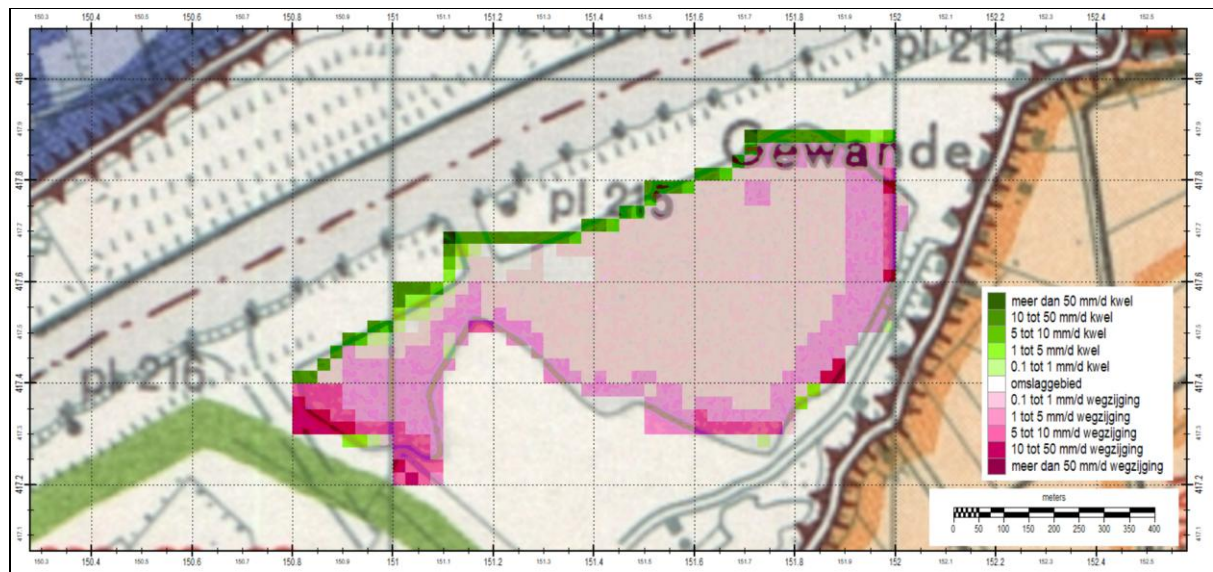
Figuur B.8 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas peil van 1.0 m



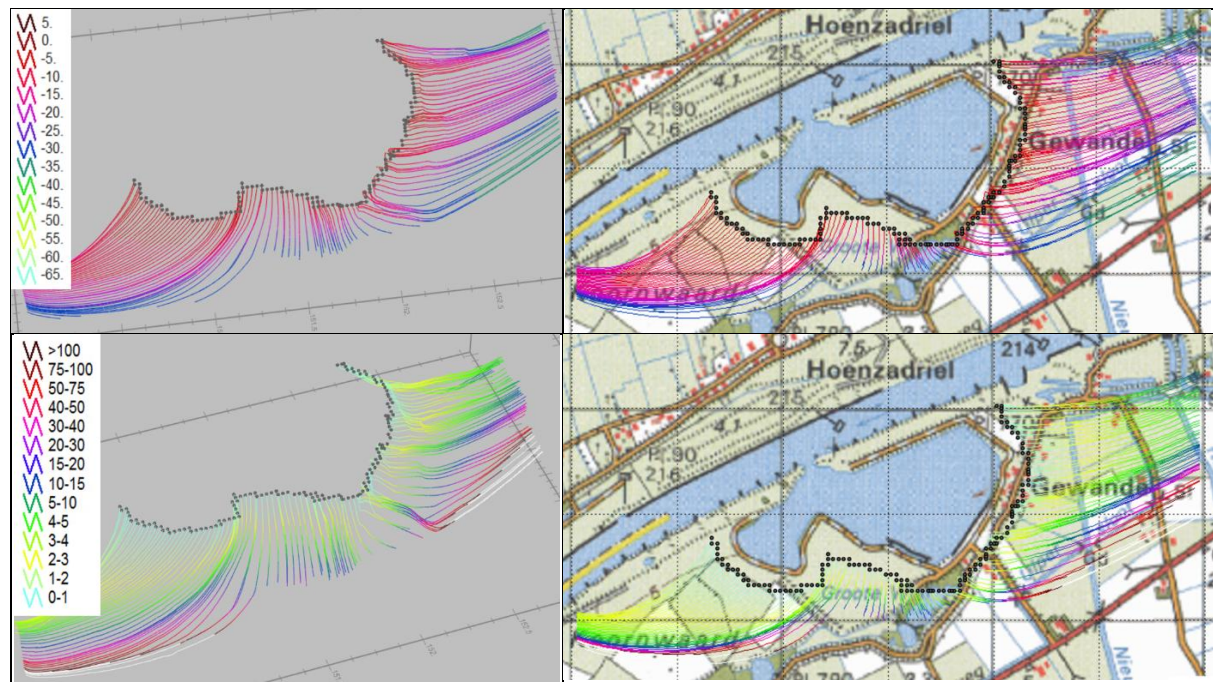
Figuur B.9 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas peil van 1.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier waterstanden + 2.0 m

