

Grondwatermodel: Cuijk - Ravenstein

Waterschap Aa en Maas

3 oktober 2023 - Public

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Doel	6
2	Werkwijze en uitgangpunten	7
2.1	Algemene werkwijze	7
2.2	Bestaande modellen	7
2.3	Koppeling GRAM en MORIA	7
2.4	Modelgebied	8
3	Modelverbeteringen	9
3.1	Zomerbed	9
3.2	Uiterwaarde en achterland	10
3.3	Open water	10
3.4	Deklaagweerstand	10
3.5	Waterhuishouding	12
3.6	Diepe ondergrond (REGIS, anisotropie, breuken en onttrekkingen)	12
3.7	Hoogwatergolf	13
3.8	MetaSWAP & berging	16
3.9	Drainage parameters bij inundatie (drains en ponding)	16
3.10	Samenvatting modelverbeteringen	16
4	Gevoeligheidsanalyse	18
4.1	Parameter aanpassingen	18
4.2	Resultaten gevoeligheidsanalyse	18
4.3	Conclusie gevoeligheidsanalyse	22
5	Modelresultaten (validatie)	24
5.1	Validatiemetingen	24
5.2	Resultaten T=10 (2021)	26

5.3	Resultaten T=10 (2011)	28
5.4	Conclusie validatie	29
6	Conclusie en aanbevelingen	30
Bijlagen		
	Bijlage A – Koppeltabellen	32
	Bijlage B – Technische specificatie modelverbetering	35
	B-1: Technische specificatie modelverbetering: zomerbed	35
	B-2: Technische specificatie modelverbetering: Uiterwaarde en achterland	35
	B-3: Technische specificatie modelverbetering: Open water	35
	B-4: Technische specificatie modelverbetering: Deklaagweerstand	36
	B-5: Technische specificatie modelverbetering: Waterhuishouding	36
	B-6: Technische specificatie modelverbetering: Diepe ondergrond	37
	B-7: Technische specificatie modelverbetering: Hoogwatergolf	37
	B-8: Technische specificatie modelverbetering: Metaswap en berging	37
	Bijlage C – Grafieken gevoeligheidsanalyse en kalibratie	39
	Bijlage D – Grafieken validatie	40
	Bijlage E – Runfiles definitieve model	41
	Colofon	42

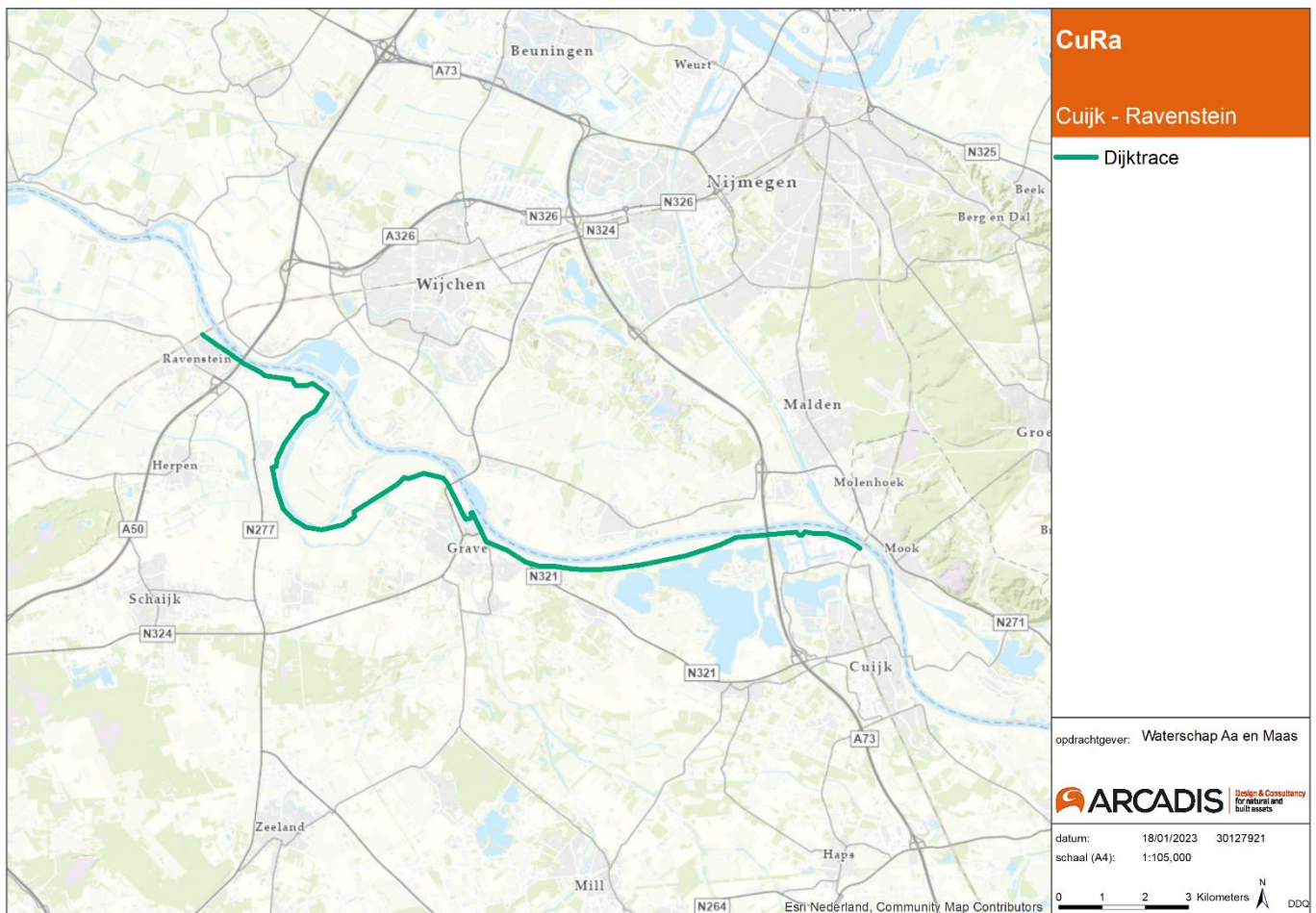
1 Inleiding

De aanleiding van dit onderzoek is in de 'Nadere offerteaanvraag Raamovereenkomst Integrale Technische Advisering (ROK ITA): Geohydrologisch model Cuijk – Ravenstein V2' geformuleerd:

“Waterschap Aa en Maas treft de voorbereidingen voor de dijkversterking van het traject 36-2, startend bij DP 174 de spoorbrug bij Katwijk en eindigend bij DP 382 voorbij de A50 aan de zijde van Ravenstein. Het project bevindt zich in de verkenningsfase. Eind 2022 zal een Voorkeursalternatief (VKA) zijn vastgesteld. Het traject kent een versterkingsopgave voor de sporen hoogte, piping en stabiliteit binnenwaarts.”

“Uit ervaringen van het naastgelegen traject 36-3 Ravenstein – Lith, projectnaam Meanderende Maas (MeMa) is gebleken dat met behulp van een geohydrologisch model van het gebied stijghoogtes van grondwaterstanden onder en buiten de dijk bij hoogwatersituaties met voldoende betrouwbaarheid zijn te berekenen. Bij toepassing van deze stijghoogtes in piping- en stabiliteitsberekeningen kan een betrouwbaarder beeld van de opgave vastgesteld worden en daarmee een optimalisatie plaatsvinden.”

Waterschap Aa en Maas wil het grondwatermodel Aa en Maas (GRAM) bij de Maas verbeteren langs het dijktraject: Cuijk – Ravenstein (Figuur 1) zodat het model ook geschikt is voor het berekenen van pieksituaties ($T=10$). In dit rapport is de ontwikkeling van deelmodel Cuijk-Ravenstein (CuRa) beschreven, evenals de uitgevoerde modelverbeteringen.



Figuur 1 | Dijktraject: Cuijk - Ravenstein.

1.1 Doel

Voor geotechnische berekeningen is de stijghoogte in de omgeving van de dijk bij hoogwatersituaties vereist. Het doel van dit project is het verbeteren van het grondwatermodel om de stijghoogte in de omgeving van de dijk, zowel binnen- als buitendijks, zo nauwkeurig mogelijk te berekenen tijdens een hoogwaterperiode ($T=10$). Het grondwatermodel moet betrouwbaar zijn voor het nemen van beslissingen in het kader van waterbeheersing en veiligheid van dijken

2 Werkwijze en uitgangspunten

2.1 Algemene werkwijze

In dit project is het grondwatermodel van Aa en Maas (GRAM 3.0) gedetailleerd en verbeterd voor dijkverbetering Cuijk-Ravenstein. Het model is opgezet in iMOD (versie 5.4) op de rekenserver van waterschap Aa en Maas. Om het basismodel te creëren, zijn twee bestaande regionale grondwatermodellen (GRAM en MORIA) gekoppeld op basis van hydrogeologische formaties uit REGIS II v2.2. Vervolgens zijn er modelverbeteringen uitgevoerd op regionale schaal (resolutie van 100 m). De aanpassingen op het topsysteem zijn voor het deelmodel op een 25 m resolutie uitgevoerd. De modelinvoer is tussentijds aangepast en verbeterd (gevoeligheidsanalyse en kalibratie). De (tussen)resultaten van deze modelverbeteringen zijn niet opgenomen in deze rapportage. Alleen de definitieve modelverbeteringen zijn beschreven.

Na de definitieve modelverbeteringen, zijn nieuwe gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om inzicht te krijgen in de parameters waarvoor kalibratie zinvol is. In overleg met het waterschap is geen kalibratie op de definitieve modelverbeteringen uitgevoerd. Uit de gevoeligheidsanalyse bleek dat kalibratie van de gekozen modelparameters niet zou leiden tot een beter modelresultaat. De modelverbeteringen zijn op een resolutie van 25 m gevalideerd voor het dijktraject Cuijk-Ravenstein. Bij de validatie is gekeken of de modelverbeteringen een positief effect hebben op de hoogwaterpiek van juli 2021 en januari 2011. De modelverbeteringen hebben geresulteerd in een grondwatermodel dat kan worden gebruikt voor het nemen van beslissingen in het kader van waterbeheersing en veiligheid van dijken.

2.2 Bestaande modellen

Het verbeterde grondwatermodel is gebaseerd op drie bestaande modellen:

GRAM 3.0

Het GRAM-model is het grondwatermodel in beheer van het waterschap Aa en Maas. Het oorspronkelijke interessegebied van het GRAM-model is het binnendijs beheergebied van waterschap Aa en Maas. Voor dit project moet over het traject Cuijk-Ravenstein het buitendijs gebied en (aangrenzend) modelgebied buiten het beheergebied van waterschap Aa en Maas verbeterd worden. In deze studie is GRAM3.0 als basismodel gehanteerd. De modelverbeteringen zijn toegepast volgens de modelstructuur en modelkeuzes van het GRAM-model.

MORIA v4.7

Regionaal modelinstrument MORIA wordt onder andere door waterschap Rivierenland gebruikt om het grondwatersysteem in het riviereengebied in beeld te brengen. De MORIA-parameters ten noorden van de Maas zijn gekoppeld aan het GRAM-model.

MeMa

Tauw heeft in opdracht van Aa en Maas een grondwatermodel opgesteld voor het project Meanderde Maas (MeMA). Het betreft het dijktraject Ravenstein – Lith (ten westen van Cuijk – Ravenstein. Veel modelkeuzes van MeMa zijn overgenomen in het Cuijk-Ravenstein-model (CuRa-model).

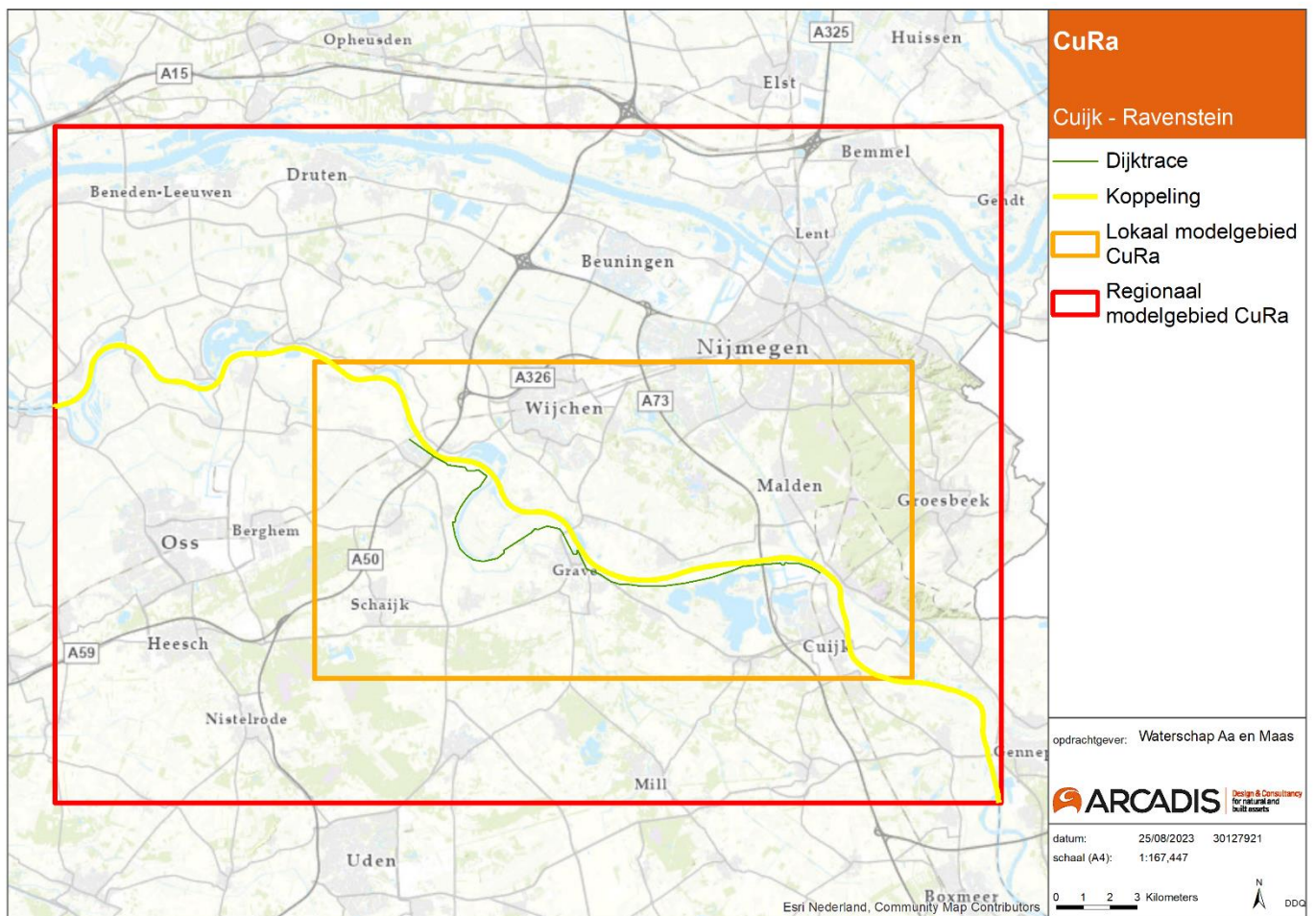
2.3 Koppeling GRAM en MORIA

In deze studie is het GRAM3.0 grondwatermodel uitgebreid ten noorden van de Maas door modelinvoer te koppelen met MORIA4.7. De modellagen, doorlaatvermogen (kD) en weerstanden (c) van MORIA4.7 zijn omgezet naar doorlatendheden (k_h en k_v) op basis van REGIS-formaties, vergelijkbaar met GRAM3.0. Hierdoor is de modelinvoer ten noorden van de Maas van MORIA 4.7 met GRAM3.0 gekoppeld. Bij de koppeling van de modellaag indeling is gestreefd naar een goede aansluiting van het doorlaatvermogen (kD; m^2/d) en weerstand (c; d). De koppeling is ter plaatse van het zomerbed van de Maas toegepast zodat eventuele verschillen tussen GRAM en MORIA zo min mogelijk effect hebben op de hydrogeologie. De koppeling van kD- en c-waarden zijn visueel geïnspecteerd en gecontroleerd door hydrologen van het waterschap en Arcadis. Omdat voor beide modellen de hydrogeologie van REGIS is gebruikt treden er geen grote overgangen (“sprongen”) in kD- en c-waarden op. De details van de laagkoppeling zijn te vinden in Bijlage A. De Maas is de zuidgrens van MORIA en noordgrens van GRAM. Modelinvoer zoals bijvoorbeeld onttrekkingen (wells), oppervlaktewater (rivs) en drainage (drn) zijn daarom als afzonderlijke invoerbestanden toegevoegd aan het gekoppelde model. Deze bestanden zijn gecontroleerd op dubbelingen.

