



Geohydrologisch onderzoek wellen langs ARK

Datum
27 juli 2022

Ons kenmerk
Corsa 22.010086

Versie
2

Projectnummer
09.0005/004

J.G.R. Beemster
S.J. van der Linde
M.R.L. Ouboter

Colofon

Opdrachtgever

Afdeling	Waterplannen en Besturing
Projectleider	Edwin ter Hennepe
Projectnummer	09.0005/004

Opdrachtnemer

Afdeling	Onderzoek en Advies
Projectleider	Jos Beemster
Projectnummer	09.0005/004

Rapport

Rapporteur	Jos Beemster, Siebren van der Linde, Maarten Ouboter
Versie	2
Rapportnummer	22.010086
Trefwoorden	Wellen, Opbarstrisico's, Grondwater, Hydrologie, Waterbalans, Amsterdam-Rijnkanaal, ARK, Kwel

Management samenvatting – wellenproblematiek ARK

In de polders Baambrugge-Oostzijds, Hoeker en Garsten en Holland Sticht en Voorburg West wordt sinds omstreeks 2002 in toenemende mate overlast ervaren als gevolg van wellen. Deze overlast komt tot uiting in:

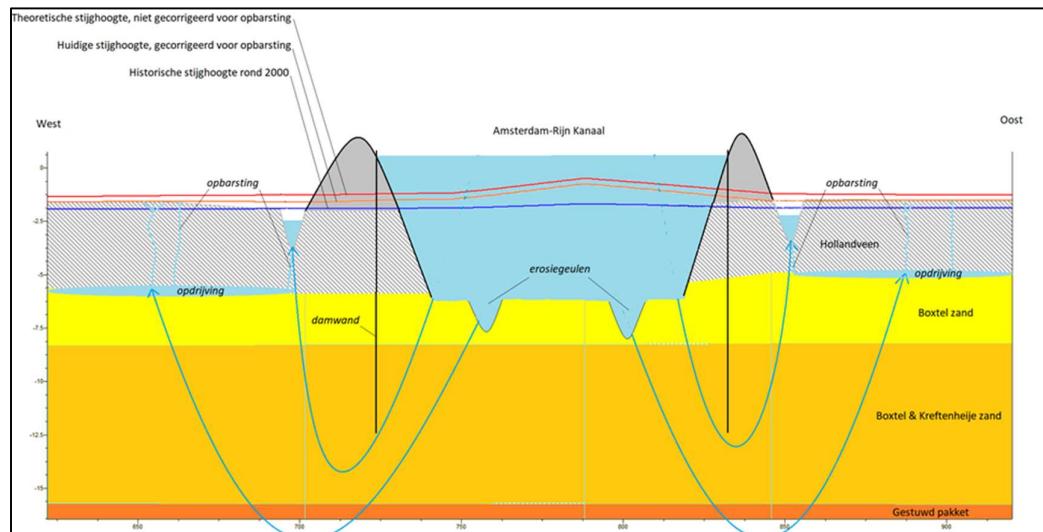
- Toename draaiuren gemalen, wat leidt tot extra kosten (slijtage onderdelen en stroom).
- Instabiliteit oevers, wat leidt tot oevererosie.
- Natte plekken in percelen van agrariërs, wat leidt tot natschade en ontoegankelijke delen voor landbouwmachines en vee.

De wellen zijn in de periode maart 2019 t/m maart 2022 via uitvoerig veldonderzoek en met drones in beeld gebracht.

Hiermee is de ervaren problematiek (aanwezigheid wellen in percelen en watergangen) aangetoond.

De overtuiging in het gebied en op basis van een eerste verkenning is dat de wellenproblematiek wordt veroorzaakt door het Amsterdam-Rijnkanaal. De hypothese die hieraan ten grondslag ligt is als volgt (zie ook de figuur):

Infiltratie van oppervlaktewater vanuit het hoger gelegen Amsterdam-Rijnkanaal naar de lager gelegen omliggende polders zorgt voor een waterdruk tegen de onderkant van de deklaag. De mate van infiltratie is rond de eeuwwisseling toegenomen doordat de infiltratieweerstand van de kanaalbodem is afgangen. Het gevolg van de toegenomen infiltratie is een verhoogde waterdruk aan de onderkant van de deklaag, die hierdoor geleidelijk aan kapot is gegaan hetgeen zich uit in wellen in de percelen/watergangen en een toename van water in de polder(s).



Figuur 1: Schematische weergave wellenproblematiek en ARK.

De hypothese is getoetst doormiddel van het uitvoeren van een breed scala aan onderzoeksmethoden:

Literatuuronderzoek naar:

- De historische verdieping en verbreding (periode 1973-1981)
- De bodemweerstand van het ARK
- De invloed van scheepvaart op de bodemweerstand

Op basis van literatuuronderzoek is geconstateerd dat er in het verleden al problematiek door kwel vanuit het ARK werd ervaren en dat dit toentertijd werd onderkend door RWS. De toen aanwezige problematiek is vervolgens afgangen door het geleidelijk aan dichtslibben van de kanaalbodem. Vanaf omstreeks 2000 lijkt de bodemweerstand van het ARK te zijn geërodeerd ten gevolge van toegenomen omvang en intensiteit van de scheepvaart op het kanaal.

Grondwatermonitoring

Op basis van gemeten grondwaterstanden in een meetraai haaks op het ARK is aangetoond dat de waterdruk op alle meetlocaties zodanig hoog is dat er overal een risico op opbarsten is. De opwaartse druk vanuit het watervoerende pakket neemt af naarmate de afstand tot het ARK groter wordt.

Tijdreeksanalyse

Met een tijdreeksanalyse van een groot aantal langjarige monitoringsbuizen in de omgeving van het ARK is een lineaire toename van de waterdruk sinds omstreeks 2000 aangetoond. De analyse laat zien dat de toename hoger is naarmate de afstand tot het ARK afneemt. De enige verklaring voor de toename kan worden gevonden in toename van infiltratie uit het ARK.

Waterbalansen

Met behulp van waterbalansen per polder is voor elke polder aangetoond dat de toename van het waterbezwaar niet veroorzaakt is door veranderingen in neerslag of inlaatwater. De enige plausibele oorzaak ligt in een toename van de toestroom van kwelwater uit wellen.

Grondwatermodellering

Met behulp van gekalibreerde en gevalideerde grondwatermodellen is het effect van de verandering van de infiltratieweerstand van het ARK op de omgeving gereproduceerd. Het grondwatermodel is op onderdelen gewijzigd ten opzichte van het model uit de vorige onderzoeksfase. Het ARK is nauwkeuriger geschematiseerd en alle poldersloten zijn individueel in het model opgenomen. De modelresultaten komen zeer goed overeen met de monitoringsgegevens van stijghoogtes en kwel. De modelresultaten onderstrepen daarmee de oorzaak van de toegenomen waterdrukken en de daaropvolgende wellen en kweltoename.

Overige oorzaken

Om andere oorzaken niet op voorhand uit te sluiten is er via verschillende sporen onderzocht of er nog meer oorzaken kunnen zijn die hebben geleid tot een verhoging van de waterdruk, met opbarsten tot gevolg.

De volgende alternatieve oorzaken zijn beschouwd.

- Ingrepen in het watersysteem (peilveranderingen) in de periode 2000 – 2020
- Reduceren grondwaterwinningen in de omgeving
- Bodemdaling
- Baggeren Vecht
- Flexibel peilbeheer Loosdrechtse Plassen
- Invloed diepe plassen ten oosten van het ARK

Deze overige oorzaken zijn deels door Waternet en deels door Tauw in een aanvullend review onderzoek beschouwd. Hieruit kwam naar voren dat bij géén van bovenstaande zaken een relatie met de lineaire stijghoogte toename rondom het ARK kon worden aangetoond waardoor ze kunnen worden uitgesloten als oorzaak voor de wellenproblematiek.

Conclusies

Alle bovenstaande 6 onderzoekslijnen wijzen afzonderlijk van elkaar op een sterke relatie tussen de ontwikkelingen in het ARK en de toegenomen wellenproblematiek in de omliggende polders. Wanneer ze gezamenlijk worden beschouwd kan enkel worden geconcludeerd dat de door Waternet geponeerde hypothese correct is. Daarmee is dus aangetoond dat de wellenproblematiek in de polders is veroorzaakt door:

1. Het verbreden en verdiepen van het ARK in het verleden (1973-1981). Dit heeft de basis gelegd voor de huidige problematiek.
2. De toegenomen scheepvaart op het ARK sinds 2000 waardoor als gevolg van bodemerosie de infiltratieweerstand is afgenomen. Dit heeft vervolgens wederom geleid tot een gestage toename van de waterdrukken in het watervoerende pakket met de huidige wellenproblematiek tot gevolg.

Inhoud

1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding onderzoek	9
1.2 Hypothese onderzoek	9
1.3 Doel van het onderzoek	10
1.4 Aanpak onderzoek en leeswijzer	10
2 Literatuuronderzoek	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Historie verdieping en verbreding van het ARK	11
2.2.1 Aetsveldse polders	11
2.2.2 Polders BBO, HGP, HSV west en HH west (km 16.3 – km 23)	11
2.3 Bodemweerstand ARK	12
2.4 Invloed scheepvaart op de bodemweerstand van het ARK	12
2.5 Conclusies	14
3 Wellenproblematiek in beeld	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Inventarisatie wellen in landbouwpercelen	15
3.3 Inventarisatie wellen in watergangen en oevers	15
3.4 Peilbuizen en grondmonsters	17
3.5 Conclusies	18
4 Tijdreeksanalyse op stijghoogte waarnemingen	19
4.1 Inleiding	19
4.2 Gevolgde procedure bij de tijdreeksanalyse	19
4.3 Voorbeeld uitwerking tijdreeksanalyse	21
4.4 Verschuiving zoet/zout grensvlak herleid uit tijdreeksanalyse	24
4.5 Conclusies tijdreeksanalyse	28
5 Overige oorzaken van versterkte kwel in de polders	29
5.1 Inleiding	29
5.2 Effecten peilbeheer sinds 2000	29
5.3 Effecten bodemdaling sinds 2000	30
5.4 Review Tauw	31
5.5 Conclusies	31
6 Grondwatermodellering	32
6.1 Inleiding	32
6.2 Methodiek	33
6.3 Resultaten	33
6.3.1 Infiltratiefux uit het ARK	34
6.3.2 Verandering stijghoogte	34
6.3.3 Opbarstrisico	35
6.3.4 Toename kwel	37
6.4 Conclusies	37
7 Waterbalansen van de polders rond het ARK	38
7.1 Inleiding en vraagstelling	38
7.2 Methodiek	38
7.2.1 Toelichting waterbalans	38

7.2.2	Afleiding van de kwel voorafgaand aan de toename van wellen	38
7.2.3	Tijdreeksanalyse ter bepaling van lineaire trend in de gemaaldebieten	38
7.2.4	De restterm	39
7.3	Resultaten balansberekeningen	39
7.3.1	De Hoeker Garstenpolder	39
7.3.2	Baambrugge Oostzijds	41
7.3.3	Holland, Sticht en Voorburg west en Het Honderd west	42
7.4	Vergelijking resultaten excel waterbalans met grondwatermodel	44
7.5	Conclusies	44
8	Eerste verkenning oplossingsrichtingen	45
8.1	Inleiding	45
8.2	Percelen ophogen met klei	45
8.3	Aanleg diepe teensloten langs ARK	45
8.4	Verhoging infiltratieweerstand ARK	46
8.4.1	Verlaging maximum snelheid van schepen op kwetsbare trajecten	46
8.4.2	Afdichting op kanaalbodem aanbrengen	46
9	Discussie seizoensvariaties in stijghoogten en waterbalans	47
9.1	Seizoenseffecten in stijghoogtewaarnemingen en gemeten waterbalans	47
9.2	Verklaring temperatuureffect op seizoensvariatie stijghoogten en waterbalans	47
9.3	Seizoensvariatie waterbalans door opdrijving deklaag	48
10	Conclusies en aanbevelingen	50
10.1	Conclusies	50
10.2	Aanbevelingen	51
Literatuur		52
Bijlagen		53
Bijlage 1: Isohypsen wvp 2 en kalibratieresultaat wvp 2 en 3		54
Bijlage 2: Isohypsen wvp 5 en kalibratieresultaat wvp 4 t/m 6		55
Bijlage 3: Resultaten tijdreeksanalyse (statistiek)		56
Bijlage 4: Resultaten tijdreeksanalyse (grafieken)		57
Bijlage 5: Peilbeheer en bodemdaling		68
5	Peilbeheer en bodemdaling	69
5.1	Inleiding	69
5.2	Peilbeheer Baambrugge Oostzijds	69
5.3	Peilbeheer Hoeker en Garstenpolder	71
5.4	Peilbeheer Holland Sticht en Voorburg West en Honderd West	72

Bijlage 6: Geohydrologie en grondwatermodellering	74
6 Geohydrologie en grondwatermodellering	75
6.1 Geohydrologische beschrijving onderzoeksgebied	75
6.2 Bodem, oppervlaktewater en grondwater gegevens	75
6.2.1 Bodem gegevens	75
6.2.2 Oppervlaktewater- en polderpeilen	77
6.2.3 Grondwatergegevens	77
6.3 Inrichting grondwatermodel	78
6.3.1 Modellentrein	78
6.3.2 Schematisering bodemopbouw	79
6.3.3 Neerslag en verdamping	80
6.3.4 Topsysteem	82
6.3.5 Onttrekkingsgegevens	83
6.4 Formularium opbarstrisico van watergangen	83
6.5 Toepassing opbarstformularium in grondwatermodel	85
6.6 Proces grondwatermodellering	87
6.7 Resultaten kalibratie grondwatermodel	88
6.7.1 ARK2000 model	88
6.7.2 Kalibratie ARK2020-opgebarsten model	89
6.8 Vergelijking huidig resultaat met modelresultaat voorgaande modellering	91
Bijlage 7: Gevoeligheidsanalyse met Monte Carlo	93
7 Gevoeligheidsanalyse met Monte Carlo	94
7.1 Inleiding	94
7.2 Methodiek	94
7.2.1 Uitleg Monte Carlo analyse	94
7.2.2 Voorbeelden uitkomsten Monte Carlo analyse	95
7.2.3 Weging meetfilters	97
7.2.4 De modellentrein i.r.t. Monte Carlo	98
7.3 Resultaten gevoeligheidsanalyse	99
7.3.1 Analyse stijghoogten	99
7.3.2 Analyse kwel	100
7.3.3 Beoordeling van de individuele parameters	103
7.4 Mogelijkheden voor modelverbetering	119
7.4.1 Algemeen	119
7.4.2 Correlaties in het model	119
7.4.3 Afweging verbetering kwel versus verbetering stijghoogte	120
7.4.4 Voorgestelde modelverbetering	120
7.5 Conclusies	121
Bijlage 8: Analysecertificaten chloridemetingen grondwater	122
Bijlage 9: Veld en laboratoriumonderzoek bodem en grondwater	123

1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

In maart 2015 is het meest recente Watergebiedsplan Hoeker- en Garstenpolder vastgesteld (Waternet, 2015). In het grondwateronderzoek dat onderdeel is van dit Watergebiedsplan, is geconcludeerd dat in de Hoeker- en Garstenpolder groot risico bestaat voor het opbarsten van de bodems van sloten en watergangen, onder invloed van wegzigging uit het Amsterdam-Rijnkanaal (Waternet, 2014).

Als reactie hierop schrijft LTO Noord in haar zienswijze op het ontwerp watergebiedsplan Hoeker- en Garstenpolder (januari 2015) dat de agrarische sector rond het Amsterdam-Rijnkanaal¹ veel hinder ondervindt van wellen veroorzaakt door kwel vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK). Het ARK wordt als oorzaak gezien van hogere grondwaterpeilen en natte plekken in de percelen waardoor overlast wordt ervaren. Het bemoeilijkt de agrarische bedrijfsvoering op deze percelen. LTO-Noord verzoekt het waterschap maatregelen te treffen om de wateroverlast van kwel vanuit het ARK in de betreffende polder(s) tegen te gaan (Waternet, 2015).

Ook het waterbeheer van de polders Baambrugge Oostzijds (BBO), Hoeker- en Garstenpolder (HGP) en Holland Sticht en Voorburg West (HSV-west) en Het Honderd West (HH-west) wordt in toenemende mate beïnvloed door de aanwezigheid van wellen. Uit metingen van Waternet blijkt dat de laatste jaren steeds meer water wordt uitgemalen. Dit waterbezwaar leidt tot een toename van het aantal draaiuren van de poldergemalen met als gevolg extra maalkosten en onderhoud van de gemalen (Waternet, 2020).

Waternet voert sinds 2018 overleg met agrariërs, provincie Utrecht en Rijkswaterstaat over de oorzaken, gevolgen en oplossingen van de wellen in de polders (Waternet, 2018). Eind 2019 zijn mogelijke maatregelen globaal in beeld gebracht en samengevat in een notitie. De notitie gaf een eerste overzicht van de inventarisatie, uitgevoerde onderzoeken en achtergronden naar het ontstaan van wellen. De notitie was informatief en bedoeld als discussiestuk over oorzaken en maatregelen (Waternet, 2020).

In dit rapport wordt de relatie tussen de veranderingen in het watersysteem van de bovennoemde polders en het ARK nader onderbouwd. Het is van belang deze relaties goed te kennen om zodoende een gedegen begrip te hebben van de interactie tussen het ARK en de omliggende poldersystemen. Enerzijds omdat dit helpt het verleden te duiden, anderzijds omdat dit helpt toekomstige plannen voor het ARK zorgvuldig af te wegen en daarmee onvoorzienbare nadelige effecten voor te zijn.

1.2 Hypothese onderzoek

De hypothese in dit onderzoek kan als volgt worden omschreven:

Verbreding en verdieping van het ARK in de jaren zeventig en begin tachtig van de vorige eeuw hebben de bodemweerstand van het kanaal verlaagd, waardoor infiltratie van kanaalwater sterk toenam. Door de sterke infiltratie namen stijghoogten én kwelfluxen in de omliggende polders acuut toe. Deze effecten namen in de volgende twee decennia weer geleidelijk af door afzetting van een weerstand biedende sliblaag op de kanaalbodem (zie ook: Waternet, 2011). Door toenemende scheepvaart op het ARK vanaf globaal de eeuwwisseling is de sliblaag deels opgeruimd en is ook de vaste waterbodem op veel plaatsen geërodeerd (Deltares, 2012). De infiltratie van kanaalwater is hierdoor weer toegenomen, met als gevolg opnieuw een toename van stijghoogten en kwelfluxen in de polders. Het gevolg van de stijghoogtentename is een verhoogde waterdruk op de onderkant van de deklaag. Hierdoor is de deklaag verzwakt ("opgebarsten") en zijn wellen ontstaan. Door de welvorming is de afvoer van kwelwater naar de gemalen van deze polders toegenomen.

¹ Het betreft de Hoeker- en Garstenpolder, de polders van Abcoude/Baambrugge (Baambrugge Oostzijds), Loenersloot (Holland, Sticht en Voorburg West) en Breukelen (Polder Het Honderd West).

1.3 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is meervoudig:

1. Een zo compleet mogelijk beeld te krijgen van aanwezige wellen in sloten en percelen binnen het onderzoeksgebied.
2. De hypothese te toetsen aan beschikbare kennis en informatie over het ARK en andere mogelijke oorzaken
3. De weerstandsvermindering van de ARK-bodem modelmatig te simuleren in tijddreksmodellen én numerieke grondwatermodellen om de gemeten effecten te toetsen aan modeluitkomsten
4. Overeenstemming te bereiken tussen stakeholders (Waternet, Rijkswaterstaat, Provincie Utrecht en agrariërs) over:
 - de oorzaak van de aanwezige wellen en de toename van de hoeveelheid af te voeren water in het onderzoeksgebied,
 - de ernst van de problematiek en mogelijke schade die hier het gevolg van is;
 - de wenselijkheid/noodzaak van een oplossing voor de problemen en mogelijke schade.

1.4 Aanpak onderzoek en leeswijzer

Om de onderzoeksdoelen te bereiken zijn de volgende stappen genomen:

1. Literatuuronderzoek met betrekking tot de verbreding en verdieping van het ARK in de laatste 50 jaar. Dit wordt behandeld in hoofdstuk 2.
2. Inventarisatie van wellen in de percelen door waarneming tijdens veldbezoek en in sloten met behulp van infrarood fotografie vanuit een drone. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 3.
3. Tijddreksanalyse van langjarige stijghoogtewaarnemingen uit het archief van Waternet en TNO in de omgeving van het kanaal. Hierop wordt ingegaan in hoofdstuk 4.
4. Onderzoek van twee belangrijke potentiële oorzaken voor de kweltoename in de polders, namelijk: veranderingen in peilbeheer en eventuele bodemdaling in de afgelopen 20 jaar. Ook wordt ingegaan op het review onderzoek van Tauw waarin nog een scala aan potentiële oorzaken wordt onderzocht (Tauw, 2021). Dit wordt beschreven in hoofdstuk 5.
5. Het simuleren van het huidige en het historische grondwatersysteem met behulp van een gekalibreerd grondwatermodel, om de waargenomen veranderingen systematisch te analyseren. De resultaten hiervan staan beschreven in hoofdstuk 6. Een gedetailleerde beschrijving van het grondwatermodel staat beschreven in de bijlagen 6 en 7.
6. Een geotechnische analyse van opbarstrisico's van watergangen en maaiveld met behulp van de resultaten uit 5. en beschikbare gegevens over de lokale bodemopbouw. De resultaten hiervan worden ook beschreven in hoofdstuk 6. De uitgangspunten staan beschreven in bijlage 6.
7. Opstellen van waterbalansen over de afgelopen 25 jaar van de polders met wellenproblematiek rond het ARK om vast te stellen in hoeverre de (k)welfluxen in deze periode significant zijn toegenomen. De waterbalansen worden toegelicht in hoofdstuk 7.
8. Er worden een aantal oplossingsrichtingen voor de geschatste problematiek aangedragen. Deze zijn verkend op hoofdlijnen, hetgeen wordt beschreven in hoofdstuk 8.

In hoofdstuk 9 worden nog enkele kanttekeningen bij het geheel geplaatst. De rapportage sluit af met de belangrijkste conclusies in hoofdstuk 10. In dat hoofdstuk worden ook een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan.

2 Literatuuronderzoek

2.1 Inleiding

Op basis van diverse literatuurbronnen is in dit hoofdstuk de verdieping en verbreding van het Amsterdam-Rijnkanaal tussen Breukelen en Weesp in de 70'er en 80'er jaren samengevat. Ook wordt aandacht gegeven aan toenmalige waarnemingen aan het grondwatersysteem. Daarnaast wordt beschreven wat er in de literatuur te vinden is over de invloed van scheepvaart op de bodemweerstand van het ARK.

2.2 Historie verdieping en verbreding van het ARK

Het Amsterdam-Rijnkanaal is in 1952 gevormd uit het voormalige Merwedekanaal, door breedte en diepte aan te passen aan de toenmalige scheepvaarteisen: 75 meter breed en 4.20 meter diep. In de zeventiger jaren groeide de wens tot aanvullende verbreding en verdieping. Besloten wordt het kanaal te verbreden tot 100 m en te verdiepen tot 6.00 m (Pomper, 1975). De historie, van verdieping en verbreding van het ARK, met weergave van verschillende bronnen, is samengevat in tabel 2.1.

Tabel 2.1: historie verdieping en verbreding ARK tussen Breukelen en Nigtevecht

Polder	km op ARK		werkzaamheden oostzijde		werkzaamheden westzijde	
			van	tot	van	tot
Aetsveld Oost en West	10,0	13,3	jul-73 ¹⁾	jul-73 ¹⁾	okt-73 ¹⁾	okt-73 ¹⁾
BBO en HGP	13,3	16,3	?	?	okt-81 ³⁾	nov-81 ³⁾
BBO en HGP	16,3	18,0	jan-77 ²⁾	mrt-77 ²⁾	sep-81 ³⁾	okt-81 ¹⁾
HSV west	18,0	21,5	mrt-77 ²⁾	apr-77 ²⁾	jul-81 ³⁾	aug-81 ³⁾
HH west	21,5	22,7	mei-77 ²⁾	juni-77 ²⁾	juli-81 ³⁾	jul-81 ³⁾

¹⁾Pomper, 1975 (figuur 22)

²⁾Pomper, 1980 (figuur 2)

³⁾Schatting Waternet, op grond van waarnemingen in peilbuizen

Hieronder volgt een korte beschrijving voor de diverse polders.

2.2.1 Aetsveldse polders

De werkzaamheden tussen Nigtevecht en Weesp verlopen in twee fasen (Pomper, 1975).

Tussen 16 en 20 juli 1973 vindt verdieping van het kanaal plaats tot NAP -6.40 m.

Verbreding van het kanaal tot 100m vindt plaats tussen 1 en 15 oktober 1973.

2.2.2 Polders BBO, HGP, HSV west en HH west (km 16.3 – km 23)

De verbeterwerken tussen Baambrugge en Breukelen (km 16.3 - km 23.3) zijn ook in twee fasen aangepakt (Pomper, 1980). In 1977 is het kanaal aan de oostzijde, gaande van noord naar zuid, verbreed en op diepte gebracht (Pomper, 1980). Daarna is in 1981 aan de westzijde, van zuid naar noord, de waterdiepte vergroot. Het kanaalgedeelte tussen km 13.3 (Nigtevecht) en Baambrugge (km 16.3) wordt niet beschreven in Pomper. Het ontgravingsmoment is geschat op grond van piekwaarnemingen van de stijghoogte in peilbuis 25H238 (zie figuur 4.5 en bijlage 4).

Oostelijke zijde ARK

In de periode van begin januari 1977 tot begin juni 1977 is het aan de polders grenzende kanaalvak aan de oostzijde verbreed van ca. 75 m naar ± 100 m en verdiept van NAP - 4,60 m tot NAP - 6,40 m.

Gestart is ter hoogte van Baambrugge in januari 1977. Er is in zuidelijke richting gewerkt. Deze fase is beëindigd aan de noordzijde van Breukelen in juni 1977.

Westelijke zijde ARK

In de periode van ca. 1 juli 1981 tot ca. 1 november 1981 is de westzijde van het aan de polders grenzende kanaalgedeelte verdiept van NAP - 4,60 m tot NAP - 6,40 m. Er is gewerkt vanuit Breukelen in noordelijke richting naar Baambrugge. De afsluitende bovenlaag is plaatselijk geheel weggebaggerd.

Op 10 augustus 1981 is RWS begonnen met het uitdiepen van het gedeelte Amsterdam-Rijnkanaal ter hoogte van de polder Holland, Sticht en Voorburg West. Direct signaleert het waterschap De Proosdijlanden een toename van kwel in de polder Holland Sticht en Voorburg West. Voordat met de onderhavige baggerwerkzaamheden werd begonnen, behoefde het gemaal uitsluitend bij overvloedige regenval in werking te worden gesteld. Uit analyse van de maalstaat en het neerslagoverschot concludeert RWS (*Brief RWS aan waterschap De Proosdijlanden, 6 december 1985*) dat beide fasen van de werkzaamheden invloed hebben gehad op het aantal draaiuren van het gemaal, hetgeen na het eerste baggerwerk alleen in de zomerhalfjaren naar voren komt en na het tweede baggerwerk in sterkere mate zowel in de zomerhalfjaren als in de winterhalfjaren. In eerder verricht onderzoek van de Commissie kwel- en verdrogingschade (Pomper 1980) werd al geconcludeerd dat kweltoename vanuit het kanaal door de baggerwerkzaamheden in de zomerhalfjaren groter was dan in de winterhalfjaren. Door het waterschap is eveneens een toename van de bemalingskosten geconstateerd in de polder Baambrugge-Oostzijds na het uitbaggeren van het Amsterdam-Rijnkanaal (*Brief van 18 december 1986 aan RWS*). Ook deze situatie wordt door RWS geanalyseerd en leidt tot dezelfde conclusie.

2.3 Bodemweerstand ARK

In een onderzoek van Rijkswaterstaat naar de mogelijkheden van zandwinning onder het ARK zijn met behulp van gemeten stijghoogten langs het kanaal, weerstandswaarden voor de kanaalbodem afgeleid: vóór verbreding, kort na verbreding en enkele jaren na verbreding van het ARK (Steenkamp, 1987). Deze berekeningen hebben als referentie gediend voor onderzoek door Waternet naar mogelijke effecten op het grondwater na baggeren van de Vecht (Waternet, 2012). In het onderzoek van Waternet (2012) zijn de door Steenkamp afgeleide bodemweerstanden herberekend met een verbeterd formularium. De resultaten van deze herberekeningen uit 2012 zijn sturend geweest in het huidige onderzoek. In tabel 2.2 zijn de door Steenkamp (1987) afgeleide en Waternet (2012) geverifieerde weerstanden voor de ARK bodem vermeld.

Tabel 2.2 infiltratie weerstand (in dagen) van ARK-bodem

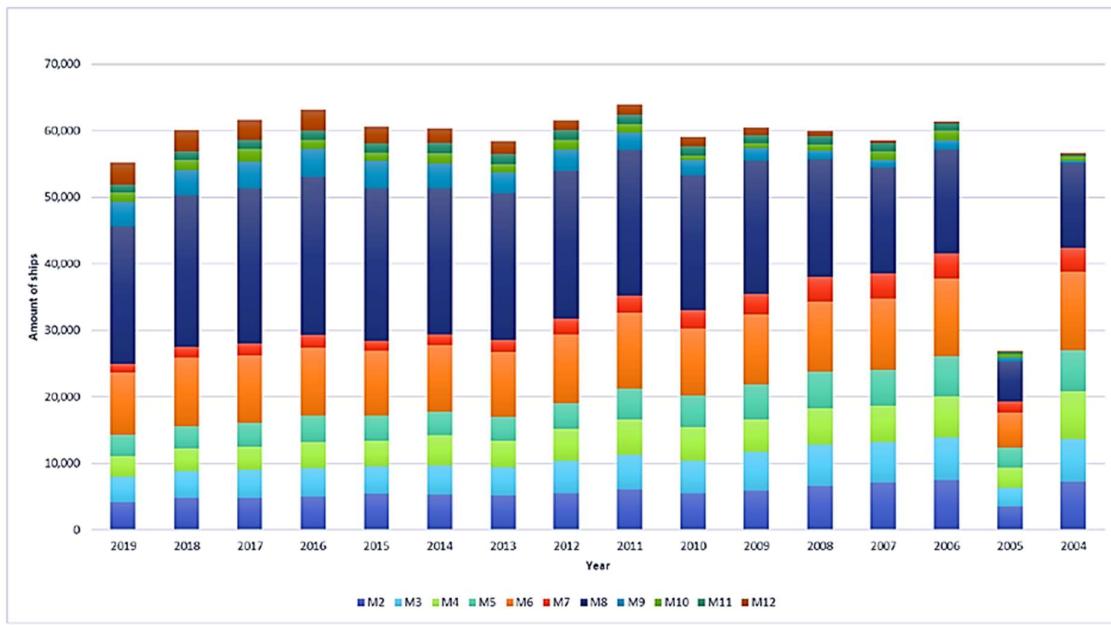
Periode	Steenkamp, 1987	Waternet, 2012
Vóór 1977	250 dagen over hele breedte	250 dagen over hele breedte
Eind 1981	40d/10d/40d in stroken ¹⁾ van 20m/60m/20m	40d/6.5d/40d in stroken van 20m/60m/20m
Ná 1990		70 dagen over hele breedte

¹⁾ De genoemde stroken van 20m/60m/20m hebben betrekking op de breedte van respectievelijk het oostelijk talud, het middendeel en het westelijk talud van de ARK bodem.

Watergraaf en Heemraden van het Waterschap De Vecht zijn van mening zijn dat de voorgenomen ontgronding een extra toename van de kwel zal opleveren ten opzichte van de aanzielijke kweltoename die reeds is veroorzaakt door de kanaalverruimingswerken van omstreeks 1974 (*Bezwaar tegen ontgronding waterschap De Vecht van 30 oktober 1987*). Dijkgraaf en Heemraden van het Waterschap De Proosdijlanden hebben ernstige bezwaren tegen de winning van zand conform de vergunningsaanvraag. Zij zijn in de stellige verwachting dat verdieping van het kanaal een toename van de kwel in de langs het kanaal gelegen polders zal veroorzaken. Dit is reeds uit het nabije verleden bekend en onderkend (*Bezwaar tegen ontgronding waterschap De Proosdijlanden van 2 november 1987*).

2.4 Invloed scheepvaart op de bodemweerstand van het ARK

Deltares heeft in 2012 onderzoek uitgevoerd naar bodemerosie in het ARK (Deltares, 2012), waarin wordt vastgesteld dat door de toename van schepen met grotere diepgang aanzielijke erosie op de bodem van het kanaal optreedt. In figuur 2.1 is de ontwikkeling in scheepsomvang op het ARK weergegeven. De codering M2 t/m M12 in deze figuur is een oplopende maat voor de lengte, diepgang en het schroefvermogen van de schepen. In tabel 2.3 zijn twee representatieve categorieën van schepen nader gespecificeerd (Deltares, 2012).

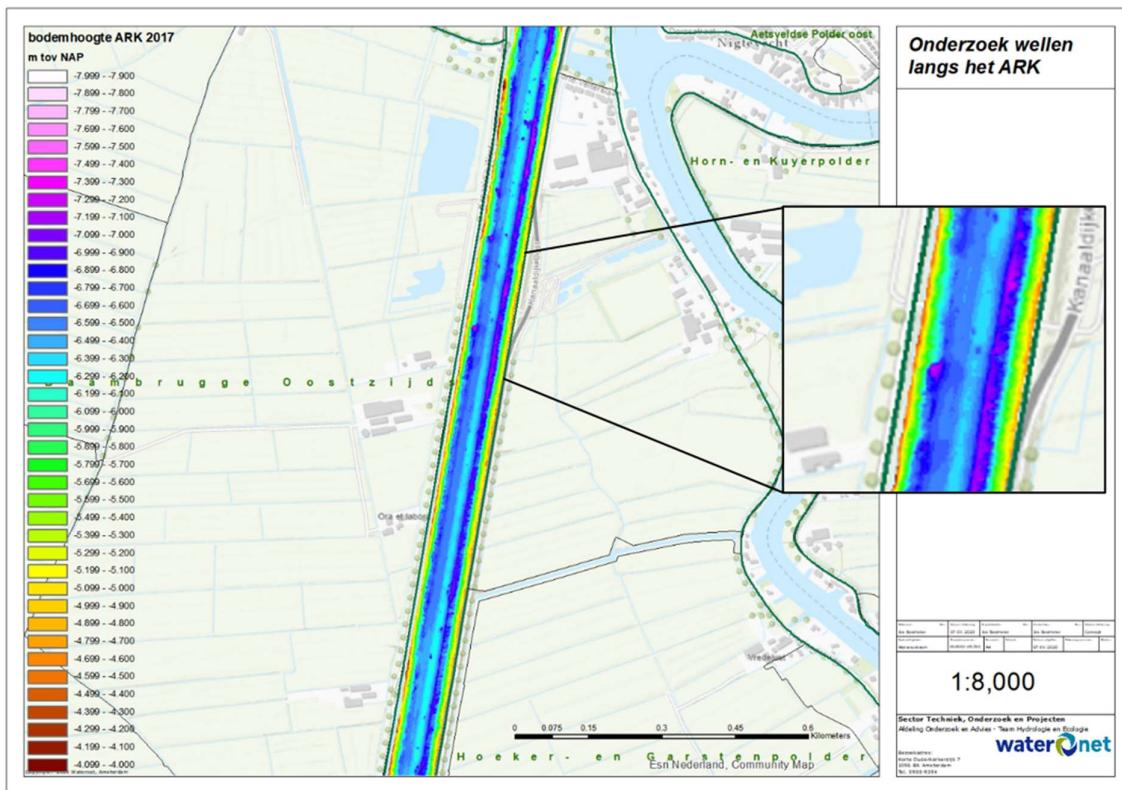


Figuur 2.1: Ontwikkeling scheepsomvang in de periode 2004-2019 (Veldhuis, 2020)

Tabel 2.3: karakterisering van twee representatieve scheepstypen op het ARK (Deltares, 2012)

Parameter	M8 schip	M12 schip
Lengte (m)	110	135
Breedte (m)	11,4	17
Diepgang (m)	3,5	4,0
<i>hoofdschroef</i>		
Max vermogen, P (kW)	1700	2800
Diameter, D _p (m)	2,0	2,3
<i>Boegschroef (stuurrooster)</i>		
Max vermogen, P (kW)	700	1000
Diameter, D _p (m)	1,2	1,4

In figuur 2.2 is voor een deeltraject van het ARK ter hoogte van de polders BBO en HGP de diepte van de kanaalbodem afgebeeld. Over het hele tracé van het ARK (ook buiten het getoonde deeltraject) zijn twee diepe erosiegeulen in de kanaalbodem zichtbaar. Deze erosiegeulen kunnen tot 1.5 meter diep zijn ten opzichte van de overige kanaalbodem. De lichtblauwe kleuren komen globaal overeen met de theoretische diepte van NAP -6,40 m. De donkerblauwe en roze kleuren geven een grotere diepte aan. De roze kleuren in de geulen reiken tot een diepte van minimaal NAP - 7,40 m en soms zelfs dieper.



Figuur 2.2: Diepte van het ARK ter hoogte van polders Baambrugge Oostzijds en Hoeker/Garstenpolder (Bathymetrische data RWS, 2017). De geulen kunnen worden herkend aan de donkerblauwe/paarse lijnen.

Enkele van de conclusies uit rapport van Deltares uit 2012 luiden:

- Stroomsnelheden aan de bodem in de orde van 2,0 à 2,6 m/s zijn te verwachten als gevolg van de retourstroming onder schepen. Deze snelheden treden niet uitsluitend op direct voor de damwand, maar ook in de vaarbaan.
- De stroomsnelheden zullen leiden tot ontgrondingen van maximaal 1,0 à 1,5 m en kunnen over de volledige kanaalbreedte mogelijk zijn. Bodempeilingen bevestigen deze verwachting.

Volgens Deltares (2012) is ook sprake van erosie van de oorspronkelijk aangelegde onderwatertaluds langs de oevers, waardoor damwanden langs het kanaal instabiel worden. Het geleidelijk verdwijnen van deze onderwatertaluds leidt er toe dat de bodemweerstand langs de oevers, waar mogelijk nog restanten deklaag aanwezig zijn, verder afneemt. Door deze toenemende erosie van onderwatertaluds en vorming van erosiegeulen meer naar het midden, neemt de infiltratieweerstand van de waterbodem af. De poriën in de zandige waterbodem kunnen niet langer dichtslibben door de continu aanwezig turbulente waterstroming. Het fijnste slab zal continu in suspensie zijn en deels afgevoerd worden met de stroming in het kanaal. In figuur 9.3 van hoofdstuk 9 is een schematische doorsnede getoond van het ARK met bovenbeschreven erosiegeulen.

2.5 Conclusies

Op basis van literatuuronderzoek wordt geconcludeerd dat:

1. Verbreding en verdieping van het ARK tussen 1973 en 1981 heeft geleid tot een toename van de afvoer van kwelwater in de polders Baambrugge Oostzijds en Holland, Sticht en Voorburg West. Deze kweltoename is door het toenmalige Waterschap Proosdijlanden aangekaart bij Rijkswaterstaat. Na onderzoek, heeft Rijkswaterstaat deze kweltoename bevestigd. De kweltoename is tussen 1982 en 2000 deels weer tenietgedaan door de afzetting van slab op de kanaalbodem.
2. Door toenemende scheepvaart op het ARK tussen globaal 2000 en 2020 is de sliblaag en de vaste waterbodem op veel plaatsen geërodeerd (Deltares, 2012). De weerstand tegen infiltratie van kanaalwater is hierdoor naar verwachting weer afgangen.

3 Wellenproblematiek in beeld

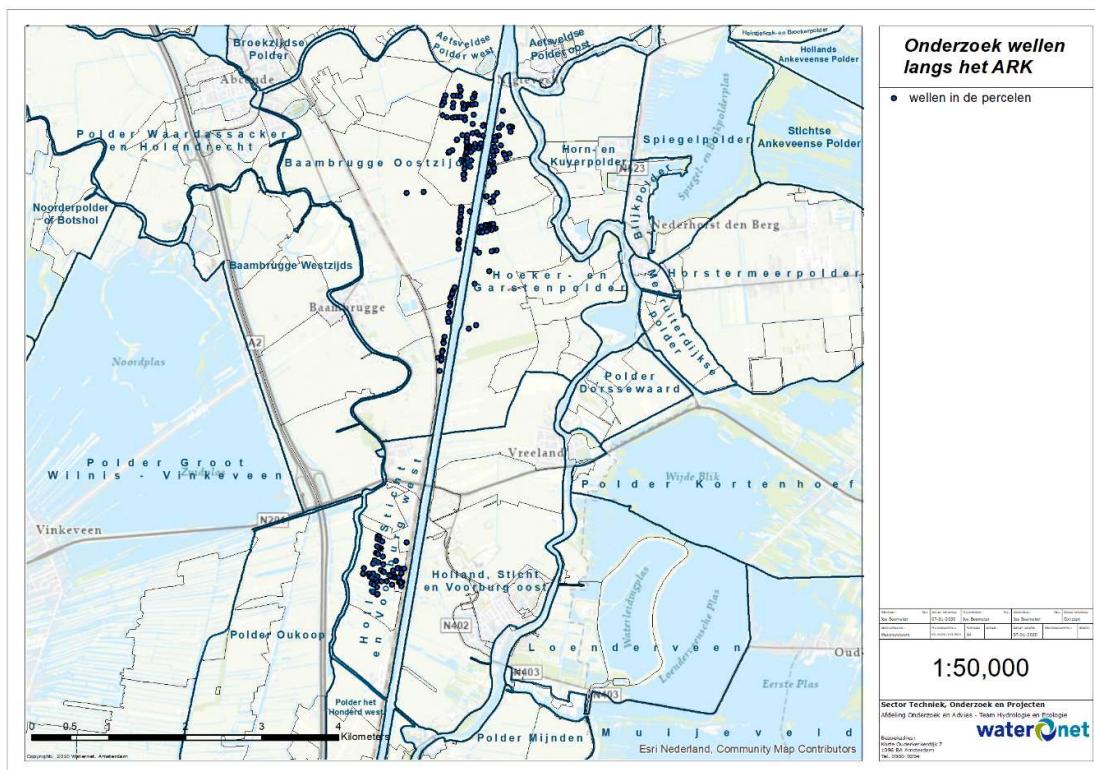
3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de manieren waarop de wellenproblematiek in de praktijk tot uiting komt. Er is een inventarisatie gemaakt van bestaande wellen, zowel in watergangen als in percelen. Ook zijn aanvullende boringen en peilbuizen geplaatst nabij het kanaal. Enerzijds om de lokale bodemeigenschappen vast te stellen, anderzijds om meer inzicht te krijgen in de lokale grondwaterstroming.

3.2 Inventarisatie wellen in landbouwpercelen

In de maanden februari en maart van 2019 zijn in Baambrugge Oostzijds en de Hoeker- en Garstenpolder de door agrariërs gemelde wellen in landbouwpercelen geïnventariseerd [Stap, 2019]. In figuur 3.1 zijn de in 2019 geïnventariseerde wellen in percelen op kaart weergegeven.

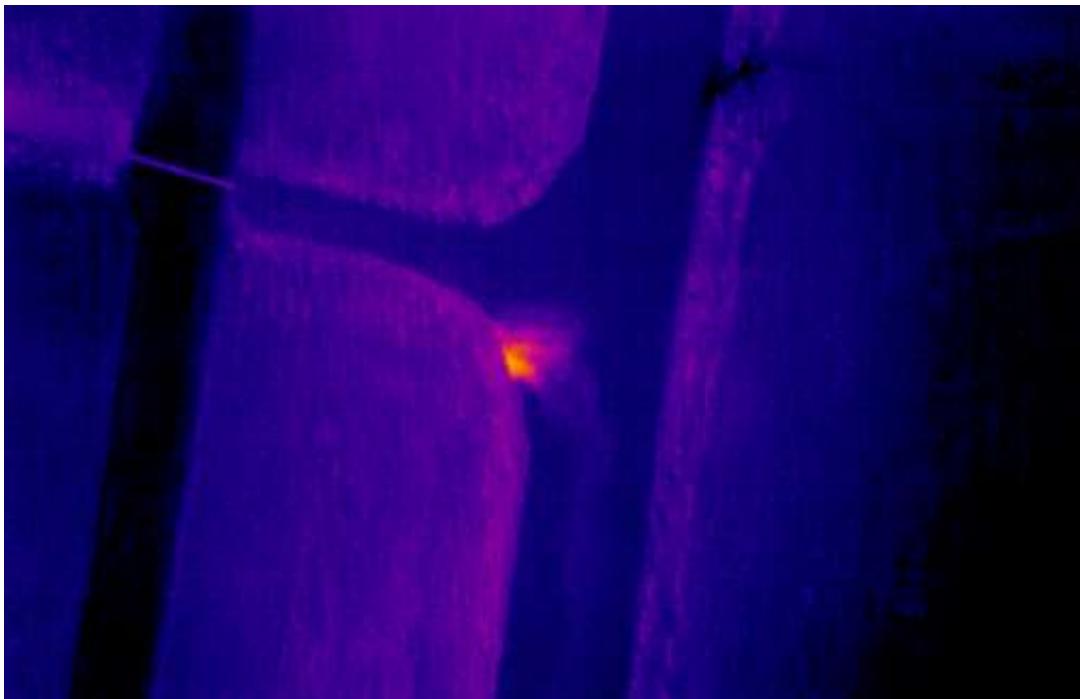
In deze figuur zijn ook landwellen getoond in de polder Holland, Sticht en Voorburg-west uit een inventarisatie uit 2012 [Waternet, 2012], aangevuld met de resultaten van een recente inventarisatie (maart, 2022).



Figuur 3.1: waargenomen wellen in percelen in het onderzoeksgebied

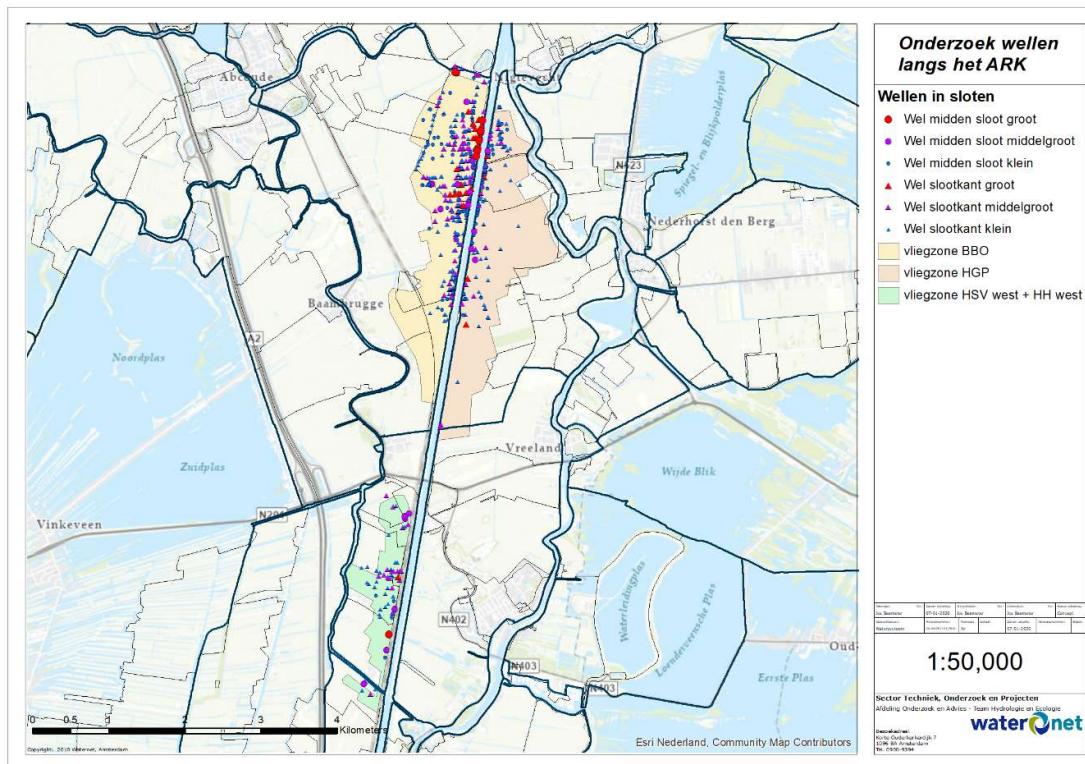
3.3 Inventarisatie wellen in watergangen en oevers

In februari 2020 en maart 2021 zijn door Waternet wellen in de watergangen en oevers geïnventariseerd met behulp van een drone die was uitgerust met een infraroodcamera. Het principe van detectie van de wellen is gebaseerd op het temperatuurverschil tussen welwater en slootwater op het moment van de waarnemingen. In winterperioden met temperaturen rond of beneden het vriespunt zal slootwater normaliter ook tot deze temperatuur afkoelen. Bij aanwezigheid van wellen is de situatie anders. Het welwater is doorgaans afkomstig van grotere diepten, waar de grondwatertemperatuur relatief constant 12-13 graden bedraagt. Door de flux van relatief warm water in de wel kan het temperatuurverschil in de sloot goed zichtbaar zijn met een infraroodcamera, zie figuur 3.2. De inventarisatie van de wellen in het onderzoeksgebied is in een afzonderlijk rapport beschreven [Waternet, 2021]. In figuur 3.3 is een overzicht van deze inventarisatie getoond.



Figuur 3.2: voorbeeld van een infraroodbeeld van een wel in de oever van een sloot

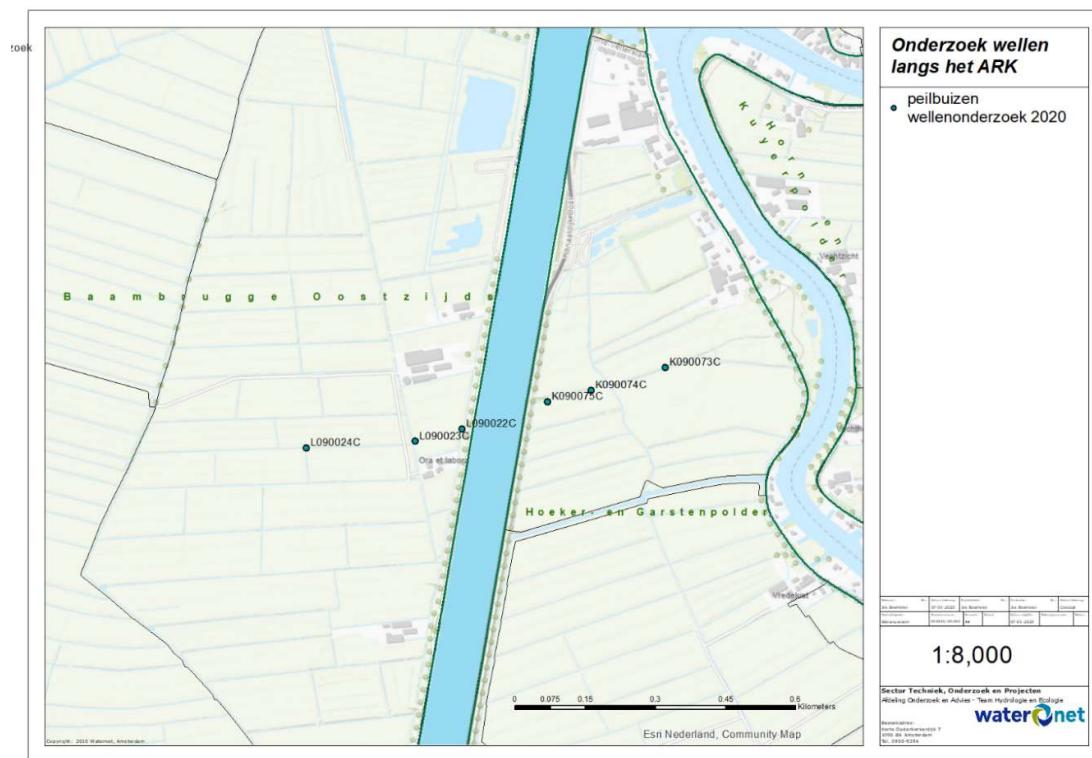
In figuur 3.3 is het resultaat van deze inventarisatie wellen in watergangen afgebeeld.



Figuur 3.3: overzicht geïnventariseerde wellen met een infrarood camera in watergangen en oevers

Peilbuizen en grondmonsters

Ten behoeve van het grondwater- en bodemonderzoek zijn in 2020 peilbuizen geplaatst en grondmonsters genomen in BBO en HGP. In bijlage 9 zijn de resultaten van het grondonderzoek opgenomen. De bemonsterings- en peilbuislocaties zijn weergegeven in figuur 3.4.



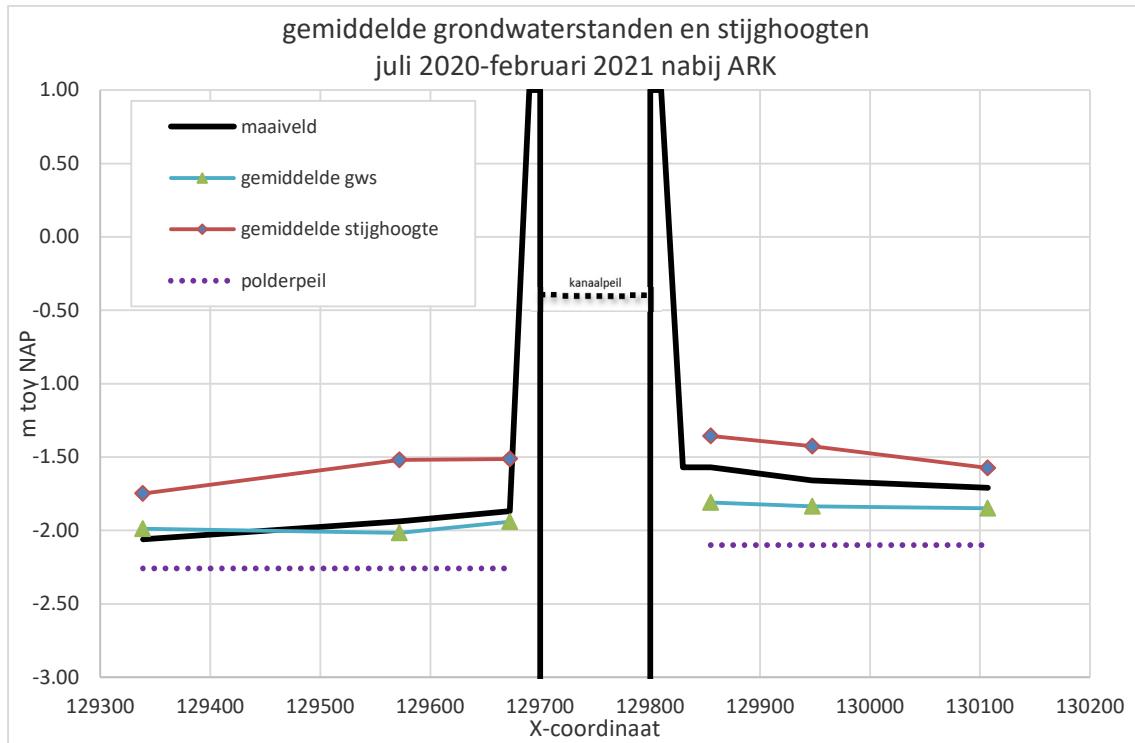
Figuur 3.4: peilbuis- en bemonsteringslocaties ondergrond in BBO en HGP

In de peilbuizen zijn automatische drukopnemers opgehangen die elk uur een meting opslaan.

De peilbuisgegevens zijn samengevat in tabel 3.1. Hierin zijn de gemiddelde freatische grondwaterstanden (A-filters) en stijghoogten van het eerste watervoerende pakket (C-filters) voor de periode juli 2020 – februari 2021 vermeld. In figuur 3.5 zijn deze gemiddelde grondwaterstanden/stijghoogten uit tabel 3.1 in een dwarsprofiel weergegeven. Opvalt dat de stijghoogten in het eerste watervoerend pakket in alle peilbuizen boven maaiveld uitstijgen en afnemen met toenemende afstand tot het kanaal. Dit betekent dat de kweldruk afneemt naarmate de afstand tot het kanaal toeneemt.

Tabel 3.1: Peilbuizen WaterNet met gemiddelde grondwaterstanden/stijghoogten juli-2020 tot febr-2021

Filter	Pakket	X	Y	Filterstelling t.o.v. bovenkant buis m	maaiveld m t.o.v. NAP	bovenkant peilbuis m t.o.v. NAP	Gemiddelde Gws/Stijghoogte wvp1 m t.o.v. NAP
K090073A	freatisch	130107	475454	1.22 - 2.22	-1.712	-1.230	-1.85
K090073C	wvp1	130107	475454	3.24 - 4.24	-1.712	-1.279	-1.57
K090074A	freatisch	129948	475404	2.05 - 3.05	-1.662	-1.168	-1.84
K090074C	wvp1	129948	475404	4.45 - 5.45	-1.662	-1.265	-1.43
K090075A	freatisch	129855	475381	2.02 - 3.02	-1.570	-1.058	-1.81
K090075C	wvp1	129855	475381	4.00 - 5.00	-1.570	-1.133	-1.36
L090022A	freatisch	129672	475322	1.72 - 2.72	-1.873	-1.269	-1.94
L090022C	wvp1	129672	475322	3.89 - 4.89	-1.873	-1.308	-1.51
L090023A	freatisch	129572	475296	2.18 - 3.18	-1.941	-1.380	-2.02
L090023C	wvp1	129572	475296	4.64 - 5.64	-1.941	-1.438	-1.52
L090024A	freatisch	129339	475282	1.67 - 2.67	-2.059	-1.542	-1.99
L090024C	wvp1	129339	475282	4.56 - 5.56	-2.059	-1.531	-1.75



Figuur 3.5: dwarsprofiel gemeten grondwaterstanden en stijghoogten nabij ARK in BBO (links) en HGP (rechts)

3.5 Conclusies

Op basis van veldinventarisatie en monitoring wordt geconcludeerd dat:

1. Er honderden landwelen en waterwellen binnen het onderzoeksgebied in de polders aanwezig zijn.
2. De geplaatste peilbuizen laten de hoogste stijghoogten nabij het ARK zien. Met toenemende afstand tot het kanaal nemen de stijghoogten af. Dit toont aan dat het ARK een bron van water in het grondwatersysteem is.

4 Tijdreeksanalyse op stijghoogte waarnemingen

4.1 Inleiding

Om een beeld te krijgen van veranderingen in het grondwatersysteem sinds de verdieping/verbreding van het kanaal zijn de beschikbare stijghoogtemetingen in het archief van TNO (Dinoloket) en het archief van Waternet (GWnet) in de ruime omgeving van het kanaal bestudeerd door middel van tijdreeksanalyse (TRA). TRA maakt gebruik van een zogenaamd transferruismodel. Hierin wordt een deterministisch transfermodel en een stochastisch ruismodel gecombineerd.

De tijdreeksanalyse in dit onderzoek is uitgevoerd met het programma Menyanthes (KWR, versie 3.x.c.l, 2021). Met dit programma kan de stijghoogte als een functie van verklarende reeksen zoals neerslag en verdamping beschreven worden. Andere variabelen die de stijghoogte in een bepaalde tijdspanne beïnvloeden kunnen als verklarende reeksen toegevoegd worden. Hierbij kan gedacht worden aan b.v. het jaarlijks wisselend winterzomerpeil, indien hiervan sprake is. Ook eenmalige ingrepen met een groot effect op het grondwatersysteem (verdiepen van het ARK) kunnen als verklarende variabele worden gebruikt.

Men kan in dit programma ook aangeven dat een plotselinge verandering (zoals een sprong in het oppervlaktewaterpeil) of een geleidelijke trend (bv toenemende infiltratie van het kanaal door bodemerosie) is opgetreden in het watersysteem.

Een goede tijdreeksanalyse moet aan enkele kwaliteitscriteria voldoen (zie o.a. Stowa, 2021).

De mate waarin gemeten en berekende waarden overeenkomen wordt uitgedrukt in % verklaarde variantie (EVP). Als de EVP groter of gelijk is aan 70% spreekt men van een betrouwbare reconstructie. Als de EVP aanzienlijk kleiner is dan 70%, is meestal sprake van een ander relevant proces dat niet is meegenomen in de analyse. Verder is het van belang dat er in het gebruikte ruismodel geen significante autocorrelatie aanwezig is, ofwel voldoet aan het 95% betrouwbaarheidsinterval.