In deze situatie beslaat het areaal waar wegzijging optreedt bijna de gehele plas. De rivier infiltreert zo veel dat er in deze situatie in het deel van de plas, dat het dichtst bij de rivier ligt, gemiddeld grote kwel optreedt.



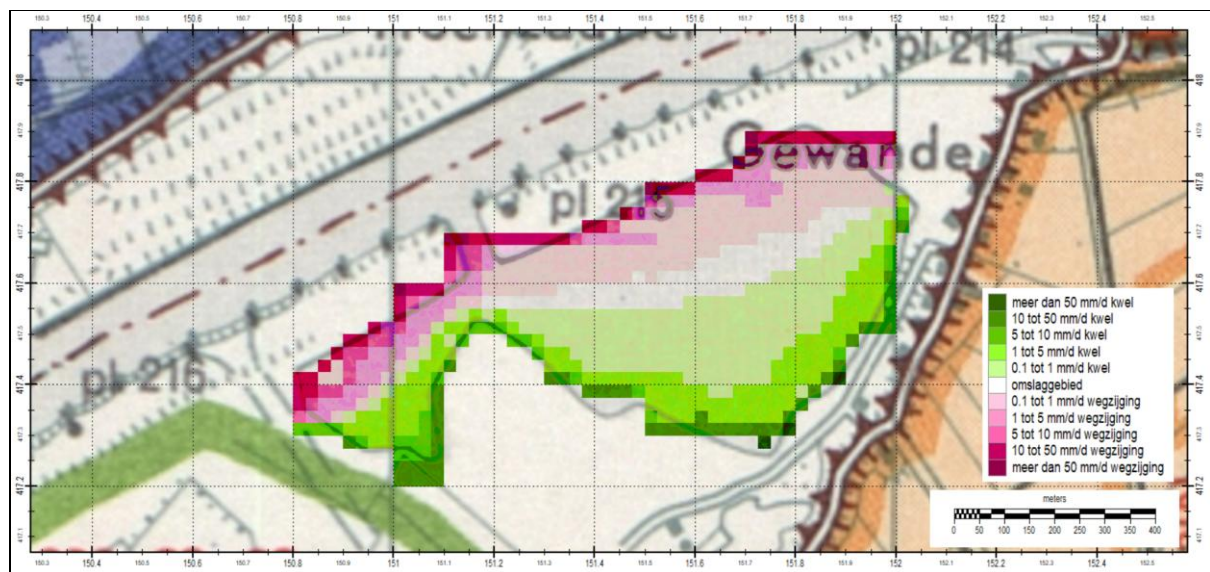
Figuur B.10 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verhoogd Maas peil van 2.0 m