2.4 Modelgebied

Het modelgebied bestaat uit twee afmetingen: een regionaal modelgebied waarin koppelingen en modelverbeteringen zijn toegepast, en een lokaal modelgebied dat gebruikt is voor kalibratie en validatie. Het regionale gebied heeft als doel de grondwaterstanden rondom het lokale modelgebied te berekenen. De grenzen van het lokale modelgebied zijn bepaald door de spreidingslengte te berekenen met behulp van de formule: spreidingslengte = $3 \cdot (\sqrt{kD \cdot c})$ voor Ravenstein, Grave en Cuijk:

- Ravenstein: 3.300 m
- Grave: 3.100 m
- Cuijk: 1.600 m



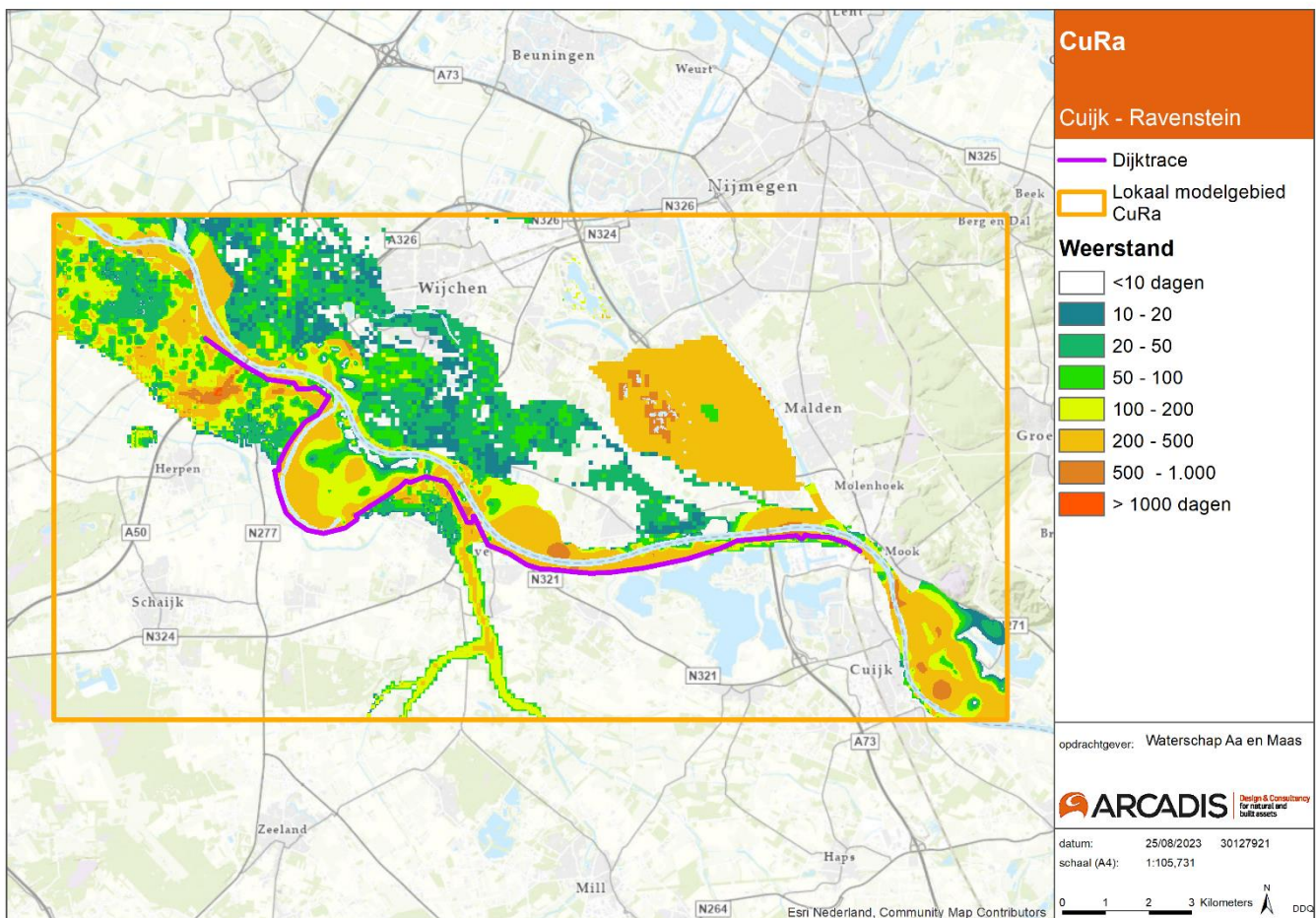
Figuur 2 | Modelgebieden grondwatermodel Cuijk-Ravenstein (CuRa).

3 Modelverbeteringen

In dit hoofdstuk zijn de uitgevoerde modelverbeteringen beschreven nadat de koppeling van GRAM3.0 en MORIA 4.7 is doorgevoerd. Hierbij is voortgebouwd op de aanpak van de geohydrologische modellering van de meanderende Maas (MeMa) door TAUW¹. Bij elke modelverbetering is een samenvattende tabel opgesteld met de activiteit van de actielijst uit de uitvraag (zie Bijlage B).

3.1 Zomerbed

Uit gemeten stijghoogten, hydrogeologie en de bodemhoogte (bathymetrie) van de Maas is af te leiden dat de Maas in directe verbinding staat met het eerste watervoerende pakket. In GRAM 3.0 is in het zomerbed van de Maas nog een bodemweerstand van circa 250 dagen toegepast (met een hydraulische rivierbodempweerstand van circa 5 dagen (ISG)). Hierdoor hebben de waterstanden op de Maas (modelinvoer) een verminderd en vertragend effect op de berekende stijghoogten (modeluitvoer). Door de bodempweerstand in het zomerbed (zie Figuur 3) en de hydraulische rivierbodempweerstand van de Maas te verlagen naar 0,1 dag, hebben de Maaswaterstanden een grotere invloed op de berekende stijghoogten in het eerste watervoerend pakket. Dit komt beter overeen met de gemeten stijghoogten in het eerste watervoerend pakket. Zie Bijlage B-1 voor de technische specificatie van de modelverbetering.



Figuur 3 | Bodempweerstand in dagen (laag 1) na modelverbetering: Het zomerbed van de Maas heeft geen weerstand meer: De intreeweerstand is verwerkt in bodempweerstand. De afbeelding weergeeft ook de aanpassing van de weerstand in uiterwaarde (zie paragraaf 3.4)

¹ Beschrijving referentie grondwatermodel, Bijlage bij deelproduct 5: Kwantificering onzekerheden stijghoogte (10 november 2020). TAUW. Kenmerk R001-1269294BMP-V01-mdg-NL:

3.2 Uiterwaarde en achterland

Oppervlaktewater staat bij inundatie van het maaiveld doorgaans niet meteen direct in contact met het met grondwater vanwege de onverzadigde zone en weerstand in de deklaag. Het is niet mogelijk om extra weerstand tijdsafhankelijk (bij een inundatie) aan de bodem toe te kennen (modelbeperking). Daarom is er gekozen om het maaiveld een extra 5 dagen bodemweerstand in de uiterwaarde toe te passen. In GRAM 3.0 is op sommige locaties nog geen weerstand toegekend. Hierdoor kan er bij een inundatie een te snelle piek worden berekend. Zie Bijlage B-2 voor de technische specificatie van de modelverbetering.

3.3 Open water

De Kraaijenbergse Plassen zijn de voornaamste plassen van omvang binnen het modelgebied. Binnen GRAM is een hoge doorlatendheid (1.000 m/d) toegekend aan modelcellen met open water. Dit was oorspronkelijk ongeveer 15 m/d. Dit komt niet overeen met het systeemgedrag omdat er dan geen vrije doorstroming wordt gesimuleerd. Open water heeft namelijk geen doorlatendheid en stroomt vrij door. Een kunstmatig hoge doorlatendheid benadert dit systeemgedrag beter. Zie Bijlage B-3 voor de technische specificatie van de modelverbetering.

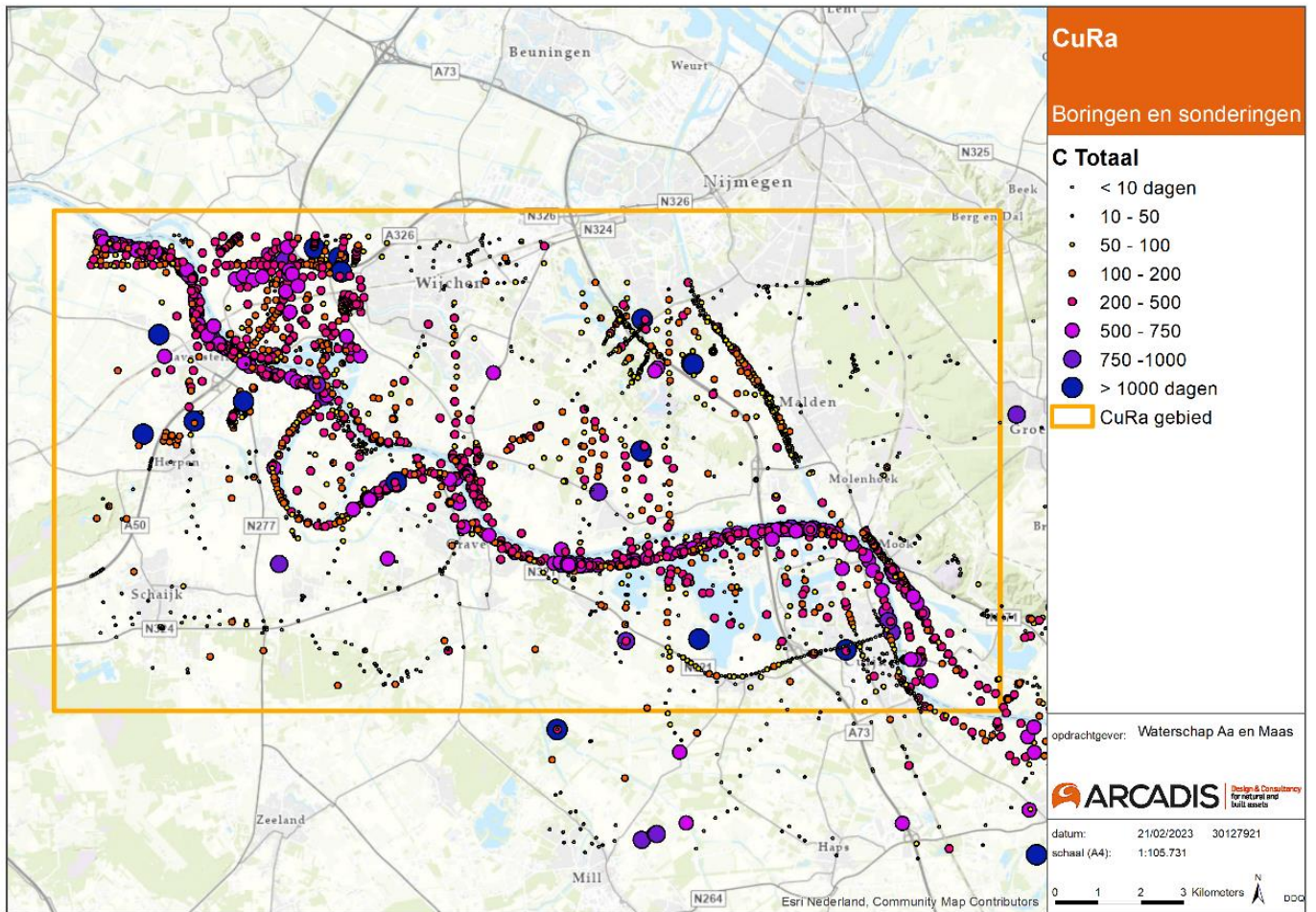
3.4 Deklaagweerstand

Het waterschap heeft aangegeven dat de gemodelleerde deklaagweerstand in de uiterwaarde onvoldoende representatief geschematiseerd is in GRAM. Door een interpolatie (methode: 'topo-to-raster') te maken van openbare en aanvullende ondergrondgegevens (boringen en sonderingen; Figuur 4 | Totale weerstand binnen 9 meter diepte van alle boringen en sonderingen (uitbijters en weerstanden zitten nog in deze set) Figuur 4) is er een nieuwe deklaag dikte geconstrueerd. Met verticale doorlatendheden uit Tabel 1 is vervolgens de weerstand van de nieuwe deklaag berekend (dikte / verticale doorlatendheid). Deze nieuwe deklaagweerstand is vervolgens gecontroleerd aan de hand van GeoTOP. Hierbij is onderzocht of de interpolatie een logisch geohydrologisch patroon heeft in de uiterwaarde. Deze controle is ook gedaan met de weerstanden van GRAM en MORIA.

Omdat de GRAM-modellagen niet aangepast mochten worden (voor het combineren van dit model met GRAM en het aanpassen van de overige lagen), is de nieuwe geïnterpoleerde deklaagweerstand gedeeld door de bestaande dikte van de modeldeklaag. De k_v die hieruit ontstaat is geen 'echte' k_v , maar een equivalente k_v (in het model 'kv_interpolatie_v6'). Deze k_v kan door de onveranderde deklaagdikte mogelijk fysisch onrealistische verticale doorlatendheden hebben. Het model rekent met de juiste weerstand doordat de laagdikte wordt gedeeld door de (equivalente) k_v . Zie Bijlage B-4 voor de technische specificatie van de modelverbetering.

Tabel 1 | Gehanteerde verticale doorlatendheden voor bepalen weerstand.

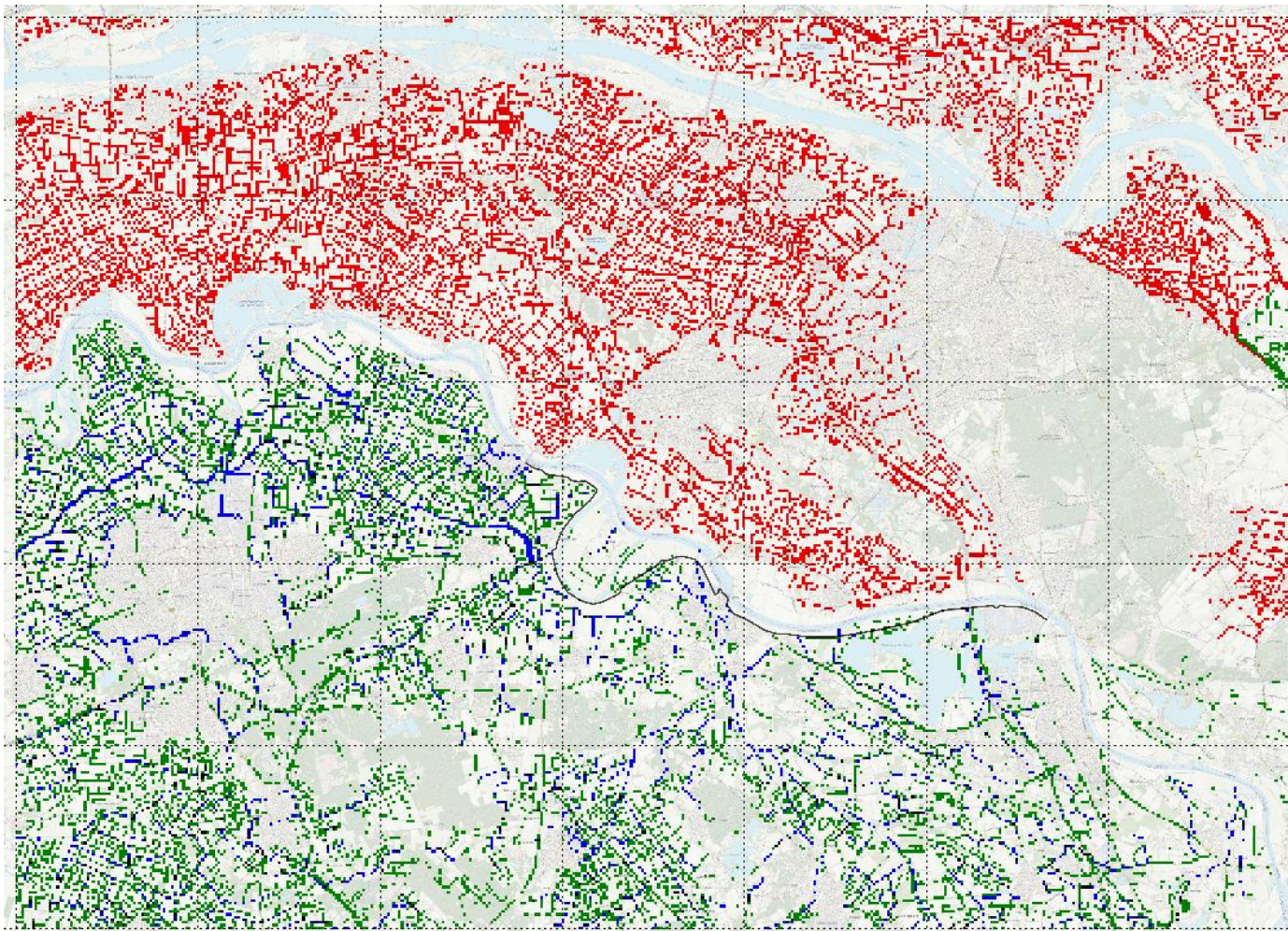
Lithologie	K_v [m/d]
Klei	0,01
Veen	0,01
Gytja	0,001
Leem	0,05



Figuur 4 | Totale weerstand binnen 9 meter diepte van alle boringen en sonderingen (uitbijters en weerstanden zitten nog in deze set)

3.5 Waterhuishouding

De waterhuishouding (watergangen, sloten en greppels) van GRAM en MORIA zijn ten noorden en ten zuiden van het zomerbed van de Maas toegepast in het deelmodel Cuijk-Ravenstein (CuRa; Figuur 5). Omdat de lagenindeling van GRAM en MORIA niet is aangepast in het CuRa-model, zijn de bestaande modelkeuzes in stand gehouden. De modelinvoer van GRAM en MORIA is gecontroleerd op basis van peil en bodemhoogte. Drains met onrealistische lage drainageniveaus (diepte van meer dan 2 m onder maaiveld) zijn verwijderd. Zie Bijlage B-5 voor de technische specificatie van de modelverbetering.



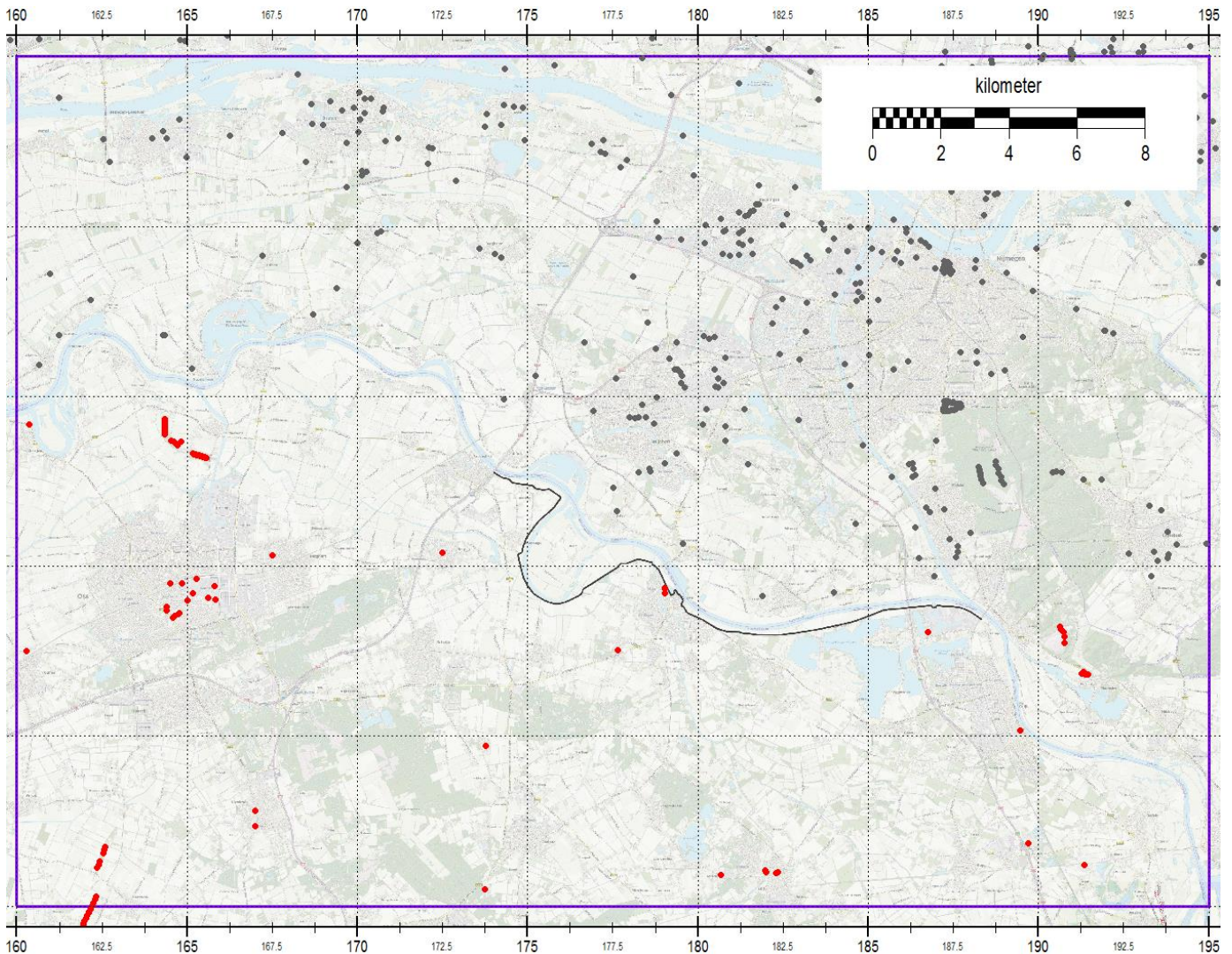
Figuur 5 | Watergangen (river-package) van MORIA (rood) en GRAM (groen en blauw).

3.6 Diepe ondergrond (REGIS, anisotropie, breuken en onttrekkingen)

In deze paragraaf is de modelinvoer beschreven die vooral van invloed is op de diepe ondergrond. Deze zijn essentieel om het grondwatersysteem nauwkeurig in kaart te brengen. Originale REGIS-waarden zijn gebruikt om gekalibreerde parameterwaarden terug te draaien (deze bevatten onrealistische waarden en veroorzaakten verkeerd systeemgedrag). De anisotropie, breuken zijn gecontroleerd en overgenomen in het CuRa-model. Bij de modelinvoer van onttrekkingen is er een duidelijk onderscheid gemaakt tussen GRAM en MORIA om dubbelingen te voorkomen (Figuur 6).

De niet-stationaire onttrekkingen zijn in de MORIA-database tot 2010 opgenomen. Omdat de berekeningen van deze studie later zijn (2010-2011 en 2020-2021) is er gekozen om de stationaire waarden van MORIA op te nemen in het CuRa-model. De niet-stationaire industriële onttrekkingen van Brabant uit de GRAM-database veroorzaakt een fout tijdens het rekenen. Daarom is er gekozen om de industriële onttrekkingen van Brabant uit het MeMa-model op te

nemen in het CuRa-model. Bij het overnemen van de onttrekkingen binnen het modelgebied zijn deze onveranderd gebleven. Zie Bijlage B-6 voor de technische specificatie van de modelverbetering.



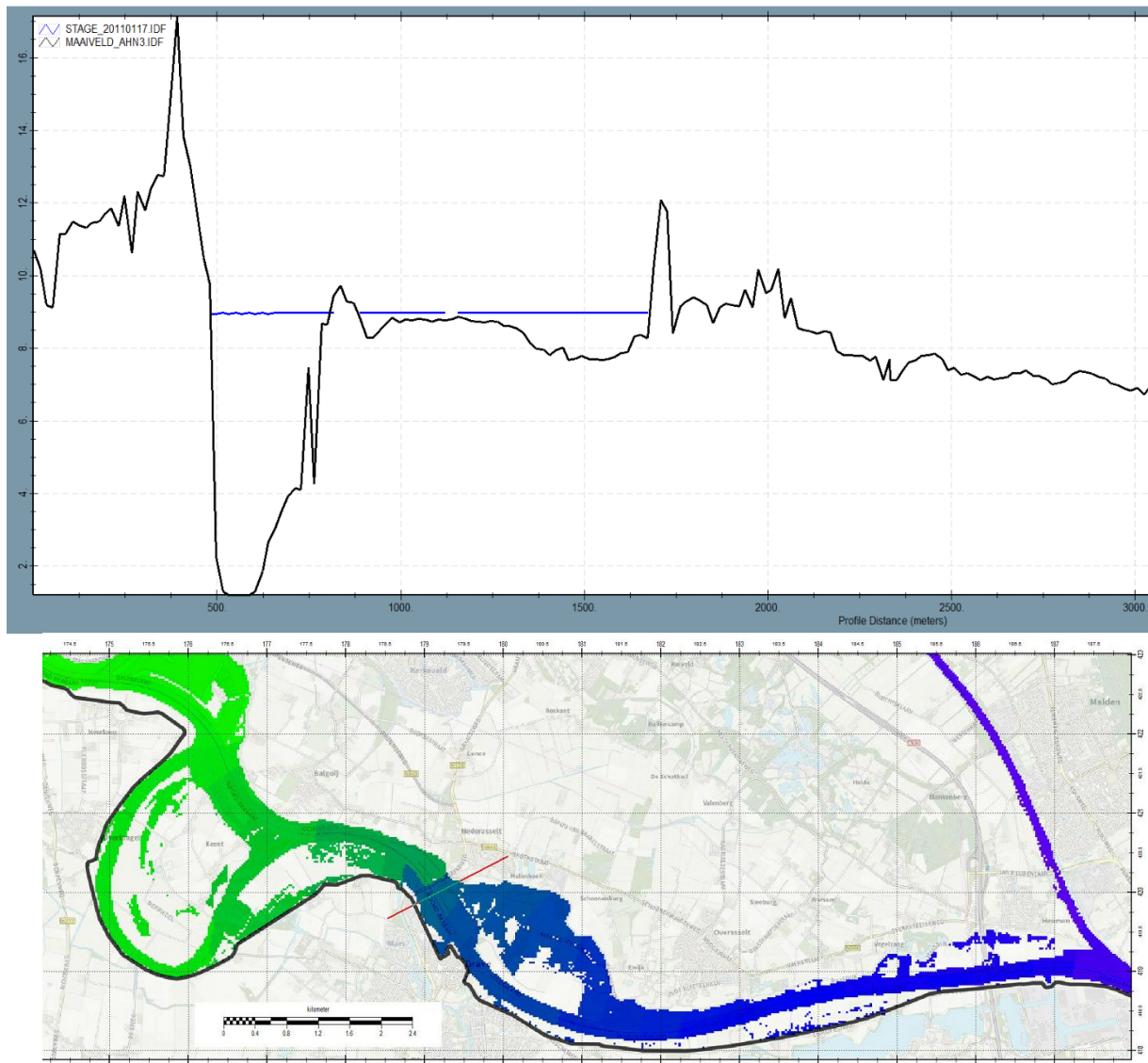
Figuur 6 | Onttrekkingen in het modelgebied (Grijs: MORIA en Rood: GRAM). Onttrekkingen zijn gecontroleerd om dubbellingen te voorkomen.

3.7 Hoogwatergolf

In deze studie ligt de focus op de hoogwaterpieken van januari 2011 en juli 2021 (Figuur 7), die beide als T=10 evenementen worden beschouwd volgens de Betrekkingslijnen Maas van 2021-2022 (Tabel 2). De betrekkingslijnen leggen een relatie tussen de waterstand in de Maas en de afvoer bij Borgharen. Hierin zijn ook de herhalingsstijden van de Maas vastgelegd. De Maas is in het model opgenomen in de ISG-package. Uit controle van het waterschap is gebleken dat ná 2020 de Maas in het model (GRAM3.0) niet correct was geschematiseerd en dat de bathymetrie ook niet goed in het model stond. Het waterschap heeft tijdens dit project/deze studie de ISG bijgewerkt tot en met 2022. Ook is de intreeverstand van de ISG veranderd van 5 dagen naar 0,1 dag om het juiste systeemgedrag te modelleren. Zie Bijlage B-7 voor de technische specificatie van de modelverbetering.

Tabel 2 | Oppervlaktewaterpeilen van de Maas bij meetpunt: Grave Beneden, Grave Boden en Mook (bron: Rijkswaterstaat betrekkingslijnen 2021-2022).

Meetpunt	Klasse		Waterhoogte (m NAP)	Frequentie T = X jaar	Dagen per jaar hoger
Grave Beneden					
	Extreem hoogwater	>	9,95	30	
	Hoogwater	<	9,00	10	
	Verhoogde waterstand	>	7,95	1	2
	Licht verhoogd	>	6,45		8
	Normaal		4,60 tot 6,45		268
	Laagwater	<	4,60		
	<i>Waterstand piek 2011</i>		9,02	10	
	<i>Waterstand piek 2021</i>		9,36	10	
Grave Boven					
	Extreem hoogwater	>	10,10	30	
	Hoogwater	<	9,35	10	
	Verhoogde waterstand	>	8,50	1	
	Licht verhoogd	>	8,20		2
	Normaal	>	7,10		268
	Laagwater	<	7,10		
	<i>Waterstand piek 2011</i>		9,44	10	
	<i>Waterstand piek 2021</i>		9,82	10	
Mook					
	Extreem hoogwater	>	11,05	20	
	Hoogwater	<	10,00	5	
	Verhoogde waterstand	>	8,30		2
	Licht verhoogd	>	8,20		4
	Normaal		7,75 tot 8,20		268
	Laagwater	<	7,75		
	<i>Waterstand piek 2011</i>		10,4	5	
	<i>Waterstand piek 2021</i>		9,82	5	



Figuur 7 | Dwarsproefiel van de Maas (ISG) bij Grave met maaiveld (Zwart) en waterpeil van de T=10 winterpiek op 17 jan 2011 (blauw).

3.8 MetaSWAP & berging

MetaSWAP berekent de grondwateraanvulling en freatische berging (variabele waarden) en doet dit aan de hand van landgebruik, oppervlakkige afstroming, neerslag en verdamping. In GRAM3.0 is MetaSWAP “uitgeschakeld” in de uiterwaarde. Deze instelling is teruggezet om het systeemgedrag (oa. Grondwateraanvulling en freatische berging) goed in beeld te brengen.

De gespannen berging van watervoerende pakketten is in deze studie aangepast, omdat de koppeling van GRAM en MORIA voor een andere laagdikte heeft gezorgd. De gespannen berging is bepaald door de dikte van de watervoerende pakketten te delen door 100.000 (eenheid per meter). Dit laatste is volgens hetzelfde uitgangspunt als bij het project MeMa. Deze waarde is gekozen, omdat de berging in het gespannen pakket erg klein is. Het watervoerende pakket is verzadigd, waardoor vrijwel geen berging aanwezig is). Door de dikte van het watervoerend pakket te delen door 100.000 wordt de bergingscoëfficiënt klein. Zie Bijlage B-8 voor de technische specificatie van de modelverbetering.

3.9 Drainage parameters bij inundatie (drains en ponding)

Tijdens hoogwater op de Maas (inundatie) verandert het geohydrologisch systeem: watergangen (drains) in de uiterwaarde overstromen, waardoor de watergangen geen afvoerfunctie meer hebben. In het model wordt dit nagebootst door de functie ICONCHK. Deze functie zet drains uit, zodra er een hoger rivierpeil in dezelfde modelcel zit.

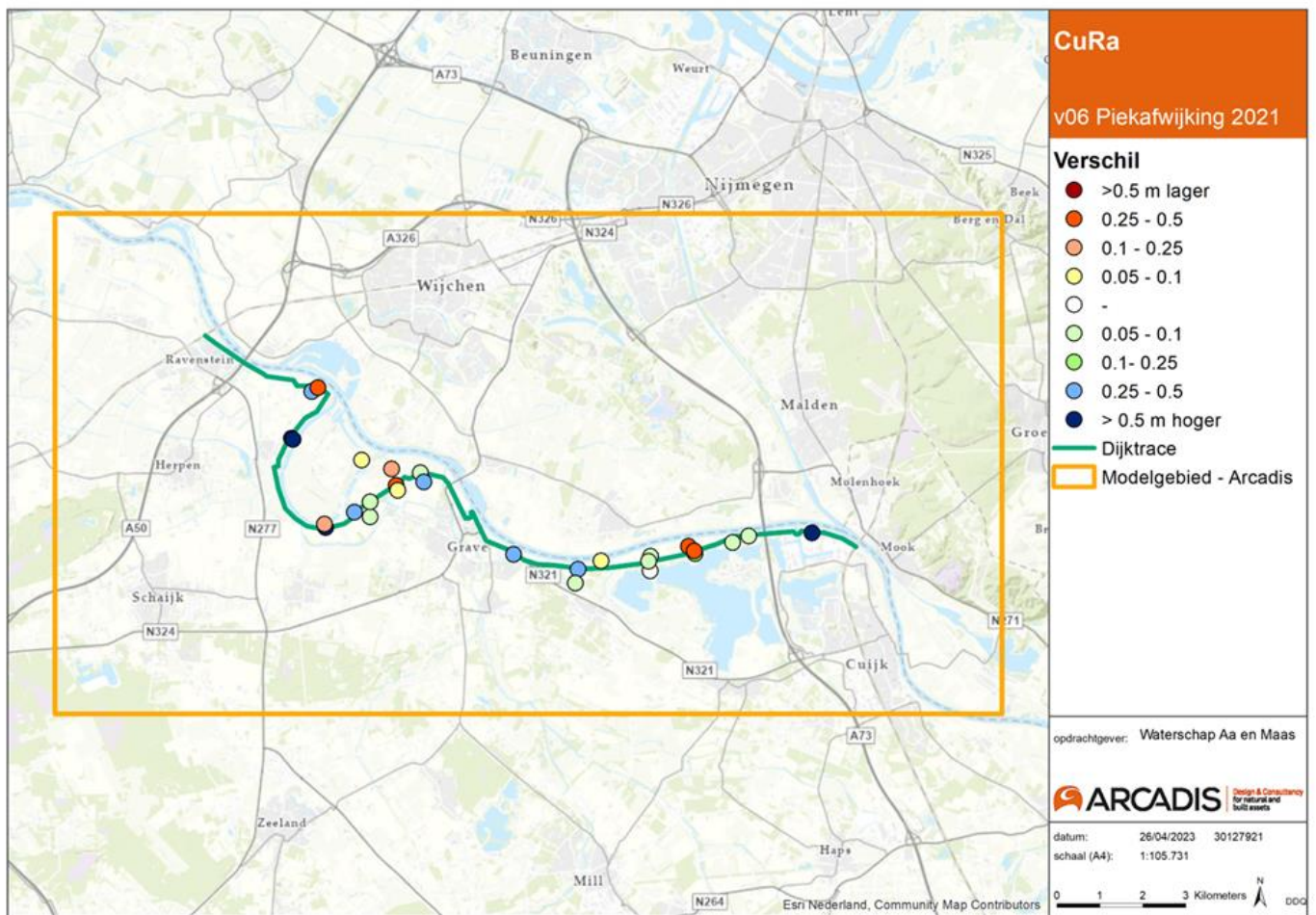
De ponding diepte is het (grondwater)niveau dat op maaiveld kan staan, voordat het water uit het systeem afstroomt. Onder normale omstandigheden is deze parameter in het model vaak een aantal centimeters boven maaiveld. Bij inundatie van de uitwaarden door hoge Maaswaterstanden zou de ponding diepte het Maaswaterpeil draineren (iets wat niet overeenkomt met de werkelijkheid). Om dit te voorkomen is de ponding diepte in de uiterwaarde “uitgezet” (ponding diepte 9999 m). Door een hogere ponding diepte in de uiterwaarde toe te staan, wordt inundatie en daarmee de hoogwaterpieken beter berekend.

3.10 Samenvatting modelverbeteringen

Het CuRA-model is aan meerdere (tussentijdse) modelaanpassingen (en kalibratieslagen) onderworpen. Het model berekende vooral te lage piek grondwaterstanden en -stijghoogten.

De tussentijdse modelresultaten zijn niet meer valide na de definitieve modelverbeteringen. De tussentijdse modelverbeteringen, gevoeligheidsanalyses en kalibratieslagen hebben inzicht gegeven in systeemgedrag en modelresultaat. Bijvoorbeeld dat de veranderingen van de gespannen berging geen effect heeft op de stijghoogten nabij de Maas, omdat deze parameter al een zeer kleine waarde heeft. Ook heeft het aanpassen van de intree weerstand van de Maas weinig invloed (zelfde reden). Er is nagenoeg geen weerstand aanwezig (doorsnijding), daarom heeft een verhoging en verlaging van de weerstand geen significant effect.

Samen met het Waterschap zijn er belangrijke modelverbeteringen uitgevoerd die tot een positief resultaat hebben geleid. Het model rekent de pieken naar tevredenheid uit (zie Figuur 8). De residuen vallen veelal binnen 0,5 m, met een evenredige verdeling van te droog en te nat. Dit duidt op een goed modelresultaat, in Hoofdstuk 5 wordt dit nader toegelicht. In Tabel 3 zijn de belangrijkste modelverbeteringen samengevat. Na de laatste modelverbetering is (in overleg met het Waterschap) geen aanvullende kalibratie uitgevoerd op basis van het definitieve model. In plaats daarvan is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.



Figuur 8 | Modelresultaten bij T=10 in 2021 na modelverbetering

Tabel 3 | Modelverbeteringsrondes

Modelversies	Verandering	Resultaat
v00 t/m v03	Basismodel opstellen	n.v.t.
v04	Storage veranderd + gevoeligheid	Geen impact > verandering teruggedraaid
v05	Deklaag aanpassen	Positief
v06	Weerstand bij Geul Keent verwijderd en MetaSWAP aangepast	Positief

4 Gevoeligheidsanalyse

De modelinvoer is tussentijds aangepast en verbeterd (gevoeligheidsanalyse en kalibratie). Na de definitieve modelverbeteringen, zijn nieuwe gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om inzicht te krijgen in de parameters waarvoor kalibratie zinvol is. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat kalibratie van de gekozen modelparameters niet zal leiden tot een (significant) beter modelresultaat. In overleg met het waterschap is geen kalibratie van de definitieve modelverbeteringen uitgevoerd. In dit hoofdstuk zijn de resultaten van modelversie 6 samengevat².

4.1 Parameter aanpassingen

Met het verbeterde grondwatermodel Cuijk-Ravenstein (CuRa) zijn diverse gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze analyses zijn gericht op de hoogwaterperiode van 2021, omdat voor deze periode de meest representatieve stijghoogtemetingen (peilbuizen) langs het traject Cuijk-Ravenstein beschikbaar zijn (FEWS-reeks; zie ook paragraaf 5.1).

Om binnen de fysisch realistische bandbreedte te blijven, is rekening gehouden met de bandbreedte van parameterwaarden. Binnen het regionale modelgebied zijn de REGIS-diktes en doorlatendheden geanalyseerd. Hieruit volgt dat de maximale kD van het watervoerend pakket in REGIS ongeveer 3.000 m²/d bedraagt. De maximale weerstand (C) zou niet hoger dan 4000 dagen zijn (uitgaande van een holocene deklaag van 4 m en maximale k_v van 0,001). Het huidige model heeft in het watervoerende pakket een kD van circa 1000 m²/dag en een maximale weerstand van 700 dagen in de uiterwaarden.

Bij de analyse zijn parameters gekozen waarvan wordt verwacht dat deze een (grote) invloed uitoefenen op de berekende grondwaterstanden en stijghoogten tijdens hoogwatersituaties (T=10). In de gevoeligheidsanalyse is een bandbreedte van parameterwaarden doorgerekend. De volgende parameters en bandbreedten zijn in de gevoeligheidsanalyse gebruikt:

- Deklaagweerstand (c) in de uiterwaarde op basis van informatie uit boringen en sonderingen (interpolatie).
 - Verticale doorlatendheid (k_v) in laag 1 vermenigvuldigd met factor 0,5 en 2,0 (de deklaag in de uiterwaarden bevindt zich in modellaag 1);
- Doorlaatvermogen (kD) watervoerende lagen in de uiterwaarden die in contact staan met Maas.
 - Horizontale doorlatendheid k_h 1-5 vermenigvuldigen met factor 0,3 en 3,0 (de maas is ingesneden tot en met modellaag 5);
- De freatische berging is niet aangepast na de verbetering van MetaSWAP in de uiterwaarde.

De gevoeligheden van de parameters zijn beoordeeld aan de hand van de verandering in grondwaterstand en stijghoogte ten opzichte van de referentieberekening. De volgende gevoeligheidsklassen zijn gebruikt voor beschrijving van de effecten op de grondwaterstanden en stijghoogte (rapportage- en presentatiedoeleinden):

- Niet gevoelig: <5 cm;
- Weinig gevoelig: 5-10 cm;
- Gevoelig: 10-50 cm
- Zeer gevoelig: >50 cm

4.2 Resultaten gevoeligheidsanalyse

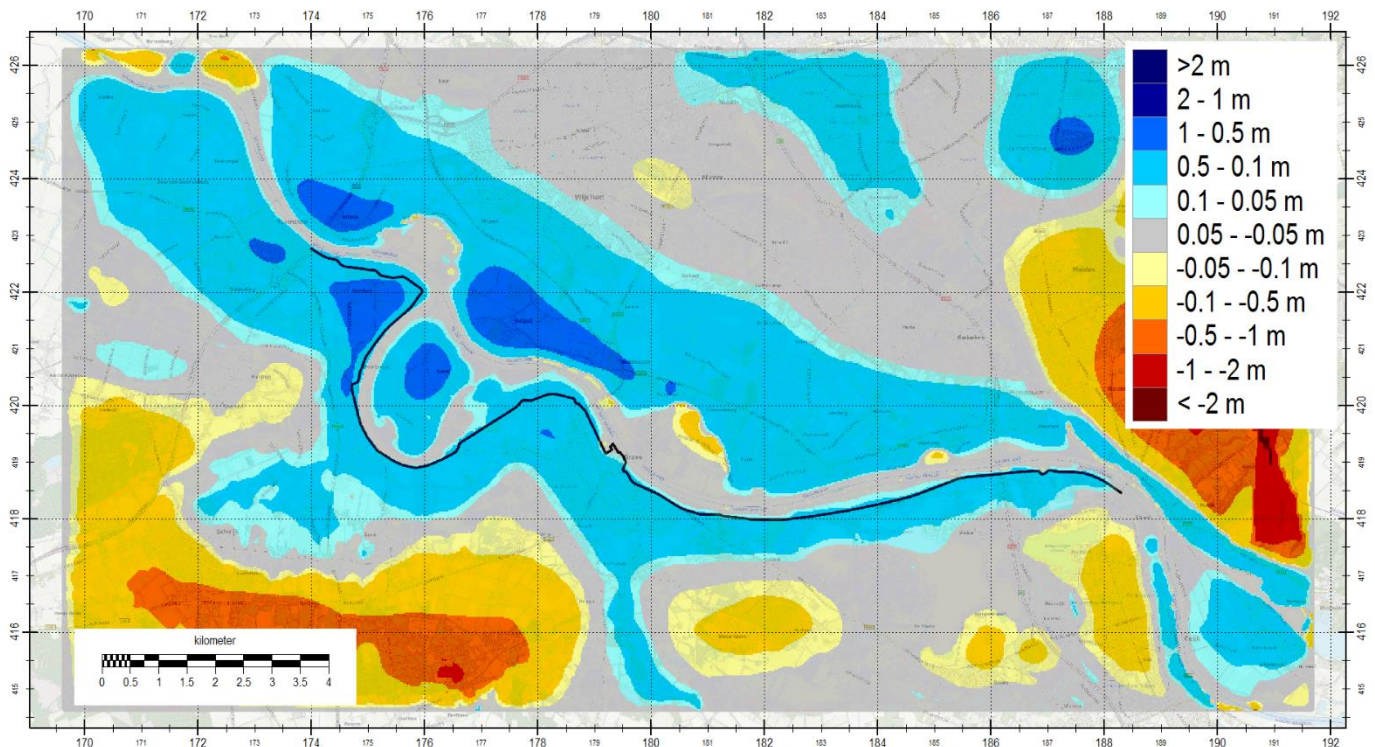
De berekende grondwaterstanden en stijghoogten reageren sterk op aanpassingen van het doorlaatvermogen (kD). Een toename van het doorlaatvermogen leidt tot een vernatting (10-50 cm) ter plaatse van de dijk. Omgekeerd resulteert een verlaging van het doorlaatvermogen in een verdroging (10-50 cm) ter plaatse van de dijk. Uit de gevoeligheidsanalyse² blijkt dat het model weinig gevoelig is voor wijzigingen in de deklaagweerstand (binnen fysisch realistische bandbreedtes; zie Tabel 4 en Bijlage C).

² De gevoeligheidsanalyse (incl. bandbreedtes van een factor 5 en/of 10) en kalibratie op tussentijdse modelverbeteringen vertoonden een vergelijkbaar beeld van de hier beschreven definitieve gevoeligheidsanalyse.

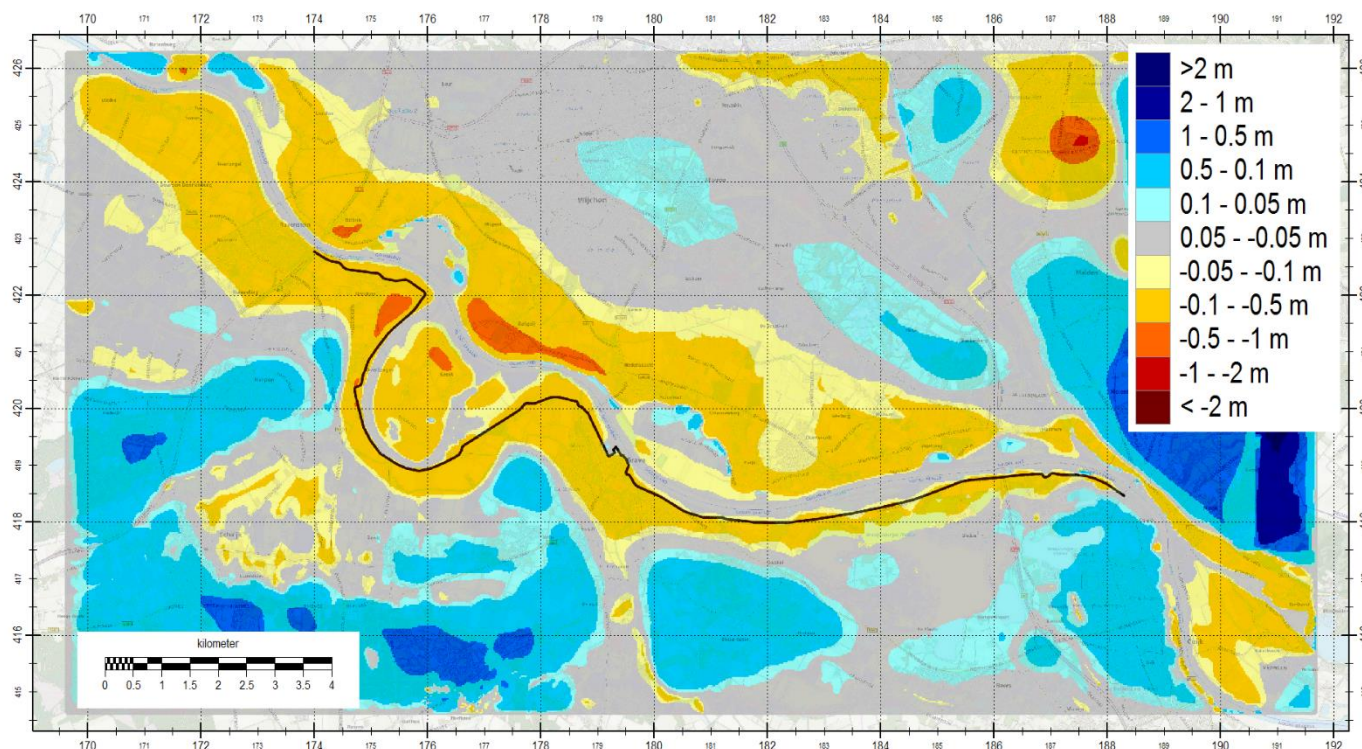
Tabel 4 | Parameters en factoren die zijn aangepast bij de gevoeligheidsanalyse

Parameter	Aanpassingen	Beschrijving effect
Weerstand deklaag	Factor 2 ($k_v \cdot 0,5$)	Weinig gevoelig (5-10 cm) 5-10 cm effect op grondwaterstanden en stijghoogten.
	Factor 0,5 ($k_v \cdot 2$)	Weinig gevoelig (5-10 cm) 5-10 cm effect op grondwaterstanden en stijghoogten.
Doorlaatvermogen (kD) eerste watervoerende pakket	Factor 3	Model blijkt gevoelig (10-50 cm) voor het veranderen van de k_h . De gevoeligheid is afhankelijk van locatie en tijd (hoogwatersituatie).
	Factor 0,3	Model blijkt gevoelig (10-50 cm) voor het veranderen van de k_h . De gevoeligheid is afhankelijk van locatie en tijd (hoogwatersituatie).

In Figuur 9 en Figuur 10 zijn de verschillen weergegeven van de stijghoogteverhoging en -verlaging van de gevoeligheidsanalyse van het doorlaatvermogen. Hieruit blijkt dat een hoger doorlaatvermogen voornamelijk leidt tot hoger berekende stijghoogten, zowel buitendijks als binnendijks, tot op een afstand van 1 km van de dijk (Figuur 9). Een hoger doorlaatvermogen van het watervoerend pakket zorgt voor een grotere invloed van de Maas op de stijghoogte in het watervoerend pakket. Op meer dan 2 kilometer van de Maas zorgt een hoger doorlaatvermogen voor lagere stijghoogten binnendijks. Een verlaging van het doorlaatvermogen heeft het tegenovergestelde effect (Figuur 10).



Figuur 9 | Verschil stijghoogten bij $kD \cdot 3$ model ten opzichte van referentiemodel (zomerpiek 2021). Circa 10-50 m verhoging van de stijghoogte bij een hoger doorlaatvermogen van het watervoerend pakket.