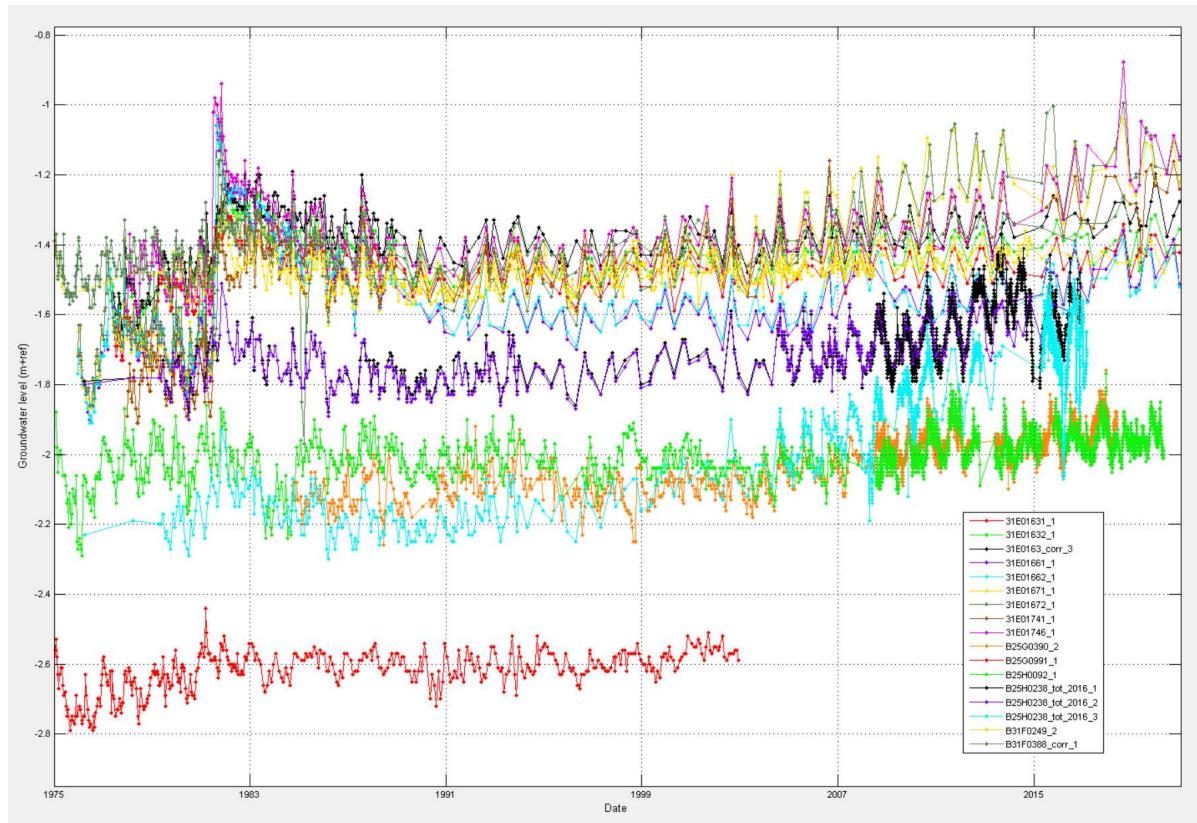
4.2 Gevolgde procedure bij de tijdreeksanalyse

- 1) In eerste instantie is gezocht naar tijdreeksen in de omgeving van het ARK (afstand tot ca 1.5 km), die minimaal teruggaan tot de jaren '70 en bij voorkeur nog steeds bemeten worden. De reden voor deze eerste selectie is dat de reeksen het effect van de verdieping/verbreding van het ARK in de jaren 70-80 laten zien. Deze peilbuizen zijn interessant om tevens te beschouwen op effecten van recente veranderingen in de ARK-bodemweerstand.
- 2) In tweede instantie is een selectie van langjarige tijdreeksen beschouwd buiten het invloedsgebied van het ARK. In dit geval om te onderzoeken of er recente, grootschalige toename van stijghoogten is opgetreden in het onderzoeksgebied die geen verband houdt met het ARK.
- 3) Uitvoering van de tijdreeksanalyse met Menyanthes op de geselecteerde meetreeksen. In deze analyse zijn de volgende verklarende reeksen gebruikt:
 - a) Neerslag (van een nabijgelegen weerstation van het KNMI) en verdamping (De Bilt).
 - b) De seizoensafwisseling in stijghoogten is doorgaans eenvoudig met neerslag en verdamping te bereiken, waardoor een extra verklarende reeks normaal gesproken niet nodig is. Nabij het ARK is na de verdieping in 1981 echter een omslag in de seizoensvariatie waarneembaar, die kan worden verklaard door de temperatuur van het sterk infiltrerende kanaalwater (zie hoofdstuk 9 voor een toelichting) Daarom is een temperatuurcurve van het ARK-water als verklarende reeks toegevoegd.
 - c) De stijghoogte toename door de kanaaluitbreiding. In literatuur over de uitbreiding van het ARK (Pomper, 1975; Pomper, 1980) worden 2 fasen van uitbreiding beschreven. Als de datareeksen voldoende ver terug gaan in de tijd, kunnen deze twee fasen herkend worden in de stijghoogtepatronen. Daarom worden de kanaaluitbreiding als volgt met meerdere verklarende reeksen in de analyse beschouwd:
 - i) Een tijdelijk effect op de stijghoogten door middel van een instantane puls op het moment van de ingreep door middel van een Pearson type III (PIII) functie. Dit is de standaard impuls/respons functie die in Menyanthes toegepast wordt. Als twee ontgravingsfasen in de reeksen zichtbaar zijn, dan wordt dit op twee momenten als verklarende reeks opgevoerd.
 - ii) In sommige gevallen treedt naast een tijdelijk effect van de kanaaluitbreiding ook een blijvend effect op. Dit blijvende effect kan in deze gevallen worden benaderd door middel van een 'step trend' op het moment van de ingreep.
 - d) Een lineair toenemende trend vanaf globaal het jaar 2000 tot in de meeste gevallen het einde van de waarnemingsreeks. Het einde van de waarnemingsreeks varieert van 2014 tot heden (2021). De lineaire trend wordt bij afwezigheid van andere processen die de stijghoogten op deze plaats kunnen

verhogen, in verband gebracht met een hernieuwde afname van de bodemweerstand van het ARK, waardoor de infiltratiefluxen sterk toenemen.

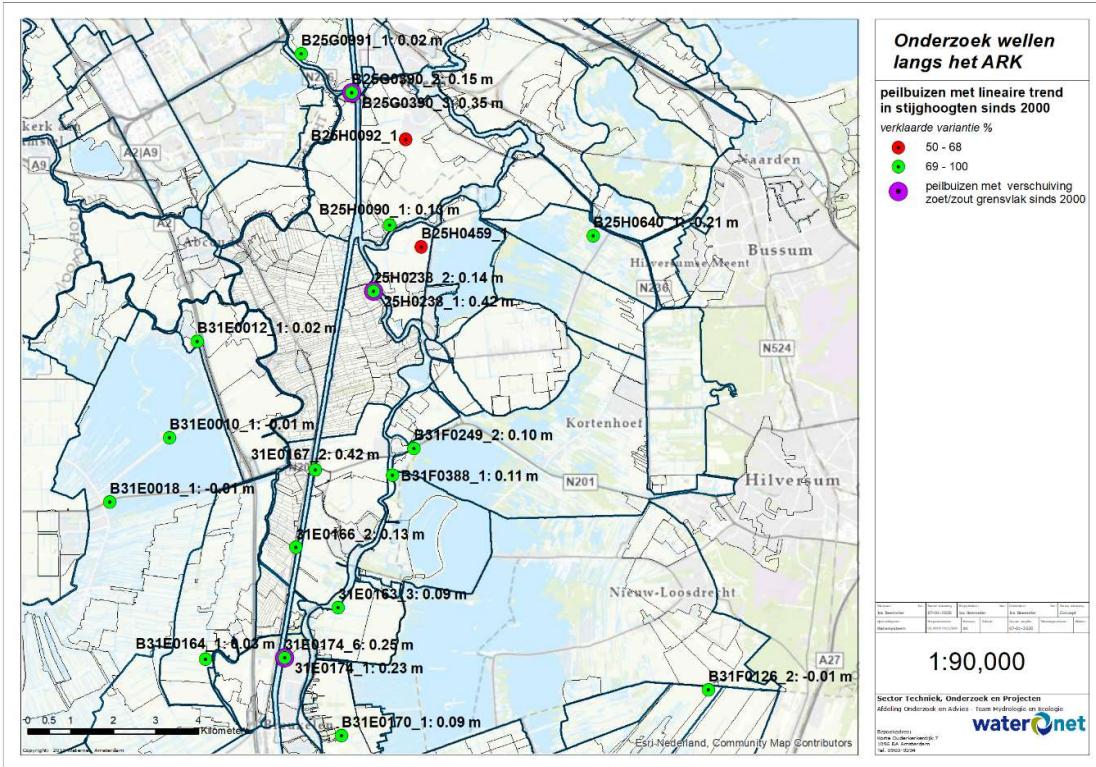
Geselecteerde peilbuisreeksen van voldoende kwaliteit (een beperkte hoeveelheid uitbijters, voldoende metingen per tijdseenheid, voldoende totale lengte van de meetreeks, etc) zijn weergegeven in figuur 4.3.

In figuur 4.1 zijn beschikbare langjarige tijdreeksen in peilbuizen nabij het ARK weergegeven, met een duidelijk zichtbaar effect van de verdieping aan de oostzijde in 1981. De verbreding en verdieping in 1977 aan de westzijde is minder goed te zien. In het uitgewerkte voorbeeld van de tijdreeksanalyse in paragraaf 4.3 blijkt het effect van beide ontgravingfasen goed te onderscheiden. In bijlage 3 (statistieken) en bijlage 4 (figuren) zijn de volledige resultaten van de uitgevoerde tijdreeksanalyses op de meetreeksen van figuur 4.1 opgenomen.



Figuur 4.1: Peilbuizen nabij het ARK met typerende trends in de periode 1975-2020

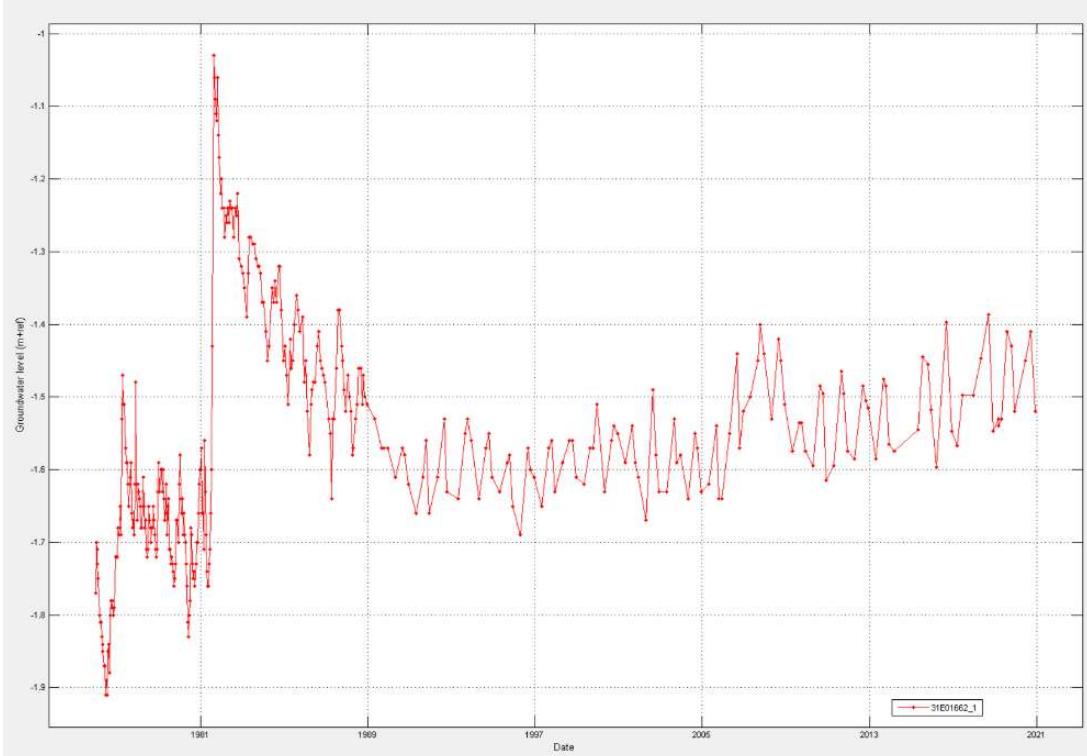
In figuur 4.2 zijn de resultaten van de tijdreeksanalyse ruimtelijk geplot. In hoofdstuk 6 wordt een vergelijking gemaakt met de resultaten van het grondwatermodel.



Figuur 4.2: Peilbuizen nabij het ARK met afgeleide stijgende trends (groene punten) in de stijghoogten van het eerste watervoerende pakket over de periode 2000-2020. De rode punten zijn onvoldoende betrouwbaar. De paarse punten duiden op een zoet/zout grensvlak verschuiving op grotere diepte.

4.3 Voorbeeld uitwerking tijdreeksanalyse

Hieronder volgt een toelichting op de procedure van tijdreeksanalyse (afgekort: TRA) aan de hand van een voorbeeld. Als voorbeeld zijn de stijghoogtemetingen in peilbuis E0166.2 (zie figuur 4.3) genomen.



Figuur 4.3: stijghoogtemetingen in peilbuis E0166.2

Dit voorbeeld bestaat uit een reconstructie van de stijghoogtereeks in 2 opeenvolgende fasen:

- Fase 1: periode 1 januari 1976 tot 1 augustus 1981
- Fase 2: periode 1 augustus 1981 tot december 2017 (einde metingen)

In figuur 4.4a is de reconstructie weergegeven van de gemeten stijghoogten van E0166.2 in fase 1. Deze periode bevat het moment in april 1977 dat het kanaal wordt verbreed, aan de oostzijde, van 60m naar 100m (en tevens op een diepte van NAP -6.4 m wordt gebracht).

In figuur 4.4a wordt het aandeel van elk van de verklarende reeksen in de reconstructie ('Rise') getoond. Deze 'Rise' past het tijdreeksmodel zodanig aan, dat een maximale overeenkomst met de metingen wordt bereikt. In dit voorbeeld heeft verdamping een logisch aandeel in de reconstructie (verlaging in de zomer, geen effect in de winter). Ook neerslag heeft over de gehele tijdspanne een logisch aandeel. Het tijdelijke effect van de kanaalverbreiding en -verdieping in april 1977 aan de oostzijde (zie paragraaf 2.1) kan goed benaderd worden als:

- eenmalige puls (maximaal effect ca **22 cm**), die geleidelijk uitdempft in combinatie met
- een blijvende steptrend (**5 cm** verhoging).

In augustus 1981 vindt de grootste verandering in de stijghoogten plaats: het moment dat het kanaal aan de westzijde wordt verbreed en verdiept. In figuur 4.4b is de reconstructie weergegeven van de gemeten stijghoogten van E0166.2 in fase 2. De reconstructie van deze periode start op het moment van het maximale effect van de kanaalverdieping op de stijghoogte in augustus 1981. In deze fase heeft verdamping nauwelijks nog een verklarend aandeel in de reconstructie. Gebruik van de watertemperatuur in het ARK/Vecht als verklarende variabele geeft wel een goed reconstructie. Het effect van de kanaalverdieping op de stijghoogte in augustus 1981 kan goed worden nagebootst als:

- een eenmalige puls (circa **55 cm**) die in circa 12 jaar geleidelijk uitdempft

Omdat twee steptrends niet onafhankelijk zijn in één en dezelfde tijdreeksanalyse, kan de steptrend in 1981 alleen benaderd worden door de steptrend in 1977 op nul te fixeren, en vervolgens de steptrend in 1981 vast te stellen. De totale (blijvende) steptrend tussen 1977 en 1982 bedraagt dan 20 cm. Door de berekende steptrend in 1977 hierop in mindering te brengen, resteert:

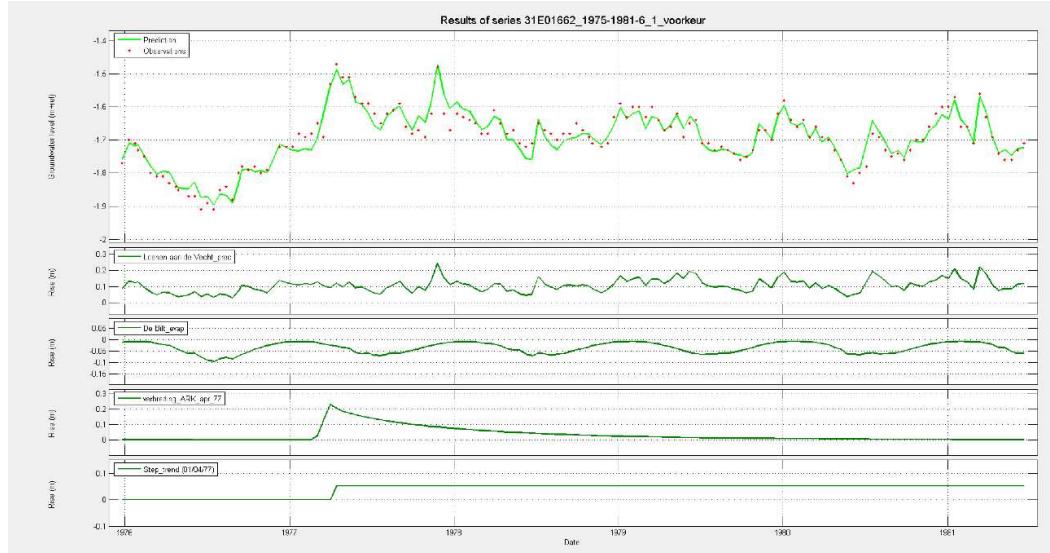
- in 1981 een steptrend van **15 cm**.

Vanaf circa 2000 treedt wederom een geleidelijke toename van de stijghoogte op. Deze toename kan goed benaderd worden met een

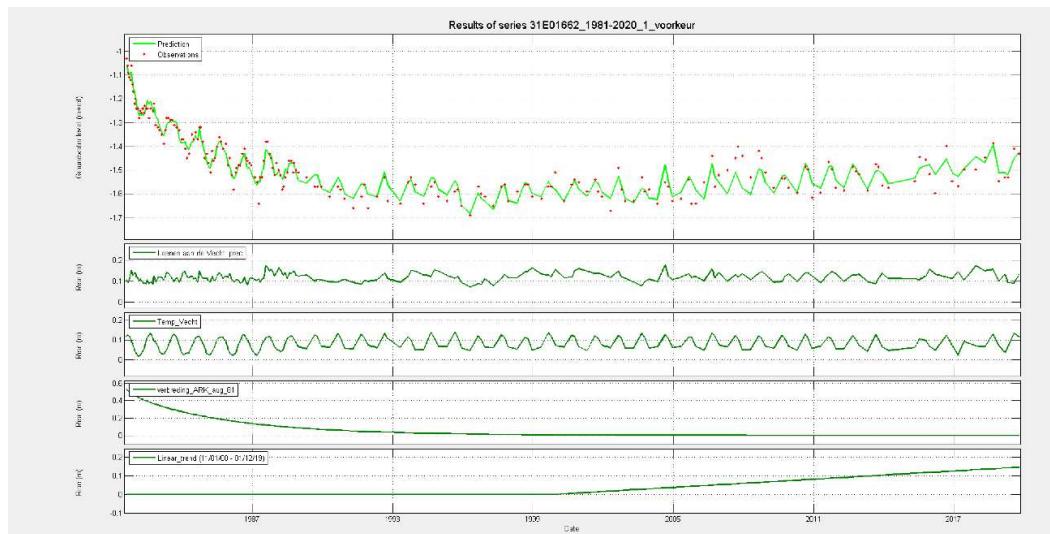
- Lineaire trendtoename van **15 cm** tussen 2000 en 2020 (einde metingen)

In figuur 4.4c is het z.g. autocorrelogram (autocorrelatie in de innovaties) van de tijdreeksanalyse in figuur 2b weergegeven met het 95% betrouwbaarheidsinterval. Als de autocorrelatie onvoldoende binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval blijft, wordt de reconstructie van de tijdreeks verworpen. In deze figuur is te zien dat de reconstructie van de seizoenfluctuatie in de tijdreeks E0166.2 met verdamping wordt verworpen op grond van autocorrelatie. De reconstructie van de seizoenfluctuatie met de watertemperatuur van het ARK/Vecht voldoet wel aan de criteria. Dit laatste is een sterke aanwijzing dat vanaf 1981 watertemperatuur een rol speelt in de stijghoogtefluctuatie nabij het kanaal.

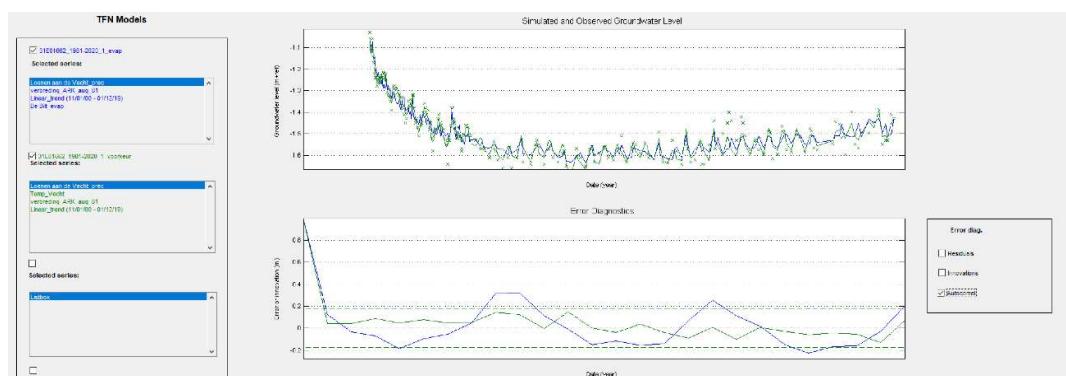
In figuur 4.4d is een simulatie van het stijghoogteverloop op dagbasis gegeven met behulp van de in figuur 4.4b gepresenteerde statistische relaties tussen gemeten waarden en verklarende reeksen. Met behulp van deze statistiek is ook het 95% betrouwbaarheidsinterval afgeleid



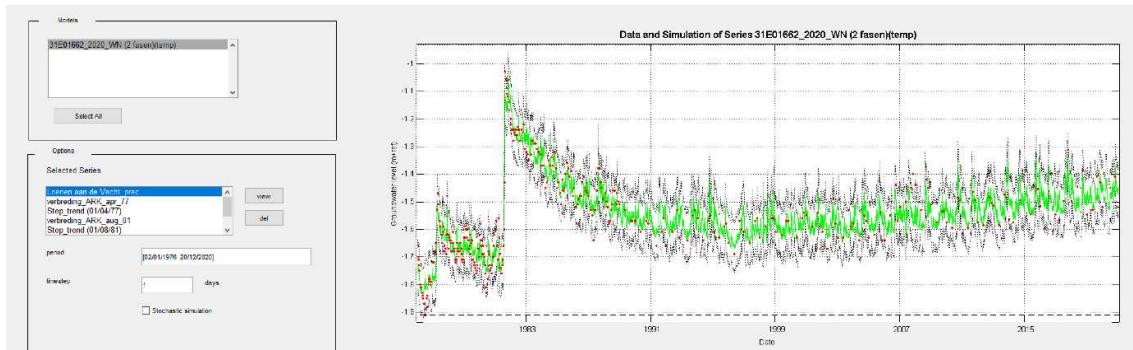
Figuur 4.a: Vier verklarende reeksen om het verloop van stijghoogten in 31E0166.2 te benaderen (EVP=92.4%) vóór de kanaalverdieping in augustus 1981: neerslag (1), verdamping (2), effect kanaalverbreding april 1977 met demping (3) en effect kanaalverbreding zonder demping (4)



Figuur 4.b: Vier verklarende reeksen om het verloop van stijghoogten van peilbuis 31E0166.2 te benaderen (EVP=93.8%) ná de kanaalverdieping in augustus 1981: neerslag (1), temperatuur oppervlaktewater (2), effect kanaalverdieping augustus 1981 met demping (3) een lineaire trend van toenemende stijghoogten van 2000-2020 (4)



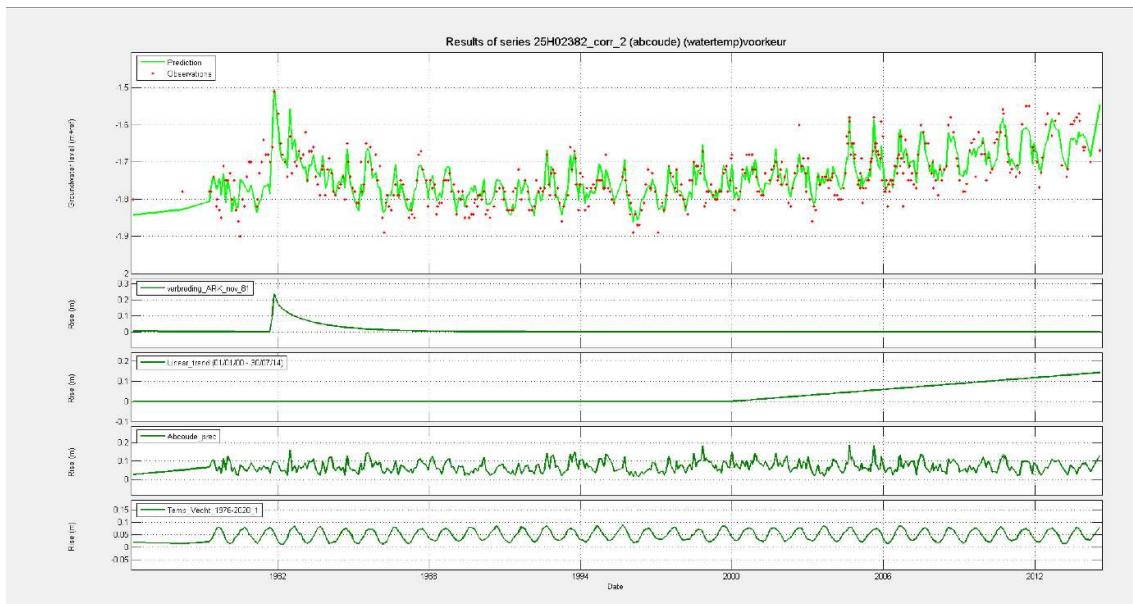
Figuur 4.4c: Autocorrelogram tijdreeksanalyse stijghoogtereeks 31E0166.2 vanaf 1981. Groen: reconstructie met watertemperatuur; Blauw: reconstructie met verdamping. Conclusie: verdamping reconstrueert de seizoenfluctuatie onvoldoende (er is autocorrelatie in de innovaties); gebruik van de watertemperatuur van het ARK/Vecht reconstrueert de seizoenfluctuatie wel adequaat



Figuur 4.4d: Simulatie (groene lijn) van de stijghoogte (dagwaarden) voor de periode 1976 tot 2020 met verklarende reeksen uit figuur 4.4a en 4.4b. De fijn gestippelde lijnen geven het 95% betrouwbaarheidsinterval aan. De streeplijn is de berekende drainagebasis. De rode punten zijn de meetwaarden

Overige bevindingen tijdreeksanalyse

In figuur 4.5 is de meetreeks verklaard van B25H0238, filter 2 uit het archief van Waternet. Deze waarnemingen eindigen eind 2014. In Dinoloket zijn van deze locatie ook metingen van provincie Utrecht aanwezig tot ca 2021. Tot eind 2016 lijken de (hand)metingen van filter 2 bruikbaar. De aanvullende metingen van filter 1 en 3 in Dinoloket worden niet betrouwbaar geacht. Op basis van de metingen van filter 2 in Dinoloket lijkt sprake van stabilisatie van de stijghoogten na 2014, wat strookt met de debietmetingen in HGP (zie paragraaf 7.3)



Figuur 4.5: Vier verklarende reeksen om het verloop van filter 2 in peilbuis B25H0238 te benaderen (EVP=78%): effect kanaalverdieping augustus 1981 met demping (1) een lineaire trend van toenemende stijghoogten van 2000-2014 (2) neerslag Abcoude (3), temperatuur oppervlaktewater (4),

4.4 Verschuiving zoet/zout grensvlak herleid uit tijdreeksanalyse

In enkele waarnemingsputten (zie figuur 4.2 voor de ligging van de hierna genoemde peilfilters) vertonen de stijghoogten in diepe filters een grotere stijgende trend dan ondiepere filters. Deze afwijkend grote trend is een sterke aanwijzing voor verzoeting van het grondwater op deze diepte. Het zoet/zout grensvlak verschuift in dat geval naar een grotere diepte en op grotere afstand wellicht ook lateraal. Dit verschijnsel is met name zichtbaar in de peilbuizen van B25G0390-3 (toename trend periode 2000-2018: 35 cm) en B25H0238-3 (toename trend periode 2000-2014 42 cm). De extra stijghoogttename door verzoeting varieert van 20 cm (B25G0390) tot 32 cm (B25H0238) ten opzichte van de ondiepere filters. In de figuren 4.6 en 4.7 hieronder zijn de stijghoogtoreeksen van B25H0238 (alle filters) en B25G0390 (bovenste 3 filters) afgebeeld. Voor beide locaties is te zien is dat het diepste filter sterker in stijghoogte is toegenomen. Voor B25G0390-3 begint de verzoeting circa 2004. In B25H0238-3 begint de verzoeting circa 1995, enkele jaren vóór de stijghoogte toename. Dit kan deels

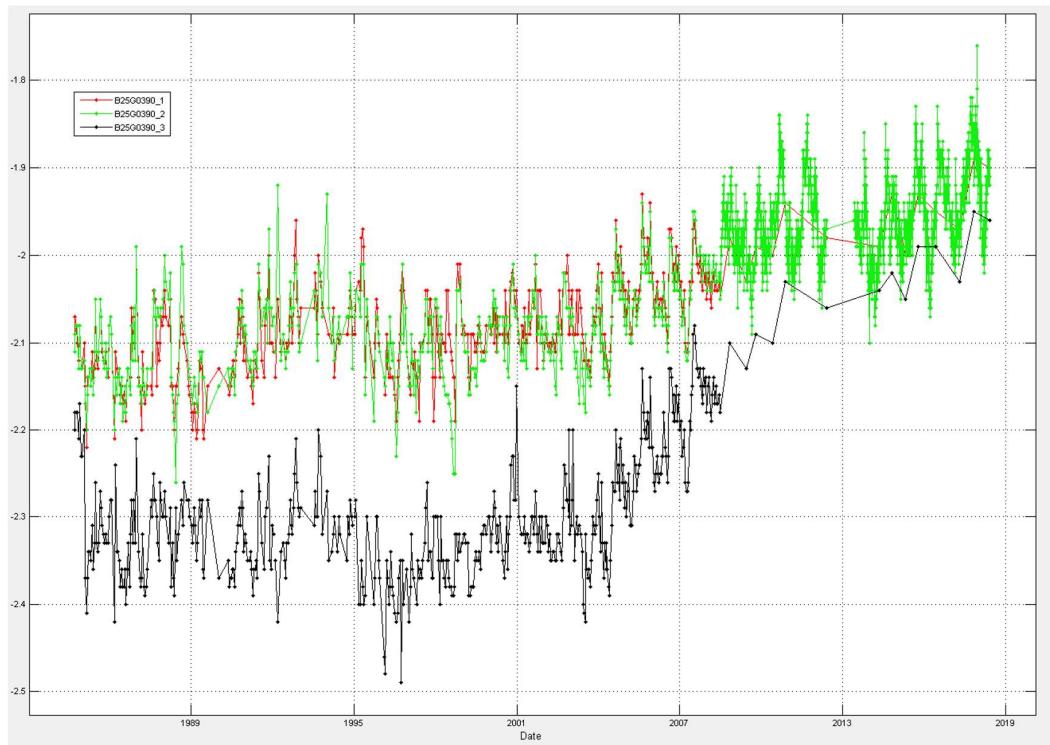
een na-ijl effect zijn van de sterke fluxverandering in 1981 en de jaren daarop volgend. De verzoeting komt in dit filter pas echt op gang vanaf globaal 2000, tegelijk met de hernieuwde stijghoogte toename. In de figuren 4.9 en 4.10 zijn de peilbuizen B25H0238-3 en B25G0390-3 afgebeeld in combinatie met gemodelleerde chloridegehalten afkomstig uit het NHI (Deltares, 2020) op de betreffende filterdiepten. De NHI chloridebeelden en kwaliteitsmetingen (zie ook volgende paragraaf) bevestigen dat het grondwater zout was op deze diepten. Peilbuis 31E0174-6 op circa NAP -126 m (aan de noordzijde van Breukelen) vertoont een afwijkend verzoetingsbeeld (zie figuren 4.8 en 4.11). De verzoeting begint hier meteen na de kanaalverdieping in juli 1981. De extra stijghoogtetoename door verzoeting bedraagt circa 25 cm Binnen enkele jaren is deze peilbuis verzoet onder invloed van de versterkte wegzijgingsflux.

Kwaliteitsmetingen

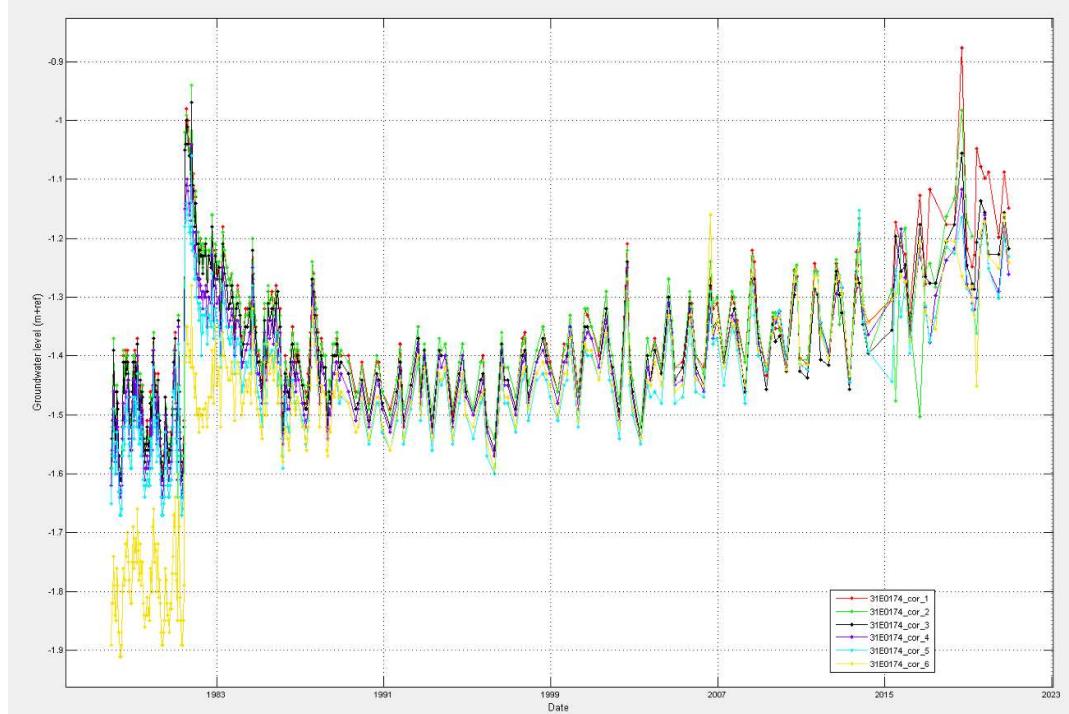
Archief data van TNO met grondwaterkwaliteitsmetingen zijn terug te vinden op de TNO-site <https://www.grondwatertools.nl/gwatlas>. Peilbuis B25H0238-3 op circa NAP -98.5 m bevatte volgens meetgegevens van TNO 3575 mg/l chloride in het recente verleden (vermoedelijk gemeten tussen 1980 en 2000). Peilbuis B25G0390-3 op circa NAP -64.5 m bevatte volgens dezelfde bron 2600 mg/l chloride (gemeten op 12/02/1985). Van peilbuis 31E0174-6 zijn geen historische kwaliteitsmetingen beschikbaar. De peilbuizen B25H0238-3 en B25G0390-3 zijn in juli 2021 door Waternet opnieuw geanalyseerd op chloridegehalten (zie bijlage 8). In juli 2021 wordt in B25G0390-3 een chloride gehalte van 250 mg/l gemeten, in B25H0238-3 een chloride gehalte van 280 mg/l. Uit de analyseresultaten blijkt dus dat beide filters in 2021 vrijwel volledig verzoet zijn, wat de veronderstelde toegenomen wegzijgingsflux van ARK-water zeer plausibel maakt.



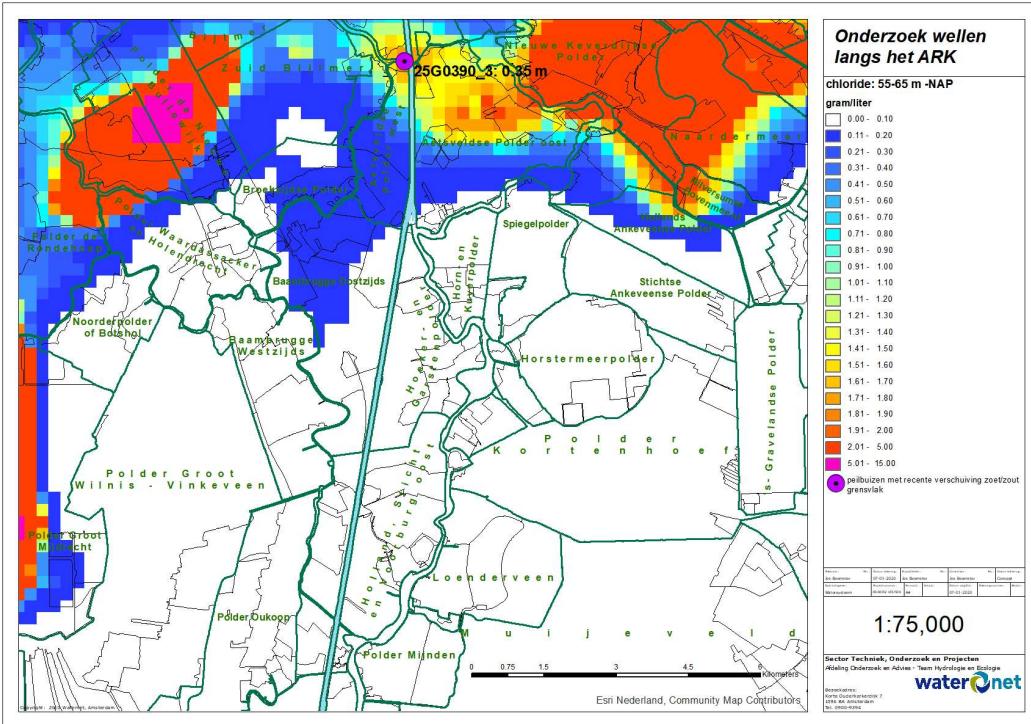
Figuur 4.6: Stijghoogteverloop peilbuizen 25H0238.3 (NAP -12), 25H0238.2 (NAP -55 m) en 25H0238.1 (NAP-98.5 m) nabij Nigtevecht



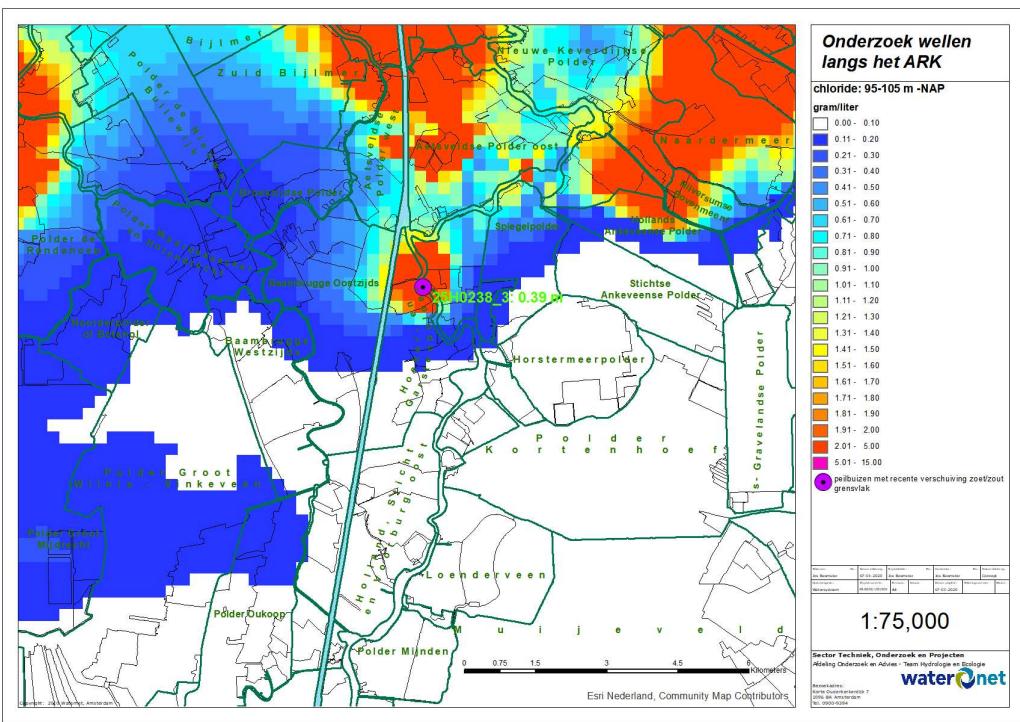
Figuur 4.7: Stijghoogteverloop peilbuizen B25G0390.1 (NAP -16.5), B25G0390.2 (NAP -28.5 m) en B25G0390.3 (NAP-66.5 m) in Driemond



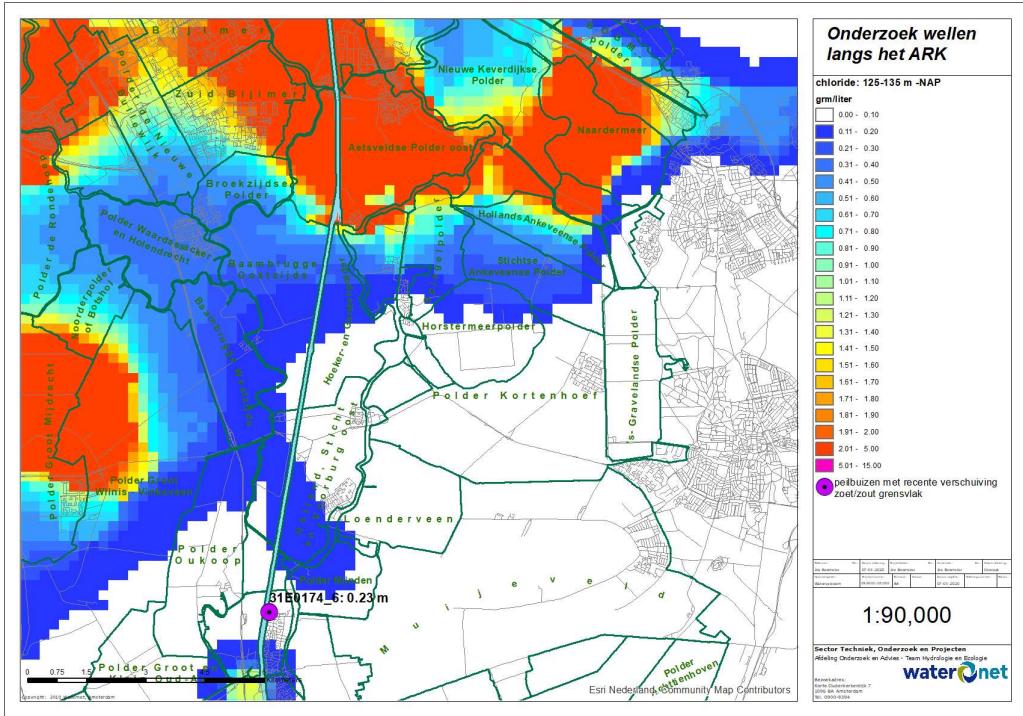
Figuur 4.8: Stijghoogteverloop peilbuizen 31E174.6 (NAP -13), 31E174.5 (NAP -31 m) en 31E174.4 (NAP -63.m, 31E174.3 (NAP -82), 31E174.2 (NAP -110 m) en 31E174.1 (NAP-126 m) in Breukelen



Figuur 4.9: Peilbuis B25G0390-3 met sterk stijgende trend in stijghoogte in periode 2000-2018 op ca NAP - 65 m, duidend op verzoeting, de chloridecontouren zijn afkomstig uit [Deltares, 2020].



Figuur 4.10: Peilbuis 25H0238-3 met sterk stijgende trend in stijghoogte in periode 2000-2014 op ca NAP - 100 m, duidend op verzoeting, de chloridecontouren zijn afkomstig uit [Deltares, 2020].



Figuur 4.11: Peilbuis 31E0174-6 met sterk stijgende trend in stijghoogte in periode 1981-1985 op ca NAP - 125 m, duidend op verzoeting, de chloridecontouren zijn afkomstig uit [Deltares, 2020].

4.5 Conclusies tijdreeksanalyse

Op basis van de tijdreeksanalyse wordt geconcludeerd dat:

1. Een sterk verhogend effect op de stijghoogte optreedt begin jaren 80 bij verdieping van het ARK. Dit effect dooft in de volgende 10 jaar weer voor een groot deel uit. In een aantal peilbuizen is echter een blijvende verhoging zichtbaar.
2. Het effect van verdamping is vanaf het moment van de ARK-verdieping niet meer goed traceerbaar in de stijghoogtereeks nabij het kanaal. Een nieuw seizoen effect treedt op dat overeenkomst vertoont met de watertemperatuur.
3. Vanaf circa 2000 treedt wederom een stijgende trend op in grondwaterstijghoogten nabij het kanaal.
4. Verschuiving van het zoet/zout grensvlak op grotere diepte in enkele peilbuizen nabij het ARK ondersteunt de hypothese van een versterkte lek van zoet water uit het ARK.

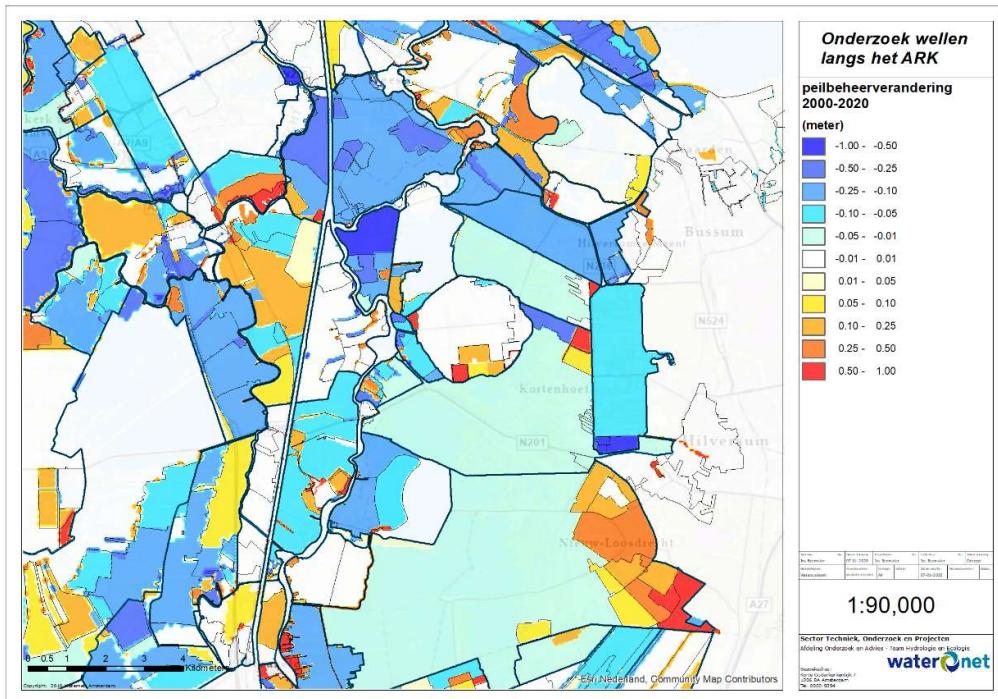
5 Overige oorzaken van versterkte kwel in de polders

5.1 Inleiding

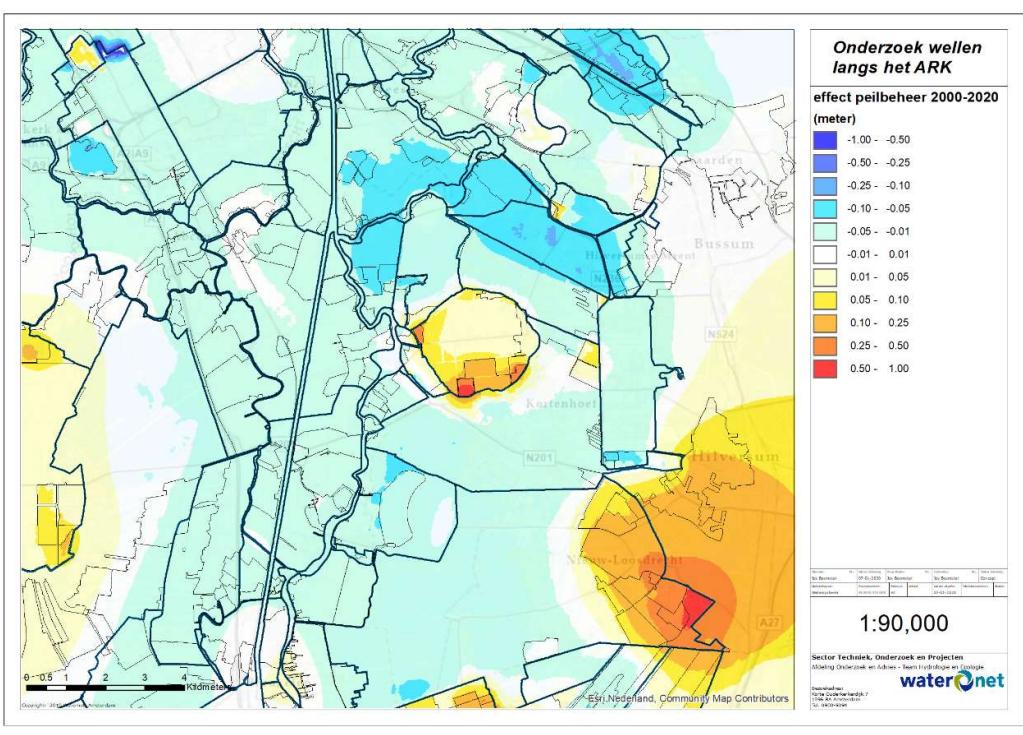
In dit hoofdstuk worden veranderingen in peilbeheer en potentieel optredende bodemdaling als mogelijke oorzaken van versterkte kwel in het onderzoeksgebied onder de loep genomen. Ook wordt aandacht besteed aan het review onderzoek van Tauw naar aanvullende potentiële oorzaken.

5.2 Effecten peilbeheer sinds 2000

In bijlage 5 wordt het peilbeheer beschreven in de polders Baambrugge Oostzijds en de Hoeker- en Garstenpolder in de afgelopen 20 jaar. In figuur 5.1 zijn de veranderingen van het gemiddelde peil tussen 2000 en 2020 in de ruime omgeving van het onderzoeksgebied afgebeeld. Het is een verschillkaart van het huidige peilbeheer met historische peilen uit de periode rond 2000. De historische peilenkaart bevat enkele artefacten en is daarom op sommige plaatsen indicatief. De kaart is gebruikt om het globale effect van peilwijzigingen sinds 2000 op de stijghoogte van het eerste watervoerende pakket te berekenen (zie figuur 5.2).



Figuur 5.1: Verandering polderpeilen tussen 2000 en 2020 (indicatief)
Blauw-groen is verlaging, geel-rood is verhoging van peil



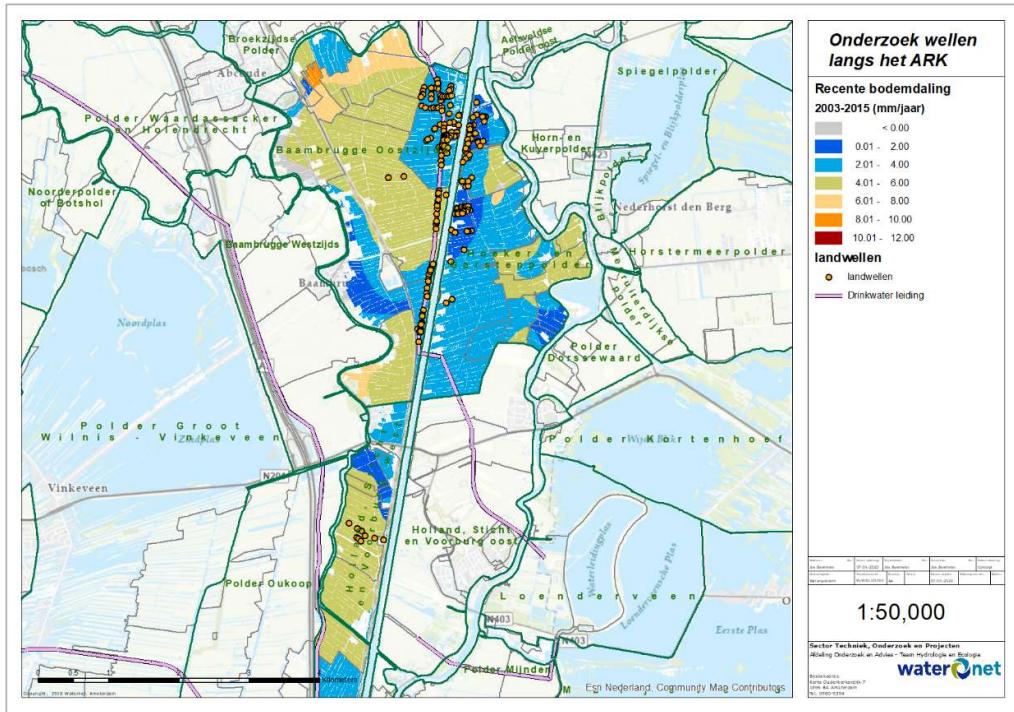
Figuur 5.2: Berekend effect van peilveranderingen sinds 2000 op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (indicatief). Blauw-groen is afname, geel-rood is toename van de stijghoogte

Het groot effect op de stijghoogtetoename rechtsonder in beeld is een artefact door ontbrekende data rond het jaar 2000 in deze polders. Verder zijn verhogende effecten zichtbaar in de Horstemeerpolder en Groot Mijdrecht, door peilverhogingen in enkele relatief kleine natuurgebieden. Het uitstralend effect van deze peilverhogingen is echter beperkt en reikt niet tot in het onderzoeksgebied.

Samenvattend kan gesteld worden dat de peilveranderingen sinds 2000 in het onderzoeksgebied een verlagend effect gehad hebben op de stijghoogte met waarden kleiner dan 5 cm, zelfs in peilvakken waar een peilverhoging is ingesteld. Het effect van peilverandering heeft daarmee een licht mitigerend effect gehad op de vastgestelde stijghoogte toename sinds 2000.

5.3 Effecten bodemdaling sinds 2000

Het verschil tussen de maaiveldhoogtebestanden AHN1 (uit 2003) en het AHN3 (uit 2015) is berekend om een schatting van de maaivelddaalsnelheid in de tussenliggende periode te bepalen. Bij deze berekening zijn wegen, bebouwing en water(gangen) weggelaten. Het resultaat is te zien in figuur 5.3. Door verschillen in resolutie en nauwkeurigheid tussen het AHN1 en het AHN3 kan het resultaat slechts indicatief van aard genoemd worden. In de peilvakken met de wellen varieert de bodemdaling tussen 0 en 4 mm/jaar. Dit levert in 20 jaar een maaivelddaling tussen 0 en 8 cm op. Ervan uitgaande dat deze daling is veroorzaakt door oxidatie van veen met een dichtheid gelijk aan water (1 kg/l), is de gewichtsafname van het holocene pakket maximaal 8 cm waterkolom. Met betrekking tot de gevoeligheid voor opbarsting kan de gewichtsafname van het holocene pakket in cm waterkolom 1-op-1 vergeleken worden met een stijghoogte toename in cm waterkolom in het eerste watervoerende pakket. Als gevolg van veenafbraak is de gevoeligheid voor opbarsting en wellen licht toegenomen.



Figuur 5.3: Globale bodemdalingssnelheid in de periode 2003-2015 (indicatief)

5.4 Review Tauw

Tauw heeft in het kader van de review van het concept van dit rapport de volgende aanvullende mogelijke oorzaken van de stijghoogte toename langs het ARK onderzocht (Tauw, 2021):

- Stopzetting c.q. vermindering van industriële winningen en/of drinkwaterwinningen
- Baggerwerkzaamheden in de Vecht én in sloten van BBO en HGP
- Peilverhogingen:
 - in enkele natuurvakken en het z.g. ANKO peilvak in de Horstermeerpolder
 - in enkele natuurvakken in de Bethunepolder
 - door instelling van flexpeilbeheer in de Loosdrechtse Plassen
- Het effect van diepe plassen in de omgeving:
 - de Haarrijnse Plas
 - de Wijde Blik
 - de Spiegelplas
 - de Waterleidingplas

De conclusie van Tauw is dat geen van bovenstaande fenomenen een noemenswaardig effect heeft gehad op de stijghoogtetename die in de afgelopen 20 jaar is waargenomen nabij het ARK.

5.5 Conclusies

Uit een analyse van peilbeheer en het optreden van bodemdaling wordt geconcludeerd dat:

1. De peilveranderingen sinds 2000 hebben in het onderzoeksgebied een verlagend effect gehad op de stijghoogte met waarden kleiner dan 5 cm.
2. De gewichtsafname van het holocene pakket in de polders naast het ARK als gevolg van veenafbraak bedraagt maximaal 8 cm waterkolom, waardoor de gevoeligheid voor opbarsting en wellen licht is toegenomen.

In het review onderzoek van Tauw zijn geen aanvullende oorzaken gedetecteerd van de stijghoogtetename nabij het ARK.

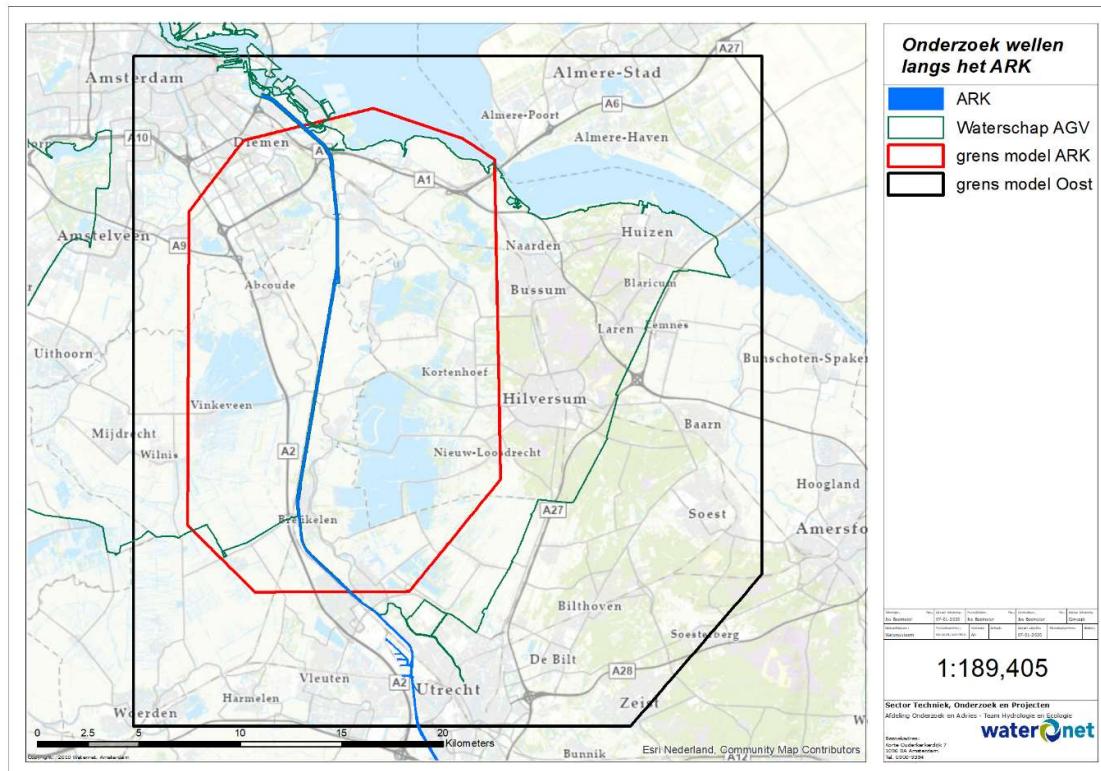
6 Grondwatermodellering

6.1 Inleiding

Er is een gedetailleerd grondwatermodel opgezet om het effect van de verminderde infiltratieweerstand van het ARK op het opbarsten van de waterbodems en toename van de polder kwelfluxen te reconstrueren. Een overzicht van het detailmodel staat weergegeven in figuur 6.1. Dit detailmodel verschilt van het model dat werd ingezet in de vorige fase van het project:

- In het detailmodel zijn binnen het interessegebied (het onderzoeksgebied naar wellen) alle poldersloten expliciet als lijnelement opgenomen.
- Het detailmodel heeft in het interessegebied een rekenresolutie van 15 meter.
- Het ARK is nu geschematiseerd als vlakparameter met breedte en diepte (op basis van bathymetrisch onderzoek an RWS).
- Op basis van de diepte van het ARK is de holocene deklaagweerstand (op basis van Geotop v01r3) naar rato van de doorsnijding onder het ARK verwijderd.
- De sliblaagweerstand in de historische situatie (periode 1990-2000) op de bodem van het ARK is gekalibreerd op een waarde van 60 dagen.
- De huidige sliblaagweerstand op de bodem van het ARK is gekalibreerd op een waarde van 2.5 dag.

Het grondwatermodel is uitvoerig gevalideerd en gekalibreerd aan de hand van stijghoogte- en afvoermetingen. Daarnaast is er naar aanleiding van de review van Tauw (Tauw, 2021) een gevoelighedsanalyse uitgevoerd op de modelparameters en de modeluitkomsten. Dit is gedaan doormiddel van de Monte Carlo systematiek. Een gedetailleerde beschrijving van het grondwatermodel, de kalibratieresultaten en het verwerken van de opbarstberekeningen staat beschreven in bijlage 6. Bijlage 7 gaat in detail in op de gevoelighedsanalyse. De gevuldde methodiek wordt op hoofdlijnen besproken in paragraaf 6.2. De modelresultaten worden gepresenteerd in paragraaf 6.3. Het hoofdstuk grondwatermodelleren wordt afgesloten met een aantal conclusies in paragraaf 6.4.

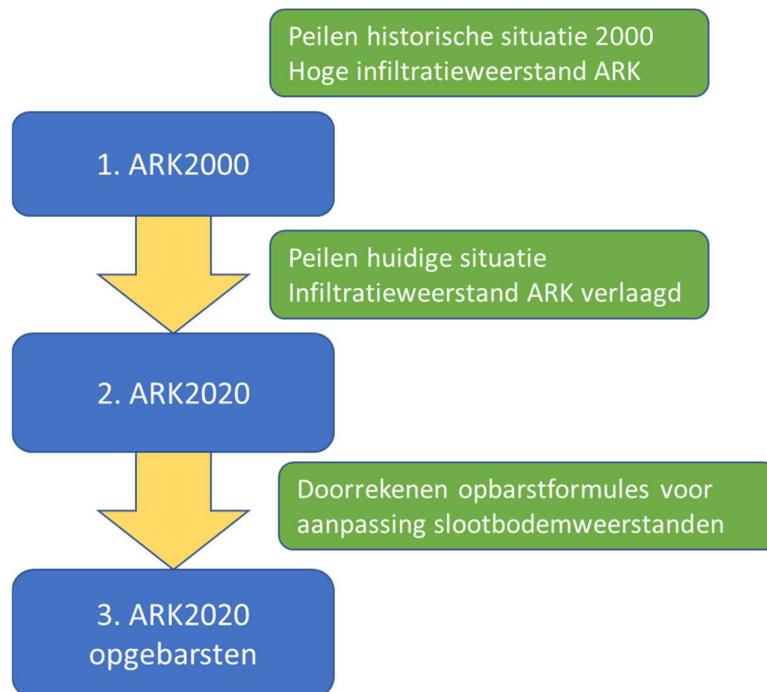


Figuur 6.1: Overzicht modelgrens detailmodel ARK (rood) t.o.v. regionaal model AGV (zwart).

6.2 Methodiek

De grondwatermodellering bestaat uit een reeks van stappen (deelmodellen) die doorlopen worden. Dit heet een zogenaamde modellentrein. De modellentrein staat schematisch weergegeven in figuur 6.2. De modelparameters van alle deelmodellen zijn gelijk, met uitzondering van de oppervlaktewaterpeilen (die zijn veranderd in de tijd), de intreeweerstand van het ARK (die is beïnvloed door erosie) en de drainageweerstand van de sloten (die is afhankelijk van het al dan niet zijn opgebarsten).

1. De modellentrein start met het model representatief voor de **historische situatie** tussen 1990 en 2000: het zogenaamde model ARK2000. In dit model zijn de watergangen in de polders nog niet opgebarsten, heeft het ARK nog een relatief hoge bodemweerstand en zijn de polderpeilen ingesteld op niveaus die in de periode 2000 gevoerd werden.
2. Vervolgens worden in het model ARK2020 de polderpeilen ingesteld op hun huidige niveau en wordt de bodemweerstand van het ARK verlaagd. Dit leidt tot een verhoging van de stijghoede in de polders rondom het ARK.
3. In het model ARK2020-opgebarsten worden de bodemweerstanden van de poldersloten vervolgens verlaagd om het effect van wellen/opbarsten te simuleren. Waar opbarsten van poldersloten optreedt is gebaseerd op de stijghoeden berekend in de voorgaande stap en wordt bepaald met opbarstberekeningen op het niveau van de rekencel. Dit is het model van de **huidige situatie**.