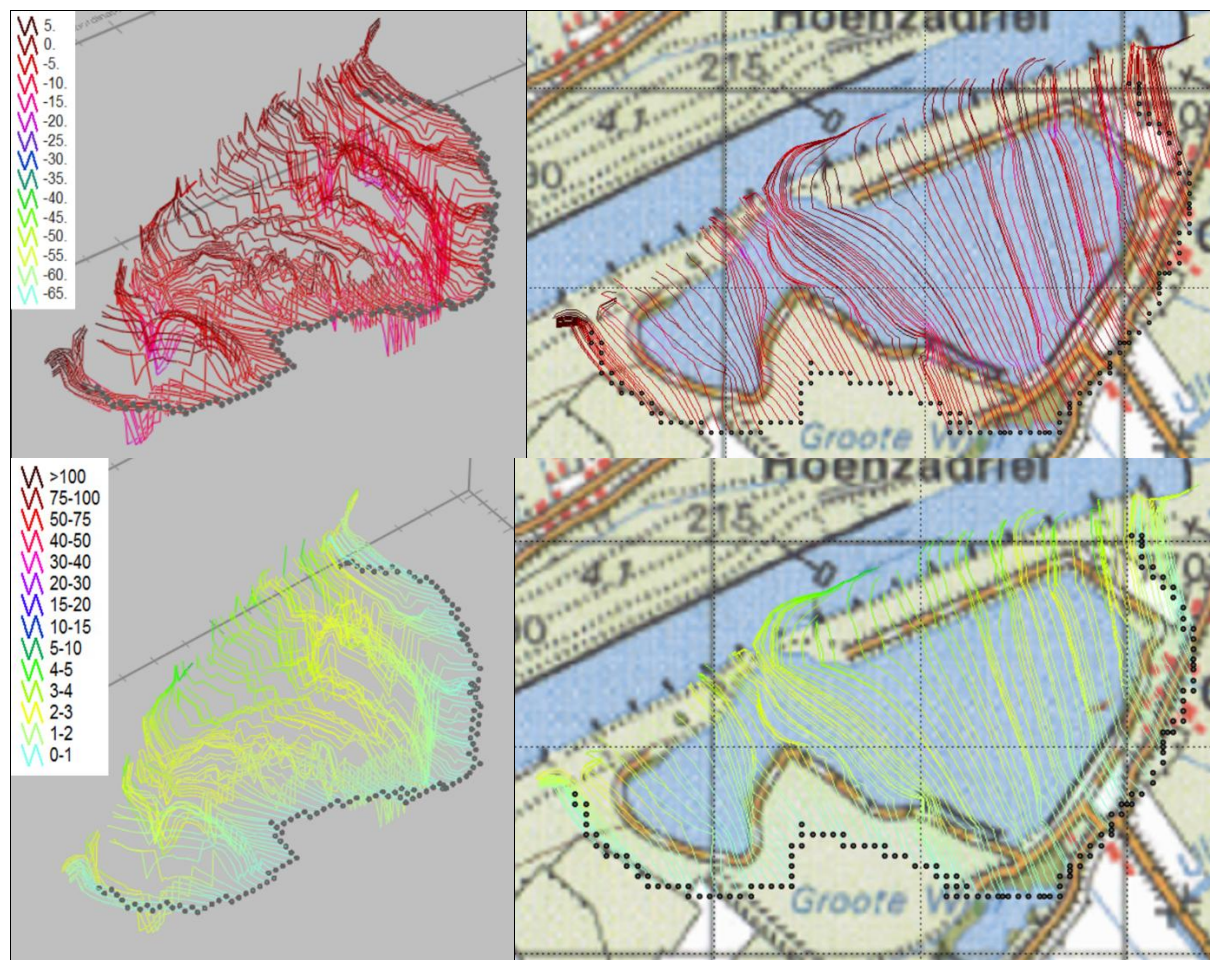
Figuur B.11 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verhoogd Maas peil van 2.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier waterstanden – 0.5 m

In deze situatie is het areaal waar wegzijging optreedt wat kleiner dan in de situatie met actuele rivierwaterstanden. De rivier draineert ter hoogte van de plas een stuk sterker.