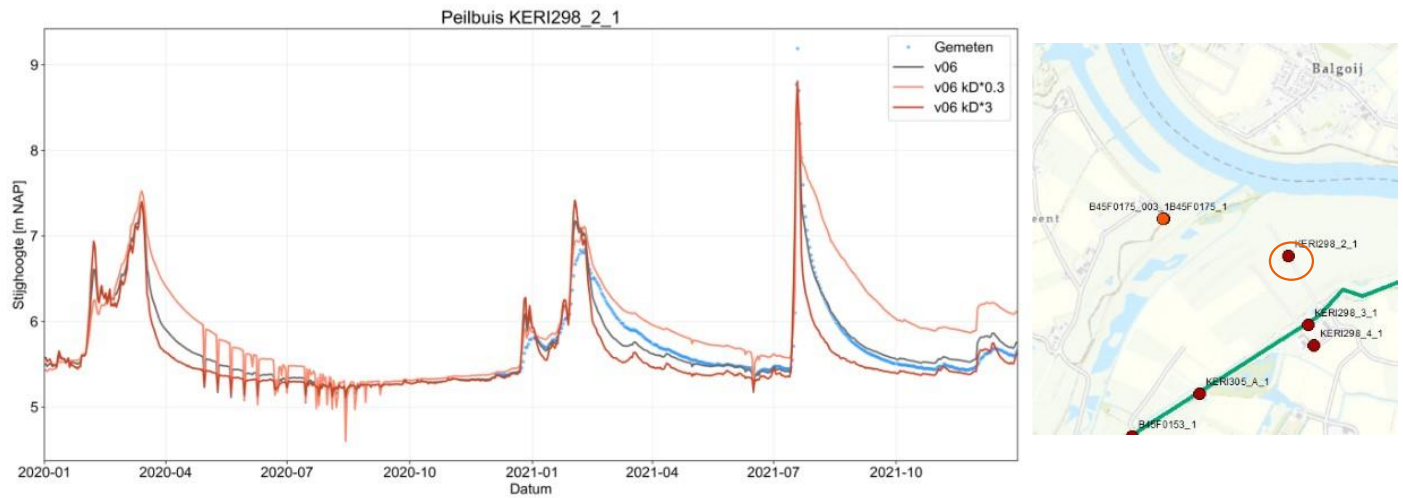
Figuur 10 | Verschil stijghoogten bij $KD*0.3$ model ten opzichte van referentiemodel (zomerpiek 2021). Circa 10-50 m verlaging van de stijghoogte bij een lager doorlaatvermogen van het watervoerend pakket.

Gevoeligheid – pieken

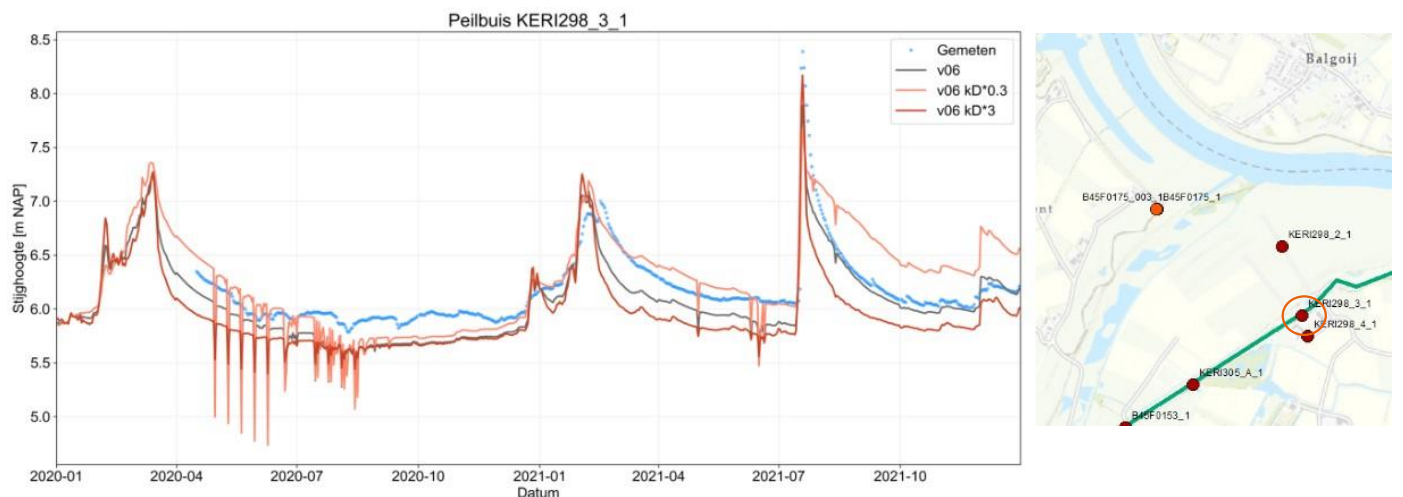
Hieronder zijn grafieken weergegeven van de berekende stijghoogte ten opzichte van de gemeten stijghoogte over de periode 2020-2021. Per peilbuislocatie is de gemeten stijghoogte (punt), stijghoogte na modelverbetering (grijze lijn) en stijghoogten van de gevoeligheidsanalyse (rode lijnen) afgebeeld. Hieronder zijn de modelresultaten over een monitoringsraai van peilbuizen KERI298_2_1 (buitendijks), KERI298_3_1 (dijk/kering) en KERI298_4_1 (binnendijks) als voorbeeld nader toegelicht. Op de rekenserver van Aa en Maas zijn alle modelresultaten en meetpunten te raadplegen.

Uit de grafieken is duidelijk af te leiden dat deze peilbuizen verschillend reageren op de gevoeligheidsanalyse.

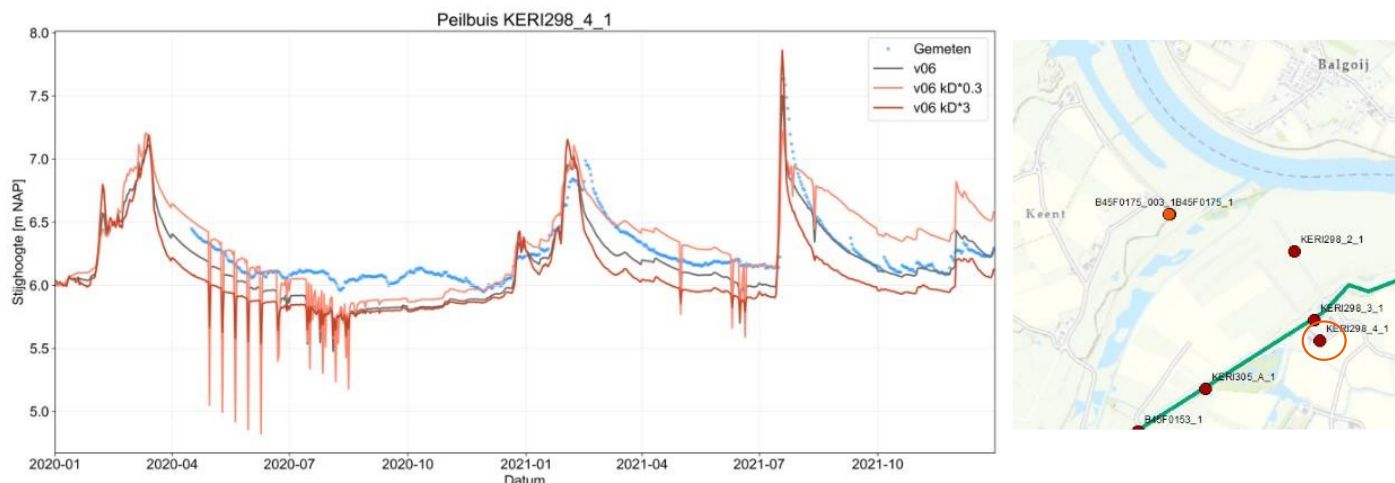
- Bij peilbuis KERI298_2_1 (buitendijks) berekent het model met een lager doorlaatvermogen een betere stijghoogte tijdens de eerste hoogwatergolf (2020), maar de tweede hoogwatergolf (januari 2021) wordt beter berekend bij een hoger doorlaatvermogen. De laatste hoogwatergolf (T=10; juli 2021) wordt het beste berekend met de (definitieve) modelverbeteringen zonder gevoeligheidsfactoren.
- Bij peilbuis KERI298_3_1 (dijk/kering) berekent het model met een lager doorlaatvermogen een betere stijghoogte tijdens de eerste hoogwatergolf (2020), maar wordt bij een hoger doorlaatvermogen een betere stijghoogte tijdens de tweede en derde hoogwatergolf berekend.
- Bij peilbuis KERI298_4_1 (binnendijks) berekent het model met een hoger doorlaatvermogen een betere stijghoogte tijdens alle drie de hoogwatersituaties.
- Bij peilbuis KERI305_A_1 (dijk/kering) zijn vergelijkbare effecten van het doorlaatvermogen op de stijghoogte berekend als bij KER298_3_1 (ook nabij de dijk/kering).



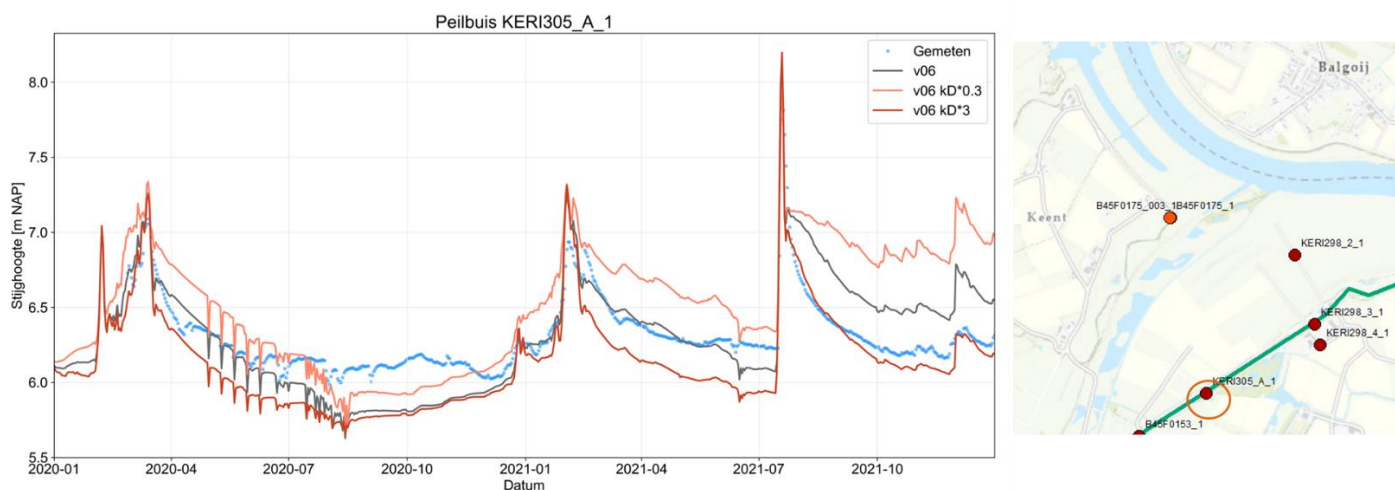
Figuur 11 | Gevoeligheidsanalyse bij KERI298_2_1. Geen verandering in de kD geeft de beste resultaten voor de $T=10$ piek. Een lagere kD geeft de beste resultaten bij de eerste piek en een hogere kD geeft de beste resultaten bij de tweede piek



Figuur 12 | Gevoeligheidsanalyse bij KERI298_3_1. Een verlaging van de kD geeft de beste resultaten bij de eerste piek. Een hogere kD geeft de beste resultaten bij de twee piek en de $T=10$ piek.



Figuur 13 | Gevoeligheidsanalyse bij KERI298_4_1. Verhoging van de kD geeft de beste resultaten bij alle pieken.



Figuur 14 | Gevoeligheidsanalyse bij KERI305_A_1. Een verlaging van de kD geeft de beste resultaten bij de eerste piek. Een hogere kD geeft de beste resultaten bij de twee piek en de $T=10$ piek.

4.3 Conclusie gevoeligheidsanalyse

De berekende stijghoogte vertoont het meest representatieve systeemgedrag zonder verandering van het doorlaatvermogen (definitieve modelverbetering). Op basis van de gevoeligheidsanalyse zijn de initieel ingeschatte parameters (v06; Bijlage C) van de definitieve modelverbetering een geschikt vertrekpunt voor hoogwaterstudies.

De gevoeligheidsanalyse geeft inzicht in de onzekerheid in parameterinschatting en de bandbreedte in modeluitkomsten. De verhoging/verlaging van het doorlaatvermogen met een factor 3 heeft ongeveer 10 cm effect op de berekende stijghoogte tijdens de onderzochte hoogwatersituaties (piek). Afhankelijk van de peilbuislocatie én hoogwatersituatie kan met een verhoging/verlaging van het doorlaatvermogen de afwijking van de berekende stijghoogte met 10-50 cm verkleind worden. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse geven onvoldoende aanknopingspunten om een ruimtelijke kalibratie uit te voeren (bijvoorbeeld, binnendijs/buitendijs). Overige conclusies van de gevoeligheidsanalyse op de definitieve modelverbeteringen zijn:

- Een verhoging/verlaging van de verbeterde deklaagweerstand met een factor 2 heeft weinig invloed op de berekende stijghoogte. Gevoeligheidsanalyses met grotere factoren (uit tussenversies) geven een vergelijkbaar beeld.

- De toegepaste bandbreedte op het doorlaatvermogen (factor 3) heeft een 10 tot 50 cm effect op de berekende stijghoogte.
- Het effect op de stijghoogte is afhankelijk van de locatie (binnen-, buitendijks en afstand tot de Maas) en de hydrologische situatie (zomer- vs. wintersituatie; gemiddelde- en hoogwatersituatie).
- Een verhoging van het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket leidt tot op 1 km afstand van de Maas tot circa 10 cm hoger berekende stijghoogten tijdens hoogwatersituaties (zie Figuur 9). Op meer dan 1-2 kilometer van de Maas leidt een verhoging van het doorlaatvermogen tot 10-50 cm lager berekende stijghoogten.
- Een verlaging van het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket leidt tot op 1 km afstand van de Maas tot circa 10 cm lager berekende stijghoogten tijdens hoogwatersituaties (zie Figuur 10). Op meer dan 1-2 kilometer van de Maas leidt een verlaging van het doorlaatvermogen tot 10-50 cm hoger berekende stijghoogten.
- Voor stijghoogteberekeningen met hoogwatersituaties is een verhoging van het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket, binnen het invloedsgebied van de hoogwatersituatie/Maas, te rechtvaardigen. Het doorlaatvermogen in regionale modellen is doorgaans gekalibreerd voor gemiddelde hydrologische situaties. Tijdens een hoogwatersituatie is het aannemelijk dat een groter deel van het (of het volledige) watervoerend pakket verzadigd is en delen van de bodemmatrix in deze situatie bijdragen aan het totale doorlaatvermogen.

5 Modelresultaten (validatie)

Het doel van dit project is het verbeteren van het grondwatermodel over het traject Cuijk-Ravenstein om de stijghoogte (en systeemgedrag) in de omgeving van de dijk zo nauwkeurig mogelijk te berekenen tijdens een hoogwaterperiode ($T=10$). Voor de validatie is een nauwkeurigheid van het systeemgedrag nagestreefd van maximaal 0,5 m afwijking op de (piek)stijghoogte. Dit is ongeveer 10% van de maximaal gemeten stijghoogteverandering tijdens een hoogwatersituatie langs het dijktracé Cuijk-Ravenstein (bijvoorbeeld Figuur 1). Een grotere afwijking is geaccepteerd zolang het juiste systeemgedrag berekend is. Bij extreme situaties hebben lokale processen (geologie en parameters) een grotere invloed en onzekerheid op de stijghoogte dan onder gemiddelde omstandigheden. De validatie is uitgevoerd in het lokale modelgebied (oranje lijn) en berekend op een resolutie van 25 m (Figuur 15). Buiten het aandachtsgebied van dijktracé Cuijk-Ravenstein is een grotere afwijking van de berekende stijghoogte en systeemgedrag geaccepteerd. Bijvoorbeeld langs de rechteroever van de Maas (buiten beheergebied waterschap Aa en Maas) en binnendijks op een afstand groter dan 500 m van de dijk.

De modelinvoer is tussentijds aangepast en verbeterd (gevoeligheidsanalyse en kalibratie). Na de definitieve modelverbeteringen is het systeemgedrag en de berekende stijghoogte gevalideerd. Voor de validatie zijn de modelresultaten vergeleken met de beschikbare metingen van peilbuislocaties. In de volgende paragrafen zijn voor de validatie de meetpunten, hoogwatersituatie 2021 en hoogwatersituatie 2011 beschreven.

5.1 Validatiemetingen

De GRAM-database bevat een set van peilbuislocaties met gemeten grondwaterstanden en stijghoogten. Hierin zijn openbare meetgegevens en meetgegevens van Aa en Maas (FEWS) gecombineerd. Om doelmatige “validatiesets” voor het grondwatermodel Cuijk-Ravenstein (CuRa) samen te stellen, zijn de volgende selectiecriteria gehanteerd:

- Alleen de peilbuizen in het (regionale) modelgebied (zie paragraaf 2.2) zijn gebruikt;
- Het model is gevalideerd voor twee $T=10$ periodes:
 - Peilbuislocaties met metingen in de periode 2020-2021;
 - Peilbuislocaties met metingen in de periode 2010-2012;
- Peilbuislocaties met onbekende filterstellingen en ontbrekende meetperioden groter dan 1 jaar zijn niet gebruikt;
- Peilbuislocaties met een meetinterval groter dan 5 dagen zijn niet gebruikt;
- Peilbuislocaties met een EVP lager dan 70% zijn niet representatief beschouwd en zijn niet gebruikt³.

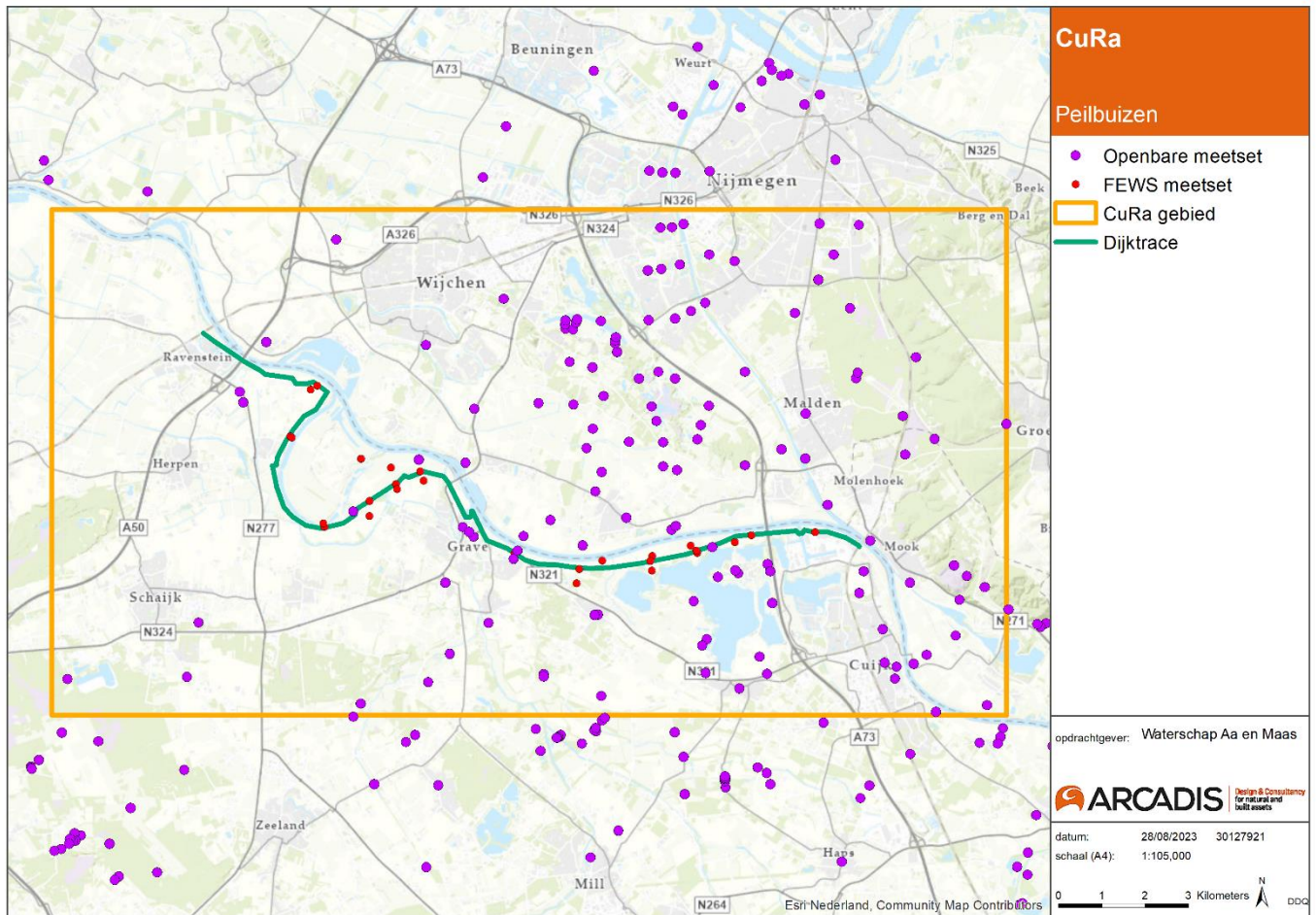
De metingen van 2020-2021 zijn gebruikt om het systeemgedrag langs de dijk te valideren. De metingen van 2010-2012 zijn gebruikt om het systeemgedrag tijdens een andere hoogwatersituatie te valideren, en ook om de invloed op regionale grondwaterstanden en stijghoogten in beeld te brengen.

De FEWS-metgegevens bevat 29 peilbuislocaties en de openbare meetgegevens 128 peilbuislocaties (Figuur 15). De peilbuislocaties zijn op basis van de (onderkant) filterstelling opnieuw toegekend aan de juiste representatieve modellaag. Tijdens de validatie is de nadruk gelegd op peilbuislocaties met metingen binnen het invloedsgebied van de hoogwatersituatie op de Maas ($T=10$). Deze locaties bevonden zich:

- Buitendijks (langs de Maas en in de uiterwaarden);
- Langs de dijk (buitenteen/binnenteen);
- Binnendijks (tot op circa 500 m afstand van de dijk).

Hoewel de FEWS-peilbuizen over het dijktracé een goede spreiding hebben, zijn er enkele gebieden langs het dijktracé waar geen metingen beschikbaar die de hoogwatersituatie van 2021 hebben gemeten. Dit geldt vooral voor de omgeving van Ravenstein, de zuidoostkant van de Keent en Cuijk.

³ De verklaringspercentages (*explained variance percentage*; EVP) van een meetreeks is berekend met het programma Menyanthes aan de hand van neerslag, verdamping en Maaswaterstand. Hierdoor worden peilbuizen uitgesloten die niet verklaard kunnen worden door neerslag, verdamping en Maaswaterstand, zoals wanneer ze onder water staan vanwege een hoge waterstand).

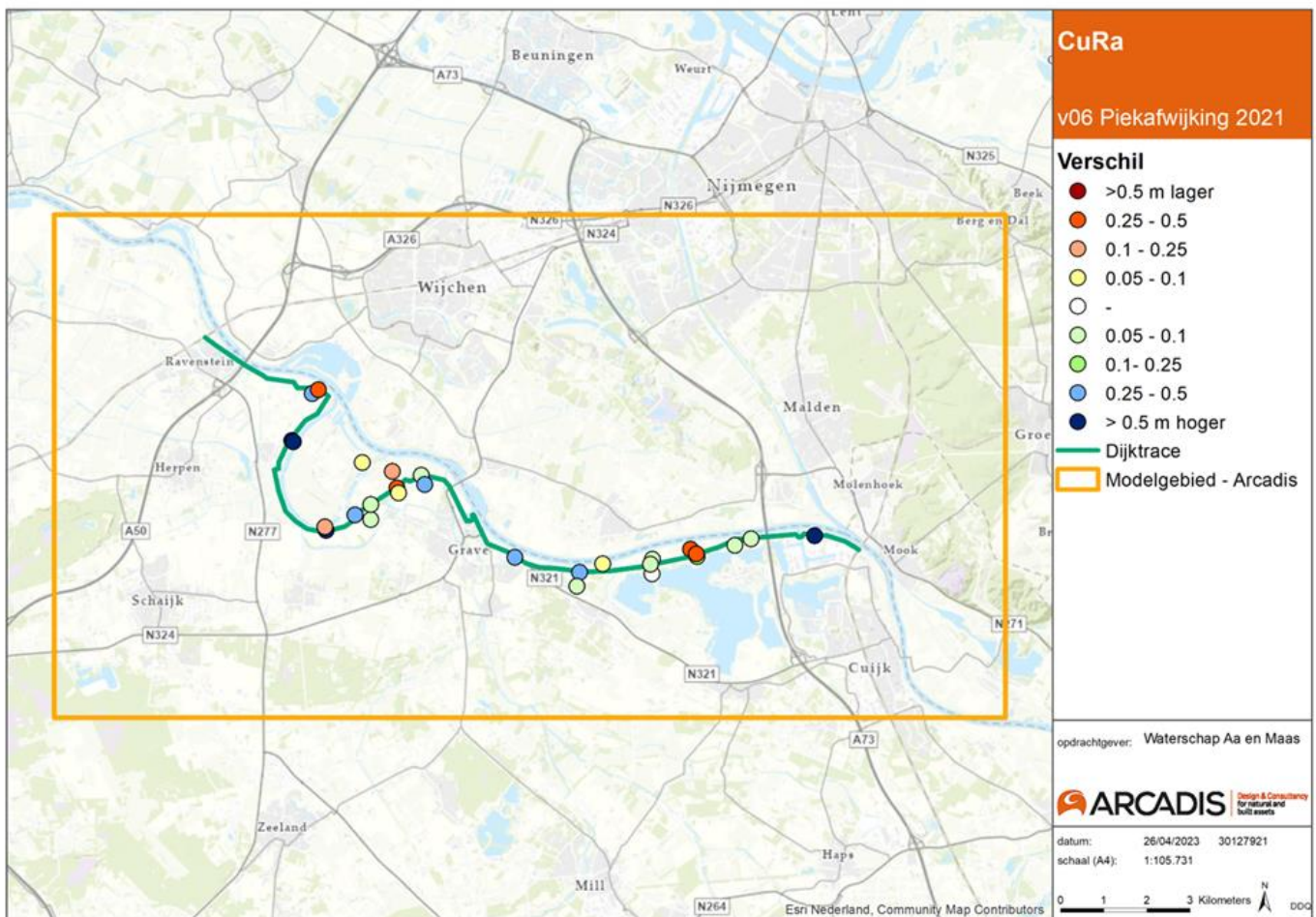


Figuur 15 | Kalibratie- en validatieset. Rode punten is de GRAM-meetset. Paarse punten zijn de validatieset. Regionale WSP-gebied ontbreekt, de focus is gelegd op de peilbuizen langs de Maas.

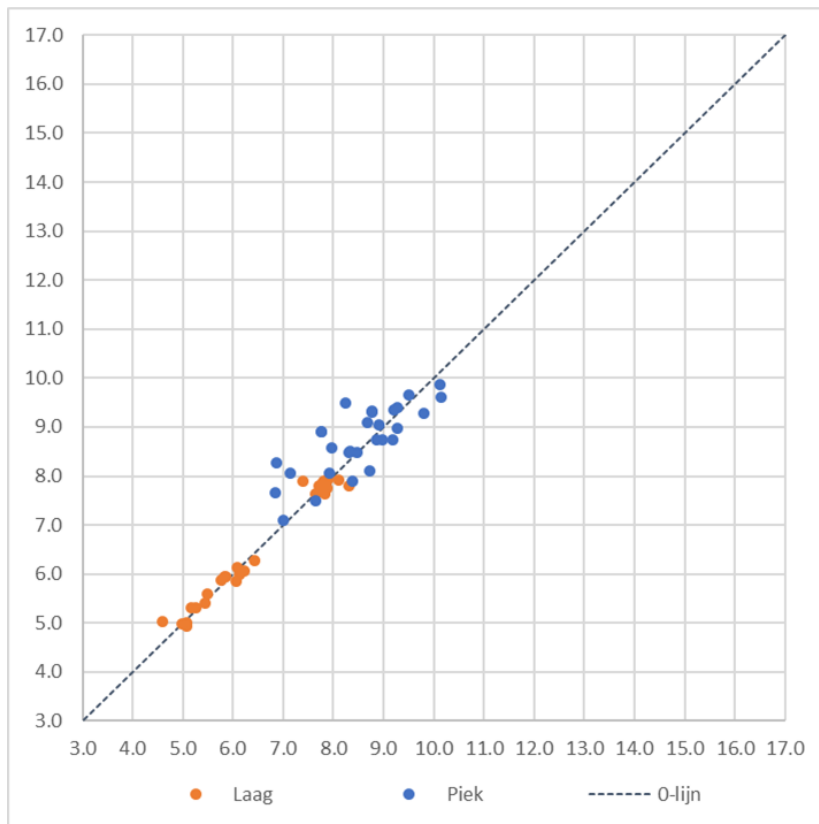
5.2 Resultaten T=10 (2021)

De validatieresultaten zijn weergegeven in een residuenkaart en spreidingsgrafieken ('scatterplots'). De residuenkaart is opgesteld voor de piekstijghoogte tijdens de hoogwatersituatie van 2021 (Figuur 16). In de residuenkaart is het verschil tussen berekende stijghoogte en gemeten stijghoogte weergegeven. In de scatterplots zijn de gemeten stijghoogten (x-as) afgezet tegen de berekende stijghoogten (y-as). In Bijlage D (en op de rekenserver van waterschap Aa en Maas) zijn de validatiegrafieken opgenomen.

Het model berekend de stijghoogte tijdens de hoogwatersituatie (piek) over het algemeen met een afwijking kleiner dan 0,5 m. Voor de hoogwatersituatie 2021 wordt de stijghoogte gemiddeld 0,2 m te hoog berekend. Voor gemiddelde grondwaterstanden en stijghoogten berekent het model een afwijking kleiner dan 0,05 m. Het systeemgedrag na de piek van de hoogwatersituatie, zoals stijghoogteverlaging wordt qua niveau en duur goed berekend. Afhankelijk van de peilbuislocatie en de hydrologische (hoogwater)situatie wordt verschillend systeemgedrag gemeten en berekend. Bijvoorbeeld bij Ravenstein – Keent en nabij Cuijk, waar ook de grootste afwijkingen met de gemeten stijghoogte worden berekend.



Figuur 16 | Residuenkaart hoogwaterpiek 2021 (T=10; v06). De gemeten stijghoogten zijn vergeleken met de berekende stijghoogte. De residuen zijn zowel te hoog als te laag berekend en het ruimtelijk beeld duidt niet op een systematische modelfout.



STATISTIEKEN (2020-2021)

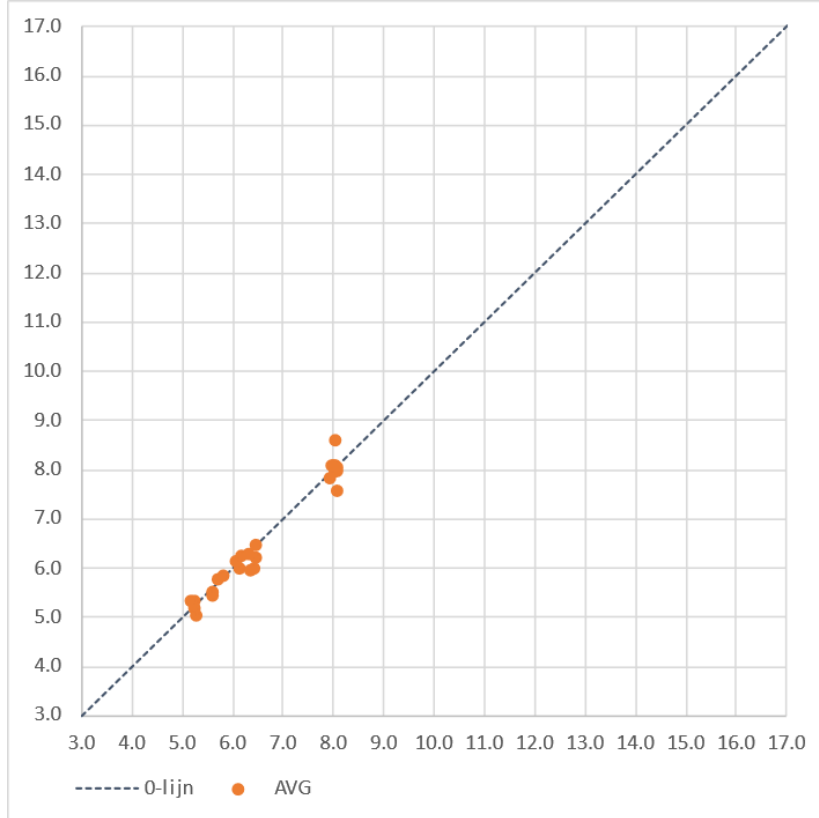
Piek

Gemiddelde afwijking	0.21 (te nat)
Gemiddelde absolute afwijking	0.47
Min/Max	-0.63/1.4

Laagwater

Gemiddelde afwijking	0.00 (te droog)
Gemiddelde absolute afwijking	0.13
Min/Max	-0.52/0.5

Figuur 17 | Gemiddelde afwijking van de berekende stijghoogte tijdens de hoogwatersituatie 2021. De pieken worden circa 20 cm te hoog berekend. Laagwater wordt goed berekend.



STATISTIEKEN (2020-2021)

Gemiddeld

Gemiddelde afwijking	0.03 (te nat)
Gemiddelde absolute afwijking	0.13
Min/Max	-0.59/0.49

Aantal peilbuizen

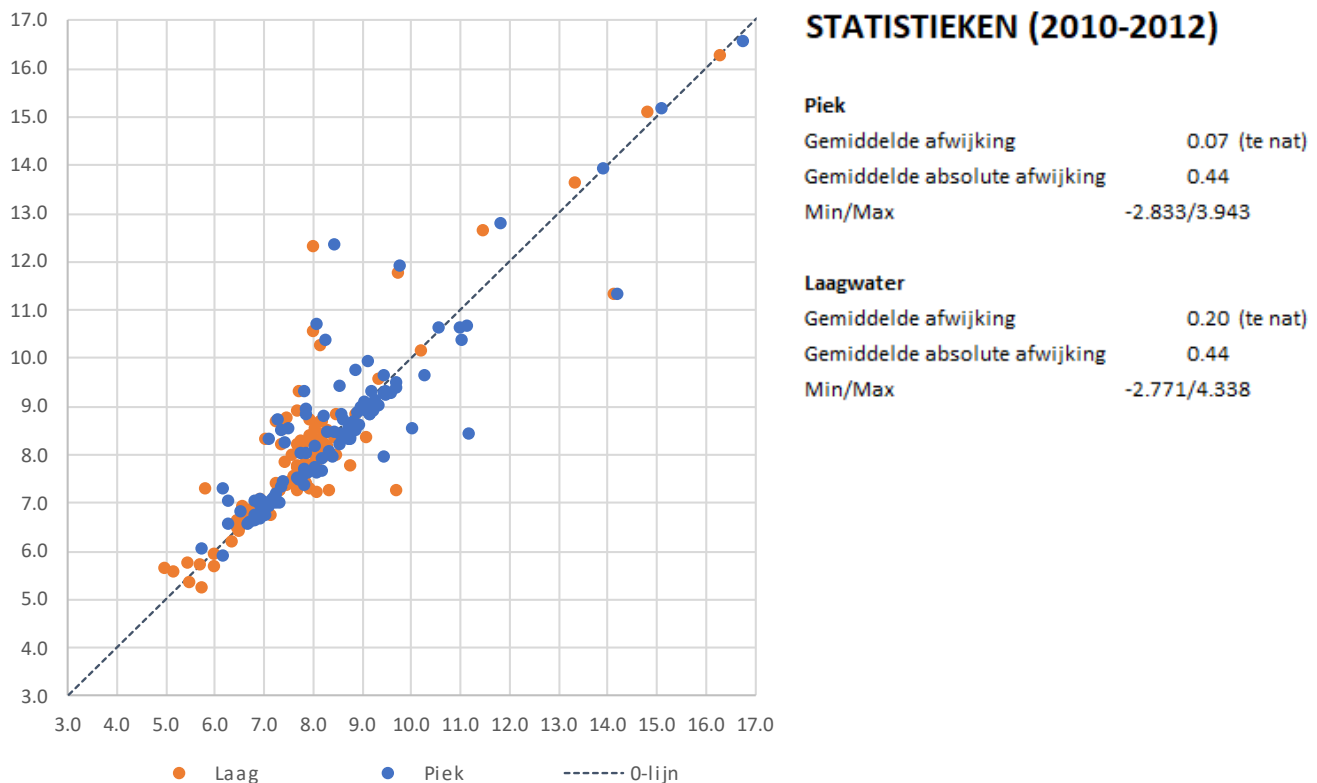
29

Figuur 18 | Statistieken gemiddelde afwijking de peilbuizen over de gehele periode 2020-2021.

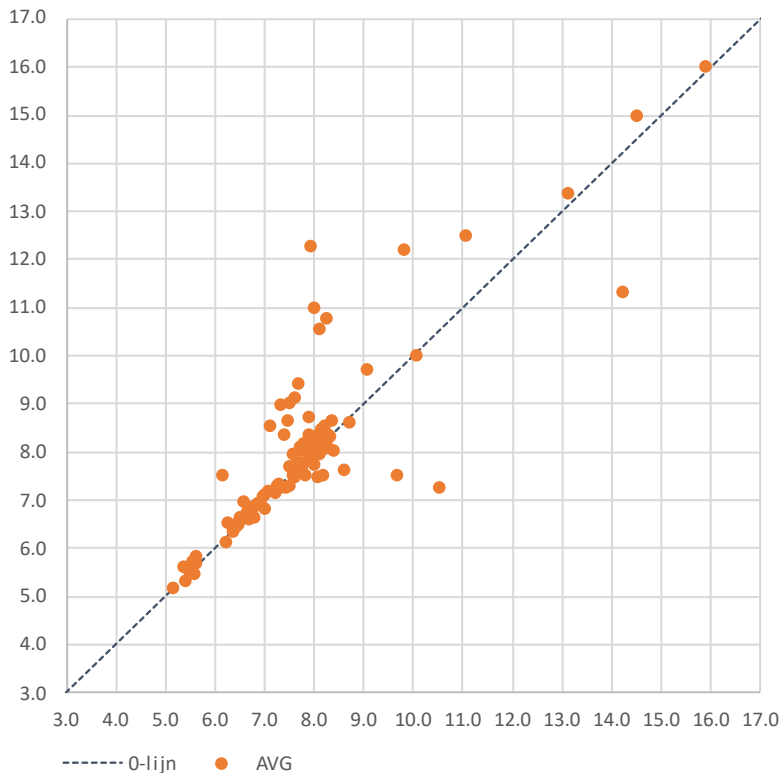
5.3 Resultaten T=10 (2011)

Om te beoordelen of de modelverbeteringen hetzelfde systeemgedrag vertonen in een andere rekenperiode is een validatie met de hoogwatersituatie 2011 uitgevoerd. De validatieresultaten zijn weergegeven in Figuur 18, Bijlage D en op de rekenserver.

Het model berekent de stijghoogte tijdens de hoogwatersituatie (piek) over het algemeen met een afwijking kleiner dan 0,5 m. Voor de hoogwatersituatie 2011 wordt de stijghoogte gemiddeld 0,1 m te hoog berekend. Voor gemiddelde grondwaterstanden en stijghoogten berekent het model een gemiddelde afwijking van 0,2 m. Het systeemgedrag na de piek van de hoogwatersituatie, zoals stijghoogteverlaging wordt qua niveau en duur goed berekend.



Figuur 19 Gemiddelde afwijking de peilbuizen tijdens de hoogwaterpiek 2011. Het model berekend de piek van 2011 op een aantal uitschieters na erg goed uit.



STATISTIEKEN (2010-2012)

Gemiddeld	
Gemiddelde afwijking	0.20 (te nat)
Gemiddelde absolute afwijking	0.43
Min/Max	-3.26/4.35
Aantal peilbuizen	128

Figuur 20 | Gemiddelde afwijking de peilbuizen over de gehele periode 2010-2012 wordt iets te nat berekend (20 cm).

5.4 Conclusie validatie

Er zijn voldoende stijghoogtemetingen langs dijktracé Cuijk-Ravenstein en op voldoende verschillende afstand tot de Maas en de dijk om het systeemgedrag en berekende stijghoogten van de hoogwatersituatie 2021 te valideren. Afhankelijk van de peilbuislocatie en de hydrologische (hoogwater)situatie wordt verschillend systeemgedrag gemeten en berekend. De validatiestatistieken en grafieken tonen aan dat het model de stijghoogten goed berekent, in absoluut niveau en in dynamiek. Bijvoorbeeld ook het uitzakken van de stijghoogte na de hoogwatersituatie.

Aan zowel de westelijke als oostelijke grenzen van het modelgebied en dijktracé zijn minder metingen en peilbuislocaties beschikbaar. Bijvoorbeeld bij Ravenstein – Keent en Cuijk. Hier worden de grootste afwijkingen met de gemeten stijghoogte berekend. We adviseren om tussen Ravenstein – Keent en nabij Cuijk, extra peilbuizen te plaatsen.

6 Conclusie en aanbevelingen

De aanleiding van deze studie is de dijkverbetering Cuijk-Ravenstein, waarvoor een grondwatermodel nodig is dat betrouwbare en nauwkeurige grondwaterstanden en stijghoogten kan berekenen voor hoogwatersituaties ($T=10$). Binnen het grondwatermodel Aa en Maas (GRAM) is een deelmodel ontwikkeld rondom de dijkverbetering Cuijk-Ravenstein (CuRa). Stijghoogteberekeningen met (regionale) grondwatermodellen geven, in aanvulling op stijghoogtemetingen, inzicht in de bandbreedte van optredende stijghoogten. Deze inzichten kunnen vervolgens worden benut bij de optimalisatie van de uitdagingen met betrekking tot piping en stabiliteit, en wel op de volgende manieren:

- Voor een vlakdekkend gebied langs de dijk (binnen- en buitendijks);
- Voor verschillende hydrologische situaties, zowel gemiddelde situaties als de $T=10$;
- Voor toekomstige situaties/effectenstudies.

Om het model op te stellen, zijn GRAM 3.0 en MORIA 4.7 gekoppeld en zijn aanpassingen aangebracht aan het CuRa-deelmodel. De belangrijkste modelverbeteringen omvatten het aanpassen en kalibreren van de deklaagweerstand (c) en doorlaatvermogen (kD) van het watervoerend pakket (WVP). Daarnaast zijn er verbeteringen doorgevoerd in de modellering van de onverzadigde zone (MetaSWAP) en inundaties in de uiterwaarden.

Het doel van deze studie is om tijdens een hoogwatersituatie (piek) de stijghoogte langs de dijk binnen een marge van 0,5 meter ten opzichte van de gemeten stijghoogte te berekenen. De berekende grondwaterstanden en stijghoogten van het CuRa-model (versie 06) voldoen aan de validatiedoelen en zijn geschikt voor het bepalen van grondwaterstanden en stijghoogten tijdens een hoogwatersituatie met een herhalingstijd van $T=10$. Bij toepassing van deze stijghoogten in piping- en stabiliteitsberekeningen kan een betrouwbaarder beeld van de opgave vastgesteld worden en daarmee een optimalisatie plaatsvinden. Het is echter wel belangrijk om rekening te houden met de betrouwbaarheid van het model:

- Het grondwatermodel CuRa is als betrouwbaar beoordeeld voor het berekenen van stijghoogten tot een afstand van 1 kilometer van de dijk tijdens een hoogwatersituatie met $T=10$.
- De nauwkeurigheid van de berekende stijghoogten vertoont ruimtelijke variatie en bedraagt ongeveer 0,5 meter binnen een afstand van 1 kilometer van de dijk.
- Op locaties die zich op meer dan 1 kilometer afstand van de dijk bevinden, neemt de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de berekende stijghoogten af.

Conclusies

In deze studie zijn de volgende conclusies getrokken met betrekking tot hoogwatersituaties:

- Het CuRa-model (v06) voldoet bij het berekenen van de grondwaterstand en stijghoogte (piek) voor een hoogwatersituatie ($T=10$). Het model is geschikt om grondwaterstanden en stijghoogten te berekenen voor hoogwatersituaties.
- Het model blijkt gevoelig te zijn voor aanpassingen van het doorlaatvermogen (kD ; WVP). De mate van gevoeligheid op de berekende stijghoogte varieert afhankelijk van de locatie (binnen vs buitendijks; afstand tot de Maas) en het tijdstip (zomer- vs. wintersituatie; gemiddelde- vs. hoogwatersituatie).
 - Een kD verhoging heeft een positief effect bij het berekenen van de $t=10$ piek.
 - Het model is licht gevoelig bij het berekenen van de piek, aanpassingen op de kD hebben wel een grote invloed op het systeemgedrag van het model.
- De deklaagweerstand (buitendijks) heeft weinig invloed, mede doordat de Maas diep is ingesneden en de weerstand erg heterogeen en niet vlakdekkend aanwezig is (Bijvoorbeeld bij Geul Keent).
- De gespannen berging heeft weinig invloed, omdat deze al erg klein is. Een aanpassing (binnen realistische bandbreedte) leidt daarom niet tot een significante verandering
- De hydraulische weerstand van oppervlaktewater heeft, bij de gekalibreerde parameterwaarden, weinig tot geen invloed (5-10 cm) op de berekende stijghoogte (niet gevoelig). Voor de Maas is nagenoeg geen weerstand aanwezig (doorsnijding). Daarom heeft een verhoging of verlaging binnen de (aanwezige) gestelde (fysisch realistische) waarden, weinig invloed.

In deze studie blijkt het doorlaatvermogen (kD) van het watervoerend pakket de grootste impact te hebben op de nauwkeurigheid van de grondwatermodellering tijdens hoogwatersituaties. Vanwege de ondergrondse heterogeniteit en lokaal voorkomende processen (zoals preferente stroming door goed doorlatende lagen en radiale toestroming),

vertonen de berekende stijghoogten variaties tussen verschillende locaties en in diverse hoogwatersituaties (bijvoorbeeld zomer vs. Winter).

Opmerkelijk is dat bij een sterk heterogene deklaagweerstand, waar sommige locaties een lage deklaagweerstand hebben of waar slecht doorlatende bodemtypen zelfs ontbreken (zoals bij De Keent), de invloed van kD minder groot lijkt te zijn op de berekende stijghoogten.

In GRAM, en daarmee ook het CuRa-model, is de gespannen berging al goed ingeschat. Echter, tijdens hoogwatersituaties waar inundatie van het maaiveld plaatsvindt, leidt de freatische berging soms tot afwijkend systeemgedrag en de berekende grondwaterstanden en stijghoogten.

Aandachtspunten

- Er is niet onderzocht of het CuRa-model voldoet aan het validatiedoel voor andere hoogwatersituaties, zoals T=100 of zelfs T=3000, of voor de gemiddelde situatie (GxG).
- De berekende stijghoogte tijdens een hoogwatersituatie (T=10) is tot op 1.000 m afstand van de Maas circa 0,5 m nauwkeurig beoordeeld. Er zijn ruimtelijke verschillen in de nauwkeurigheid berekend. De bandbreedte en betrouwbaarheid van de berekende stijghoogte met de ingeschatte kD-waarden is ruimtelijk inzichtelijk gemaakt in de gevoeligheidsanalyse en kalibratie. Bij het gebruik van de berekende stijghoogten moet rekening gehouden worden met de gepresenteerde bandbreedte en ruimtelijke variatie in modelnauwkeurigheid en betrouwbaarheid.
- Freatische berging is in dit model door MetaSWAP berekend.
- Voor de kalibratie en validatie zijn 29 peilbuizen gebruikt. Echter, we adviseren om extra peilbuizen te plaatsen in de omgeving van zowel Cuijk als Ravenstein, bij voorkeur op plekken waar nu peilbuizen ontbreken of waar een grote onzekerheid wordt berekend. Zo kunnen de resultaten worden aangevuld en worden meetpunten gevalideerd. Dit is met name relevant bij Ravenstein, de zuidoostkant van de Keent en bij Cuijk.
- Een geotechnische interpretatie van de opbouw van de deklaag- en watervoerende pakket (gelaagdheid) zouden meer aandacht moeten krijgen bij het opstellen van regionale grondwatermodellen:
 - De doorsnijding van watergangen en rivieren hebben grote invloed op de stijghoogte in het watervoerend pakket. De schematisering van de regionale grondwatermodellen is in de verticale discretisatie (laagindeling) vaak te grootschalig om de lokale (ondiepe) bodemopbouw en doorsnijding van de deklaag representatief te modelleren. In veel gebieden met een deklaag van enkele meters loopt de dikte in de eerste 1-10 modellagen snel op van afwezig of enkele (centi)meters tot meerdere meters of zelfs meer dan 10 meter.
 - Een gevoeligheidsanalyse van de deklaagweerstand en doorlaatvermogen van het watervoerend pakket in combinatie met de modeldiscretisatie (gridverfijning) geeft inzicht in het effect dat het detail van het rekengrid heeft op de berekende grondwaterstanden en stijghoogten.
 - Lokale ondergrondgegevens (boringen, sonderingen, etc.) in combinatie met (ondiepe) ondergrondmodellen zoals GeoTOP en geotechnische dwars-/lengteprofielen kunnen bijdragen aan het detailleren van de deklaag en eerste watervoerend pakket bij een hogere (verticale) modeldiscretisatie.

Bijlage A – Koppeltabellen

TOP GRAM	TOP MORIA	TOP ARCADIS
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	10	5
6	11	6
7	12	7
8	12	8
9	13	9
10	14	10
11	15	11
12	16	12
13	17	13
14	18	14
15	18	15
16	18	16
17	18	17
18	19	18
19	19	19

BOT GRAM	BOT MORIA	BOT ARCADIS
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	9	4
5	10	5
6	11	6
7	top12*	7
8	12	8
9	13	9
10	14	10
11	15	11
12	17	12
13	17	13
14	top18 *	14
15	top18 *	15
16	top18 *	16
17	top19 *	17
18	top19 *	18
19	19	19

*Laag komt niet voor in MORIA

Koppeltabel om GRAM te verlengen met MORIA					
Modellayer		GRAM3	Gohydrologisch pakket - REGISII	MORIA4.7	Gohydrologisch pakket - REGISII
WVP	SDL	IDF	[-]	IDF	[-]
1		TOP1.IDF BOT1.IDF	hlc	TOP1.IDF BOT1.IDF	hlc (GEOTOP)
1			c1		hlc (GEOTOP)
2		TOP2.IDF BOT2.IDF	bxz2	TOP2.IDF BOT2.IDF	Pleisz*, bxz2
2			c2		bxlmk1, bxk1
3		TOP3.IDF BOT3.IDF	bxz3	TOP3.IDF BOT3.IDF	bxz3
3			c3		bxk2, krwyk1, krk1
4		TOP4.IDF BOT4.IDF	bxz4, krz2, krz3, bez1, bez2, bez3, eez1, eez2, eez3, krz4, krz5, drz1, drz2, drz3, dtc, dnz1, urz1, urz2, Berok1, bek1, bek2, wbv1, eek1, eek2, krzuk1, krtwk1, druik1, drgik1, urk1, stk1	TOP4.IDF BOT4.IDF	bxz4, krz2, krz3, bez1, bez2, bez3
4			c4		bek1, bek2, wbv1, eek1
5		TOP5.IDF BOT5.IDF	stz2, syz1	TOP5.IDF BOT5.IDF	eez1, eez2, eez3
5			c5		krzuk1
6		TOP6.IDF BOT6.IDF	syz2	TOP6.IDF BOT6.IDF	Krz4
6			c6		krtwk1
7		TOP7.IDF BOT7.IDF	syz3	TOP7.IDF BOT7.IDF	krz5, drz1, drz2, drz3, dtcbz
7			c7		Druik1, drgik1
8		TOP8.IDF BOT8.IDF	syz4, pzwaz1	TOP8.IDF BOT8.IDF	DTC
8			c8		DTC
9		TOP9.IDF BOT9.IDF	pzwaz2	TOP9.IDF BOT9.IDF	z, dnz1, urz1, urz2, urz3, urz4, urz5, urk1, stk1
9			c9		urk1, stk1
10		TOP10.IDF BOT10.IDF	pzwaz3	TOP10.IDF BOT10.IDF	stz2, syz1
10			c10		Syk1
11		TOP11.IDF BOT11.IDF	pzwaz4, msz1	TOP11.IDF BOT11.IDF	syz2
11			c11		syk2
12		TOP12.IDF BOT12.IDF	msz2	TOP12.IDF BOT12.IDF	syz3, syz4, pzwaz1
12			c12		Wak1
13		TOP13.IDF BOT13.IDF	msz3, msc, msz4, kiz1	TOP13.IDF BOT13.IDF	pzwaz2
13			c13		wak2
14		TOP14.IDF BOT14.IDF	kiz2	TOP14.IDF BOT14.IDF	pzwaz3
14			c14		wak3
15		TOP15.IDF BOT15.IDF	kiz3	TOP15.IDF BOT15.IDF	pzwaz4, msz1
15			c15		Msk1
16		TOP16.IDF BOT16.IDF	kiz4	TOP16.IDF BOT16.IDF	msz2
16			c16		Msk2
17		TOP17.IDF BOT17.IDF	kiz5, ooz1	TOP17.IDF BOT17.IDF	msz3, msc, msz4, kiz1
17			c17		Kik1
18		TOP18.IDF BOT18.IDF	ooz2, ooc	TOP18.IDF BOT18.IDF	kiz2, kiz3, kiz4, kiz5, ooz1
18			c18		Ook, ooc
19		TOP19.IDF BOT19.IDF	iez2, iez3, brz1*	TOP19.IDF BOT19.IDF	Ooz2, ooc, brz1

Bijlage B – Technische specificatie modelverbetering

Hierin zijn de samenvattende tabellen opgenomen met Activiteit (van de uitvraag), uitgangspunten die van toepassing zijn bij de activiteit en de verbeteringsslagen.

B-1: Technische specificatie modelverbetering: zomerbed

Omschrijving

Activiteit	A_1a: Breng het zomerbed passend op 25 meter netjes in de verschillende modellagen. De intreedeweerstand van het zomerbed lijkt laag te zijn (0,1 dag).
Uitgangspunt	<ul style="list-style-type: none"> Ter plaatse van het zomerbed van de Maas moet de intreedeweerstand tussen het Maaswaterpeil en stijghoogte in het eerste watervoerend pakket gemodelleerd worden in de geohydrologische bodemweerstand (k_v). Het model is een lagenmodel met doorlatendheden en berekend weerstanden aan de hand van de laagdiktes en k_v. Alleen de k_v waarden zijn aangepast om de gewenste weerstand te bereiken. De laagdiktes zijn niet aangepast, om toekomstige koppeling met het gehele GRAM model mogelijk te maken.
Verbetering	<ul style="list-style-type: none"> De bodemweerstand (c) ter plaatse van het zomerbed van de Maas is op 0,1 dag gezet (L1-4). De rivierbodemweerstand (intreedeweerstand) ter plaatse van het zomerbed van de Maas is op 0,1 dag gezet.

B-2: Technische specificatie modelverbetering: Uiterwaarde en achterland

Omschrijving

Activiteit	A_2a: Als de uiterwaard overstroomt (inundatie) moet een intreedeweerstand worden meegegeven; deze weerstand is boven op de bodemweerstand. Bij MeMa is hier 5 dagen voor gebruikt; hier alleen van afwijken als daar goede reden voor is.
Uitgangspunt	<ul style="list-style-type: none"> Het is niet mogelijk om extra weerstand tijdsafhankelijk (bij een inundatie) aan de bodem toe te kennen (modelgebrek). Daarom is er gekozen om een minimale weerstand in de bodemweerstand op te leggen.
Verbetering	<ul style="list-style-type: none"> Er is een minimale weerstand van 5 dagen toegekend in de uiterwaarde door de verticale doorlatendheid (k_v) in laag 1 te veranderen in relatie tot de aanwezige laagdikte. Voorbeeld: bij een minimale laagdikte van 0,1 m is de k_v 0,2 m/d ($c = 5,0$ d).

B-3: Technische specificatie modelverbetering: Open water

Omschrijving

Activiteit	A_2b: Check op open water of dit juist gemodelleerd wordt met het model.
Uitgangspunt	<ul style="list-style-type: none"> Door een hoge horizontale- en verticale doorlatendheid (k_h en k_v) toe te kennen aan modelcellen van de plas wordt er een vrije doorstroming van grondwater gesimuleerd. In MetaSWAP zijn de plassen opgenomen als nat oppervlak en is er geen grondwateraanvulling vanuit MetaSWAP berekend.
Verbetering	<ul style="list-style-type: none"> De k_h is op 1.000 m/d gezet bij de Kraaijenbergse Plassen. Dit is toegepast voor laag 1- 8 (gebaseerd op de doorsnijding van de plasbodemhoogte in het lagenmodel) De k_v voor laag 1 bij de Kraaijenbergse Plassen is ook op 1.000 m/d gezet, om eventuele verticale weerstand binnen de plassen te verwijderen.

B-4: Technische specificatie modelverbetering: Deklaagweerstand

Omschrijving

Activiteit	A_3: Analyseer de weerstand en het voorkomen (dikte) van klei in de uiterwaarden en het achterland en pas het model indien nodig aan. Gebruik hierbij aanvullende gegevens als boringen, bodemkaart etc.
Uitgangspunt	<ul style="list-style-type: none"> De volgende gegevens zijn gebruikt voor de interpolatie van de deklaagweerstand: <ul style="list-style-type: none"> DINO boringen: 3.101 locaties; DINO Sonderingen: 853 locaties; BRO Sonderingen: 773 locaties; Aanvullende gegevens (Aa en Maas): 25 locaties; De aangenomen doorlatendheden zijn opgenomen in Tabel 1; De geïnterpoleerde deklaagweerstand is op basis van de laagdikte, die niet is aangepast, omgerekend naar verticale doorlatendheden (k_v) voor de eerste slecht doorlatende laag. <ul style="list-style-type: none"> <i>iMODFLOW (iMOD rekencode) rekent met weerstanden door de laagdikte te delen door de k_v. Omdat de laagdiktes deelmodellen niet aangepast mogen worden (zodat het model later aan GRAM toegevoegd kan worden en dat de overige lagen niet aangepast hoeven te worden) is de weerstand verdisconteerd in de k_v (In het model wordt deze k_v aangeduid als k_{v1} interpolatie). Hierdoor is het mogelijk dat fysisch onrealistische verticale doorlatendheden in de modeldatabase zijn toegepast. De gebruikers van het grondwatermodel moeten bewust zijn van de herkomst van deze k_v-waarden. Idealiter wordt in toekomstige modelversies de laagindeling aangepast om representatieve laagdiktes en doorlatendheden in het model toe te passen.</i>
Verbetering	<ul style="list-style-type: none"> De waargenomen diktes van slecht doorlatende bodemtypen (lithologie) zijn per boring en sondering (locaties) bepaald met behulp van een aantal scripts/tools: <ul style="list-style-type: none"> Voor de eerste 9 m onder maaiveld is per locatie (Figuur 4) de totale weerstand berekend door de som van de dikte per lithologie te delen door de doorlatendheden (Tabel 1). Deze 9m sluit aan bij de methode die is toegepast bij MeMa. Uitbijters van weerstanden en boor- en sondeerlocaties in/onder de dijk zijn niet opgenomen in de interpolatie. De weerstand is geïnterpoleerd met de interpolatie methode: topo-to-raster Meerdere k_v waarden zijn getest. De uiteindelijke waarden zijn gekozen, omdat deze waarden de ruimtelijke heterogeniteit goed weergeven en daarbij geven deze waarden ook de beste resultaten. De uiteindelijke k_v is bepaald door de dikte van SDL1 te delen door geïnterpoleerde C-waarden <ul style="list-style-type: none"> De modellaag dikten zijn onveranderd. Deklaag is bij het aanleggen van de Geul Keent volledig afgegraven. Daarom is bij de Geul Keent is de weerstand op 0,1 dag gezet (zoals bij de Maas). De verandering van de weerstand/k_v is alleen toegepast in de uiterwaarde (Figuur 3), omdat deze bij GRAM nog niet goed gekalibreerd was. Binnendijks is de weerstand wel goed gekalibreerd.

B-5: Technische specificatie modelverbetering: Waterhuishouding

Omschrijving

Activiteit	A_4a: Analyseer het doorsnijden van deze kleilaag door sloten en pas het model aan indien nodig.
Uitgangspunt	De modelinvoer van GRAM en MORIA is gecontroleerd op basis van peil en bodemhoogte/drainageniveau. Hieruit blijkt dat beide modellen een andere methode hebben toegepast om doorsnijding van de deklaag te simuleren.
Verbetering	<p>De drain- en river-packages zijn grotendeels onveranderd gebleven omdat de lagenindeling van zowel GRAM als MORIA onveranderd is doorgevoerd in CuRa.</p> <ul style="list-style-type: none"> Leggerwatergangen van GRAM en MORIA onveranderd in het model opgenomen Drains met een onrealistisch laag drainageniveau zijn verwijderd.

- Detailwatergangen van GRAM en MORIA zijn gecombineerd tot 1 bestand.

B-6: Technische specificatie modelverbetering: Diepe ondergrond

Omschrijving

Activiteit	A_5a: Zet rondom de rivier de standaard REGIS-waarden van de diepe ondergrond terug in het model, tenzij er goede aanwijzingen zijn dit niet te doen. (Achtergrond: in GRAM zijn aanpassingsfactoren t.o.v. REGIS gehanteerd na kalibratie met als doel GGOR-studies, echter rondom de rivier is de rivier zo dominant dat we inschatten dat de kalibratie hier geen uitspraak had mogen doen.).
Uitgangspunt	<ul style="list-style-type: none"> • De diepe REGIS-waarden in de GRAM-database zijn niet correct doorgevoerd en moeten worden teruggebracht naar de oorspronkelijke waarden. • De niet-stationaire onttrekkingen van MORIA lopen tot 2010.
Verbetering	<ul style="list-style-type: none"> • Voor de diepe ondergrond zijn ongekalibreerde REGIS-waarden gebruikt. Dit is aangepast in zowel GRAM3.0 als MORIA4.7. • De breuken in het model zijn ongewijzigd van GRAM3.0 overgenomen. • De anisotropie is ongewijzigd van GRAM3.0 en MORIA4.7 overgenomen. • De onttrekkingen van GRAM zijn grotendeels overgenomen: <ul style="list-style-type: none"> – Brabant Water - Niet stationair – WML - Niet stationair – Industrie Aa en Maas - Niet stationair – Alleen de industrie Brabant is van het MeMa-model overgenomen – stationair • De niet stationaire onttrekkingen van MORIA gaan tot 2010, daarom is er gekozen om de stationaire onttrekkingen van MORIA toe te passen in CuRa.

B-7: Technische specificatie modelverbetering: Hoogwatergolf

Omschrijving

Activiteit	A_6a/b/c: (a) De schematisatie van het hoogwater controleren. (b) Indien nodig de schematisatie aanpassen aan de 25m schaal van het model. (c) In het model ervoor zorgdragen dat de sloten in de uiterwaarden uit staan tijdens hoog water (niet draineren).
Uitgangspunt	<ul style="list-style-type: none"> • De schematisatie van de ISG is niet correct na 2020. • In het model is de functie ICONCHK ingeschakeld, waardoor de drain-package onder de river-package wordt uitgeschakeld bij inundatie.
Verbetering	<ul style="list-style-type: none"> • Waterschap heeft de ISG in het modelgebied bijgewerkt tot en met 2022. <ul style="list-style-type: none"> – De ISG tijdens deze periode is gecontroleerd op watervlak en waterpeil (Figuur 7) • Infiltratieweerstand van de Maas is op 0,1 dag gezet zoals in paragraaf 3.1 beschreven

B-8: Technische specificatie modelverbetering: Metaswap en berging

Omschrijving

Activiteit	A_7c: Zorg voor passende bergingscoëfficiënten in de verschillende modellagen, waarbij een extra aandachtspunt is: tijdens hoog water, als de onverzadigde zone vol is, is er geen freatische berging meer mogelijk. Hanteer juiste bergingscoëfficiënten voor de diepe ondergrond (Uit A_5a).
Uitgangspunt	<ul style="list-style-type: none"> • LHM2018_v02z is gebruikt als bodem-database. • Voor een groot deel zijn dezelfde MetaSWAP-instellingen aangehouden als in GRAM3.0. • Buitendijks is dezelfde methode toegepast voor de onverzadigde zone als binnendijks. • Freatische berging is berekend door MetaSWAP. • Gespannen berging is berekend zoals bij MeMa.

Verbetering

- Het natte oppervlak (nopp) is aangepast voor alleen permanent watervoerend oppervlaktewater. Waar geen oppervlaktewater aanwezig is, is het natte oppervlak verwijderd waardoor MetaSWAP in de uiterwaarde hetzelfde functioneert als binnendijks.
 - MetaSWAP berekend de freatische berging, omdat het nat oppervlak is aangepast.
 - MetaSWAP is in de uiterwaarde aangezet, deze berekend nu betere freatische bergingscoëfficiënten en grondwateraanvulling.
 - De gespannen berging is berekend door dikte van de watervoerende pakketten te delen door 100.000.
 - De metrologische waarden (mete_grid), tijd en output (tiop_sim) en parameters instellingen (para_sim) apart ingesteld voor beide modelperiodes: 2020-2021 en 2010-2012. De waarden zijn onveranderd
 - De (rural) ponding depth in de uiterwaarde is ingesteld op 9999 m, zodat deze wordt uitgeschakeld bij inundatie.
 - De instelling voor verhard oppervlak (urban area) is uitgeschakeld bij bruggen over de Maas.
-

Bijlage C – Grafieken gevoeligheidsanalyse en kalibratie

Zie grafieken rekenserver:

Gevoeligheid C:

d:\Extern\Arcadis\CuijkRavenstein\Model\Results\v06\Kalibratie\NSTAT_CURA_v06_2020_2021_HDG_25m\timeseries\tijdreeksen_plots_gevoeligheid_C\

Gevoeligheid kD:

d:\Extern\Arcadis\CuijkRavenstein\Model\Results\v06\Kalibratie\NSTAT_CURA_v06_2020_2021_HDG_25m\timeseries\tijdreeksen_plots_gevoeligheid_kD\

Bijlage D – Grafieken validatie

Zie grafieken rekenserver:

d:\Extern\Arcadis\CuijkRavenstein\Mode\Results\v06\Validatie\NSTAT_CURA_v06_2010_2011_HDG_25m\timeseries\tijdreeksen_plots\

Bijlage E – Runfiles definitieve model

Zie runfiles rekenserver:

Runfile voor de 2021 run:

d:\Extern\Arcadis\CuijkRavenstein\Model\Runfiles\v06\Kalibratie\NSTAT_CURA_v06_2020_2021_HDG_25m.run

Runfile voor de 2011 run:

d:\Extern\Arcadis\CuijkRavenstein\Model\Runfiles\v06\Validatie\NSTAT_CURA_v06_2010_2011_HDG_25m.run

Runfiles van de gevoeligheidsanalyse:

d:\Extern\Arcadis\CuijkRavenstein\Model\Runfiles\v06\Kalibratie\Gevoeligheid\

d:\Extern\Arcadis\CuijkRavenstein\Model\Runfiles\v06\Validatie\Gevoeligheid\

Over Arcadis

Arcadis is de leidende wereldwijd opererende ontwerp- en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij helpen onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Wij zijn met 36.000 mensen actief die in ruim zeventig landen meer dan €4,2 miljard aan omzet genereren. Wij helpen UN-Habitat met onze mensen, die kennis en expertise leveren om de moeilijke leefomstandigheden te verbeteren in gebieden die lijden onder de gevolgen van klimaatverandering.

www.arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 1018
5200 BA 's-Hertogenbosch
Nederland

T +31 (0)88 4261 261

Arcadis. Improving quality of life

Volg ons op



[Arcadis](#)



[arcadis_nl](#)



[ArcadisNetherlands](#)