Figuur 6.2: Onderlinge samenhang verschillende deelmodellen in de modellentrein.

6.3 Resultaten

In de presentatie van de resultaten wordt achtereenvolgens onderscheid gemaakt tussen:

- I. De toegenomen infiltratieflux uit het ARK
- II. Het effect van de toegenomen infiltratieflux op de stijghoede
- III. Het resulterende opbarstrisico van de poldersloten
- IV. De toename van de kwel in de polders

De volgorde van presenteren volgt de volgordelijkheid van hoe de hydrologische processen hebben plaatsgevonden. De infiltratieflux vanuit het ARK neemt eerst toe, hetgeen leidt tot een verhoging van de stijghoede onder de polders. De verhoging van de stijghoede zorgt voor een groter opbarstrisico, met wellen tot gevolg. De wellen in combinatie met de verhoogde stijghoede resulteren in een toename van de kwel in de polders.

6.3.1

Infiltratieflux uit het ARK

Tabel 6.1 geeft de met het grondwatermodel berekende infiltratie door de bodem van het ARK weer. Het tracé waarover dit is berekend is gelijk aan de ligging van de polders en is nadrukkelijk dus niet de totale infiltratieflux van het ARK. In de periode waarin er in de vorm van een sliblaag nog een infiltratieweerstand aanwezig was op de bodem van het ARK (60 dagen weerstand) was de infiltratieflux ca. 13000 m³/dag. Door het verdwijnen van de sliblaag is de infiltratieweerstand zeer laag geworden (2.5 dagen). Dit resulterde in een verviervoudiging van de infiltratieflux naar meer dan 50.000 m³/dag, ofwel ca. 18 Mm³/jaar.

De infiltratieweerstanden in de huidige en de historische situatie zijn bepaald doormiddel van modelkalibratie aan metingen, zie bijlagen 6 en 7.

Het grootste deel van het geïnfiltreerde ARK-water kwelt omhoog in de naastgelegen polders (zie ook tabel 6.3). Het restant stroomt onder de polders door richting de verdere omgeving (o.a. polder Groot Mijdrecht en de Horstermeerpolder).

Tabel 6.1: Infiltratieflux vanuit het ARK

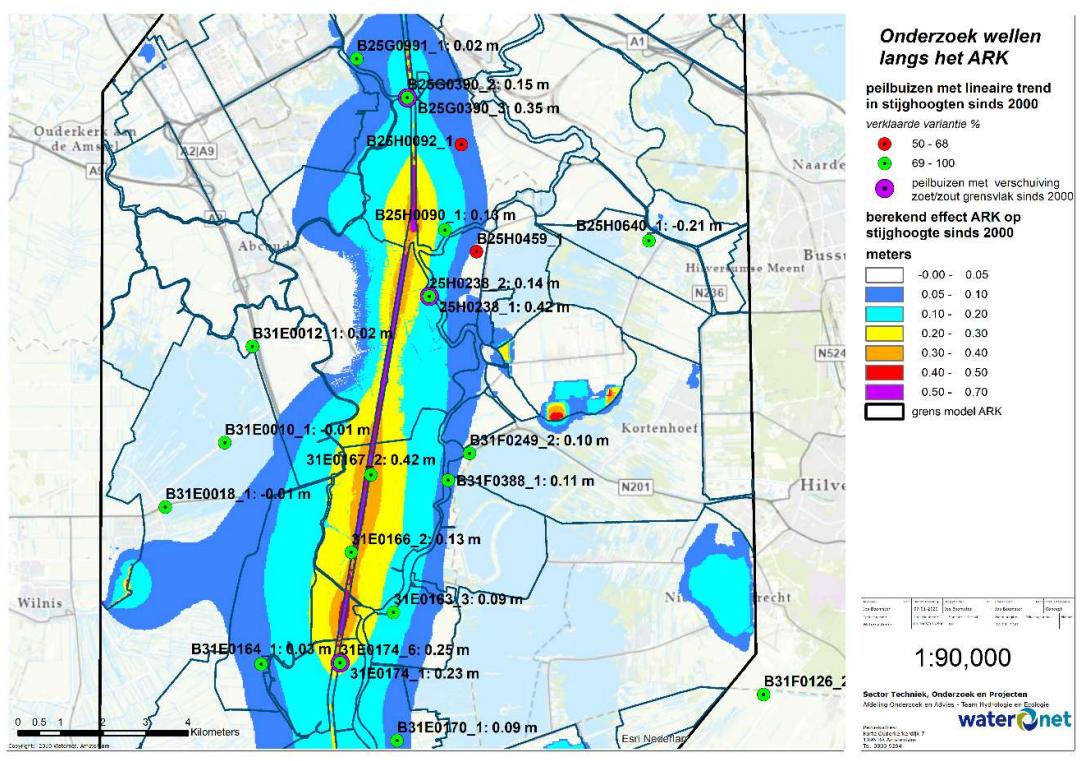
Model	Infiltratieflux door bodem ARK	
	Per dag (m ³)	Per jaar (Mm ³)
ARK2000	13057	4.8
ARK2020-opgebarsten	50311	18.4
Toename	37255	13.6

6.3.2

Verandering stijghoogte

Als gevolg van de toegenomen infiltratieflux neemt de stijghoogte onder en in de omgeving van het ARK toe. Dit staat weergegeven in figuur 6.3. Daarin is de stijghoogteverandering te zien tussen het model van de historische situatie (ARK2000) en het model van de huidige situatie (ARK2020-opgebarsten). De stijghoogtetoename is duidelijk geconcentreerd rondom het ARK. Dit is dus het gevolg van de afname van de infiltratieweerstand van het ARK. Het effect bedraagt ca. 50 cm toename in de directe nabijheid van het ARK en neemt binnen een afstand van ca. 2.5 km af tot effecten kleiner dan 5 cm. Bij de polders BBO en HGP is de uitstraling van de stijghoogtetoename minder ver. Dit komt doordat de poldersloten hier op grote schaal opbarsten, wat lokaal een mitigerend effect heeft op de stijghoogteverhoging. De sloten fungeren daardoor nu als drukontlasting wat past bij het beeld dat bestaat van een stabiliserende polderafvoer (zie hoofdstuk 7). Hetgeen overigens niet betekent dat er daarmee geen nieuwe opbarstingen meer kunnen plaatsvinden. Zou de stijghoogte onder het ARK verder toenemen, bijvoorbeeld door een tijdelijk sterk verhoogde waterstand op het ARK, dan kan het zijn dat de huidige ontlasting nog onvoldoende is waardoor er nieuwe slootbodembezwijken en de polderafvoer verder stijgt. De zones met de grootste stijghoogtetoename onder het ARK komen overeen met de locaties waar de deklaagweerstand onder het ARK het laagst is, als gevolg van doorsnijding van de holocene deklaag (zie figuur 2.2). Er zijn in de figuur ook een aantal lokale stijghoogte verhogingen waarneembaar welke niet worden veroorzaakt door de afname van de infiltratieweerstand van het ARK. Dit is het gevolg van de aanpassingen van polderpeilen sinds 2000. Dat komt dus overeen met de detailresultaten van het effect van peilbeheer op de grondwaterstanden (zie figuur 5.2), waarin deze effecten zijn geïsoleerd van het effect van het ARK.

De contouren van de met het grondwatermodel berekende stijghoogtetoename zijn in figuur 6-3 geplot, tezamen met de berekende toename in de peilbuizen op basis van tijdreeksanalyse (zie hoofdstuk 4). Vastgesteld kan worden dat de berekende stijghoogte toename met tijdreeksanalyse (labels naast de peilbuisnrs) en het numerieke grondwatermodel (contourlijnen met gelijke verhogingseffecten) in grote mate overeenstemmen.



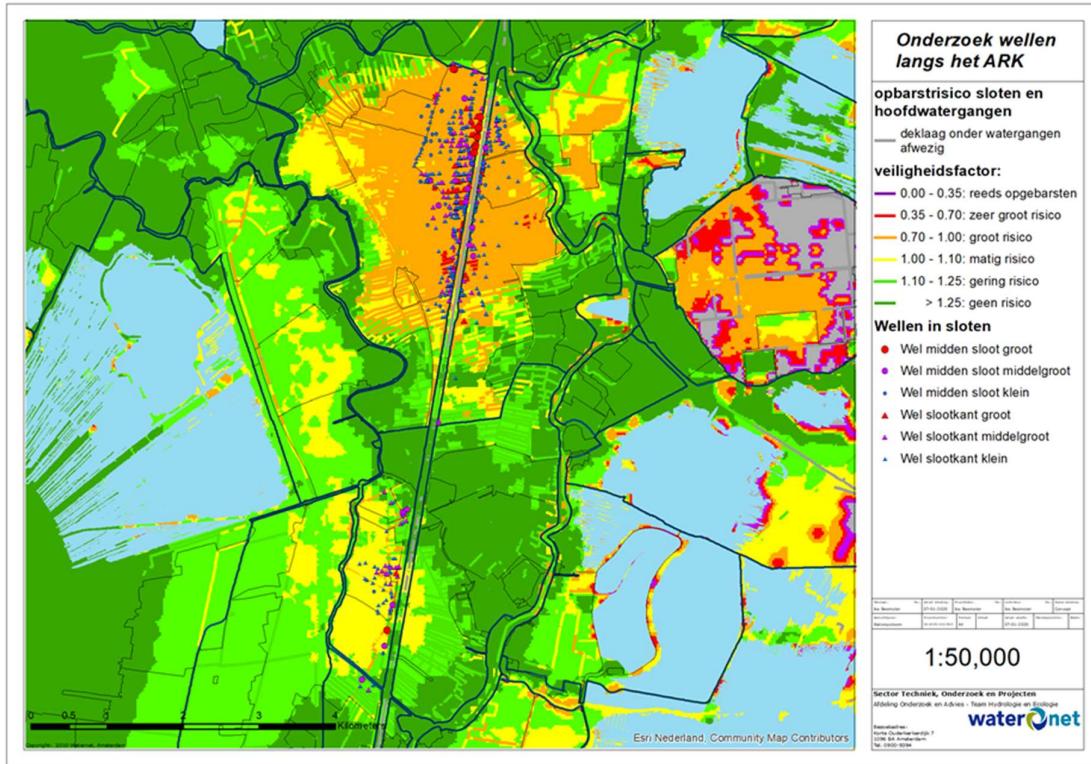
Figuur 6.3: Contouren met berekende verandering van de stijghoogten met het grondwatermodel (ARK2020-opgebarsten vs ARK2000) gecombineerd met resultaten tijdreeksanalyse uit figuur 4.2.

6.3.3 Opbarstrisico

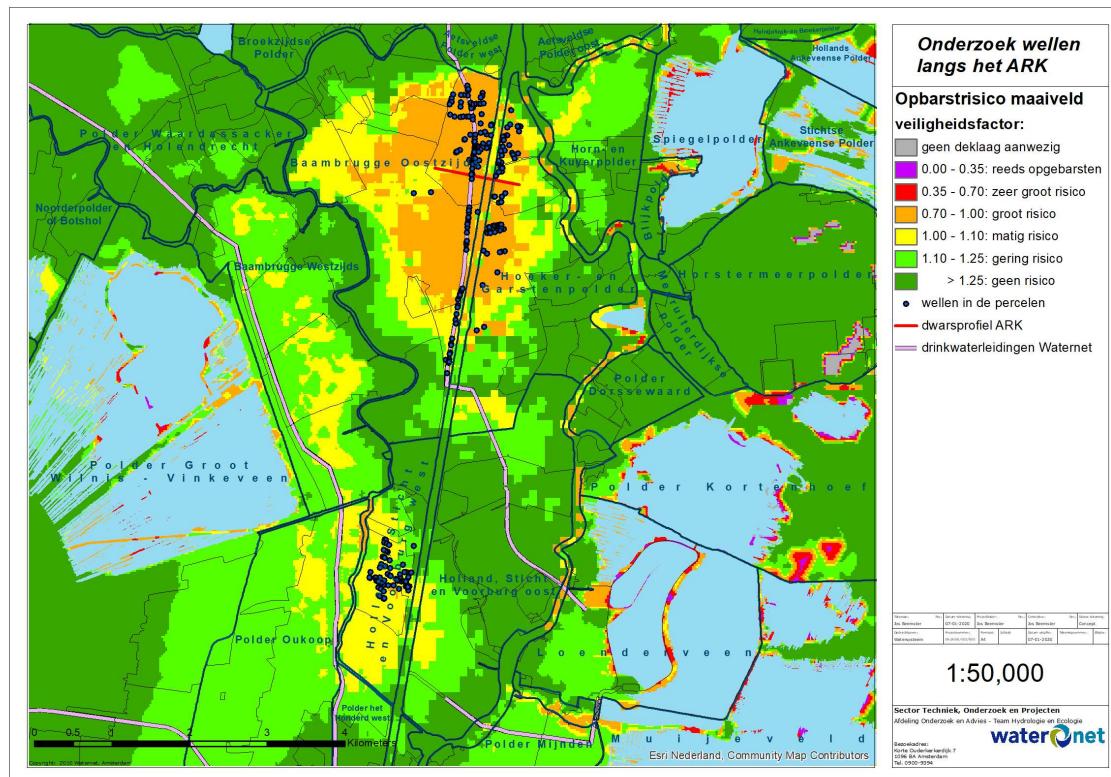
Doordat de stijghoogten onder de polders toenemen neemt de waterdruk aan de onderzijde van de deklaag toe. Dit heeft gevolgen voor de opbarstrisico's van waterbodems en percelen in de polders.

Het opbarstrisico kan worden bepaald aan de hand van een veiligheidsfactor in de verhouding tussen de neerwaartse gronddruk en de opwaartse waterdruk. Is deze verhouding te klein, dan ontstaan risico's voor opbarsten (wellen). Op plaatsen waar de veiligheidsfactor kleiner is dan 0.7, zijn de risico's voor opbarsten zeer groot. Tussen 0.7 en 1.0 bestaat een groot risico dat de bodem zal opbarsten. Boven de 1.25 worden de het systeem als stabiel beschouwd. In bijlage 6 wordt uitgelegd hoe het opbarstrisico in het grondwatermodel is berekend en hoe dit resultaat vervolgens is verwerkt door het aanpassen van de drainageweerstanden van de watergangen.

In figuur 6.4 is het berekeningsresultaat weergegeven van de veiligheidsfactor voor opbarsten van de poldersloten. Uit de rekenresultaten blijkt dat slootbodems met name in Baambrugge Oostzijds en de Hoeker/Garstenpolder grote risico's voor opbarsten vertonen. Dit komt dus goed overeen met de waarnemingen van slootwellen in het veld in figuur 6.4 (zie hoofdstuk 3). In figuur 6.5 is het berekende opbarstrisico van het maaiveld gevisualiseerd. In dezelfde figuur zijn de waargenomen landwellen geprojecteerd. Ook in deze figuur blijkt een goede overeenkomst tussen berekende risico's en waargenomen wellen in percelen. Opvallend is de lijnformige reeks wellen die exact samenvalt met de ligging van een drinkwaterleidingtracé van Waternet. Door het vergraven van de ondergrond tijdens aanleg is het leidingtracé een zwaktezone in deklaag, die bij een toenemende grondwaterdruk uit het eerste watervoerende pakket preferent zal opbarsten. Het gevolg van de aanwezige zwaktezone is dat elders in de polder minder wellen zijn gevormd.



Figuur 6.4: Opbarstrisico's in huidige situatie voor hoofdwatergangen AGV ('de legger') en perceelsloten, met daarop geprojecteerd de waargenomen wellen in de watergangen.



Figuur 6.5: Opbarstrisico's in huidige situatie voor het maaiveld met daarop geprojecteerd de waargenomen wellen in landbouwpercelen.

6.3.4

Toename kwel

Als gevolg van de ontstane wellen neemt de kwelflux in de polders significant toe. De kwellename is geconcentreerd in de watergangen. De toename in sommige grote watergangen is meer dan 60 mm/d. De kwel is per polder gesommeerd, de resultaten hiervan staan in tabel 6.2. Daaruit blijkt dat de polders BBO en HGP in absolute zin de meeste kwellename hebben, omdat daar de meeste wellen zijn ontstaan. Toch is de kwel in HSV ook met een factor 6 á 7 toegenomen.

De toename van de kwel in de polders kan worden gedeeld door de toename van de infiltratieflux uit het ARK (tabel 6.1) om zodoende een beeld te krijgen van waar het infiltratiewater uit het ARK heen stroomt. De kwellename in de polders is namelijk volledig toe te schrijven aan het ARK aangezien er geen andere oorzaken van stijghoogteverhoging in de omgeving zijn. Dit geeft het aandeel van de toegenomen infiltratieflux uit het ARK weer (laatste kolom van tabel 6.2). Het blijkt dat ca. 65% van de toegenomen infiltratie door de bodem van het ARK in de polders BBO, HGP en HSV als kwel weer bovenkomt. Het leeuwendeel hiervan komt in de BBO en de HGP. De resterende 35% stroomt dus onder de polders door naar de verdere omgeving en treedt daar uit als extra kwel.

Tabel 6.2 Berekende kwel in de historische situatie en huidige situatie en kwellename.

Polder	Berekende kwel in 2000 (m ³ /d)	Berekende kwel in 2020 (m ³ /d)	Kwellename (m ³ /d)	Aandeel kwellename in de polders van toegenomen infiltratieflux ARK
Hoeker- en Garstenpolder (HGP)	-50	7327	7377	24%
Baambrugge Oostzijds en Lange Coupure (BBO)	2175	16234	14059	37%
Holland, Sticht en Voorburg west & Het Honderd west (HSV)	391	2622	2231	7%
Totaal	2516	26183	23667	64%

Tabel 6.3 geeft de verhouding weer tussen het gemiddelde neerslagoverschot in de polders en de kwel in 2000 en 2020. Daarin is zichtbaar dat in de historische situatie het neerslagoverschot in alle polders dominant is ten opzichte van de kwel. In de huidige situatie is dit niet meer het geval en overheert de kwel.

Tabel 6.3: Kwel in verhouding tot het neerslagoverschot

Polder	Neerslagoverschot (mm)	Kwel 2000 (mm)	Kwel 2020 (mm)
Hoeker en Garsten polder (HGP)	0.8	0.0	1.4
Baambrugge Oostzijds & Lange Coupure (BBO)	0.8	0.3	1.9
Holland, Sticht en Voorburg west & Het Honderd west (HSV)	0.8	0.1	0.8

6.4

Conclusies

Met behulp van gekalibreerde en gevalideerde grondwatermodellen is het effect van de verandering van de infiltratieweerstand van het ARK op de omgeving gereproduceerd. De modelresultaten komen goed overeen met de monitoringsgegevens van stijghoogen en kwel. De modellering heeft laten zien dat:

1. De infiltratieflux door de bodem van het ARK gesommeerd voor het tracé langs de polders Baambrugge Oostzijds, Hoeker Garsten Polder en Holland Sticht Voorburg west in de periode 2000-2020 globaal is verviervoudigd doordat de infiltratieweerstand van de bodem is afgangen.
2. Dit heeft geleid tot een verhoging van de stijghoogen onder het ARK en de nabijgelegen polders.
3. Hierdoor op grote schaal vorming van wellen in sloten en percelen heeft plaatsgevonden, wat vervolgens weer heeft geleid tot een toename van de kwel in de polders.
4. Door de vorming van wellen is een verdere stijghoogtoename in Baambrugge Oostzijds en Hoeker Garstenpolder afgeremd aangezien de opgebarsten sloten nu fungeren als drukontlasting.
5. Vóór 2000 was het gemiddeld neerslagoverschot de belangrijkste watertoever in de onderzochte polders. In de huidige situatie is de kwel dominant.

7 Waterbalansen van de polders rond het ARK

7.1 Inleiding en vraagstelling

In een aantal polders rond het Amsterdam-Rijnkanaal zien we de laatste 15 tot 20 jaar meer waterafvoer bij de poldergemalen. Bij vergelijkbare meteorologische omstandigheden wordt een groter watervolume uitgemalen door het poldergemaal. Met name in de polder Baambrugge Oostzijds, in de Hoeker en Garstenpolder en in toenemende mate ook in de polder Holland Sticht en Voorburg West. Deze bevinding komt overeen met waarnemingen van wellen in de polders.

7.2 Methodiek

7.2.1 Toelichting waterbalans

Waternet bouwt sinds 1998 aan waterbalansen van de bemalingsgebieden. Al vele jaren houden we door toepassing van de waterbalansen de vinger aan de pols in het waterbeheer. De waterbalanstool is een Excel-spreadsheet dat voor het eerst is ontwikkeld voor Botshol in 1994. Sinds een aantal jaren wordt de Excel-tool verspreid via de Stowa. Het idee achter de methode is om vanuit de sturende meteorologie en de geometrie van een gebied de waterbalans uit te rekenen. Het vaststellen van de schematisatie (welke gebieden zijn nu precies gekoppeld bij wateroverschot en bij watertekort) en de aansturing van een gebied is een belangrijke basis voor het opstellen van de balans.

Van de verschillende waterstromen zijn data (op dagbasis) van 1996-2021 gebruikt:

- Neerslag (KNMI station Abcoude)
- Verdamping (KNMI station Schiphol)
- Bemeten waterinlaten.
- Waterafvoer via het poldergemaal (registratie).

De meetreeksen worden gebruikt om te vergelijken met berekeningsresultaten. Aldus wordt inzicht verkregen in het gebiedsfunctioneren. Doordat de geregistreerde data worden gebruikt voor vergelijking, kan er ook gerekend worden voor perioden met ontbrekende data. We richten ons altijd op een lange reeks van jaren en we beschouwen de balans op maandbasis. De methode is beschreven in H2O:

<https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/ecologische-watersysteemanalyse-waterbalans-geeft-inzicht>

7.2.2 Afleiding van de kwel voorafgaand aan de toename van wellen

Nieuw in dit onderzoek is dat de kwelterm onafhankelijk van het grondwatermodel wordt afgeleid.

Door sommatie van neerslag, verdamping en bemeten inlaten in de periode voorafgaand aan de toename van de wellenflux, kan het gemiddelde van de restterm toegekend worden aan de (basis)kwel in de beginfase.

7.2.3 Tijdreeksanalyse ter bepaling van lineaire trend in de gemaaldebieten

Ook nieuw is dat nu gebruik is gemaakt van een tijdreeksanalyse in Menyanthes op de gemaalcijfers van de drie onderzochte polders. Op deze wijze kan op objectieve wijze vastgesteld worden in hoeverre de gemaalcijfers een lineaire trend vertonen in de afgelopen 25 jaar (1996-2021). De werkwijze is analoog aan de trendanalyses op stijghoogten in hoofdstuk 4. De gemaalcijfers kunnen globaal verklard worden met 3 verklarende reeksen:

- Neerslag
- Verdamping
- Een lineaire trend in de kweltoename

De vastgestelde lineaire trend wordt in de waterbalans gebruikt om de toename van de wellenflux te kwantificeren. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de inlaten over de afgelopen 25 jaar jaargemiddeld constant zijn geweest. Deze aanname is verdedigbaar met de stelling dat Waternet noch agrariërs/particulieren in deze polders aanleiding hebben gehad om het inlaatbeleid te veranderen. Constante termen (zoals de constante inlaat) spelen geen rol in een tijdreeksanalyse en blijven dus buiten deze analyse.

7.2.4

De restterm

Tenslotte blijft een sluitfout of restterm over in de maandcijfers die diverse **onnauwkeurigheden** vertegenwoordigt:

1. Onnauwkeurigheden In de omrekening van maalreeksen naar gemaaldebieten
2. Onnauwkeurigheden in de gebruikte neerslag- en/of verdampingsreeksen. De verdamping en met name de neerslag ter plaatse van meetstations in de omgeving kunnen afwijken van de werkelijke situatie in de betreffende polder.
3. Onnauwkeurigheden In de schatting van de inlaathoeveelheden
4. Seizoenvariaties in kwel op maandbasis ten opzichte van een jaargemiddeld afgeleide kwelterm in de waterbalansanalyse

Ad 1: De werking van de gemalen wordt vastgelegd door registratie van het aantal draaiuren. De draaiuren worden omgerekend naar afvoerdebieten. Voor een correcte omrekening wordt de afvoer van de gemalen regelmatig gekalibreerd.

Ad 2: De neerslagreeks betreft meetstation Abcoude. Abcoude ligt aan de westrand van BBO, dus zal de afwijking met werkelijk gevallen neerslag klein zijn. De verdampingsreeks betreft Schiphol. Verdampingsreeksen verschillen in Nederland relatief gering, daar zit de onnauwkeurigheid dus niet in. Wel is van belang hoe de (referentie) Makkink verdamping van het KNMI omgerekend wordt naar actuele verdamping. Zowel in het balansmodel als in het grondwatermodel wordt aangenomen dat alle vegetatie gras is en continu optimaal van water is voorzien (dus geen verdampingsreductie in het droge seizoen). Voor wateroppervlakken wordt de verdamping gecorrigeerd door om te rekenen naar open-water-verdamping, conform de methode van het KNMI (Hooghart et al., 1988).

Ad 3: Voor dit onderzoek heeft Waternet zich in de periode 2021-2022 ingespannen om alle inlaten in de onderzochte polders (inclusief particuliere inlaten) zo goed mogelijk te kwantificeren.

In de winter van 2021 en de zomer van 2022 zijn door Waternet zo goed mogelijk (met stopwatch en emmer) alle inlaten in het onderzoeksgebied gemeten. De winterinlaten zijn gemeten in januari en februari 2021. De zomerinlaten zijn gemeten in mei en juni van 2022. In HGP is sinds 2019 een bemeten inlaat van het Waterschap aanwezig. Op basis van deze metingen is de inschatting gemaakt wat het gemiddeld debiet is in de zomer en wintermaanden. Voor de berekeningen in de waterbalans is aangenomen dat het gemiddelde van deze gemeten hoeveelheid aan waterinlaten in de afgelopen 25 jaar min of meer stabiel is geweest.

In tabel 7.1 zijn inlaten gemiddeld en zijn jaartotalen per polder afgeleid.

Tabel 7.1: Gemeten inlaten polders onderzoeksgebied

Polder	Seizoen	particulier	Waternet	Totaal
HGP	Winter	50	50	
	zomer	800	1940	
	Gemiddeld	425	995	1420
BBO&LC	Winter	2000	0	
	Zomer	5000	0	
	Gemiddeld	3500	0	3500
HSV&HH west	Winter	400	0	
	Zomer	1000	500	
	Gemiddeld	700	250	950

Ad 4: Bij aanname van een lineaire toename van de wellenflux, wordt voorbijgegaan aan de seisoenvariaties in de kwel. Bij gebruik van deze term in een waterbalans op maandbasis zullen deze variaties daarom zichtbaar zijn als periodieke sluitfouten. Voor inzicht in de langjarige trends zijn deze seisoenvariaties in de waterbalans van ondergeschikt belang.

7.3

Resultaten balansberekeningen

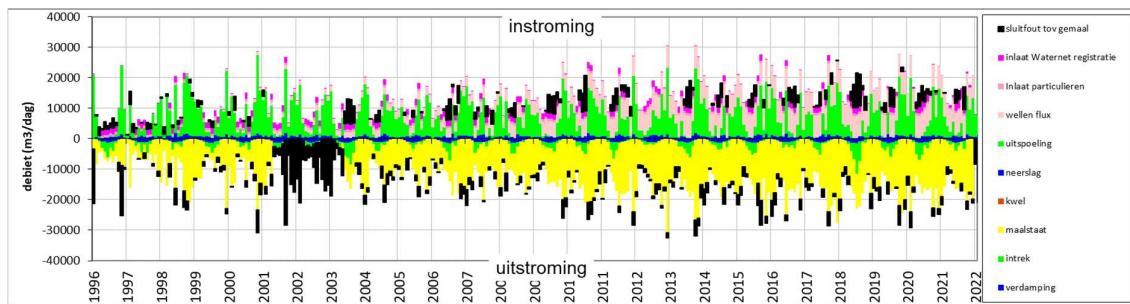
Eerst worden de resultaten voor de Hoeker Garstenpolder (HGP) beschreven. Na de beschrijving voor HGP worden resultaten voor Baambrugge Oostzijds (BBO) en Holland, Sticht en Voorburg West plus het Honderd West (HSV-west en HH-west) behandeld.

7.3.1

De Hoeker Garstenpolder

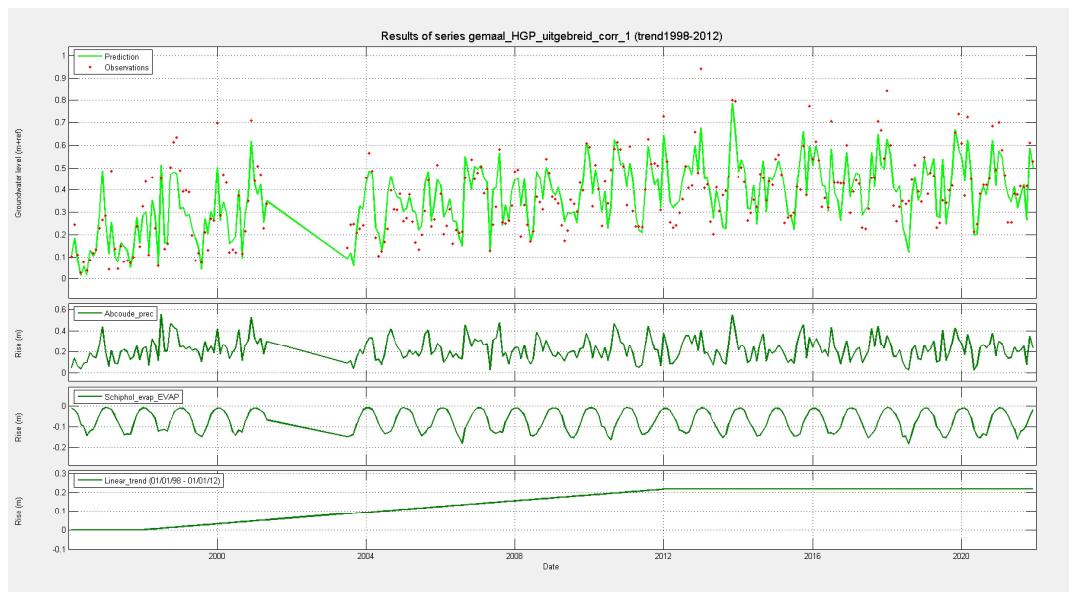
De Hoeker Garstenpolder ligt tussen het ARK en de Vecht. Het gemaal staat sinds 2003 langs het ARK. Voor die tijd stond het gemaal aan de Vecht. De waterbalans op maandbasis is weergegeven in Figuur 7.1. De kern van het probleem is terug te zien in de toename van de waargenomen bemaling (de uitslag van de gele balansterm op de y-as) en daarmee in de toename van de wellenflux (roze). Ontbrekende gemaalcijfers rond 2002 zijn in deze figuur zichtbaar als prominente sluitfout (de zwarte term aan de onderzijde van de grafiek in deze periode).

Uit de gemaalcijfers, maar ook uit waarnemingen in het veld, weten we dat de kwelfluxen in de zomer groter zijn dan in de winter. In Figuur 7.1 is dit fenomeen af te lezen aan de sluitfout die in vrijwel alle zomerperioden aan de bovenzijde van de grafiek als zwarte term opduikt. In droge zomers als 2018 en 2003 is deze term het grootst.



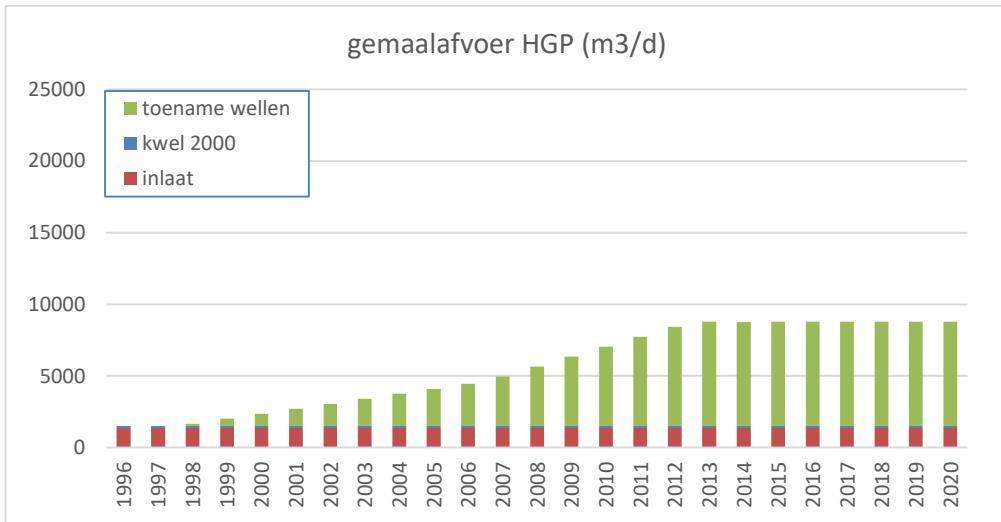
Figuur 7.1 Waterbalans van de HGP op basis van neerslag, verdamping en kwel 2000. De gele term geeft de geregistreerde maalvolumes weer. De zwarte term is de restterm. Alle termen staan in m3/d.

In Menyanthes is een analyse op een lineaire trend onderzocht in de gemaalafvoeren (miljoenen m³/maand), zie figuur 7.2. Er is in de HGP een toename zichtbaar vanaf 1998 tot en met 2012. Daarna blijven de waarden min of meer stabiel. De gevonden lineaire trend is toegekend aan de wellenflux in figuur 7.1.



Figuur 7.2 Tijdreeksanalyse lineaire trend toename wellenflux Hoeker Garstenpolder: de toename vindt plaats in de periode 1998-2012. Fluxen (verticale as) in miljoenen m3/maand

In Figuur 7.3 zijn de belangrijkste deeltermen van de waterbalans van HGP op jaarbasis samengevat.



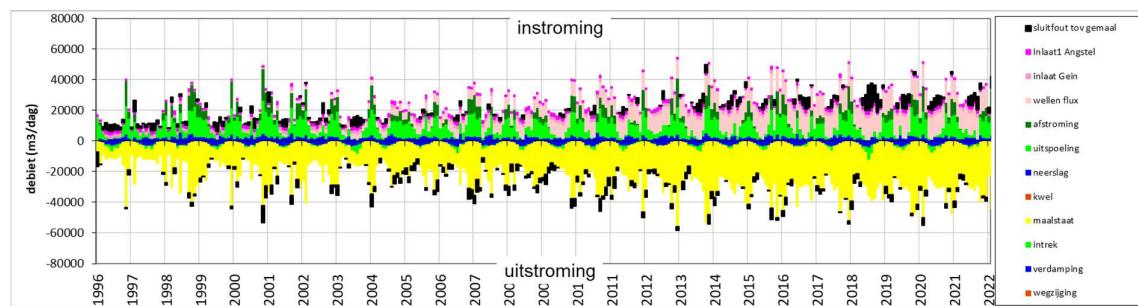
Figuur 7.3 De berekende deeltermen van de gemaalafvoer Hoek Garstenpolder in m3/dag

Samenvattend voor de Hoek Garstenpolder

De wellenflux is toegenomen vanaf 1998 tot en met 2012 van 0 tot circa 7000 m³ per dag en in de periode daarna ongeveer gelijk gebleven. Er is in sommige zomers een relatief grote restterm zichtbaar (figuur 7.1). De conclusie is dat in met name droge zomers de wellen harder gaan stromen.

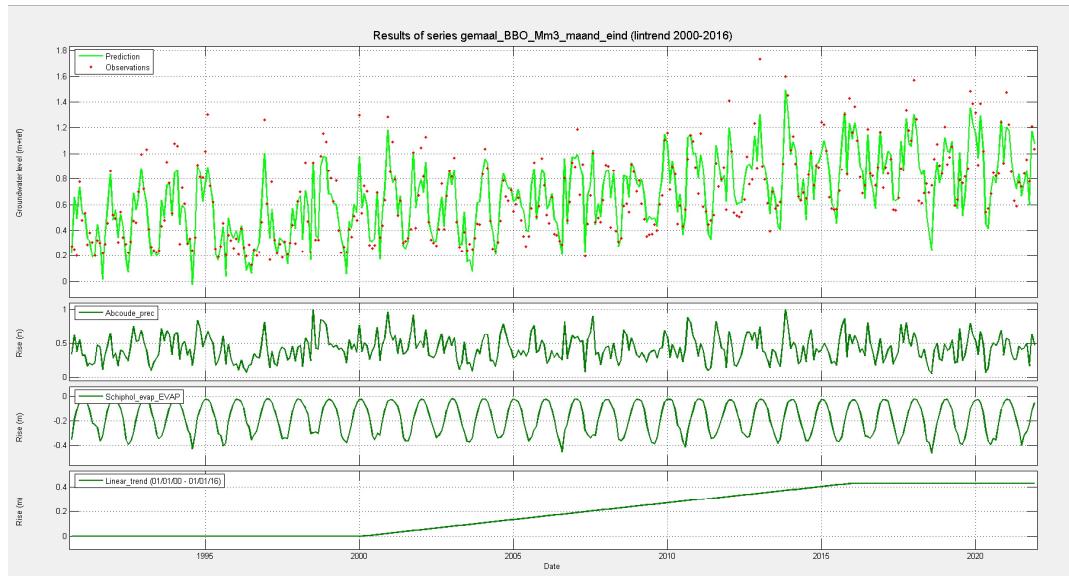
7.3.2 Baambrugge Oostzijds

De polder Baambrugge Oostzijds slaat water uit via twee gemalen. Aan de oostkant via het gemaal aan het Amsterdam-Rijnkanaal en aan de westkant (het aan- en afvoergebied van de Lange Coupure met het gemaal aan de Angstel. Daarom is de balans gemaakt van de som van deze gebieden. In Tabel 7.1 (paragraaf 7.4) zijn de kentallen van dit afvoergebied terug te vinden. De afvoer van de twee gemalen is dus bij elkaar opgeteld en weergegeven in figuur 7.4 (gele term). De toename van de wellen is de roze term. De sluitfout die vervolgens overblijft is de zwarte term. Bij aanname van een lineaire toename van de wellenflux, wordt voorbij gegaan aan de seizoensvariaties in de kwel. Ook in figuur 7.4 is de seizoensfluctuatie van de kwel terug te vinden in de hogere waarden van de sluitfout in de zomerperiode (bv 2018)



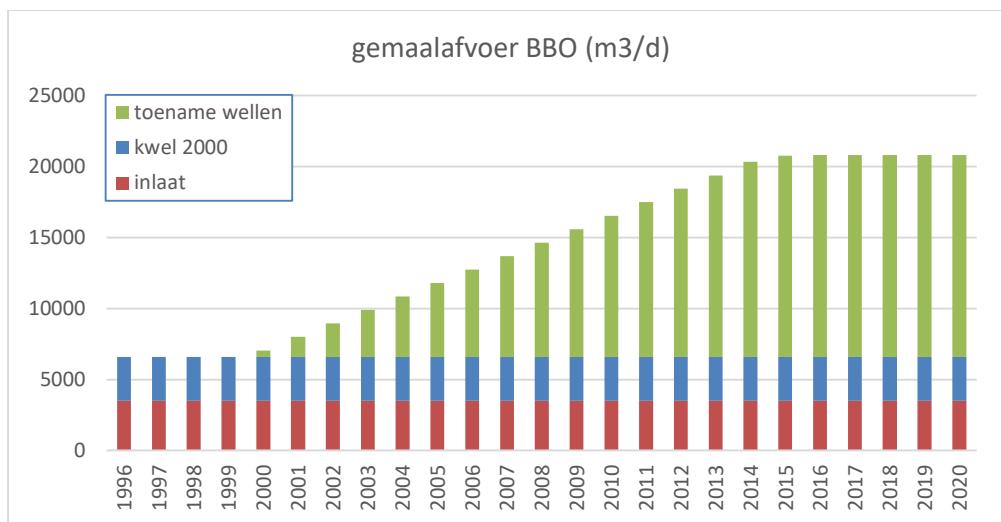
Figuur 7.4 Waterbalans van Baambrugge Oostzijds en Lange Coupure op basis van neerslag, verdamping kwel (oranje) en de toename van de wellenflux (roze). De gele term geeft de geregistreerde maalvolumes weer. De zwarte term betreft de sluitfout. Alle termen staan in m3/d.

In Menyanthes is een analyse op een lineaire trend onderzocht in de gemaalafvoeren (miljoenen m³/maand), zie figuur 7.5. Er is in BBO en LC een toename zichtbaar vanaf 2000 tot en met 2016. Daarna blijven de waarden min of meer stabiel. De gevonden lineaire trend is toegekend aan de wellenflux in figuur 7.4.



Figuur 7.5 Tijdreeksanalyse lineaire trend toename wellenflux Baambrugge Oostzijds en Lange Coupure: de toename vindt plaats in de periode 2000-2016. Fluxen in miljoenen m³/maand

In Figuur 7.6 zijn de belangrijkste deeltermen van de waterbalans van BBO en LC op jaarbasis samengevat.



Figuur 7.6 De berekende deeltermen van de gemaalafvoer Baambrugge Oostzijds en Lange Coupure in m³/dag

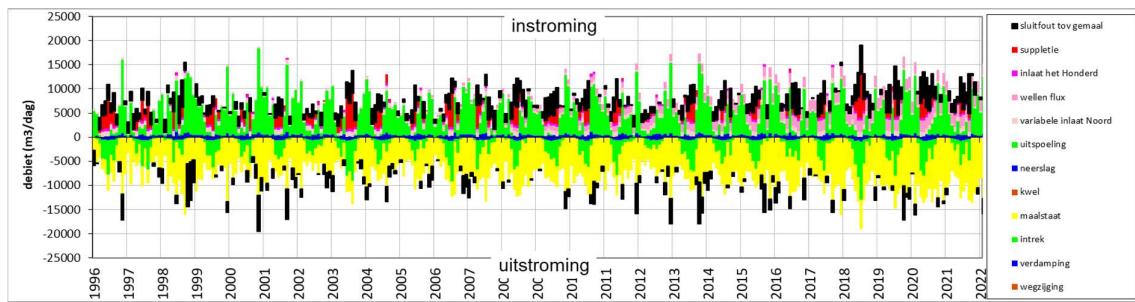
Samenvattend voor de polder Baambrugge Oostzijds

De wellen zijn hier ontwikkeld in de periode tussen 2000 en 2016. Daarna zijn ze in orde van grootte gelijk gebleven. Er is in sommige zomers een relatief grote restterm zichtbaar (figuur 7.4). De conclusie is dat in met name droge zomers de wellen harder gaan stromen.

7.3.3

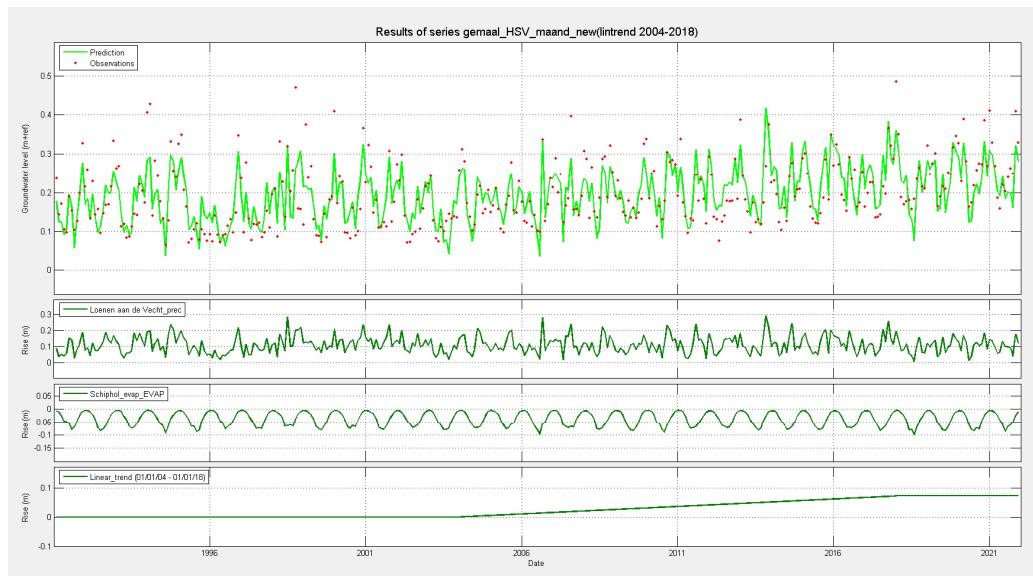
Holland, Sticht en Voorburg west en Het Honderd west

In Holland Sticht en Voorburg west is de zone waar wellen verwacht worden kleiner dan in de andere polders. Door aanwezigheid van het spoortracé langs het kanaal ligt de eerste (teen)sloot verder van het kanaal. Hierdoor zal de kweldruk vanuit het ARK zich pas op grotere afstand manifesteren. Kijkend naar figuur 7.7 wordt geconcludeerd dat de balansberekening matig is (de sluitfout is over de hele periode relatief groot). Vermoedelijk zitten er onvolkomenheden in de gemaalcijfers of schattingen van de inlaat. Conclusies op grond van deze waterbalans kunnen daarom slechts met de nodige reserve getrokken worden.



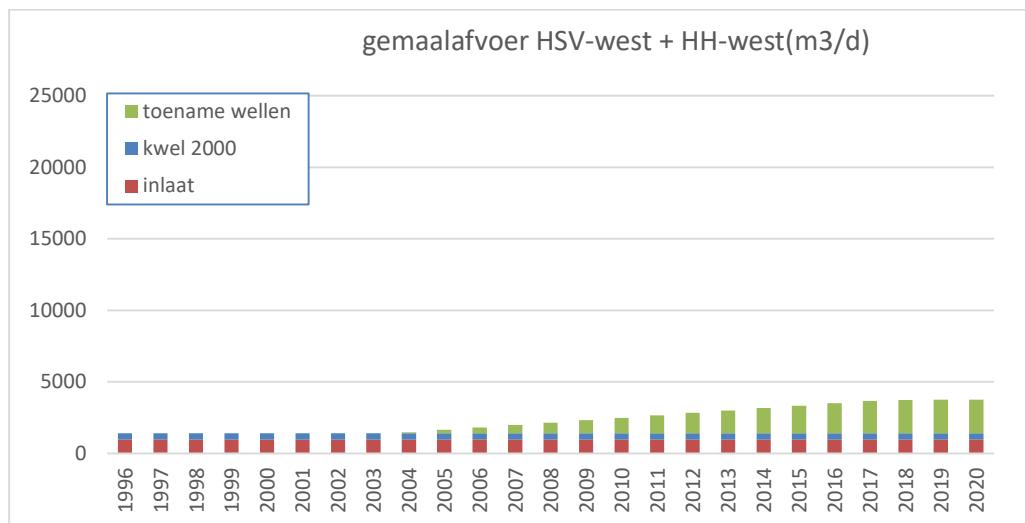
Figuur 7.7 Balans van Holland, Sticht en Voorburg en Het Honderd West

In Menyanthes is een analyse op een lineaire trend onderzocht in de gemaalafvoeren (miljoenen m³/maand), zie figuur 7.8. Er is in HSV en HH west een toename zichtbaar vanaf 2004 tot en met 2018. Daarna blijven de waarden min of meer stabiel. De gevonden lineaire trend is toegekend aan de wellenflux in figuur 7.7.



Figuur 7.8 Tijdreeksanalyse lineaire trend toename wellenflux Holland, Sticht en Voorburg en Het Honderd West: toename vindt plaats in de periode 2004-2018. Fluxen in miljoenen m³/maand

In Figuur 7.9 zijn de belangrijkste deeltermen van de waterbalans van HSV en HH west op jaarbasis samengevat.



Figuur 7.9 De berekende deeltermen van de gemaalafvoer Holland, Sticht en Voorburg en Het Honderd West in m³/dag

7.4 Vergelijking resultaten excel waterbalans met grondwatermodel

De kwel/wegzettingstermen uit de excel waterbalansen kunnen worden vergeleken met de kweltermen uit de grondwatermodellering (zie hoofdstuk 6 en bijlage 6). In tabel 7.2 zijn de belangrijkste termen voor de hydrologische situatie in 2000 en voor de huidige situatie in de onderzochte polders samengevat.

Gesteld kan worden dat beide rekenmethoden vergelijkbare resultaten opleveren. Een nadere beschouwing is te lezen in bijlage 6.

Tabel 7.2 Berekende kwel/wegzettingstermen waterbalans en grondwatermodel

Polder	Oppervlakte (m ²)	kwel 2000 (m ³ /d)	toename wellen flux (m ³ /d)	kwel 2020 (m ³ /d)	gemiddelde inlaat gemeten (m ³ /dag)
Waterbalans HGP	5156194	138	7266	7404	1420
Waterbalans BBO	8646683	3072	14137	17209	3500
Waterbalans HSV	3256174	439	2361	2800	950
GW Model HGP	5156194	-50	7377	7327	1420
GW Model BBO	8646683	2175	14059	16234	3500
GW Model HSV	3256174	391	2231	2622	950

7.5 Conclusies

Op basis van de excel waterbalansen van de polders wordt geconcludeerd dat:

1. Het waterbezaar in de drie beschouwde afvoergebieden sterk is toegenomen in de periode 1998-2018. Het sterkst is de toename in Baambrugge Oostzijds, minder in de Hoeker Garstenpolder en het minst in Holland Sticht en Voorburg West en het Honderd West.
2. De sluitfout voor BBO en HGP weerspiegelt de seizoensfluctuatie van de kwel, met in de zomer hogere afvoeren dan in de winter.
3. De jaargemiddelde hoeveelheid kwel lijkt de laatste jaren te stabiliseren.

8 Eerste verkenning oplossingsrichtingen

8.1 Inleiding

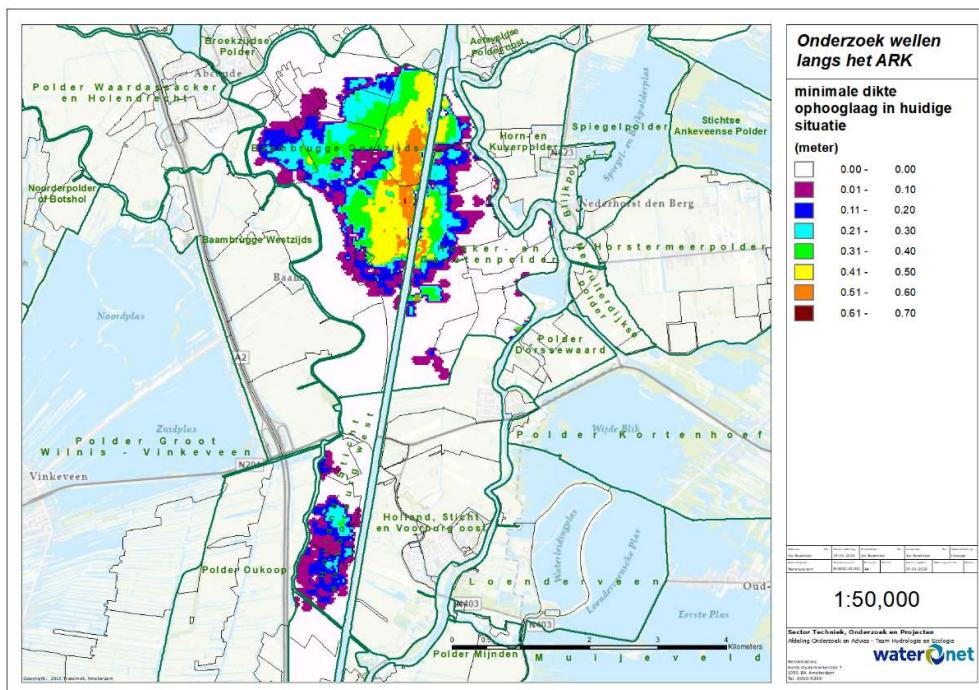
Er zijn meerdere maatregelen denkbaar die de kwelfflux door de wellen in het maaiveld en watergangen kunnen verminderen. Een aantal van deze maatregelen zijn doormiddel van verkennende modelberekeningen geanalyseerd op effectiviteit en een aantal kort beschouwd. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van deze eerste verkenning van oplossingsrichtingen.

De volgende maatregelen zijn verkend:

- Polders ophogen met klei, om de toegenomen waterdruk met meer gewicht van boven te weerstaan
- Aanleggen diepe drainerende sloten langs het ARK, om de stijghoogten in de polders te verlagen
- Verhogen bodemweerstand ARK, zodat minder water uit het kanaal infiltrert en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket af zal nemen

8.2 Percelen ophogen met klei

Met het grondwatermodel is berekend hoeveel dikte aan klei nodig is om de verhoogde waterdruk uit het watervoerende pakket te weerstaan. In deze berekeningen is voor de klei uitgegaan van een volumegewicht van 1.4 kg/l. Aangenomen is dat een veiligheidsfactor van 1.1 (10% overgewicht aan klei ten opzichte van de waterdruk) voldoende is. In figuur 8.1 is de benodigde dikte van een dergelijk kleidek weergegeven. De maximale dikte bedraagt circa 60 cm.



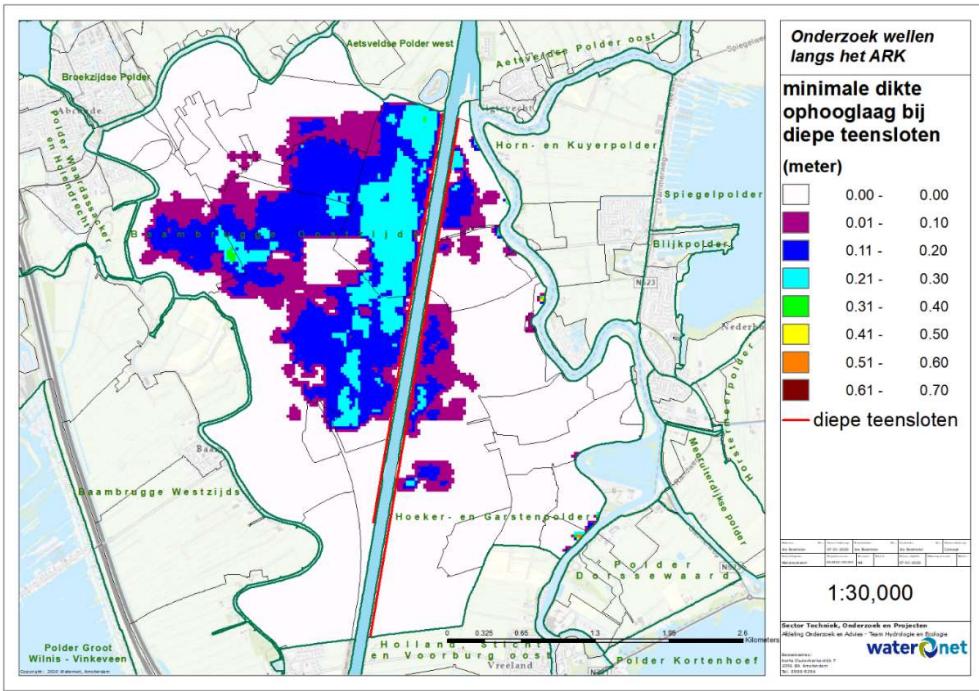
Figuur 8.1: Benodigde dikte ophooglaag om opbarsten van percelen te voorkomen (veiligheidsfactor 1.1, dichtheid ophoogklei=1.4 kg/l)

Door het opbrengen van klei zal het onderliggende veenpakket sterk gaan klinken. Het is goed denkbaar dat de ophoging op termijn geheel wordt teniet gedaan door bodemdaling. Doordat de hoeveelheid water in de bodemkolom afneemt bij klink, zal het stabiliserend effect van de ophoging in zekere mate af kunnen nemen met de tijd.

8.3 Aanleg diepe teensloten langs ARK

Om de stijghoogten effectief te verlagen zijn in het grondwatermodel diepe teensloten met een breedte van 9m, tot in het Pleistocene zand langs het ARK aangebracht in de polders BBO en HGP. De ligging van deze teensloten zijn rood gemarkeerd in figuur 8.2. Voor deze verkennende berekeningen zijn de diepe teensloten gepositioneerd op de bestaande locaties van de teensloten. Als deze optie in de toekomst nader onderzocht gaat worden moet de afstand tot het ARK worden vergroot om het risico voor 'piping' te reduceren.

De bodemweerstand van deze sloten is gelijkgesteld aan 1 dag. In figuur 8.2 is het resultaat weergegeven door de resterende kleidekdikte af te beelden die nodig is voor volledige stabiliteit, zoals weergegeven in figuur 8.1. Duidelijk is dat alleen aanleg van diepe teensloten niet genoeg is om stabiliteit van de bovengrond te garanderen. Er is aanvullend nog een kleidek tot een dikte van maximaal 30 cm noodzakelijk om de veiligheidsfactor van 1.1 te bereiken.



Figuur 8.2: Combinatie diepe teensloten langs ARK en ophooglaag om opbarsten van percelen in BBO en HGP te voorkomen (veiligheidsfactor 1,1, dichtheid ophoogklei=1,4 kg/l)

Als langs het ARK diepe teensloten worden aangelegd, zullen deze watergangen bij gelijkblijvend peil zeer forse debieten gaan afvoeren. De verwachting is dat de toename in de teensloot voor een groot deel gecompenseerd wordt door een afname van de diffuse kwel en wellenflux elders in deze polders

8.4 Verhoging infiltratieweerstand ARK

De (verlaagde) infiltratie weerstand van het ARK kan op verschillende manieren weer worden verhoogd. Op hoofdlijnen vallen alle manieren terug in twee sporen:

1. Het passief verhogen van de infiltratieweerstand door het bevorderen van het proces van dichtslibben van de bodem. Dit kan bijvoorbeeld door een verlaging van de maximum vaarsnelheid.
 2. Het actief verhogen van de infiltratieweerstand door de kanaalbodem af te dichten.

Beide maatregelsperen worden hieronder kort besproken.

8.4.1 **Verlaging maximum snelheid van schepen op kwetsbare trajecten**
Als de aanvraagde vermindering van de snelheid wordt toegestaan, dan kan dit zijn:

Als de eroderende werking van schepen wordt beperkt door beperking van de maximum vaarsnelheid van de schepen, zal de weerstand van de kanaalbodem weer kunnen toenemen. Een vergelijkbaar proces kan dan in gang gezet worden als in de periode na de verbreding/verdieping van het kanaal in 1981. Fijn slib kan weer bezinken en zich de tussen grotere zandkorrels nestelen, waardoor de infiltratiesnelheid van kanaalwater af zal nemen. De weerstand van de kanaalbodem kan in theorie weer toenemen tot waarden, die in de periode 1990-2000 aanwezig waren. Deze natuurlijke vorm van afdichten blijft echter kwetsbaar voor verstoring, omdat de verstopping slechts optreedt in de bovenste centimeters van het zandpakket op de bodem.

Het zal wederom 10-15 jaar duren voordat deze vorm van afdichting maximaal doorwerkt, zoals in het verleden is aangetoond (zie bijlage 4).

8.4.2 Afdichting op kanaalbodem aanbrengen

Het aanbrengen van een afdichtende klei/bentoniet laag op de bodem van het ARK lijkt de ideale oplossing. De bodemweerstand kan in theorie verhoogd worden tot minimaal enkele honderden dagen, waardoor de wegziiging sterk gereduceerd zal worden. De stijghoogten rond het kanaal zullen daarmee weer aanzienlijk kunnen dalen. Modelmatig kan dit aangetoond worden.

9 Discussie seisoensvariaties in stijghoogten en waterbalans

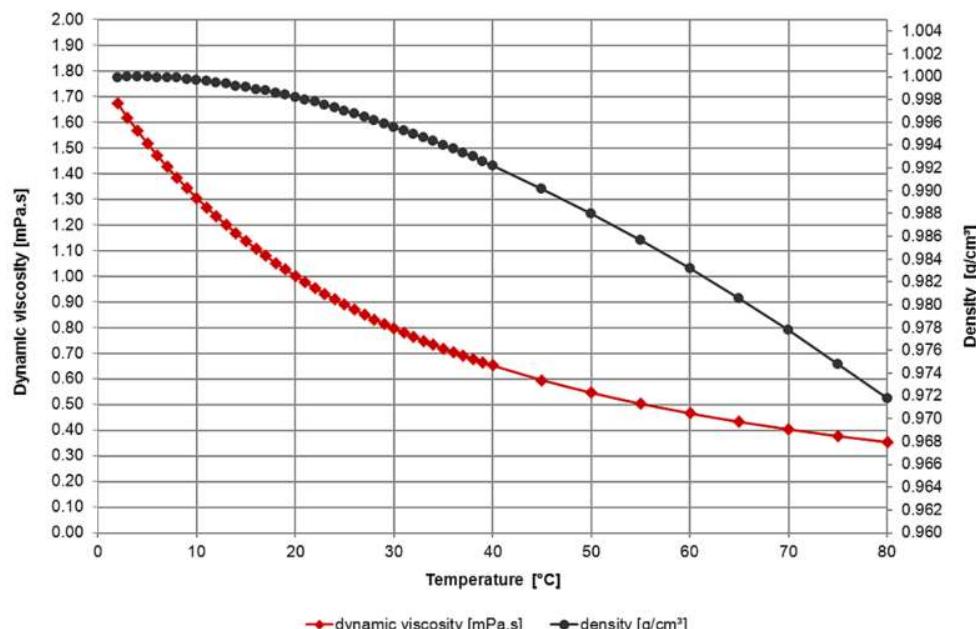
9.1 Seizoenseffecten in stijghoogtewaarnemingen en gemeten waterbalans

In de metingen van de polderafvoeren blijkt dat er een sterke seisoensvariatie is: de zomerafvoer kan in sommige zomers verdubbelen ten opzichte van winterafvoer. Het huidige grondwatermodel is stationair en daarmee representatief voor de gemiddelde situatie. De waargenomen seisoensvariatie is niet eenvoudig te modelleren. Tijdsafhankelijk doorrekenen van het grondwatermodel zoals het nu is, leidt juist tot lagere afvoeren in de zomer terwijl er dus in de metingen meer wordt afgevoerd. Dit komt doordat in een tijdsafhankelijk grondwatermodel de stijghoogte als gevolg van verdamping uitzakt. Hierdoor neemt ook de kweldruk (en daarmee de kwelflux) in de sloten ook af. De afname van de stijghoogten worden echter niet waargenomen in de stijghoogtemetingen. Het is duidelijk dat er hier iets speelt dat afhankelijk is van een andere variabele dan neerslag en verdamping.

Nabij het ARK is een bijzonder fenomeen waarneembaar vanaf het moment dat het kanaal in 1981 aan de westzijde verdiept wordt van NAP -4.0 m naar NAP -6.4 meter. De gebruikelijke seisoensbepaalde afwisseling met hogere stijghoogten aan het einde van de winter en lagere stijghoogten aan het einde van de zomer, slaat om naar een afwisseling met lagere stijghoogten aan het einde van de winter en hogere stijghoogten aan het einde van de zomer (zie hoofdstuk 4). Voor dit fenomeen is een verklaring gevonden in de toegenomen invloed van de temperatuur van ARK water, dat na de verdieping in 1981 sterker gaan infiltreren. Door dit zogenaamde viscositeitseffect (zie paragraaf 9.2) zal het ARK water, naarmate dit opwarmt in de loop van de zomer, makkelijker infiltreren. Aan het eind van de winter is de watertemperatuur van het ARK minimaal en zal het onderliggende zandpakket minder waterdoorlatend zijn. Hoge doorlatendheden in de zomer gaan dan gepaard met toenemende stijghoogten, lagere doorlatendheden in de winter met afnemende stijghoogten. Dit fenomeen is in de tijdreeksanalyse van stijghoogtereeksen in hoofdstuk 4 onderscheiden met een aanvullende verklarende variabele, namelijk het temperatuurverloop van ARK water in de periode 1975-2020.

9.2 Verklaring temperatuureffect op seisoensvariatie stijghoogten en waterbalans

De watertemperatuur is mede bepalend voor de waterviscositeit. Als de viscositeit toeneemt neemt hierdoor ook de doorlatendheid (permeabiliteit) van de bodem toe. Dit fenomeen is ook zichtbaar bij de drinkwaterproductie in de duinen (Waternet, Dunea en PWN). Daar nemen de infiltratiegebieden in de zomers sterk toe als gevolg van het warmere water in de infiltratieplassen. De relatie tussen viscositeit van water (en dus de effectieve permeabiliteit) en temperatuur is weergegeven in figuur 9.1.

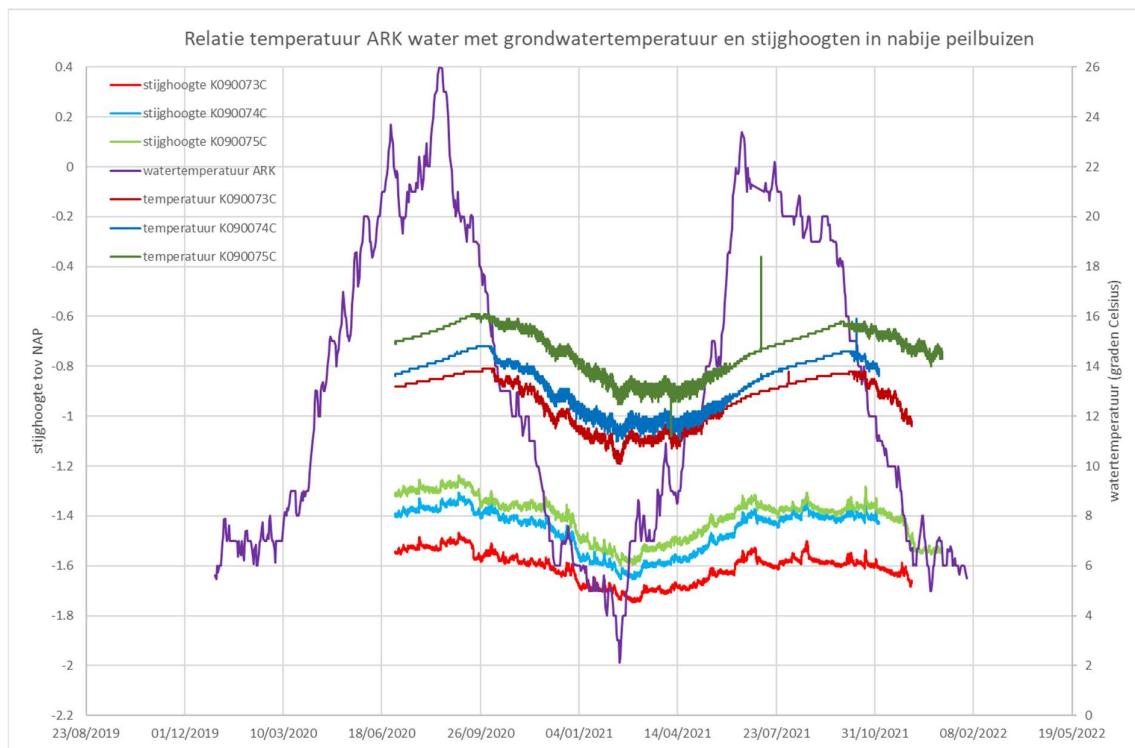


Figuur 9.1: Relatie viscositeit en temperatuur van water

De doorlatendheid van de ARK-bodem en het watervoerende pakket daaronder wordt daarom dus mede bepaald door seizoenseffecten op de temperatuur van het infiltrerende kanaalwater. De infiltratieflux van het ARK kan dus theoretisch sterk toenemen als de kanaalwatertemperatuur toeneemt. Er zijn aanwijzingen vanuit metingen dat de temperatuur van het ARK-water ook wordt doorvertaald naar de temperatuur van het grondwater. In figuur 9.2 staan grafieken weergegeven van het temperatuurverloop in het ARK-water en in peilfilters in de Hoeker en Garsten polder op circa NAP -6 m. De peilbuizen staan op afstanden van resp. 50m (K090075C, rode lijn), 135m (K090074C, groene lijn) en 280m (K090073C, zwarte lijn) vanaf het ARK. Zichtbaar is dat de seizoensbeweging van de grondwatertemperaturen de temperatuur van het ARK-water (paarse lijn) volgt. Bovendien is het filter op 50m afstand gemiddeld 1.35 graden warmer is dan het grondwater op 135m afstand. Het filter op 135m is gemiddeld 0.7 graad warmer dan het grondwater op 280m afstand.

De temperatuursvariatie in het ARK kan uit figuur 9.2 worden afgelezen: deze gaat van 2 tot 27 °C. Dit scheelt dus (op basis van figuur 9.1) een factor 2 in de viscositeit van water. Onbekend is echter wat de temperatuur op de bodem van het ARK is, waarschijnlijk is het temperatuursverloop hier minder groot waardoor het effect op de doorlatendheid van de kanaalbodem kleiner dan de factor 2 is. De metingen van de grondwatertemperatuur hebben een variatie van ca. 3 graden. Het dichtst bij het ARK is het verloop van ca. 13 naar 16 graden. Het effect daarvan op de viscositeit is een factor 1.1.

Vooral vlak naast het ARK (waar de reistijden het kortst zijn) en bij de kanaalbodem zelf (waar de bodemdoorlatendheid de infiltratieflux bepaalt) kan het temperatuureffect op de grondwaterstroming significant zijn. Dit effect kan een groot deel van de waargenomen hogere stijghoogten en grotere waterafvoeren in de polders nabij het ARK in de zomermaanden verklaren. Aanvullend onderzoek is wenselijk om meer inzicht in dit fenomeen te krijgen.

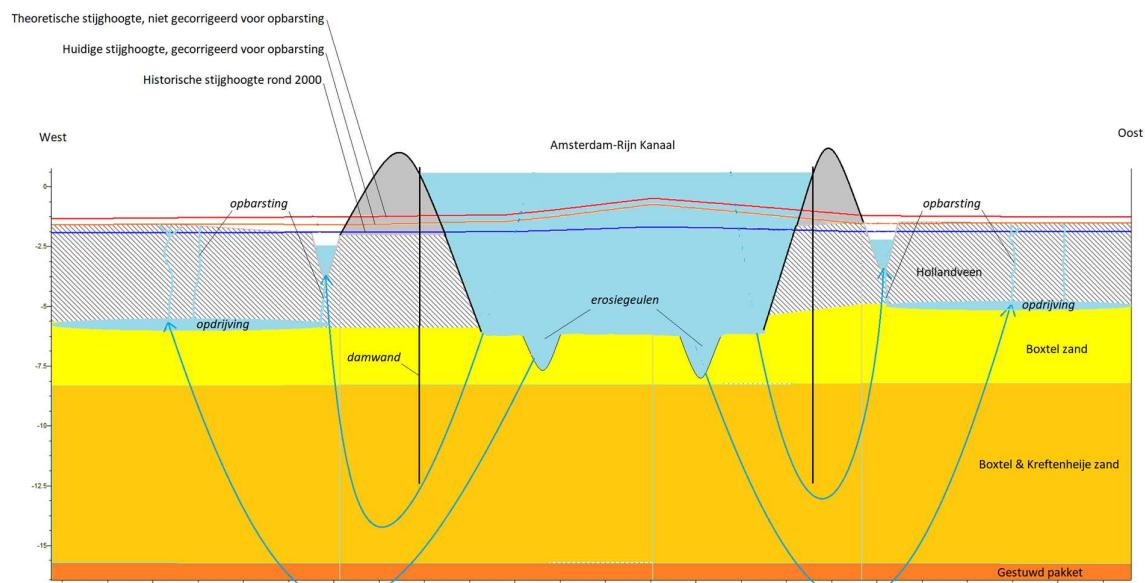


Figuur 9.1: Temperatuurverloop in ARK-water en in enkele peilfilters nabij het ARK
(locatie peilfilters zie figuur 3.4)

9.3 Seizoensvariatie waterbalans door opdrijving deklaag

De grote toename van gemaalafvoeren in de droge zomers van 2018 en 2019 in de polders BBO en HGP (zie hoofdstuk 7: waterbalansen) geeft voeding aan het idee dat de toename van stijghoogten in zomerperioden extra versterkt wordt door nog een ander fenomeen. Gedacht wordt aan een combinatie van slootwellen met het tijdelijk opdrijven van een uitdrogende, holocene deklaag. De grote afvoer kan deels verklaard worden doordat het horizontale waterlichaam op de overgang van zand naar veen en de verticale wellen onder de sloten een systeem van watertransport vormen, waarin de stromingsweerstand over een groot areaal sterk verlaagd wordt.

Kwantificering van dergelijke grondwaterstroming is door de onvoorspelbaarheid van deze 'holle ruimte' in de ondergrond. In figuur 9.3 is in een dwarsprofiel (ligging dwarsprofiel zie figuur 6.3) het opdrijven van het veenpakket en de vorming van wellen (zowel in de percelen als in de sloten) schematisch weergegeven.



Figuur 9.3: Schematische dwarsdoorsnede met berekende stijghoogten, stroombanen en afgeleide vormen van opdrijving en opbarsting van het holocene veenpakket.

10 Conclusies en aanbevelingen

10.1 Conclusies

Er zijn een groot aantal verschillende onderzoekslijnen gevolgd om de oorzaak van de wellenproblematiek te kunnen duiden. Uit de onderzoeken kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Op basis van **literatuuronderzoek** is geconcludeerd dat:
 - a. De verbreding en verdieping van het ARK tussen 1973 en 1981 heeft geleid tot een toename van de afvoer van kwelwater. De kweltoename is tussen 1982 en 2000 deels weer tenietgedaan door de afzetting van slib op de kanaalbodem.
 - b. Door de toenemende scheepvaart op het ARK tussen globaal 2000 en 2020 de sliblaag in de vaargeul is verdwenen en de vaste waterbodem op veel plaatsen geërodeerd is (Deltares, 2012). De weerstand tegen infiltratie van kanaalwater is hierdoor sterk afgangen.
2. Op basis van **veldinventarisatie en monitoring** is geconcludeerd dat:
 - a. Er honderden landwellen en waterwellen binnen het onderzoeksgebied in de polders aanwezig zijn.
 - b. De geplaatste peilbuizen laten de hoogste stijghoogten nabij het ARK zien. Met toenemende afstand tot het kanaal nemen de stijghoogten af. Dit laat zien dat het ARK een bron van water in het grondwatersysteem is.
3. Uit de **tijdreeksanalyse** volgt dat:
 - a. Vanaf globaal 2000 een stijgende trend optreedt in grondwaterstijghoogten nabij het ARK.
 - b. Verschuiving van het zoet/zout grensvlak op grotere diepte rond het ARK ondersteunt de hypothese van een versterkte influx van zoet water vanuit het ARK.
4. Met een gekalibreerd **grondwatermodel** is aangetoond dat:
 - a. Vermindering van de weerstand van de ARK-bodem leidt tot significante toename van infiltratie van kanaalwater naar het watervoerende pakket. Deze infiltratie toename leidt tot grootschalige stijging van stijghoogtes in de omgeving van het ARK met het opbarsten van watergangen en toegenomen polderafvoeren tot gevolg.
 - b. De afvoer van kwel in de polders BBO, HGP en HSV-west in de huidige situatie dominant is geworden over het gemiddelde neerslagoverschot.
5. Op basis van de analyse van **andere oorzaken** is vastgesteld dat:
 - a. Het effect van peilwijzigingen door het Waterschap een licht mitigerend effect heeft gehad op de stijghoogte toename sinds 2000.
 - b. Bodemdaling (als gevolg van veenoxidatie) leidt tot een toename van het opbarstrisico. De gewichtsafname van het holocene pakket door veenoxidatie sinds 2000 wordt geschat op maximaal 8 cm waterkolom. De effecten van bodemdaling zijn daarmee echter ondergeschikt aan de berekende stijghoogtetename door het ARK en kunnen daarom niet de oorzaak zijn van de toegenomen kwelflux.
 - c. Overige oorzaken in het review onderzoek van Tauw niet gevonden zijn
6. De **waterbalansen** laten zien dat:
 - a. Het waterbezwaar in de drie beschouwde afvoergebieden sterk is toegenomen in de periode 1998-2018. Het sterkst is de toename in Baambrugge Oostzijds, minder in de Hoeker Garstenpolder en het minst in Holland Sticht en Voorburg West en het Honderd West.
 - b. De sluitfout voor BBO en HGP de seizoensfluctuatie van de kwel weerspiegelt, met in de zomer hogere afvoeren dan in de winter.
 - c. De jaargemiddelde hoeveelheid kwel de laatste jaren lijkt te stabiliseren.

Alle bovenstaande onderzoekslijnen wijzen afzonderlijk van elkaar op een sterke relatie tussen de ontwikkelingen in het ARK en de toegenomen wellenproblematiek in de omliggende polders. Wanneer ze gezamenlijk worden beschouwd wordt geconcludeerd dat de door Waternet geponeerde hypothese (zie paragraaf 1.2) correct is.

Daarmee heeft het onderzoek aangetoond dat de wellenproblematiek in de polders veroorzaakt wordt door:

1. Het verbreden en verdiepen van het ARK in het verleden (1973-1981). Dit heeft de basis gelegd voor de huidige problematiek.
2. De toegenomen scheepvaart op het ARK sinds 2000, waardoor als gevolg van bodemerosie de infiltratieweerstand is afgangen. Dit heeft vervolgens wederom geleid tot een gestage toename van de waterdrukken in het watervoerende pakket met de huidige wellenproblematiek tot gevolg.

10.2 Aanbevelingen

In dit onderzoek zijn de volgende aanbevelingen voor nader onderzoek geformuleerd.

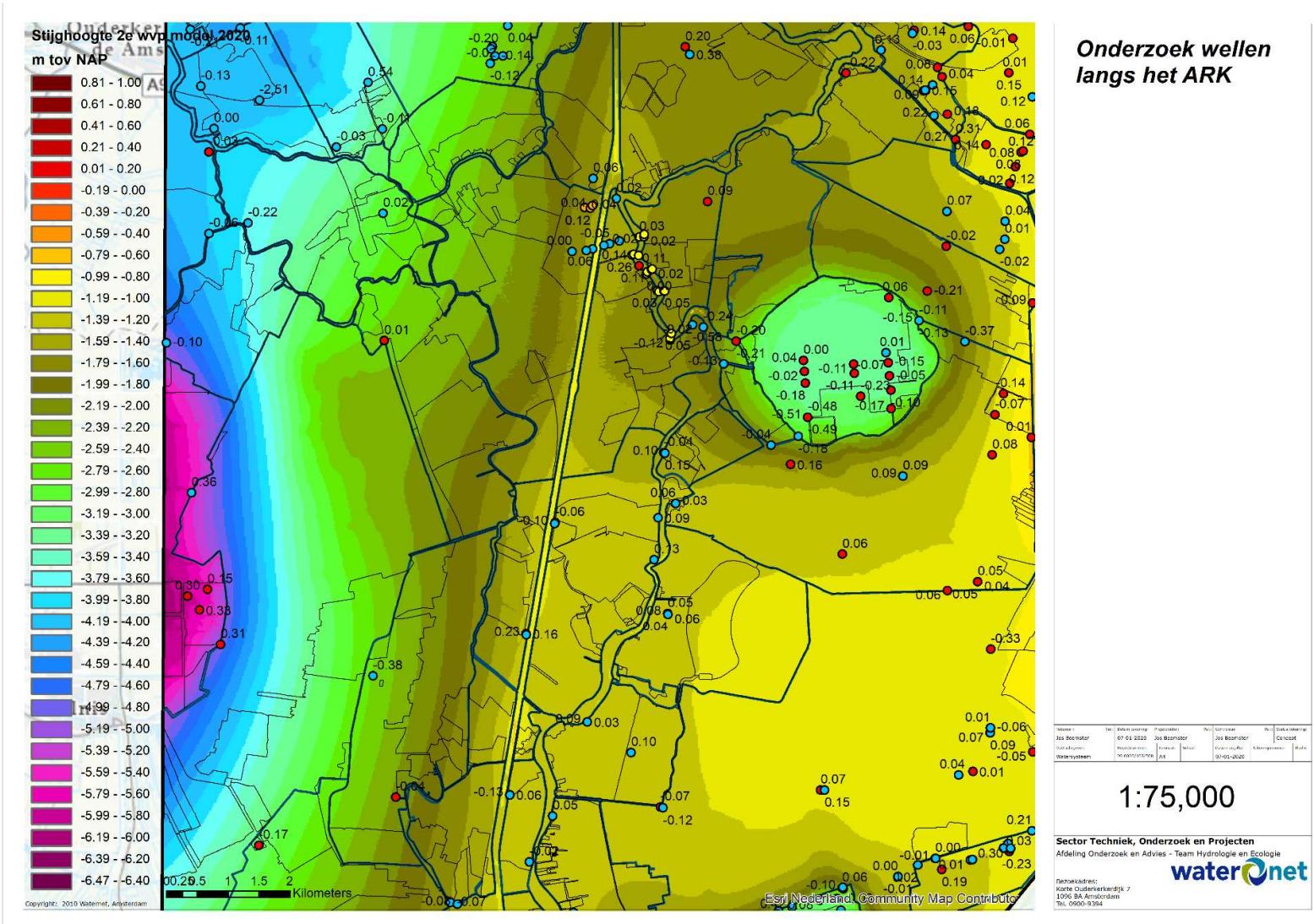
1. Het wordt aanbevolen om waterbalansen per peilvak te maken in de onderzochte polders, door continue registratie van de overstorthoogte bij de stuwen. Aldus kan nauwkeuriger in beeld worden gebracht waar de gebieden zijn met de grootste kwelfluxen. Waternet is hiermee recent gestart.
2. Het is raadzaam de inlaathoeveelheden in de polder regelmatig te blijven monitoren ter verhoging van de betrouwbaarheid van de waterbalans.
3. Aanvullend onderzoek naar het temperatuureffect van ARK-water op de grondwaterstroming is wenselijk om inzicht te krijgen in welke mate dit fenomeen een rol speelt bij door de seizoenen variërende infiltratiefuxen vanuit het kanaal, variaties in stijghoogten in de omgeving en seisoensfluctuaties in afvoerdebieten bij het gemaal.
4. Er zijn een aantal maatregelen/oplossingsrichtingen verkend. Het wordt aanbevolen de effectiviteit van deze maatregelen (of een pakket van gecombineerde maatregelen) verder uit te werken door middel van modelberekeningen.
5. Alvorens wordt overgegaan tot maatregelen/oplossingsrichtingen is het van belang de huidige situatie (de nul-situatie) van het grondwatersysteem nabij het kanaal met meer detail in beeld te brengen. Hiervoor moet een aanvullend meetnet worden aangelegd met meetraaien dwars op het ARK. De te plaatsen peilbuizen worden voorzien van automatische drukopnemers, die grondwaterstanden en stijghoogten continu registreren. Het aanvullend meetnet is in de eerste plaats bedoeld om effecten van te nemen maatregelen nauwkeurig te kunnen monitoren. De inrichting van het meetnet moet worden afgestemd op de te treffen maatregelen. Het is van belang dat het meetnet in nauwe samenwerking tussen RWS en Waternet tot stand komt. Op termijn kunnen de aanvullende metingen gebruikt worden om het grondwatermodel te valideren.
6. Voor een beter inzicht in de temperatuureffecten op de grondwaterstroming zijn intensievere grondwaterstands- en temperatuurmetingen nabij het ARK noodzakelijk. Deze metingen kunnen gecombineerd worden met de metingen genoemd onder punt 5. De drukopnemers registreren naast stijghoogten ook standaard de grondwatertemperatuur. Deze metingen kunnen meer inzicht in de variabele doorlatendheid van de ARK-bodem onder invloed van temperatuur geven.

Literatuur

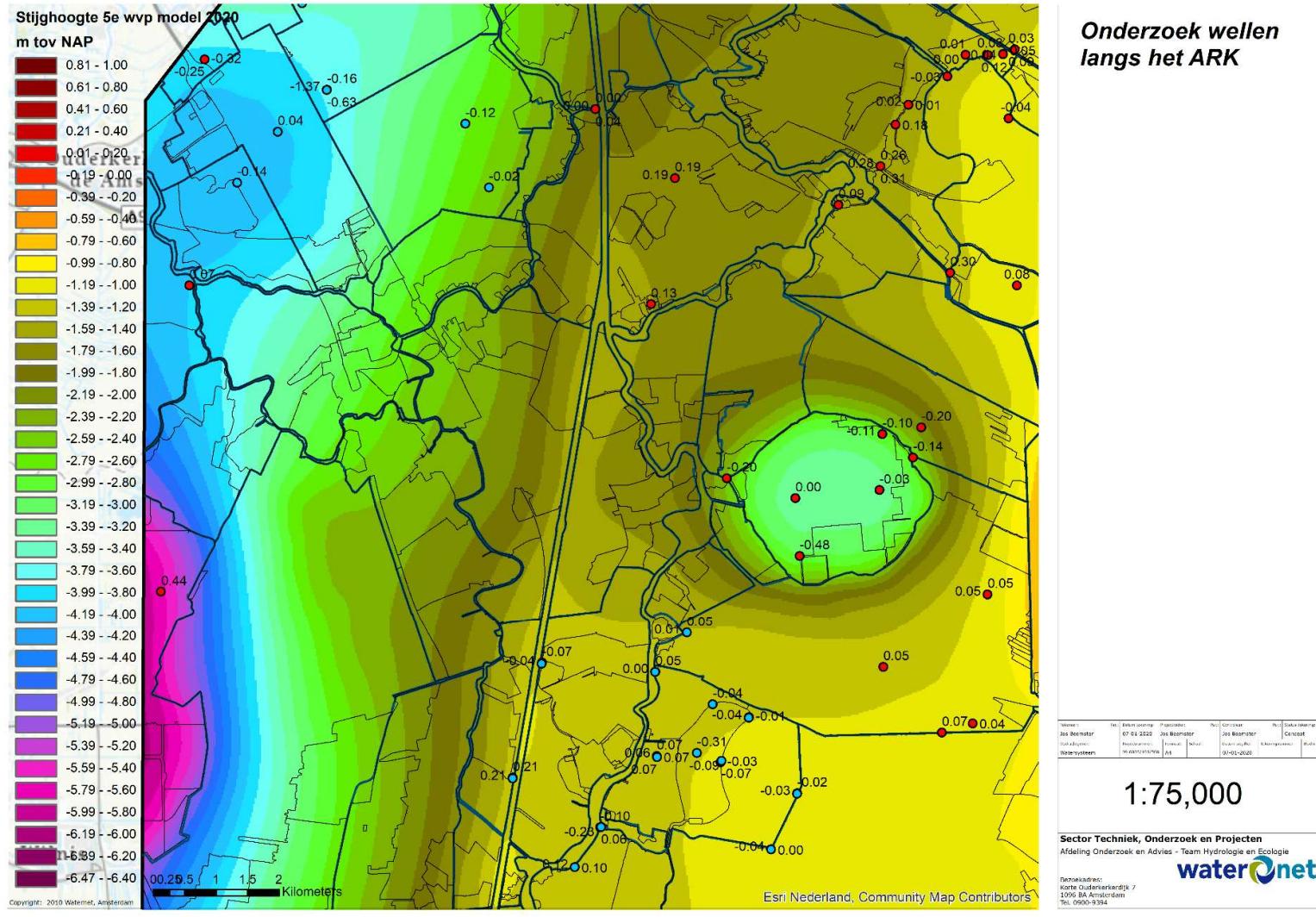
- Deltares, 2012. H. Verheij et al. Onderzoek Bodemerosie Amsterdam-Rijnkanaal.
- Deltares, 2020. J. Delsman et al. Actualisatie zout in het NHI.
- LTO Noord, 2015. Zienswijze Watergebiedsplan Hoeker- en Garstenpolder.
- Pomper, 1975. ICW, Wageningen. De gevolgen van de uitvoering van de verbeteringswerken van het Amsterdam Rijnkanaal in het kanaalgedeelte tussen Utrecht en Amsterdam op de hydrologie van de aangrenzende oevers.
- Pomper, 1980. ICW, Wageningen. De resultaten van het hydrologisch onderzoek bij het Amsterdam-Rijnkanaal.
- Stap G., 2019. The Triggers of boil seepage in the Netherlands: A case study in Baambrugge and Hoeker-Garsten polder. Stageverslag Waternet/ Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Steenkamp, 1987. Invloed van zandwinning op de kwel uit het Amsterdam-Rijnkanaal. DBW/RIZA nota 87.048
- STOWA, 2021. Handleiding tijdsreeksanalyse, rapport 32.
- Tauw, 2021. Systeemanalyse wellenproblematiek ARK. Rapportnr. R001-1280758HKO-V02-nda-NL.
- Veldhuis Y., 2020. Groundwaterfluxes in a lowland polder in the Netherlands. Stageverslag Rijkswaterstaat/ Universiteit Utrecht.
- Waternet, 2011. J. Beemster, T. Olsthoorn. Hydrologisch onderzoek naar risico's voor bodeminstabiliteit bij baggeren Vecht.
- Waternet 2014. J. Beemster. GGOR onderzoek Hoeker- Garstenpolder.
- Waternet, 2015. Watergebiedsplan Hoeker- en Garstenpolder.
- Waternet, 2018. Memo wellenproblematiek afstemming programmabureau Utrecht West.
- Waternet, 2020. Notitie wellenproblematiek Baambrugge Oost en Hoeker en Garstenpolder.
- Waternet, 2021. Toelichting data inwinning - Lokaliseren wellen in sloten.

Bijlagen

Bijlage 1: Isohypsen wvp 2 en kalibratieresultaat wvp 2 en 3



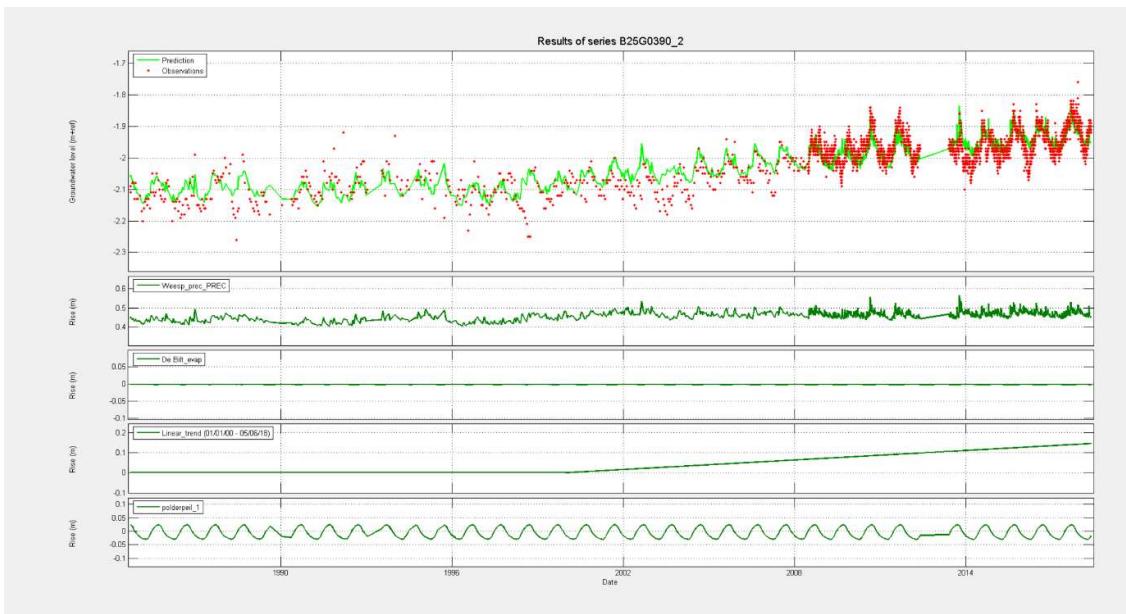
Bijlage 2: Isohypsen wvp 5 en kalibratieresultaat wvp 4 t/m 6



Bijlage 3: Resultaten tijdreeksanalyse (statistiek)

Locatie	Filter	OKP (m_tov_NAP)	EVP %	MAE	RMSE	RMSI	Drainage Base	Step trend	Stnd deviatie Step trend	Lin trend	Stnd deviatie Lin trend	Periode Lin trend	Verzoeting
25H0238	3	-11.00	69.28	0.03	0.04	0.03	-1.82			0.13	0.008	2000-2014	
25H0238	2	-55.10	73.41	0.03	0.04	0.03	-1.83			0.14	0.008	2000-2014	
25H0238	1	-98.50	89.75	0.03	0.04	0.04	-2.66			0.42	0.022	2000-2014	2000-2014
31E0163	1	-118.89	81.79	0.03	0.04	0.03	-1.80	0.08	0.009	0.07	0.012	2000-2020	
31E0163	2	-52.49	81.67	0.03	0.04	0.03	-1.71	0.04	0.008	0.07	0.010	2000-2020	
31E0163	3	-15.19	82.01	0.03	0.04	0.04	-1.68	0.07	0.010	0.09	0.012	2000-2020	
31E0166	1	-28.93	87.32	0.04	0.06	0.04	-1.82	0.09	0.010	0.15	0.019	2000-2019	
31E0166	2	-8.93	86.95	0.04	0.06	0.04	-1.81	0.10	0.010	0.13	0.019	2000-2019	
31E0167	1	-26.94	85.49	0.05	0.07	0.06	-1.79	0.19	0.010	0.37	0.019	2000-2020	
31E0167	2	-7.94	86.63	0.05	0.07	0.06	-1.79	0.16	0.010	0.42	0.018	2000-2020	
31E0174	1	-125.95	94.53	0.03	0.04	0.04	-1.90	0.32	0.007	0.23	0.012	2000-2020	1981-1985
31E0174	3	-63.95	88.53	0.04	0.05	0.04	-1.63	0.07	0.008	0.21	0.014	2000-2020	
31E0174	6	-12.95	86.86	0.04	0.05	0.04	-1.57	0.06	0.008	0.25	0.013	2000-2020	
B25G0390	2	-26.53	68.24	0.03	0.04	0.02	-2.53			0.15	0.040	2000-2018	
B25G0390	3	-64.53	67.97	0.04	0.05	0.04	-2.38			0.35	0.012	2000-2018	2000-2018
B31F0388	1	-30.60	75.39	0.03	0.03	0.03	-1.49			0.11	0.010	2000-2018	
B31F0249	2	-29.80	70.98	0.02	0.02	0.02	-1.55			0.08	0.004	2000-2014	
B25H0092	1	-11.40	49.91	0.03	0.04	0.02	-2.12			0.11	0.005	2000-2020	
B31F0249	2	-29.80	69.17	0.02	0.03	0.02	-1.57			0.08	0.004	2000-2014	
B25G0991	1	-12.00	70.98	0.02	0.03	0.03	-2.70	0.06	0.004	0.02	0.010	2000-2002	
B31E0170	1	-9.60	72.02	0.04	0.05	0.04	-1.70			0.09	0.013	2000-2014	
B31E0018	1	-20.13	90.47	0.02	0.02	0.02	-3.81			-0.01	0.004	2000-2007	
B31E0012	1	-24.90	84.05	0.02	0.03	0.02	-2.52			0.02	0.005	2000-2006	
B31E0010	1	-20.28	89.70	0.01	0.02	0.01	-2.31	-0.07	0.00	-0.01	0.003	2000-2008	
B31F0126	2	-53.80	72.95	0.03	0.05	0.05	-0.86			-0.01	0.014	2000-2020	
B31E0164	1	-11.95	84.79	0.03	0.03	0.03	-2.04			0.03	0.005	2000-2007	
B25H0640	1	-4.010	93.09	0.02	0.03	0.03	-1.50			-0.21	0.006	2000-2004	
B25H0090	1	-30.80	73.63	0.04	0.05	0.04	-2.00			0.13	0.011	2000-2020	
B25H0459	1	-9.81	59.57	0.03	0.03	0.02	-1.90			0.06	0.012	2000-2020	

Bijlage 4: Resultaten tijdreeksanalyse (grafieken)



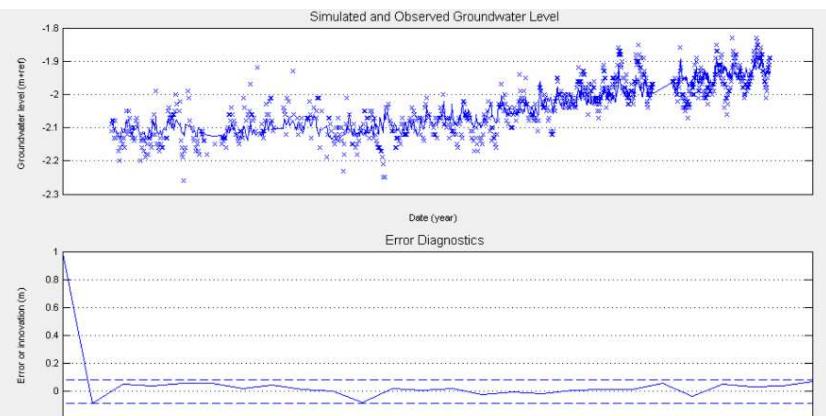
Peilbuis B25G0390-2

TFN Models

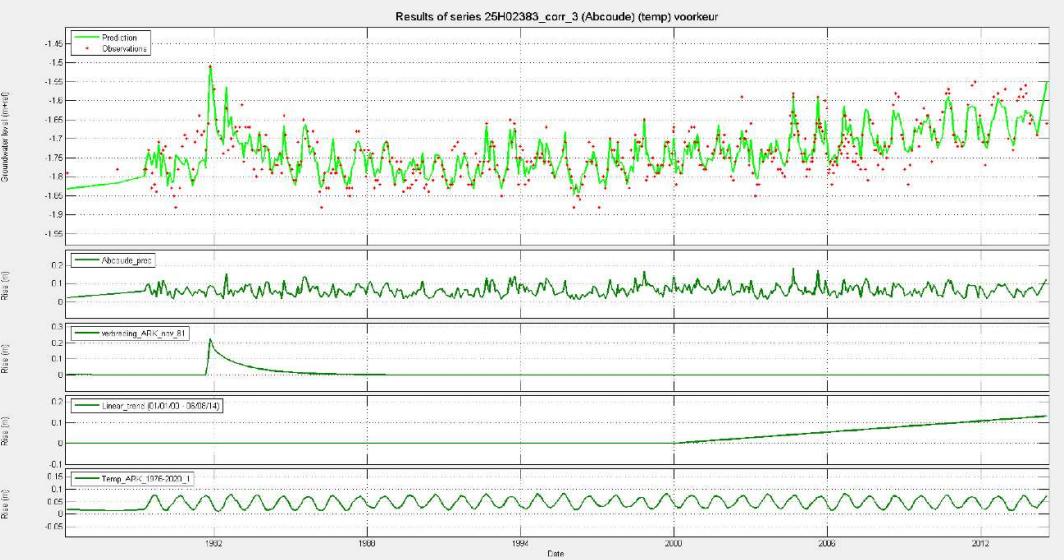
B25G0390_2 (weekly) (geen pp)
 Selected series:
 Weesp_prec_PREC
 De Bilt_evap
 Linear_trend (01/01/00 - 05/06/18)

Selected series:
 Listbox

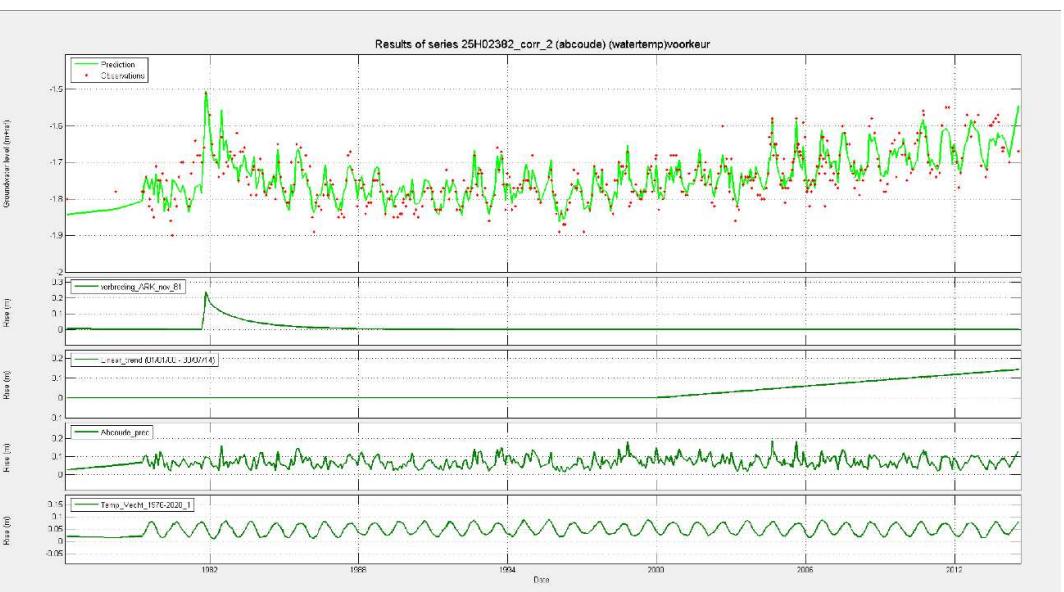
Selected series:
 Listbox



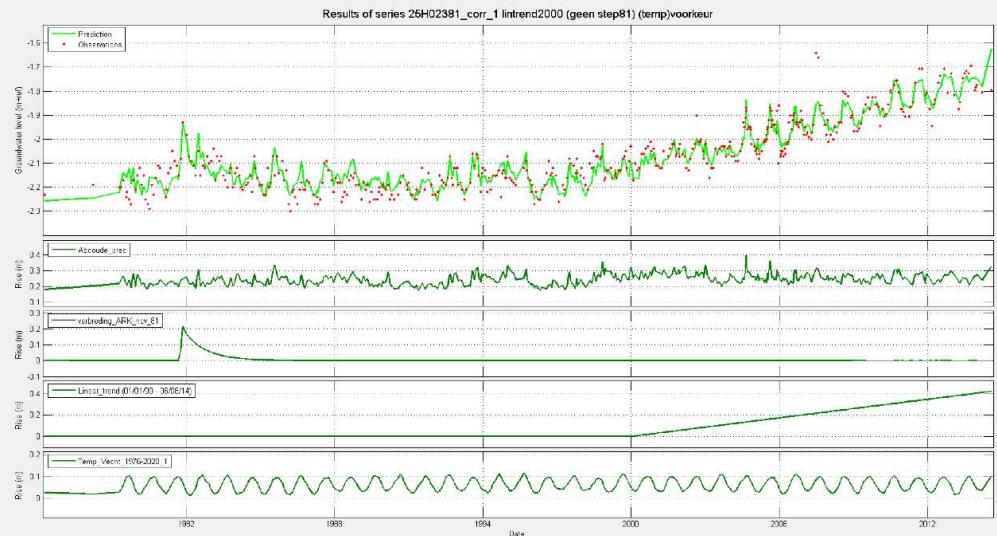
Autocorrelatie peilbuis B25G0390-2



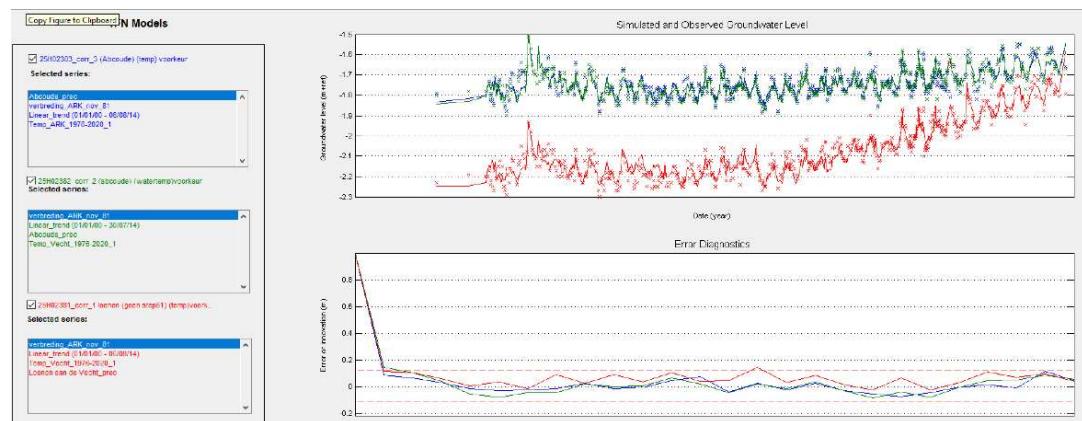
Peilbuis B25H0238-3 ondiep Waternet



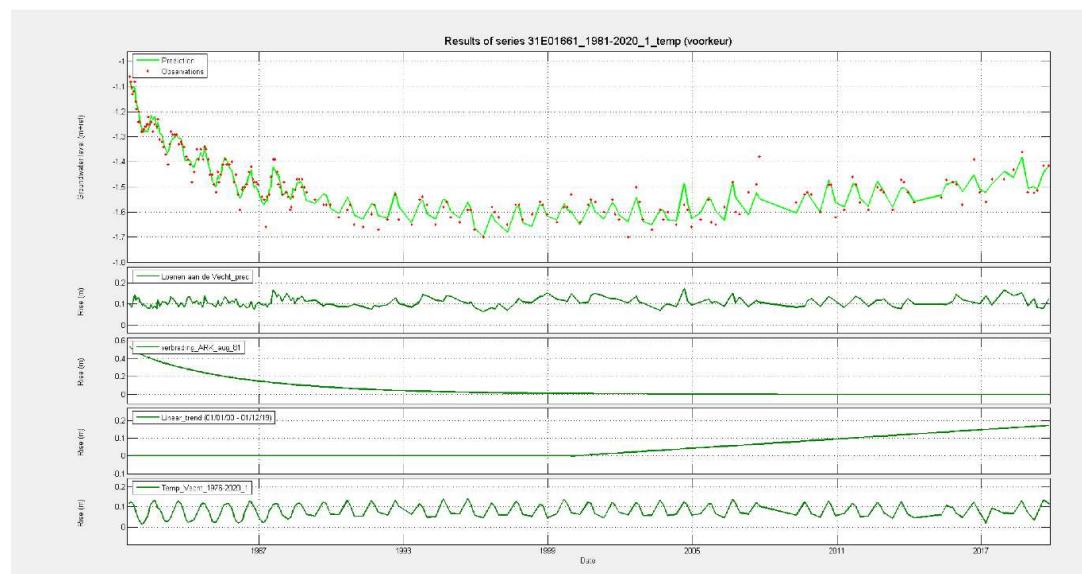
Peilbuis B25H0238-2 middeldiep Waternet



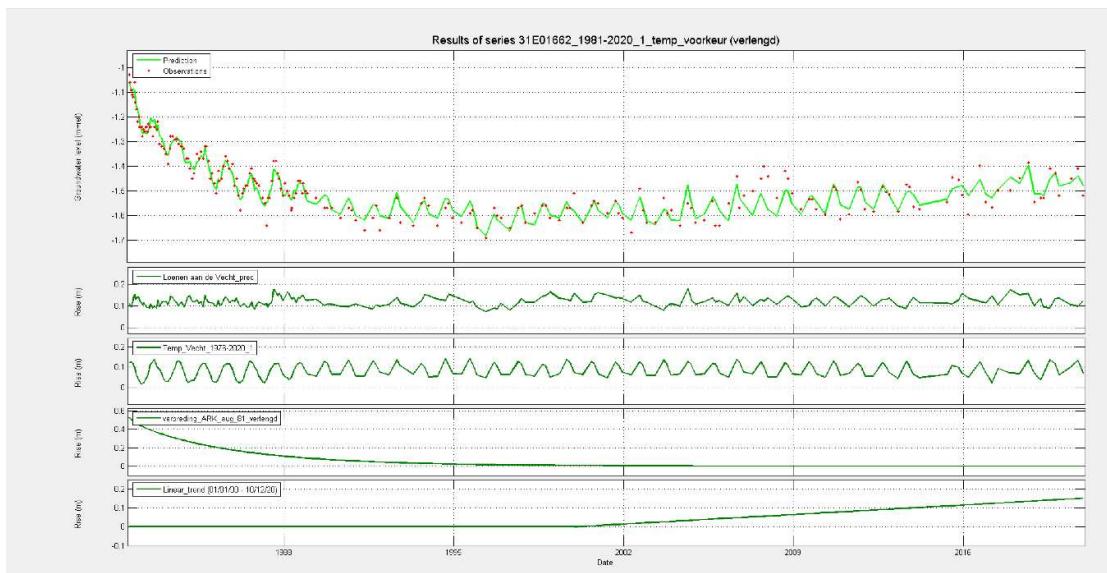
Peilbuis B25H0238-1 diep Waternet



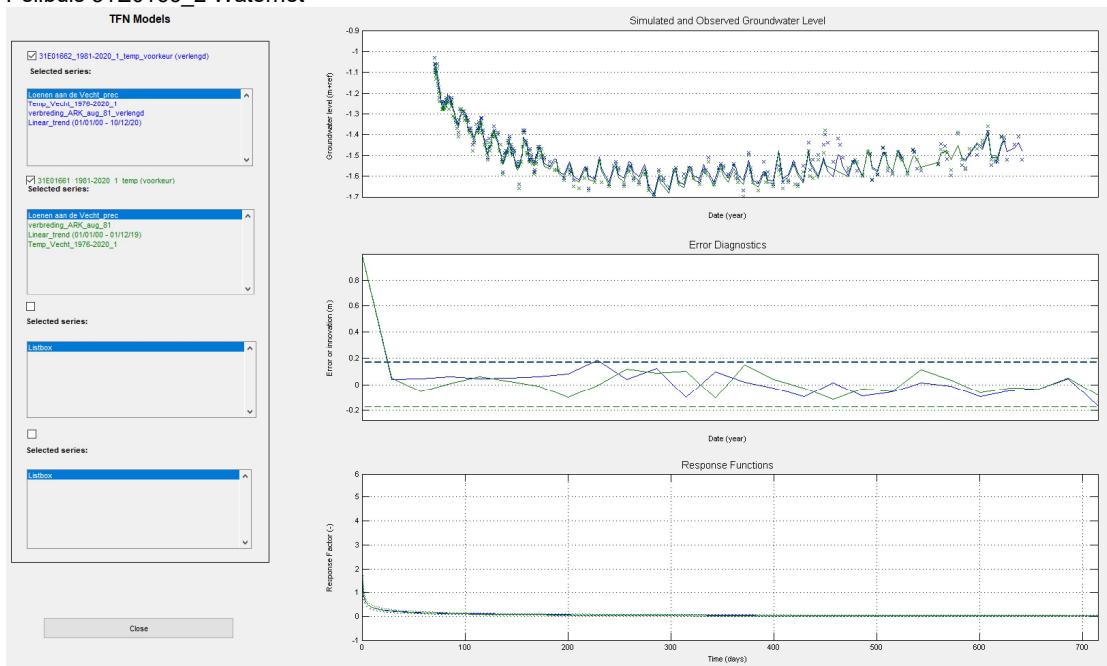
Autocorrelatie Peilbuizen B25H0238 Waternet



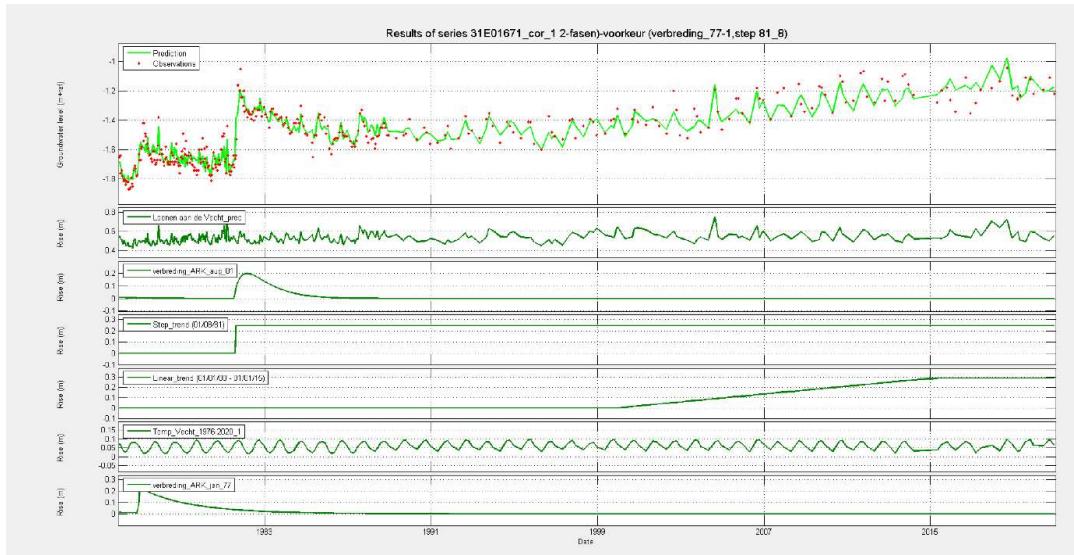
Peilbuis 31E0166_1 Waternet



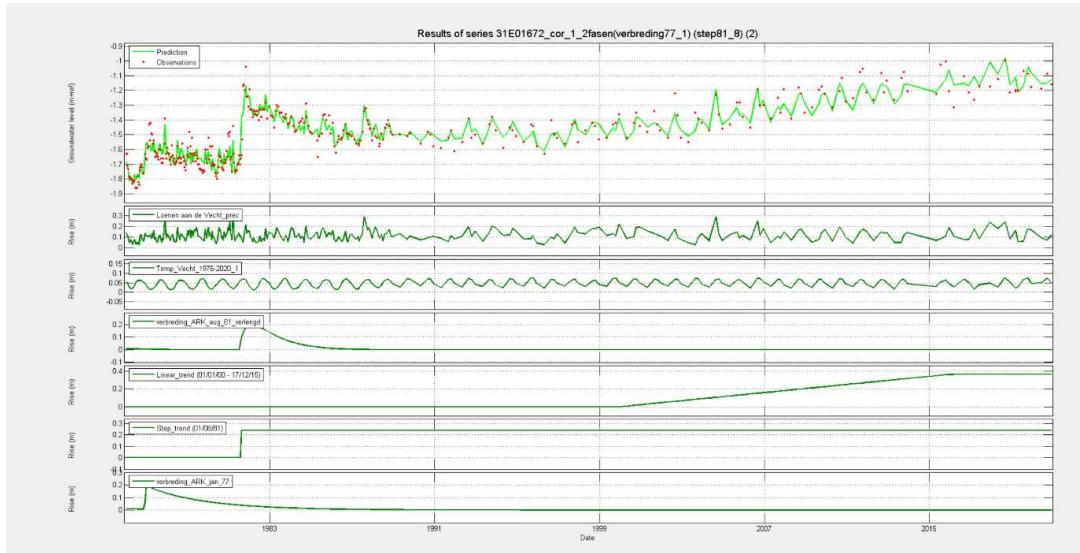
Peilbuis 31E0166_2 Waternet



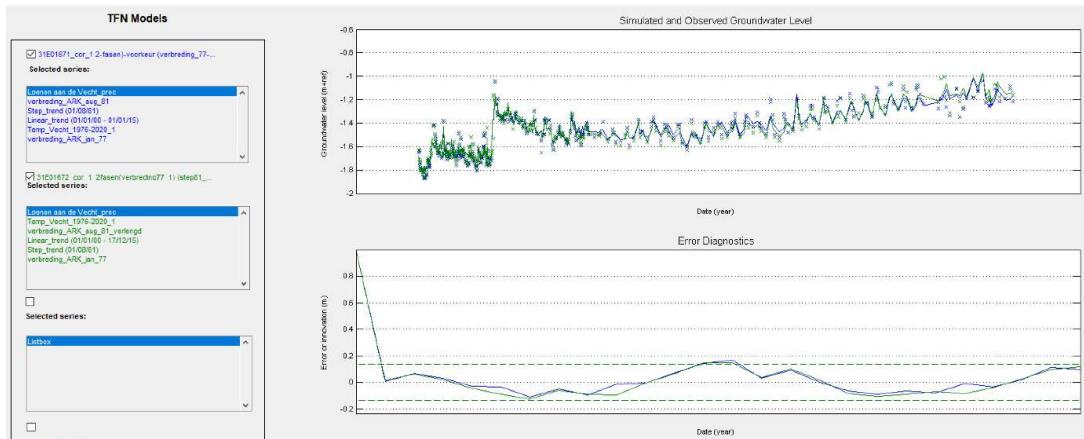
Autocorrelatie peilbuizen 31E166 Waternet



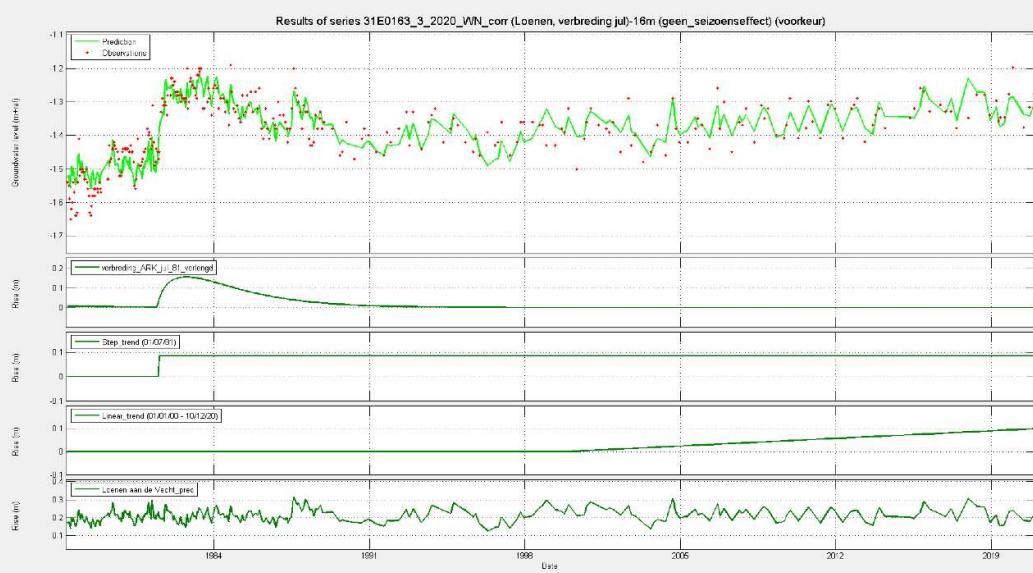
Peilbuis 31E01671 Waternet



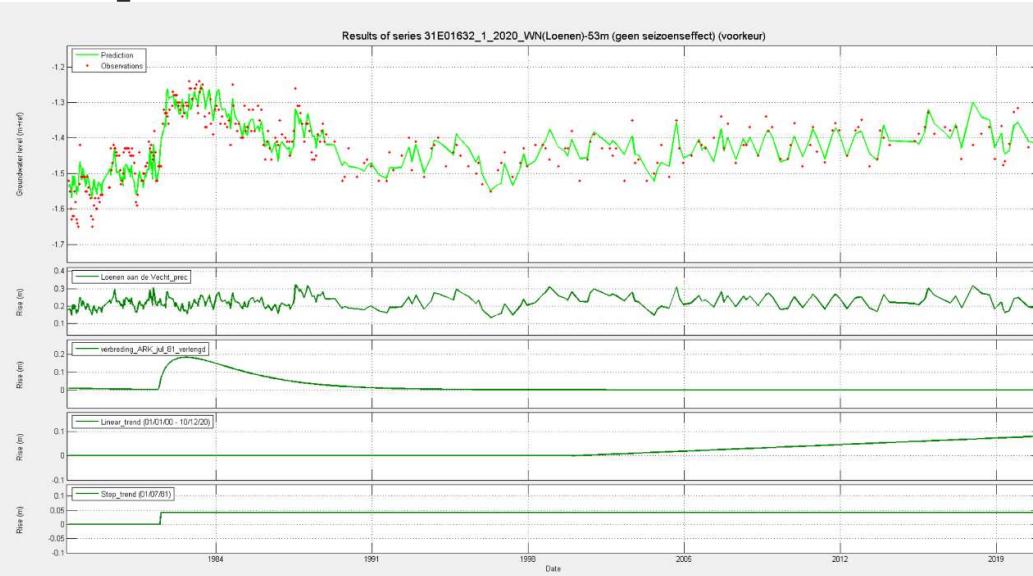
Peilbuis 31E01672 Waternet



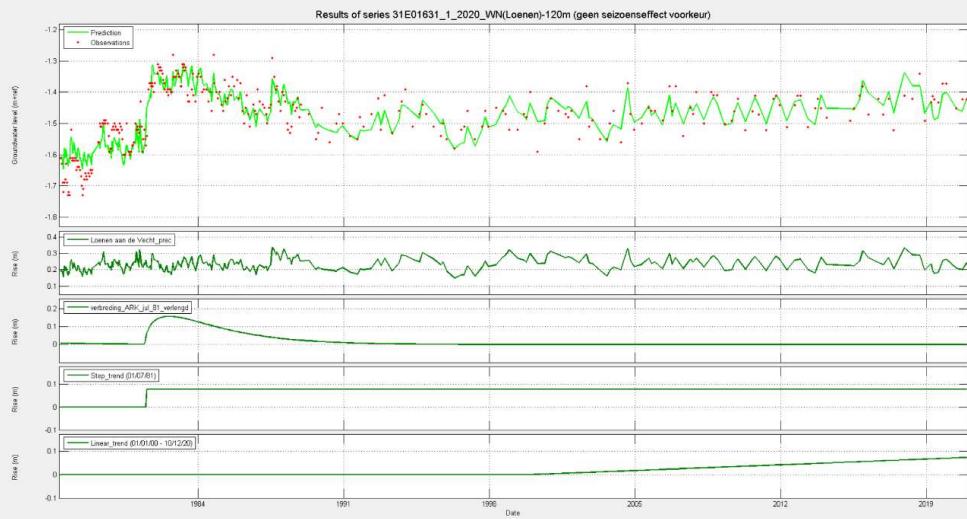
Autocorrelatie peilbuizen 31E167 Waternet



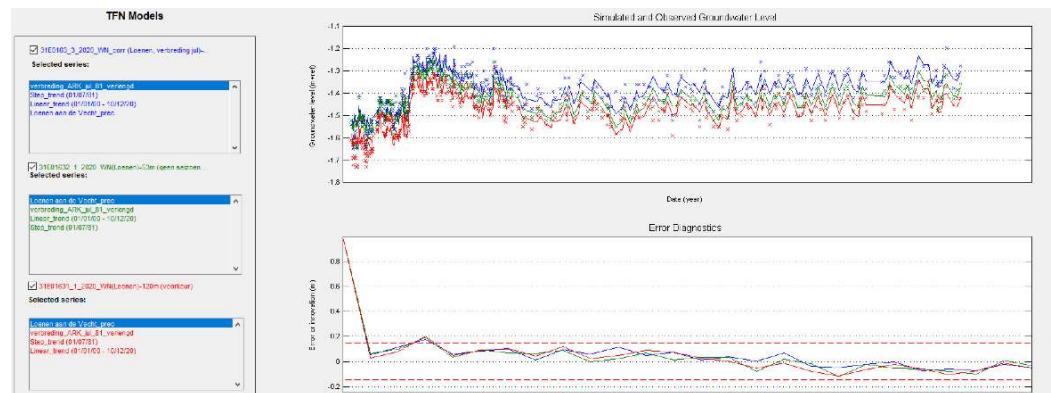
Peilbuis 31E0163_3 Waternet



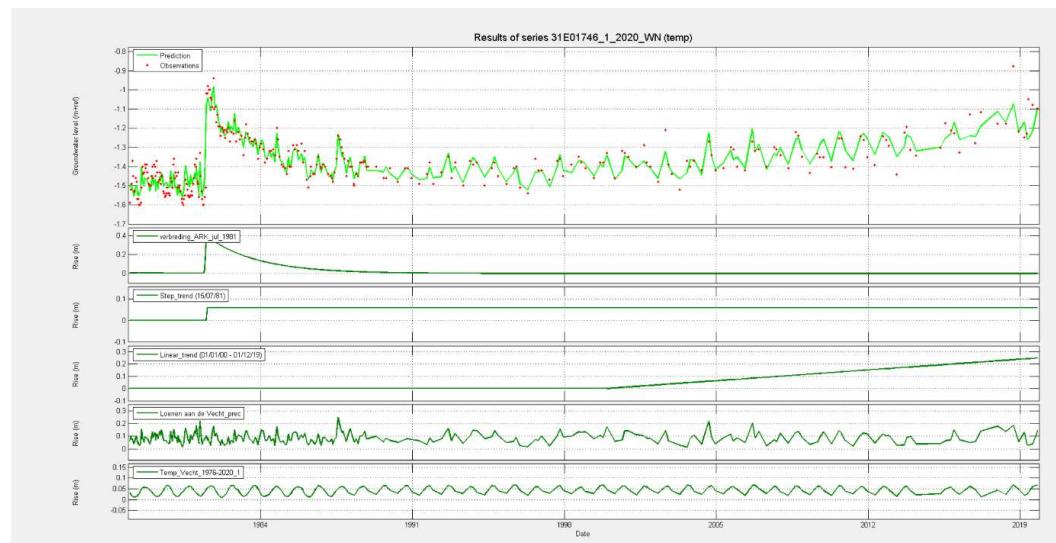
Peilbuis 31E0163_2 Waternet



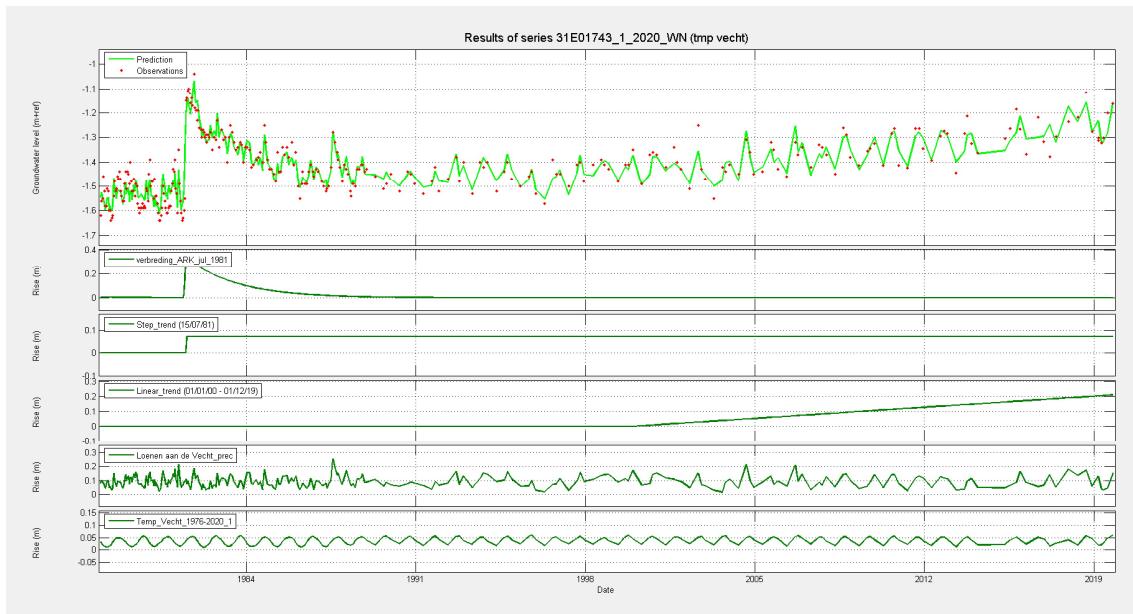
Peilbuis 31E0163_1 Waternet



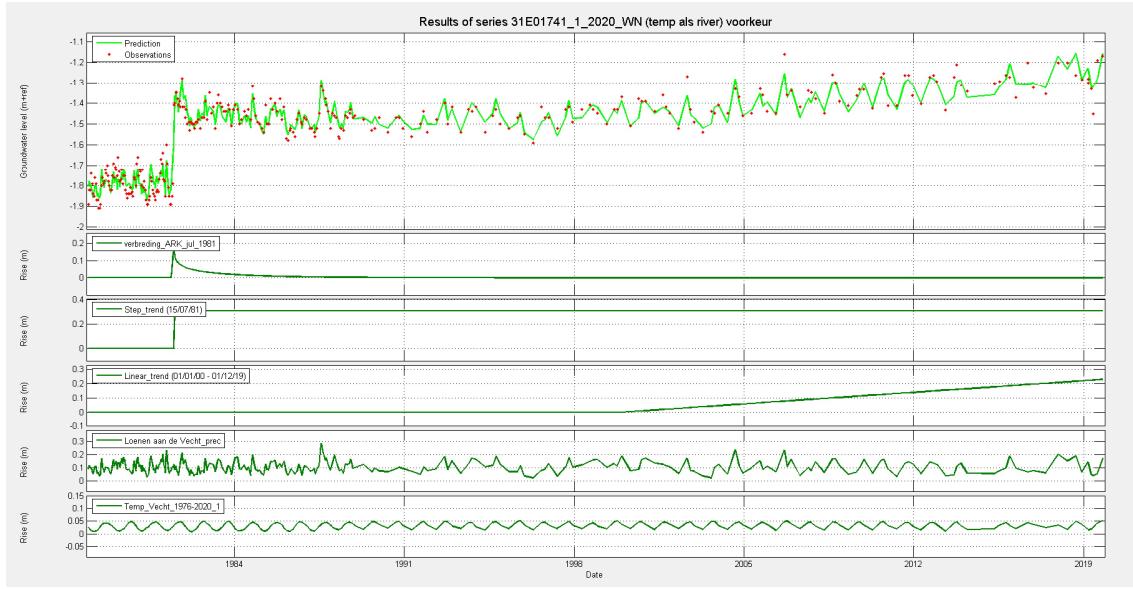
Atuocorrelatie peilbuizen 31E163



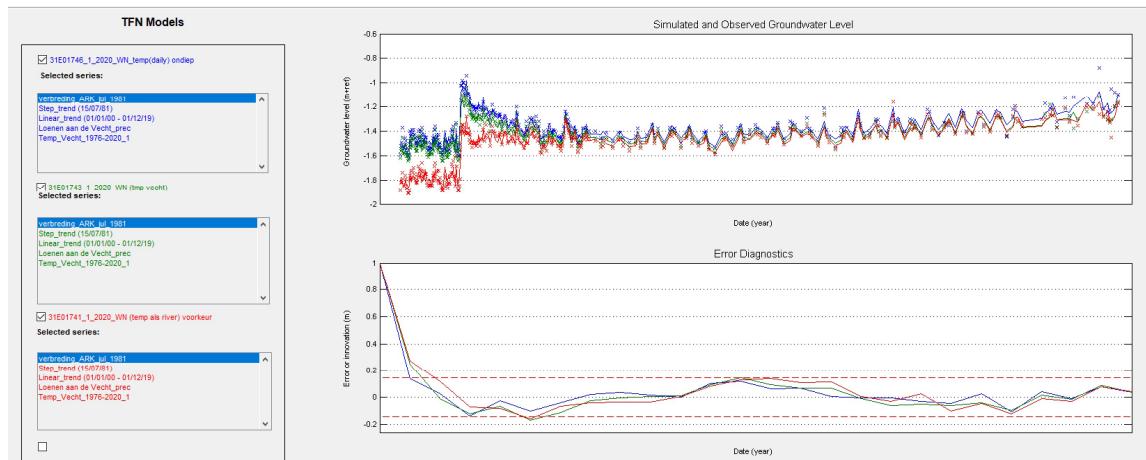
Peilbuis 31E0174_6 Waternet



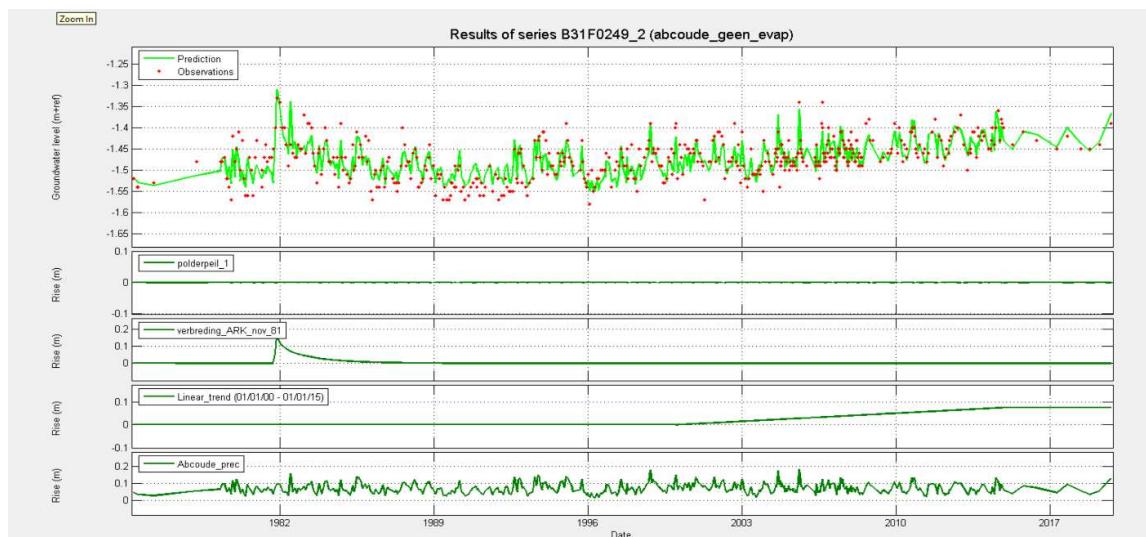
Peilbuis 31E0174_3 Waternet



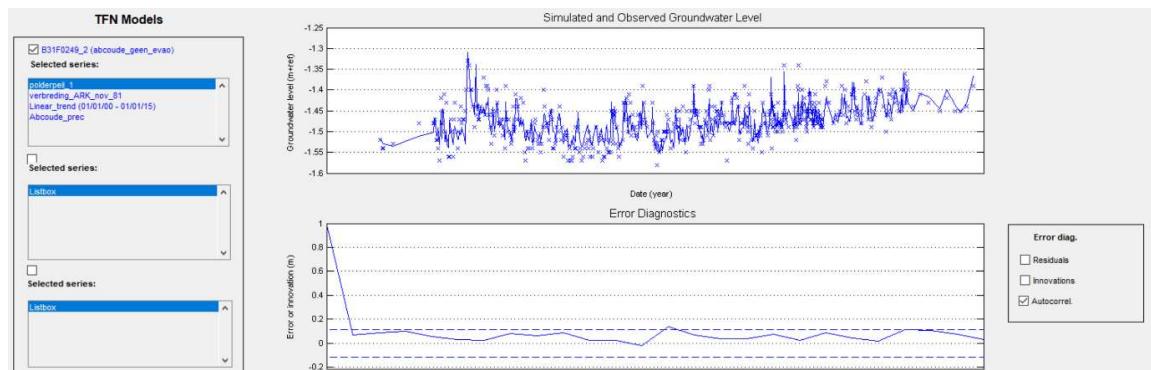
Peilbuis 31E0174_1 Waternet



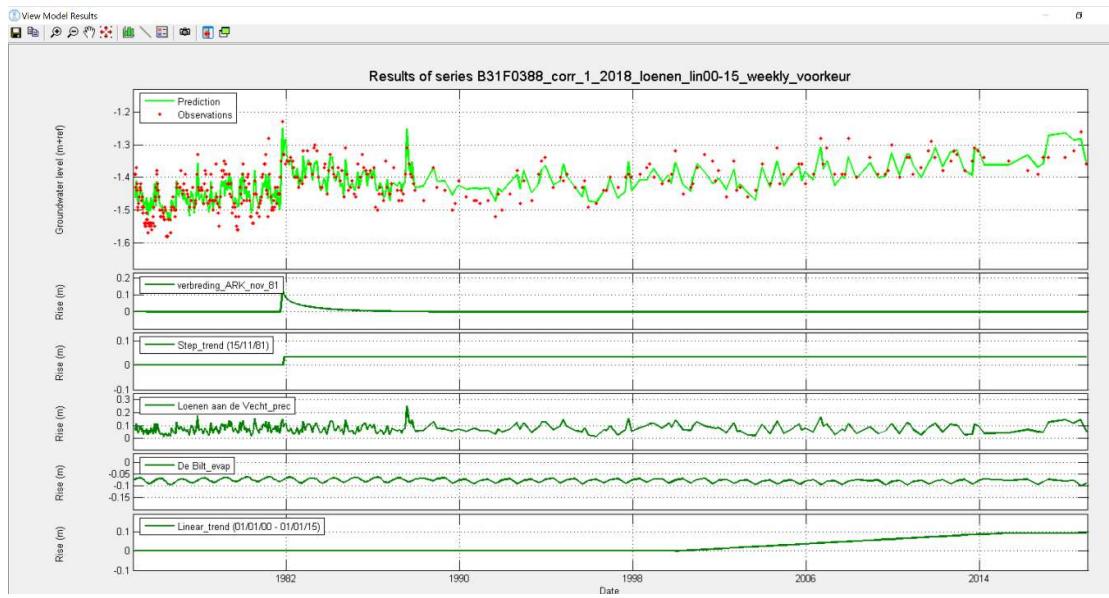
Autocorrelatie peilbuizen 31E174



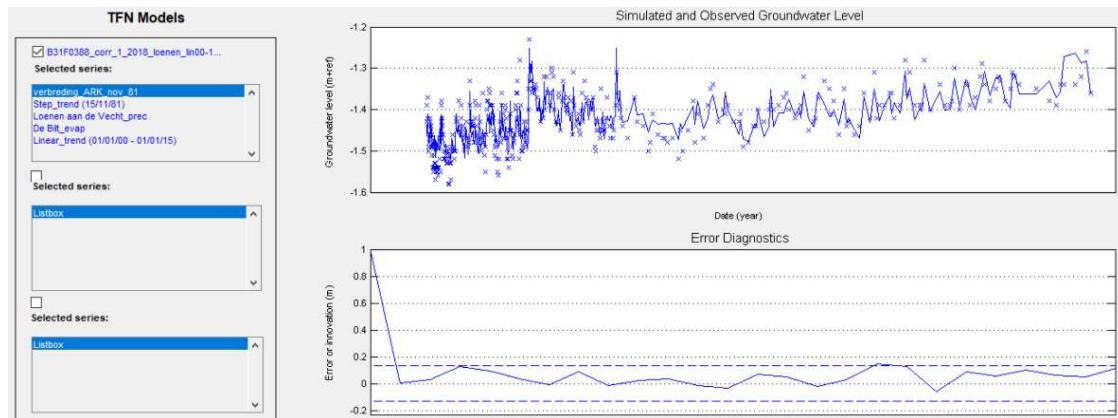
Peilbus B31F0249_2



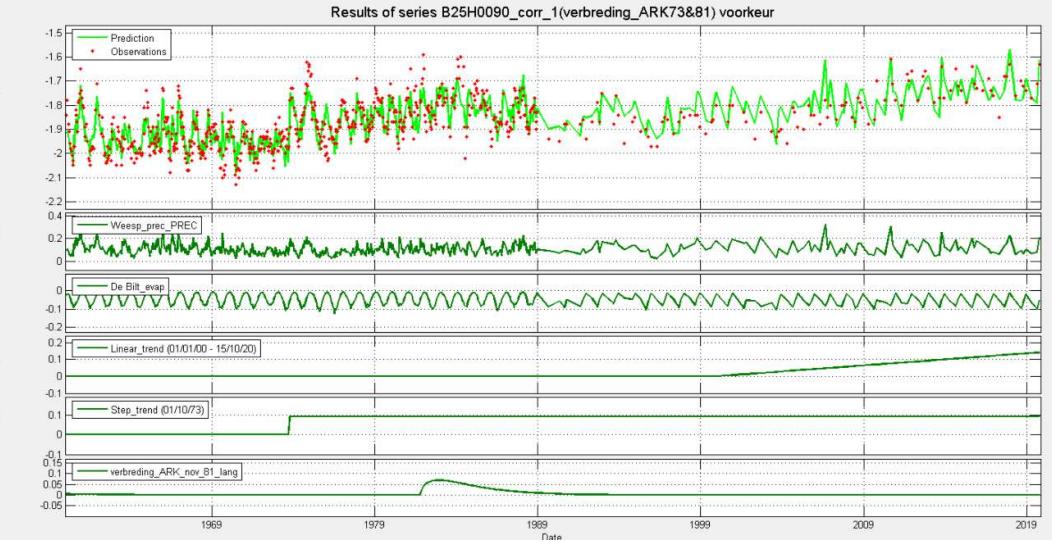
Autocorrelatie peilbus B31F0249_2



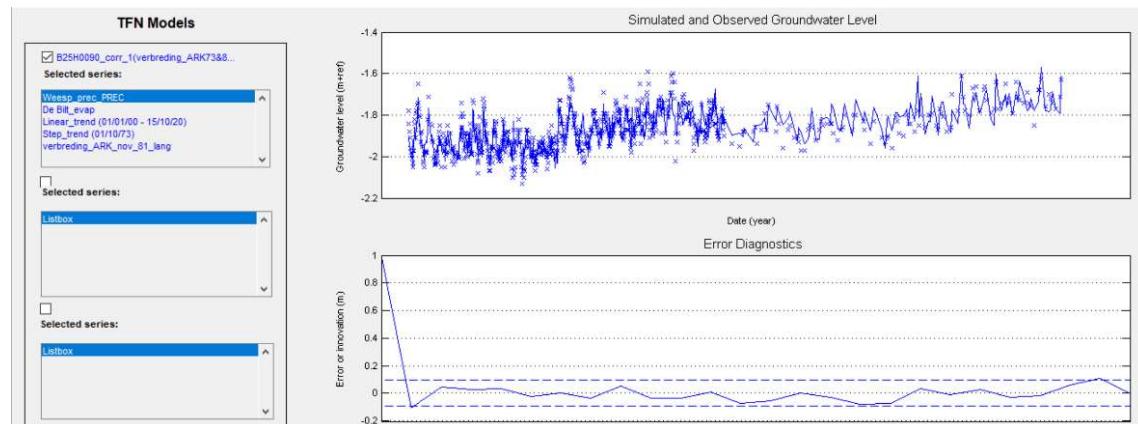
Peilbus B31F0388_1



Autocorrelatie peilbus B31F0388_1



Peilbuis B25H0090_1



Autocorrelatie Peilbuis B25H0090_1

Bijlage 5: Peilbeheer en bodemdaling

5 Peilbeheer en bodemdaling

5.1 Inleiding

In deze bijlage wordt het peilbeheer beschreven in de polders Baambrugge Oostzijds en Hoeker/- en Garstenpolder in de afgelopen 20 jaar.

5.2 Peilbeheer Baambrugge Oostzijds



Figuur B5.1: peilenkaart van Keurbesluit 1989 (links), kaart met praktijkpeilen tijdens planvorming peilbesluit 2003 (midden) en kaart peilbesluit 2003 (figuur rechts)

Gebruikte gegevens peilkaart van Keurbesluit 1989, praktijkpeilenkaart peilbesluit 2003, peilbesluit 2003 en peilregistraties uit Fews. Meest relevante peilvakken: ARK-Noord, polder midden en maalkom ARK² (figuur rechts).

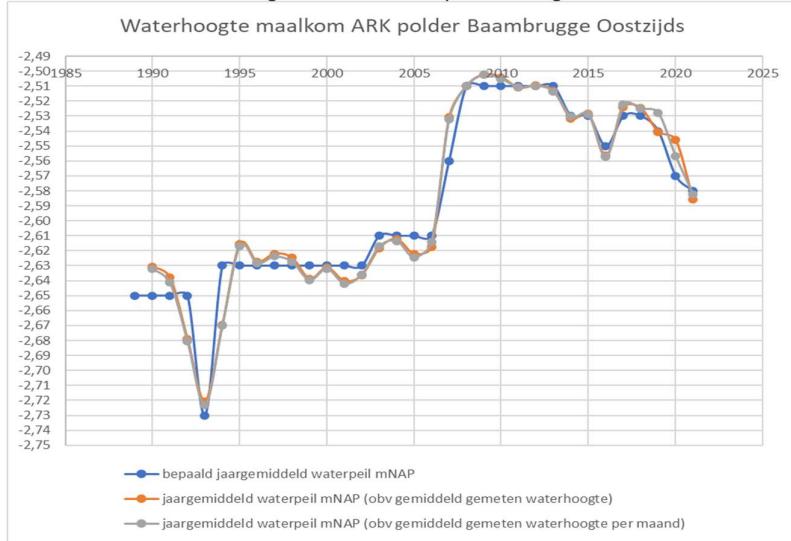
In 2002 is het planvormingstraject voor het vigerende peilbesluit voor polder Baambrugge Oostzijds gestart. Hierbij is in kaart gebracht wat de afspraken uit het voorgaande peilbesluit (keurbesluit 1989) waren, wat de praktijkpeilen in 2002 zijn en welke nieuwe peilen moeten worden vastgesteld. Bij het nemen van het peilbesluit zijn de beleidsuitgangspunten voor het nemen van een peilbesluit gebruikt. Een belangrijk criterium is een mediane drooglegging in peilvakken van 60 cm. Bij het peilbesluit (2003) zijn in sommige delen de peilen aanzienlijk aangepast (in peilgebied 10, de maalkom ARK, is het waterpeil met 16 cm verhoogd; in peilgebied 7, ARK Noord met 14 cm). Vanwege bodemdaling is in het peilbesluit een glijdend peil vastgesteld, zodat het slootpeil met de bekende maaivelddaling meebeekt: elk jaar een peilverlaging van 0,5 cm.

Om te voorkomen dat te veel peilvakken ontstaan of te veel scheeften (delen met significant hogere of lagere drooglegging) zijn peilvakken samengevoegd of gesplitst. Om de nieuwe peilen te kunnen instellen, moeten na de besluitvorming eerst inrichtingsmaatregelen worden uitgevoerd. De peilen zijn daarom pas in de jaren 2007 en 2008 ingesteld. Bij het instellen zijn iets lagere waterpeilen aangehouden omdat rekening is gehouden met de berekende maaivelddaling sinds de vaststelling van het peilbesluit.

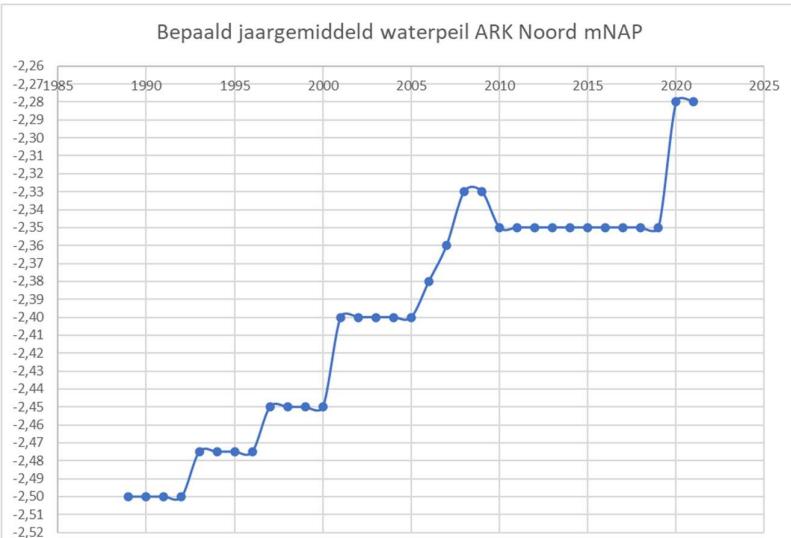
² In de praktijk zijn de peilvakken polder midden en maalkom ARK niet onderscheiden

Vanwege bodemdaling is in het peilbesluit een glijdend peil vastgesteld, zodat het slootpeil met de bekende maaivelddaling meebeweegt: elk jaar een peilverlaging van 0,5 cm.

In 2020 is de voorbereiding voor een nieuw peilbesluit gestart

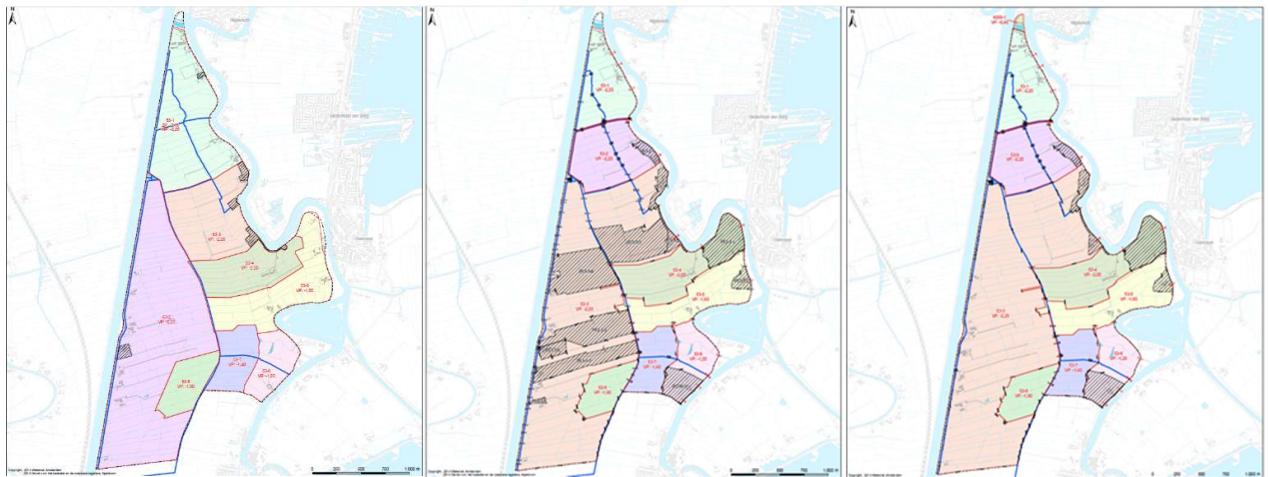


Figuur B5.2: Gemeten verloop waterhoogte maalkom ARK (BBO: peilvak 51.10)



Figuur B5.3: Gemeten verloop waterhoogte ARK Noord (BBO: peilvak 51.7)

5.3 Peilbeheer Hoeker en Garstenpolder



Figuur B5.4: peilbesluit 1996 (links), praktijkpeilen tijdens planvorming peilbesluit 2018 (midden) en peilbesluit 2018 (rechts)

Gebruikte gegevens peilkaart van peilbesluit 1996, praktijkpeilenkaart peilbesluit 2018, peilbesluit 2018 en peilregistraties uit Fews. Meest relevante peilvakken: 53-1, 53-3 en 53-9.

In 2012 is het planvormingstraject voor het vigerende peilbesluit uit 2018 voor polder Hoeker en Garsten gestart. Hierbij is in kaart gebracht wat de afspraken uit het voorgaande peilbesluit (peilbesluit 1996) waren, wat de praktijkpeilen in 2015 zijn en welke nieuwe peilen moeten worden vastgesteld. Bij het nemen van het peilbesluit zijn de beleidsuitgangspunten voor het nemen van een peilbesluit gebruikt.

Om te voorkomen dat te veel peilvakken ontstaan of te veel scheeften (delen met significant hogere of lagere drooglegging) zijn peilvakken samengevoegd of gesplitst. In peilvak 53-3 zijn een aantal peilafwijkingen/onderbemalingen (zie tabel B5.2 en figuur B5.10), hier wordt het peil lager gehouden met een vergunning; 104, 105, 106, 107 en 108. In de polder zijn de peilen de laatste 20 jaar niet of nauwelijks aangepast

Tabel B5.1: Peilverloop Hoeker en Garstenpolder in de voor welken relevante peilvakken

Peilvak (situatie 2018)	Peilbesluit 1996	Praktijkpeil 2017	Peilbesluit 2015	Praktijkpeil 2021
53-1	-2,15/-2,25 ZP/WP	-2,20 VP	-2,20 VP*	-2,10 VP
53-9	-2,15/-2,25 ZP/WP	-2,20 VP	-2,20 VP	-2,20 VP
53-3	-2,25 VP	-2,25 VP	-2,25 VP	-2,25 VP

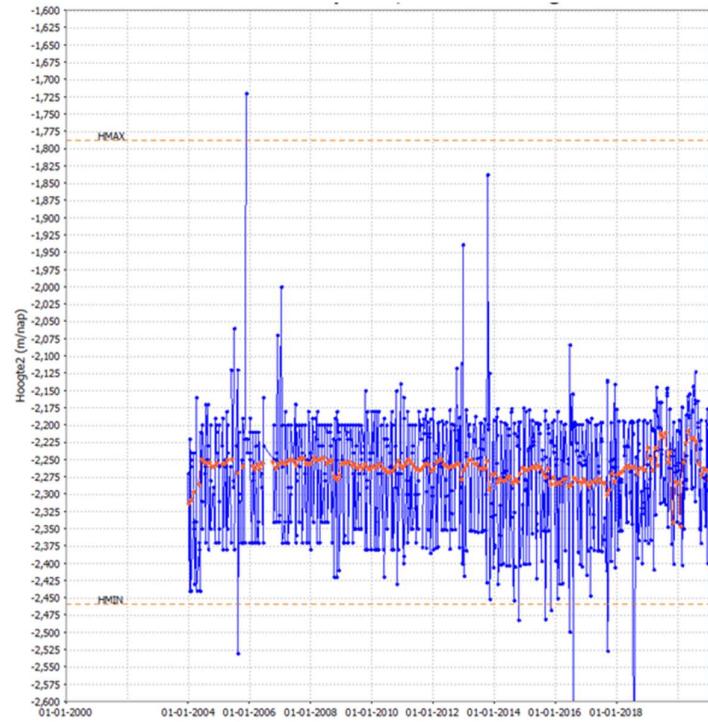
* In 2018 is voor peilgebied 53-1 partiële herziening van het peilbesluit vastgesteld. Het waterpeil is hierbij aangepast naar VP op NAP -2.10 m, conform de praktisksituatie

Tabel B5.2: Waterpeilen in peilafwijkingen (onderbemalingen)

Onderbemaling	Waterpeil	Peilverschil peilvak 53-3	
103	-2,50	-0,25	
104	-2,70	-0,45	
105	-2,55	-0,30	
106	-2,55	-0,30	
107	-2,75	-0,50	
108	-2,40	-0,15	



Figuur B5.10: Peilafwijkingen



Figuur B5.11: Peilverloop in peilvak 53-3, gemeten waterhoogte (blauw), gemiddeld gemeten waterhoogte (rood)

5.4 Peilbeheer Holland Sticht en Voorburg West en Honderd West

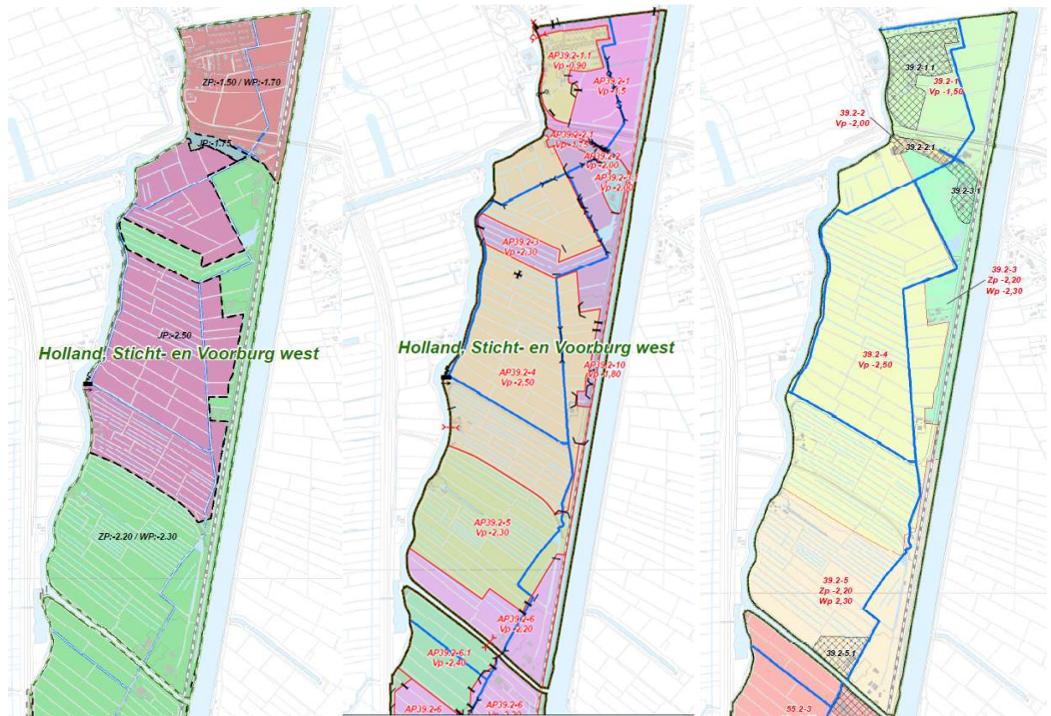
In 2008 is het planvormingstraject voor het vigerende peilbesluit uit 2011 voor polder Holland Sticht en Voorburg en polder Honderd West gestart. Hierbij is in kaart gebracht wat de afspraken uit het voorgaande peilbesluit (peilbesluit 1989) waren, wat de praktijkpeilen in 2011 zijn en welke nieuwe peilen moeten worden vastgesteld. Bij het nemen van het peilbesluit zijn de beleidsuitgangspunten voor het nemen van een peilbesluit gebruikt.

In het gebiedsplan en peilbesluit van 2012 is ook besloten de sifonverbinding tussen de polders Honderd West en Holland Sticht en Voorburg West op te heffen. Voor polder Honderd West is een nieuw gemaal gebouwd.

Tabel B5.3: Peilverloop Hoeker en Garstenpolder in de voor wellen relevante peilvakken

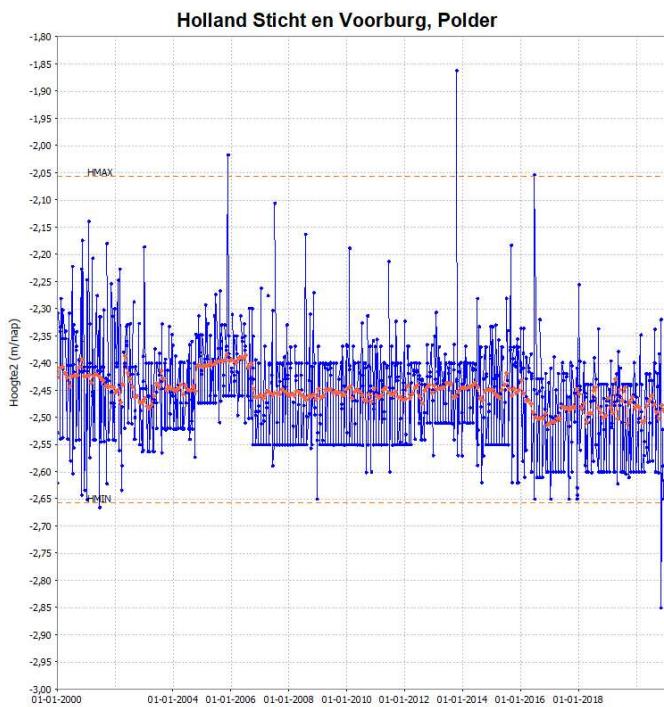
Tabel Bc. 5.7: Uitvoerbaar peilhoogte en startsporde in de voor welke relevante peilvakken				
Peilvak (situatie 2018)	Peilbesluit 1989	Praktijkpeil 2011	Peilbesluit 2011	Praktijkpeil 2021
39.2-1	-1,50/-1,70 ZP/WP	-1,50 VP	-1,50 VP	-1,50 VP
39.2-3	-2,20/-2,30 ZP/WP	-2,30 VP	-2,20/-2,30 ZP/WP	-2,20/-2,30 ZP/WP
39.2-4	-2,50 VP	-2,45 VP	-2,50 VP	-2,50 VP
39.2-5	-2,20/-2,30 ZP/WP	-2,20 VP	-2,20/-2,30 ZP/WP	-2,20/-2,30 ZP/WP

In de polder zijn de peilen niet of nauwelijks aangepast.



Figuur B5.12: peilbesluit 1989 (links), praktijkpeilen tijdens planvorming peilbesluit 2012 (midden) en peilbesluit 2012 (rechts).

Gebruikte gegevens peilkaart van peilbesluit 1989, praktijkpeilenkaart peilbesluit 2012, peilbesluit 2012 en peilregistraties uit Fews. Meest relevante peilvakken: 39.2-1, 39.2-3, 39.2-4 (bemalen peilvak) en 39.2-5.



Figuur B5.13: Peilverloop in peilvak 39.2-4, gemeten waterhoogte (blauw), gemiddeld gemeten waterhoogte (rood)

Bijlage 6: Geohydrologie en grondwatermodellering

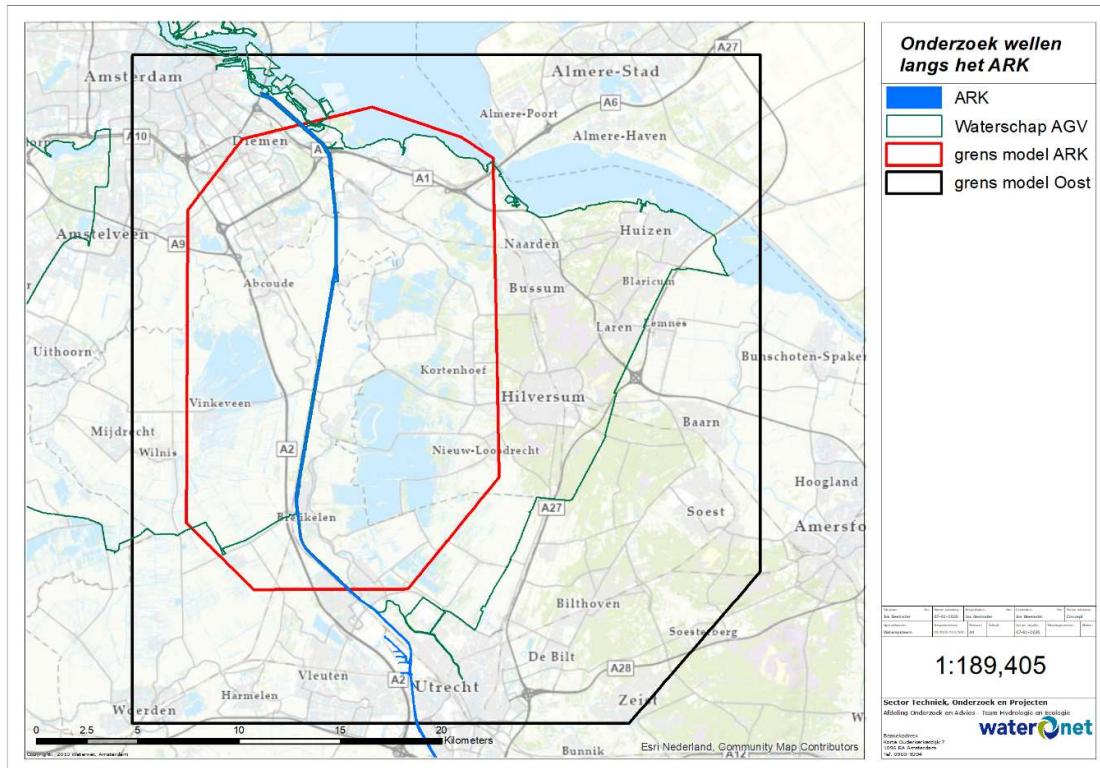
6 Geohydrologie en grondwatermodellering

6.1 Geohydrologische beschrijving onderzoeksgebied

Het onderzoek spitst zich toe op de volgende polders.

- Baambrugge Oostzijds & Lange Coupure
- Hoeker en Garstenpolder
- Holland, Sticht en Voorburg west & Het Honderd west

Figuur B6.1 toont de omvang van het modelgebied. In Figuur B6.2 is de ligging van het onderzoeksgebied met bovengenoemde polders afgebeeld. Het grondwatermodel voor het ARK is een uitsnedemodel dat is gebaseerd op een regionaal model (model Oost) van Waternet. Op de rand van het ARK-model zijn de stijghoogten overgenomen uit het regionale model en gebruikt als Neumann-randvoorwaarde (vaste stijghoogte). In het onderzoeksgebied is het rekennetwerk verdicht tot een resolutie van 15 meter.

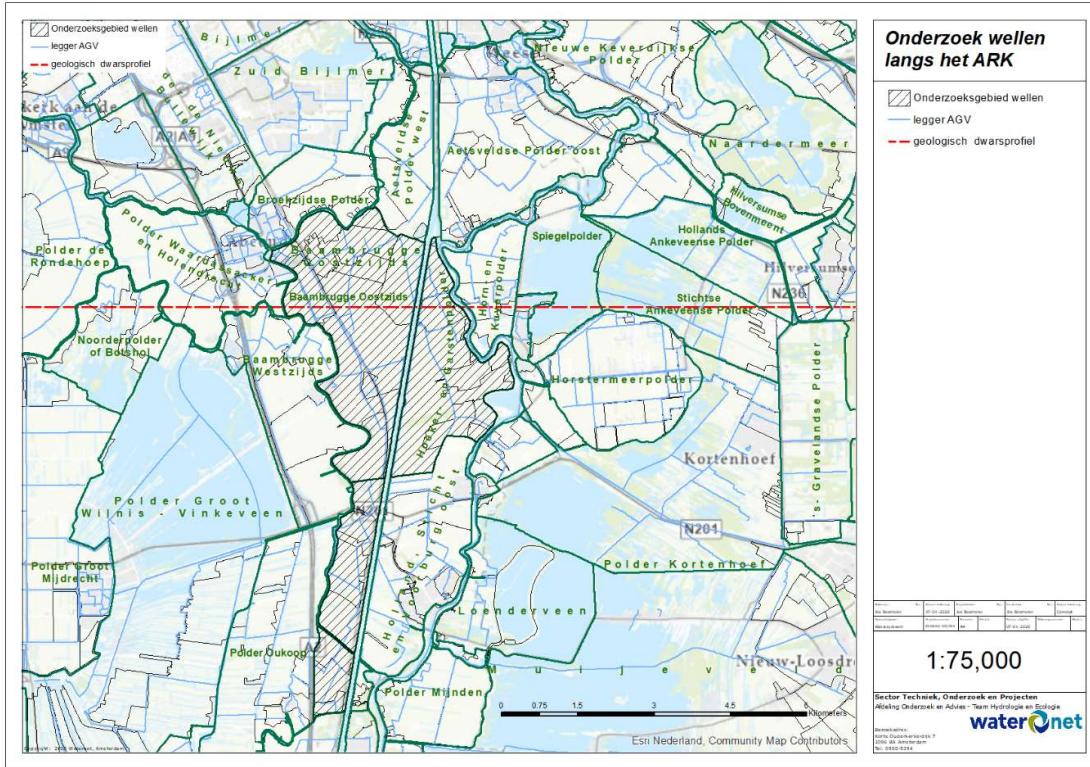


Figuur B6.1: Overzicht modelgrens model ARK (rood) t.o.v. regionaal model Oost van AGV (zwart).

6.2 Bodem, oppervlaktewater en grondwater gegevens

6.2.1 Bodem gegevens

Uit het bodemarchief van TNO (REGIS) zijn gegevens opgevraagd over de geohydrologische bodemopbouw in het modelgebied. Figuur B6.2 geeft de geohydrologische bodemopbouw volgens REGIS II.2 weer in een west-oost-dwarsdoorsnede door het onderzoeksgebied. De ligging van de dwarsdoorsnede is in dezelfde figuur weergegeven. Deze laagindeling is gebruikt als basis voor de indeling in watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen voor het grondwatermodel, zoals weergegeven in figuren B6.3 t/m B6.5. Aanvullend is gebruikgemaakt van GEOTOP v01r3 voor een indeling van de ondergrond tot een diepte van circa 30 meter. Waar GEOTOP-data beschikbaar is, is de REGIS-data vervangen.

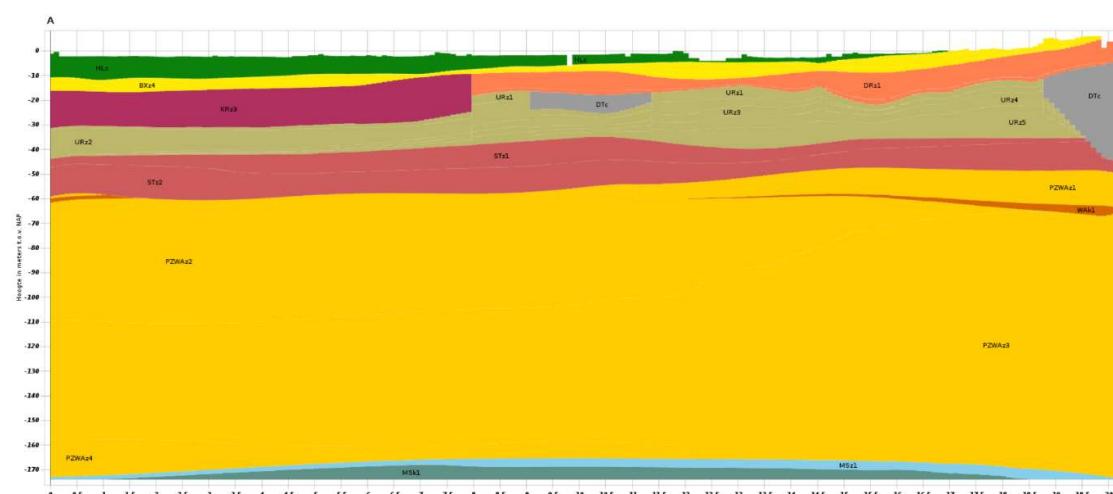


Figuur B6.2: Ligging van het onderzoeksgebied en positie van een geohydrologisch dwarsprofiel (zie Figurem B6.3, B6.4 en B6.5)

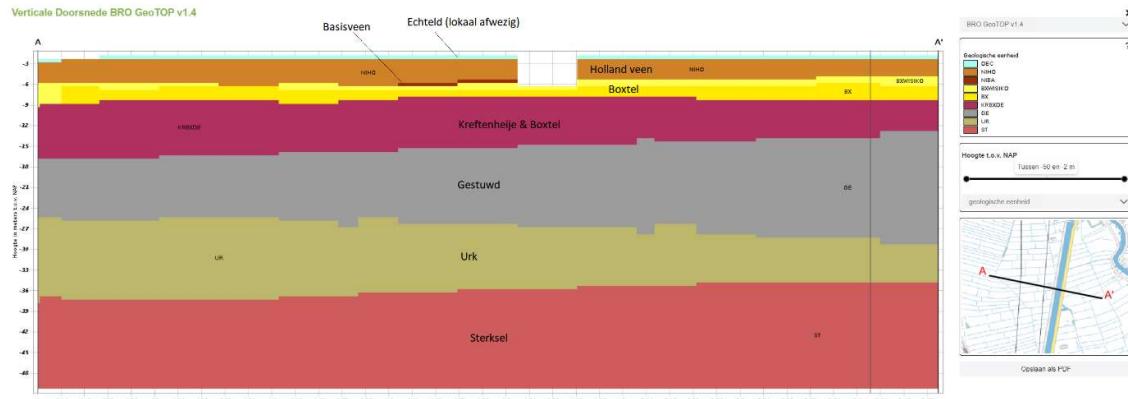
De dikte van de Formatie van Echteld boven het Hollandveen is lokaal in het onderzoeksgebied gecorrigeerd met behulp van de kleidek dikte kaart van de Bodemkaart van Nederland (1:50.000).

De laagindeling van het grondwatermodel wordt verder toegelicht in paragraaf B6.3.

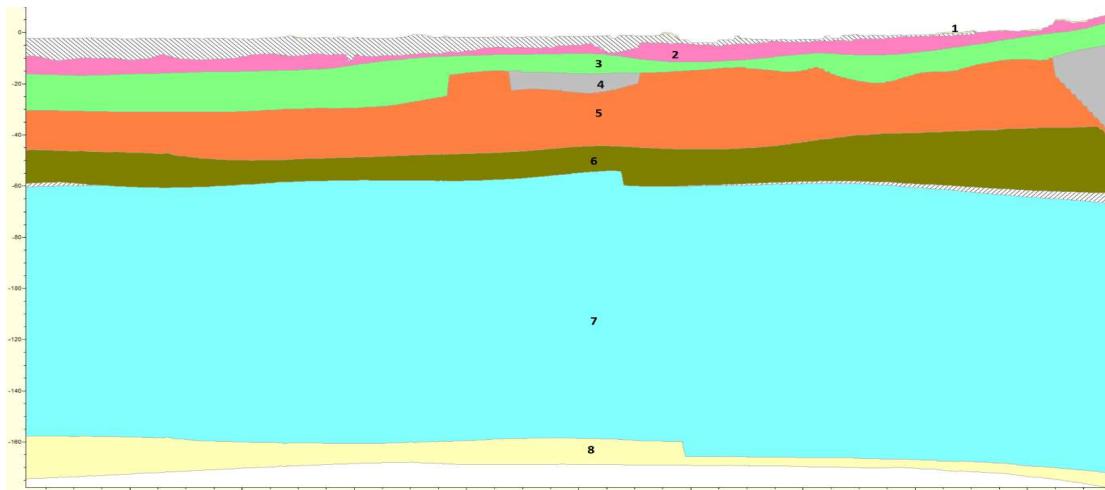
Verticale Doorsnede BRO REGIS II v2.2



Figuur B6.3: Geohydrologisch dwarsprofiel volgens REGISII v2.2 (voor ligging zie Figuur B 6.1)



Figuur B6.4: Geohydrologisch dwarsprofiel volgens Geotop v1.4 (ingezoomd nabij ARK)



Figuur B6.5: Geohydrologisch dwarsprofiel met schematisering in watervoerende en slecht doorlatende lagen. Watervoerende lagen zijn genummerd, slecht doorlatende lagen zijn gearceerd. De laagpakketten zijn nader gekarakteriseerd in tabel B6.1

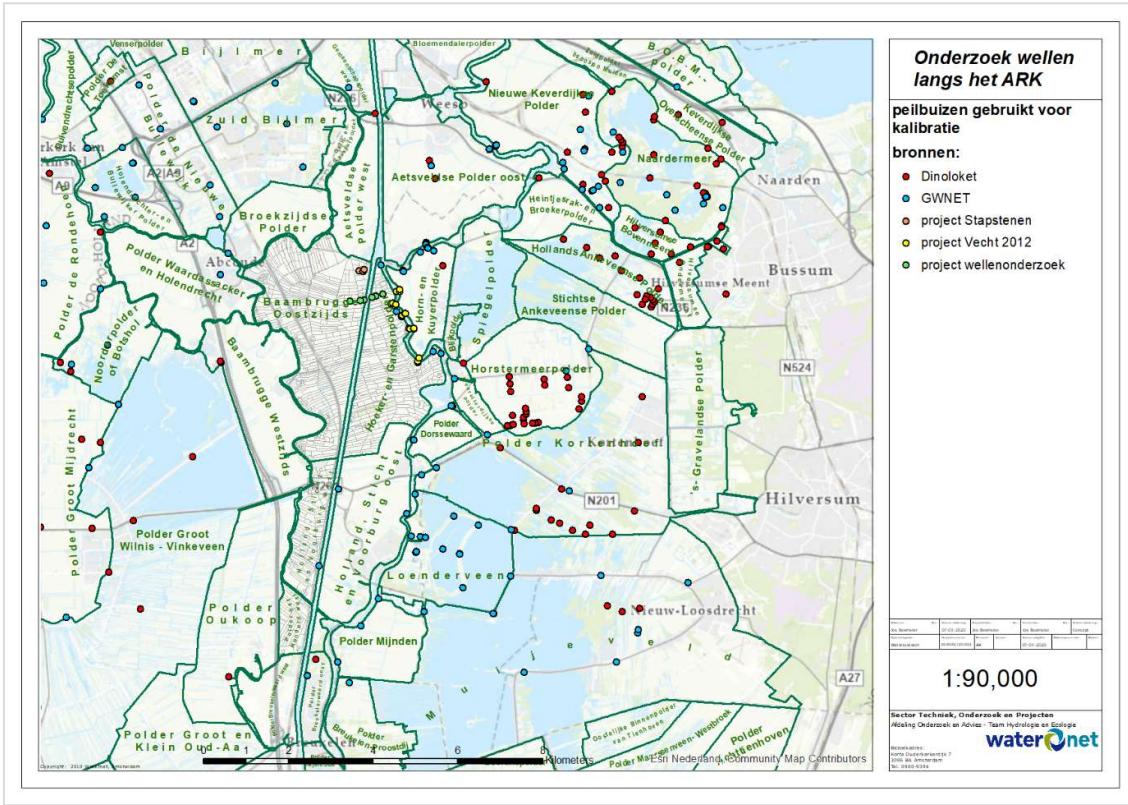
6.2.2 Oppervlaktewater- en polderpeilen

De ligging van oppervlaktewateren in het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur B6.2. De modelberekeningen worden uitgevoerd voor twee verschillende perioden, een historische situatie gebaseerd op de periode 1990-2000 en de huidige situatie gebaseerd op de periode 2015-2020. Voor de twee modelperioden zijn de toen geldende gemiddelde peilen van AGV in oppervlaktewater en polders verwerkt in het grondwatermodel. Voor flexibele peilgebieden (onder andere de Loosdrechtse Plassen) zijn in het grondwatermodel ook gemiddelde peilen ingesteld. In het Amsterdam-Rijnkanaal (RWS) en (het boezemgebied van) de Vecht geldt een vast peil van NAP -0.40 m.

In de polders rondom het Amsterdam-Rijnkanaal zijn alle detailwatergangen expliciet opgenomen. In paragraaf B6.3.4 wordt dit verder toegelicht.

6.2.3 Grondwatergegevens

Figuur B6.6 geeft de beschikbare peilbuizen weer uit de grondwaterdatabases van Waternet en TNO en van enkele projectmeetnetten in het onderzoeksgebied. De peilbuisgegevens zijn gebruikt voor kalibratie van het grondwatermodel (paragraaf 6.7). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de meetgegevens uit de periode 1990-2000 voor de historische situatie (model ARK2000) en de meetgegevens uit de periode 2015-2021 voor de huidige situatie (model ARK2020). Zodoende zijn er twee verschillende ijksets tot stand gekomen



Figuur B6.6: Peilbuizen, gebruikt voor kalibratie van het grondwatermodel

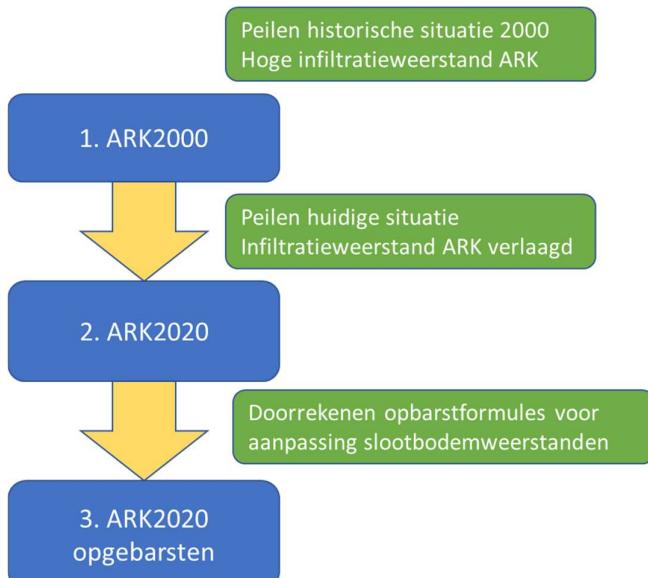
6.3 Inrichting grondwatermodel

Ten behoeve van de onderhavige studie is het ARK model verfijnd ter plaatse van het onderzoeksgebied (minimale knooppunt afstand 15 m). Voor de drie belangrijkste polders (BBO, HGP en HSV) zijn alle poldersloten expliciet als lijnelement in het model gebracht. Gezien de breedte van ARK (100 meter) is deze niet langer als lijnelement maar als vlakdekkend element ingevoerd.

6.3.1 Modelentrein

De grondwatermodellering voor het ARK bestaat uit een reeks van stappen (deelmodellen) die doorlopen worden, de zogenaamde modellentrein. Dit is schematisch weergegeven in figuur B6.7. De modelparameters van alle deelmodellen zijn gelijk, met uitzondering van de oppervlaktewaterpeilen (die zijn veranderd in de tijd), de intreeweerstand van het ARK (die is beïnvloed door erosie) en de drainageweerstand van de sloten (die is afhankelijk van het al dan niet zijn opgebarsten).

1. De modellentrein start met het model representatief voor de historische situatie tussen 1990 en 2000: het zogenaamde model ARK2000. In dit model zijn de watergangen in de polders nog niet opgebarsten, heeft het ARK nog een relatieve hoge bodemweerstand en zijn de polderpeilen ingesteld op niveaus die in de periode 2000 gevoerd werden.
2. Vervolgens worden in het model ARK2020 de polderpeilen ingesteld op hun huidige niveau en wordt de bodemweerstand van het ARK verlaagd. Dit leidt tot een verhoging van de stijghoogte in de polders rondom het ARK.
3. In het model ARK2020-opgebarsten worden de bodemweerstanden van de poldersloten vervolgens verlaagd om het effect van wellen/opbarsten te simuleren. Op basis van de stijghoogten berekend in de voorgaande stap wordt het opbarstrisico in de watergangen berekend. Op plaatsen van een verhoogd risico wordt een verlaagde drainageweerstand in de watergangen ingevoerd. Dit leidt tot het model van de huidige situatie.



Figuur B6.7: Gevolgde modellentrein voor het project.

6.3.2 Schematisering bodemopbouw

In een grondwatermodel wordt de ondergrond geschematiseerd tot een systeem van goed doorlatende watervoerende (zand)lagen, die van elkaar worden gescheiden door slecht doorlatende klei- en/of veenlagen. In tabel B6.1 is de regionale bodemopbouw volgens REGIS II.2/GEOTOP v1.3 geschematiseerd tot een systeem met acht watervoerende pakketten (wvp's) en zeven slecht doorlatende lagen (sdl's), conform de dwarsdoorsnede in Figuur B6.5. In deze tabel zijn ook de horizontale doorlatendheid (k-waarde) en de verticale weerstand (c-waarde) van de pakketten vermeld, zoals die na kalibratie zijn bepaald (paragraaf B6.7).

De vermelde dieptelijging van de pakketten in tabel B6.1 komt globaal overeen met de plaats waar het dwarsprofiel (Figuur B6.2) het ARK kruist. Het watervoerende pakket 1 betreft antropogeen ophoogzand in stedelijk gebied. In het landelijk gebied (o.a. de polders langs het ARK) betreft het de horizontale doorlatendheid van het afdekkende Holocene pakket.

Uit de kalibratie (zie ook paragraaf B6.7) blijkt dat de scheidende lagen 5 (Sterksel klei 1) en 6 (Waalre klei 1+2 en Peize klei 1) een relatief lage weerstand hebben. Voor het gehele modelgebied geldt dat deze lagen weinig aaneengesloten voorkomen. De eerste slecht doorlatende laag is de holocene deklaag. In het project gebied is de tweede en derde scheidende laag afwezig. Alle lagen zijn in horizontale richting homogeen en isotroop (de doorlatendheid is in alle richtingen even groot) verondersteld, ook het gestuwde pakket. Voor het fijnzandige en gelaagde tweede watervoerende pakket (Boxtel zand) is een verticale anisotropiefactor van 3 aangenomen. Op de onderzoeklocatie levert dit een extra verticale weerstand van ($3 \times \text{Dikte-wvp2}/k$ -waarde) circa 2-5 dagen (afhankelijk van de dikte van de Boxtel zanden).

Tabel B6.1: Geohydrologische bodemopbouw en parametrisatie

Diepte t.o.v. NAP	Modelpakket*	Code Water- net	REGIS II v2.2/Geotop v1.3 pakketten	K-waarde (m/dag)	C-waarde (dagen/m)
0- -2	wvp1		Ophooglaag in stedelijk gebied of dummy laag voor horizontale stroming in deklaag	0.2	-
-2- -5	sdl 1 (deklaag)	B	laagpakket Walcheren+ Hollandveen+ laagpakket Wormer+ Echteld+ laag van Velsen+ Basisveen	-	Walcheren:250 Hollandveen:20-100 Echteld:25-50 Wormer:1500 Velsen+Basisv:5000
5- -7.5	wvp 2	C	Boxtel zand 2+3+4	2	3*D/k
	sdl 2		Eem+ Boxtel+ Kreftenheije klei (lokaal afwezig)	-	200
-7.5--17	wvp 3	D	Kreftenheije zand 2 Eem zand 1+2+3 Drente zand 1+2+3	50	-
	sdl 3		Gieten+ Uitdam klei (lokaal afwezig)	-	50
-17- -27	wvp 4	E	gestuwde pakket	50	-
	sdl 4		(virtuele modellaag)	-	1
-27- -45	wvp 5	F	Urk zand 1+2+3+4+5 Sterksel zand 1	50	-
	sdl 5		Sterksel klei 1	-	25
-45- -55	wvp 6		Sterksel zand 2 Appelscha zand 1 Peize/Waalre zand 1	37.5	-
	sdl 6		Waalre klei 1+2 + Peize klei 1	-	6
-55- -160	wvp7		Peize/Waalre zand 2 + 3	37.5	
	sdl 7		Waalre klei 3	-	75
-160- -170	Wvp8		Peize/Waalre zand 4 Peize complex Maassluis zand 1	25	

* sdl = slecht doorlatende laag, wvp = watervoerend pakket

6.3.3 Neerslag en verdamping

De grondwateraanvulling wordt gedefinieerd als het neerslagoverschot. Het neerslagoverschot is de neerslag minus de actuele verdamping. De neerslaggegevens zijn afkomstig van het KNMI voor diverse neerslagstations (zie tabel B6.2). De verdampingsgegevens (referentieverdamping volgens Makkink) zijn afkomstig van de meteostations Schiphol en de Bilt. De neerslag- en de verdampingsgegevens van de weerstations zijn ruimtelijk geïnterpoleerd met behulp van het Triwaco4-grondwaterinstrumentarium.

Voor het stationaire grondwatermodel is een gemiddeld neerslagoverschot berekend over de periode 2010-2018.

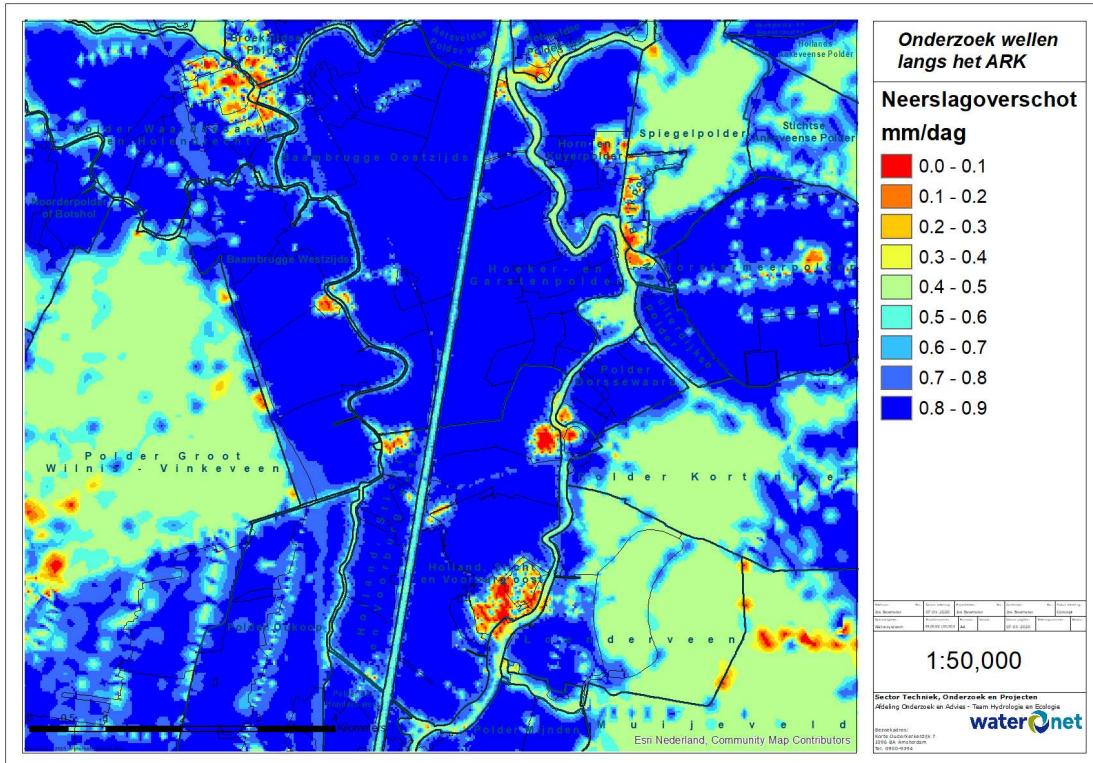
De ruimtelijke verdeling van de oppervlakten stedelijk verhard en onverhard gebied, open water, landbouwgronden en bos in het onderzoeksgebied die in het model wordt toegepast is gebaseerd op de landgebruikskaart van Nederland. De actuele verdamping in het modelgebied wordt bepaald met gewasfactoren die gekoppeld zijn aan de landgebruikstypen. (tabel B6.3). De resulterende grondwateraanvulling is weergegeven in Figuur B6.8. In het projectgebied is dit gemiddeld circa 0.85 mm/d.

Tabel B6.2: Neerslag- en verdampingsstations

Nr.	Naam
223	Schellingwoude
233	Zaandam (Hembrug)
240	Schiphol
367	Oostvaardersdiep
438	Hoofddorp
441	Amsterdam
458	Aalsmeer
470	Zegveld
548	Loenen aan de Vecht
572	Abcoude
593	Laren

Tabel B6.3: Gemiddelde gewasfactoren behorend bij Makkink referentieverdamping (STOWA, 2009)

Gewas	Gemiddelde gewasfactor
Gras	1,0
Mais	0,4
Aardappelen	0,3
Overig	0,4
Loofbos	1
Naaldbos	1,1
Overig bos	1
Water	1,3
Bebouwing	0,3



Figuur B6.8. Grondwaternaavulling (mm/dag)

6.3.4 Topsysteem

In het grondwatermodel is voor het topsysteem onderscheid gemaakt tussen lijnelementen en vlakdekkende systemen.

Als lijnelement zijn ingebracht:

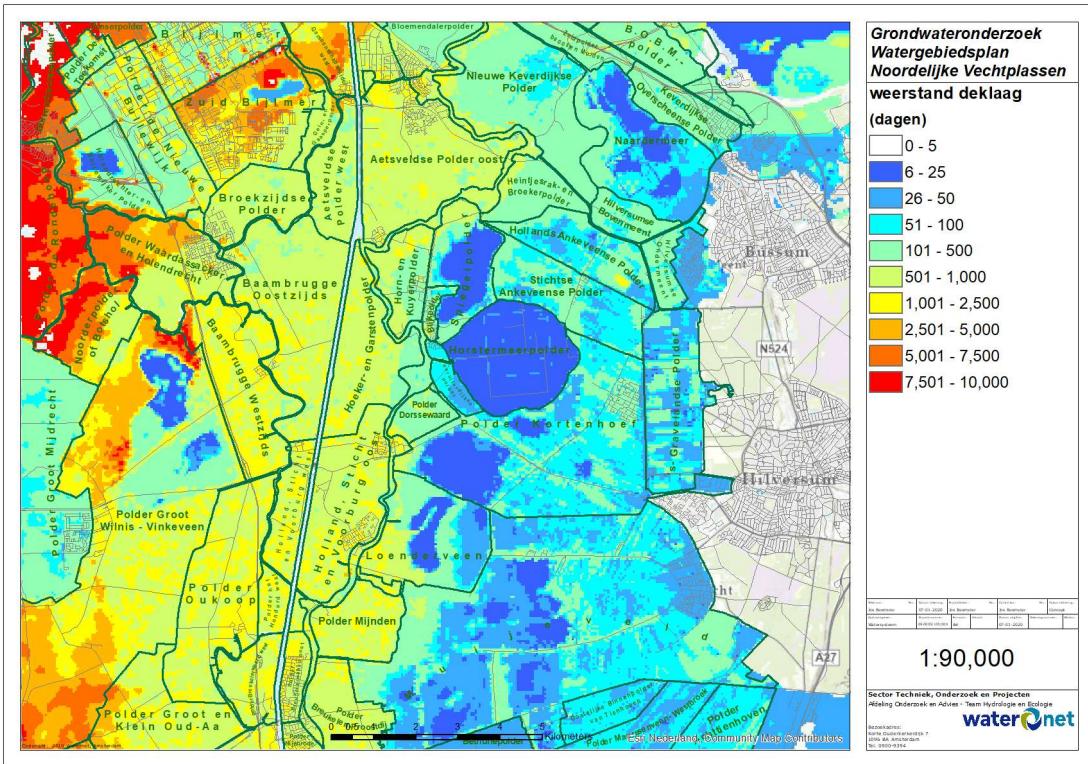
- De grotere oppervlaktewateren (plassen en de Vecht), met breedtes, dieptes en peilen.
- De Legger van het AGV met ingemeten breedtes en dieptes.
- Alle detailwatergangen in de polders rondom het Amsterdam-Rijnkanaal. Deze zijn gebaseerd op de top10NL en is vervolgens nog aangevuld gegevens afgeleid van de luchtfoto's. Er is voor deze watergangen een uniforme breedte aangenomen van 2,5 meter. Dit is gebaseerd op basis van GIS-metingen met luchtfoto's en het AHN4 en representatief voor het grootste deel van de sloten in het gebied. De diepte van de sloten is ingeschatt op basis van ervaringen van de AGV-gediebsbeheerders op 50 cm.

Er zijn drainage- en infiltratieweerstanden aan de watergangen toegekend. De drainage- en infiltratieweerstand van de waterlopen wordt bepaald door de hoeveelheid slib op de bodem en de deklaagweerstand onder de waterbodem. Uitgaande van regelmatig onderhoud, is de hoeveelheid bodemslib beperkt. Deze weerstand is opgenomen in modellaag 1. Aan de meeste watergangen is in modellaag 1 een drainageweerstand van 5 dagen toegekend en voor de infiltratieweerstand is 10 dagen aangehouden.

Van groter belang voor de bodemweerstand van waterlopen is de mate waarin deze zijn ingesneden in het holocene pakket. Deze weerstand is opgenomen in modellaag 2. De waterdiepte en de basis van het holocene pakket zijn bekend in het model. De restweerstand van het holocene pakket onder de grote waterlopen is bepaald door de deklaagweerstand (zie figuur B6.9) recht evenredig te verminderen met de mate van doorsnijding. In het geval van opbarsten van waterbodems wordt deze weerstand verlaagd, zie voor een verdere uitleg van de vertaling van opbarsten in de waterbodems paragraaf 6.4.

Het Amsterdam-Rijnkanaal is vlakdekkend ingebracht:

- Het kanaal heeft een breedte van ca. 100 meter. Aangezien de resolutie van het rekennetwerk in het interessegebied verdicht is naar 15 meter, volstaat het niet om zo'n brede watergang te modelleren als lijnelement. Er is immers een stijghoogte gradiënt tussen de teensloot langs de dijk en het kanaal. Zou het kanaal als lijn (centraal in het kanaal) worden gemodelleerd dan loopt deze onvoldoende stijl. Waardoor de stijghoogte en kweldruk in de teensloten te laag worden gemodelleerd. In werkelijkheid zal de stijghoogte namelijk onder de gehele bodem van het kanaal min of meer gelijk zijn en pas verlopen naar een lager niveau vanaf de kade. Door het kanaal als vlak te modelleren wordt conceptueel recht gedaan aan de werkelijkheid.
- Specifiek voor het Amsterdam-Rijnkanaal is voor de bepaling van de bodemdiepte in het model gebruik gemaakt van bathymetrische data uit 2017 afkomstig van Rijkswaterstaat. De diepteliggig is per rekenknoop vergeleken met de hoogteliggig van de deklaag. De deklaagweerstand (sdl-1) is vervolgens verminderd naar mate van de doorsnijding. Voor een groot deel van het kanaal blijkt dat er nu geen of weinig deklaagweerstand meer aanwezig is onder de kanaalbodem (zie figuur 3.2 in het hoofdrapport).
- De weerstandbiedende sliblaag op de bodem van het Amsterdam-Rijnkanaal is ingebracht als vlakparameter met een infiltratieweerstand van 60 dagen in de situatie 2000. Voor de huidige situatie is de infiltratieweerstand 2.5 dag. Deze waarden zijn bijgesteld op basis van de gevoeligheidsanalyse (bijlage 7).



Figuur B6.9: Deklaagweerstand (in dagen)

Buiten het interessegebied zijn de kleinere oppervlaktewateren (poldersloten) verdisconteerd in een diffuse drainageweerstand die op peilniveau is afgeleid. Hierbij is de vuistregel gehanteerd dat de drainageweerstand gelijk is aan de gemiddelde slootafstand binnen het peilvak. De infiltratieweerstand is een factor 5 groter genomen. Deze factor is door kalibratie op waterbalansen van afvoergebieden afgeleid. De vlakdekende peilen zijn gelijk genomen aan de in de gebieden geldende gemiddelde polderpeilen.

6.3.5 Onttrekkingsgegevens

Gegevens met betrekking tot grondwateronttrekkingen zijn opgevraagd bij provincie Noord-Holland, PWN, Vitens en Waternet. Alle winningen met een gemiddeld debiet (periode 2010-2018) groter dan 5000 m³/jaar zijn in het grondwatermodel opgenomen.

6.4 Formularium opbarstrisico van watergangen

In situaties met een sterke kweldruk kan de bodem van watergangen opbarsten, waardoor wellen ontstaan. In dergelijke watergangen is de kweldruk dermate hoog dat het resterende deel van de holocene deklaag breekt en het kwelwater versneld wordt afgevoerd. In extreme gevallen kunnen delen van percelen met een relatief lichte deklaag (grotendeels samengesteld uit veen) opdrijven. Lokaal breekt in dergelijke percelen het water door naar het maaiveld, waar natte plekken ontstaan die onbegaanbaar worden voor landbouwvoertuigen en vee.

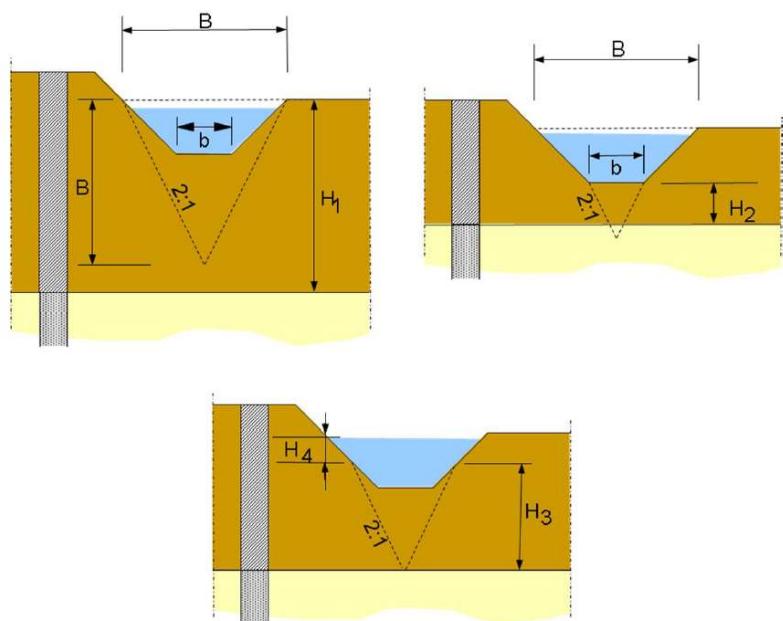
Opbarsten van waterbodems heeft een groot effect op de weerstand van het holocene pakket tegen kwelstroming onder deze watergangen. Op plaatsen waar opbarsting plaatsvindt, zal daarom de deklaagweerstand in het model moeten worden aangepast. In onderstaand kader is het gebruikte formularium weergegeven om het opbarstrisico van watergangen te berekenen.

Invloed van sloten en watergangen

(overgenomen uit: Technisch rapport Macrostabilliteit. (Deltares, 2013)).

Als in de stabilitetszone plaatselijk een duidelijk minder dik afdekkend pakket aanwezig is, bijvoorbeeld ter plaatse van een watergang (dijk- en bermsloten), kan de veiligheid tegen opbarsten hier ter plaatse lager zijn. In Figuur 5.1 is aangegeven hoe ter bepaling van de opdrukveiligheid kan worden gerekend met de gewichtsvermindering van de ondoorlatende laag onder de sloot uitgaande van een spreiding van 2:1.

- Bij een dikte van de samendrukbare laag groter dan B (= slootbreedte op maaiveldniveau) wordt geen reductie meer toegepast; de in rekening te brengen maximale waterspanning tegen de onderkant van de samendrukbare laag is dan gelijk aan het volumegewicht van de samendrukbare laag vermenigvuldigd met de hoogte H_1 .
- Bij een dikte van de samendrukbare laag onder de sloot kleiner dan b (= de slootbodembreedte) is de in rekening te brengen maximale waterspanning tegen de onderkant van de samendrukbare laag gelijk aan het volumegewicht van de samendrukbare laag onder de slootbodem vermenigvuldigd met de dikte H_2 , vermeerderd met de het volumegewicht van water vermenigvuldigd met de minimale waterdiepte in de sloot.
- Bij een dikte van de samendrukbare laag onder de slootbodem kleiner dan B , maar groter dan b is de in rekening te brengen maximale waterspanning tegen de onderkant van de samendrukbare laag gelijk aan het volumegewicht over de hoogte H_3 , vermenigvuldigd met de hoogte H_3 , vermeerderd met het volumegewicht van water vermenigvuldigd met de minimale waterhoogte H_4 boven H_3 in de sloot.



Figuur B6.10: Toelichting berekening opbarstrisico watergangen (uit: Technisch rapport Macrostabilliteit, Deltares 2013)

6.5 Toepassing opbarstformularium in grondwatermodel

In het grondwatermodel is het effect van opbarsten in de hoofdwatertgangen op de grondwaterstroming in enkele opeenvolgende stappen uitgerekend:

1. In de eerste stap wordt het "standaard" grondwatermodel doorgerekend, zonder te corrigeren voor opbarsten. Hiermee wordt de benodigde waterspanning bepaald voor het 1^e watervoerende pakket.
2. In de volgende stap wordt met het formularium uit voorgaande paragraaf vastgesteld waar de hoofdwatertgangen kunnen opbarsten. Hiervoor worden een aantal uitgangspunten gehanteerd bij het bepalen van het opbarstrisico. De neerwaartse druk hangt af van:
 - De dikte en samenstelling van de deklaag (gebaseerd op GeoTOPv1.3) en lokaal gecorrigeerd voor de kleidekdikte op basis van de Bodemkaart van Nederland (1:50.000).
 - De mate vaninsnijding van de sloten (dit geeft een reductie van het gewicht van de deklaag). Dit is bepaald op basis van een vergelijking met de slootdiepte en het peil (= het slootbodemniveau) en de onderkant van de deklaag. Resultante is de resterende deklaagdikte.
 - De waterdiepte in de sloot. De waterlaag geeft een extra gewicht.
 - De soortelijke gewichten die worden toegekend aan de verschillende GeoTOP formaties. Zie tabel B6.4 voor de onderscheiden grondsoorten/formaties.

Hantering van bovenstaande uitgangspunten leidt tot uiteindelijk tot een kaartbeeld van het opbarstrisico voor sloten en watertgangen, zoals is weergegeven in Figuur B6.11.

3. In de laatste stap wordt op plaatsen met groot risico de weerstand van de deklaag onder de watertgangen verlaagd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in 3 klassen, zie tabel B6.5. Deze klasseindeling is gekozen op basis van handmatige modelkalibratie en verder bijgesteld op basis van de gevoeligheidsanalyse (bijlage 7). De gevoeligheid van deze modelparameter is groot (zie bijlage B7.3.3.12) wat betekent dat de onzekerheidsbandbreedte rondom de parameter klein is. Hoewel de onzekerheid van deze weerstandswaarde op het schaalniveau van hele watertgangen beperkt is, kan deze lokaal afwijken. Door de heterogeniteit van de deklaagsamenstelling en de globale slootdimensionering is het niet mogelijk de exacte locatie van de individuele wellen met het grondwatermodel te voorspellen. In de praktijk betekent dit dat ter plaatse van de daadwerkelijke slootwellen in het veld de deklaagweerstand lager zal zijn en op plekken die niet zijn opgebarsten juist hoger.

Tabel B6.4: Soortelijke gewichten grondsoorten in opbarstberekeningen

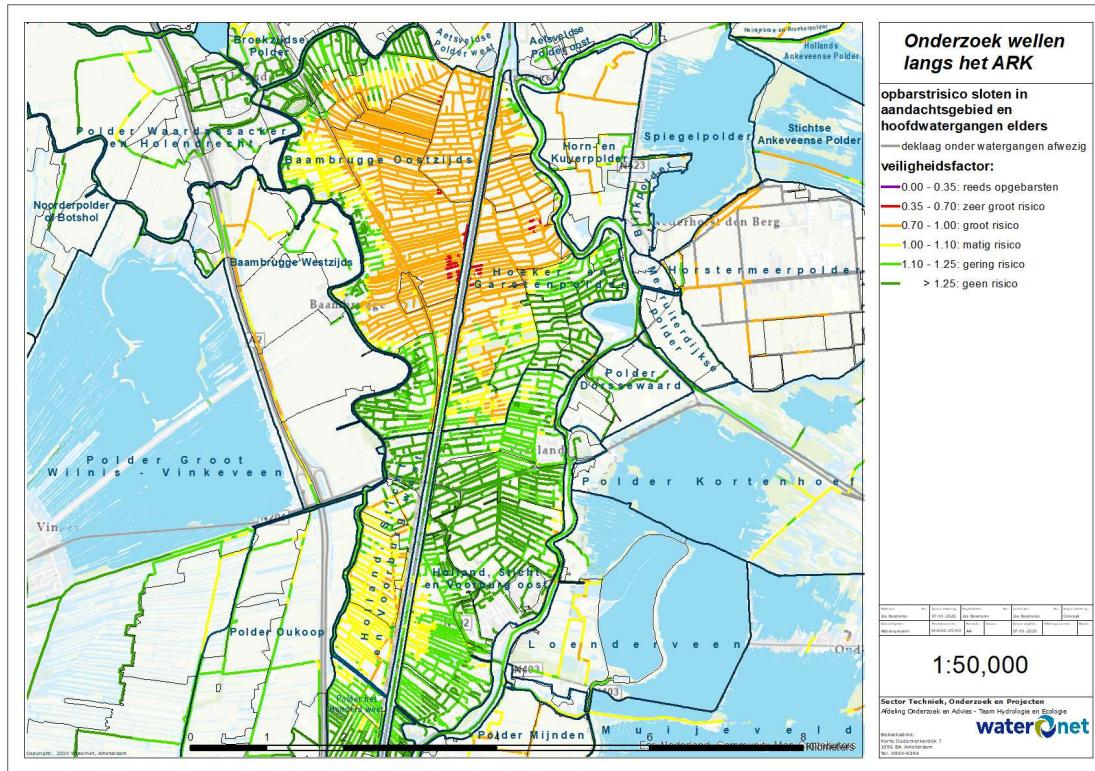
Grondsoort	Soortelijk gewicht (kg/l)
Ophooglaag stedelijk gebied	1.90
Kleiige afzettingen Formatie van Echteld	1.40
Hollandveen (Formatie van Naaldwijk)	0.98 in BBO en HGP ¹⁾ 1.05 elders in het gebied
Wormer klei (Formatie van Naaldwijk)	1.40
Basisveen (Formatie van Naaldwijk)	1.10

¹⁾Voor BBO en HGP zijn de gemiddelde dichthesen in het veld bepaald op basis van 6 boringen en 38 grondmonsters (zie bijlage 8)

Tabel B6.5: veiligheidsfactoren en afgeleide weerstand van de deklaag onder watertgangen

Veiligheidsfactor	Weerstand deklaag (dagen)
< 0.35	1
= 0.35 en < 0.70	6
= 0.70 en < 1.00	12.5

Zoals te zien in Figuur B6.11 hebben de sloten in de polders rondom het Amsterdam-Rijnkanaal grotendeels een veiligheidsfactor tussen de 0.70 en 1.00, waardoor de meeste sloten hier een weerstand krijgen van 10 dagen. Meer naar de randen van de polders wordt de druk lager waardoor het opbarstrisico hier lager is. In de BBO en de HGP zijn de grootste opbarstrisico's aanwezig. Dit is enerzijds het gevolg van een dunne/ontbrekende kleiige toplaag en anderzijds van de grote mate van doorsnijding van het ARK in het holocene pakket, waardoor de stijghoogtes onder deze polders het hoogst zijn.



Figuur B6.11: opbarstrisico's in huidige situatie voor alle watergangen in het onderzoeksgebied en hoofdwatergangen van AGV elders

6.6 Proces grondwatermodellering

Tijdens het grondwatermodelleringsproces zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Opzet verfijnd deelmodel ARK

Het deelmodel ARK (ligging beschreven in paragraaf B6.1) is gebaseerd op het overkoepelende regionale AGV model Oost. Het model Oost is al verregaand gekalibreerd over een periode van jaren ten behoeve van diverse watergebiedsplannen op polderniveau binnen AGV en recentelijk ten behoeve van deze ARK studie. Deze kalibraties zijn handmatig uitgevoerd op basis van beschikbare gemeten stijghoogten én waterbalansen van polders op basis van gemaalregistraties.

Het rekennetwerk van het deelmodel ARK is ten opzichte van het regionale model Oost en de voorgaande modellering aan het ARK verder verfijnd in de omgeving van het ARK. Hierdoor kunnen de sterke stijghoogte gradiënten nauwkeuriger worden uitgerekend. Daarnaast zijn alle individuele poldersloten in het model ingebracht als lijnelementen om zodoende het proces van opbarsten op slootniveau in te kunnen brengen in plaats van op peilvaktijniveau. Tot slot is het ARK in het deelmodel geschematiseerd met de werkelijke doorstroomde breedte en diepte en dus niet langer als lijnelement. Hierdoor kon de doorsnijding van het ARK door de holocene deklaag beter in het model worden verwerkt. Daarbij is het effect van de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket nu beter verdeeld over de gehele breedte van het kanaal. Dit betekent ook dat de stijghoogte gradiënt vanaf de rand van de kanaalbodem richting de teensloot achter de dijk beter met het model kan worden uitgerekend.

2. Validatie deelmodellen ARK2000 en ARK2020-opgebersten

Op basis van het uitsnedemodel ARK zijn er vervolgens twee verschillende deelmodellen opgebouwd.

I. Model ARK2000

Dit model is representatief voor de historische situatie 1990-2000. Hier heeft de bodem van het ARK nog een slibweerstand van 70 dagen en zijn de poldersloten nog niet opgebersten. Daarbij zijn er in deze periode lokaal andere polderpeilen ingesteld (zie bijlage B5). Er is een ijkset gemaakt die de metingen bevat van deze periode. In deze periode is in de metingen nog geen stijgende trend in de stijghoogte of kwel zichtbaar waardoor deze periode geschikt is voor de toetsing van de geohydrologische modelparameters.

II. Model ARK2020-opgebersten

Dit model is representatief voor de huidige situatie. Ten opzichte van het ARK2000 model zijn alle geohydrologische modelparameters identiek aan het ARK2000 model, met uitzondering van:

- de oppervlaktewater- en/of polderpeilen (conform de actuele praktijkpeilenkaart van Waternet),
- de intredeweerstand van het ARK (verlaagd naar 1 dag) en
- de verlaagde weerstand van de deklaag in de opgebersten poldersloten.

Er is een ijkset samengesteld met metingen van de periode 2015-2021. In deze periode zijn de grootste veranderingen in de stijghoogte in de omgeving van het ARK reeds opgetreden en is de toegenomen polderafvoer min of meer gestabiliseerd (zie hoofdstuk 7 waterbalans en hoofdstuk 4 tijddreksanalyse in het hoofdrapport). Dit betekent dat ook de modelparameters in het model ARK2020-opgebersten kunnen worden getoetst.

3. Gevoeligheidsanalyse met Monte Carlo

Door middel van een gevoeligheidsanalyse via de Monte Carlo methodiek is de betrouwbaarheid van de gekozen uitgangspunten en modelparameters van bovenstaande modellen in beeld gebracht. In de gevoeligheidsanalyse zijn er enkele parameters geïdentificeerd welke konden worden aangepast om de twee modellen verder te optimaliseren. De resultaten van de verschillende stappen in de modelkalibratie worden afzonderlijk besproken in de volgende paragrafen. De gevoeligheidsanalyse met Monte Carlo is in een afzonderlijke bijlage besproken (bijlage 7).

4. Modeloptimalisatie op basis van de inzichten uit Monte Carlo

De inzichten uit de gevoeligheidsanalyse zijn doorgevoerd en de kalibratieresultaten die worden gepresenteerd in de volgende paragraaf zijn het resultaat van deze definitieve modelberekeningen. Uit de gevoeligheidsanalyse kwam naar voren dat:

- Het ARK2000 model nog verbeterd kon worden door verlaging van de (historische) infiltratieweerstand van het ARK. Naar aanleiding hiervan is de infiltratieweerstand van het ARK verlaagd van 70 naar 60 dagen.
- Het ARK2020-opgebarsten model verbeterd kon worden, zowel door verhoging van de (huidige) infiltratieweerstand van het ARK (parameter 1) als door verhoging van de weerstand van de sloten na opbarsten (parameter 2). Uit de gevoelighedsanalyse bleek dat de weerstand van de sloten na opbarsten (parameter 2) het meest gevoelig was, waardoor hiermee de modelverbetering preciezer kon worden uitgevoerd. Handmatige kalibratie naar aanleiding van deze inzichten wees echter uit dat een aanpassing van beide parameters tot het beste resultaat leidde. Door verhoging van enkel de infiltratieweerstand van het ARK óf van enkel de weerstand van de opgebarsten sloten was het wel mogelijk om de berekende kwelflux in de polders rond het ARK te verbeteren maar dit gaf vervolgens toch een lokale verslechtering van de berekende stijghoogtes in de peilbuizen rondom het ARK. Dit wordt niet zichtbaar op basis van de statistiek van het totale model maar werd duidelijk wanneer in detail werd gekeken naar de beschikbare peilbuizen in de polders rondom het ARK. Een waarde van 2.5 dagen voor de infiltratieweerstand van het ARK (in plaats van 1 dag) en een factor van 1.25 op de resterende bodemweerstand van de sloten na opbarsten zorgt voor een verbeterde modelperformance voor zowel de berekende stijghoogte als kwel in het onderzoeksgebied.

6.7 Resultaten kalibratie grondwatermodel

In deze paragraaf wordt het presteren van het grondwatermodel na het doorlopen van het kalibratieproces (zie vorige paragraaf) getoond en toegelicht. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende modellen (ARK2000 en ARK2020-opgebarsten). De resultaten die worden gepresenteerd zijn daarmee dus de resultaten na het doorvoeren van de inzichten uit de gevoelighedsanalyse (bijlage 7).

6.7.1 ARK2000 model

Het grondwatermodel ARK2000 (representatief voor de historische situatie, vóór opbarsten) is stationair gekalibreerd op basis van gemiddelde stijghoogten en gemiddelde afvoergegevens van polders over de periode 1990-2000. Deze kalibratieset bevat peilbuizen uit Dinoloket en buizen afkomstig uit GWNET van Waternet. In totaal gaat het om 511 meetfilters in de watervoerende pakketten.

Daarnaast worden in het onderzoeksgebied de berekende afvoeren van de volgende 3 poldersystemen gebruikt bij de kalibratie:

- Baambrugge Oostzijds & Lange Coupure
- Hoeker en Garstenpolder
- Holland Sticht en Voorburg west & Het Honderd west

Tijdens de stationaire kalibratie is gezocht naar een minimumverschil tussen de gemeten en de berekende stijghoogten. Tijdens de stationaire kalibratie zijn met name de weerstandswaarden van de slecht doorlatende lagen geoptimaliseerd (c-waarden in tabel B6.1). Het stationaire kalibratieresultaat voor de watervoerende pakketten 2 en 5, inclusief berekende isohypsen, is te vinden in respectievelijk de bijlagen 1 en 2. Het kalibratieresultaat, uitgedrukt als het verschil tussen gemeten en berekende stijghoogte ter plaatse van de peilbuizen, is waar mogelijk met een waardelabel afgebeeld.

Een extra toetsing op de validiteit van het grondwatermodel is de waterbalans van de Horstermeer polder op circa 3 km ten oosten en de Bethunepolder op circa 5 km ten zuidoosten van het onderzoeksgebied. Gemeten afvoeren van gemalen en inlaten leveren een gemiddeld afvoerdebiet voor Horstermeer van circa 36 à 37 Mm³/jaar. Het grondwatermodel berekent een gemiddeld afvoerdebiet van 36.5 Mm³/jaar. Van de Bethunepolder bedraagt de gemeten afvoer gemiddeld 32 Mm³/jaar. Het grondwatermodel voor de huidige situatie berekend voor de Bethunepolder een afvoer van 32.5 Mm³/jaar.

Tabel B6.6 geeft de statistieken weer van de stationaire kalibratie voor alle lagen in het grondwatermodel onder de deklaag. Daaruit kunnen een aantal zaken worden afgeleid:

- Het model heeft geen structurele afwijking. De gemiddelde afwijking van alle lagen samen is 0 cm, en de gemiddelde afwijkingen tussen de lagen verschillen van te hoog en te laag.
- De gemiddelde absolute afwijkingen zijn met 16 cm laag. Dit is voor een regionaal grondwatermodel zeer goed.
- In het diepe pakket 7 en met name 8 neemt het kalibratieresultaat af doordat in dit bereik stijghoogten deels bepaald worden door aanwezigheid van zout grondwater. De stijghoogten in het grondwatermodel zijn namelijk niet gecorrigeerd voor het zoutgehalte.

De kwel uit het grondwatermodel wordt in tabel B6.7 vergeleken met de netto kwelterm uit de Excel-waterbalans. Daaruit volgt dat de berekende kwel in de HGP en de HSV-west goed overeenkomen. Voor alle polders geldt dat er nog wat minder kwel met het grondwatermodel wordt berekend als dat er is afgeleid met de Excel-waterbalans. Het grootste absolute verschil is daarbij aanwezig in de BBO (ca. 900 m³/d). Wanneer de kwel echter wordt gecorrigeerd voor het oppervlak is het grootste verschil aanwezig in de HSV-west (ca. 0.4 mm/d). Qua ordegrootte geldt daarmee dat de verschillen in alle polders klein zijn en het model daarmee goed presteert.

Tabel B6.6: Statistiek kalibratieresultaat peilbuizen 1990-2000 voor historische ARK2000 model

Aquifer nummer	alle lagen	2	3	4	5	6	7	8
Gemiddelde afwijking (m)	0.00	0.01	-0.01	0.08	-0.02	0.04	0.02	-0.30
Gemiddelde absolute afwijking (m)	0.16	0.16	0.14	0.14	0.11	0.11	0.17	0.51
Maximale negatieve afwijking (m)	-0.75	-0.72	-0.63	-0.52	-0.92	-0.31	-0.75	-0.52
Maximale positieve afwijking (m)	0.73	0.73	0.48	0.46	0.37	0.32	0.58	0.69
Totaal aantal peilbuizen	511	188	92	55	89	13	63	11

Tabel B6.7 Gemiddelde kwel voor drie bemalingsgebieden vergeleken met de kwel uit de waterbalans voor het historische ARK2000 model

Polder	Oppervlakte (m ²)	Kwel Excel-waterbalans (m ³ /dag)	Kwel grondwatermodel (m ³ /dag)	Absoluut verschil (m ³ /dag)	Absoluut verschil (mm/dag)
Hoeker en Garsten polder	5156194	138	-50	188	0.04
Baambrugge Oostzijds & Lange Coupre	8646683	3072	2175	897	0.10
Holland, Sticht en Voorburg west & Het Honderd west	3256174	439	391	48	0.36

6.7.2 Kalibratie ARK2020-opgebarsten model

Na kalibratie van het ARK2000 model wordt het ARK2020 model doorgerekend met de recente peilen, en de verminderde infiltratieverstand van het ARK. Na het doorvoeren van de opbarstberekeningen leidt dit tot opbarsten van de poldersloten en komt het ARK2020-opgebarsten model tot stand. De berekeningsresultaten van dit model zijn vervolgens getoetst aan een kalibratieset, samengesteld uit metingen van de periode 2015-2021.

De kalibratieset (totaal 554 peilbuizen) is samengesteld uit de volgende deelbestanden:

1. peilbuismetingen uit GWNET van Waternet inclusief recente metingen uit het Project Wellen nabij het ARK (286 peilbuizen).
2. peilbuismetingen uit Dinoloket van TNO (248 peilbuizen).
3. Project Stapstenen, provincie Utrecht 2018 (3 peilbuizen nabij het ARK);
4. Project Baggeren Vecht, Waternet 2012 (17 peilbuizen). Ondanks dat dit iets oudere metingen zijn worden deze peilbuizen wel meegenomen. De stijghoogte toename op deze plaats is in 2012 namelijk al voor een groot deel bereikt (zie o.a. figuur 4.5 met toelichting in hoofdrapport).

Het ARK2020-opgebarsten model is vervolgens weer gevalideerd aan de waterbalansen van dezelfde 3 polders als het ARK2000 model, maar nu met de kwel van de recente situatie (2015-2021).

De tabel B6.8 geeft de statistieken weer van de stationaire kalibratie voor alle lagen in het grondwatermodel onder de deklaag. Daaruit kunnen een aantal zaken worden afgeleid:

- Net zoals het ARK2000 model heeft het ARK2020-opgebarsten model geen noemenswaardige structurele afwijking. De gemiddelde afwijking van alle lagen is 2 cm.
- De gemiddelde absolute afwijking is met 15 cm laag. Dit is voor een regionaal grondwatermodel zeer goed en zelfs nog 1 cm beter dan het ARK2000 model.
- In het diepe pakket 7 en met name 8 neemt het kalibratieresultaat af doordat in dit bereik stijghoogten deels bepaald worden door aanwezigheid van zout grondwater. De stijghoogten in het grondwatermodel zijn namelijk niet gecorrigeerd voor het zoutgehalte.

De berekende kwel wordt in tabel B6.9 vergeleken met de netto kwelterm uit de Excel-waterbalans (welke representatief wordt geacht voor de kwel uit het diepe grondwater). Daaruit volgt dat:

- De kwel met het grondwatermodel voor alle polders zeer goed overeenkomen met de kwel uit de Excel-waterbalans. De afwijkingen zijn slechts enkele procenten.
- De berekende kweltoename (ARK2000 t.o.v. ARK2020-opgebarsten) versus de kweltoename op basis van de Excel-waterbalans ook zeer goed overeenkomen.
- Het grondwatermodel is daarmee dus in staat om zowel de huidige situatie als het effect van de verlaagde bodemweerstand van het ARK en het effect hiervan (opbarsten) goed te reproduceren.

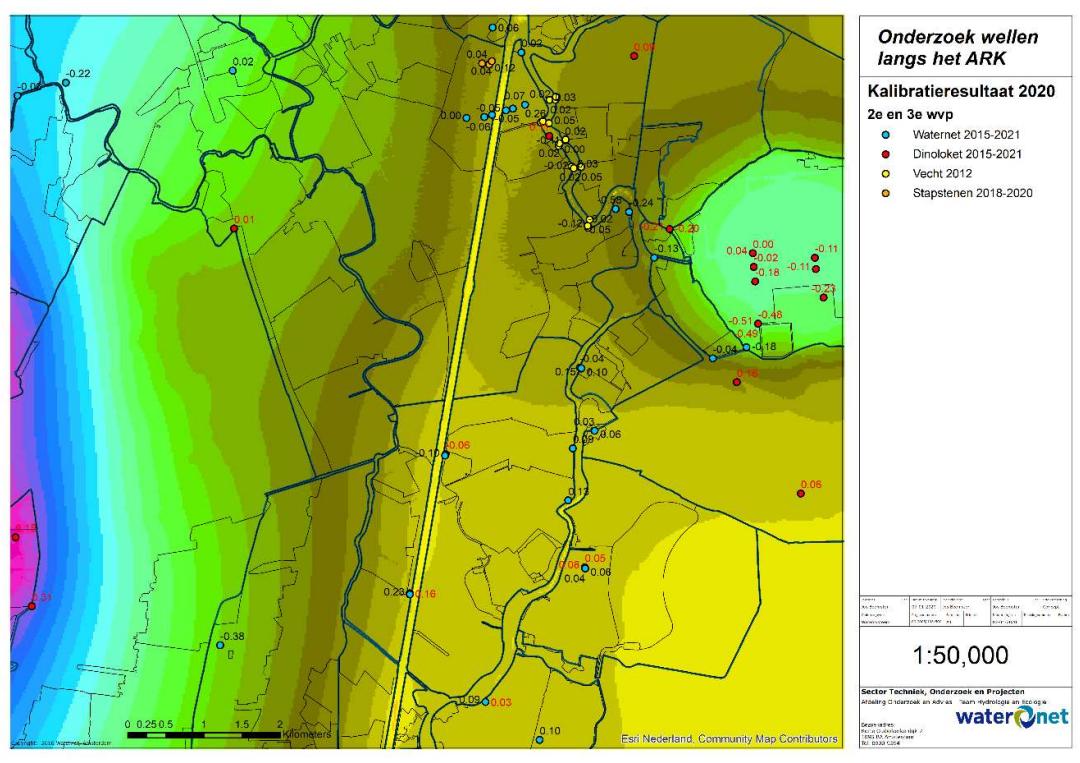
In de bijlagen 1 en 2 zijn de kalibratieresultaten van het ARK2020-opgebarsten model van watervoerende pakketten 2 t/m 8 ruimtelijk weergegeven. In Figuur B6.12 is een detail opgenomen van bijlage 1: de kalibratie van de pakketten 2 en 3 in de polders BBO en HGP. Daarin is zichtbaar dat het model in de polders rondom het ARK zeer goed presteert. Echter het aantal meetfilters met stijghoogtes in de polders is beperkt, het zou goed zijn het meetnet uit te breiden om het grondwatermodel zodoende nog beter op de stijghoogte te kunnen valideren in de polders.

Tabel B6.8: Statistiek kalibratieresultaat peilbuizen 2015-2021.

Aquifer nummer	alle lagen	2	3	4	5	6	7	8
Gemiddelde afwijking (m)	-0.02	-0.01	-0.04	-0.02	-0.01	-0.08	0.01	-0.28
Gemiddelde absolute afwijking (m)	0.15	0.14	0.11	0.18	0.10	0.20	0.13	0.34
Maximale negatieve afwijking (m)	-0.68	-0.68	-0.51	-0.63	-0.48	-0.14	-0.46	-0.62
Maximale positieve afwijking (m)	0.71	0.55	0.34	0.42	0.44	0.31	0.59	0.71
Totaal aantal peilbuizen	554	260	79	43	73	11	61	27

Tabel B6.9: Berekende gemiddelde kwel voor drie bemalingsgebieden vergeleken met de kwel uit de Excel-waterbalans voor het huidige model (ARK2020-opgebarsten). Daarnaast ook de vergelijking met de berekende toename t.o.v. de historische situatie (ARK2000).

Polder	Kwel Excel-waterbalans (m³/dag)	Kwel grondwatermodel (m³/dag)	Toename kwel Excel-waterbalans (m³/dag)	Toename kwel grondwatermodel (m³/dag)
Hoeker en Garsten polder (HGP)	7404	7327 (1% lager)	7266	7377 (2% hoger)
Baambrugge Oostzijds & Lange Coupure (BBO)	17209	16243 (6% lager)	14137	14059 (1% lager)
Holland, Sticht en Voorburg west & Het Honderd west (HSV)	2800	2622 (6% lager)	2361	2231 (6% lager)



Figuur B6.12: detail kalibratie van de pakketten 2 en 3

6.8 Vergelijking huidig resultaat met modelresultaat voorgaande modellering

Zoals beschreven in paragraaf B6.6 is het grondwatermodel van het ARK wezenlijk herzien ten opzichte van de modelversie (model Oost) uit de concept-rapportage van dit onderzoek (zie concept rapport 'Geohydrologisch onderzoek wellen langs ARK' van 15 april 2021). Deze paragraaf beschrijft de verschillen in modelresultaat tussen het gekalibreerde ARK model en het model uit de vorige projectfase voor de stijghoogte statistieken en de berekende kwel.

Tabel B6.10 geeft het verschil tussen de modellen weer in de stijghoogtestatistieken. Hierbij zijn exact dezelfde ijksets gehanteerd om zodoende appels met appels te kunnen vergelijken. Uit de tabel volgt dat de statistieken niet wezenlijk zijn veranderd. De gemiddelde en absolute afwijkingen zijn in het detailmodel ARK2000 nagenoeg gelijk gebleven aan het model Oost (historische situatie). Enkel de 'sum of squares' is een fractie kleiner in het nieuwe model ARK2000 dan in het vorige model Oost. De observatie dat beide modellen nagenoeg gelijk op de stijghoogte presteren kan worden verklaard doordat de bodem van het ARK in die situatie nog een hoge weerstand heeft en de poldersloten nog niet zijn opgebarsten en de conceptuele verschillen tussen beide modellen juist op deze aspecten betrekking hebben. Daarom is het verschil van het ARK2020-opgebarsten model met het Oost-opgebarsten model (huidige situatie) ook wat groter: de verschillen tussen beide modellen werken nu meer door. Wat opvalt is dat de stijghoogte statistieken van het verfijnde model ARK2020-opgebarsten iets minder goed zijn als het regionale model Oost-opgebarsten. De verschillen vallen echter in de marges, beide modellen geven een zeer goed validatie resultaat op stijghoogte.

Tabel B6.10: Vergelijking stijghoogtestatistieken van de huidige en voorgaande grondwatermodellen.

Model	Sum of squares	Gemiddelde afwijking (m)	Gemiddelde absolute afwijking (m)
Oost – historische situatie	22.82	0.002	0.153
Oost-opgebarsten – huidige situatie	20.33	-0.006	0.139
ARK2000	22.09	0.002	0.155
ARK2020opgebarsten	21.25	-0.017	0.146

Tabel B6.11 laat de verschillen zien tussen de berekende kwel met het model Oost en deelmodel ARK. Beide modellen worden vergeleken met de netto kwel uit de waterbalansen. De waterbalansen staan uitvoerig beschreven in hoofdstuk 7 van het hoofdrapport. Uit de vergelijking volgt dat de berekende kwel met het deelmodel ARK significant is verbeterd:

- De kwel die wordt berekend voor de historische situatie in de HGP en de HSV-west komt beter overeen met de netto kwel uit de waterbalans. De historische kwel in de BBO wordt in het ARK2000 model wat lager berekend en kwam in het model Oost beter overeen met de waterbalans.
- De kwel berekend voor de huidige situatie is in alle polders verbeterd. In met name de BBO is het verschil zeer groot, maar ook in de HSV-west is de verbetering significant. De kwel in de HGP werd in het model Oost al relatief goed berekend maar komt nu nog wat beter overeen.
- De grootste verbetering van het nieuwe modelconcept wordt zichtbaar in de berekende kweltoename van de BBO en de HGP. De kweltoename berekend met het deelmodel ARK komt zeer goed overeen met de toename van de netto kwel afgeleid uit het waterbalans onderzoek. De kweltoename van de HSV kwam in model Oost al goed overeen, echter werd de kwel in absolute zin significant overschat.

Tabel B6.21: Berekende kwel per polder van de huidige en voorgaande grondwatermodellen, vergeleken met de netto kwel uit de Excel-waterbalans.

Model	Berekende kwel in polder (m³/d)			Netto kwel in de Excel-waterbalans (m³/d)			Verschil (m³/d)		
	BBO	HGP	HSV	BBO	HGP	HSV	BBO	HGP	HSV
Oost – historische situatie	2933	725	1035	3072	138	439	-139	587	596
Oost – huidige situatie	10633	7048	3543	17209	7404	2800	-6576	-356	743
Model Oost: kweltoename	7700	6323	2508	14137	7266	2361	-6437	-943	147
ARK2000	2175	-50	391	3072	138	439	-897	-188	-48
ARK2020-opgebarsten	16243	7327	2622	17209	7404	2800	-966	-77	-178
Deelmodel ARK: kweltoename	14068	7377	2231	14137	7266	2361	-69	111	-130

Bijlage 7: Gevoeligheidsanalyse met Monte Carlo

7 Gevoelighedsanalyse met Monte Carlo

7.1 Inleiding

Een bestaand model (deelmodel Oost van het regionale model van AGV) is ingezet bij deze studie. Dit model is in het verleden goed gekalibreerd. Het model kent echter nog onzekerheden wat betreft de bandbreedte van de berekende parameterwaarden. Omdat de deelmodellen voor het ARK (ARK2000 en ARK2020-opgebarsten) op het model Oost gebaseerd is het van belang dat duidelijk wordt in welke mate de onzekerheden de uitkomsten van deze studie kunnen beïnvloeden. Er is daarom een gevoelighedsanalyse uitgevoerd om zodoende meer grip te krijgen op deze onzekerheden. De gevoelighedsanalyse moet inzicht geven in:

- Invloed van de bandbreedte (het onzekerheidsinterval) van de parameters op de afvoer in het poldersysteem.
- In hoeverre de deelmodellen ondanks de geringe afwijkingen in het model Oost nog verbeterd kunnen worden.

Bij de gevoelighedsanalyse worden de modeluitkomsten zowel op stijghoogte als op berekende kwel getoetst. De verwachting is dat daardoor het model beter beoordeeld kan worden. De beoordeling op stijghoogte en kwel zou theoretisch zelfs gecombineerd kunnen worden in het proces van de gevoelighedsanalyse. Probleem daarbij is om een goede weging te vinden voor de stijghoogten en kwel om gezamenlijk een modelberekening te beoordelen. Daarom is ervoor gekozen de beoordeling voor stijghoogten en kwel afzonderlijk te doen.

Leeswijzer

De opbouw van deze bijlage is als volgt. In paragraaf 7.2 wordt de gevuldde methodiek van de gevoelighedsanalyse besproken. Vervolgens worden de resultaten van de gevoelighedsanalyse gepresenteerd in paragraaf 7.3, hieruit komt de haalbaarheid van modelverbetering en de gevoeligheid van de verschillende modelparameters naar voren. Paragraaf 7.4 gaat in op de doelmatigheid van een eventuele verdere modelverbetering n.a.v. de inzichten verkregen uit de gevoelighedsanalyse. De conclusies van de gevoelighedsanalyse staan beschreven in paragraaf 7.5.

7.2 Methodiek

De gevuldde methodiek wordt toegelicht door eerst de Monte Carlo analyse uit te leggen. Vervolgens worden een aantal voorbeelden van inzichten die de Monte Carlo analyse kan geven besproken. Daarna wordt ingegaan op de manier waarop meetfilters worden gewenst en hoe de Monte Carlo analyse is verwerkt in de modellentrein.

7.2.1 Uitleg Monte Carlo analyse

De gevoelighedsanalyse is uitgevoerd doormiddel van een Monte Carlo analyse. Hierbij zijn er in eerste instantie een aantal verkennende berekeningen van steeds 200 Monte Carlo runs uitgevoerd om de spreiding van de factorwaarden goed te kunnen inschatten alvorens over te gaan tot de definitieve Monte Carlo berekening. De definitieve Monte Carlo berekening bestaat uit 1000 berekeningen met voor elke berekening een unieke parameterset. Er worden 18 parameters gevarieerd door deze te vermenigvuldigen met een factor. Voor elke factor wordt een uniform verdeelde bandbreedte gedefinieerd. Dit betekent dat elke waarde uit de verdeling even veel kans heeft op te treden. Er is geen voorkeur. Uit de verdeling worden met de Latin Hypercube trekkingsmethode zoveel waarden getrokken als berekeningen worden gedaan. Latin Hypercube trekking zorgt ervoor dat ook bij een gering aantal berekeningen de gehele verdeling aan bod komt bij de analyse.

Per berekening wordt de initiële waarde van de modelparameter vermenigvuldigd met de factorwaarde of, indien van toepassing, opgeteld met de factorwaarde. De parameters en gekozen bandbreedtes voor de factorwaarden zijn benoemd in onderstaande tabel. Aangezien alle parameters tegelijk worden gevarieerd resulteert dit in 1000 unieke parametersets.

De uitkomsten van alle 1000 berekeningen zijn vervolgens vergeleken met de ijksets. Voor elke berekening is er op basis van de ijkset een gemiddelde afwijking en gemiddelde absolute afwijking bepaald. Er is gekozen om de 20 berekeningen met de kleinste gemiddelde absolute afwijking te selecteren. De onderlinge verschillen in de gemiddelde absolute afwijking tussen deze 20 beste berekeningen uit een totaal van 1000 berekeningen zijn klein. Kortom: ze scoren allemaal "goed".

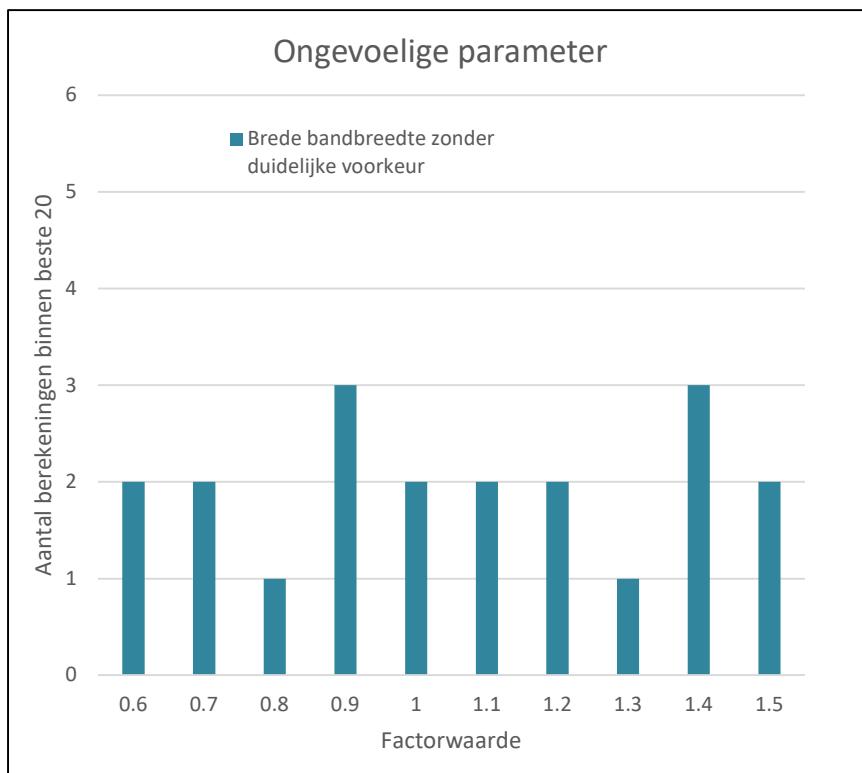
Per parameter is vervolgens geanalyseerd welke factorwaarden voor die parameter voorkomen bij de 20 beste berekeningen. De verdeling van de factorwaarden geeft inzicht in de gevoeligheid van deze parameter binnen het gekozen spectrum en welke factorwaarde resulteren in de kleinste gemiddelde absolute afwijking.

7.2.2 Voorbeelden uitkomsten Monte Carlo analyse

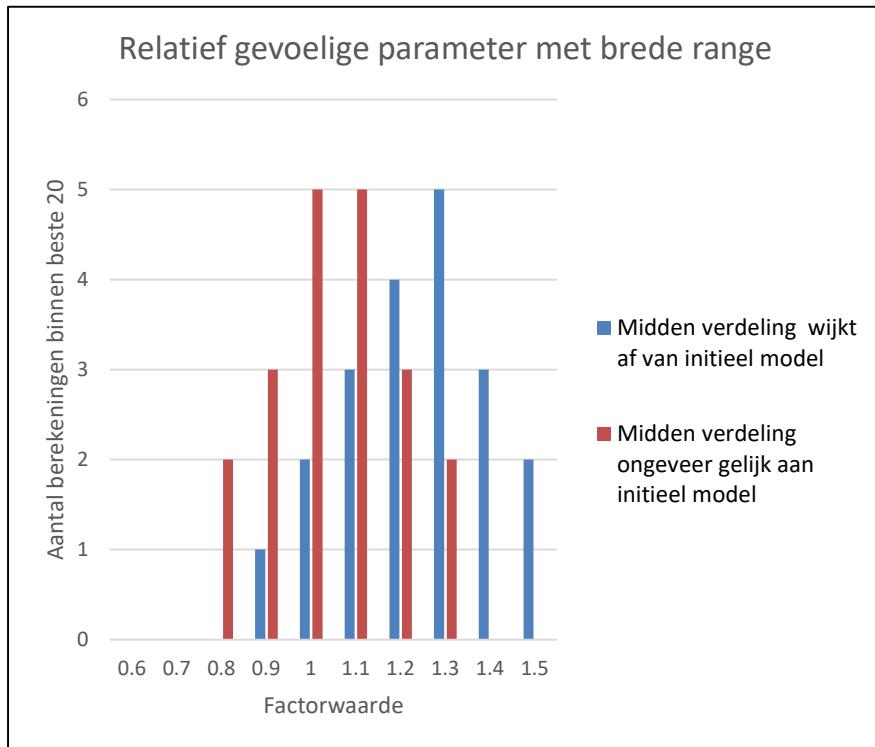
Figuren B7.1 tot B7.3 laten een aantal theoretische voorbeelden van verdeleningen van factorwaarden voor de 20 beste berekeningen. Hieronder wordt kort toegelicht welke inzichten de theoretische figuren geven in de modelparameters.

In figuur B7.1 komt binnen de 20 beste berekeningen een grote bandbreedte van factorwaarden voor. De gehele initiële bandbreedte komt terug en er is geen duidelijke voorkeur. Dit betekent dat al deze berekeningen factoren hebben welke resulteren in goede uitkomsten. Deze parameter is daarom niet gevoelig binnen het gekozen spectrum. Een andere mogelijkheid is dat parameters afhankelijk van elkaar zijn en het daarmee niet goed mogelijk is één parametercombinatie te kiezen. De beste keuze is in dit geval om uit te gaan van de initiële **parameter waarde (dus factorwaarde = 1)**.

Figuur B7.1: Voorbeeld voor ongevoelige modelparameter.

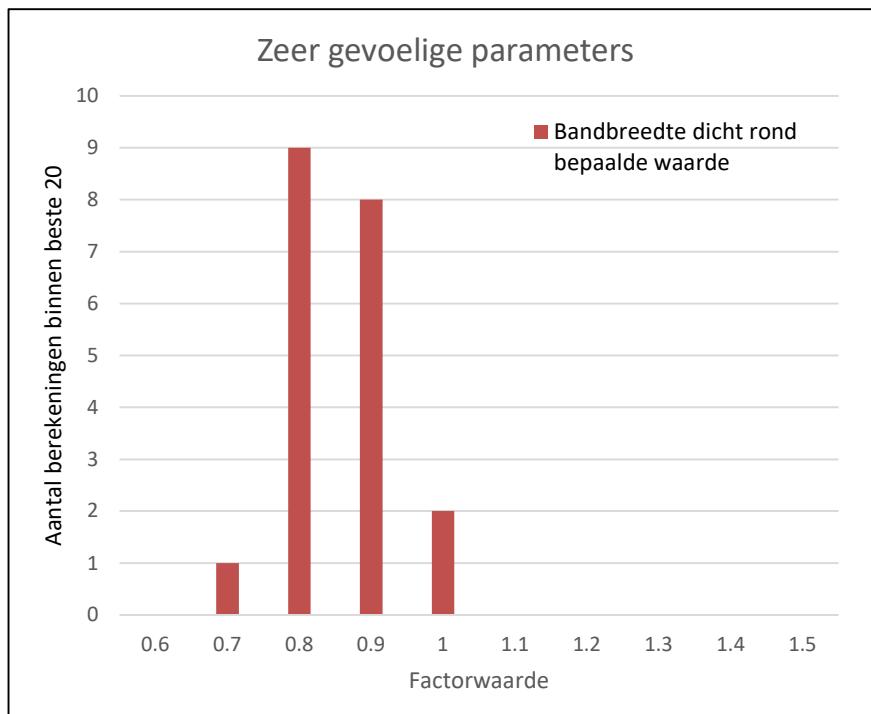


In figuur B7.2 is ook nog een relatief grote bandbreedte, echter wordt deze wel beperkt binnen de gekozen toegestane factorwaarden. Dit wijst op een gevoelige parameter. Of de initiële parameter waarde in de initiële modelberekening zou kunnen worden bijgesteld is afhankelijk van de verdeling van de berekeningen ten opzichte van de factor 1. Zo is de parameter met de rode staven verdeeld rondom de 1 maar de blauwe staven rondom de factor 1.2. Het is echter niet noodzakelijkerwijs zo dat het midden van de verdeling altijd de optimale waarde vertegenwoordigt. Immers, bij elke berekening worden ook andere modelparameters gewijzigd en verschillende parameters kunnen aan elkaar zijn gecorreleerd. Het feit dat de factorwaarden echter een beperkte bandbreedte hebben geeft wel aan dat het waarschijnlijk is dat de beste waarde binnen deze bandbreedte valt. Het ligt voor de hand de parameterwaarde te kiezen die gemiddeld het meest voorkomt in het laatste geval rond de 1.2.



Figuur B7.2: Voorbeeld gevoelige parameter met brede range.

Tot slot laat figuur B7.3 een parameter zien welke een zeer smalle bandbreedte heeft rondom een bepaalde waarde. Deze parameter is dus zeer gevoelig en de beste uitkomsten zijn te verwachten rondom deze factorwaarde. In dit voorbeeld is de factorwaarde 0.8-0.9 en zou dit dus aanleiding kunnen zijn om deze omlaag bij te stellen.



Figuur B7.3: Voorbeeld zeer gevoelige parameter.

Als onderdeel van de optimalisatie kiest de hydroloog op basis van de beschreven analyse parameterwaarden en vervolgens wordt een controleberekening gedaan om te beoordelen of het modelresultaat inderdaad goed past bij de metingen in vergelijking met het resultaat van de 20 beste berekeningen.

Het kan zijn dat de parameters te veel afhankelijk van elkaar zijn. In dat geval zal voor de meeste parameters en grafiek gevonden worden als getoond in figuur B7.1. Er is dan geen aanleiding parameters aan te passen. Als het doel is het model te optimaliseren kan de gevoelighedsanalyse opnieuw gedaan worden met minder parameters of met een slimmer gekozen zonering.

7.2.3 Weging meetfilters

De gevoelighedsanalyse is uitgevoerd met factoren voor parameters in verschillende zones of bijvoorbeeld voor een deel van het ARK. In dat geval kunnen de parameters minder afhankelijk van elkaar zijn omdat ze op verschillende manieren het resultaat beïnvloeden ter plaatse van de meetfilters. De zoneringen die zijn gehanteerd in de analyse staan weergeven in figuur B7.4. Sommige parameters zijn enkel aangepast ter plaatse van het ARK (rood), andere enkel in de polders (blauw) en weer andere zijn modelbreed aangepast.

Het risico bij een groot model is dat een parameter die substantiële invloed heeft in maar enkele meetpunten in de hierboven beschreven analyse niet opgemerkt wordt omdat de gemiddelde absolute afwijking van alle metingen ten gevolge van deze parameter weinig varieert. Om deze reden wordt de analyse ook uitgevoerd met alleen die meetfilters waar de parameter invloed heeft, dit heet de zogenaamde gewogen analyse. Bij de beoordeling van de individuele modelparameters (paragraaf B7.3.3) zijn daarom enkel de resultaten uit de gewogen analyse meegenomen.

De invloed van een verandering van een modelparameter is bepaald door voor iedere parameter afzonderlijk de effecten van deze parameter te berekenen in de meetfilters. Dit zijn daarmee dus losstaande gevoelighedsberekeningen. Het berekende effect in de meetpunten wordt vervolgens als weegfactor op diezelfde peilbuizen gebruikt in de Monte Carlo-analyse. Is het effect van de parameterverandering in een peilbuis dus 0.01 cm, dan is de weegfactor 0.01. Is het effect 10 cm, dan is de weegfactor 10.



Figuur B7.4 : Zonerings voor parameteraanpassing. Blauw: polders ARK, rood: ARK.

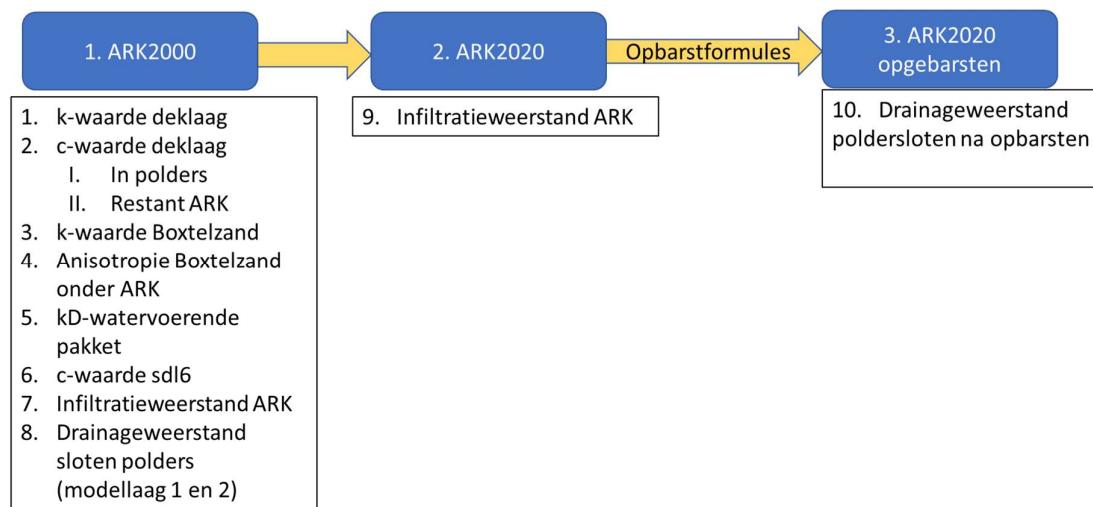
7.2.4

De modellentrein i.r.t. Monte Carlo

De modelberekeningen in dit project volgen steeds een bepaald spoor en vormen gezamenlijk een modellentrein. Dit wordt uitgebreid beschreven in hoofdstuk B6.3. Ditzelfde spoor is gevuld in de gevoelighetsanalyse. Alleen worden nu op verschillende momenten parameters gevarieerd, hetgeen schematisch is weergegeven in figuur B7.4.

De definitieve Monte Carlo berekening bestaat dus uit 1000 berekeningen van de gehele modellentrein met elke keer een unieke parameterset. Voor de verschillende deelmodellen binnen de modellentrein zijn deze parametersets niet gewijzigd. De factorwaarden in het model 2000 zijn dus gelijk aan de waarden in het model ARK2020 en ARK2020 opgebarsten. De gebruikte factorwaarden staan in tabel B7.1

Er wordt beoordeeld op basis van kwel en stijghoogte. De ijksets die worden gebruikt zijn dezelfde als beschreven in paragraaf B6.7. De afzonderlijke 3 modellen zijn dus nog steeds volledig gescheiden: de voor dat model relevante Monte Carlo parameters worden enkel getoetst aan de ijksets die horen bij dat model.



Figuur B7.5: Verwerking van de verschillende Monte Carlo parameters in de modelltrein

Tabel B7.1: Overzicht Monte Carlo parameters, zie figuur B7.4 voor de bijbehorende zonering.

Parameter	Toelichting	Bandbreedtes factorwaarden
1.	kD-deklaag, komt afhankelijk van de deklaagdikte overeen met een kh van ca. 0.1-0.3 m/d. Dit is aangepast in het gehele model.	
2A	Deklaagweerstand, enkel aangepast in de polders rondom het ARK.	
2B	Deklaagweerstand onder het ARK na doorsnijding.	
3	k-waarde Boxtelzand, aangepast voor het gehele model.	
4	50% van de verticale anisotropie van Boxtelzand in sdl2 (de rest zit verwerkt samen met de deklaagweerstand in sdl1). Aangepast voor het ARK.	0.5 – 1.5
5	k-waarde watervoerende pakket 3 t/m laag 6. Aangepast voor het gehele model.	
6	c-waarde Sdl-6, Wak1,2 en Pek1. Aangepast voor het gehele model.	
7	Infiltratieweerstand sliblaag ARK voor historische situatie	
8A	Drainageweerstand sloten in modellaag 1, enkel aangepast in de polders rondom het ARK.	
8B	Drainageweerstand sloten in modellaag 2 vóór opbarsting. Aangepast in de polders rondom het ARK.	
9	Infiltratieweerstand sliblaag ARK in de huidige situatie.	
10	Weerstand sloten na opbarsting, zie hoofdstuk 6.5 in bijlage 6. Aangepast in de polders rondom het ARK.	0.5 - 3

7.3 Resultaten gevoelighedsanalyse

De resultaten van de gevoelighedsanalyse worden vanuit een aantal sporen gepresenteerd:

- Eerst worden de modelstatistieken (gemiddelde afwijking en de gemiddelde absolute afwijking) van de berekende grondwaterstand en stijghoogte onderzocht (paragraaf 7.3.1).
- Daarna wordt bekeken wat de variatie van de berekende kwel van de polders rondom het ARK is, bij verwerking van de resultaten van alle 1000 Monte Carlo berekeningen (paragraaf 7.3.2). Dit is gedaan voor zowel het historische model als het huidige model en de resultaten worden vergeleken met de gemeten kwel en de kwel uit de basisberekening. De **basisberekening** is de berekening waarbij er geen parameters zijn aangepast en is dus gelijk aan het oorspronkelijke ARK2000 of het ARK2020-model voorafgaand aan de modelkalibratie.
- Tenslotte wordt in paragraaf 7.3.3 per individuele Monte Carlo parameter de gevoeligheid gepresenteerd en de verdeling van de factorwaarden, steeds op basis van de 20 beste scorende berekeningen uit de 1000 Monte Carlo berekeningen. Dit geeft per parameter inzicht in de mate van (on)gevoeligheid en of aanpassing van de parameterwaarde mogelijk zou kunnen leiden tot verbetering van de modelperformance. De conclusies ten aanzien van de mogelijke modelverbeteringen zijn samengevat in paragraaf 7.4.

Zowel de veranderingen in de modelstatistieken van de stijghoogten én de bandbreedtes in berekende kwel geven inzicht in de mogelijkheden het model te verbeteren. Deze komen aan de orde bij de analyse van de stijghoogten en de kwel in paragrafen 7.3.1 en 7.3.2.

Een bijkomend voordeel van het zowel beoordelen op stijghoogte als kwel is dat dit de parametercorrelatie verkleind. Dit kan worden geïllustreerd door de correlatie tussen de intree weerstand van het ARK en de drainageweerstand van de poldersloten als voorbeeld te nemen. Als de stijghoogte onder de polders te hoog is berekend kan de afwijking worden verkleind door een verlaging van zowel de drainageweerstand van de poldersloten (dit geeft namelijk extra ontlasting van de kweldruk) als door verhoging van de intree weerstand van het ARK (dit zorgt voor minder kweldruk onder de polders). Wordt daarnaast ook de beoordeling op kwel betrokken dan blijkt dat het daar precies omgekeerd ligt: verlaging van de drainageweerstand van de poldersloten leidt tot meer kwel en verhoging van de intree weerstand van het ARK leidt tot minder kwel. De juiste parameter aanpassing is daarom de aanpassing die leidt tot de kleinste modelafwijking op zowel stijghoogte als kwel. Aangezien er relatief weinig peilbuizen aanwezig zijn in de polders rondom het ARK moet er bij contrasterende inzichten meer gewicht worden gegeven aan het verkleinen van de afwijking van de berekende kwel in de polders dan aan de stijghoogteafwijking. Dit geeft namelijk ruimtelijk een consistentere beeld in de modelperformance.

7.3.1 Analyse stijghoogten

De resultaten van een vergelijking van de statistieken van de initiële modelberekening (dus het basismodel voor ARK2000 en ARK2020-opgebarsten) en de beste 20 Monte Carlo berekeningen staan weergegeven in tabel B7.2. Als selectie criterium is daarvoor de kleinste gemiddelde absolute afwijking gehanteerd. Daaruit volgt dat de gemiddelde absolute afwijking nog slechts met ca. 1 cm te verbeteren is. De gemiddelde afwijkingen blijven hierbij gelijk. Dit geldt zowel voor de ijkset van periode 1990-2000 als voor 2015-2021. Wanneer in detail wordt gekeken naar de spreiding van de afwijkingen in de 1000 berekeningen (niet in deze bijlage gepresenteerd) dan blijkt dat het verschil tussen de berekeningen zeer beperkt is: binnen de gekozen bandbreedtes van de factorwaarden is er slechts 1 cm variatie in de gemiddelde absolute afwijking en 4 cm in de gemiddelde afwijking. Dit betekent dat het basismodel al goed is en met aanpassing van de geselecteerde Monte Carlo parameters, factorbandbreedtes en zoneringen niet significant op stijghoogte te verbeteren is.

Tabel B7.2: Resultaten Monte Carlo analyse op statistiek stijghoogte afwijking t.o.v. basismodellen

	Model	Gem. afwijking (m)	Gem. absolute afwijking (m)
Basisberekening	ARK2000	0.00	0.16
	ARK2020-opgebarsten	-0.02	0.15
Beste 20 berekeningen	ARK2000	0.00	0.15
	ARK2020-opgebarsten	-0.02	0.14

7.3.2 Analyse kwel

Het resultaat van de vergelijking van de berekende kwel t.o.v. de netto kwelterm die is afgeleid uit de het waterbalans onderzoek (zie hoofdstuk 7 uit hoofdrapportage) is per polder gepresenteerd in afzonderlijke figuren. Daarbij horen figuren B7.6 t/m B7.8 bij het historische model (ARK2000) en figuren B7.9 t/m B7.11 bij het huidige model (ARK2020-opgebarsten). In elke figuur staat de berekende kwel in één polder (BBO/HGP/HSV) per Monte Carlo berekening (gesorteerd van laag naar hoog) weergegeven als oranje lijn. In diezelfde figuur zijn ook de Excel-waterbalans kwelflux (blauw) en de berekende kwelflux van het basismodel (groen) geplot als horizontale lijnen. Er wordt in dit geval aangenomen dat de onzekerheid in de kwelterm uit de Excel-waterbalans beperkt is. Het verschil tussen de blauwe en de groene lijn is daarmee dus de afwijking van het model. De haalbaarheid voor modelverbetering blijkt dan uit de mate waarin de blauwe lijn benaderd kan worden door de oranje lijn.

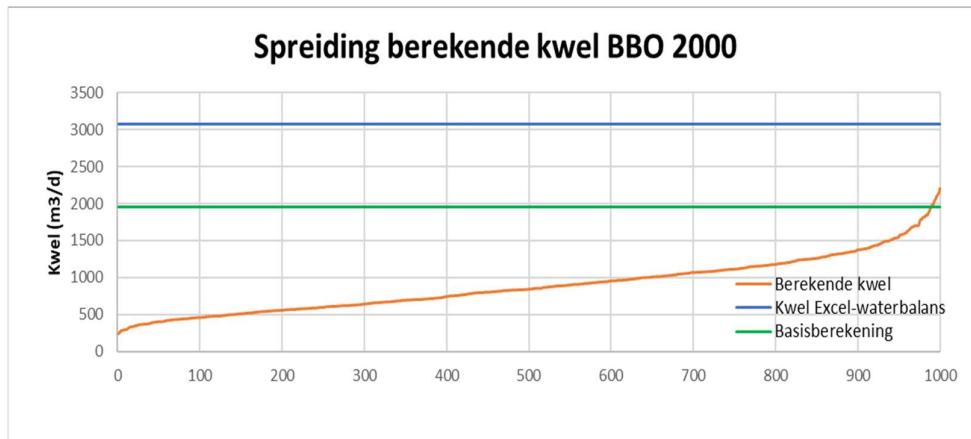
Uit de figuren voor het historische model (ARK2000) komen een aantal zaken naar voren:

- Alle polders berekenen ten opzichte van de Excel-waterbalans te weinig kwel in de basisberekening. Het verschil is in de BBO het grootst met ca. 1100 m³/d te weinig. Het verschil is in de andere polders kleiner met ca. 300 en 100 m³/d voor respectievelijk de HGP en de HSV-west.
- Het blijkt dat er een relatief grote spreiding in berekende kwel is binnen de 1000 berekeningen. Dit is daarmee dus wezenlijk anders dan de kleine verschillen in stijghoogte statistieken tussen de 1000 berekeningen.
- De berekende kwel met het historische model blijft voor de BBO voor alle berekeningen lager dan de kwel uit de Excel-waterbalans. De berekening met de meeste kwel in de BBO is nog steeds ca. 800 m³/d minder dan de Excel-waterbalans. De kwel in de HGP en de HSV-west kan wel benaderd worden door sommige berekeningen.

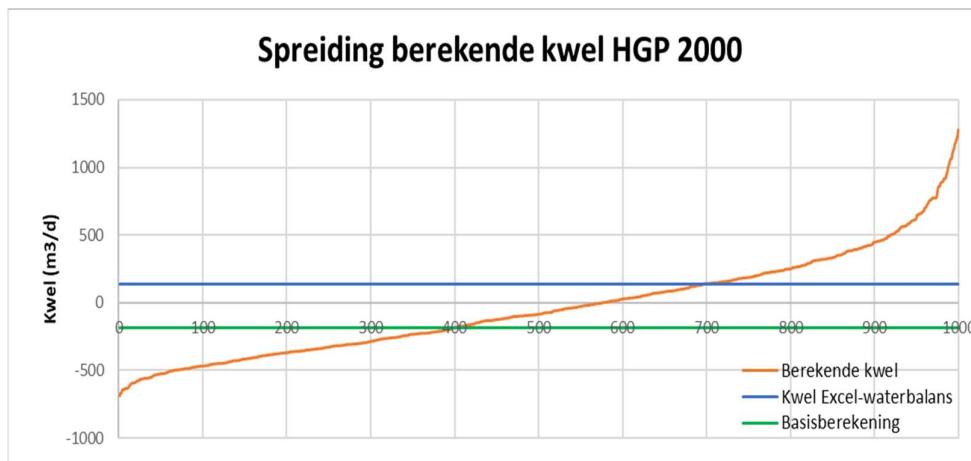
Bij het model van de huidige situatie (ARK2020-opgebarsten) is het beeld juist andersom:

- In de basisberekening wordt er in alle polders te veel kwel berekend vergeleken met de kwel uit de Excel-waterbalans. Het verschil is ca. 2500, 4000 en 850 m³/d voor de BBO, HGP en HSV-west respectievelijk.
- Uit de spreidingen blijkt dat het voor de BBO en de HSV mogelijk is om een parameterinstelling te definiëren waarmee de berekende kwelfluxen beter overeenkomen met de kwel uit de Excel-waterbalans.
- De berekende kwel in de HGP kan worden verlaagd maar blijft in elke berekening van de 1000 berekeningen hoger dan de kwel uit de Excel-waterbalans.

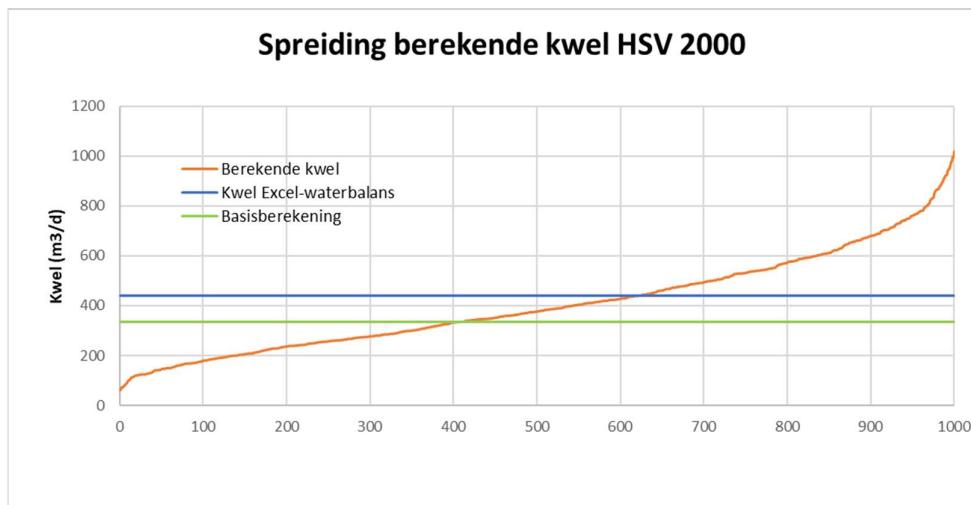
Op basis van deze analyse van de uitkomsten van de kwel blijkt het dus mogelijk beide grondwatermodellen nog op enkele punten te verbeteren. De haalbaarheid voor modelverbetering wordt nader besproken in paragraaf B7.4.



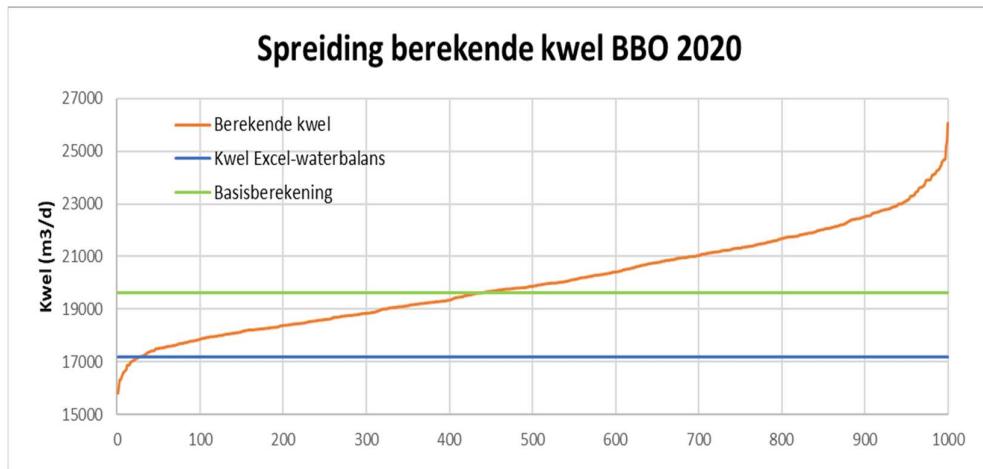
Figuur B7.6: Vergelijking van de spreiding in berekende kwel van alle 1000 berekeningen t.o.v. de kwel uit de Excel-waterbalans en de basisberekening in polder BBO - voor het historische model (ARK2000).



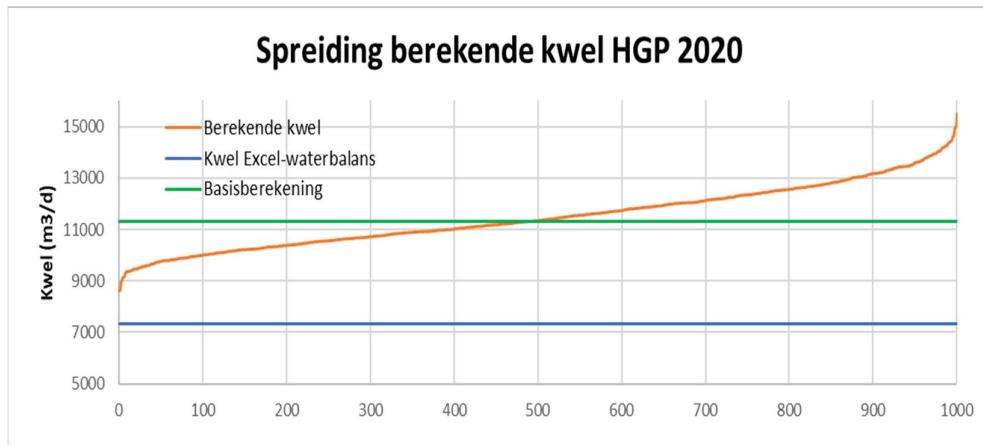
Figuur B7.7: Vergelijking van de spreiding in berekende kwel van alle 1000 berekeningen t.o.v. de kwel uit de Excel-waterbalans en de basisberekening in polder HGP - voor het historische model (ARK2000).



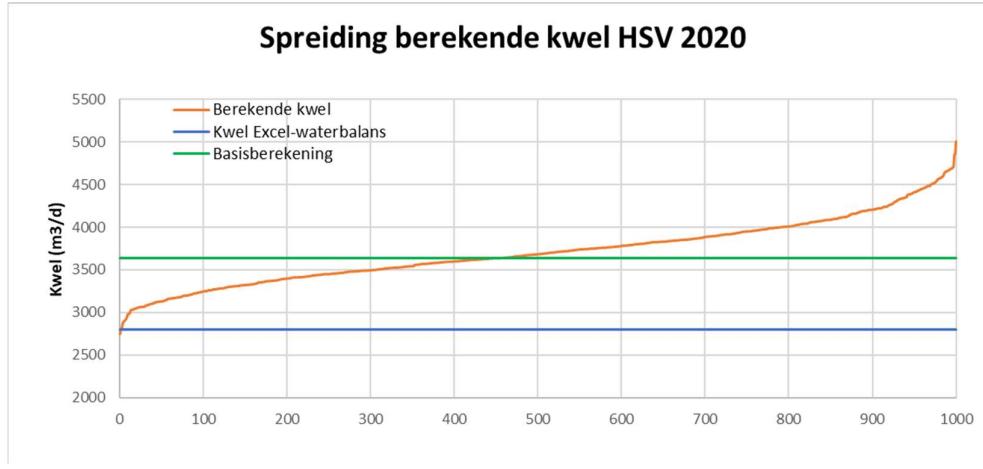
Figuur B7.8: Vergelijking van de spreiding in berekende kwel van alle 1000 berekeningen t.o.v. de kwel uit de Excel-waterbalans en de basisberekening in polder HSV - voor het historische model (ARK2000).



Figuur B7.9: Vergelijking van de spreiding in berekende kwel van alle 1000 berekeningen t.o.v. de kwel uit de Excel-waterbalans en de basisberekening in polder BBO - voor het huidige model (ARK2020-opgebarsten).



Figuur B7.10: Vergelijking van de spreiding in berekende kwel van alle 1000 berekeningen t.o.v. de kwel uit de Excel-waterbalans en de basisberekening in polder HGP - voor het huidige model (ARK2020-opgebarsten).



Figuur B7.11: Vergelijking van de spreiding in berekende kwel van alle 1000 berekeningen t.o.v. de kwel uit de Excel-waterbalans en de basisberekening in polder HSV - voor het huidige model (ARK2020-opgebarsten).

7.3.3 Beoordeling van de individuele parameters

Een samenvatting van de resultaten van inzichten voor de individuele parameters wordt gegeven in tabel B7.3. Hierbij is steeds de gewogen analyse van de resultaten gebruikt om zodoende enkel de peilbuizen waar effecten van parameterverandering zijn berekend mee te nemen. Een aantal parameters zijn ongevoelig gebleken, zowel op stijghoogte als berekende kwel. Dit betekent dat aanpassing daarvan niet doelmatig is. Verder zijn er ook een aantal parameters juist gevoelig gebleken maar waren deze soms initieel al goed ingeschat. Bij andere gevoelige parameters bleek dat (wanneer ze afzonderlijk werden beoordeeld voor stijghoogte en kwel) aanpassing van deze parameter ten behoeve van een verbetering op de stijghoogte statistieken dit niet per definitie ook leidt tot een verbetering van de berekende kwel. Aanpassing van zo'n parameter leidt in dat geval niet tot modelverbetering op beide fronten, terwijl dit wel het doel van de modelverbetering is, zie ook het kader in paragraaf B7.3. Drie parameters zouden mogelijk kunnen worden bijgesteld. De haalbaarheid hiervan wordt in detail bediscussieerd in paragraaf B7.4.

Voor de parameterbeoordeling op de stijghoogte zijn de ijksets ARK2000 en ARK2020 gezamenlijk meegenomen. Hierbij wordt de berekening met het ARK2000 model dus nog wel getoetst aan de ARK2000 ijkset, en de berekening met het ARK2020-opgebarsten model aan de ARK2020 ijkset. Echter, omdat de parameter actief is in beide modellen worden de resultaten van de beide modelberekeningen meegenomen. Dit is gedaan omdat er dan zoveel mogelijk meetpunten meedoen in de beoordeling. Er is hiervoor eerst gecontroleerd of er geen wezenlijk verschil ontstond in de parametergevoeligheid voor het ARK2000 model of het ARK2020-model (zie tabellen B7.4 en B7.5) wat het resultaat van de gevoelighetsanalyse zou kunnen vertekenen. Dit bleek enkel het geval bij de verticale anisotropie van het Boxtelzand. Daarom is bij de bespreking van deze parameter onderscheid gemaakt tussen het effect van deze parameter in het ARK2000 model en het ARK2020-opgebarsten model. Soortgelijk effect is zichtbaar bij de deklaagweerstand onder het ARK (zie hiervoor ook tabellen B7.4 en B7.5). Deze parameter blijkt echter in beide modellen relatief ongevoelig waardoor hierbij in de beoordeling minder aandacht aan het verschil tussen het ARK2000 en ARK2020-opgebarstenmodel wordt gegeven.

Voor de beoordeling op de kwel is soortgelijke analyse uitgevoerd. Waar dat mogelijk is zijn beide modellen gelijktijdig beoordeeld. Enkel bij de verticale anisotropie van het Boxtelzand was dit niet mogelijk, waardoor deze afzonderlijk is beoordeeld voor het ARK2000 en het ARK2020-opgebarsten model. Bij de beoordeling op kwel is weer uitgegaan van het resultaat van de Excel-waterbalansen per polder. Hiermee is de netto kwelflux per polder bepaald, hetgeen wordt toegelicht in het hoofdrapport, hoofdstuk 7.

Tabel B7.3: Resultaten Monte Carlo analyse voor individuele parameters

Parameter	Resultaat Monte Carlo analyse
k-waarde deklaag	Ongevoelig
k-waarde formatie van Boxtel	Ongevoelig
k-waarde watervoerende pakket	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat
Deklaagweerstand in de polders rondom het ARK.	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat.
Deklaagweerstand onder het ARK	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat.
Verticale anisotropie Boxtelzand	Ongevoelig in ARK2000, gevoelig in ARK2020opgebarsten.
Weerstand sdl 6	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat.
Drainageweerstand sloten in modellaag 1 in polders ARK.	Ongevoelig
Drainageweerstand sloten in modellaag 2 in polders - vóór opbarsting,	Ongevoelig
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - historische situatie	Gevoelig, parameter aanpassing mogelijk
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - huidige situatie.	Gevoelig, parameter aanpassing mogelijk
Weerstand sloten na opbarsting	Gevoelig, parameter aanpassing mogelijk

7.3.3.1 Parametergevoeligheid

Er is per parameter een individuele berekening gedaan waarbij enkel deze ene parameter is aangepast met de maximale veranderingsfactor. Hiermee kan er inzicht worden verkregen in de relatieve parametergevoeligheid. Dat is hier gedefinieerd als het quotiënt van de verandering in de gemiddelde afwijking en de vermenigvuldigingsfactor. De resultaten hiervan staan opgenomen in tabel B7.4 (voor de stijghoogte) en tabel B7.5 (voor de kwel). De resultaten worden per parameter in detail besproken in de volgende paragrafen bij de individuele parameters. Een aantal algemene observaties op hoofdlijnen worden hier gegeven:

- Er zijn een heel aantal parameters waar er geen noemenswaardig effect is, zowel op de stijghoogte als op de berekende kwel. Deze parameters zijn dus ongevoelig.
 - k-waarde van de deklaag (modellaag 1)
 - k-waarde van de formatie van Boxtel (modellaag 2)
 - (resterende) deklaagweerstand onder het ARK
 - Drainageweerstand van de poldersloten, in zowel modellaag 1 als 2
- De overige parameters lijken wel gevoelig. Individuele beoordeling op basis van de nabewerking van de Monte Carlo analyse zal uitsluitsel moeten geven in hoeverre deze initiële parameterwaarden voldoen.
- De parameters hebben over het algemeen ongeveer een gelijke gevoeligheid in het ARK2000 model als in het ARK2020-opgebarsten model. De enige uitzondering op deze regel is de verticale anisotropie van de formatie van Boxtel. Deze is ongevoelig in het ARK2000 model maar zeer gevoelig in het ARK2020-opgebarsten model.
- De rangorde van welke parameters het meest gevoelig zijn op de berekende kwel verschuift tussen de twee modellen. In het ARK2000 model zijn dat de infiltratieweerstand van de sliblaag in het ARK en de deklaagweerstand in de polders rondom het ARK. In het ARK2020-opgebarsten model is de infiltratieweerstand van de sliblaag in het ARK ongeveer even gevoelig, maar is deze significant minder gevoelig geworden als de weerstand van de sloten na het opbarsten en de verticale anisotropie van de formatie van Boxtel.
- De deklaagweerstand in de polders rond het ARK is in beide modellen ongeveer even gevoelig wanneer wordt gelet op het absolute effect, maar deze weerstand is het ARK2020-opgebarsten model ondergeschikt geworden aan de weerstand van de poldersloten na opbarsten. Dit geeft aan dat in het ARK2000 model een groot deel van de gemodelleerde kwel diffuus tot stand komt. In het ARK2020-opgebarsten model komt het grootste deel van de kwel via de (opgebarsten) sloten waardoor de relatieve parametergevoeligheid van de deklaagweerstand ondergeschikt wordt aan de drainageweerstand van de poldersloten.
- De rangorde van de meest gevoelige parameters zijn niet gelijk voor de stijghoogte en de kwel. Dit komt ook omdat de stijghoogte statistieken van het gehele model worden beschouwd, terwijl bij de kwel enkel de polders rondom het ARK worden meegenomen in de analyse.

Tabel B7.4: Individuele (relatieve) parametergevoeligheid op de stijghoogte.

Parameter	Factor	Verandering gemiddelde afwijking (cm)		Relatieve parametergevoeligheid (verandering/factor)	
		ARK2000	ARK2020-opgebarsten	ARK2000	ARK2020-opgebarsten
k-waarde deklaag (laag 1)	1.5	0.1	0	0.1	0
k-waarde formatie van Boxtel (laag 2)	1.5	0	0.1	0	0.1
k-waarde wvp (laag 3-6)	1.5	1.3	1.4	0.9	0.9
Deklaagweerstand in de polders rondom het ARK.	1.5	2.1	1.9	1.4	1.3
Deklaagweerstand onder het ARK	1.5	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2
Verticale anisotropie Boxtelzand	1.5	0	-0.7	0	-0.5
Weerstand sdl 6	1.5	0.5	0.5	0.3	0.3
Drainageweerstand sloten in modellaag 1 in polders ARK.	1.5	0	0	0	0
Drainageweerstand sloten in modellaag 2 in polders - vóór opbarsten,	1.5	0	n.v.t.	0	n.v.t.
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - historische situatie	1.5	-0.5	n.v.t.	-0.3	n.v.t.
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - huidige situatie.	1.5	n.v.t.	-0.4	n.v.t.	-0.3
Weerstand sloten na opbarsten	3	n.v.t.	0.4	n.v.t.	0.1

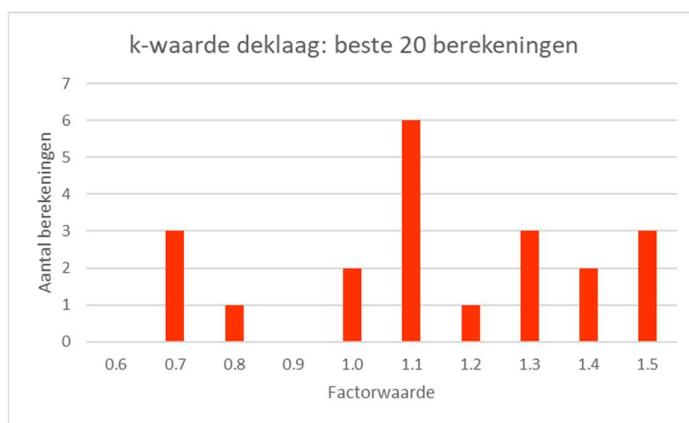
Tabel B7.5: Individuele (relatieve) parametergevoeligheid op de kwel.

Parameter	Factor	Verandering gemiddelde kwel polders rondom ARK (m³/d)		Relatieve parametergevoeligheid (verandering/factor)	
		ARK2000	ARK2020-opgebarsten	ARK2000	ARK2020-opgebarsten
k-waarde deklaag (laag 1)	1.5	136	100	91	67
k-waarde formatie van Boxtel (laag 2)	1.5	1	107	1	71
k-waarde watervoerende pakket (laag 3-6)	1.5	-63	47	-42	31
Deklaagweerstand in de polders rondom het ARK.	1.5	-329	-357	-219	-238
Deklaagweerstand onder het ARK	1.5	-44	-201	-29	-134
Verticale anisotropie Boxtelzand	1.5	-6	-1354	-4	-903
Weerstand sdl 6	1.5	1	-35	1	-23
Drainageweerstand sloten in modellaag 1 in polders ARK.	1.5	-32	-24	-21	-16
Drainageweerstand sloten in modellaag 2 in polders - vóór opbarsten,	1.5	-63	n.v.t.	-42	n.v.t.
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - historische situatie	1.5	-247	n.v.t.	-165	n.v.t.
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - huidige situatie.	1.5	n.v.t.	-375	n.v.t.	-250
Weerstand sloten na opbarsten	3	n.v.t.	-3366	n.v.t.	-1122

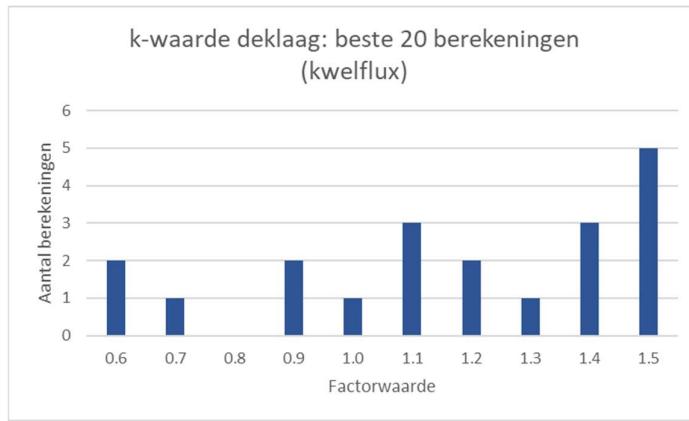
7.3.3.2 k-waarde deklaag

Figuren B7.12 en B7.13 laten de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de k-waarde van de deklaag wanneer wordt getoetst op respectievelijk stijghoogten en kwelfluxen. Dit blijkt geen gevoelige parameter voor de berekening. De spreiding is groot zowel voor de toetsing op stijghoogte als de toetsing op kwel. Ook de relatieve parametergevoeligheid van de k-waarde van de deklaag is klein, op zowel de kwel als de stijghoogte (zie tabellen B7.4 en B7.5). Daarmee zijn de resultaten van de Monte Carlo analyse en de individuele gevoeligheidsanalyse met elkaar in overeenstemming.

Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat er geen aanleiding is om de initiële parameterwaarde in het basismodel aan te passen. De oorspronkelijke parameterwaarde voldoet.



Figuur B7.12: Resultaat k-waarde deklaag – beoordeling voor stijghoogte.

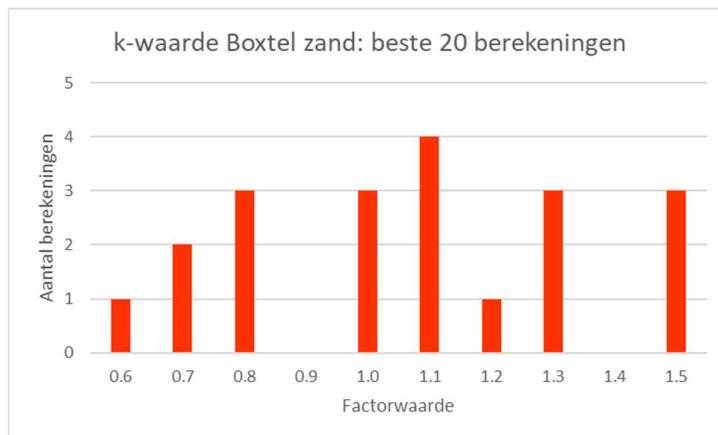


Figuur B7.13: Resultaat k-waarde deklaag – beoordeling voor netto kwelflux.

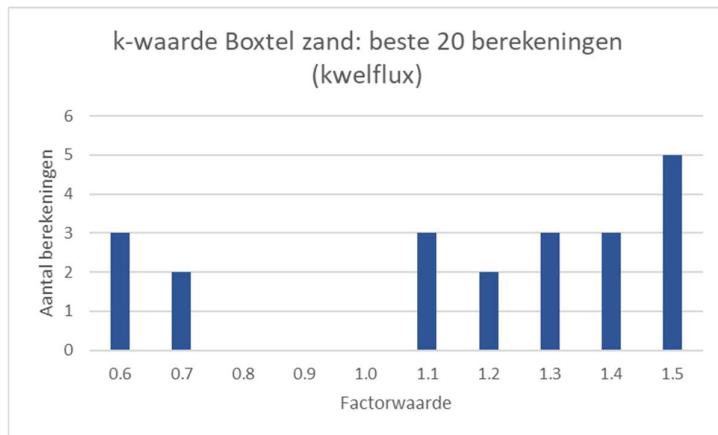
7.3.3.3 k-waarde formatie van Boxtel

Figuren B7.14 en B7.15 laten de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de k-waarde van de formatie van Boxtel voor respectievelijk de toetsing op stijghoogte en kwelflux. Dit blijkt geen gevoelige parameter voor de berekening. De spreiding is zowel op de toetsing van de stijghoogten als de berekende kwel groot. Ook de relatieve parametergevoeligheid van de k-waarde van het Boxtelzand is klein, op zowel de kwel als de stijghoogte (zie tabellen B7.4 en B7.5). De gevoeligheid op de berekende kwel is in het ARK2020opgebarsten model groter dan in het ARK2000 model, maar dit geeft vooral het effect weer van het feit dat er meer stroming vanuit het ARK richting de polders plaatsvindt. Ten opzichte van de andere parameters blijft dit een relatief ongevoelige parameter. De resultaten van de Monte Carlo analyse en de individuele gevoelighedsanalyse zijn dus met elkaar in overeenstemming.

Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat er geen aanleiding is om de initiële parameterwaarde in het basismodel aan te passen. De oorspronkelijke parameterwaarde voldoet.



Figuur B7.14: Resultaat k-waarde Boxtelzand – beoordeling voor stijghoogte.



Figuur B7.15: Resultaat k-waarde Boxtelzand – beoordeling voor netto kwelflux.

7.3.3.4 k-waarde watervoerende pakket

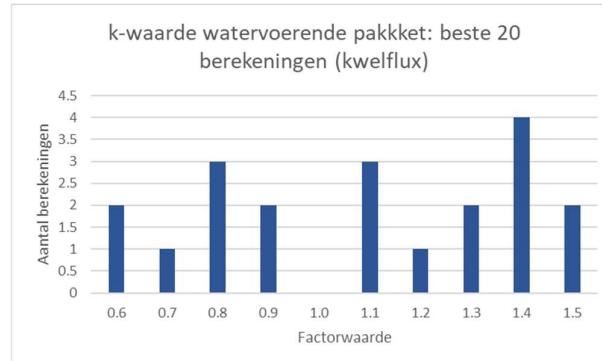
Figuur B7.16 laat de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de k-waarde van het watervoerende pakket (laag 3-6) wanneer wordt beoordeeld op de stijghoogte. Dit is een gevoelige parameter voor de berekening. Dat komt overeen met het resultaat van de individuele parametergevoeligheid (tabel B7.4). Een factorwaarde van 1.4 of hoger is mogelijk op basis van de stijghoogte.

Wanneer er echter wordt getoetst op basis van de berekende kwel dan blijkt de parameter juist ongevoelig (zie figuur B7.17 en tabel B7.5)). De bandbreedte van de factorwaarden is groot en de gemiddelde factorwaarde is 1. Dit betekent enerzijds dat de oorspronkelijke parameterwaarde goed is ingeschat maar anderzijds dat dit geen contra-indicatie is voor aanpassing van de parameterwaarde: aanpassing van de k-waarde zou namelijk mogelijk zijn zonder dat dit leidt tot een verslechtering van het model op basis van toetsing op de kwelflux. In een proefberekening is de k-waarde van het watervoerende pakket verhoogd met een factor 1.5, dit leidt slechts tot een gemiddelde afname in de kwel van ca. 60 m³/d in het ARK2000 model wat bevestigt dat de gevoeligheid van de k-waarde van het watervoerende pakket op de kwel niet hoog is. Toch is het duidelijk dat de richting van de verandering (een verlaging van de kwel) niet juist is: de berekende kwel in het ARK2000 model moet immers worden verhoogd.

Daarnaast is de initiële k-waarde van het watervoerende pakket in de ARK-modellen 37,5 – 50 m/d. Dit verhogen met een factor van ca. 1.5 leidt tot zeer hoge k-waarden (ca. 60-75). Hoewel aanpassen van deze parameter naar zeer hoge k-waarden op basis van de Monte Carlo analyse mogelijk lijkt wordt dit echter hydrogeologisch gezien niet realistisch geacht. Ter vergelijking: de k-waarden in REGISII variëren voor deze pakketten tussen de 15 en 40 m/d. Daarbij is de winst in modelperformance (verkleining van de gemiddelde absolute modelafwijking) is zodanig beperkt (maximaal 1 cm, zie tabel B7.2 en geen winst in de berekende kwel) om op basis hiervan zo'n forse modelaanpassing door te voeren. Terughoudendheid om deze gebiedsbrede k-waarde aan te passen is bovendien op zijn plaats gezien de goed gekalibreerde waterbalansen van polders buiten het aandachtsgebied (o.a. Horstermeer polder en Bethunepolder, zie paragraaf 6.7.1). Als in deze polders een grote verandering in k-waarde wordt doorgevoerd, zal de waterbalans hier verslechteren.



Figuur B7.16: Resultaat k-waarde wvp – beoordeling voor stijghoogte.



Figuur B7.17: Resultaat k-waarde wvp – beoordeling voor netto kwelflux.

7.3.3.5 Deklaagweerstand onder ARK

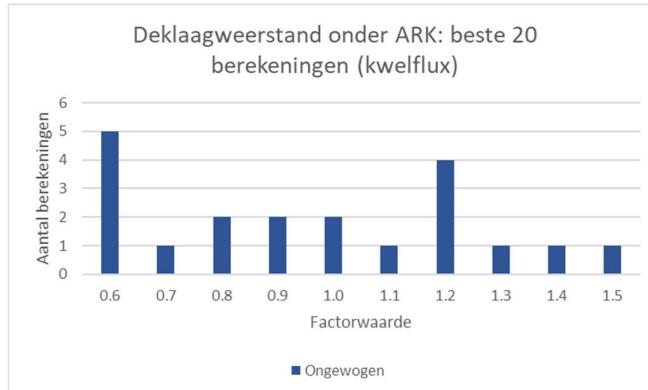
Figuur B7.18 laat de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de (resterende) deklaagweerstand onder het ARK voor de beoordeling op stijghoede. Dit is een matig gevoelige parameter voor de berekening, dat blijkt ook uit tabel B7.4. Echter, de spreiding op basis van de Monte Carlo analyse blijft relatief groot, met een gemiddelde factorwaarde van 1,2. Deze weerstand lijkt dus op basis van toetsing op de stijghoeden wat hoger te kunnen worden ingesteld dan de waarde in het basismodel.

Figuur B7.19 geeft de verdeling van de factorwaarden wanneer wordt getoetst op de berekende netto kwelflux. Hieruit komt naar voren dat deze parameter juist ongevoelig is: de spreiding is groot. Dit beeld komt overeen met de individuele parametergevoeligheid op kwel (tabel B7.6). Het effect van de parameterverandering op de berekende kwel is in het ARK2020-opgebarsten model wel groter als in het ARK2000-model. Dat wordt veroorzaakt doordat er meer water infiltrert door de ARK-bodem. Het relatieve belang van deze weerstandslaag wordt daarmee dus in het ARK2020-opgebarsten model groter als in het ARK2000 model. De relatieve gevoeligheid (ten opzichte van de andere modellparameters) blijft echter zeer beperkt. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat deze parameter zeer heterogeen aanwezig is. Nagenoeg overal is de deklaagweerstand afwezig waardoor een vermenigvuldiging met een factorwaarde geen verschil maakt. Op de locaties waar er nog wel een restant deklaagweerstand onder het ARK aanwezig is zal er lokaal mogelijk een groter effect zijn. Dit heeft echter zowel op de stijghoede statistieken als op de kwel in de polders geen significante invloed.

De spreidingen van de factorwaarden geven op het eerste gezicht een tegengesteld beeld: bij de toetsing op de stijghoeden neigt het zwaartepunt van de spreiding naar een verhoging van de weerstand, de toetsing op de kwelflux neigt juist naar een verlaging van de weerstand. De spreidingen van de factorwaarden zijn echter in beide gevallen zodanig groot dat ze elkaar deels overlappen waardoor dit resultaat niet met elkaar in tegenspraak is. Het betekent ook dat aanpassing van de initiële waarde van deze parameter niet als doelmatig wordt geacht.



Figuur B7.18: Resultaat deklaagweerstand onder ARK- beoordeling voor stijghoede.



Figuur B7.19: Resultaat deklaagweerstand onder ARK- beoordeling voor netto kwelflux.

7.3.3.6 Deklaagweerstand polders

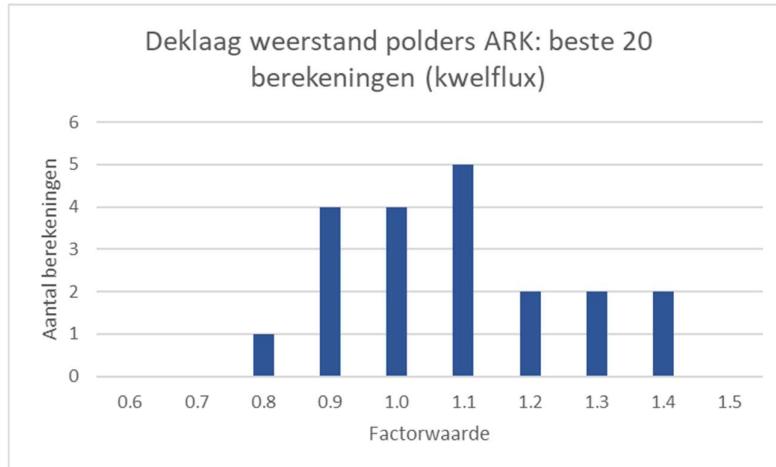
Figuur B7.20 laat de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de deklaagweerstand van de polders rondom het ARK voor de beoordeling op de stijghoogte. Dit blijkt zowel uit de Monte Carlo analyse als uit de individuele berekeningen een gevoelige parameter voor de berekening (tabel B7.5). De factorwaarde zoekt een hoek van de bandbreedte op. De gemiddelde factorwaarde is 0.6, maar mogelijk kan deze nog lager als de bandbreedte verder wordt verruimd.

Wanneer wordt gekeken naar de verdeling van de factorwaarde van de 20 beste berekeningen op basis van toetsing van de kwelflux (figuur B7.21) dan blijkt wederom dat de deklaagweerstand van de polders gevoelig is. Ook dit komt overeen met de individuele berekening (tabel B7.5). De deklaagweerstand zou echter op basis van de Monte Carlo resultaten niet naar beneden moeten worden bijgesteld maar lijkt al goed ingeschat in het initiële model. De verdeling ligt tussen de 0.8 en 1.4 met een gemiddelde van 1.

Op basis van bovenstaande observaties kan worden geconcludeerd dat er geen aanleiding is om de initiële waarde van de deklaagweerstand aan te passen en dat de oorspronkelijke waarde dus voldoet.



Figuur B7.20: Resultaat deklaagweerstand polders – beoordeling voor stijghoogte.



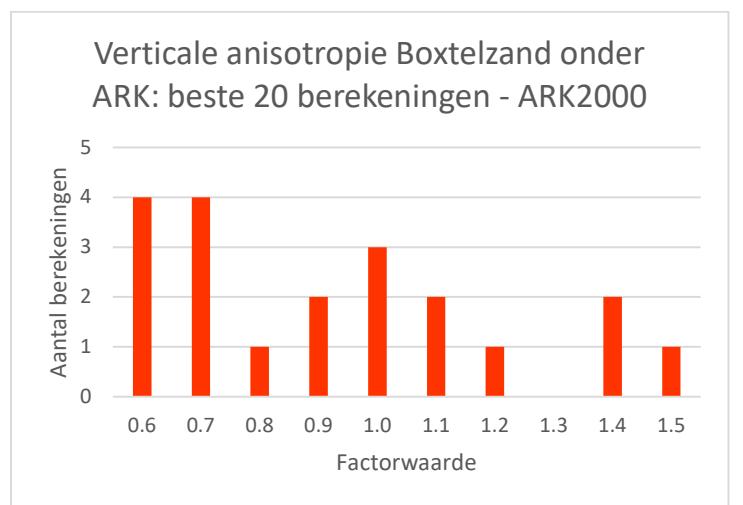
Figuur B7.21: Resultaat deklaagweerstand polders – beoordeling voor netto kwelflux.

7.3.3.7 Verticale anisotropie Boxtelzand onder het ARK

De gevoeligheid voor de verticale anisotropie van het Boxtelzand is niet gelijk in het ARK2000 model en het ARK2020-opgebarsten model. Figuren B7.22 en B7.23 laten de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de verticale anisotropie van het Boxtelzand onder het ARK voor de beoordeling op stijghoogten voor respectievelijk het ARK2000 en het ARK2020-opgebarsten model. Figuren B7.24 en B7.25 laten hetzelfde zien, maar dan voor de beoordeling op de netto kwelfflux. Dit blijkt in het ARK2000 model geen gevoelige parameter voor de berekening. De spreiding in factorwaarde is groot, zowel voor de beoordeling op stijghoogten als kwel. Dit geeft daarom geen aanleiding om de initiële parameterwaarde in het basismodel aan te passen. De oorspronkelijke waarde lijkt in het ARK2000 model te voldoen.

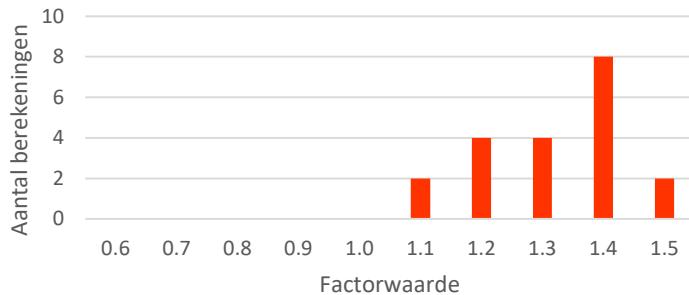
In het ARK2020-opgebarsten model is deze parameter echter wel zeer gevoelig. Het feit dat de parameter in het ARK2000 model ongevoelig is en in het ARK2020-opgebarsten model juist zeer gevoelig komt doordat de verticale anisotropie van het Boxtelzand één van de weerstanden onder het ARK vertegenwoordigd tezamen met de deklaagweerstand en de sliblaagweerstand. Het relatieve aandeel van de verticale anisotropie (ca. 2-5 dagen) in de totale weerstand (ca. 70-75 dagen) in het ARK2000 is klein. Hierdoor wordt deze parameter ongevoelig ten opzichte van de andere weerstanden. In het ARK2020-opgebarsten model vertegenwoordigt de verticale anisotropie van het Boxtelzand juist het grootste deel van de weerstand. De sliblaag weerstand is immers nog slechts 1 dag en de deklaagweerstand is vrijwel overal afwezig i.v.m. de verdieping en verbreding van het ARK in 1980. Dit leidt ertoe dat de verticale anisotropie van het Boxtelzand nu juist zeer gevoelig is geworden.

Zowel de beoordeling op stijghoogte als de beoordeling op kwel geven aan dat de parameter een hogere weerstandswaarde zou kunnen krijgen.



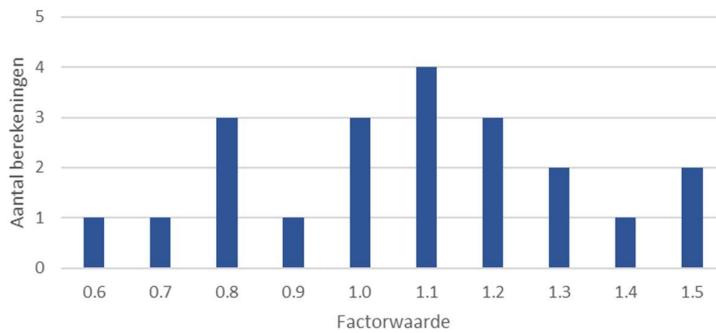
Figuur B7.22: Resultaat verticale anisotropie Boxtelzand – beoordeling voor stijghoogte 2000.

Verticale anisotropie Boxtelzand onder
ARK: beste 20 berekeningen - ARK2020-
opgebarsten



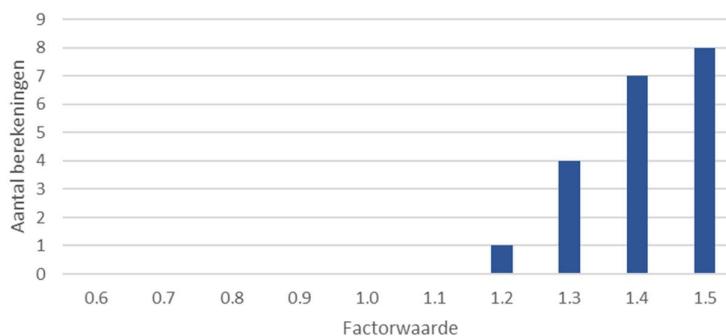
Figuur B7.23: Resultaat verticale anisotropie Boxtelzand – beoordeling voor stijghoogte 2020.

Anisotropie Boxtelzand: beste 20 berekeningen
(kwelflux) - ARK2000



Figuur B7.23: Resultaat verticale anisotropie Boxtelzand – beoordeling voor kwel 2000.

Anisotropie Boxtelzand: beste 20 berekeningen
(kwelflux) - ARK2020-opgebarsten



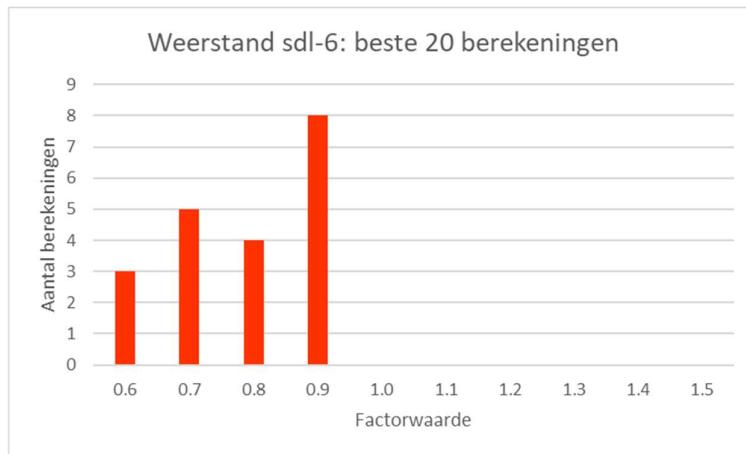
Figuur B7.25: Resultaat verticale anisotropie Boxtelzand – beoordeling voor kwel 2020.

7.3.3.8 Weerstand sdl 6

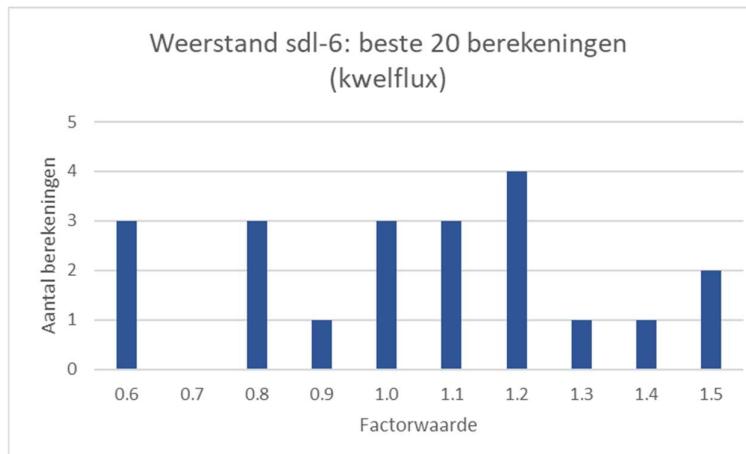
Figuur B7.26 laat de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de weerstand van sdl-6 wanneer wordt beoordeeld op stijghoogte. Dit lijkt een gevoelige parameter voor de berekening en dat komt overeen met het resultaat in tabel B7.4. De spreiding in de factorwaarde is beperkt tot enkel verlagingen (0.5-0.9). De gemiddelde factorwaarde is 0.75.

De gevoeligheid van de weerstand van sdl-6 op de kwel in de polders rondom het ARK is zeer beperkt (zie tabel B7.5). Dit is logisch aangezien de scheidende laag hier grotendeels ontbreekt. De resultaten van scenarioberekeningen aan het ARK met de ARK-modellen worden daarom niet beïnvloed door deze parameter. Dat blijkt ook uit analyse van de 20 beste berekeningen voor de kwelflux (figuur B7.27). De kwelfluxen in de polders rondom het ARK zijn dus ongevoelig voor deze parameter.

Echter, bij de ijking van het AGV-model (waarop het ARK-model is gebaseerd) is de waarde van de sdl-6 handmatig gejikt op kwel in de Bethunepolder (waar de sdl-6 prominent aanwezig is). Verlaging van de sdl-6 zou daarom gaan leiden tot aanzienlijke veranderingen in de berekende kwel in de Bethunepolder waardoor aanpassing van deze parameter niet realistisch wordt geacht en daarbij is het ook niet nodig voor de resultaten van het grondwatermodel in het interessegebied.



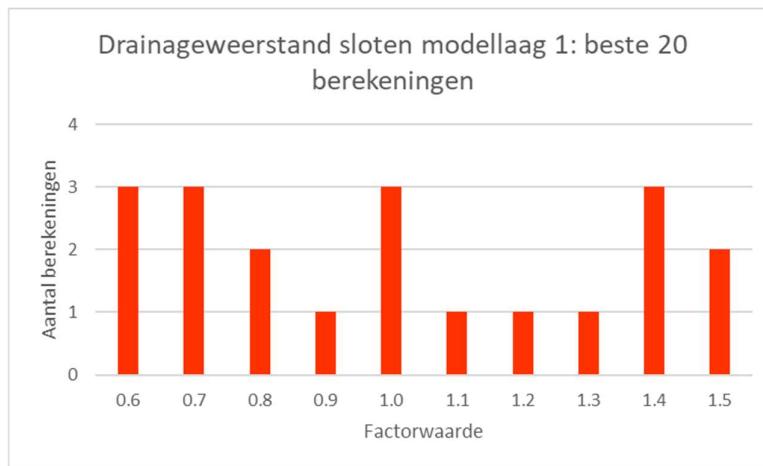
Figuur B7.26: Resultaat weerstand sdl 6 – beoordeling voor stijghoogte.



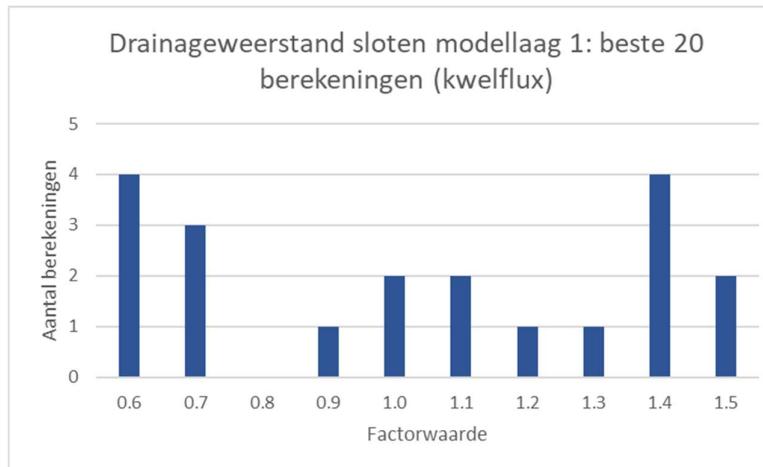
Figuur B7.27: Resultaat weerstand sdl 6 – beoordeling voor netto kwelflux.

7.3.3.9 Drainageweerstanden sloten modellaag 1

Figuur B7.28 en B7.29 laten de verdelingen van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de drainageweerstanden van de sloten in modellaag 1 wanneer wordt beoordeeld op resp. de stijghoogte of de kwelfflux. De drainageweerstand van de sloten in modellaag 1 lijkt geen gevoelige parameter voor de berekening. De spreiding in de factorwaarde is groot: zowel voor de stijghoogten als de kwel en het gemiddelde zit in beide gevallen rond de factor 1. Ook op basis van de individuele gevoelighetsberekeningen (tabellen B7.4 en B7.5) blijkt dat de parameter ongevoelig is. Dit geeft geen aanleiding om de initiële parameterwaarde in het basismodel aan te passen.



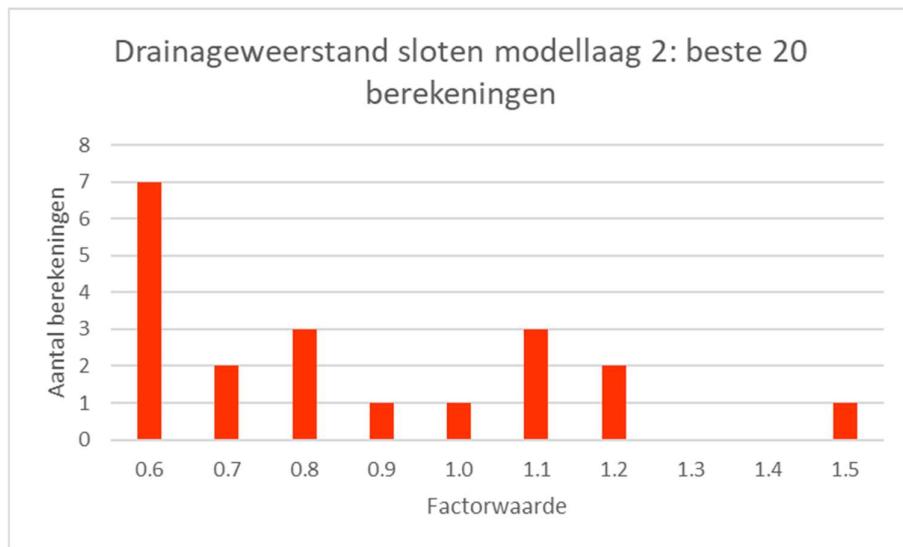
Figuur B7.28: Resultaat weerstand sloten modellaag 1 – beoordeling voor stijghoogte.



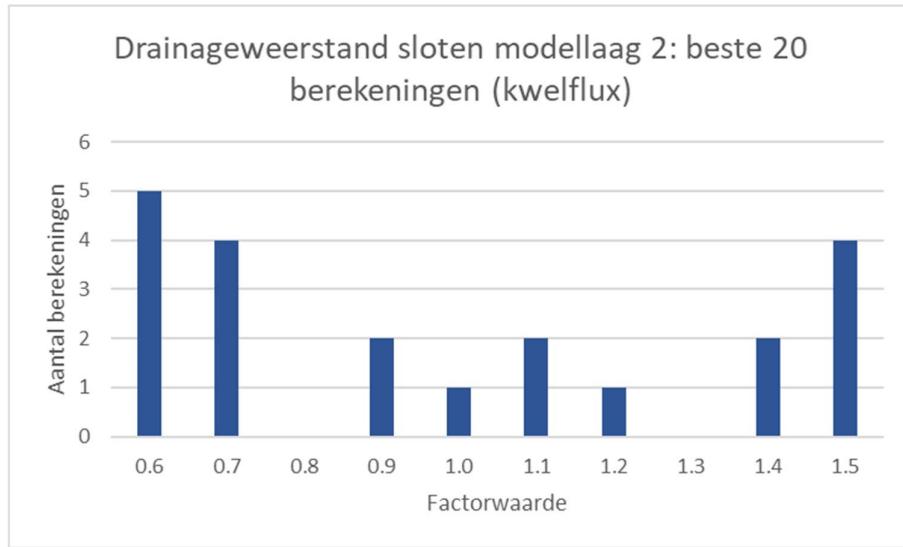
Figuur B7.29: Resultaat weerstand sloten modellaag 1 – beoordeling voor netto kwelfflux.

7.3.3.10 Drainageweerstanden sloten modellaag 2

Figuur B7.30 en B7.31 laten de verdelingen van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de drainageweerstanden van de sloten in modellaag 2 wanneer wordt beoordeeld op resp. de stijghoogte of de kwelfflux. De drainageweerstand van de sloten in modellaag 2 lijkt geen gevoelige parameter voor de berekening. De factorwaardes zitten voor de stijghoogten aan de linkerkant van het spectrum 0.5-1.5 met een gemiddelde van 0.8, echter doordat de spreiding zo groot is kan hieruit geen duidelijke richting worden afgeleid. Voor de kwel zit het gemiddelde rond de factor 1. Op basis van de individuele gevoeligheidsberekeningen (tabellen B7.4 en B7.5) blijkt ook dat de parameter ongevoelig is. Dit alles geeft geen aanleiding om de initiële parameterwaarde in het basismodel aan te passen.



Figuur B7.30: Resultaat weerstand sloten modellaag 2 voor de historische situatie– beoordeling voor stijghoogte.



Figuur B7.3124: Resultaat weerstand sloten modellaag 2 voor de historische situatie– beoordeling voor netto kwelfflux.

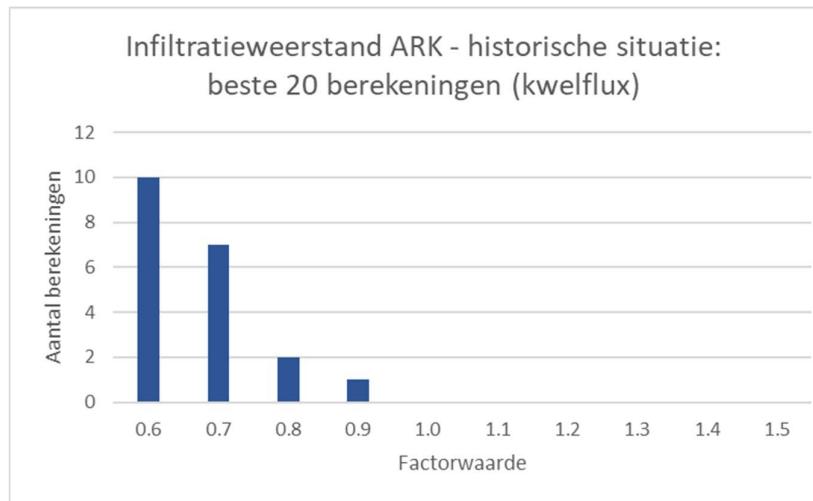
7.3.3.11 Infiltratieweerstand sliblaag ARK – historische situatie

Figuren B7.32 en B7.33 laten de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de infiltratieweerstand sliblaag van het ARK in de historische situatie wanneer wordt beoordeeld op resp. de stijghoogte of kwelflux. Dit blijkt een gevoelige parameter voor de berekening. De gevoeligheid blijkt ook uit tabellen B7.4 en B7.5: daaruit blijkt dat de historische infiltratieweerstand van het ARK de één na gevoeligste parameter is op de kwel, en ook relatief gevoelig op de stijghoogte.

De gemiddelde factorwaarde uit de beste Monte Carlo berekeningen is voor de stijghoogten 0.9, met een spreiding tussen de 0.8 en 1.2. De gemiddelde factorwaarde voor de kwelfluxen is 0.6, met een spreiding tussen de 0.5 en 0.9 en mogelijk een lagere waarde. Op basis van zowel de stijghoogten als de kwel lijkt de infiltratieweerstand van het ARK in de historische situatie te kunnen worden verlaagd. Het beeld is echter niet helemaal consistent: de mate van parameter aanpassing is namelijk groter wanneer wordt beoordeeld op basis van kwel als wanneer wordt beoordeeld op stijghoogte. Hier zou dus met een handmatige kalibratie moeten worden gezocht naar een optimum.



Figuur B7.32: Resultaat infiltratieweerstand sliblaag ARK voor de historische situatie– beoordeling voor stijghoogte.

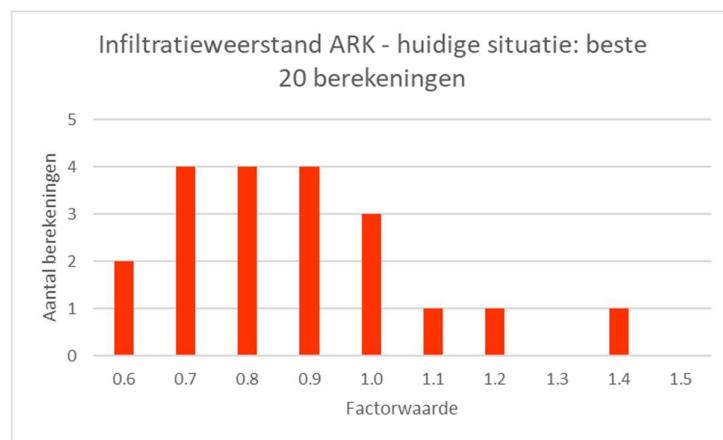


Figuur B7.33: Resultaat infiltratieweerstand sliblaag ARK voor de historische situatie– beoordeling voor netto kwelflux.

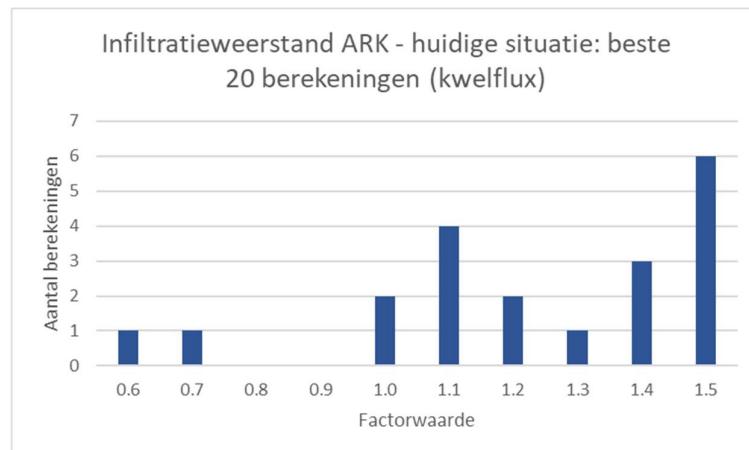
7.3.3.12 Infiltratieweerstand sliblaag ARK – huidige situatie

Figuur B7.34 laat de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de infiltratieweerstand van de sliblaag in het ARK in de huidige situatie wanneer wordt beoordeeld op de stijghoogte en figuur B7.35 wanneer wordt beoordeeld op de kwelflux. De infiltratieweerstand is een redelijk gevoelige parameter, op basis van tabellen B7.4 en B7.5 blijkt dit ook. Ten opzichte van de overige modelparameters is de infiltratieweerstand van het ARK echter niet bijzonder gevoelig. De observatie dat de gevoeligheid van de historische infiltratieweerstand groot is, terwijl deze voor de huidige infiltratieweerstand van het ARK relatief beperkt is kan worden verklaart door het feit dat de effectieve weerstand onder het ARK wordt beïnvloed door een combinatie van weerstanden (sliblaagweerstand, resterende deklaagweerstand en de anisotropie van de formatie van Boxtel). In het ARK2000 model neemt de weerstand van het ARK (70 dagen in de uitgangssituatie) het grootste aandeel in de totale weerstand voor zijn rekening. Daarmee is deze parameter dominant over de overige weerstanden. In het ARK2020-opgebarsten model is de weerstand nog slechts 1 dag waardoor de overige weerstandsparameters dominant worden, met name de verticale anisotropie van de formatie van Boxtel (zie paragraaf 7.3.3.7).

Op basis van de stijghoogten lijkt de infiltratieweerstand wat lager te kunnen (gemiddelde factor 0.8) terwijl deze op basis van de kwelflux juist hoger lijkt te moeten (gemiddelde factor 1.2). Het is echter wel duidelijk dat de initiële inschatting van een weerstand van 1 dag qua ordegrootte juist is: de Monte Carlo analyse duikt namelijk niet geheel in een hoek en de spreiding is breed. Aanpassing van deze parameter in het model op basis van de enkel resultaten van deze Monte Carlo analyse wordt daarom niet als doelmatig beoordeeld.



Figuur B7.34: Resultaat infiltratieweerstand sliblaag ARK voor de huidige situatie– beoordeling voor stijghoogte.



Figuur B7.35: Resultaat infiltratieweerstand sliblaag ARK voor de huidige situatie– beoordeling voor netto kwelflux.

7.3.3.13 Weerstand sloten na opbarsten

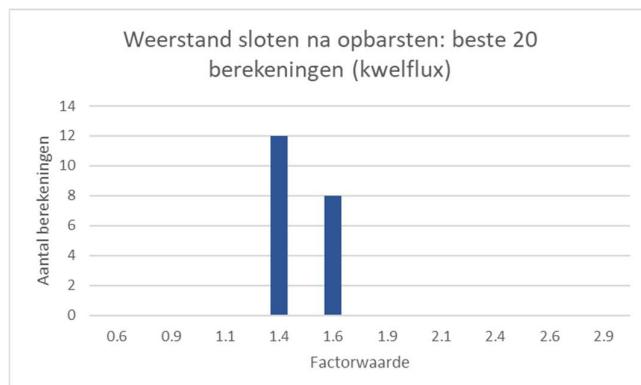
Figuren B7.36 en B7.37 laten de verdeling van de factorwaarde binnen de 20 beste Monte Carlo berekeningen zien voor de weerstand van de poldersloten na het opbarsten voor de beoordeling op resp. de stijghoogten als de kwelflux. De weerstand na opbarsten is duidelijk een gevoelige parameter voor het model: er is een kleine bandbreedte rondom de factorwaarden uit de 20 beste berekeningen. Op basis van de resultaten uit de individuele gevoelighetsberekeningen (tabellen B7.4 en B7.5) blijkt ook dat de gevoeligheid voor de kwel zeer groot is, terwijl de gevoeligheid op de gemiddelde modelafwijking van de stijghoogtes relatief beperkt is. Dit wil echter niet zeggen dat de peilbuizen lokaal wel degelijk sterk door deze parameter kunnen worden beïnvloed, je ziet dit alleen niet duidelijk terug in de statistiek voor het gehele model.

Het beeld dat ontstaat lijkt qua richting gelijk aan het beeld van de infiltratie weerstand sliblaag van het ARK: op basis van beoordeling op stijghoogten lijkt de parameter lager te moeten worden ingesteld terwijl die op basis van de kwel juist hoger moet (het ARK2020-opgebarsten model berekent immers teveel kwel). De relatieve gevoeligheid van de weerstand van de sloten is echter significant groter dan de gevoeligheid van de infiltratie weerstand van het ARK. Dit komt echter ook doordat er wordt gewerkt met vermenigvuldigingsfactoren. In het geval van de infiltratie weerstand van het ARK is een factor 1.5 een verhoging van de weerstand van 0.5 dag. In het geval van de weerstand van de sloten na opbarsten is diezelfde factor ca. 5 dagen. Daarmee is de weerstandsverandering met dezelfde factorwaarde niet gelijk. Tenslotte wordt de totale infiltratie weerstand onder het ARK niet enkel vertegenwoordigd door de slijtage weerstand maar door de som van de slijtage weerstand, resterende deklaag weerstand en de verticale anisotropie in de formatie van Boxtel. Het aandeel van de slijtage weerstand is daarin echter zodanig klein geworden dat de weerstand van de sloten na opbarsten significant gevoeliger is geworden.

De weerstand van de sloten na het opbarsten zou moeten worden verhoogd in het ARK2020-opgebarsten model. De parametergevoeligheid op de berekende kwel is zeer groot en door aanpassing van de parameter kan de berekende kwel significant worden verbeterd.



Figuur B7.36: Resultaat drainageweerstand sloten na opbarsten – beoordeling voor stijghoogte.



Figuur B7.37: Resultaat drainageweerstand sloten na opbarsten – beoordeling voor netto kwelflux.

7.4 Mogelijkheden voor modelverbetering

7.4.1 Algemeen

De resultaten van de Monte Carlo analyse geven aan dat de statistieken van de berekende stijghoogte voor beide modellen al zeer goed zijn en nauwelijks kunnen worden verbeterd. Er is wel modelverbetering mogelijk wanneer wordt gefocust op de berekende kwel. Deze verbeteringen worden besproken in paragraaf B7.4.3. Er zijn echter een aantal dingen waar rekening mee moet worden gehouden, namelijk de beoordeling van de modelperformance (qua stijghoogte én kwel) en parameter correlatie. Deze zaken worden besproken in de volgende paragrafen.

7.4.2 Correlaties in het model

Op basis van de Monte Carlo analyse lijken er twee belangrijke correlaties in het grondwatersysteem van het ARK naar voren gekomen:

- Correlaties tussen de verschillende weerstanden die aanwezig zijn onder het ARK.
- Correlaties tussen de infiltratieweerstand onder het ARK en de drainageweerdstand na opbarsten van de poldersloten

Een beschouwing op deze correlaties en de implicaties daarvan op de modellering worden hieronder gegeven.

Correlaties weerstanden onder het ARK

De effectieve weerstand tegen infiltratie van water uit het ARK richting het watervoerende pakket is een combinatie van drie deelweerstanden:

- De weerstand van de sliblaag op de bodem (70 dagen in het ARK2000 model, 1 dag in het ARK2020-opgebarsten model).
- De resterende deklaagweerdstand (nagenoeg overal afwezig i.v.m. doorsnijding, maar soms lokaal nog 50-75 dagen weerstand).
- De verticale anisotropie van de formatie van Boxtel (2-5 dagen, afhankelijk van dikte formatie van Boxtel).

Omdat er nagenoeg geen doorstroomde laagdikte tussen deze drie weerstanden aanwezig is, is het te verwachten dat er een grote mate van correlatie bestaat tussen deze parameters. Uit de gevoeligheidsanalyse bleek dat de weerstand van de sliblaag op de ARK-bodem een gevoelige parameter was in het ARK2000 model, maar veel minder in het ARK2020-opgebarsten model. Precies hetzelfde kwam naar voren voor de verticale anisotropie van de formatie van Boxtel. Deze is juist ongevoelig in het ARK2000 model en zeer gevoelig in het ARK2020-opgebarsten model. Deze verschillen zijn te verklaren uit de relatieve grootte van deze parameters en de factor waarmee deze parameters mogen variëren in de Monte Carlo analyse. De sliblaagweerdstand in het ARK2000 model is veruit de grootste van de drie en mag met een factor 1.5 variëren. Deze parameter zal dus domineren ten opzichte van de meestal veel kleinere restweerdstand deklaag en verticale anisotropie. Dit geeft aan dat bij beschouwing van gevoeligheid van de restweerdstand onder het ARK rekening moet worden gehouden met de onderlinge verhoudingen tussen de deelweerstanden.

De Monte Carlo-analyse van het ARK2000 model geeft aan dat de weerstand onder het ARK omlaag zou moeten, dit kwam tot uiting in de sliblaagweerdstand en het is daarom ook aan te raden om deze weerstandswaarde te verlagen. De Monte Carlo analyse van het ARK2020-opgebarsten model geeft aan dat de weerstand onder het ARK wat omhoog zou moeten, dit kwam tot uiting in de verticale anisotropie van de formatie van Boxtel maar in de praktijk gaat het erom dat de weerstand onder het ARK in het ARK2020-opgebarsten model wat hoger moet. Het is niet logisch deze benodigde extra weerstand van ARK in de anisotropie van de formatie van Boxtel te verwerken. Dit leidt immers ook weer tot een hogere weerstand in het ARK2000 model (dat model hanteert dezelfde geohydrologische laagopbouw waardoor de formatie van Boxtel dan daar ook moet worden aangepast). Daarnaast is het hydrogeologisch gezien niet waarschijnlijk dat de verticale anisotropie dan enkel onder het ARK moet worden verhoogd, de anisotropiefactor is immers een kenmerk voor de gehele geologische formatie. Het is echter niet de verwachting dat de weerstand in de gehele modellaag moeten worden opgehoogd. Hierboven is reeds betoogd dat de verschillende weerstanden onder het ARK in gezamenlijkheid moeten worden beschouwd en in feite dus uitwisselbaar zijn. Daarom wordt aangeraden de weerstandsverhoging die is geïdentificeerd voor de anisotropie van Boxtel toe te kennen aan de sliblaagweerdstand van het ARK.

Correlaties infiltratieweerstand ARK – drainageweerstand poldersloten na opbarsten

Voor de kwel geldt dat sprake is van een positieve correlatie tussen infiltratieweerstand ARK en drainageweerstand van poldersloten. Verhoging van infiltratieweerstand van het ARK leidt tot een vermindering van de infiltratie, dus een geringere hoeveelheid kwel in de omliggende polders. Verhoging van de drainageweerstand van de poldersloten leidt ook tot een vermindering van de kwel.

Voor de stijghoogte geldt echter dat er een negatieve correlatie tussen deze twee modelparameters is: verhoging van de infiltratieweerstand van het ARK leidt tot een verlaging van de stijghoogte (er komt dan minder water het systeem binnen, hetgeen leidt tot minder waterdruk) en een verhoging van de drainageweerstand van de poldersloten leidt juist tot een verhoging van de stijghoogte (er is dan immers minder drukontlasting).

Het is dus van groot belang om beide aspecten (veranderingen in stijghoogte én kwel) gelijktijdig in ogenschouw te nemen in de afweging in welke mate deze parameters aangepast moeten worden.

7.4.3 Afweging verbetering kwel versus verbetering stijghoogte

Zoals in voorgaande paragraaf is uitgelegd leidt een verbetering van de kwel niet automatisch ook tot een verbetering van de stijghoogte of omgekeerd. Door beide aspecten (verbetering kwel en stijghoogten) gezamenlijk in de modelkalibratie te beschouwen kan een optimale parameter combinatie worden gevonden.

Hierbij wordt het verkrijgen van een kleinere afwijking in de berekende kwel van een polder zwaarder gewogen dan een verbetering in de stijghoogten van een beperkt aantal filters in deze polders.

7.4.4 Voorgestelde modelverbetering

Historische model (ARK2000)

De berekende kwel in het basismodel is in alle polders aan de lage kant. Dit zou op basis van de Monte Carlo analyse kunnen worden verbeterd door verlaging van de infiltratieweerstand van het ARK. Daarbij geldt wel dat er een grens is aan het verlagen van de infiltratieweerstand van het ARK. Wordt de weerstandswaarde te laag dan zullen de stijghoogtes in en rond het ARK te hoog worden terwijl dit niet zichtbaar wordt in de algemene stijghoogtestatistieken. Hiermee moet dus rekening worden gehouden in een handmatige kalibratie op deze parameter.

Huidige model (ARK2020-opgebarsten)

De berekende kwel is in het basismodel voor alle polders te hoog. Dit zou op basis van de Monte Carlo analyse kunnen worden verbeterd door verhoging van de drainageweerstand van de sloten in modellaag 2 (na opbarsten). Belangrijk hierbij is echter opnieuw dat de stijghoogtes mogelijk lokaal kunnen verslechteren waardoor er een grens is aan de verhoging van deze weerstand.

De weerstand van het ARK in de huidige situatie bleek ook gevoelig, zij het niet zo gevoelig als de weerstand van de opgebarsten sloten. Zoals besproken in paragraaf B7.4.2. moet de verhoging van de weerstand onder het ARK worden doorgevoerd in de parameter voor de sliblaagweerstand. Waarschijnlijk leidt aanpassing van zowel de weerstand van de sloten na opbarsten én de weerstand onder het ARK tot een evenwichtig resultaat in de berekende stijghoogte en kwel.

7.5 Conclusies

De gevoelighetsanalyse heeft inzicht gegeven in de gevoeligheid van een groot aantal modelparameters, zie onderstaande tabel B7.6.

1. Een aantal parameters zijn ongevoelig gebleken, zowel op stijghoogte als berekende kwel. Dit betekent dat aanpassing daarvan niet doelmatig is.
2. Verder zijn er ook een aantal parameters zeer gevoelig gebleken. Wanneer deze echter werden beoordeeld op zowel stijghoogte als kwel dan bleek dat deze in het initiële model al goed waren ingeschat waardoor aanpassing niet tot verdere modelverbetering zal leiden.
3. De drainageweerstand van de poldersloten na opbarsten en de infiltratieweerstand van de sliblaag van het ARK blijken gevoelige parameters waarbij aanpassing mogelijk zou kunnen leiden tot modelverbetering.

Tabel B7.6: Resultaten Monte Carlo analyse voor individuele parameters

Parameter	Resultaat Monte Carlo analyse
k-waarde deklaag	Ongevoelig
k-waarde formatie van Boxtel	Ongevoelig
k-waarde watervoerende pakket	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat
Deklaagweerstand in de polders rondom het ARK.	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat.
Deklaagweerstand onder het ARK	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat.
Verticale anisotropie Boxtelzand	Ongevoelig in het ARK2000 model, gevoelig in het ARK2020-opgebarsten model
Weerstand sdl 6	Gevoelig, maar initieel goed ingeschat.
Drainageweerstand sloten in modellaag 1 in polders ARK.	Ongevoelig
Drainageweerstand sloten in modellaag 2 in polders - vóór opbarsten,	Ongevoelig
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - historische situatie	Gevoelig, parameter aanpassing mogelijk
Infiltratieweerstand sliblaag ARK - huidige situatie.	Gevoelig, parameter aanpassing mogelijk
Weerstand sloten na opbarsten	Gevoelig, parameter aanpassing mogelijk

Wanneer de statistiek van de stijghoogen wordt bekeken dan blijkt er voor de stijghoogen geen significante verbetering van de grondwatermodellen haalbaar. De maximaal haalbare verbetering in de gemiddelde absolute afwijking is 1 cm. Dit geldt zowel voor het model van de historische situatie (ARK2000) als het model van de huidige situatie (ARK2020-opgebarsten).

Op basis van de analyses van de berekende kwelflux blijkt dat er voor zowel het huidige als historische model wel verbetering mogelijk is. Nadere beschouwing van de parameters die gevoelig zijn gebleken in de Monte Carlo analyse wijzen uit dat:

1. De berekende kwel in historische model te laag is. Dit kan worden verbeterd door middel van het verlagen van de infiltratieweerstand van het ARK.
2. De berekende kwel in het huidige model te hoog is. Dit kan worden verbeterd door een combinatie van het verhogen van de drainageweerstand van de poldersloten na opbarsten en het verhogen van de weerstand van het ARK, in dit geval de infiltratieweerstand van de sliblaag.
3. De infiltratieweerstand ARK en drainageweerstand poldersloten kunnen door beschouwing van verbeteringen in zowel kwel als stijghoogen geoptimaliseerd worden.
4. De weerstand van het ARK is opgebouwd uit drie verschillende weerstandbiedende onderdelen. Deze kunnen enkel in samenhang kunnen worden geanalyseerd:
 - De sliblaag op de bodem van het ARK.
 - De deklaagweerstand die her en der nog resteert sinds de verdieping van het kanaal omstreeks 1980.
 - De anisotropie in de formatie van Boxtel.

De weerstandsveranderingen die sinds 2000 zijn opgetreden op de bodem van het ARK moeten worden verwerkt in de modelparameter van de infiltratieweerstand van de sliblaag.

Bijlage 8: analysecertificaten chloridemetingen grondwater

Analyserapport



Waternet, TOP
Bodem- en Geotechniek
T.a.v. de heer F.P. Otten
Postbus 94370
1090 GJ AMSTERDAM

Datum:
07-07-2021

Rapportnummer:
386089

Uw Kenmerk:
275013

Project:
dooea001/1171, Ark

Monstername door:
Opdrachtgever

Uw projectcode:
09.0005/00

Geachte heer Otten,

Hierbij zend ik u de resultaten van analyses die op uw verzoek werden uitgevoerd.
Deze resultaten hebben alleen betrekking op de monsters, zoals die door u ter analyse werden aangeboden.

De werkzaamheden zijn, tenzij anders aangegeven, uitgevoerd overeenkomstig het document 'Producten en dienstencatalogus Stichting Waterproof'. Belangrijk voor de interpretatie van de resultaten is het gegeven dat analyseresultaten altijd een meetonzekerheid bezitten. Gegevens over de analysemethoden en meetonzekerheden worden u op aanvraag toegezonden.

De met Q gemerkte analyses zijn op basis van NEN-EN ISO/IEC 17025 geaccrediteerd door de Raad voor Accreditatie.

De verklaring van accreditatie van Stichting Waterproof en het hierbij behorende keurmerk zijn uitsluitend van toepassing op de activiteiten, zoals vastgelegd op het overzicht van verrichtingen en de overdracht van de monsters, aan een erkende instelling.

Dit rapport mag niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.

De resultaten op dit rapport zijn geautoriseerd door de directeur van Stichting Waterproof E . van Oorsouw



Waterproof, laboratorium voor onderzoek van water en bodem.
Dijkgraaf Poschlaan 6 - 1135 GP Edam
T 0299 39 17 00 - klantenservice@waterproof.nl



Rapportnummer:

386089

Pagina

2 / 3

Volgnummer	Puntcode	Monsteromschrijving*
625885	gwwn0001	Grondwater 1
625886	gwwn0001	Grondwater B250G0390.3-1

Volgnummer	625885	625886
Monstercode klant*	79119391	79119390
Monsterpuntcode klant*	-	-
Monstertype*	Grondwater	Grondwater
Monstertype klant*	44	44
Bemonsteringstype*	steekmonster	steekmonster
Monsternemer*	Monstername klant	Monstername klant
Monstername datum*	05-07-2021	05-07-2021
Monstername tijd*	00:00	00:00
Acceptatiедatum	05-07-2021	05-07-2021

Fysisch- Chemische analyses			Eenheid
Chloride	Q	250	mg/l Cl



Rapportnummer:

386089

Pagina

3 / 3

Methodeverwijzingen

Fysisch-Chemische analyses in grondwater

Chloride

Conform

NEN ISO 15923-1

Bijlage 9: Veld en laboratoriumonderzoek bodem en grondwater

Situatietekeningen

•

-
- 09.0005-004 Polders Baambrugge Oostzijds en Hoeker-Garsten



K9

Kanaaldijk West

L9

L090022A/C

L090023A/C

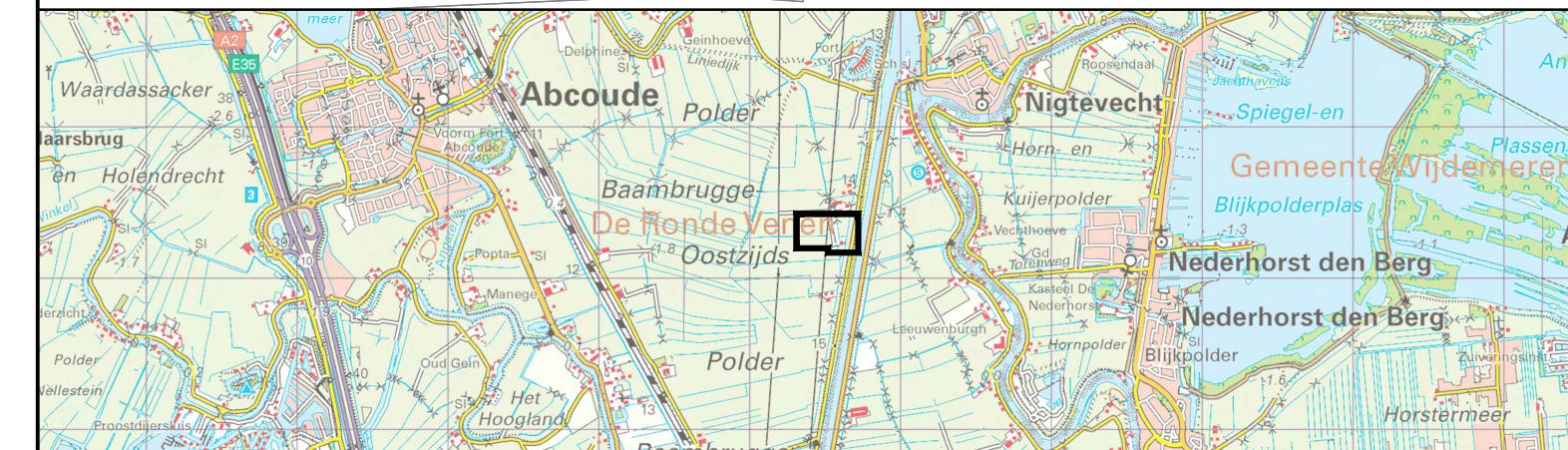
L090024A/C

LEGENDA

Boring met A- en C-filter

Getekend: P.Th. Carrière	Datum: 28-02-2020	Projectleider: G.J. in 't Veld	Gecontroleerd: G.J. in 't Veld	Status: DEFINITIEF
Opdrachtgever: Watersysteem	Projectnummer: 09.0005-004	Besteknr.	Formaat: A3	Schaal: 1:1000
Project: Polder Baambrugge Oostzijds				
Onderwerp: Situering peilfilters				

waternet
waterschap amstel gooi en vecht
gemeente amsterdam

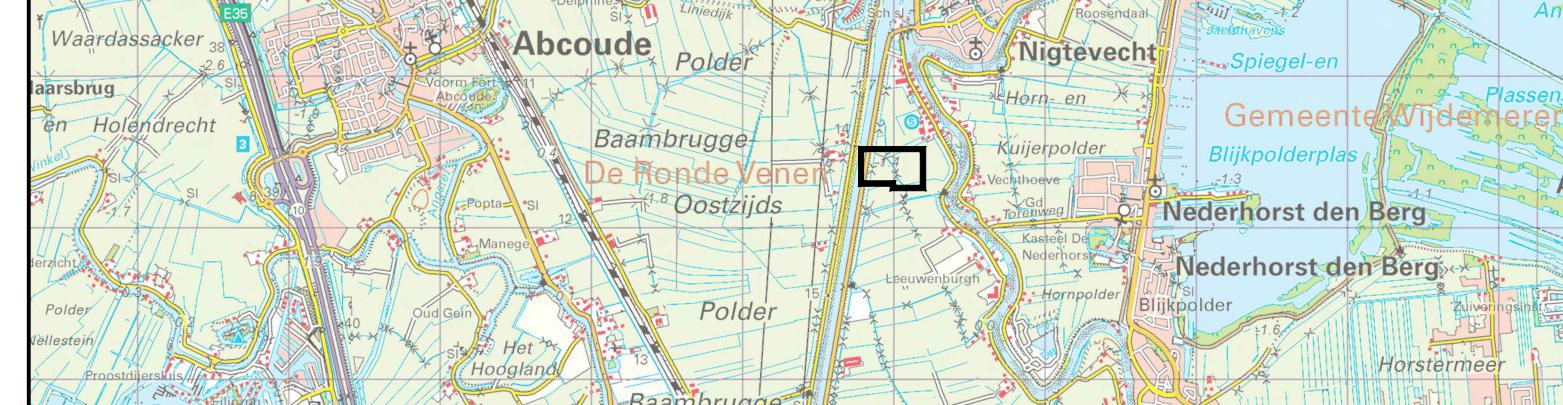




N

K9

L9

**LEGENDA**

Boring met A- en C-filter

Getekend: P.Th. Carrière	Datum: 28-02-2020	Projectleider: G.J. in 't Veld	Gecontroleerd: G.J. in 't Veld	Status: DEFINITIEF
Opdrachtgever: Watersysteem	Projectnummer: 09.0005-004	Besteknr.	Formaat: A3	Schaal: 1:1000
Project: Hoeker-Garsten Polder Onderwerp: Situering peilfilters				
Sector TOP Onderzoek & Advies Korte Ouderkerkerdijk 7 1096 AC Amsterdam tel. 0900-9394				

waternet
waterschap amstel gooi en vecht
gemeente amsterdam

Handboringen

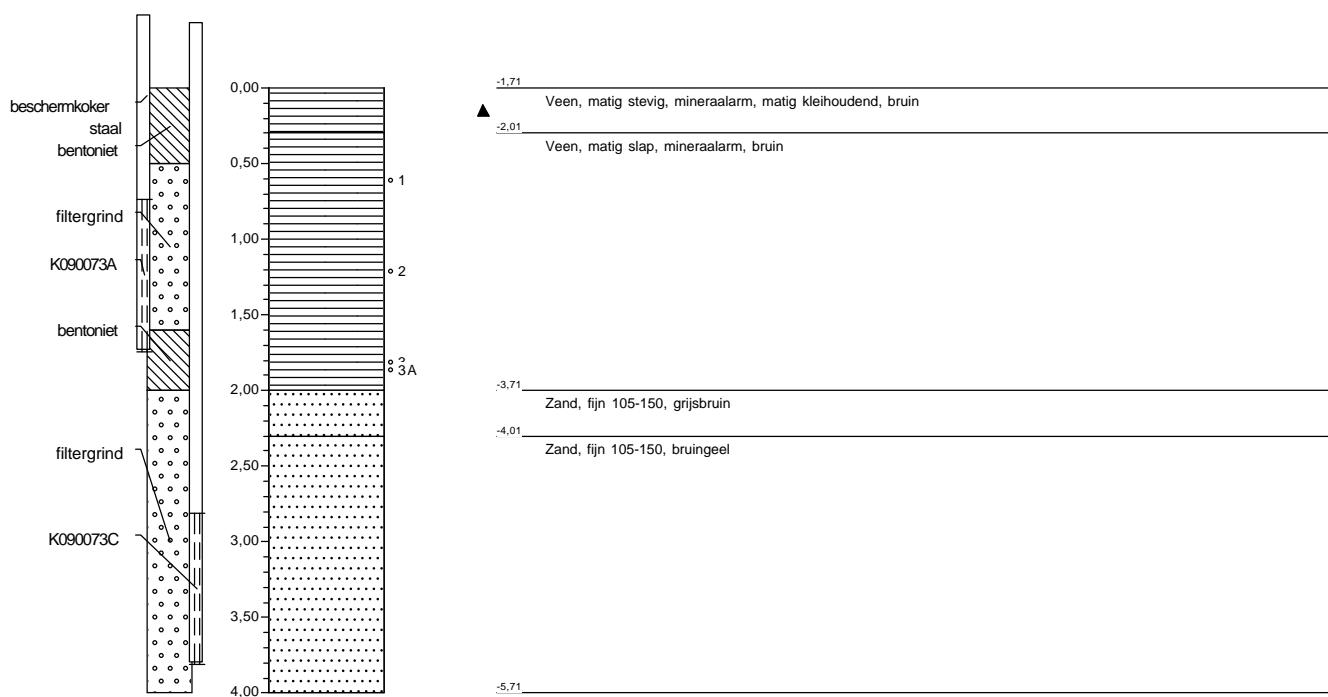
•

K09-73

Type boring: Handboring
Datum uitvoering: 11-2-2020

X-coördinaat: 130107,21
Y-coördinaat: 475453,94

Maaiveld (m t.o.v. N.A.P.): -1,71
Referentievlak: N.A.P.

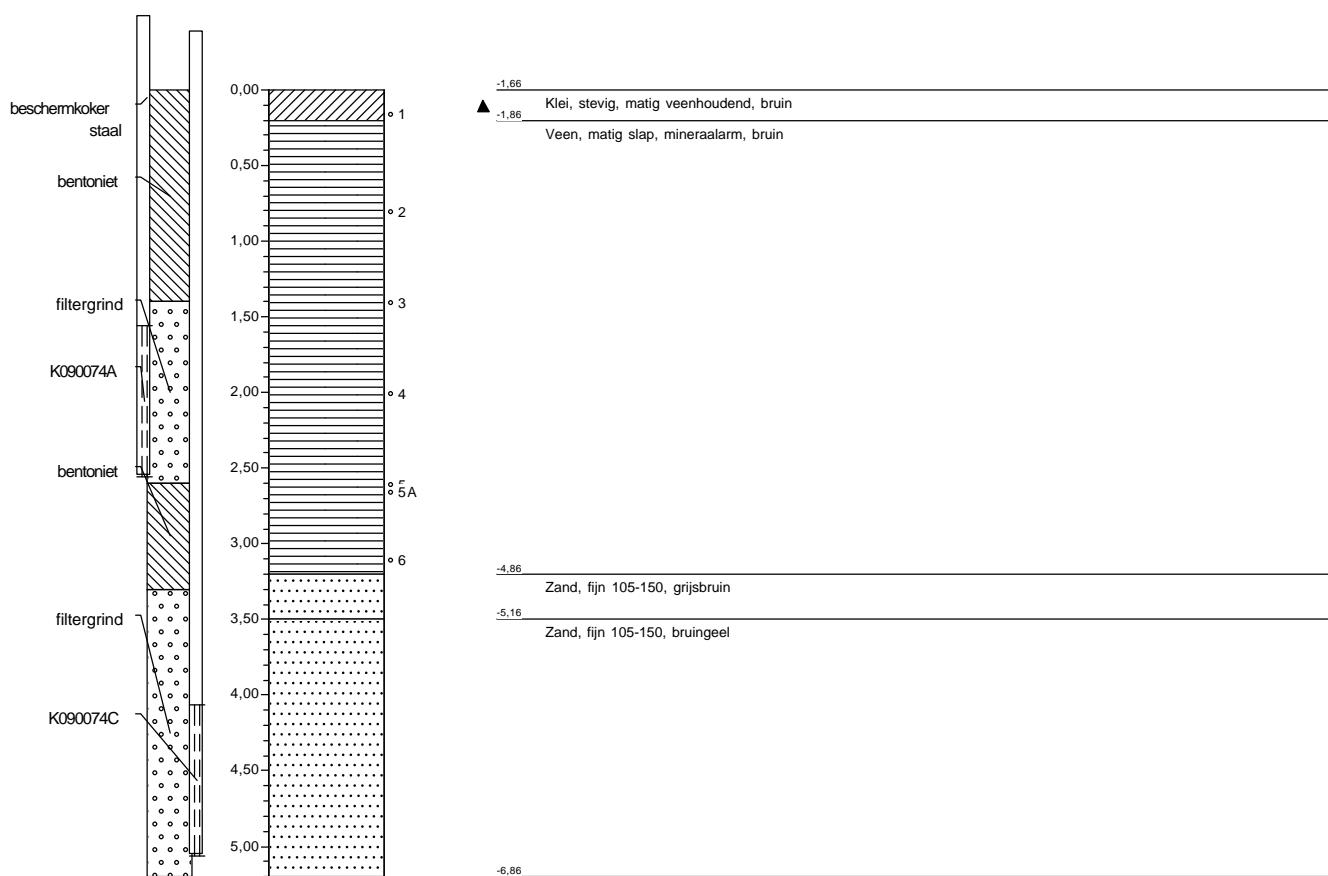


K09-74

Type boring: Handboring
Datum uitvoering: 11-2-2020

X-coördinaat: 129947,70
Y-coördinaat: 475404,49

Maaiveld (m t.o.v. N.A.P.): -1,66
Referentievlak: N.A.P.

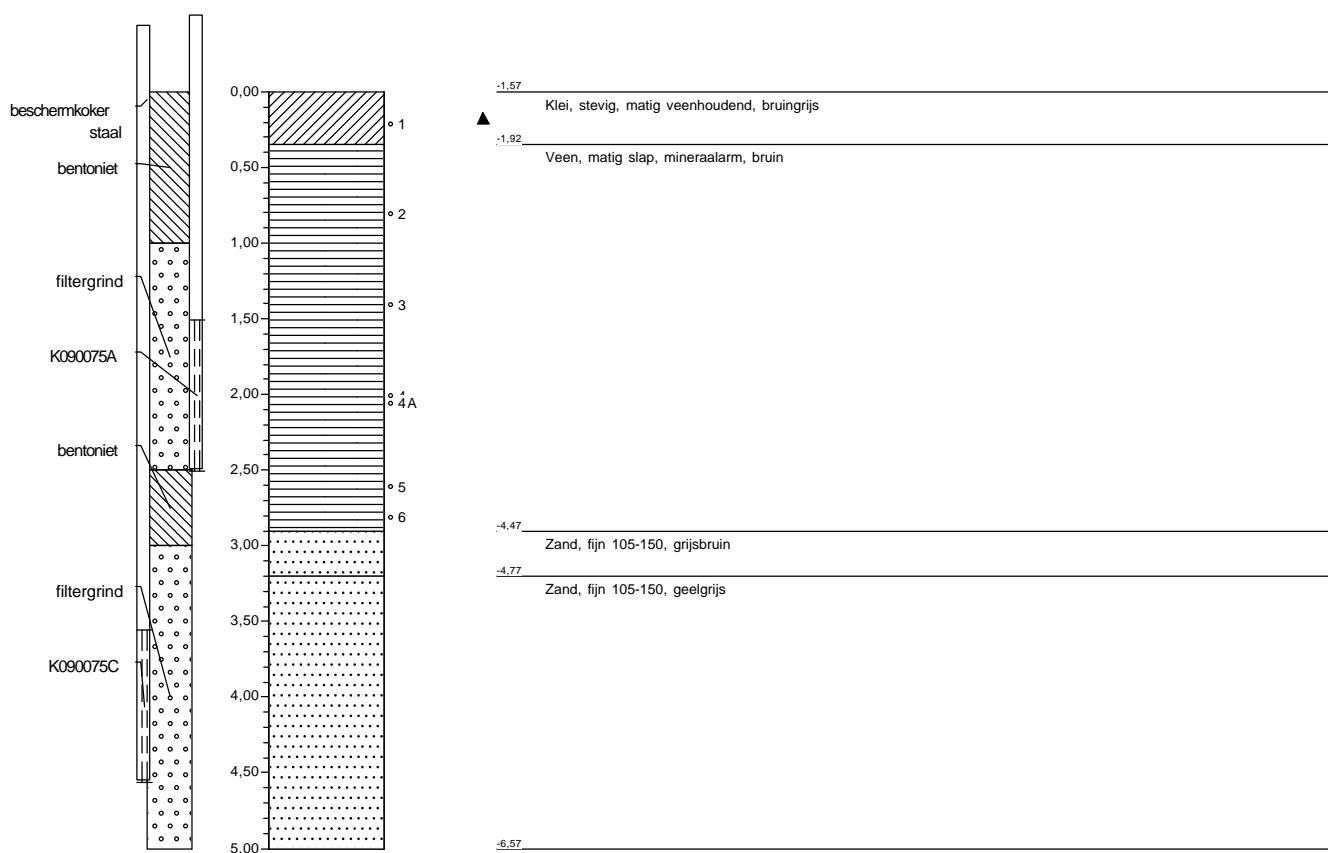


K09-75

Type boring: Handboring
Datum uitvoering: 11-2-2020

X-coördinaat: 129854,99
Y-coördinaat: 475380,82

Maaiveld (m t.o.v. N.A.P.): -1,57
Referentievlak: N.A.P.

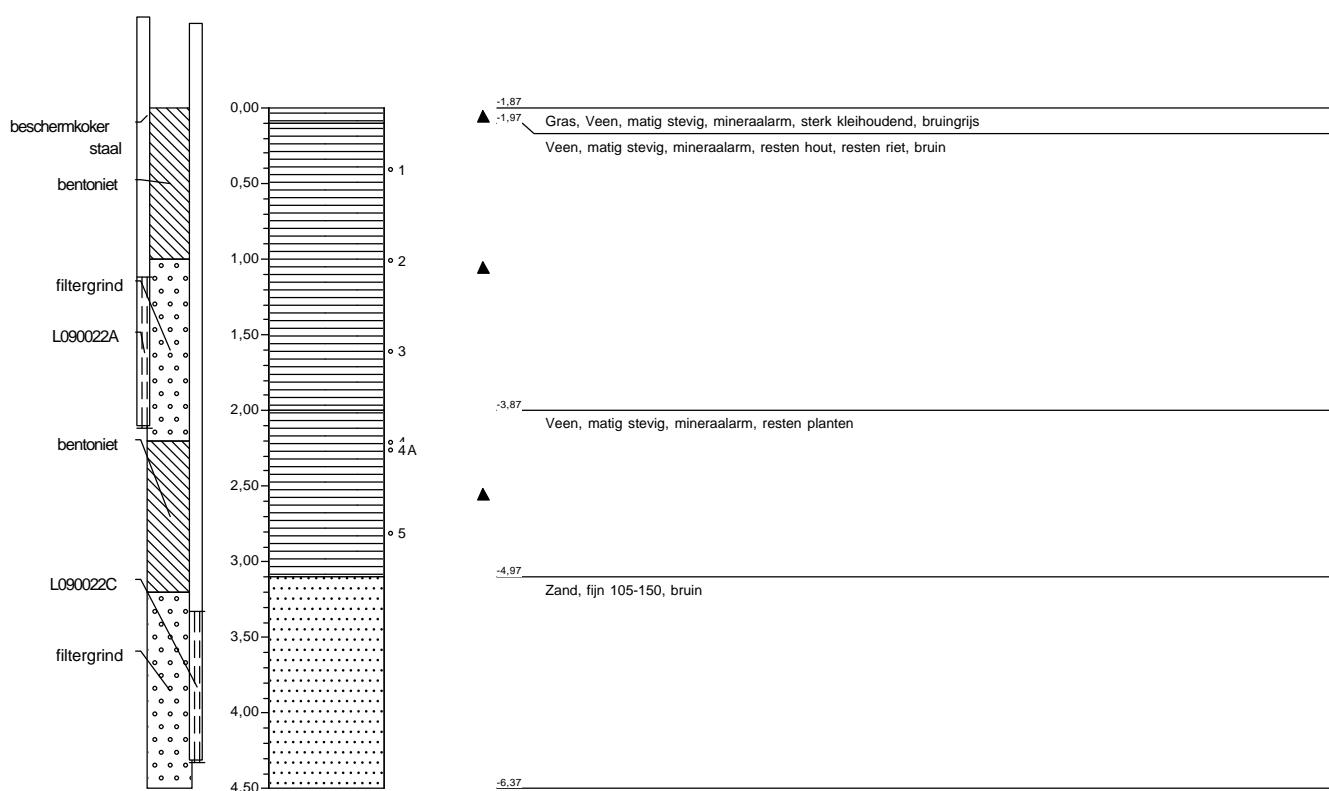


L09-22

Type boring: Handboring
Datum uitvoering: 4-2-2020

X-coördinaat: 129672,42
Y-coördinaat: 475322,29

Maaiveld (m t.o.v. N.A.P.): -1,87
Referentievlek: N.A.P.

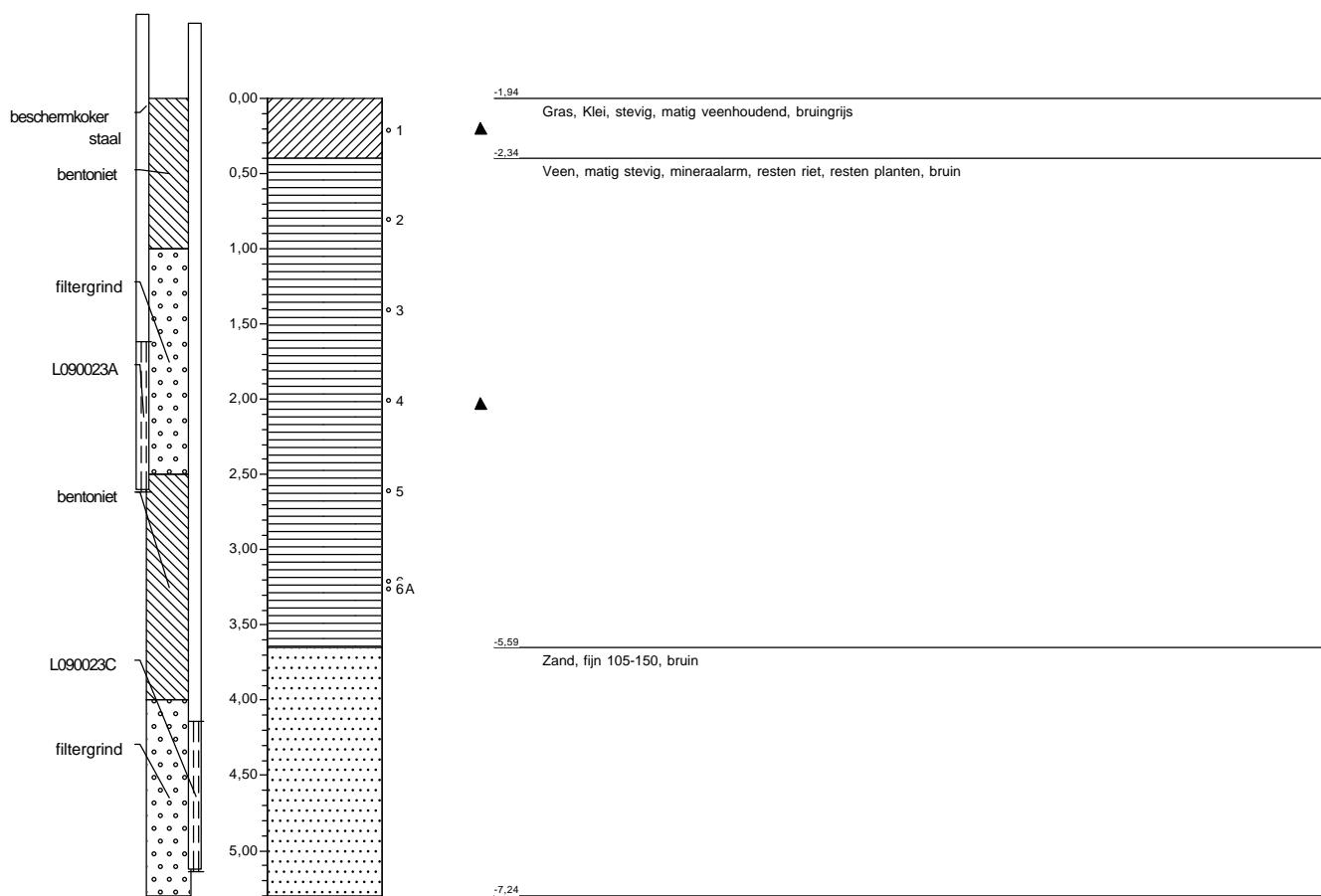


L09-23

Type boring: Handboring
Datum uitvoering: 4-2-2020

X-coördinaat: 129571,91
Y-coördinaat: 475296,43

Maaiveld (m t.o.v. N.A.P.): -1,94
Referentievlak: N.A.P.

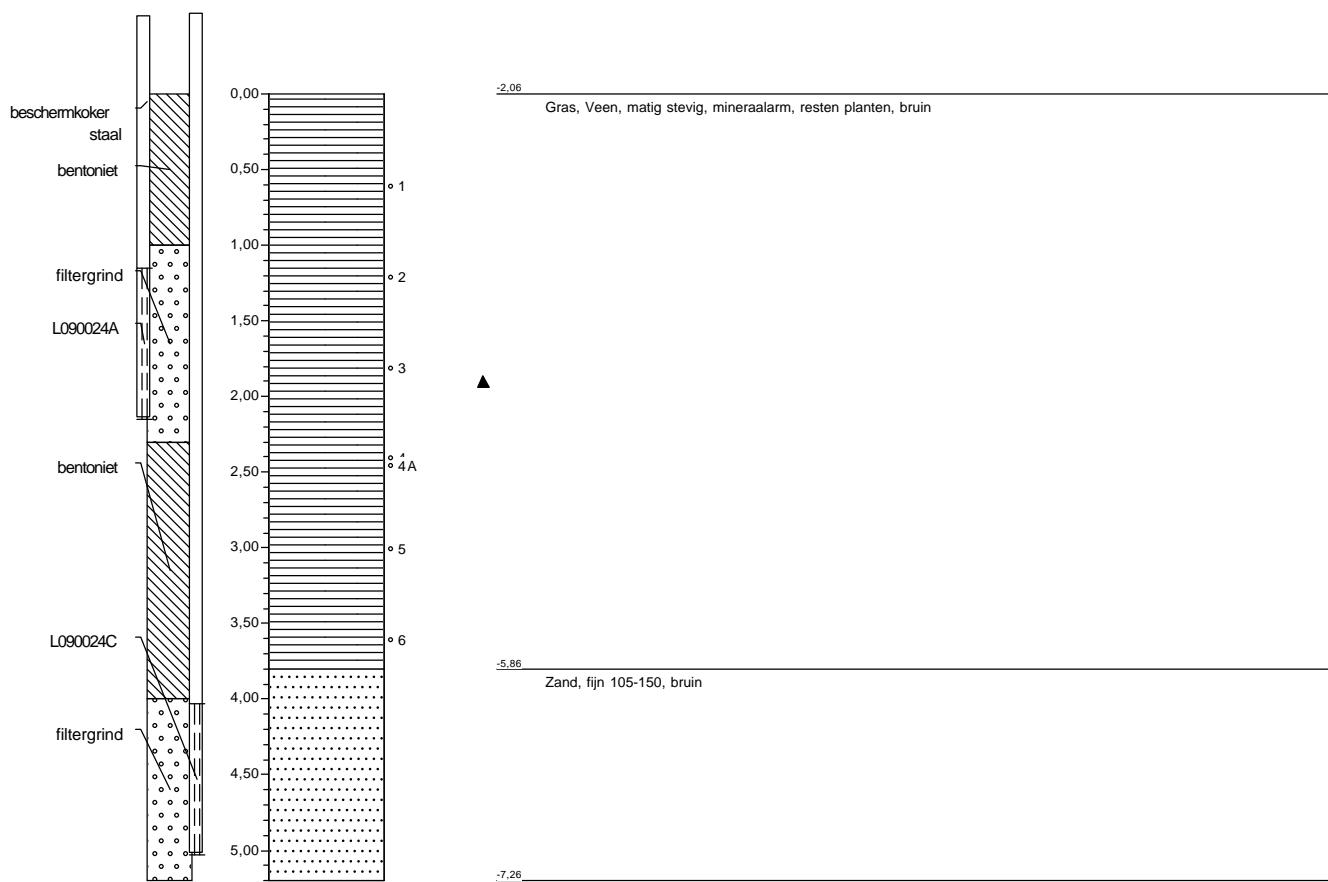


L09-24

Type boring: Handboring
Datum uitvoering: 4-2-2020

X-coördinaat: 129338,73
Y-coördinaat: 475282,22

Maaiveld (m t.o.v. N.A.P.): -2,06
Referentievlak: N.A.P.



Gegevens peilfilters

•

-
- 09.0005-004 Polders Baambrugge Oostzijds en Hoeker-Garsten

09.0005-004 Polders Baambrugge Oostzijds en Hoeker-Garsten

Stijghoogten spanningswater en freatisch grondwater

Tabel 1 Invoer

Filter Invoer	X	Y	Filterniveau beneden BOPB [m-m]	Hoogte mv. t.o.v. NAP [m]	Hoogte BOPB t.o.v. NAP [m]	Meting t.o.v. BOPB [m]
						19-2-2020
K090073A	130107,050	475454,046	1,22 - 2,22	-1,712	-1,230	0,62
K090073C	130107,211	475453,942	3,24 - 4,24	-1,712	-1,279	0,36
K090074A	129947,640	475404,388	2,05 - 3,05	-1,662	-1,168	0,68
K090074C	129947,695	475404,493	4,45 - 5,45	-1,662	-1,265	0,25
K090075A	129854,956	475380,817	2,02 - 3,02	-1,570	-1,058	0,77
K090075C	129854,991	475380,821	4,00 - 5,00	-1,570	-1,133	0,30
L090022A	129672,430	475322,177	1,72 - 2,72	-1,873	-1,269	0,69
L090022C	129672,424	475322,285	3,89 - 4,89	-1,873	-1,308	0,22
L090023A	129571,884	475296,403	2,18 - 3,18	-1,941	-1,380	0,68
L090023C	129571,912	475296,429	4,64 - 5,64	-1,941	-1,438	0,17
L090024A	129338,749	475282,223	1,67 - 2,67	-2,059	-1,542	0,50
L090024C	129338,728	475282,222	4,56 - 5,56	-2,059	-1,531	0,25

Tabel 2 Stijghoogten t.o.v. NAP

Filter	X	Y	Filterniveau beneden BOPB [m-m]	Hoogte mv. t.o.v. NAP [m]	Hoogte BOPB t.o.v. NAP [m]	Stijghoogte t.o.v. NAP [m]
						19-2-2020
K090073A	130107,050	475454,046	1,22 - 2,22	-1,712	-1,230	-1,85
K090073C	130107,211	475453,942	3,24 - 4,24	-1,712	-1,279	-1,64
K090074A	129947,640	475404,388	2,05 - 3,05	-1,662	-1,168	-1,85
K090074C	129947,695	475404,493	4,45 - 5,45	-1,662	-1,265	-1,52
K090075A	129854,956	475380,817	2,02 - 3,02	-1,570	-1,058	-1,83
K090075C	129854,991	475380,821	4,00 - 5,00	-1,570	-1,133	-1,43
L090022A	129672,430	475322,177	1,72 - 2,72	-1,873	-1,269	-1,96
L090022C	129672,424	475322,285	3,89 - 4,89	-1,873	-1,308	-1,53
L090023A	129571,884	475296,403	2,18 - 3,18	-1,941	-1,380	-2,06
L090023C	129571,912	475296,429	4,64 - 5,64	-1,941	-1,438	-1,61
L090024A	129338,749	475282,223	1,67 - 2,67	-2,059	-1,542	-2,04
L090024C	129338,728	475282,222	4,56 - 5,56	-2,059	-1,531	-1,78

BOPB = Bovenkant peilbuis

= ingevoerde waarden

= berekende waarden

Analysecertificaten geotechnisch laboratoriumonderzoek

•

-
- 09.0005-004 Polders Baambrugge Oostzijds en Hoeker-Garsten

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code : 1002438
Project omschrijving : 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever : Waternet

Volumieke massa's e.d. (volgens OMEGAM Lab. methode, gebaseerd op NEN 5781)

Referentie	Hoogte t.o.v. N.A.P. in meter	Vol. massa nat in kg/m ³	Vol.massa droog in kg/m ³	Watergeh. massa fractie	Porositeit volume fractie	Watergeh. volume fractie	Verzadig. graad in %
K09-73.1 (0.60)	-2.31	953	132	6.202		0.821	
K09-73.2 (1.20)	-2.91	965	88	9.925		0.877	
K09-73.3 (1.80)	-3.51	997	79	11.567		0.918	
K09-73.3a (1.85)	-3.56	994	85	10.690		0.909	

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code	: 1002438
Project omschrijving	: 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever	: Waternet

Analysemethoden in Grond

In dit analysecertificaat zijn de met 'Q' gemerkte analyses uitgevoerd volgens de onderstaande analysemethoden. Deze analyses zijn vastgelegd in het geldende accreditatie-certificaat met bijbehorende verrichtingenlijst L086 van Eurofins Omegam BV.

Porositeit	: Eigen methode
Watergeh. massafr.	: Eigen methode
Watergeh. volumefr.	: Eigen methode
Verzadigingsgraad	: Eigen methode
Volumiekemassa droog	: Eigen methode
Volumiekemassa nat	: Eigen methode

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code : 1002436
Project omschrijving : 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever : Waternet

Volumieke massa's e.d. (volgens OMEGAM Lab. methode, gebaseerd op NEN 5781)

Referentie	Hoogte t.o.v. N.A.P. in meter	Vol. massa nat in kg/m ³	Vol.massa droog in kg/m ³	Watergeh. massa fractie	Porositeit volume fractie	Watergeh. volume fractie	Verzadig. graad in %
K09-74.1 (0.15)	-1.81	1264	604	1.093		0.660	
K09-74.2 (0.80)	-2.46	974	134	6.248		0.839	
K09-74.3 (1.40)	-3.06	1002	80	11.525		0.922	
K09-74.4 (2.00)	-3.66	985	88	10.189		0.897	
K09-74.5 (2.60)	-4.26	890	79	10.314		0.811	
K09-74.5A (2.65)	-4.31	833	73	10.355		0.759	
K09-74.6 (3.10)	-4.76	939	77	11.248		0.862	

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code	: 1002436
Project omschrijving	: 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever	: Waternet

Analysemethoden in Grond

In dit analysecertificaat zijn de met 'Q' gemerkte analyses uitgevoerd volgens de onderstaande analysemethoden. Deze analyses zijn vastgelegd in het geldende accreditatie-certificaat met bijbehorende verrichtingenlijst L086 van Eurofins Omegam BV.

Porositeit	: Eigen methode
Watergeh. massafr.	: Eigen methode
Watergeh. volumefr.	: Eigen methode
Verzadigingsgraad	: Eigen methode
Volumiekemassa droog	: Eigen methode
Volumiekemassa nat	: Eigen methode

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code : 1002402
Project omschrijving : 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever : Waternet

Volumieke massa's e.d. (volgens OMEGAM Lab. methode, gebaseerd op NEN 5781)

Referentie	Hoogte t.o.v. N.A.P. in meter	Vol. massa nat in kg/m ³	Vol. massa droog in kg/m ³	Watergeh. massa fractie	Porositeit volume fractie	Watergeh. volume fractie	Verzadig. graad in %
K09-75.1 (0.20)	-1.77	1413	719	0.964		0.693	
K09-75.2 (0.80)	-2.37	1023	163	5.261		0.859	
K09-75.3 (1.40)	-2.97	953	125	6.627		0.828	
K09-75.4 (2.00)	-3.57	977	97	9.072		0.880	
K09-75.4A (2.05)	-3.62	1082	91	10.894		0.991	
K09-75.5 (2.60)	-4.17	976	92	9.612		0.884	
K09-75.6 (2.80)	-4.37	884	84	9.486		0.800	

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code	: 1002402
Project omschrijving	: 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever	: Waternet

Analysemethoden in Grond

In dit analysecertificaat zijn de met 'Q' gemerkte analyses uitgevoerd volgens de onderstaande analysemethoden. Deze analyses zijn vastgelegd in het geldende accreditatie-certificaat met bijbehorende verrichtingenlijst L086 van Eurofins Omegam BV.

Porositeit	: Eigen methode
Watergeh. massafr.	: Eigen methode
Watergeh. volumefr.	: Eigen methode
Verzadigingsgraad	: Eigen methode
Volumiekemassa droog	: Eigen methode
Volumiekemassa nat	: Eigen methode

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code : 997491
Project omschrijving : 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever : Waternet

Volumieke massa's e.d. (volgens OMEGAM Lab. methode, gebaseerd op NEN 5781)

Referentie	Hoogte t.o.v. N.A.P. in meter	Vol. massa nat in kg/m ³	Vol.massa droog in kg/m ³	Watergeh. massa fractie	Porositeit volume fractie	Watergeh. volume fractie	Verzadig. graad in %
L09-22.1 (0.40)	-2.27	1050	96	9.972		0.954	
L09-22.2 (1.00)	-2.87	1005	109	8.252		0.897	
L09-22.3 (1.60)	-3.47	981	107	8.168		0.874	
L09-22.4 (2.20	-4.07	1030	112	8.221		0.918	
L09-22.4A (2.25	-4.12	1006	102	8.892		0.904	
L09-22.5 (2.80)	-4.67	1006	95	9.593		0.911	

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code	:	997491
Project omschrijving	:	090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever	:	Waternet

Analysemethoden in Grond

In dit analysecertificaat zijn de met 'Q' gemerkte analyses uitgevoerd volgens de onderstaande analysemethoden. Deze analyses zijn vastgelegd in het geldende accreditatie-certificaat met bijbehorende verrichtingenlijst L086 van Eurofins Omegam BV.

Porositeit	:	Eigen methode
Watergeh. massafr.	:	Eigen methode
Watergeh. volumefr.	:	Eigen methode
Verzadigingsgraad	:	Eigen methode
Volumiekemassa droog	:	Eigen methode
Volumiekemassa nat	:	Eigen methode

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code	:	997483
Project omschrijving	:	090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever	:	Waternet

Volumieke massa's e.d. (volgens OMEGAM Lab. methode, gebaseerd op NEN 5781)

Referentie	Hoogte t.o.v. N.A.P. in meter	Vol. massa nat in kg/m ³	Vol. massa droog in kg/m ³	Watergeh. massa fractie	Porositeit volume fractie	Watergeh. volume fractie	Verzadig. graad in %
L09-23.1 (0.20)	-2.14	1223	474	1.579		0.749	
L09-23.2 (0.80)	-2.74	976	115	7.509		0.861	
L09-23.3 (1.40)	-3.34	975	88	10.080		0.887	
L09-23.4 (2.00)	-3.94	985	83	10.915		0.902	
L09-23.5 (2.60)	-4.54	979	87	10.206		0.891	
L09-23.6 (3.20)	-5.14	1030	120	7.557		0.909	
L09-23.6A (3.25)	-5.19	980	87	10.268		0.893	

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code	:	997483
Project omschrijving	:	090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever	:	Waternet

Analysemethoden in Grond

In dit analysecertificaat zijn de met 'Q' gemerkte analyses uitgevoerd volgens de onderstaande analysemethoden. Deze analyses zijn vastgelegd in het geldende accreditatie-certificaat met bijbehorende verrichtingenlijst L086 van Eurofins Omegam BV.

Porositeit	:	Eigen methode
Watergeh. massafr.	:	Eigen methode
Watergeh. volumefr.	:	Eigen methode
Verzadigingsgraad	:	Eigen methode
Volumiekemassa droog	:	Eigen methode
Volumiekemassa nat	:	Eigen methode

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code : 997492
Project omschrijving : 090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever : Waternet

Volumieke massa's e.d. (volgens OMEGAM Lab. methode, gebaseerd op NEN 5781)

Referentie	Hoogte t.o.v. N.A.P. in meter	Vol. massa nat in kg/m ³	Vol. massa droog in kg/m ³	Watergeh. massa fractie	Porositeit volume fractie	Watergeh. volume fractie	Verzadig. graad in %
L09-24.1 (0.60)	-2.66	1006	134	6.510		0.872	
L09-24.2 (1.20)	-3.26	968	77	11.630		0.892	
L09-24.3 (1.80)	-3.86	941	171	4.501		0.770	
L09-24.4 (2.40)	-4.46	1033	94	10.028		0.939	
L09-24.4A (2.45)	-4.51	1025	96	9.674		0.929	
L09-24.5 (3.00)	-5.06	889	73	11.229		0.816	
L09-24.6 (3.60)	-5.66	1002	96	9.434		0.906	

ANALYSE CERTIFICAAT

Project code	:	997492
Project omschrijving	:	090005-004 Polder Baambrugge
Opdrachtgever	:	Waternet

Analysemethoden in Grond

In dit analysecertificaat zijn de met 'Q' gemerkte analyses uitgevoerd volgens de onderstaande analysemethoden. Deze analyses zijn vastgelegd in het geldende accreditatie-certificaat met bijbehorende verrichtingenlijst L086 van Eurofins Omegam BV.

Porositeit	:	Eigen methode
Watergeh. massafr.	:	Eigen methode
Watergeh. volumefr.	:	Eigen methode
Verzadigingsgraad	:	Eigen methode
Volumiekemassa droog	:	Eigen methode
Volumiekemassa nat	:	Eigen methode