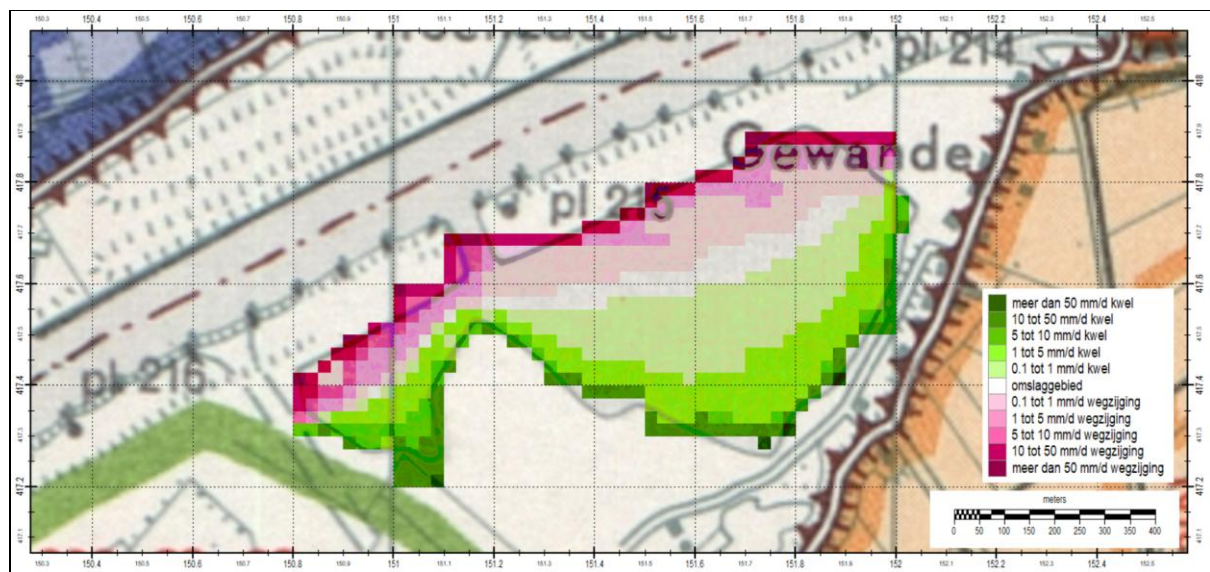
Figuur B.12 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas peil van 0.5 m



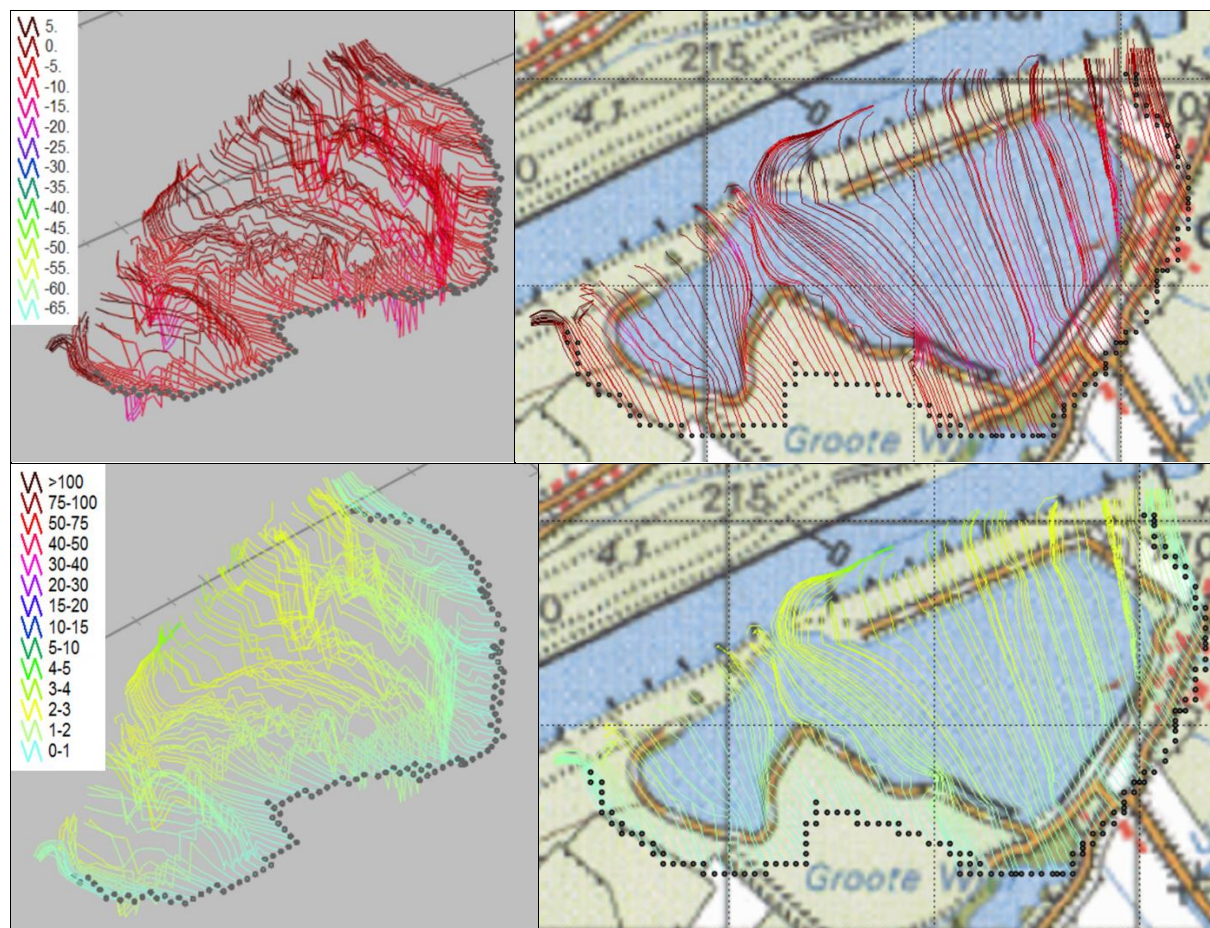
Figuur B.13 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verlaagd Maas peil van 0.5 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier waterstanden – 1.0 m

In deze situatie is het areaal waar wegzijging optreedt weer wat kleiner dan in de situatie met actuele rivierwaterstanden. De rivier draineert gemiddeld nog sterker.



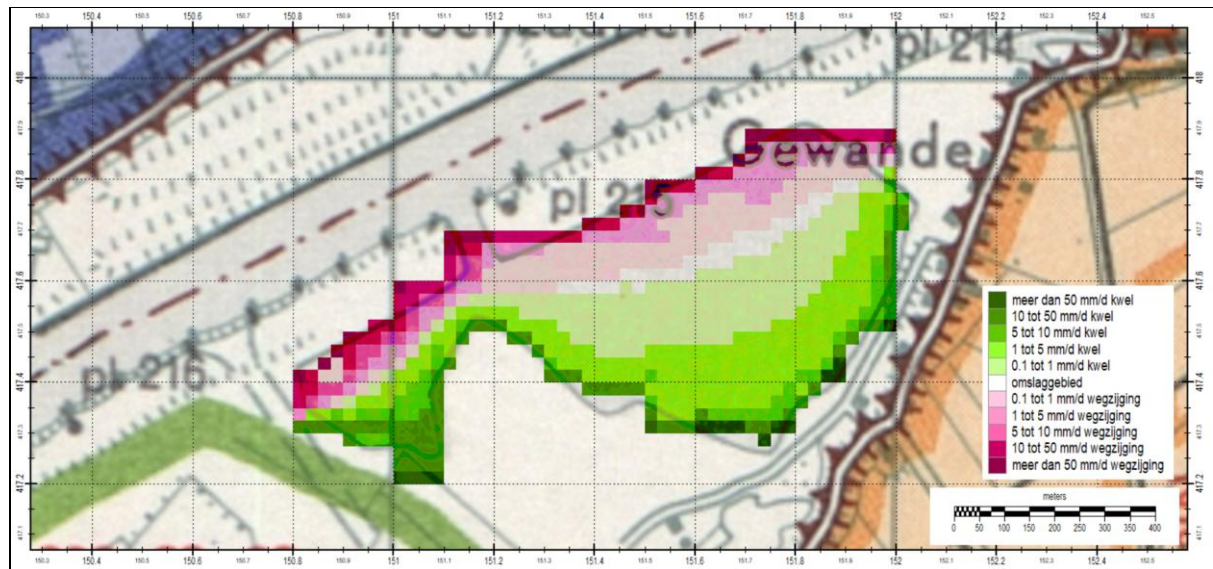
Figuur B.14 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas peil van 1.0 m



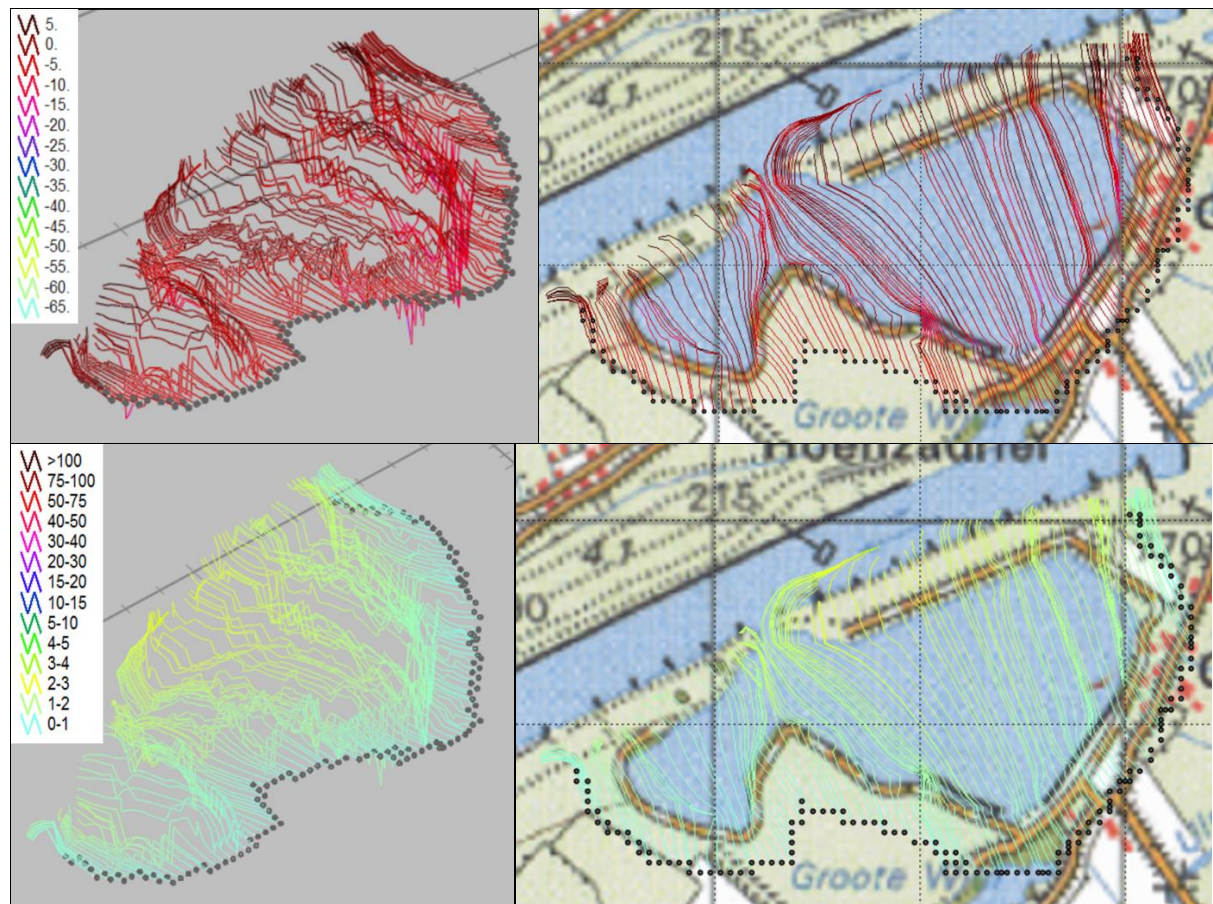
Figuur B.15 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verlaagd Maas peil van 1.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Rivier waterstanden – 2.0 m

In deze situatie is het areaal waar wegzijging optreedt nog verder verkleind. De rivier draineert nog meer.



Figuur B.16 Kwel (groen) / wegzijging (rood) in de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie met verlaagd Maas peil van 2.0 m



Figuur B.17 Resultaten stroombaanberekeningen startend langs de buitenrand van de losgekoppelde plas voor de gemiddelde niet-stationaire situatie, startend op 10 m diepte, met verlaagd Maas peil van 2.0 m met boven de diepte [m +NAP] en onder de verblijftijd [jaar]

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl