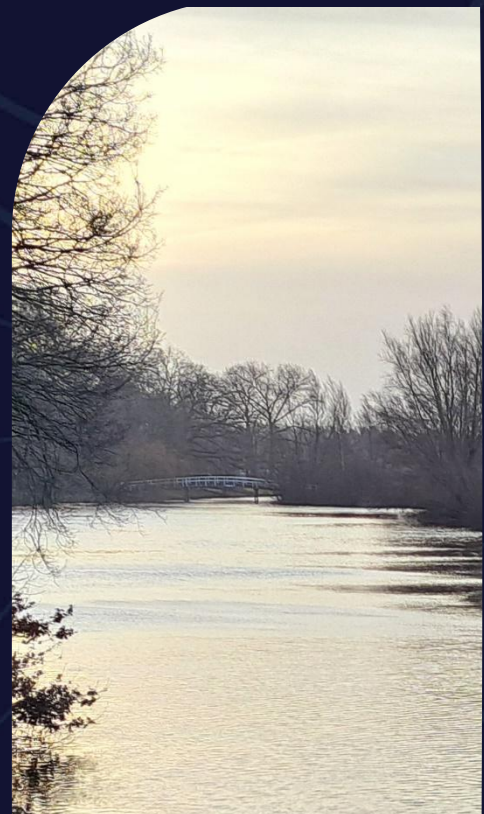


Methode- ontwikkeling grensoverschrijden de stresstest (wateroverlast en droogte) voor Vlaams- Nederlandse beken – Scoping fase



Colofon

Client

Contact person	Diermanse, F.
References	[reference(s)]
Keywords	Stresstest,

Document data

Version	[version]
Date	[pick a date]
Document ID	[document ID]
Pages	91
Classification	[classification]
Status	[status of document] This document is a draft and for discussion purposes only. Neither the client nor third parties can derive any rights from the contents of this report.

Author(s)

This table is used to check the correct execution of the assignment by Deltares. Any other customer use or external distribution is not permitted.

Version	Authors	Check	Approved
1	Siep Bakker, Charlotte van Strien, Simon Nollet, Perry de Louw.	Patrick Willems, Ferdinand Diermanse	Kymo Slager

Samenvatting

De Nederlandse en Vlaamse zomers van 2018, 2019 en 2020 werden getekend door extreme droogte. In de hierop volgende zomer van 2021 vond een extreme neerslaggebeurtenis plaats die heeft geleid tot overstromingen met grote impact in Nederland, België, Duitsland en Luxemburg. Naar aanleiding van deze gebeurtenissen is het programma "Joint Cooperation Programme on Applied scientific Research to Accelerate Transboundary Regional Adaptation to Climate Extremes (JCAR-ATRACE)" opgestart. Binnen dit programma wordt samengewerkt tussen negen gerenommeerde kennisinstituten, onder aanvoering van Deltares. In het programma worden meerdere grensoverschrijdende stroomgebieden geëvalueerd. De doelstelling van het JCAR-ATRACE programma is het versterken van langetermijn partnerschappen tussen Europese kennisinstellingen, ten behoeve van de kennisbasis en het kennisnetwerk over overstromings- en droogterisicobeheer in grensoverschrijdende stroomgebieden. De opgedane kennis uit het JCAR-ATRACE programma kan ingezet worden ter bevordering van de internationale samenwerking en om grensoverschrijdende gebiedsvisies op te zetten.

Het voorliggende rapport is een deelstudie onder JCAR-ATRACE. Het rapport geeft voor de Vlaams-Nederlandse beken invulling aan twee hoofddoelen van JCAR-ATRACE:

1. Het ontwikkelen van een methode voor een stresstest (in grensoverschrijdende Vlaams-Nederlandse stroomgebieden) voor zowel droogte als wateroverlast. Bij het uitvoeren van een stresstest wordt gekeken naar de respons van het watersysteem (de beken en rivieren en het landschap waarin zij zich bevinden) op extreem grote neerslagvolumes en droogte.
2. Het vergroten van de kennisbasis over het functioneren van stroomgebieden van Vlaams-Nederlandse beken als één geheel en het identificeren van knelpunten (onder andere ten behoeve van de risicodialoog).

Het doel van een stresstest is dus vooral om te doorgronden hoe het watersysteem functioneert onder extreem natte en extreem droge omstandigheden, zodat het bevoegd gezag zich hierop kan voorbereiden. Dit kan door aanpassingen in het watersysteem, door crisismanagement te verbeteren, of door in te zetten op sneller herstel.

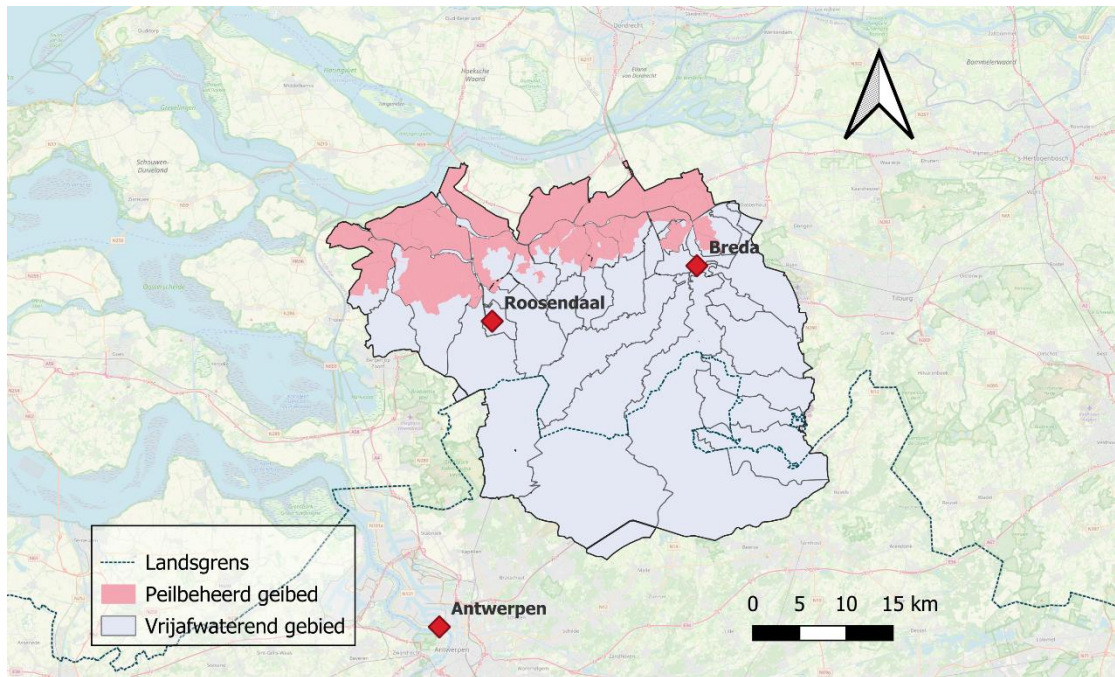
Voor de methodeontwikkeling van de stresstest is het grensoverschrijdende stroomgebied van de Kleine Aa-Molenbeek, Kleine Aa/Weerijse Beek-Aa of Weerijse en Mark als pilotgebied geselecteerd. In vervolgstudies zal de ontwikkelde methode ook geïmplementeerd worden voor andere Vlaams-Nederlandse stroomgebieden.

De stresstest bestaat uit drie fasen. De eerste fase van de stresstest betreft een scoping. In deze fase wordt het gebied beschreven (de afbakening), en beschikbare kennis en modellen geïnventariseerd. De tweede fase betreft de analyse van het functioneren van het huidige systeem (watersysteem, omringende gebied inclusief de functies en het huidig beheer, inclusief crisismanagement onder extreem natte en extreem droge omstandigheden). De derde fase betreft een eerste screening van maatregelen. Dit rapport beschrijft de bevindingen van fase 1 (scoping).

Na de inleiding (hoofdstuk 1) geeft **hoofdstuk 2** van dit rapport een beschrijving van de belangrijkste gebiedskenmerken, zoals de ligging van de beken, het grondwatersysteem, landgebruik, hoogteligging, bodem en ondergrond.

Het Vlaamse deel van het stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek en Mark ligt in het noordoosten van de provincie Antwerpen. Het Nederlandse deel, ongeveer 2/3 van het stroomgebied, ligt in het westen van de provincie Noord-Brabant. Het stroomgebied bevat een hoger gelegen vrij afwaterend gebied in het zuiden en een lager gelegen gebied in het noorden met waterpeilbeheer. De grens tussen deze gebieden, die globaal van Bergen op Zoom naar Waalwijk loopt, wordt ook wel de 'Naad van Brabant' genoemd.

Er zijn drie grotere beken in het vrij afwaterende gebied, van west naar oost zijn dit: de "Kleine Aa-Molenbeek", de "Aa/Weerijse Beek-Aa of Weerijse" en de "(Boven)Mark". Deze beken wateren uiteindelijk af in een netwerk van boezemkanalen, vaak genoemd onder de verzamelnaam Mark-Dintel-Vliet boezem (MDV-boezem). De peilbeheerde gebieden lozen via bemaling op de MDV-boezem, maar kunnen soms ook gedeeltelijk direct op het hoofdwatersysteem lozen. De MDV-boezem laat het water uiteindelijk via de sluizen Dintel- en Benedensas af op het Volkerak-Zoommeer (VZM).



Het grensoverschrijdende stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek en de Mark. Het roze gebied geeft aan waar het peilbeheerd is. Het overige gebied is vrij afwaterend.

Hoofdstuk 3 beschrijft kenmerken van hoog- en laagwaters die zich in het verleden hebben voorgedaan, waarbij in de beschrijving onderscheid is gemaakt in vrij afwaterende gebieden en peilbeheerde gebieden. Op basis daarvan zijn kwetsbare locaties geïdentificeerd. Verder zijn normen beschreven die gehanteerd worden voor bescherming tegen wateroverlast en overstromingen. Tot slot zijn beschikbare overstromingskaarten uit analyses zoals de EU Floods Directive (EFD) beschreven

Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de verschillende typen maatregelen die voorhanden zijn om de nadelige gevolgen van droogte en hoogwater te mitigeren en beschrijft maatregelen die in het gebied zijn uitgevoerd, gepland of worden verkend. Vervolgens gaat het in op de wisselwerking tussen droogte-maatregelen en maatregelen tegen wateroverlast. De uitdaging daarbij is maatregelen tegen droogte averechts kunnen werken op wateroverlast en vice versa. Droogtemaatregelen om water langer vasthouden zorgen bijvoorbeeld voor een 'vollere spons' waardoor er bij extreme neerslaggebeurtenissen niet veel water meer bij kan en de kans op wateroverlast en piekafvoeren toeneemt. Om dat effect te mitigeren zijn aanvullende maatregelen nodig om het overtollige water beter te kunnen afvoeren en/of tijdelijk te bergen.

In **hoofdstuk 5** wordt ingegaan op hydrologische en socio-economische indicatoren die in Vlaanderen en Nederland worden gebruikt om de effecten van droogte en overstromingen te kwantificeren en/of te beoordelen. Een deel van deze indicatoren zijn algemeen bekend in het

internationale werkveld van waterbeheer. Andere indicatoren zijn specifiek afgestemd om te bepalen of voldaan wordt aan de wet- en regelgeving in een land of regio. Voor wateroverlast zijn neerslagvolumes, debieten en waterstanden die corresponderen met gericht gekozen herhalingstijden veel gebruikte indicatoren. Voor grondwater betreft het doorgaans gemiddeldes zoals GLG, GVG en HG3. Socio-economische indicatoren hebben in de regel betrekking op materiële schade, aantallen slachtoffers of getroffen.

Ten slotte wordt in **hoofdstuk 6** een overzicht gegeven van beschikbare modellen voor het gebied. Voor zowel oppervlaktewater als grondwater zijn diverse modellen beschikbaar van deelgebieden. De modellen zijn afgebakend door (deel-)stroomgebiedsgrenzen en vaak ook door landsgrenzen. De modellen zijn in verschillende software-pakketten (model-omgevingen) geïmplementeerd. Voor oppervlaktewater zijn er bijvoorbeeld modellen in Sobek, D-Hydro en Autodesk InfoWorks beschikbaar. Dat maakt dat er in het vervolg een flinke inspanning nodig is om tot een geïntegreerd model te komen voor het hele stroomgebied.

Resumerend: In deze scoping-fase is een grote hoeveelheid waardevolle informatie verzameld waarmee de volgende fase van de stresstest (analyse) uitgevoerd kan worden.

Inhoud

1	Inleiding	10
1.1	JCAR-ATRACE	10
1.2	Dit rapport	11
1.3	Casestudie Kleine Aa/Molenbeek en Mark	11
1.4	Komen tot een methode voor grensoverschrijdende stresstest	12
1.4.1	Doel van een stresstest	12
1.4.2	Opzet stresstest op hoofdlijnen	13
1.4.3	Hoe verhoudt een stresstest zich ten opzichte van regulier droogte- en overstromingsrisicobeheer?	14
1.5	Opzet van dit rapport (leeswijzer)	16
2	Gebiedsbeschrijving	17
2.1	Ligging stroomgebied	17
2.2	Vrij afwaterend gebied	20
2.3	Peilbeheerd gebied	23
2.4	Landgebruik	24
2.5	Hoogteligging, bodem en ondergrond	26
2.6	Grondwatersysteem	29
2.6.1	Grondwaterstanden	30
2.6.2	Kwel en infiltratie	32
2.6.3	Grondwateronttrekkingen	33
2.7	Beheerders	34
3	Overstromings- en droogtegebeurtenissen	38
3.1	Overstromingen	38
3.1.1	Normering	38
3.1.2	Huidige situatie	39

3.2	Droogte	45
3.2.1	Indicatoren voor meteorologische droogte	46
3.2.2	Situatie 2018	47
3.2.3	Modelanalyse 2018	47
3.2.4	Ecologische kwetsbaarheid van waterlopen	53
4	Verkende en/of uitgevoerde maatregelen	55
4.1	Beperken van overstromingsrisico's	55
4.1.1	Typen maatregelen	55
4.1.2	Uitgevoerde maatregelen	57
4.1.3	Overige onderzochte maar nog niet geplande maatregelen	60
4.2	Beperken van droogterisico's	61
4.2.1	Typen maatregelen	61
4.2.2	Uitgevoerde maatregelen	62
4.3	Droogtemaatregelen versus wateroverlastmaatregelen	63
5	Indicatoren	66
5.1	Indicatoren voor wateroverlast	67
5.1.1	Hydrologische indicatoren	67
5.1.2	Socio-economische indicatoren	68
5.1.3	Modelkeuze	69
5.2	Indicatoren voor droogte	69
5.2.1	Hydrologische indicatoren	69
5.2.2	Socio-economische indicatoren	70
6	Beschikbare modellen	73
6.1	Oppervlaktewatermodellen	73
6.1.1	Infoworks ICM: Kleine Aa model	74
6.1.2	InfoWorks ICM: Mark model	74

6.1.3	Optimalisatie Hoogwaterbescherming Breda (OHB) model	75
6.1.4	Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) modellen	76
6.1.5	D-Hydro modellen WBD	77
6.1.6	D-Hydro model Chaamse beken	78
6.1.7	Tygron model Chaamse beken	78
6.1.8	Reflectie software	78
6.2	Grondwatermodellen	79
6.2.1	Brabant Model	79
6.2.2	Landelijk Hydrologisch Model	81
6.2.3	Vlaams grondwatermodel	83

Referenties **84**

Bijlage A Vergelijking modelsoftware **89**

1 Inleiding

1.1 JCAR-ATRACE

De Nederlandse en Vlaamse zomers van 2018, 2019 en 2020 werden getekend door extreme droogte. In de hierop volgende zomer van 2021 vond een extreme neerslaggebeurtenis plaats die heeft geleid tot overstromingen met grote impact in Nederland, België, Duitsland en Luxemburg. Deze gebeurtenissen hebben onder meer geleid tot een gevoel van urgentie tot het verkrijgen van een beter systeembegrip over grensoverschrijdende stroomgebieden, zowel op het gebied van extreme hoogwaters als droogte.

In Vlaanderen heeft in 2022 een expertpanel met 'Weerbaar Waterland' (Expertpanel Hoogwaterbeveiliging, 2022) een aangepaste strategie voor de waterzekerheid in Vlaanderen geformuleerd, met tien samenhangende acties en een plan van aanpak om die strategie zo snel mogelijk tot uitvoering te brengen. Het expertenpanel geeft aan dat alle tien de acties belangrijk zijn en moeten worden uitgevoerd om Vlaanderen waterzeker te maken. Acties 1, 7 en 10 zijn rechtstreeks gerelateerd aan JCAR-ATRACE: methode-ontwikkeling voor de opmaak van geïntegreerde waterdoelen (actie 1), verhogen van de paraatheid van mensen en infrastructuur (actie 7) en versterken van de internationale samenwerking (actie 10).

In Nederland is naar aanleiding van de hoogwatergebeurtenis van 2021 de 'beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater' opgezet. In de eindrapportage *'Voorkomen kan niet, voorbereiden wel. Allemaal aan de slag'* worden zeven punten beschreven die tot een betere voorbereiding moeten leiden. Punt 6, *'Samenwerking met buurlanden op alle grensoverschrijdende wateren'*, heeft geleid tot de oprichting van het Joint Cooperation Programme on Applied scientific Research to Accelerate Transboundary Regional Adaptation to Climate Extremes (JCAR-ATRACE). Binnen dit programma wordt samengewerkt tussen negen gerenommeerde kennisinstituten, onder aanvoering van Deltares en zullen er meerdere grensoverschrijdende stroomgebieden geëvalueerd worden.

De doelstelling van het JCAR-ATRACE programma is het versterken van langetermijn partnerschappen tussen Europese kennisinstellingen, t.b.v. de kennisbasis en het kennisnetwerk over overstromings- en droogterisicobeheer in grensoverschrijdende stroomgebieden. De

opgedane kennis uit het JCAR-ATRACE programma kan ingezet worden ter bevordering van de internationale samenwerking en om grensoverschrijdende gebiedsvisies op te zetten.

1.2 Dit rapport

Het voorliggende rapport is een deelstudie onder JCAR-ATRACE. Het rapport geeft voor de Vlaams-Nederlandse beken invulling aan twee hoofddoelen van JCAR-ATRACE:

1. Het ontwikkelen van een methode voor een stresstest (in grensoverschrijdende Vlaams-Nederlandse stroomgebieden) voor zowel droogte als wateroverlast.
2. Het vergroten van de kennisbasis over het functioneren van stroomgebieden van Vlaams-Nederlandse beken als één geheel en het identificeren van knelpunten (onder andere t.b.v. de risicodialoog).

1.3 Casestudie Kleine Aa/Molenbeek en Mark

Vlaanderen en Nederland delen meerdere grensoverschrijdende beken, zoals de Gentse Kanalen, Kleine Aa-Molenbeek, Mark, Dommel, Uffelschebeek en Jeker. Binnen het JCAR-ATRACE programma zullen meerdere van deze beken (afzonderlijk of in combinatie) geëvalueerd worden.

Voor de methodeontwikkeling van een stresstest voor zowel droogte als wateroverlast is het grensoverschrijdende stroomgebied van de **Kleine Aa-Molenbeek, Kleine Aa/Weerijse Beek-Aa of Weerijse en Mark** als pilotgebied geselecteerd. In vervolgstudies zal de ontwikkelde methode ook geïmplementeerd worden voor de andere Vlaams-Nederlandse stroomgebieden. Hoofdstuk 2 geeft een nadere beschrijving van het stroomgebied.

1.4 Komen tot een methode voor grensoverschrijdende stresstest

1.4.1 Doel van een stresstest

De casestudie naar het stroomgebied van de Mark/Molenbeek heeft tot doel om te komen tot een methode voor grensoverschrijdende stresstesten, voor zowel droogte als wateroverlast, voor beken en rivieren die zowel door Vlaanderen als door Nederland stromen. Bij het uitvoeren van een stresstest wordt gekeken naar de respons van het watersysteem (de beken en rivieren en het landschap waarin zij zich bevinden) op extreem grote neerslagvolumes en droogte. Hiertoe worden (grond)waterstanden, beekafvoeren en overstroomde gebieden gekwantificeerd, en vervolgens gekwalificeerd aan de hand van indicatoren. Ook worden de maatschappelijke gevolgen in beeld gebracht, zoals het aantal getroffen personen of schade uitgedrukt in euro's. Een eerste screening van maatregelen maakt ook deel uit van de stresstest. Hierbij worden geen maatregelen in detail onderzocht, maar wordt globaal in beeld gebracht hoe omvangrijk maatregelen zouden moeten zijn om de problemen (het gevaar, danwel de gevolgen) te verkleinen, bijvoorbeeld door water bovenstrooms vast te houden, 'onderweg' te bergen of benedenstrooms versneld af te kunnen voeren, maar ook door verbetering van de waarschuwing en crisisbeheersing.

In Nederland is een belangrijk doel van stresstesten het verschaffen van informatie voor een risicodialoog (N.B. deze risico-dialoog maakt geen onderdeel uit van het JCAR-project). Vooralsnog richt deze dialoog zich in Nederland alleen op hoogwaters, dus niet op droogte. De risicodialoog heeft twee doelen¹:

1. Het vergroten van het risicobewustzijn en dan met name het bewustzijn over hoe kwetsbaar het gebied is voor extreme gebeurtenissen en klimaatverandering. Tijdens de dialoog bespreken de deelnemers de resultaten uit de stresstest. Daarna bespreekt men welke risico's wel of niet acceptabel zijn.
2. Verkenning van mogelijke maatregelen. In de dialoog bespreekt men hoe het risico kan worden verkleind door aanpassingen in het watersysteem of door de gevolgen te beperken (verkleinen van de kwetsbaarheid). Daarbij wordt ook gekeken naar mogelijke

¹ Zie ook <https://klimaatadaptatienederland.nl/risicodialoog/>

meekoppelkansen en de inzet die qua mensen en materieel nodig is om maatregelen uit te voeren.

Bij deze dialoog wordt dus stil gestaan bij het functioneren van het huidige watersysteem en het effect daarvan op de functies die het watersysteem bedient. Tevens wordt er gesproken over het handelingsperspectief tijdens extreme gebeurtenissen zoals geformuleerd in het kader van de stresstesten. Uiteindelijk levert een risicodialoog de input voor een adaptatiestrategie en een uitvoeringsagenda.

Het doel van een stresstest is dus vooral om te doorgronden hoe het watersysteem functioneert onder extreem natte en extreem droge omstandigheden, zodat het bevoegd gezag zich hierop voor kan bereiden. Dit kan door aanpassingen in het watersysteem, door crisismanagement te verbeteren, of door in te zetten op sneller herstel.

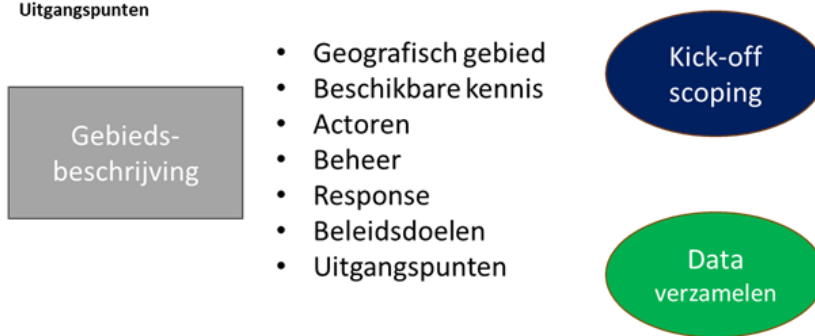
1.4.2 Opzet stresstest op hoofdlijnen

Een stresstest doorloopt drie fasen zoals weergegeven in Figuur 1-1. De eerste fase betreft een scoping. In deze fase wordt het gebied beschreven (de afbakening), en beschikbare kennis en modellen geïnventariseerd. De tweede fase betreft de analyse van het functioneren van het huidige systeem (watersysteem, omringende gebied inclusief de functies en het huidig beheer, inclusief crisismanagement onder extreem natte en extreem droge omstandigheden). De derde fase betreft een eerste screening van maatregelen. Dit rapport beschrijft de bevindingen van fase 1 (scoping).

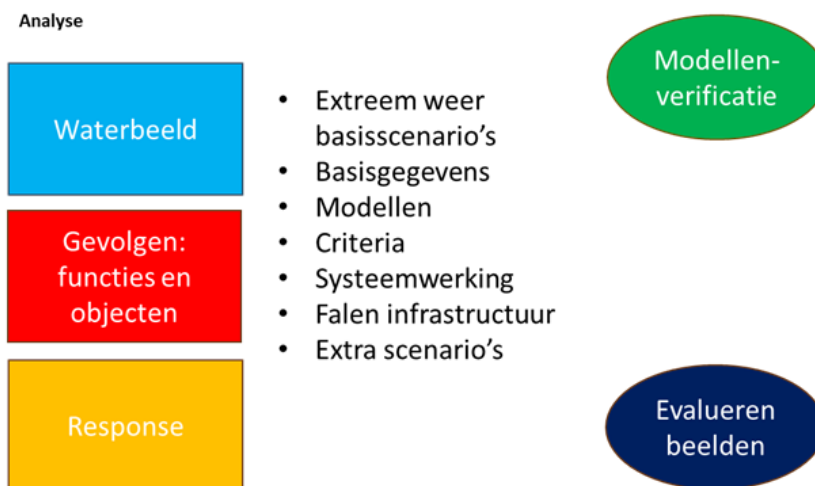
Methode bovenregionale stresstest

Doel: inzicht in kwetsbaarheid van gebied voor extreem weer

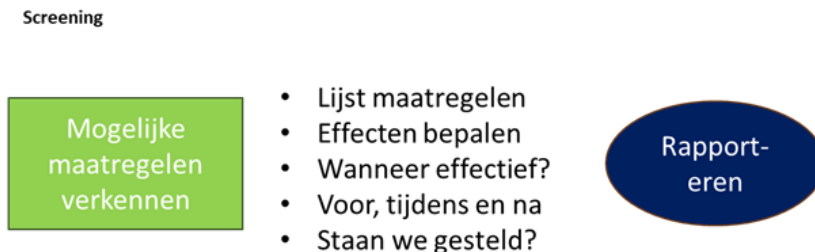
Uitgangspunten



Analyse



Screening



Bewustzijn Preventie Gevolgbeperking Crisisbeheersing Herstel



Figuur 1-1 Opzet stresstest

1.4.3 Hoe verhoudt een stresstest zich ten opzichte van regulier droogte- en overstromingsrisicobeheer?

Bij het opstellen van stroomgebiedsplannen gericht op het verkleinen van droogterisico's en overstromingsrisico's kijkt men veelal naar gebeurtenissen (extreme neerslaggebeurtenissen of droge jaren) met een

kans rond de norm waaraan het watersysteem moet voldoen. Voor wateroverlast langs kleine (niet primaire) rivieren en beken kijkt men in Nederland vaak naar gebeurtenissen met een kans van voorkomen van 1:10, 1:25 of 1:100 per jaar (T10, T25 en T100 gebeurtenissen), afhankelijk van de geldende norm. In Vlaanderen verschilt de aanpak voor de onbevaarbare en bevaarbare waterlopen. Bij onbevaarbare waterlopen wordt via een statistische nabewerking van hydrologische-hydraulische modelresultaten overschrijdingsfrequentiekaarten bekomen voor terugkeerperiodes T10, T100 en vaak ook T1000. In het geval van bevaarbare waterlopen wordt de composietmethode toegepast, waarbij gebruik wordt gemaakt van (synthetische) randvoorwaarden die gebaseerd zijn op duur-frequentie-relaties voor debiet, waterhoogte en/of wind. Terugkeerperiodes van T10, T100 en T1000 worden doorgerekend (Willems, 2007). Deze methode Voor het Sigmaplan² wordt T4000 ook doorgerekend. Zowel in Nederland als Vlaanderen zijn er voor droogterisico's minder 'hard vastgelegde normen'. Voor het Deltaprogramma Zoetwater in Nederland wordt voor het bepalen van droogterisico's door watertekort uit het Hoofdwatersysteem gekeken naar droogtesituaties met een kans van voorkomen van 1:20 per jaar (Deltares, 2025). Men probeert het hoofdwatersysteem zo in te richten dat tijdens dit soort droge perioden aan de totale watervraag kan worden voldaan. Voor droogterisico's voor de landbouw, natuur, bebouwing en infrastructuur is nog geen standaard methodiek beschikbaar maar wordt vaker gekeken naar de impact van recente droge jaren (bijv. Van den Eertwegh et al., 2019; De Louw et al., 2023). In Vlaanderen kijkt men ook veeleer naar de schadedossiers van recente jaren met droogte om de kwetsbaarheden te bepalen en worden hydrologische modelsimulaties gebruikt om droogtecondities te bepalen tot een herhalingstijd van 20 jaar (T20). Recente voorbeelden zijn de droge opeenvolgende jaren 2017, 2018, 2019, 2020 en 2022.

Bij een stresstest kijkt men vooral naar gebeurtenissen die extremer zijn ('bovenmaatgevend'). Aan die gebeurtenissen hoeft niet per se een kans te worden toegekend. Het zijn scenario's die plausibel en uitlegbaar moeten zijn. Een extreme gebeurtenis die voor zou kunnen komen in dat gebied, zonder dat de kans daarvan exact bekend is. Men mag, indien gewenst, er wel een kans aan koppelen waardoor de stresstestbuien mee

² Programma in Vlaanderen dat zich richt op weerbaarder maken van de Schelde en zijrivieren tegen overstromingen en gelijktijdig riviernatuur wilt verbeteren.
[Sigmaplan bouwt aan een overstromingsveilig Vlaanderen | Sigmaplan](#)

genomen kunnen worden in de traditionele risicobenadering, maar voor een stresstest hoeft dat niet.

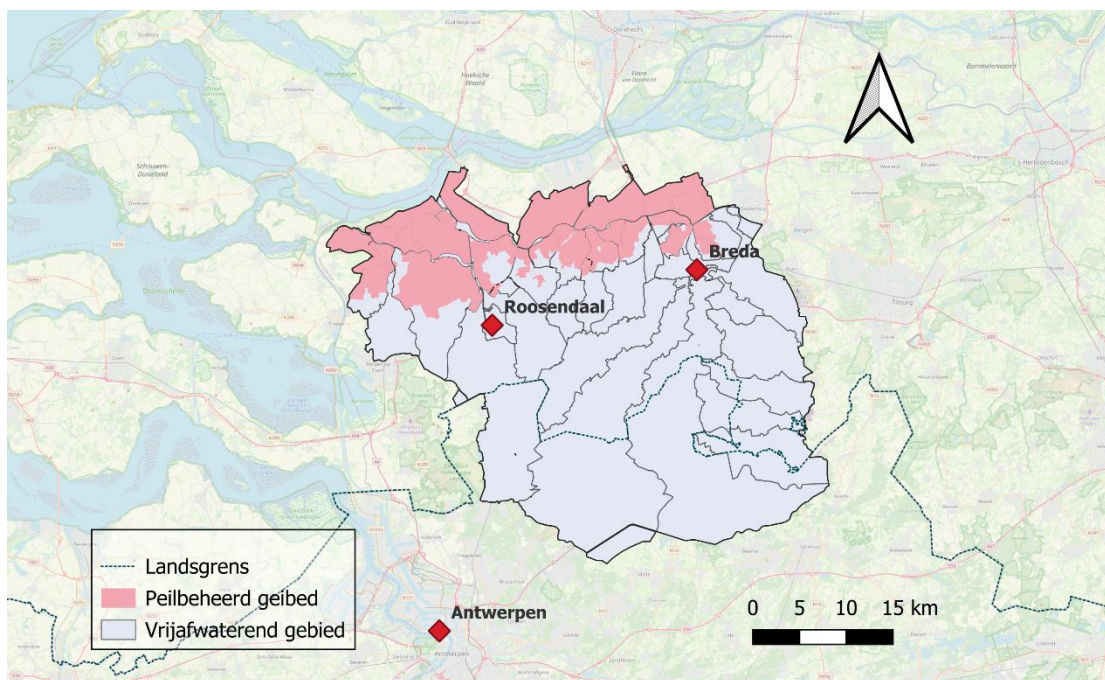
1.5 Opzet van dit rapport (leeswijzer)

Dit rapport betreft de eerste fase van de stresstest: de gebiedsbeschrijving. Hoofdstuk 2 geeft een algemene beschrijving van de gebiedskenmerken, zoals de ligging, landgebruik en reliëf. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de huidige aanpak van overstromingen en droogte in dit gebied en gebeurtenissen die zich in de afgelopen jaren hebben voorgedaan. Op basis hiervan worden kwetsbare locaties geïdentificeerd. Hoofdstuk 4 beschrijft eerder uitgevoerde en verkende maatregelen in het gebied. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op hydrologische en socio-economische indicatoren die in Vlaanderen en Nederland worden gebruikt om de effecten van droogte en overstromingen te kwantificeren en/of te beoordelen. Als laatste wordt in hoofdstuk 6 een overzicht gegeven van beschikbare modellen die in het gebied beschikbaar zijn.

2 Gebiedsbeschrijving

2.1 Ligging stroomgebied

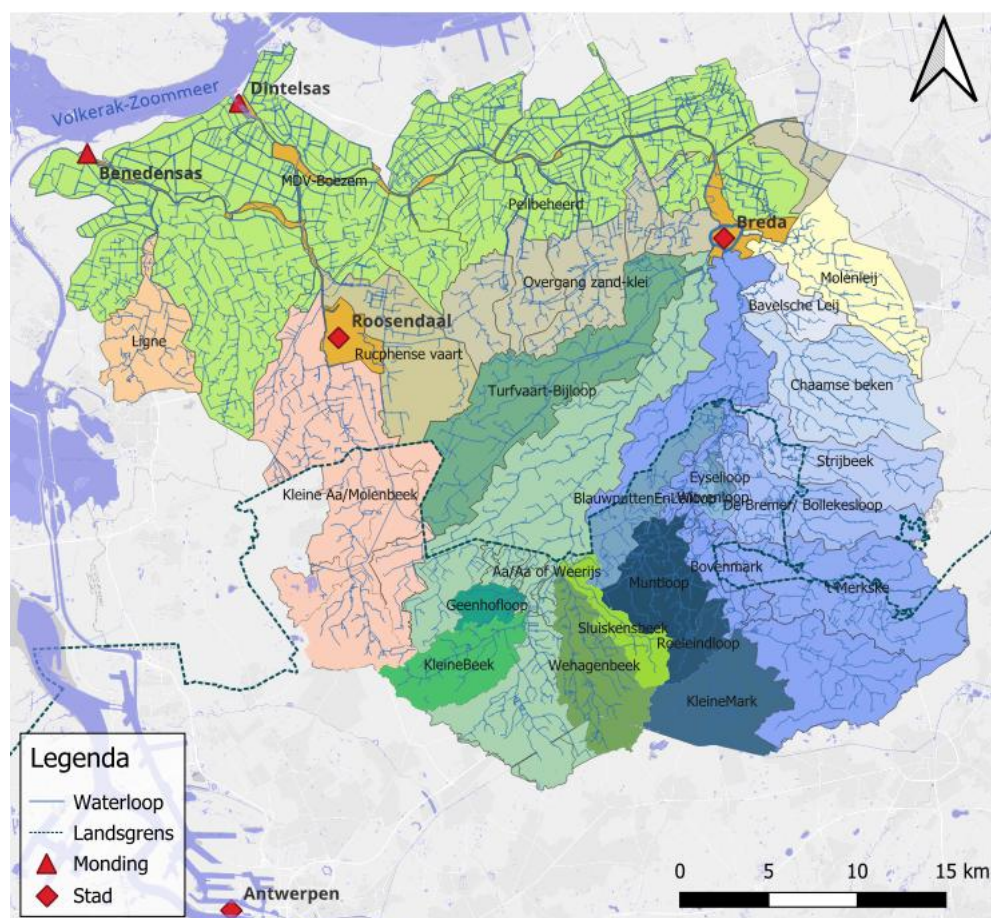
Het Vlaamse deel van het stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek en Mark ligt in het noordoosten van de provincie Antwerpen. Het Nederlandse deel, ongeveer 2/3 van het stroomgebied, ligt in het westen van de provincie Noord-Brabant. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen een hoger gelegen vrij afwaterend gebied in het zuiden en een lagergelegen gebied in het noorden met waterpeilbeheer (zie Figuur 2-1). De grens tussen deze gebieden, die globaal van Bergen op Zoom naar Waalwijk loopt, wordt ook wel de 'Naad van Brabant' genoemd. Veel steden in het gebied, zoals Breda en Roosendaal, liggen grofweg op de Naad van Brabant.



Figuur 2-1 Het grensoverschrijdende stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek en de Mark. Het roze gebied geeft aan waar het peilbeheerd is. Het overige gebied is vrij afwaterend.

Er zijn drie grotere beken in het vrij afwaterende gebied, van west naar oost zijn dit: de "Kleine Aa-Molenbeek", de "Aa/Weerijse Beek-Aa of Weerijse" en de "(Boven)Mark" (Figuur 2-2). Deze beken wateren uiteindelijk af in een netwerk van boezemkanalen, vaak genoemd onder de verzamelnaam Mark-Dintel-Vliet boezem (MDV-boezem). De peilbeheerde gebieden lozen via bemaling op de MDV-boezem, maar kunnen soms ook gedeeltelijk direct op het hoofdwatersysteem lozen. De

MDV-boezem laat het water uiteindelijk via de sluizen Dintel- en Benedensas af op het Volkerak-Zoommeer (VZM).

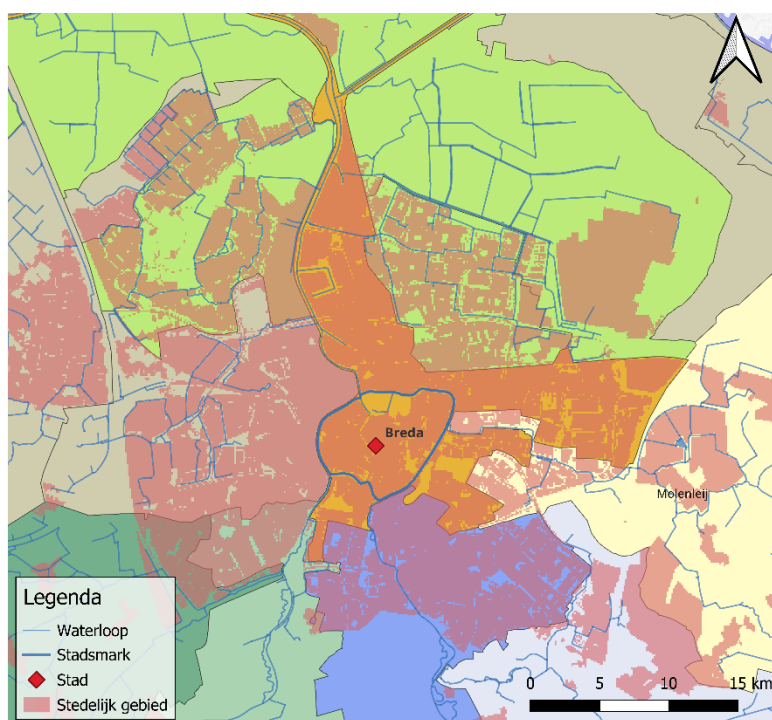


Figuur 2-2. Stroomgebieden in het onderzoeksgebied, ingetekend o.b.v. Nederlandse (pdok.nl) en Vlaamse (Waterinfo.be) database en een hoogtekaart.

Mark

In het oosten van het stroomgebied ligt de Mark. Het stroomgebied van de Mark kan opgedeeld worden in meerdere deelstroomgebieden. De grootste is de zuid-noord georiënteerde Bovenmark. Vanaf de bron stroomafwaarts naar de Belgisch-Nederlandse grens bevinden zich volgende zijlopen (onbevaarbare waterlopen categorie 1 en 2): Goorloop, Kleine Mark, Heymaarsloop, Roeleindeloop, Molenloop, Hollandse loop, het Merkske, Bergse Loop, Beekse Venloop, Muntloop, Loyloop, Werkhovenseloop, Gerrevenloop, Witvenloop, Heschputtenloop, Eyselloop, Heerlese loop, Blauwputten Leiloo, Strijbeek. In dit geval zijn er geen onbevaarbare waterlopen van categorie 1 aanwezig, buiten de Mark zelf.

Meerdere beken sluiten vanuit het oosten aan op de Mark, van zuid naar noord: 't Merkske, de Bremer (in Vlaanderen kortstondig Bollekesloop genoemd, de Strijbeek, Chaamse Beken en de Bavelse Leij. Aan de zuidrand van Breda splitst de Mark zich en stroomt rond Breda als een Singel (Stadsmark) (Figuur 2-3). Ten noorden van Breda begint de MDV-boezem.



Figuur 2-3 Ligging van de Mark rond Breda.

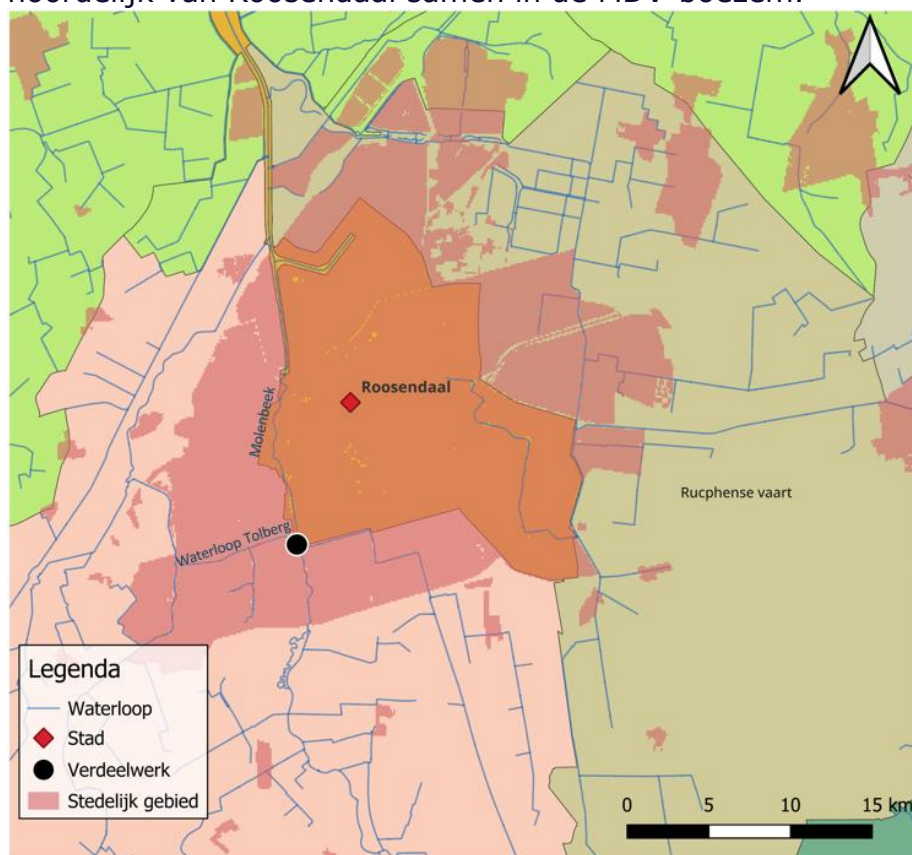
Kleine Aa/Aa of Weerijs

Ten westen van de Mark stroomt de Kleine Aa/Aa of Weerijs met parallel ten westen hiervan de Turfvaart-Bijloop. De Kleine Aa/Aa of Weerijs zijn de Vlaamse benamingen voor de beek, in Nederland wordt deze Aa of Weerijs (of Weerijse Beek) genoemd. Deze beek wordt hier aangeduid als

Aa of Weerijs. Deze beken komen uit in de Stadsmark in Breda, net ten noorden van de monding van de Mark.

Kleine Aa/Molenbeek

In het westelijke gedeelte van het stroomgebied ligt de Kleine Aa/Molenbeek. In het Vlaamse deel van het stroomgebied draagt de naam de Kleine Aa, waarna die in Nederland de (Water)Molenbeek genoemd wordt. In het zuiden van Roosendaal wordt het water via een verdeelwerk over de Waterloop Tolberg en de Molenbeek verdeeld (Figuur 2-4). De Waterloop Tolberg loopt westelijk om Roosendaal heen, terwijl de Molenbeek door het centrum van Roosendaal loopt. Beide beken komen noordelijk van Roosendaal samen in de MDV-boezem.

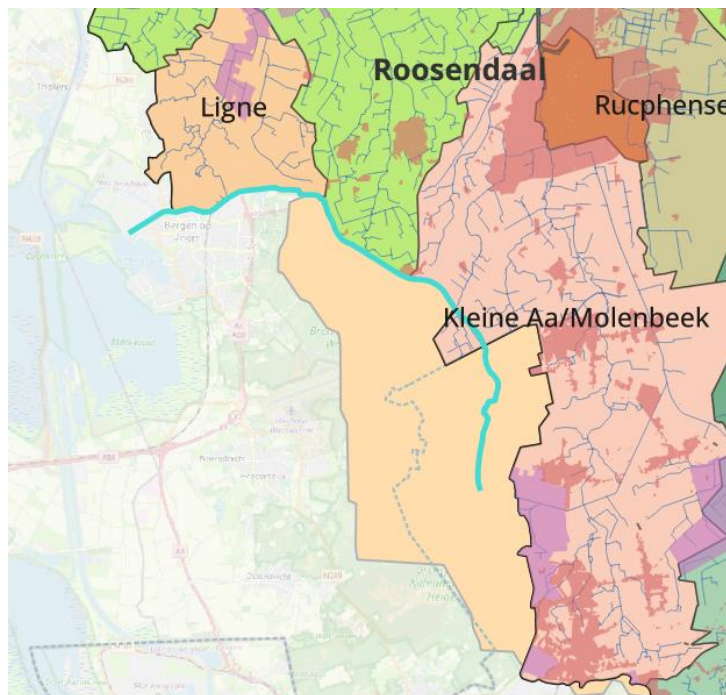


Figuur 2-4. Locatie van het verdeelwerk en de waterlopen in en rondom Roosendaal.

2.2 Vrij afwaterend gebied

Het vrij afwaterende gebied bevindt zich op licht hellende zandgronden, die grofweg van zuid naar noord worden doorsneden door de beekdalen. In de jaren '60 en '70 van de vorige eeuw zijn meerdere beken in dit gebied, met name de Mark, rechtgetrokken en uitgebaggerd (genormaliseerd) om in natte perioden het overtollige regenwater zo snel mogelijk af te voeren (Brevé, 2007).

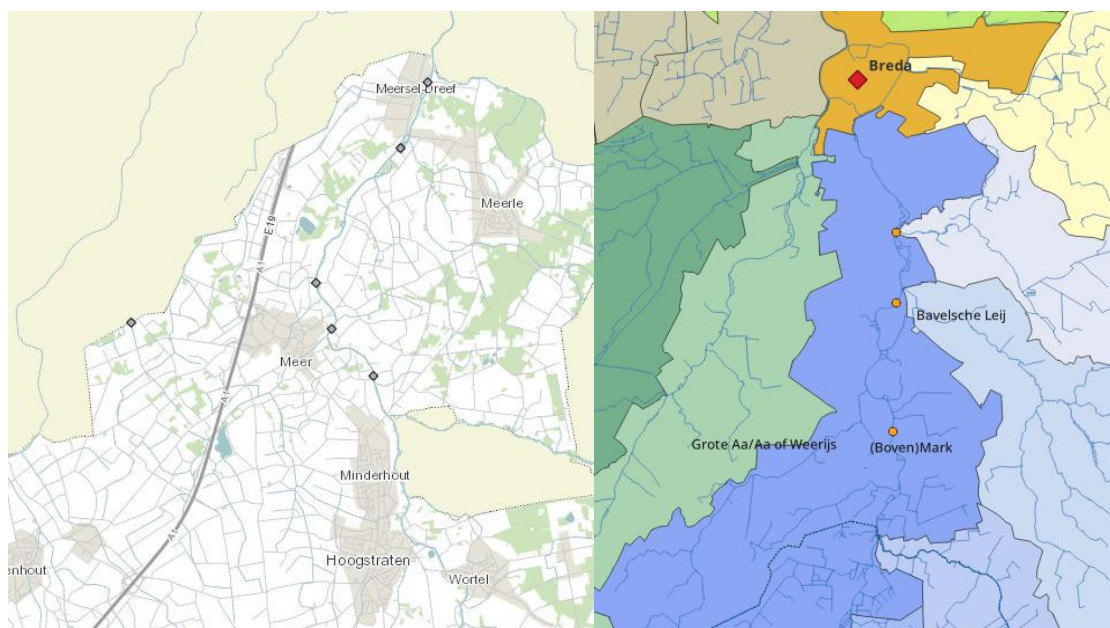
Ook kenmerkend voor het vrij afwaterende gebied zijn de oude turfvaarten die hier gegraven zijn om turf te kunnen transporteren. Het gaat hier bijvoorbeeld om de Turfvaart-Bijloop en de Zoom. De Zoom, gelegen in het zuidwesten van het stroomgebied, zorgt voor een andere afbakening van het afwateringsgebied dan men o.b.v. een hoogtemodel zou verwachten (Figuur 2-5). Hierdoor is er in het zuidwesten van het gebied een groot oppervlak dat door het graven van de Zoom nu afwatert richting Bergen op Zoom in plaats van de Molenbeek.



Figuur 2-5. In oranje het deel van het natuurlijke afwateringsgebied dat afwatert via de turfvaart De Zoom (cyaan).

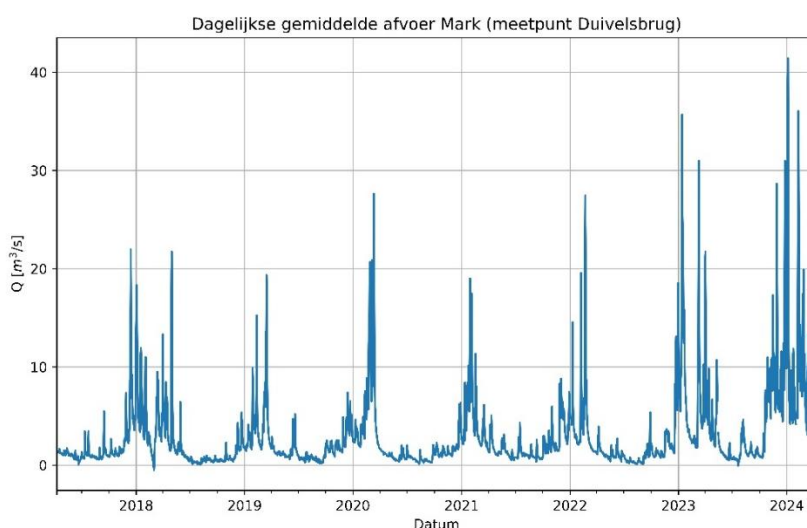
In het gehele stroomgebied liggen stuwen om het water op peil te houden³. In de Mark liggen meerdere gestuurde stuwen; in het Vlaamse deel liggen vijf grote gestuurde stuwen in nabijheid van de grens (Figuur 2-6). In Nederland liggen er tussen de grens en Breda drie gestuurde stuwen (Figuur 2-6). In de Aa-Aa of Weerijds en Molenbeek liggen ook kleinere stuwen, waarvan een deel automatisch werkt en een deel handgestuurd is. Sinds het extreme droogtejaar in 2018 worden de peilen zomers hoog gehouden om zoveel mogelijk water te conserveren. In deze vrij afwaterende gebieden bestaat er namelijk geen mogelijkheid om vanuit een externe bron water aan te voeren.

³ De stuwen en andere artificiële elementen worden weergegeven in ArcGIS REST Servers. Voor Vlaanderen: [ArcGIS REST server Vlaamse Overheid](#). Voor Waterschap Brabantse Delta: [ArcGIS REST server Waterschap Brabantse Delta](#).



Figuur 2-6. Links: Stuwen in het Vlaamse deel van de Mark (van zuid naar noord stuw A t/m E, het meest westelijke punt betreft een pompstation). Rechts: Stuwen in het Nederlandse deel van de Mark (van zuid naar noord: stuw Galder, Blauwe Kamer en Bieberg).

Binnen de vrij afwaterende gebieden zijn de beken grotendeels door regen gevoed, waardoor het debiet van de beken sterk kan fluctueren. De tijdsreeks in Figuur 2-7 toont de daggemiddelde afvoer in de Mark ten zuiden van Breda (meetpunt Duivelsbrug) tussen 2017-2024. Hierin is te zien dat in de meeste zomers gedurende dagen/weken bijna geen water meer door de Mark stroomt. Ook de natte winter van 2023/2024 is duidelijk terug te zien.



Figuur 2-7 Daggemiddelde afvoer bij meetstation Duivelsbrug (Waterschap Brabantse Delta, 2024).

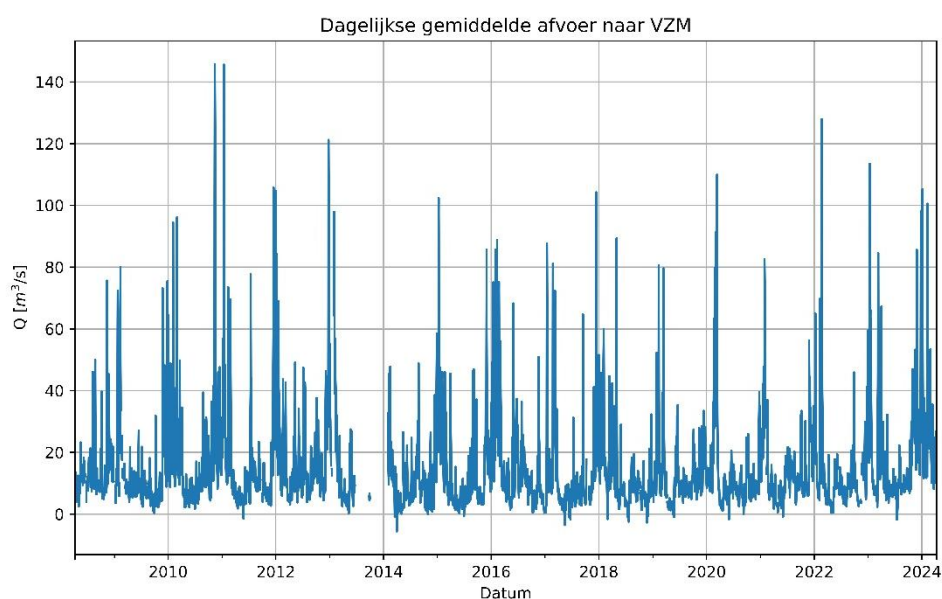
2.3 Peilbeheerd gebied

Het laaggelegen peilbeheerd gebied wordt door waterkeringen beschermd tegen overstromingen. De peilbeheerde gebieden kunnen d.m.v. bemaling lozen op de MDV-boezem. Een deel van de gebieden ten noorden van de MDV-boezem kan ook direct op het Hollands Diep lozen. Het waterpeil in deze gebieden wordt kunstmatig beheerd met behulp van stuwen en gemalen, waarbij gevarieerd wordt tussen zomer- en winterpeilen.

Er liggen primaire keringen aan de noord- en oostgrens van het beheergebied van WBD langs de Amer, het Hollands Diep en het Volkerak-Zoommeer (hoofdwatersysteem). In Nederland liggen regionale keringen in het beheergebied, voornamelijk langs de Mark-Dintel-Vliet boezem (MDV-boezem).

Bij hoge waterstanden op de MDV-boezem kan een maalstop worden ingesteld, waardoor water uit de peilbeheerde gebieden tijdelijk niet kan worden afgevoerd. Deze situatie doet zich overigens zelden voor. In tijden van droogte wordt water ingelaten vanuit het hoofdwatersysteem en vanuit de MDV-boezem. Waterinname vanuit het hoofdwatersysteem wordt echter zoveel mogelijk beperkt vanwege de slechtere waterkwaliteit.

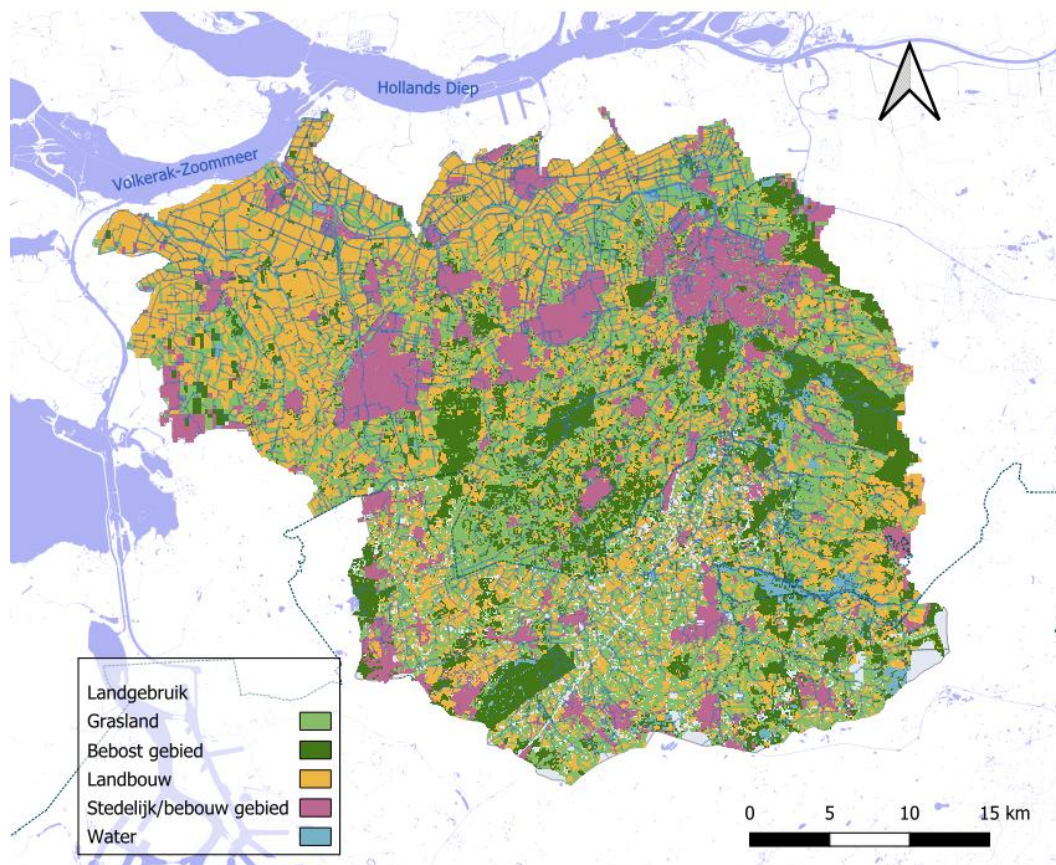
De totale afvoer vanuit het stroomgebied, en het grootste deel van de aanvoer, gaat via de Dintelsas en Benedensas naar het Volkerak-Zoommeer. Deze afvoer is weergegeven in Figuur 2-8. De MDV boezem is behalve via de Dintelsas en Benedensas ook nog met het hoofdwatersysteem verbonden via de Roode Vaart (Hollands Diep) en het Markkanaal (de Amer, via het Wilhelminakanaal).



Figuur 2-8 Daggemiddelde totale afvoer uit het gehele stroomgebied via de Dintelsas en Benedensas. Dit betreft de gesomde waarde van de twee locaties. Waterschap Brabantse Delta, 2024.

2.4 Landgebruik

Het stroomgebied van de Mark was van oorsprong een uitgestrekt moerasgebied, waarin veel water werd geborgen. Na ontginning vanaf de Middeleeuwen is in de negentiende eeuw het gebied sterk ontwaterd voor de landbouw. Figuur 2-9 toont het landgebruik in de stroomgebieden. Bijna twee derde van het stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek bestaat uit akkers en graslanden en een kwart uit natuur. Het lager gelegen Nederlandse gedeelte bestaat voornamelijk uit landbouw, met name akkerbouw voor granen en aardappels. Het hoger gelegen afwaterende deel van het stroomgebied kent veel grasland voor veeteelt en landbouwgronden worden veelal gebruikt voor maisteelt.



Figuur 2-9 Landgebruik in het stroomgebied.

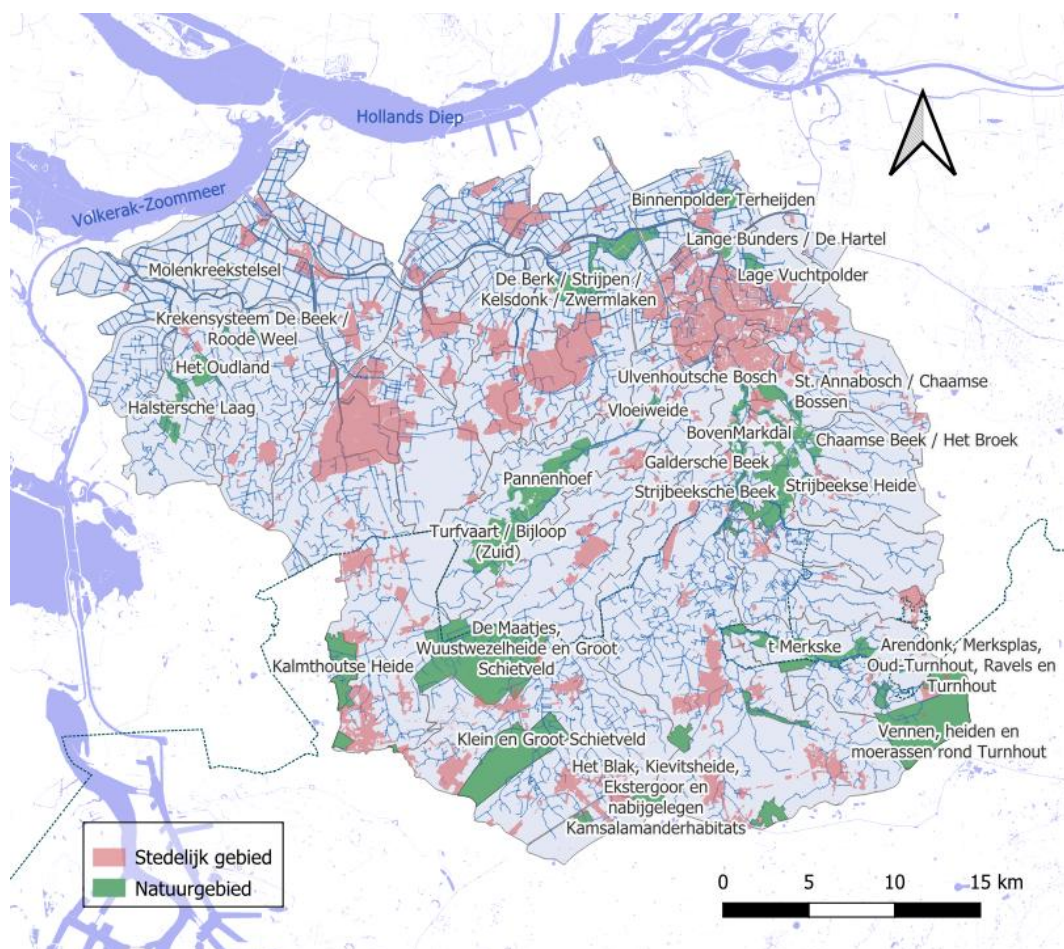
Stedelijk gebied

In Figuur 2-10 zijn de bebouwde gebieden in het stroomgebied uitgelicht. Wat opvalt is dat de zuidelijke helft van het stroomgebied minder bebouwd gebied kent dan de noordelijke helft en dat de steden en dorpen meer verspreid voorkomen. Op de overgang van de hoger gelegen zandgronden naar de lager gelegen polders bevindt zich een aantal grote steden, zoals Breda, Etten-Leur en Roosendaal.

Naast stedelijk gebied liggen er ook twee grotere militaire terreinen in het gebied: een militair vliegveld bovenstrooms in het stroomgebied van 't Merske en een militair vliegveld en groot oefenterrein bovenstrooms in de Aa of Weerij. Deze zorgen door het grote verharde oppervlak voor snelle waterafvoer.

Ondanks inspanningen in Vlaanderen om het verharde oppervlak te laten afnemen, neemt het juist toe door onder andere nieuwe bebouwing en de uitbreiding van de glastuinbouw. De glastuinbouw (groenten en aardbeienteelt) bevindt zich met name in het oostelijk deel rond Noorderkempem (het gebied rond Hoogstraten, Merksplas).

Ook in Nederland zorgen woningbouw, toename van industrie, en expansie van de glastuinbouw en stallen tot een toename in de ontwatering in het gebied.



Figuur 2-10 Natuurgebieden (groen) en stedelijke gebieden (roze) in het Mark stroomgebied. De namen bij de gebieden geven de namen van natuurgebieden weer.

Natuurgebieden

Het stroomgebied telt meerdere waardevolle natuurgebieden (zie Figuur 2-10) waarvan een groot deel (grond)waterafhankelijk is. In Vlaanderen liggen bijvoorbeeld het Groot en Klein Schietveld bij de Weerijse beek en de valleien van de Mark en 't Merkske. Ook het heidecomplex in Kalmthout is rijk aan watergebonden natuur.

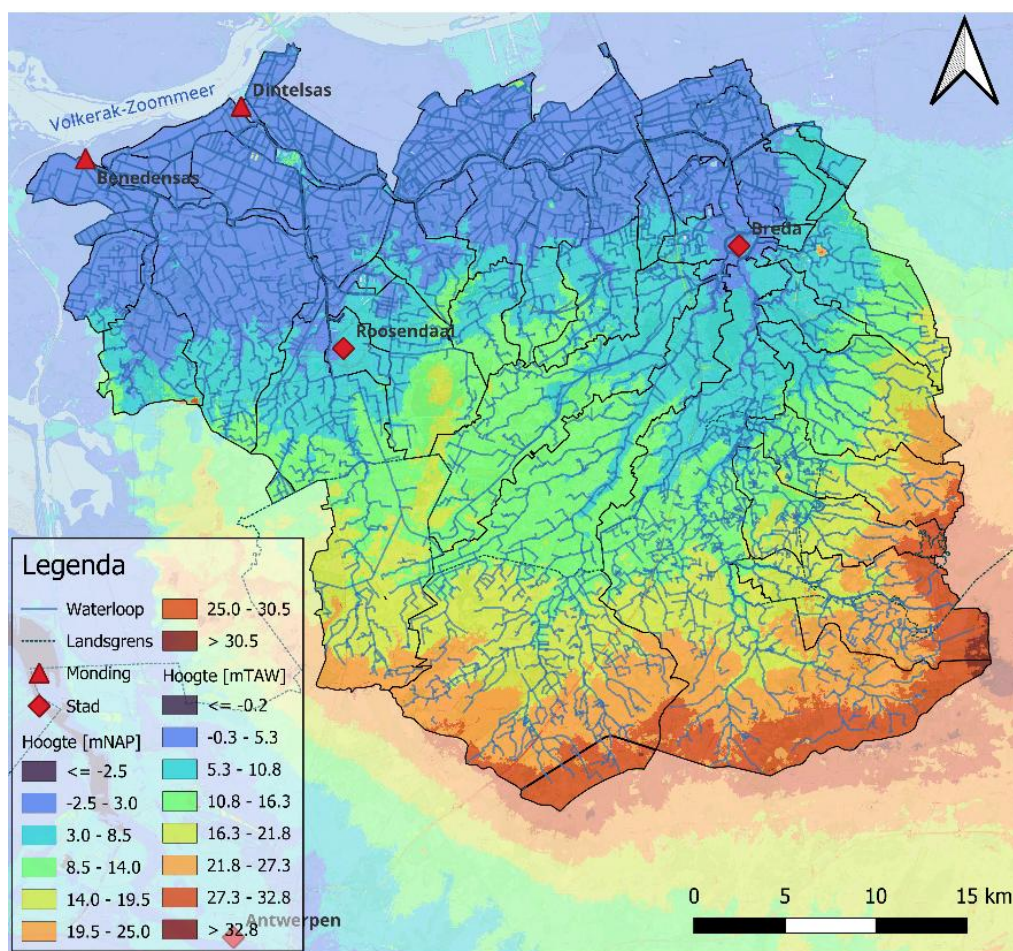
Zoals te zien in Figuur 2-10 kent ook het Nederlandse gebied een aantal natuurgebieden waarvan een aantal als 'Natte Natuurparels' zijn aangemerkt, zoals de Strijbeekse Heide, 't Merkske en de Chaamse Beken. Dit zijn Brabantse natuurgebieden die sterk afhankelijk zijn van hoge grondwaterstanden en kwelfluxen. Door de versnelde en verhoogde ontwatering in het stroomgebied en grondwateronttrekkingen voor drinkwater, ondervinden deze natuurgebieden vaker schade door verdroging en droogvallende beken. 't Merkske, de Maatjes en de Strijbeekse Beek liggen in zowel Nederland als Vlaanderen.

2.5 Hoogteligging, bodem en ondergrond

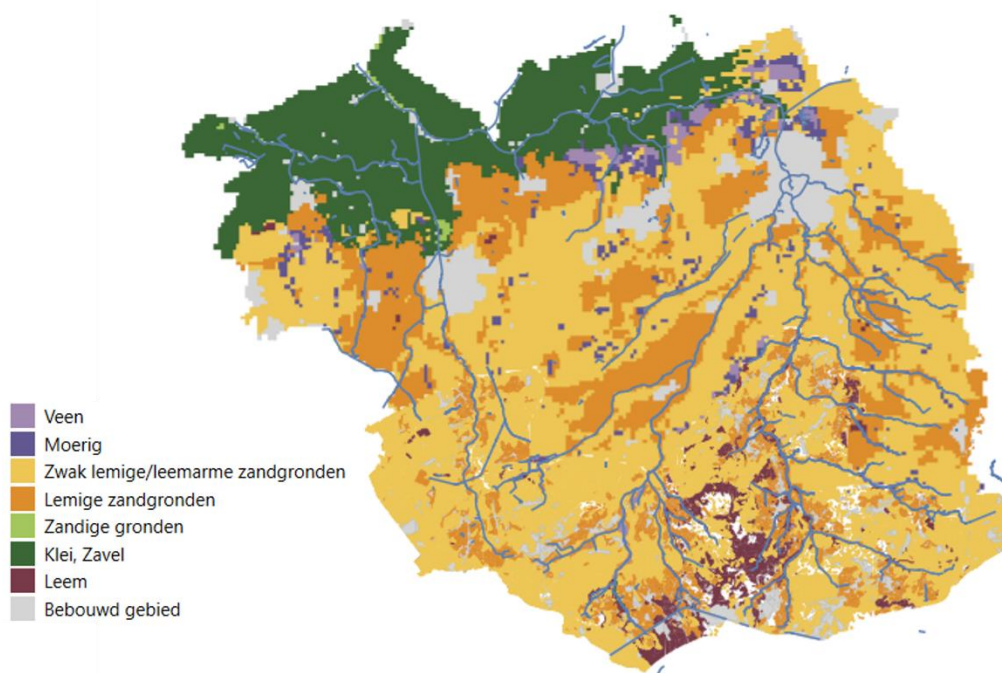
De hoogteligging van het maaiveld in het gebied (zoals weergegeven in het digitale terrein model) varieert tussen -8.6 m en +33.6 m NAP, oftewel tussen de -6.3m en TAW+35.9 TAW m (zie Figuur 2-11). Deze kaart is samengesteld uit het Nederlandse AHN4 hoogtebestand⁴ (0.5m resolutie) en Vlaamse Hoogtebestand II⁵ (5m resolutie). Figuur 2-12 laat de bodemtypes in het stroomgebied zien. De bodem in de laaggelegen poldergebieden bestaat hoofdzakelijk uit zee- en rivierkleigronden (donkergroen op de kaart). Richting het zuidoosten loopt het maaiveld vervolgens op en wordt de bodem steeds zandiger (met leem). Tussen de hogere zandgronden en de lagere kleigebieden ligt een relatief nat overgangsgebied: de Naad van Brabant. De nattere omstandigheden hebben in het verleden geleid tot veenvorming (zie paarse gebieden op de kaart), vooral aan de oostelijke kant. Aan de westelijke kant komen meer lemige zandgronden voor. In het Vlaamse zuidelijke deel van het stroomgebied, tussen de Aa en de Mark, ligt een groter gebied met leemgronden. Rond de rivieren, waterlopen en beken liggen lemige zandgronden bestaande uit humusrijke veldpodzol en beekkeerdgronden.

⁴ <https://www.ahn.nl/ahn-viewer>

⁵ <https://www.vlaanderen.be/digitaal-vlaanderen/onze-oplossingen/earth-observation-data-science-eodas/het-digitaal-hoogtemodel/digitaal-hoogtemodel-vlaanderen-ii>

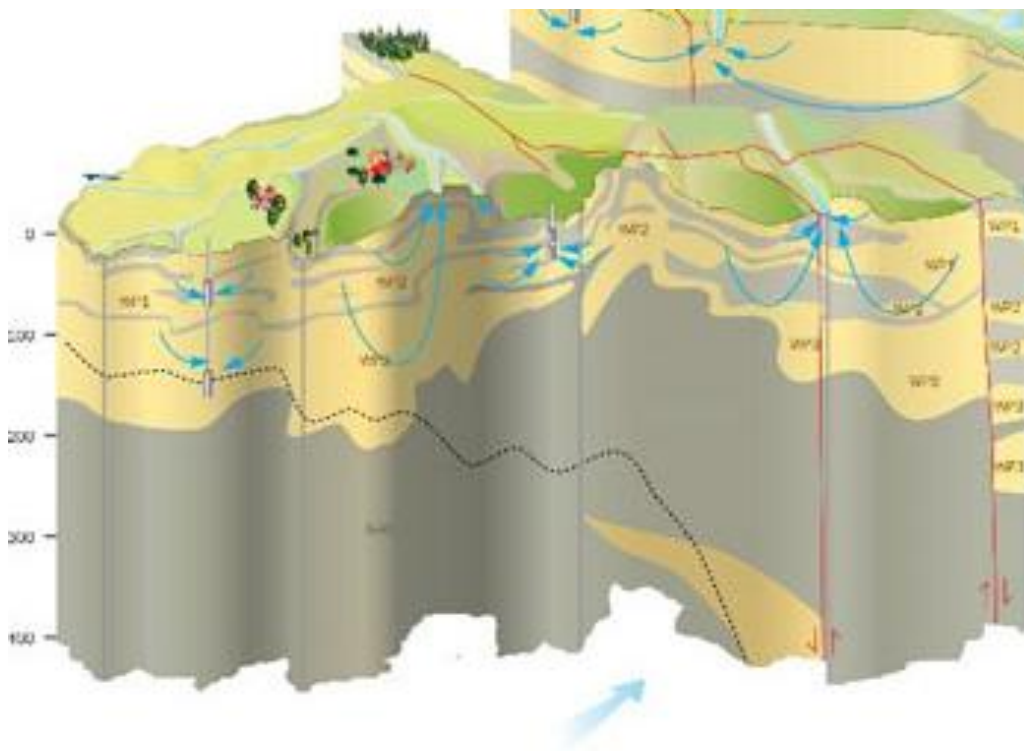


Figuur 2-11 Maaiveldhoogte in mNAP en mTAW



Figuur 2-12 Bodemtypes

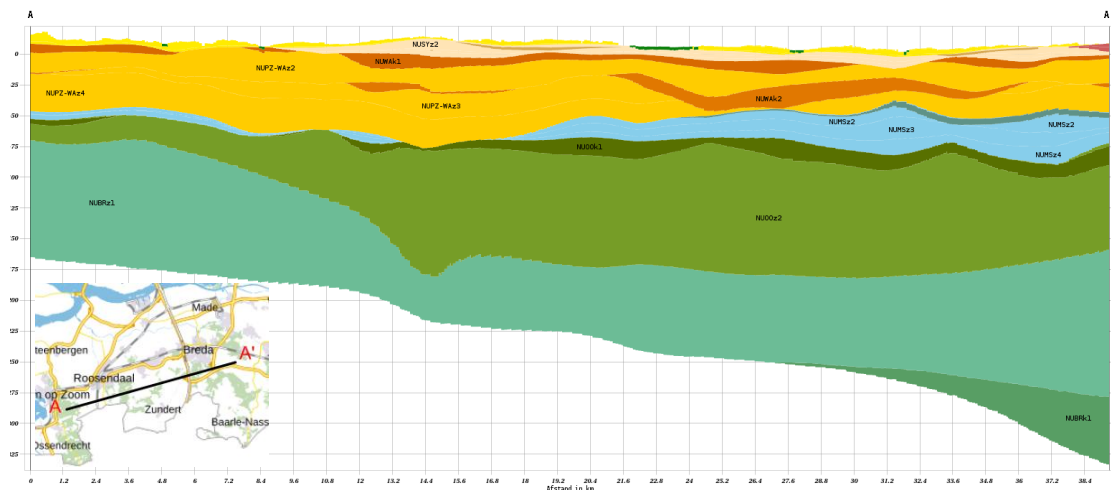
Figuur 2-13 toont een schematische doorsnede van het Nederlandse grondwatersysteem (tot 400 m onder maaiveld). Het grijze gebied geeft de geohydrologische (slecht doorlatende) basis op ongeveer 200 onder maaiveld weer. De lichtgrijze lagen, met name gelegen in de bovenste 50 onder maaiveld, geven de kleiige aquitards (slecht doorlatende pakketten) weer. In het oosten zijn deze dikker (20 meter in plaats van maximaal 10 meter). Deze kleiige formaties vormen een belangrijke weerstand tussen het ondiepe, dunne freatische dekzand pakket en het diepe watervoerende pakket. De regionale grondwaterstroming wordt daardoor sterk beïnvloed (zie volgende paragraaf).



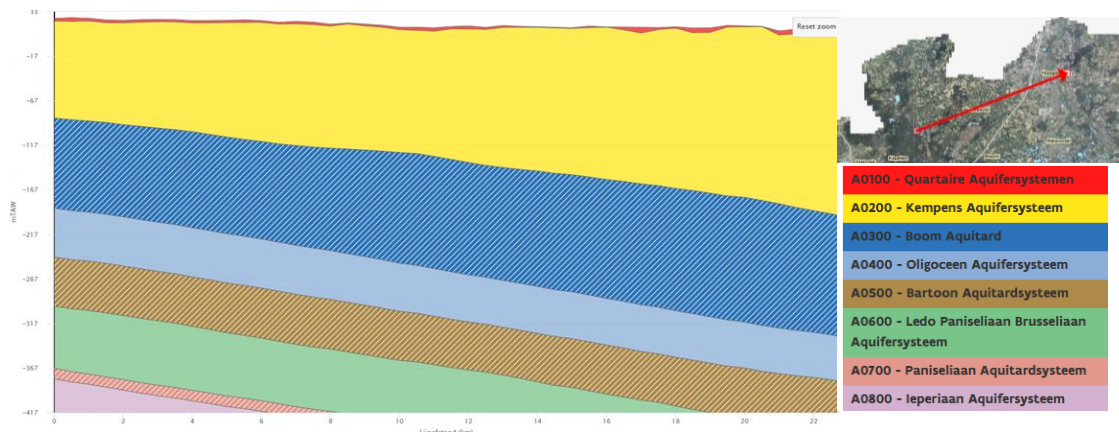
Figuur 2-13 Schematische 3D doorsnede van het Nederlandse deel van het grondwatersysteem. De groene kleuren geven het oppervlak weer (hoe donkerder, hoe hoger gelegen). De gele lagen geven de watervoerende pakketten aan, met in grijs decheidende slecht doorlatende lagen. De geohydrologische basis is weergegeven in donkergrijs aan de onderkant. De stippellijn toont het zoet-zout grensvlak. Overgenomen van Deltares en RIVM (2010).

De geologische opbouw is in meer detail weergegeven in een west-oost doorsnede in uit REGIS (Nederland, Figuur 2-14) en uit de DOV (Vlaanderen, Figuur 2-15). De verschillende kleuren in de Nederlandse doorsnede geven de verschillende formaties weer (van boven naar onder: Formatie van Stramproy, Formatie van Waalre, Formatie van Maassluis, Formatie van Oosterhout, Formatie van Breda) die vaak afgescheiden zijn met een kleiige laag (weergegeven met donkerdere kleuren in dezelfde

kleurtint). De kleuren in de Vlaamse doorsnede geven de geohydrologische systemen weer. In Vlaanderen is de Boomse klei de eerste aquitard in de ondergrond en vormt de geohydrologische basis. De aquifer erboven is zeer zandig, waarin tweemaal kleiige zandlagen voorkomen (ongeveer 10 meter dik).



Figuur 2-14 Geologische west-oostelijke doorsnede (38 km) van de Nederlandse ondergrond uit BRO REGIS II v2.2.2 data (TNO-GDN, 2025). Verschillende kleurtypen (geel, blauw, groen) geven verschillende geologische formaties. De verticale as loopt van +25mNAP tot -425mNAP (voor omrekening naar mTAW: +2.33 m), in intervallen van 25 m.

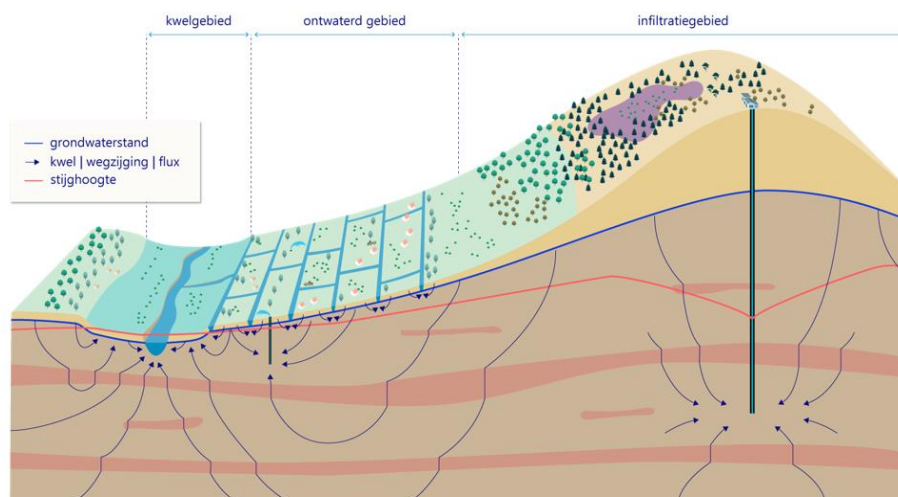


Figuur 2-15 Geologische west-oostelijke doorsnede (22 km) van de Vlaamse ondergrond uit de Databank Ondergrond Vlaanderen. Verschillende kleuren geven verschillende systemen weer, waarbij de gearceerde lagen de aquitards (slecht doorlatend) aangeven. De verticale as loopt van +30 tot -400 mTAW (voor omrekening naar mNAP: -2.33), in intervallen van 50 m.

2.6 Grondwatersysteem

Ten oosten van Breda ligt een geologische breuk "de Feldbissbreuk" (ook schematisch weergegeven in Figuur 2-13). Deze breuk zorgt voor een scheiding in geologische opbouw en dus de grondwaterstroming. Deze breuk vormt dan ook de grens van het (geohydrologisch) stroomgebied de Mark. De bodemopbouw en het maaiveld vormen samen een belangrijke

basis voor het grondwatersysteem. Figuur 2-16 geeft met een schematische doorsnede weer hoe deze samenhangen. Het laag gelegen kwelgebied in de figuur is qua karakteristieken vergelijkbaar met het peilbeheerde gebied en de Naad van Brabant (het overgangsgebied van vrij afwaterend zandgebied naar peilbeheerd kleigebied), waar het grondwater ook dicht aan maaiveld staat en omhoog kwelt vanuit de diepere ondergrond. Er zijn veel slootjes aanwezig die in de winter draineren om het gebied droog te houden voor de (land)bouw. Het infiltratiegebied (het bovenstroomse deel) ligt hoger en kent daardoor diepere grondwaterstanden. Sloten zijn daarom minder of niet aanwezig en grondwateronttrekkingen vinden veelal hier plaats. Na infiltratie stroomt het grondwater via de dieper watervoerende pakketten naar het lager gelegen kwelgebied. Lokale stroming wordt bepaald door de ontwateringsdichtheid en de relatieve hoogte binnen het gebied (zie korte pijltjes in Figuur 2-16). De volgende paragrafen geven meer informatie over de exacte waterstanden en stromen in het Mark stroomgebied.

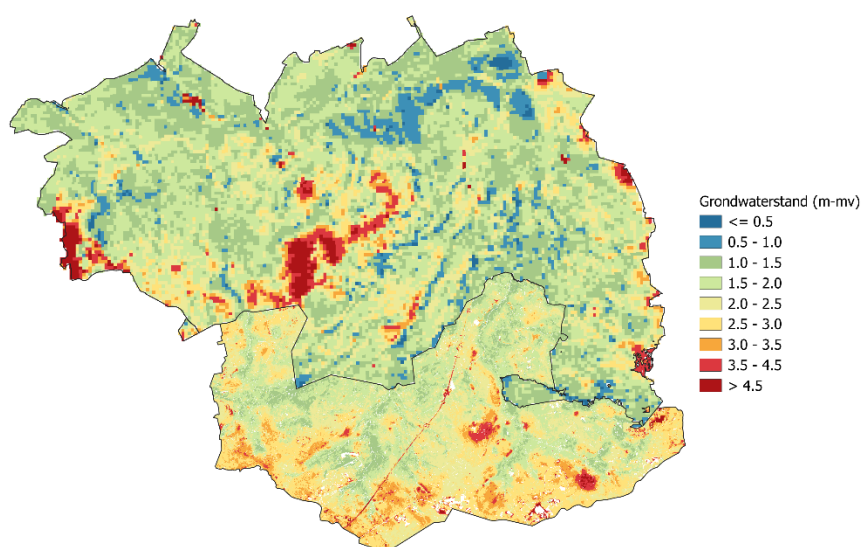


Figuur 2-16 Schematische doorsnede van een typisch geohydrologisch systeem in het Vlaams-Nederlandse zandlandschap (bron: Deltares).

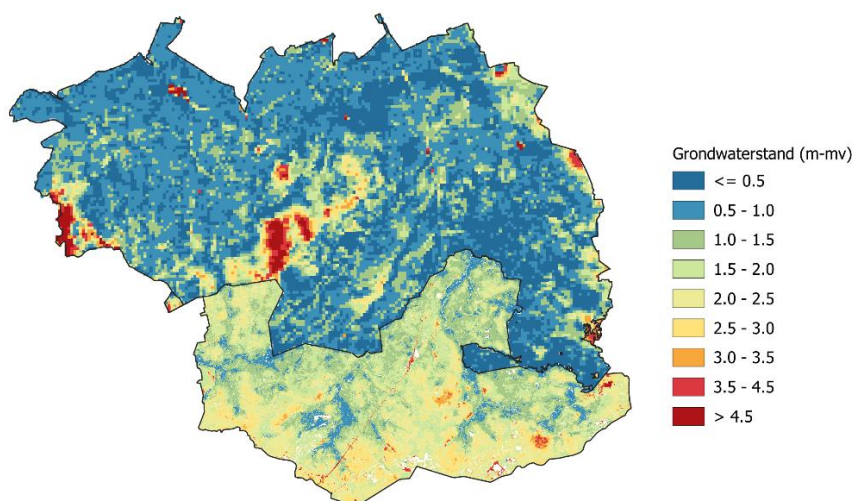
2.6.1 Grondwaterstanden

Figuur 2-17 en Figuur 2-18 tonen de gemodelleerde Gemiddelde Laagste en Hoogste Grondwaterstanden (respectievelijk GLG en GHG) in het Mark stroomgebied. Het Nederlandse deel is gemodelleerd voor de periode 2011-2018 met het Landelijk Hydrologisch Model, versie LHM4.3 op 250 m resolutie (Deltares, 2023). Het Vlaamse gebied is gemodelleerd met het PIRFICT-model (een tijdreeksanalyse aan de hand van gemeten grondwaterstanden) en het SWAP-model voor de periode 2010-2024 (Van de Velde et al., 2025). De resultaten daarvan zijn opgeschaald van 100 m naar 5 m resolutie. Doordat de twee gebieden zijn gemodelleerd op basis van verschillende methodes en data, zijn er verschillen in de grondwaterstanden rond de grens. In Vlaanderen wordt de

grondwaterstand lager geschat dan in Nederland. Dit valt met name op in de GHG kaart, waarbij de Nederlandse grondwaterstanden rond de grens veelal tot 1 m-mv worden geschat en de Vlaamse grondwaterstanden tot 2 m-mv gaan. Doordat Vlaanderen hoger gelegen is en meer zandige gronden bevat, ligt de grondwaterstand daar ook lager.



Figuur 2-17 Gemiddelde Laagste Grondwaterstand in m-mv. Donkerrode kleuren geven een lage grondwaterstand weer en blauwe kleuren een grondwaterstand dichtbij maaiveld. Bronnen: LHM4.3 (Nederland) en PIRFICT/SWAP (Vlaanderen).



Figuur 2-18 Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand in m-mv. Donkerrode kleuren geven een lage grondwaterstand weer en blauwe kleuren een grondwaterstand dichtbij maaiveld. Bronnen: LHM4.3 (Nederland) en PIRFICT/SWAP (Vlaanderen).

De GxG kaarten laten zien dat – in lijn met de schematisatie in Figuur 2-16 – de grondwaterstanden in de peilgestuurde gebieden en rond de

waterlopen het hoogst zijn en weinig uitzakken (tot maximaal 1.5m-mv in Nederland in de zomer). Bij het Volkerak-Zoommeer staan de grondwaterstanden jaarrond het hoogst, aangezien hier ook water wordt ingelaten uit het Volkerak en Hollands Diep. Doordat het vrij afwaterende gebied hoger ligt en bestaat uit een zandige ondergrond met een hogere doorlatendheid, staat het grondwater daar dieper en zakt het ook verder uit. De grondwaterstanden zijn daar ongeveer 2-3.5 m-mv in de zomer tot respectievelijk 1 en 2 m-mv in Nederland en Vlaanderen in de winter.

Op de GxG's in Figuur 2-17 en Figuur 2-18 is te zien dat een aantal gebieden het hele jaar door lage grondwaterstanden kennen (donkerrode kleuren). De diepe grondwaterstanden bij suikerfabriek Dinteloord waar de Kleine Aa samenkomt bij de MDV boezem komen door de aanwezigheid van een afvalberg. Ook aan de westelijke en oostelijke kant van het stroomgebied zijn de diepe grondwaterstanden te danken aan een snel oplopend maaiveld (sneller dan de grondwater gradiënt, zie ook Figuur 2-16). Bij de Rucphense Heide naast de Turfvaart ligt tevens een grote onttrekking.

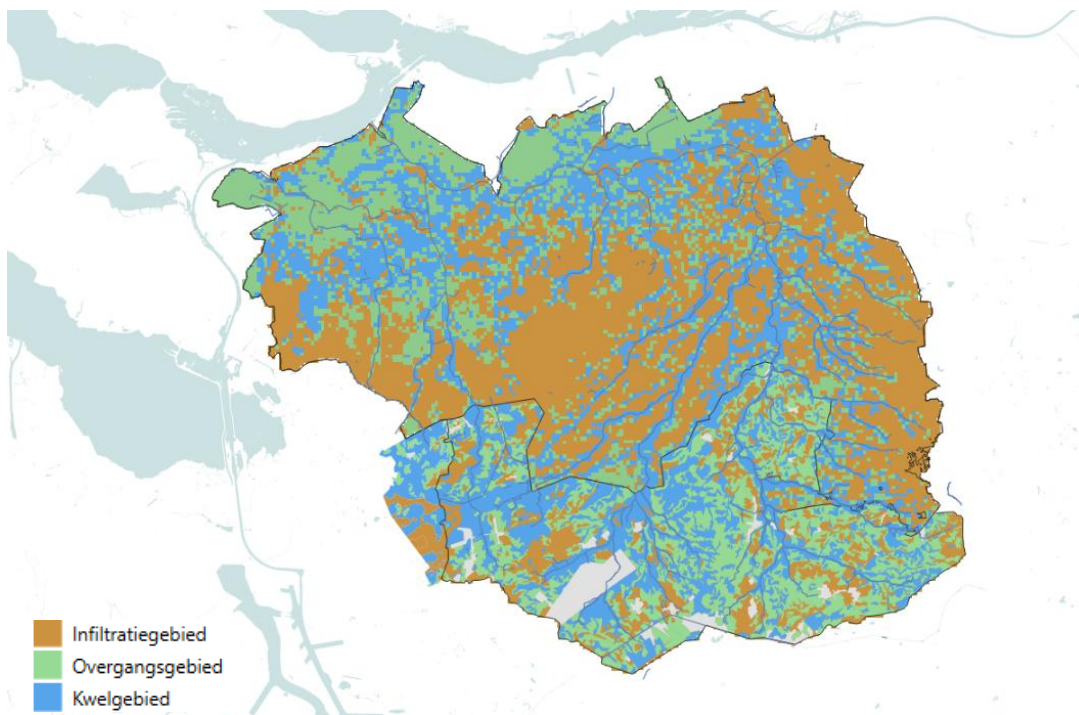
2.6.2 Kwel en infiltratie

Figuur 2-20 laat de kwel- en infiltratiegebieden zien. De infiltratie is in dit geval de stroming van het ondiepe freatische pakket door de Waalre kleien (oranje lagen in Figuur 2-14) naar de diepere watervoerende pakketten. Zoals eerder benoemd, vindt infiltratie netto plaats in de hoger gelegen zandgebieden. In het oosten rond de Chaamse Beken en in het midden bij de Oud Buisse Heide is de infiltratieflux het grootst. Het water kwelt vervolgens op in de lager gelegen beekdalen van de Mark, de Naad van Brabant en het peilgestuurde kleigebied. Wegens de hoge en basenrijk kwelflux, ook in de zomer, en de hierdoor permanent natte omstandigheden vond in het verleden veenvorming plaats. Deze natte en basische condities zijn aantrekkelijk voor natuur die vaak vrij zeldzaam is.

Door aanpassingen aan het natuurlijke landschap via grondwaterwinningen voor drinkwater en landbouw en het draineren van de landbouwpercelen door zowel buisdrainage als de vele sloten en afvoergreppels is de stijghoogte, en daarmee de kwelintensiteit, over de afgelopen decennia lager geworden. De stijghoogte is in de beekdalen op veel plekken echter nog steeds hoger dan maaiveld. Daardoor zijn langs de Strijbeekse beek, Merkske en Mark veel artesische bronnen te vinden (zie .



Figuur 2-19 Artesische bron langs de Strijbeek. Doordat de stijghoogte boven het maaiveld uitkomt, stroomt het grondwater bij het opendraaien van de buis vanzelf omhoog (De Louw et al., 2000).

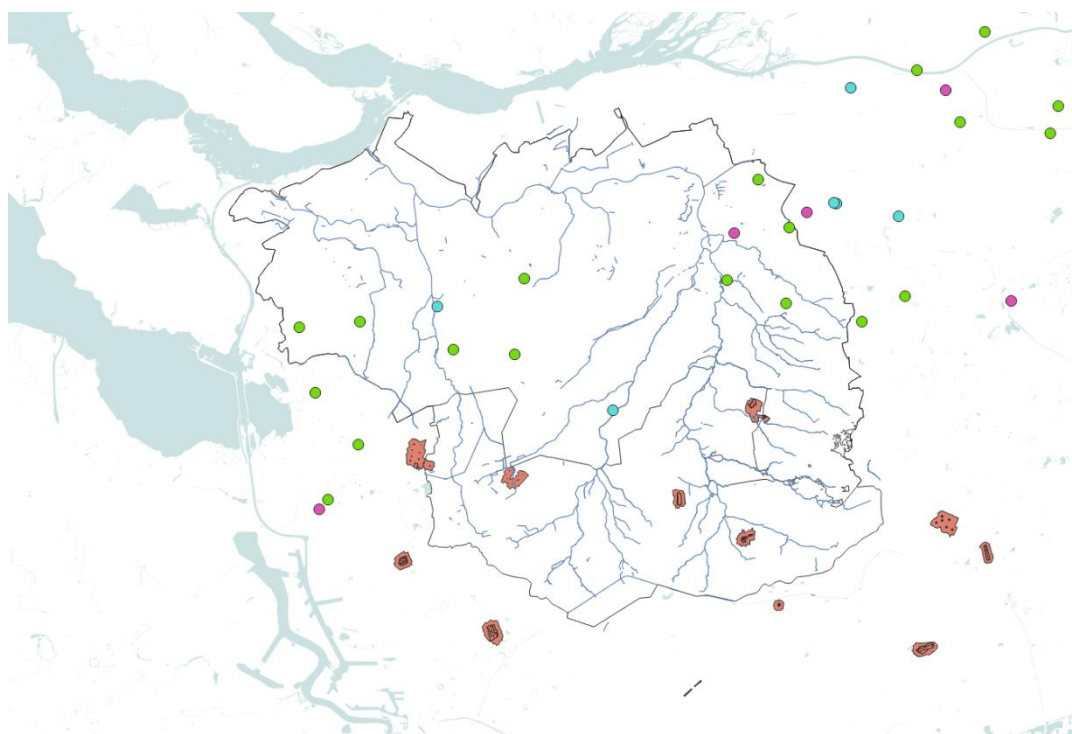


Figuur 2-20 Kwel en infiltratiegebieden in het stroomgebied. In de blauwe gebieden kwelt grondwater over het algemeen op en in bruine gebieden infiltreert het. De data in het Nederlandse deel is afkomstig van het Landelijk Hydrologisch Model (LHM4.3) over de periode 2011-2018. De data in het Vlaamse gebied is afkomstig van de studie Kartering van het Fysisch Systeem en de Ruimtelijke structuren in Vlaanderen op schaal 1 : 50 000 (VLM).

2.6.3 Grondwateronttrekkingen

De grondwateronttrekkingen voor drinkwater en industrie zijn weergegeven Figuur 2-21. Het valt op dat in Nederland veel (grote) onttrekkingen voor drinkwater aanwezig zijn. De grootste onttrekkingen vinden plaats bij Rucphen (ten oosten van Roosendaal), Oosterhout (noordoosten van Breda) en Tilburg. Op deze locaties wordt gezamenlijk meer dan 11 miljoen m³/jaar onttrokken wat resulteert in lagere

stijghoogten (zie rode lijn bij de onttrekking in Figuur 2-16). De onttrekkingen in Vlaanderen liggen dichtbij de landsgrens en beïnvloeden de natuurgebieden in de beekdalen van bijvoorbeeld 't Merkske en de Mark. De grondwaterstanden en stijghoogten dalen immers en verlagen de kwelflux. Verder bevinden zich relatief veel beregeningsputten in het gebied. Onttrekken voor beregening gebeurt echter alleen in droge perioden in tegenstelling tot drinkwater- en industriële onttrekkingen die jaarrond plaats vinden. Bovendien liggen beregeningsputten vaak ondieper. De onttrekkingsdebieten voor beregening kunnen in droge jaren die van drinkwater en industrie tijdelijk overtreffen. Volgens schattingen werd er in de droge jaren 2018 en 2023 meer dan 20 miljoen m³ grondwater onttrokken voor beregening, in een korte periode van maximaal 6 weken (De Louw et al., 2023).



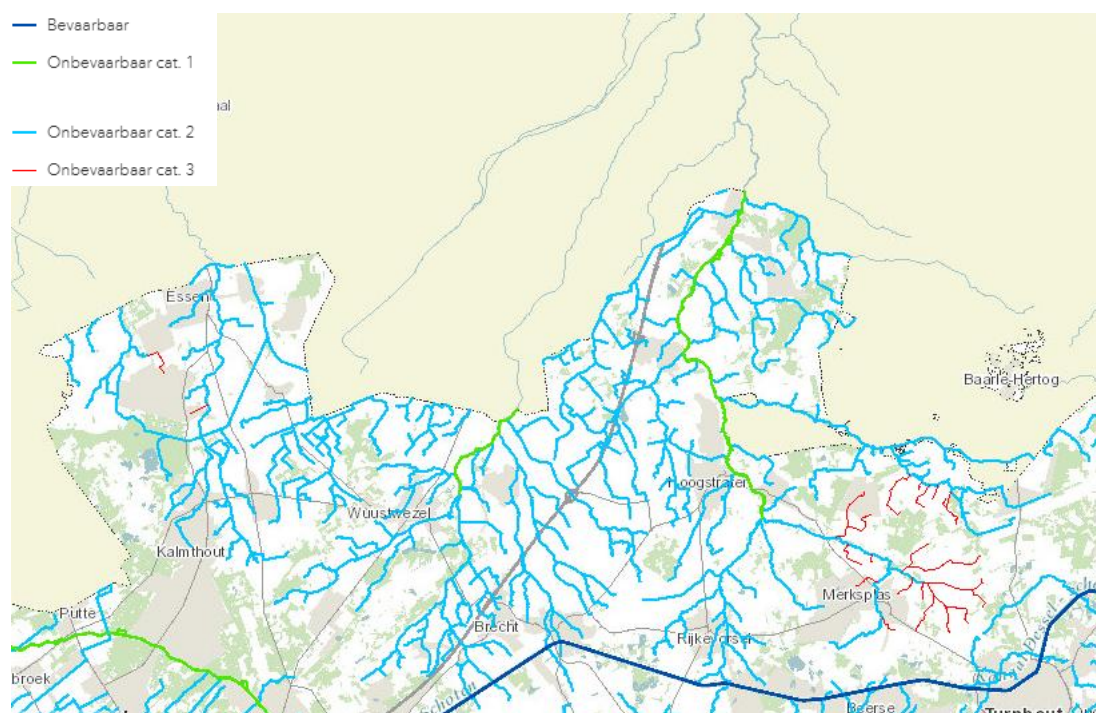
Figuur 2-21 Grondwateronttrekkingen in het stroomgebied. In het Nederlandse deel geven de cirkels onttrekkingslocaties aan voor drinkwater (blauw) en industrie (groen en roze, waarbij respectievelijk meer of minder dan 150 000 m³/jaar wordt onttrokken). Bron: Provincie Brabant <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=b6414403ef5e4e9aa8875a7c366209c6>. In Vlaanderen geven de oranje-rode gebieden de grondwaterbeschermingszones weer waar wordt gewonnen voor consumptie. Bron: Vlaanderen Datavindplaats <https://www.vlaanderen.be/datavindplaats/catalogus/grondwaterwingebeden-en-beschermingszones>

2.7 Beheerders

Vlaamse beheerders

In Vlaanderen zijn de waterlopen opgedeeld in bevaarbare en onbevaarbare waterlopen. De bevaarbare waterlopen worden beheerd door de Vlaamse

Waterweg. De onbevaarbare waterlopen worden vervolgens weer opgedeeld in vier categorieën (categorie 1 t/m 3 en publieke grachten). Waterlopen van categorie 1 (Mark en Weerijsebeek) worden beheerd door de *Vlaamse Milieumaatschappij (VMM)*, van categorie 2 (o.a. Leyloop, De Aa, Merkske, Kleine Aa, Bolkse Beek, Kleine Mark) door de *Provincie Antwerpen (Dienst Integraal Waterbeleid)*, van categorie 3 (o.a. Molenbeek, Moerbeek, Biezenloop, Venneloop, Moerstraatloop, Zandloop) en de publieke grachten door de betrokken gemeenten.



Figuur 2-22. Opdeling categorieën waterlopen in Vlaanderen (bron: waterinfo.be).

De gemeenten dragen het beheer in de meeste gevallen over aan de provincie. Verder zijn er drie deelgebieden waar de waterlopen van categorie 1 en 2 en de publieke grachten beheerd worden door volgende wateringen: Watering De Beneden Mark, Watering van Loenhout en Watering van Wuustwezel. Er zijn hervormingen in het Vlaamse waterbeheer op komst, met een mogelijke oprichting van Waterschappen naar Nederlands model en afschaffing van de Polders en Wateringen. De Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid (CIW) en de bekkencoördinator van het Maasbekken hebben een coördinerende rol. Het grondwater wordt beheerd door de VMM. VMM beheert zowel de waterkwantiteit als de waterkwaliteit.

In het Vlaamse gedeelte van het stroomgebied zijn ook nog de volgende beheerders betrokken bij het waterbeheer in het gebied:

- *Vlaamse Landmaatschappij* - Landbeheer in landelijk gebied: inrichtingsprojecten uit om de kwaliteit van de open ruimte te

verbeteren, beheer van de grondenbank, beheerovereenkomsten met landbouwers die vrijwillig aan natuur-, milieu- en landschapszorg doen, stimuleren van duurzame bemesting bij landbouwers.

- *Departement Omgeving* - Ruimtelijk beleid, erosiebestrijding, klimaatadaptatieplanning, toezicht op bedrijven met een klasse 1-vergunning, integratie van ecologie in de infrastructuur
- *Agentschap voor Natuur en Bos* - Beheer van openbaar groen, parken, natuur- en bosgebieden. Natuur en Bos heeft een vergelijkbare functie als Staatsbosbeheer, maar heeft ook mandaat aan de beleidskant, niet alleen de uitvoering.
- *Departement Landbouw en Visserij* - Landbouw-, tuinbouw- en visserijbeleid.
- *Aquafin* - Aanleg van de bovengemeentelijke afvalwaterinfrastructuur en beheer van collectoren, pompstations en afvalwaterzuiveringsinstallaties, rioolbeheerder voor bepaalde gemeenten
- *Agentschap Wegen en Verkeer* - Beheer van de baangrachten langs gewestwegen
- *Pidpa (nieuw bedrijf: Adelta)* - Drinkwatermaatschappij, behalve voor een deel van de gemeente Baarle-Hertog. Pidpa exploiteert in het gebied zeven (diepe) grondwaterwinningen in Brecht, Essen, Wuustwezel, Hoogstraten, Meerle, Rijkevorsel-Merksplas en Ravels

Nederlandse beheerders

In Nederland is het watersysteem opgedeeld in een hoofdwatersysteem en regionaal watersysteem. Voor het hoofdwatersysteem is de normering vastgesteld door de nationale overheid. In het regionale watersysteem is de normering vastgesteld door de provincie, vaak in samenspraak met het waterschap.

- *Waterschap Brabantse Delta* - Het waterschap is verantwoordelijk voor het beheer van de primaire en regionale waterkeringen binnen het beheergebied. Deze moeten voldoen aan gestelde veiligheidsnormeringen. Daarnaast waarborgt het waterschap de waterkwaliteit en verzorgt het de rioolwaterzuivering.
- *Rijkswaterstaat* - Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor de normering van de primaire waterkeringen. Het onderhoud van deze keringen wordt samen met het waterschap gefinancierd en uitgevoerd door het waterschap.
- *Provincie Noord-Brabant* - De provincie is (in samenspraak met het waterschap) verantwoordelijk voor het vaststellen en normeren van de regionale keringen. Het Waterschap is verantwoordelijk voor de uitvoering hiervan. Daarnaast is de provincie verantwoordelijk voor grondwaterbeheer.

- *Gemeenten* – Gemeenten zijn verantwoordelijk voor grondwaterbeheer binnen het stedelijk gebied. Daarnaast verzorgen zij de afwatering van afval- en regenwater via de riolering.
- *Staatsbosbeheer* – Staatsbosbeheer is verantwoordelijk voor het beheer van natuurgebieden in Nederland. Binnen het stroomgebied van de Mark en Molenbeek zijn de grootste gebieden: Brabantse Wal, Het Merkske en Baronie van Breda.
- *Natuurmonumenten* – Een natuurbeschermingsorganisatie. Natuurmonumenten heeft enkele gebieden binnen het waterschap in eigendom. Het grootste gebied is Chaamse Beken (112 hectare)

Samenwerkingsverbanden en -projecten

Er vindt al samenwerking plaats tussen de beheerders van het Nederlandse en Vlaamse gedeelte van het stroomgebied. Vaak gaat het om projecten gefinancierd door de EU. Daarnaast overleggen beheerders in het Grensoverschrijdend Wateroverleg. De focus in dit overleg lijkt hier nog wel te liggen op specifieke lokale problemen rondom de grens, bijvoorbeeld m.b.t. de afwatering en waterkwaliteit in de grensbeken.

- *Grensoverschrijdend wateroverleg (GoW)* – Jaarlijks overleg tussen Waterschap Brabantse Delta en Vlaamse beheerders van stroomgebieden die uitkomen in het waterschap.
- *Grensoverschrijdend integraal waterproject Merske* - Eind 2017 startte het bekkensecretariaat Maasbekken samen met Waterschap Brabantse Delta een grensoverschrijdend integraal waterproject op voor het Merkske. Alle overheden en actoren die betrokken zijn bij het waterbeleid langs beide zijden van de grens werden hiervoor uitgenodigd, o.a. gemeenten, waterbeheerders, rioolbeheerders, administraties en natuur- en landbouwverenigingen zitten rond de tafel. Dit heeft geleid tot een concrete actielijst en verdere verfijning van de acties uit het stroomgebiedbeheerplan. Hiermee is verder aan de slag gegaan. Sinds 2021 wordt het integraal waterproject van het Merkske getrokken door provincie Antwerpen en waterschap Brabantse Delta. Voor heel wat acties loopt de voorbereiding en is effectieve uitvoering voorzien voor 2027.
- *Interreg Triple-C project Kleine Aa/Molenbeek* – In de kleine Aa/Molenbeek zijn in het kader van het Europese Triple C project stuwen geplaatst, verwijderd en is hermeandering van trajecten in het beekdal uitgevoerd.

3 Overstromings- en droogtegebeurtenissen

3.1 Overstromingen

3.1.1 Normering

In zowel Vlaanderen als Nederland wordt onderscheid gemaakt tussen wateroverlast en overstromingen. In het geval van wateroverlast veroorzaakt water veroorzaakt door extreme neerslag problemen. Hierdoor ontstaat vooral materiële schade, onder andere aan de landbouw, en kunnen mensen overlast ervaren. Wateroverlast komt relatief vaak voor. Overstromingen vinden plaats vanuit waterlopen en beken. Dit komt relatief minder vaak voor, maar kan een grotere impact hebben doordat bijvoorbeeld de stroomsnelheden en volumina groter kunnen zijn.

In Nederland zijn normen vastgesteld voor wateroverlast en regionale keringen (vanuit de provincies) en voor primaire keringen (vanuit de Rijksoverheid). Voor de regionale keringen in de provincie Noord-Brabant is vastgesteld dat ze bestand moeten zijn tegen een afvoergebeurtenis met overschrijdingskansen van 1:100 per jaar (ook wel een T100 situatie genoemd). Daarnaast is er een norm per type grondgebruik (Figuur 3-1), waarin staat weergegeven hoe groot de kans op wateroverlast per type grondgebruik mag zijn. Deze Nederlandse normen zijn vastgesteld in het kader van het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW), en worden daarom ook wel de NBW-normen genoemd.

Normklasse gerelateerd aan grondgebruiktype	Maaiveld-criterium	Basis werk criterium (l/jr)
Grasland	5 %	1/10
Akkerbouw	1 %	1/25
Hoogwaardige land- en tuinbouw	1 %	1/50
Glastuinbouw	1 %	1/50
Bebouwd gebied	0 %	1/100

Figuur 3-1. Nederlandse norm voor wateroverlast per type grondgebruik (bron: [IPLO](#)).

In Vlaanderen maakt men een gelijkaardig onderscheid tussen overstromingen (buiten de oevers treden van rivieren) en wateroverlast (als direct gevolg van extreme neerslag), of tussen pluviale, fluviale en kust-overstromingen. Voor de kustoverstromingen beperkt de Vlaamse overheid via hun kustvisie de overschrijdingskansen tot 1:1000 per jaar. Voor de aanleg van rioleringsstelsels wordt hiervoor een

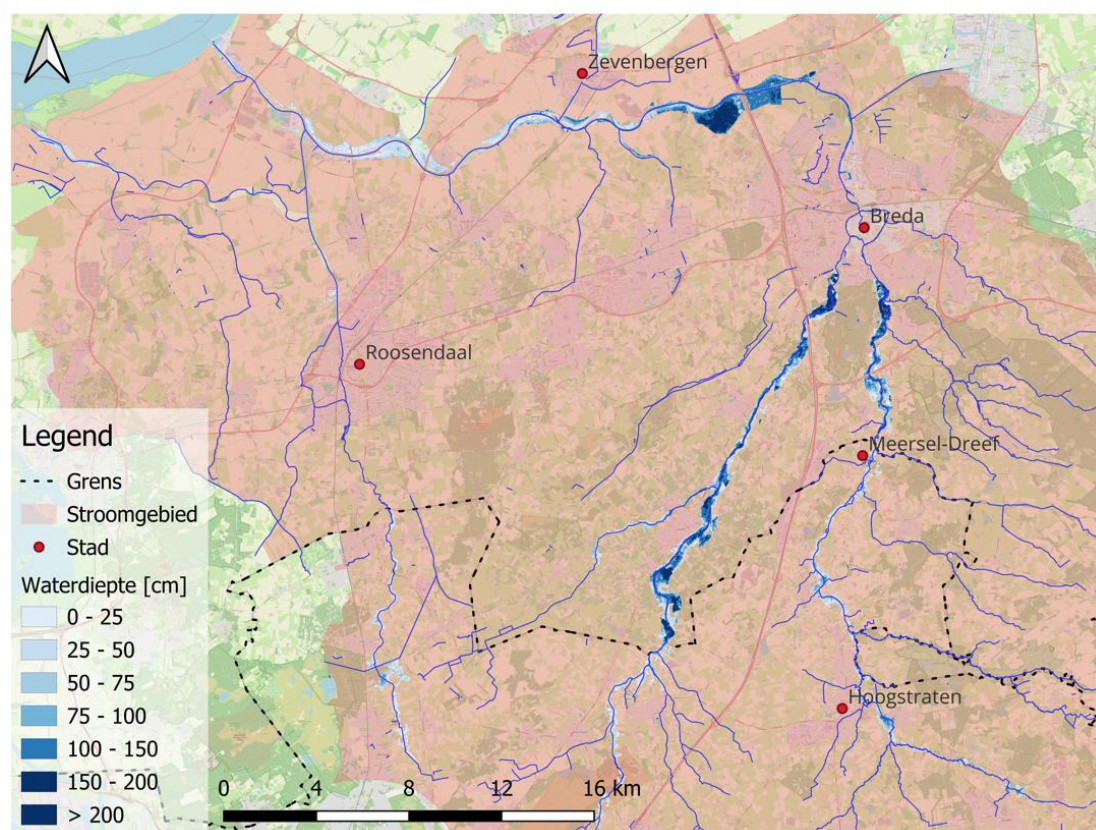
overschrijdingskansen van 1:20 gehanteerd. Voor de andere typen overstromingen zoals de fluviale overstromingen zijn er geen vaste overschrijdingskansen gedefinieerd, en wordt de veiligheid eerder ad hoc bepaald. Voor het Sigmaplan langs de Zeeschelde en de andere tijgebonden rivieren, en bepaalde andere rivieren, werd ze gebaseerd op een maatschappelijke kosten-batenafweging. In Weerbaar Waterland werd geadviseerd om voor alle rivieren in Vlaanderen heldere doelen te definiëren, zowel voor overstromingen als voor waterschaarste.

3.1.2 Huidige situatie

Overstromingen vanuit de beken

Gebieden die vatbaar zijn voor overstromingen in de beekdalen zijn te zien in kaarten die in Vlaanderen en Nederland zijn ontwikkeld in kader van de EU Floods Directive (EFD). In zowel Vlaanderen als Nederland zijn overstromingskaarten beschikbaar voor gebeurtenissen met een overschrijdingskansen van 1:10, 1:100 en 1:1000 per jaar (T10, T100 en T1000) (Figuur 3-2). Deze kaarten moeten worden gemaakt voor gebieden waar sprake is van een 'significant risico'. In Vlaanderen betekent dit dat voor alle waterlopen van categorie 1 fluviale overstromingskaarten beschikbaar zijn. Voor alle andere gebieden zijn er pluviale overstromingskaarten opgemaakt, zowel voor de waterdiepten als de economische, ecologische en sociale gevolgen en risico's. Er zijn verschillende technieken voor het vaststellen van overstromingskaarten (verschillen in o.a. modelinstrumentarium en rastergrootte). Ook zijn bijvoorbeeld overstromingen in de Kleine Aa (VL) wel in beeld gebracht, maar in de benedenstroomse Molenbeek (NL) niet.

Overstromingen fluviaal T1000



Figuur 3-2 Fluviale overstromingen met een overschrijdingskans van 1/1000. De Nederlandse en Vlaamse kaarten zijn met verschillende modelleringstechnieken samengesteld, en hebben een andere resolutie (LIWO⁶; Waterinfo⁷).

Kleine Aa/Molenbeek

De Kleine Aa/Molenbeek is niet meegenomen in de Nederlandse EFD studie. In het Vlaamse gedeelte (Kleine Aa) vinden kleinschalige overstromingen plaats. Als er wateroverlast plaatsvindt komt dit meestal in de zomer voor. In een studie in het kader van het NBW wordt beschreven dat er in het Nederlandse deel vooral wateroverlast kan optreden bij locaties waar beken Roosendaal instromen (Witteveen+Bos, 2014a). Eén van de belangrijkste knelpunten ligt ten zuiden van het verdeelwerk Molenbeek. Dit verdeelwerk heeft een beperkte capaciteit en zorgt voor opstuwing, waardoor wateroverlast bovenstrooms van dit verdeelwerk kan plaatsvinden. Er is relatief weinig ruimte beschikbaar in het gebied tussen Roosendaal en de landsgrens, waardoor er in dit gebied weinig waterberging gerealiseerd kan worden. Ook is in het Nederlandse deel sprake van een relatief grote directe afvoer uit verhard/bebouwd oppervlak, doordat Roosendaal een groot deel van het (Nederlandse deel van) stroomgebied uitmaakt.

⁶ [LIWO - regionale fluviale overstromingen](#)

⁷ [WATERINFO - Overstromingsrichtlijn](#)

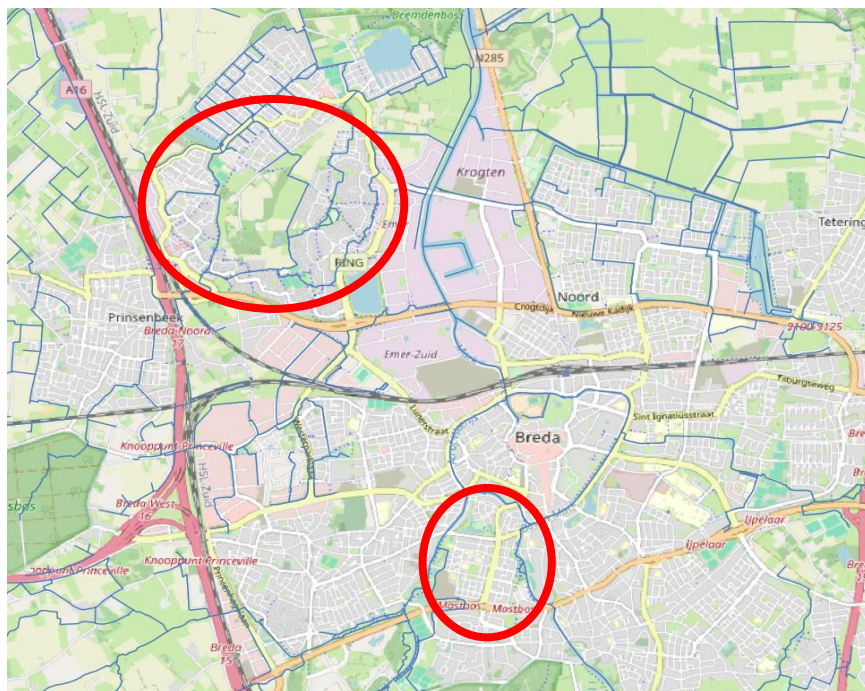
Aa of Weerijds en Mark

In het bovenstroomse gedeelte van de Aa of Weerijds zijn overstromingen beperkt van omvang en zijn ook weinig overstromingsgevoelige gebieden. Benedenstrooms, met name in het Nederlandse gedeelte, treedt de beek wel regelmatig buiten zijn oevers. In deze gebieden (in/op de rand van de beekdalen) bevindt zich voornamelijk kapitaalintensieve landbouw zoals boomgaarden, waar inundatie tot schade kan leiden.

De Mark treedt regelmatig buiten haar oevers, waarbij er vooral knelpunten rond Breda in Nederland en Hoogstraten/Mersel-Dreef in Vlaanderen zitten. De beekdalen tussen de Vlaams-Nederlandse grens en Breda hebben relatief vaak last van overstromingen, maar zijn hier grotendeels op ingericht met waterbergings- en natuurgebieden. De grootste knelpunten in deze stroomgebieden lijken in en rondom Breda te liggen. Hier spelen twee processen die invloed uitoefenen op de waterstanden.

1. Hoge waterstanden in de MDV-boezem (als gevolg van hoge waterstanden op het VZM) kunnen zorgen voor een belemmering van de afvoer van de Mark en daardoor hoge waterstanden in de Stadsmark in Breda.
2. Over het algemeen valt de piek van de afvoergolf van de Bovenmark na de piek van de Aa of Weerijds, maar met specifieke neerslagpatronen kunnen deze samenvallen. Dit zorgt met name voor verhoogde waterstanden aan de zuidkant van de Stadsmark in Breda.

Twee gebieden die door gebiedskenners als kwetsbaar geïdentificeerd worden zijn de wijken Haagse Beemden en Boeimeer in Breda (Figuur 3-3). Boeimeer ligt tussen de Mark en Aa of Weerijds vlak voordat deze de stadsmark instromen en is daardoor erg gevoelig voor overstromingen vanuit de beken.



Figuur 3-3. Kwetsbare wijken Boeimeer (onder) en Haagse Beemden (boven) in Breda.

De stuwen in zowel het Vlaamse als Nederlandse deel van de Mark zijn gevoelig voor uitspoeling bij hoge afvoeren. In 1998 is de stuw 'Blauwe Kamer' tijdens een hoogwater bijna uitgespoeld. Het uitspoelen van een stuw zou kunnen leiden tot een vloedgolf met als gevolg overstromingen benedenstrooms (waaronder in Breda). Verder liggen er meerdere duikers en bruggen waardoor de afvoercapaciteit gelimiteerd is. Enkele voorbeelden zijn de bruggen in Breda (m.n. de Tramburg aan de noordzijde van Breda) en de brug van de A58 over de Mark (tussen Breda en de Vlaams-Nederlandse grens).

Gebiedskenners geven aan dat de militaire terreinen in Vlaanderen (bovenstrooms in stroomgebieden Aa of Weerij/Grote Aa en 't Merske, een deelstroomgebied van de Mark) pieken in het afvoerverloop veroorzaken omdat de inrichting hier gericht is op zo snelle afvoer om de vliegvelden in bedrijf te houden. Lokale knelpunten en overstromingsgevoelige locaties die zijn geïdentificeerd in de studie 'Optimalisatie Hoogwaterbescherming Breda' zijn weergegeven in (Figuur 3-4).



Figuur 3-4. Knelpunten in en rond de stad Breda. De drie zuidelijke punten zijn knelpunten met een beperkte afvoercapaciteit. De twee noordelijke punten zijn laag liggende gebieden die relatief snel onderlopen bij hoge waterstanden in de MDV boezem (Versteeg et al., 2013).

MDV-Boezem

De MDV-boezem wordt begrensd door regionale keringen. Bij een doorbraak van deze regionale keringen (Figuur 3-5) kunnen er mogelijk snel diepe overstromingen optreden. Binnen de peilbeheerde gebieden liggen boezemkades, waardoor een eventuele doorbraak van de regionale keringen gecompartmentaliseerd kan worden.

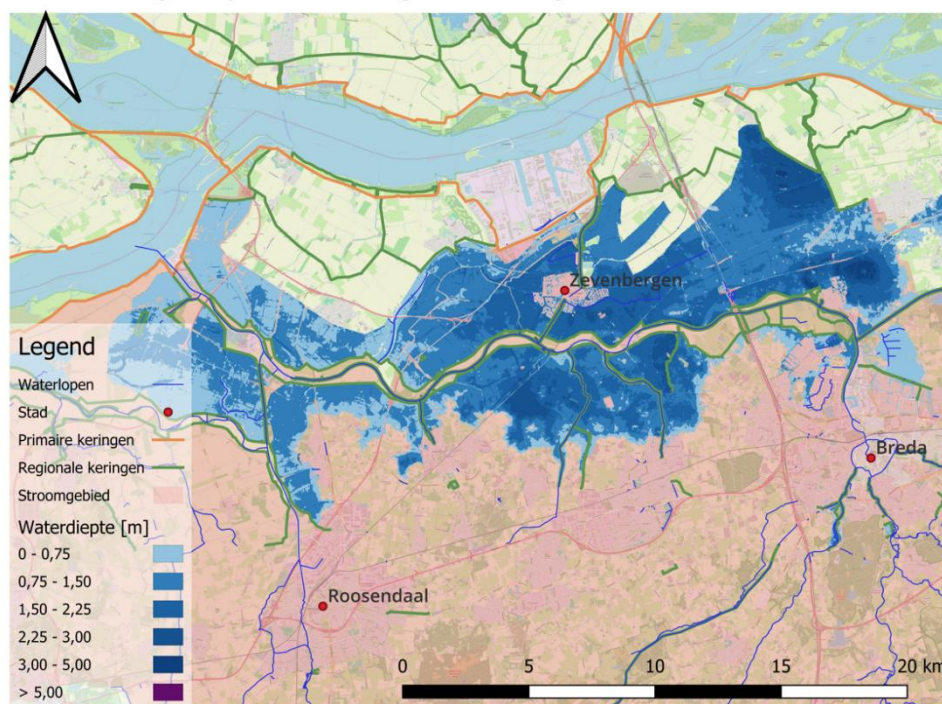
De boezemkades en regionale keringen kunnen ook zorgen voor compartimentalisering bij een doorbraak van een primaire kering. De primaire waterkeringen liggen aan de rand van of net buiten het stroomgebied. In Figuur 3-6 staat de beschermingsnorm (ondergrens van de toelaatbare faalkans) per kering traject weergegeven.

Als er zowel hoge waterstanden in de grote rivieren (Rijn en Maas) als op zee zijn, kan het VZM als bergingslocatie voor rivierwater ingezet worden (geschatte inzetfrequentie 1/1400 jaar)⁸. In deze situatie worden de sluiscomplexen bij Dintel- en Benedensas gesloten waardoor de afvoer van de MDV-boezem naar het VZM tot enkele dagen gestremd wordt. Als er gelijktijdig veel neerslag in het stroomgebied valt, kan dit leiden tot maalstops en tot wateroverlast in de peilbeheerde gebieden en Roosendaal

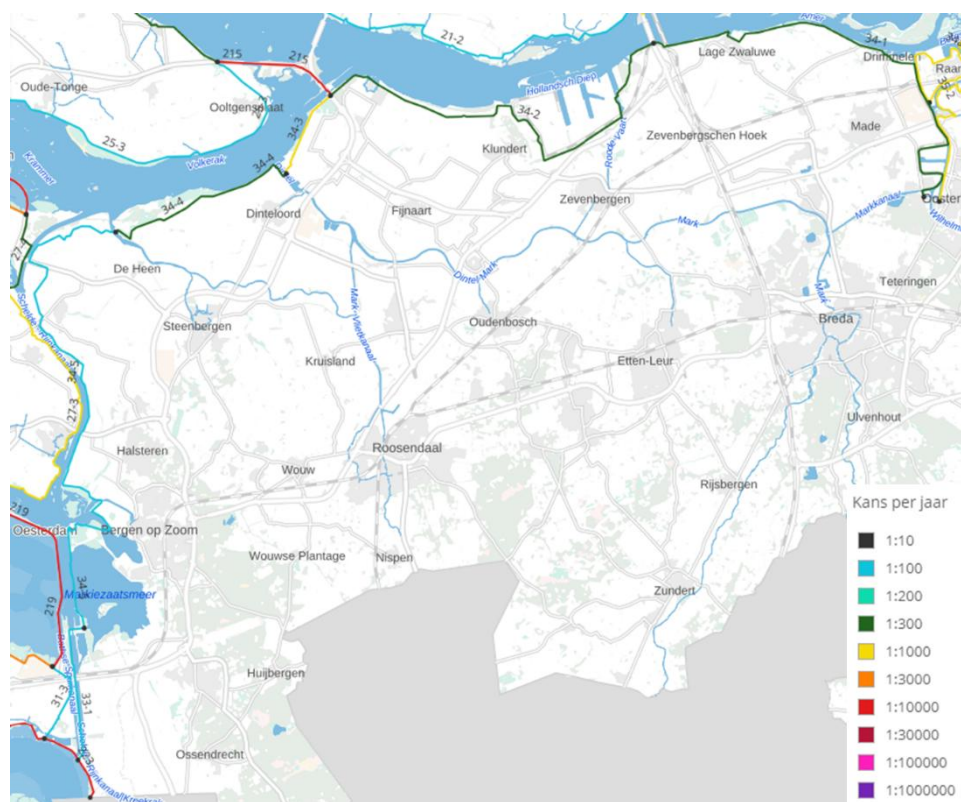
⁸ [Infographics operationeel watermanagement | IPLO](#) Zie infographic Volkerak Zoommeer.

en Breda. Een dergelijke gebeurtenis is heeft echter een zeer kleine kans van voorkomen.

Overstromingen bij doorbraak regionale keringen



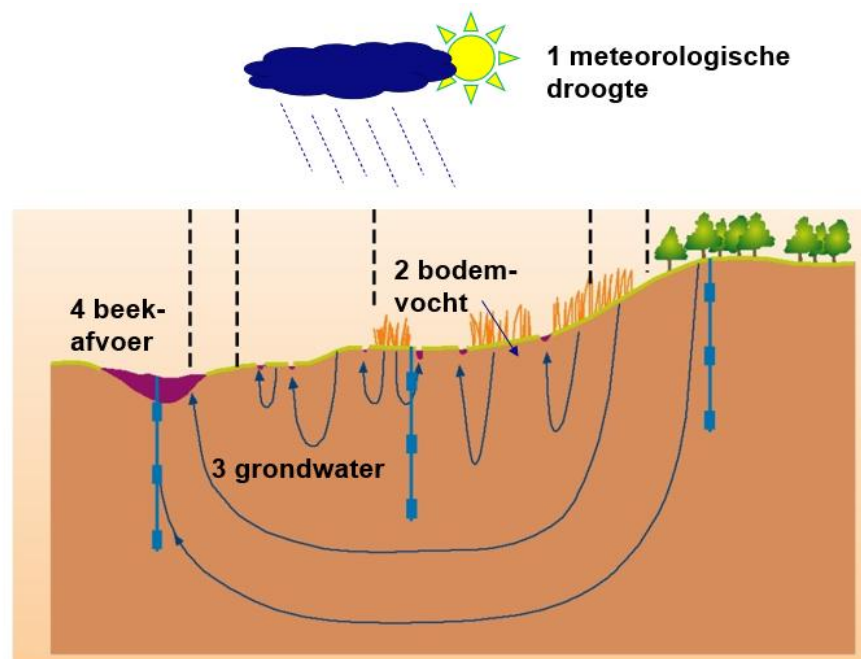
Figuur 3-5 Kaart met samengestelde overstromingen bij doorbraak van de regionale keringen. Scenario 'Kleine kans' ($T > 300$). Deze overstromingen zullen nooit gelijktijdig optreden (LIWO, 2024).



Figuur 3-6. Ondergrenswaarde van de toelaatbare faalkans per primaire kering in het Nederlandse deel van het projectgebied.

3.2 Droogte

Een meteorologische droogte heeft, door het uitblijven van neerslag en een hoge verdamping, een groot effect op het bodemvocht en grondwatersysteem. Het vochtgehalte in de onverzadigde zone neemt sterk af, er vindt nauwelijks tot geen grondwateraanvulling plaats, en de capillaire opstijging vanuit het grondwater richting de wortelzone wordt groter. Hierdoor dalen de grondwaterstanden in een dergelijk jaar sterker dan in een normaal jaar. Dit heeft een effect op de grondwaterafvoer die door de daling van de grondwaterstanden afneemt waardoor uiteindelijk de beken minder water afvoeren of zelfs droogvallen (zie Figuur 3-7). De propagatie van meteorologische droogte gaat via bodemvochtdroogte naar grondwaterdroogte en naar uiteindelijk lage afvoeren. Dit is een proces dat, afhankelijk van gebiedskenmerken, weken tot maanden in beslag neemt (Van der Eertwegh et al., 2021).



Figuur 3-7 Propagatie van meteorologische droogte, via bodemvocht, naar grondwater en uiteindelijk beekafvoer (grondwaterafvoer) (Bron: Deltares).

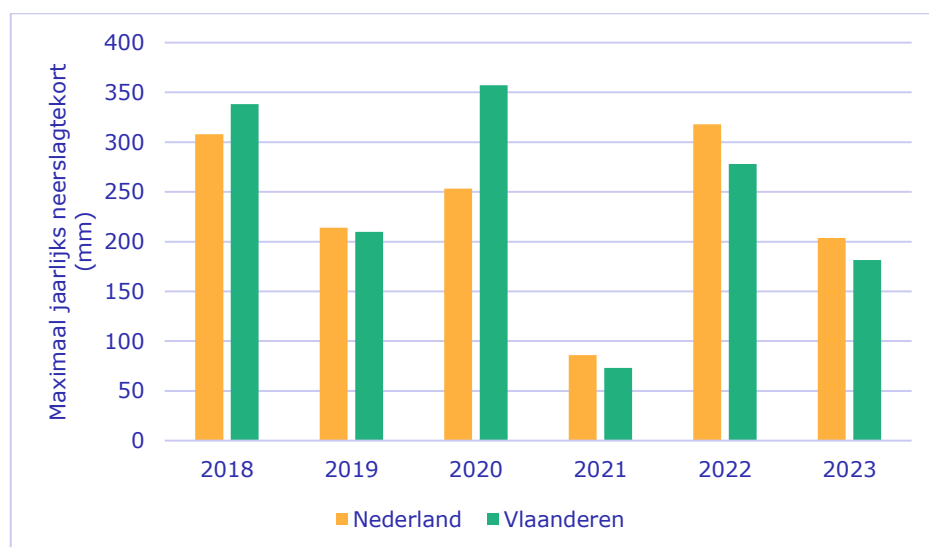
Het Mark stroomgebied is door de zandige bodems zeer droogtegevoelig. Het grondwater kent tijdens droogte problematische dalingen en moeizaam herstel. Het jaar 2018 geldt voor het hele stroomgebied historisch gezien als een extreem droog jaar. In dit hoofdstuk wordt daarom de hydrologische situatie in 2018 gebruikt om te illustreren hoe het stroomgebied reageert in tijden van droogte.

3.2.1 Indicatoren voor meteorologische droogte

In zowel Nederland als Vlaanderen wordt de mate van droogte vaak geduid aan de hand van het oplopend neerslagtekort vanaf 1 april. Dit is het cumulatieve verschil tussen de neerslag en verdamping (potentiële evapotranspiratie) over van april tot en met september. In beide landen is de afgelopen jaren de frequentie van grote tekorten (ten opzichte van het gemiddelde neerslagtekort over de afgelopen 100 jaar) toegenomen. Perioden van droogte treden in sommige jaren (zoals 2025) al vroeg (voor april) op, wat een reden zou kunnen zijn om de neerslagtekortberekening vanaf voor april te starten.

2018 en 2022 kenden grote neerslagtekorten in zowel Nederland als Vlaanderen (bijna 310 mm resp. 340 mm in 2018 en 320 mm resp. 280 mm in 2022). Eind oktober 2018 heeft de Vlaamse minister van Omgeving, Natuur en Landbouw de droogte van 2018 officieel uitgeroepen als landbouwramp, omdat het voldeed aan de wettelijke voorwaarden dat het weersfenomeen een uitzonderlijk karakter had en omvangrijke schade heeft veroorzaakt.

Vaak wordt gekeken naar de nationale neerslagtekorten. Op deze manier kunnen tekorten tussen de landen verschillen, terwijl de tekorten binnen een grensoverschrijdend stroomgebied vergelijkbaar zullen zijn. Zo laat Figuur 3-8 zien dat 2020 in Vlaanderen het hoogste maximale tekort kende, terwijl dit jaar in Nederland natter was dan 2018 en 2022. De focusjaren van waterschappen, onderzoeksbureaus en overheidsinstanties kunnen hierdoor iets verschillen.



Figuur 3-8 Maximale jaarlijkse neerslagtekorten in Vlaanderen en Nederland tussen 2018 en 2023. Bronnen: KNMI en VMM. Het langjarig gemiddelde cumulatieve neerslagtekort is in de orde van 100 mm.

3.2.2 Situatie 2018

Het neerslagtekort eind september 2018 was gemiddeld 290 mm in het stroomgebied. De hydrologische droogte werd sterk verergerd doordat er meer dan ooit grondwater werd opgepompt voor beregening, geschat op zo'n verdubbeling ten opzichte van normaal (Van Eertwegh et al., 2019). Om de schade aan aquatische natuur zoveel mogelijk te beperken golden in augustus 2018 in het gehele vrij-afwaterend gebied onttrekkingsverboden uit het oppervlaktewater. Voor grondwateronttrekkingen voor beregening gold in Nederland geen verbod. In juli was in Nederland de 5%-regeling van kracht waarbij tijdelijk overdag grondwater mocht worden onttrokken voor het beregenen van grasland. In het peilbeheerste gebied gold een onttrekkingsverbod omdat er te weinig water was om de MDV door te spoelen (Waterschap Brabantse Delta, 2018). In Vlaanderen golden op grote schaal onttrekkingsverboden, sproeiverboden voor particulieren, en een verbod voor het overdag besproeien van gewassen met grondwater (met het argument dat hierbij te veel verdampt) (Waterschap Brabantse Delta, 2018). Het venster waarin de landbouwsector mocht besproeien werd vastgesteld per provincie. Dit werd op vraag van de landbouwsector versoepeld in West- en Oost-Vlaanderen en Antwerpen wegens regen en lagere temperaturen in de eerste helft van augustus (CIW, 2019). Gedurende de droogteperiode is er geen contact geweest tussen de Nederlandse en Vlaamse waterschappen. Er was dus geen afstemming wat betreft onttrekkingen bij de grens.

3.2.3 Modelanalyse 2018

Voor een analyse naar de droogte van 2018 heeft Deltares berekeningen uitgevoerd (De Louw et al., 2023) met het Landelijk Hydrologische Instrumentarium (LHM 4.2.1) (Hendriks et al., 2023). Met dit landelijke model zijn de effecten van een extreem droog jaar op de verschillende elementen van het watersysteem (bodemvocht, grondwater, beekafvoer, zoals in Figuur 3-7 weergegeven), in beeld gebracht voor het gehele zandgebied van Nederland. Het LHM bevat ook een deel van Vlaanderen en omvat daarmee het gehele Mark-stroomgebied en ook alle andere grensoverschrijdende beken in het studiegebied. Ook al is de modelinvoer voor Vlaanderen op een veel minder gedetailleerd niveau ingevoerd omdat dit deel buiten het interessegebied van LHM valt, het is wel van belang als goede hydrologische randvoorwaarde voor het Nederlandse interessegebied. In paragraaf 6.2.2 wordt meer informatie gegeven over het LHM en de model invoer in het Vlaamse deel.

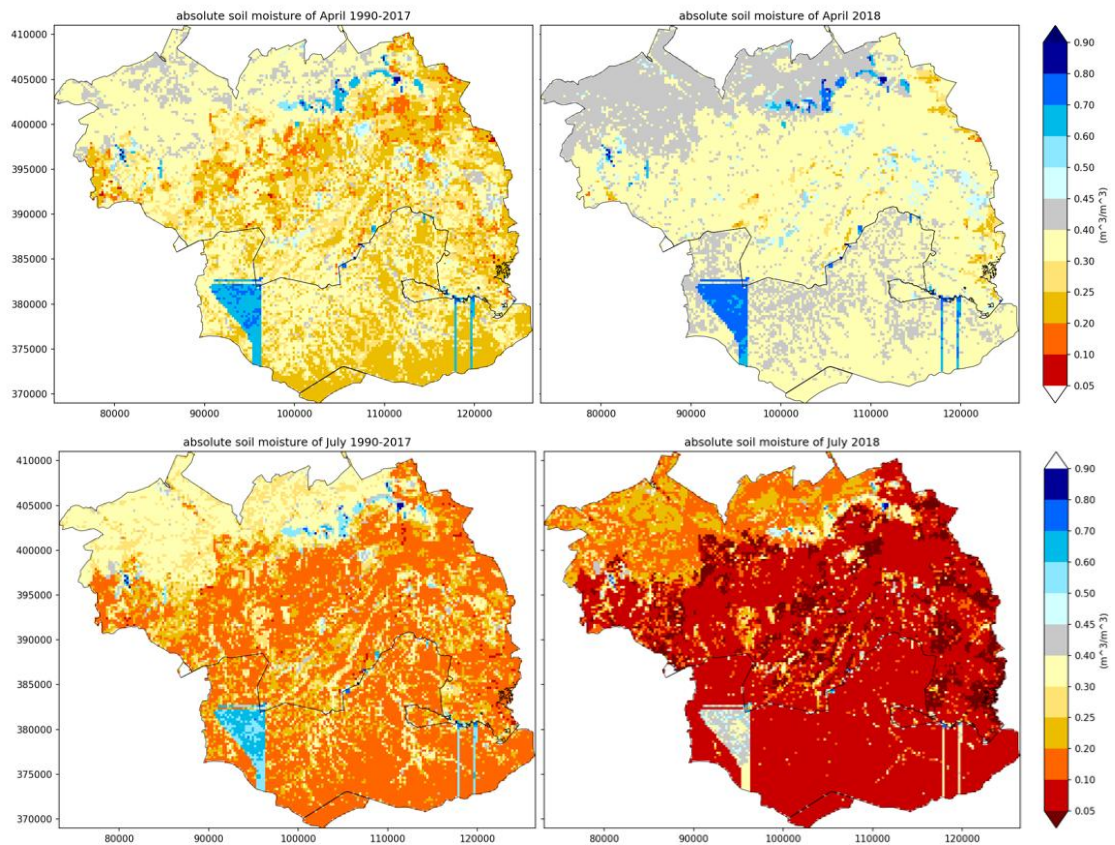
In deze paragraaf worden de resultaten uit deze droogte-analyse voor het gehele grensoverschrijdende JCAR-ATRACE studiegebied gepresenteerd. Het doel hiervan is om voor het studiegebied al in deze eerste fase van het onderzoek inzicht te geven hoe een dergelijk bodem- en grondwatermodel kan worden ingezet voor een droogtestresstest. Het biedt vervolgens aanknopingspunten om te komen tot een verbeterd grensoverschrijdend model.

Modelberekening

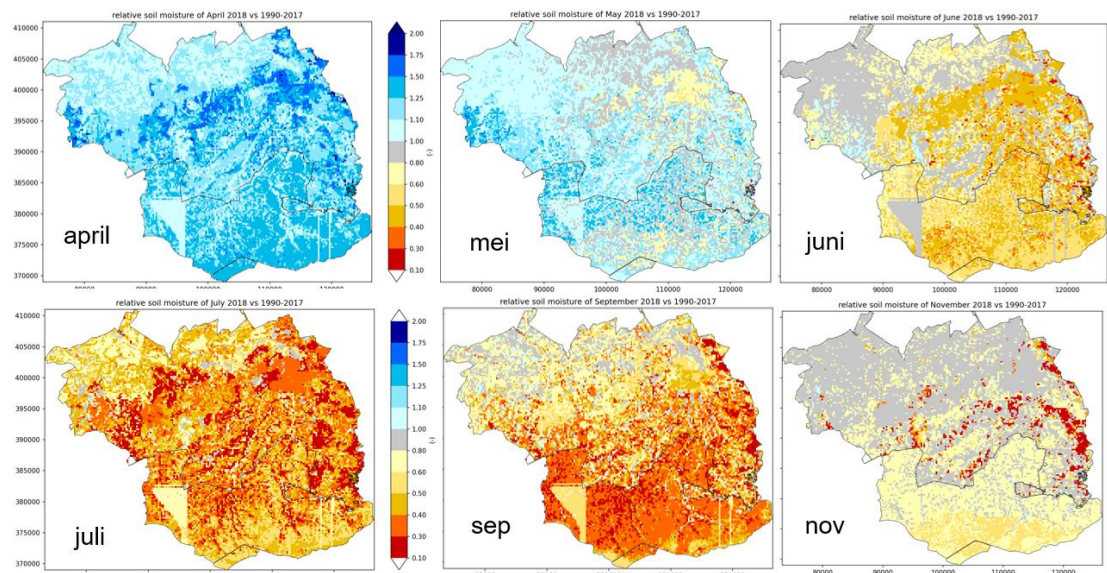
LHM is een gekoppeld modelinstrument waarbij de grondwaterstroming wordt gesimuleerd door MODFLOW en de onverzadigde zone processen en interactie met het grondwater door METASWAP. De oppervlaktewatermodule MOZART houdt een waterbalans bij van het oppervlaktewater op LSW-niveau (local surface water = substroomgebied) en het Distributiemodel (DM) berekent de waterverdeling en waterbeschikbaarheid in het hoofdwatersysteem (zie voor meer info www.nhi.nu/nl/). Het LHM is doorerekend voor de periode 1988-2022 en het extreem droge jaar 2018 is vergeleken met het gemiddelde van de 30-jarige periode 1988-2017. Bij de berekening zijn geen veranderingen van het watersysteem en onttrekkingen in de tijd doorgevoerd, met uitzondering van onttrekkingen t.b.v. berekening die het model zelf uitrekent op basis van het berekende vochttekort in de wortelzone.

Bodemvocht

De meteorologische droogte grijpt als eerste aan op het bodemvocht dat dan sterk afneemt. Het bodemvocht reageert dan het snelst op veranderende weersomstandigheden. In de hoger gelegen gebieden met een dikkere onverzadigde zone, is de hoeveelheid vocht in het bovenste 10 cm van de bodem iedere zomer al relatief laag maar wordt nog lager tijdens een extreme droogte. Het peilgestuurde noordelijke deel van het studiegebied (de polders) laat altijd een wat nattere bodem zien dan het zandgebied ten zuiden er van, zoals in Figuur 3-9 is te zien. Figuur 3-9 laat zien dat de bodem in de maand april 2018 natter was dan het 30-jarig gemiddelde van de maand april. Echter, in de maand juli is er in 2018 duidelijk sprake van droogte met zeer lage bodemvochtgehalten. Opvallend is dat in 2018 de lage bodemvochtgehalten aanhouden tot en met oktober door de aanhoudende droogte (zie Figuur 3-10). In november is voor het grootste deel van het studiegebied het bodemvocht al weer normaal, met uitzondering van de hoger gelegen infiltratiegebieden met een dikkere onverzadigde zone dan 2-3 meter.



Figuur 3-9 Het berekende bodemvocht (bovenste 10 cm) voor de maand april (boven) en juli (onder), voor zowel het 30-jarig gemiddelde (links) en voor 2018 (rechts).

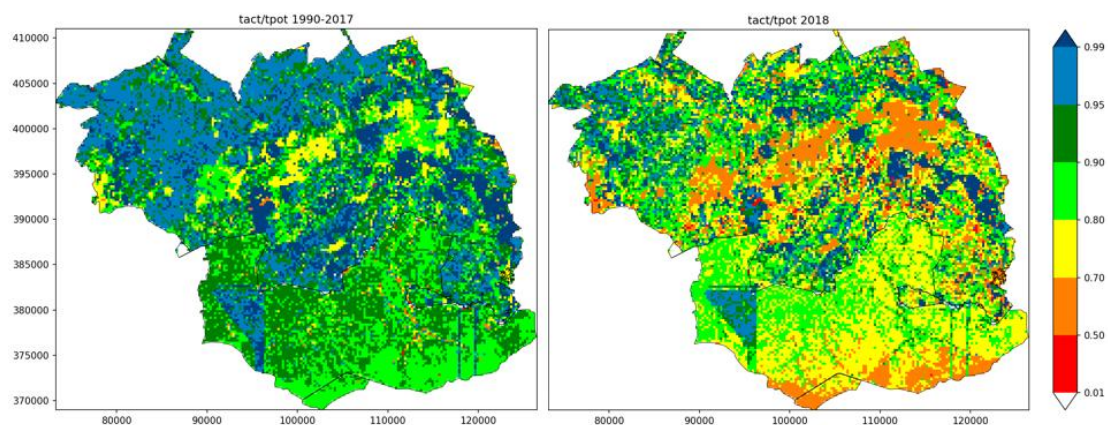


Figuur 3-10 Het berekende bodemvocht van 2018 gedeeld door 30-jarig gemiddelde. Een factor < 1 betekent dat het in de betreffende maand van 2018 droger was dan het 30-jarig gemiddelde (> 1 betekent natter).

Verdamping

Door de afname van bodemvocht is er minder vocht voor vegetatie beschikbaar om te verdampen (transpiratie) maar door de hoge temperatuur en globale straling is de potentiële verdampingsvraag juist groot. De modelberekeningen laten zien dat gewassen tijdens het extreem

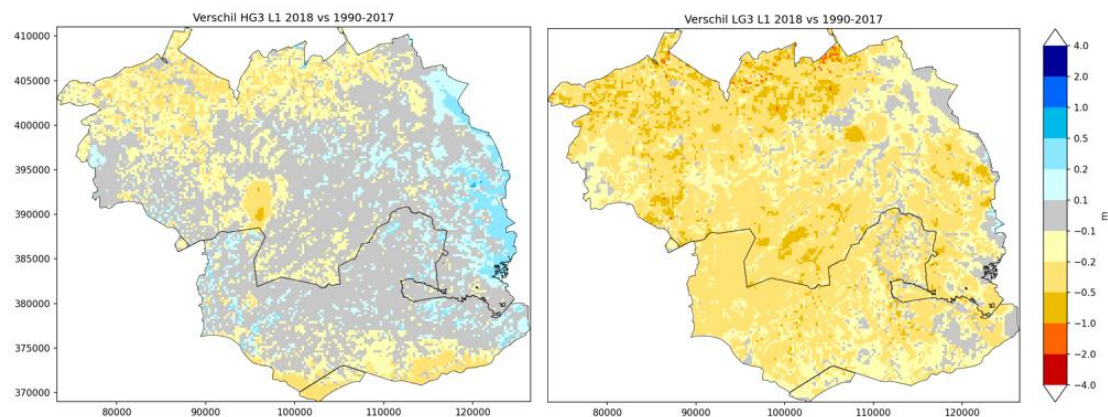
droge jaar 2018 in vergelijking met het langjarig gemiddelde veel minder water verdampen dan ze potentieel zouden kunnen (zie Figuur 3-11). Dit is het gevolg van droogtestress en leidt tot gewasschade als gewassen niet worden beregend. De droogtestress is duidelijk het grootst voor de hoger gelegen gebieden met grondwaterstanden dieper dan 2 meter. De grondwaterstand staat hier te diep om het bodemvocht in de wortelzone aan te vullen via capillaire opstijging. Dit is ook terug te zien in de berekende beregeningsbehoefte, die was in 2018 ongeveer 2,5 tot 4 keer zo groot als gemiddeld.



Figuur 3-11 De berekende factor Tact/tpot voor het 30-jarig gemiddelde (links) en het extreem droge jaar 2018 (rechts). Een lage factor ($< \sim 0.80$) betekent dat gewassen niet optimaal kunnen verdampen en er droogtestress en gewasschade kan optreden.

Grondwaterstanden

Grondwaterstanden lagen in de zomer van 2018 enkele decimeters tot wel één meter lager dan gemiddeld (Figuur 3-12). Het voorjaar van 2018 begon relatief nat en de grondwaterdroogte begon zich pas in juli af te tekenen. Opvallend is dat het noordelijke deel van het studiegebied (inclusief poldergebied) een grotere droogte kende dan de rest van het gebied. De grondwaterdroogte duurde in 2018 voort tot ver in het najaar.



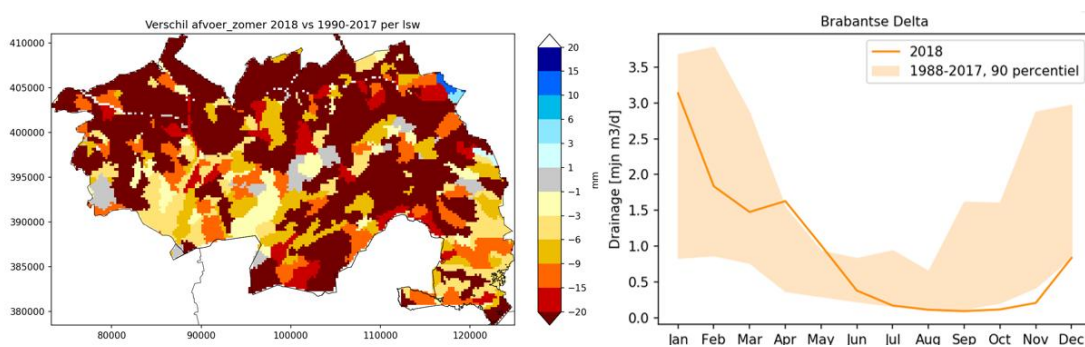
Figuur 3-12 Het verschil in grondwaterstand tussen 2018 en het 30-jarig gemiddelde voor de HG3 (links) en de LG3 (rechts). Negatief betekent een lagere grondwaterstand in 2018 t.o.v. het 30-jarig gemiddelde. HG3 en LG3 zijn vergelijkbaar met de GHG en GLG maar dan voor een specifiek jaar, in dit geval 2018.

Grondwaterafvoer

De extreem lage grondwaterstanden vertalen zich door in lage tot extreem lage grondwaterafvoeren in 2018. Vooral in de hoge zandgebieden in het studiegebied leidde dit tot lage beekafvoeren en oppervlaktewaterstanden. In deze gebieden zijn beken en andere waterlopen afhankelijk van neerslag en grondwaterafvoer, want er is nauwelijks wateraanvoer vanuit de grote rivieren en kanalen mogelijk. In de lagere poldergebieden zijn er wel mogelijkheden voor wateraanvoer vanuit de grote rivieren.

Door de lage grondwaterafvoeren vielen een aantal beken in de zandgebieden droog. Figuur 3-13 laat voor het waterschap Brabantse Delta zien dat in het jaar 2018 de berekende grondwaterafvoer in juli onder het 90-percentiel van het langjarig gemiddeld duikt. Voor 2018 blijft de grondwaterafvoer in ieder geval tot en met het einde van het jaar laag en vindt de laagste afvoer zelfs pas in oktober plaats. In november is het verschil tussen 2018 en het 30-jarig gemiddelde het grootst. Het grondwatersysteem is zo ver uitgezakt dat het afvoerproces in 2018 pas weer in december enigszins op gang komt.

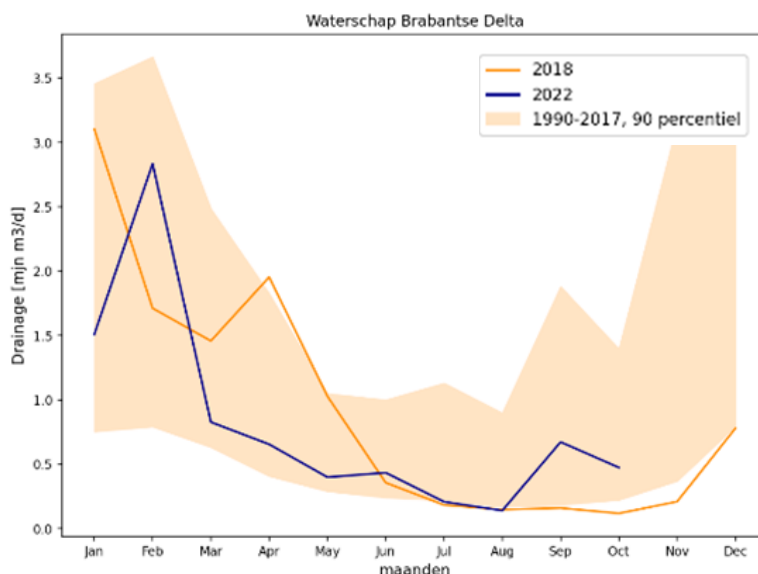
Figuur 3-13 (links) toont ook het verschil in zomerafvoer (juni, juli, augustus) tussen 2018 en het 30-jarig gemiddelde. Hier zijn duidelijk ruimtelijke verschillen zichtbaar. Ongeveer de helft van het Brabantse Delta beheergebied had meer dan 20 mm lagere afvoer, maar er zijn ook substroomgebieden (LSW's) waar het verschil enkele millimeters was. Dit zijn veelal kleine stroomgebieden die in het 30-jarig gemiddelde al hele lage afvoeren vertoonden (< 10 mm in 3 maanden) waarvan sommige in 2018 zelfs tijdelijk droogvielen.



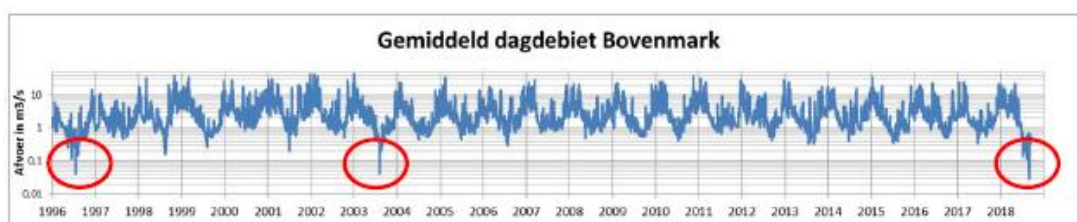
Figuur 3-13 Het verschil in berekende grondwaterafvoer (mm) voor de zomermaanden juni, juli en augustus voor het jaar 2018 t.o.v. het 30-jarig gemiddelde per sub-stroomgebieden, zogenaamde LSW's (links) en de berekende totale grondwaterafvoer voor het gehele waterschap Brabantse Delta per maand weergegeven voor de extreem droge jaren 2018 en 2022 en het 90%-betrouwbaarheidsinterval van het langjarig gemiddelde (rechts).

Figuur 3-15 toont de grondwaterafvoeren in de Bovenmark bij de Blauwe Kamer (Markdal) tussen 1996-2018. Het is duidelijk te zien dat de afvoer

in 2018, vooral in juli-november, uitzonderlijk laag was (ongeveer minimaal 0.2 m³/s met een onderschrijdingskans <5%) (Van Eertwegh et al., 2019).



Figuur 3-14 De berekende grondwaterafvoer voor het waterschap Brabantse Delta per maand (in Mm³/dag) weergegeven voor de extreem droge jaren 2018 en 2022 en het 90% betrouwbaarheidsinterval (5-95 percentiel) van het langjarig gemiddelde (Van Eertwegh et al., 2019).



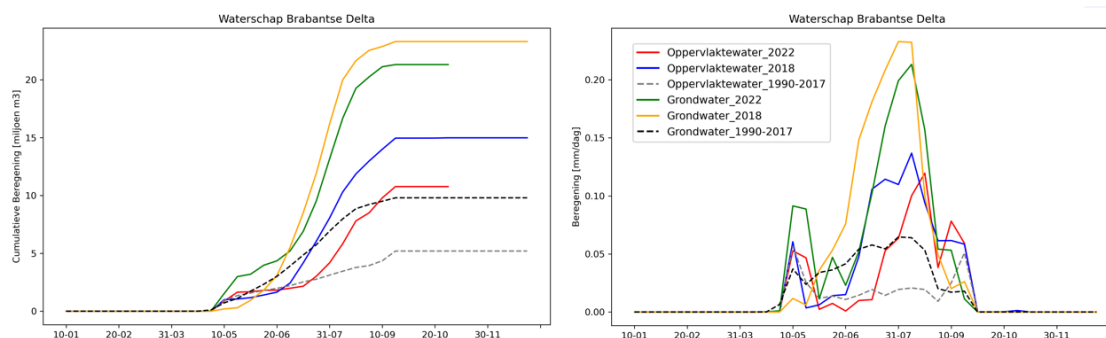
Figuur 3-15 Afvoer Bovenmark bij de Blauwe Kamer tussen 1996-2018 (Van Eertwegh et al., 2019).

Berekening

Tijdens droge perioden vindt er relatief veel berekening plaats om droogteschade aan landbouwgewassen tegen te gaan. Het water voor berekening komt deels uit het oppervlaktewater en deels uit grondwater. Volgens de modelberekeningen is in het beheergebied van Brabantse Delta in 2018 ongeveer 30% meer uit grondwater dan oppervlaktewater onttrokken, ongeveer 24 miljoen m³ in totaal (Figuur 3-16). De LHM-berekeningen tonen aan dat in 2018 ongeveer vier maal zoveel grondwater is onttrokken voor berekening als in een gemiddeld jaar en dat in juni pas echt werd begonnen met beregenen door het relatief natte voorjaar. Juli was de maand met veruit de meeste berekening door de combinatie van het uitblijven van neerslag en het feit dat dit de maand is waarin de meest gewassen het sterkst groeien.

Er dient te worden opgemerkt dat het LHM berekeningsbehoefte zelf berekent maar alleen voor de percelen die staan aangemerkt als potentiële beregende percelen (o.b.v. een kartering uit 2010). Inmiddels is duidelijk dat er veel meer percelen worden berekend maar wel met

kleinere hoeveelheden dan in LHN aangenomen (het totaal blijkt wel ongeveer te kloppen). Dit wordt momenteel in het LHM verbeterd.



Figuur 3-16 De berekende cumulatieve hoeveelheid beregening (links) en de beregening per decade (rechtst) uit het grondwater en oppervlaktewater voor 2018, 2022 en het 30-jarig gemiddelde voor waterschap Brabantse Delta.

Conclusies

De berekeningen laten zien dat de meteorologische droogte van 2018 een sterk effect heeft gehad op het bodemvocht, grondwater en grondwaterafvoer. In 2018 treden 'pas' vanaf mei lage bodemvochtgehalten en grondwaterstanden op en deze zijn laag tot extreem laag vanaf juli tot na oktober in 2018 vergeleken met het langjarig gemiddelde (30 jaar). In 2018 hadden de grondwaterstanden pas half oktober het laagste punt bereikt, veel later dan normaal. In 2018 werden grondwaterstanden bereikt die maar eens in de 40 tot 50 jaar voorkomen.

Als gevolg van de lage grondwaterstanden nam de grondwaterafvoer flink af en dit leidde in de zomermaanden tot droogval van beken waar geen aanvoer van water uit de rivieren en kanalen mogelijk was. In 2018 was de grondwaterafvoer 'pas' vanaf juni laag. Het jaar 2018 was namelijk tot mei natter dan normaal en begon pas in juni droog te worden door het uitblijven van neerslag. De grondwaterafvoer bleef in het grootste deel van het studiegebied laag tot het einde van het jaar. Pas in december vond weer enige stijging plaats.

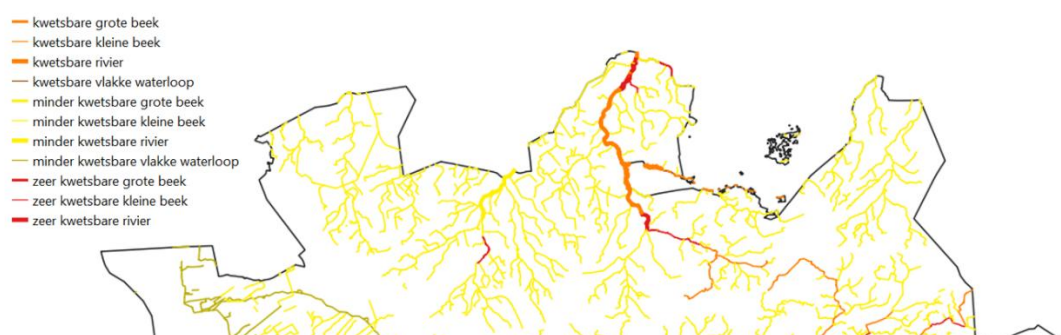
Een ander gevolg van de lage grondwaterstanden en grondwaterafvoer is een sterke toename van de beregening uit grondwater om landbouwschade te voorkomen. Volgens de berekeningen werd 2,5 keer zoveel grondwater onttrokken als in een gemiddeld jaar.

3.2.4 Ecologische kwetsbaarheid van waterlopen

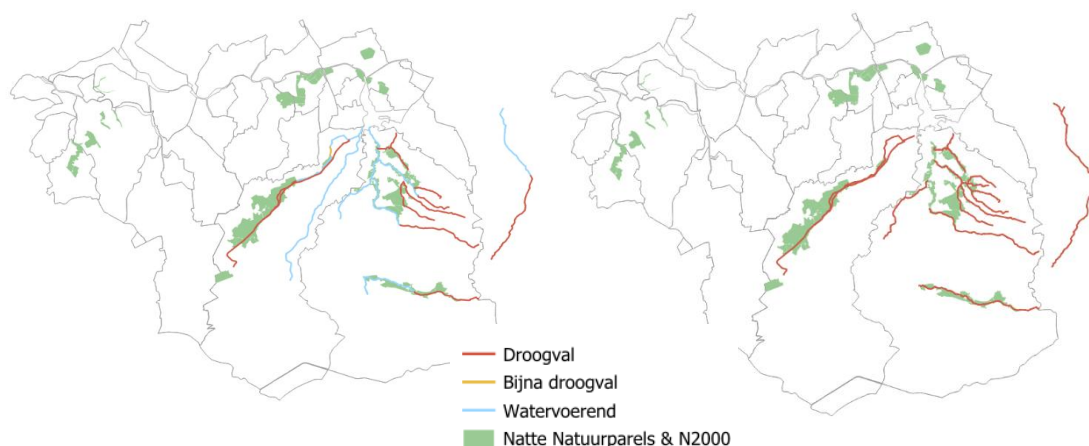
Een waterbeschikbaarheidsanalyse die KU Leuven en partners uitvoerden in het kader van de opmaak van het reactief afwegingskader voor waterschaarste (VRAG, 2021), geeft aan dat het stroomgebied van de Mark kwetsbaar is voor droogte met (dreigende) vissterfte tot gevolg.

Figuur 3-17 laat de ecologische kwetsbaarheid van de Vlaamse waterlopen zien en Figuur 3-18 geeft voor de Nederlandse beken aan of ze zijn drooggevallen in 2018 en 2022 op basis van visuele inspectie. De combinatie van de figuren maakt duidelijk dat de kwetsbaarheid van de Vlaamse Mark zich ook vertaalt in de kwetsbaarheid van de beken en natuurgebieden benedenstrooms.

In Figuur 3-18 blijkt ook een deel van de Bovenmark droog te zijn gevallen in 2022, wat niet gebeurde in 2018. Dit zou het resultaat kunnen zijn van meerdere achtereenvolgende extreem droge jaren. De waterlopen naar en door de Strijbeekse Heide en de Pannenhoef (zie locaties van de natuurgebieden in Figuur 2-10) zijn kwetsbaar en vallen regelmatig droog.



Figuur 3-17 Ecologische kwetsbaarheid van de waterlopen in het noorden van de Provincie Antwerpen.



Figuur 3-18 Indicatie van droogvallende beken in 2018 (links) en 2022 (rechts) in het Markstroomgebied op basis van visuele inspectie door Brabantse Delta. De groene gebieden geven de natuurgebieden weer.

4 Verkende en/of uitgevoerde maatregelen

In voorgaande hoofdstukken lag de nadruk op het functioneren van het watersysteem. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de maatregelen die eerder al zijn verkend (en deels gerealiseerd) om het risico op overstromingen en droogte te beperken.

4.1 Beperken van overstromingsrisico's

4.1.1 Typen maatregelen

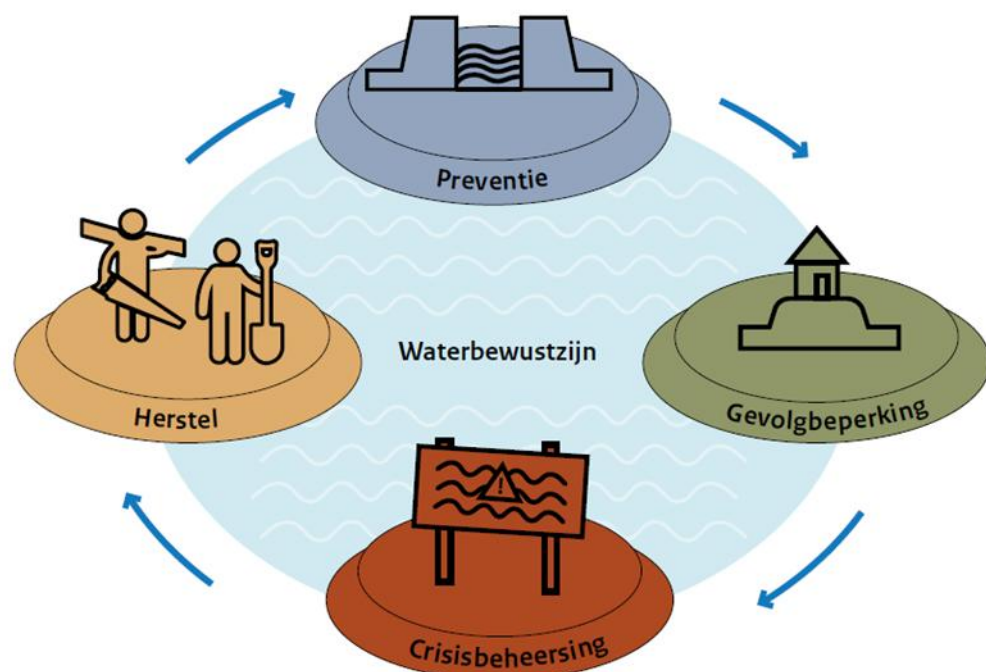
De maatregelen in het watersysteem zijn bedoeld om het overstromingsgevaar te verkleinen. Dat wil zeggen dat ze de kans op een overstroming verkleinen of ervoor zorgen dat de omvang van de overstroming minder wordt, bijvoorbeeld door te zorgen dat de waterdieptes, stroomsnelheden en/of het overstroomd oppervlak kleiner worden. In zowel Nederland als Vlaanderen worden deze maatregelen geordend volgens het principe "vasthouden-bergen-afvoeren":

- Vasthouden: hieronder vallen alle maatregelen die er voor zorgen dat minder neerslag tot afstroming komt. Dit kan onder meer worden gerealiseerd door een combinatie van ander landgebruik (bijvoorbeeld grasland of bos in plaats van akkerland) of door te zorgen dat meer regenwater in stedelijk gebied kan infiltreren (wadi's, regenopvangsystemen).
- Bergen: met deze maatregel wordt getracht om meer water in het beekdal vast te houden, bijvoorbeeld door de overstromingsvlakten te verruwen (de ruwere vegetatie zorgt voor langzamere doorstroom, daardoor hogere waterstanden en daarmee ook voor meer berging van water in het beekdal) of door de aanleg van bergingsgebieden. Dit kan zowel hogerop in het stroomgebied, als in de lager gelegen overstromingsvlaktes. Ook het herstellen van oude Vennen en moerasachtige gebieden in het bovenstroomse gebied kan zorgen voor extra bergingscapaciteit. In Vlaanderen worden bergingsgebieden aangeduid als GOG (Gecontroleerd Overstromingsgebied).
- Afvoeren: deze maatregelen vergroten de afvoercapaciteit van de beek, zodat het water makkelijker weg kan stromen en de waterstanden bovenstrooms lager zullen worden. Dit kan onder meer door de beken meer ruimte te geven of door duikers en bruggen te vergroten.

Al deze maatregelen zijn gericht op het verkleinen van het overstromingsgevaar. In de meerlaagsveiligheidsbenadering behoren ze tot de categorie 'preventie'. Er zijn echter ook maatregelen mogelijk die gericht zijn op het beperken van de gevolgen of het bespoedigen van het herstel (zie Figuur 4-). Te denken valt in dit geval aan:

- Gevolgbeperking door ruimtelijke adaptatie door het slim inrichten van de openbare ruimte. Men kan bijvoorbeeld besluiten om niet te bouwen in gebieden die vaak en/of diep onder water kunnen komen te staan. Men kan ook besluiten om aangepast te bouwen. Dit zijn structurele maatregelen.
- Crisismanagement: maatregelen om de gevolgen tijdens een ramp te beperken door het treffen van noodmaatregelen. Denk hierbij niet alleen aan het plaatsen van zandzakken e.d., maar ook aan waarschuwing en evacuatie.
- Herstel: hieronder vallen alle maatregelen die er voor zorgen dat nadelige gevolgen snel kunnen worden hersteld. Denk aan noodfondsen en verzekeringen. Wanneer sprake is van 'klimaatrobuust' herstel wordt internationaal ook vaak gesproken over '*building back better*'.
- Vergroten van het water- of risicobewustzijn heeft een centrale plek gekregen in de Nederlandse 'meerlaagsveiligheidsbenadering'. Dit type maatregelen is er op gericht om de zelfredzaamheid van burgers te vergroten. Dit kan onder meer door burgers goed te informeren.

Meerlaagsveiligheid



Figuur 4-. Meerlaagsveiligheidsbenadering zoals voorgesteld door de Beleidstafel wateroverlast en hoogwater (2022)

4.1.2 Uitgevoerde maatregelen

De beekdalen fungeren tijdens hogere afvoeren als natuurlijke buffers, waardoor het water minder snel wordt afgevoerd naar benedenstrooms gelegen (stedelijke) gebieden en de MDV-boezem. In de afgelopen jaren zijn er meerdere projecten uitgevoerd om deze bufferfunctie (berging) te vergroten, en de afvoer te vertragen (topvervlakking). Ook ligt er in het gebied een sterke focus op hermeandering. In de vorige eeuw zijn zowel in Vlaanderen als in Nederland veel waterlopen gekanaliseerd, een maatregel die vooral gericht is op snel afvoeren. Hermeandering kan meerdere positieve effecten hebben, o.a.:

- Topvervlakking van hoogwaterpieken
- Verhoging waterstand en daardoor verhoging grondwaterstand
- Ruimte voor natuur en toename in biodiversiteit

Hermeandering wordt dan ook regelmatig geïmplementeerd in beken in zowel Vlaanderen als Nederland, maar meestal op kleine schaal.

In de afgelopen decennia zijn er meerdere studies uitgevoerd naar het watersysteem en maatregelen. Enkele hiervan zijn:

Optimalisatie Hoogwaterbescherming Breda (OHB) – Studie van Waterschap Brabantse Delta uitgevoerd door HKV Lijn in Water (2013) waarin het Nederlandse deel van de beken die uitkomen op de singel van Breda uitgebreid gemodelleerd zijn en de effecten van maatregelen boven- en benedenstrooms van Breda doorgerekend zijn.

Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) toetsing – Naar aanleiding van het Nederlandse Nationaal Bestuursakkoord Water zijn er toetsingen van het watersysteem uitgevoerd. In het beheergebied van Waterschap Brabantse Delta is dit uitgevoerd door Witteveen+Bos (2014).

Integrale Gebiedsanalyse (IGA) – Studies voorafgaand aan de NBW-toetsing uitgevoerd door Tauw (2007).

Hieronder volgt een opsomming van geplande, uitgevoerde en in uitvoering zijnde maatregelen per (deel-)stroomgebied.

Kleine Aa/Molenbeek

- Hermeandering i.c.m. aanleg vispassages in Vlaanderen⁹

⁹ [Kleine Aa - Provincie Antwerpen](#)

- Aanleg van “waterberging zuidrand” aan de zuidelijke rand van Roosendaal. Deze berging kan gestuurd ingezet worden d.m.v. het opzetten van stuw Zuidrand. Wanneer waterstanden ter hoogte van de stuw hoger zijn dan orde NAP+3.2m, kan de stuw opgezet worden. Als gevolg van de sluiting kunnen de waterstanden de drempelwaarde van NAP+4 m overschrijden en kan het water het bergingsgebied instromen.

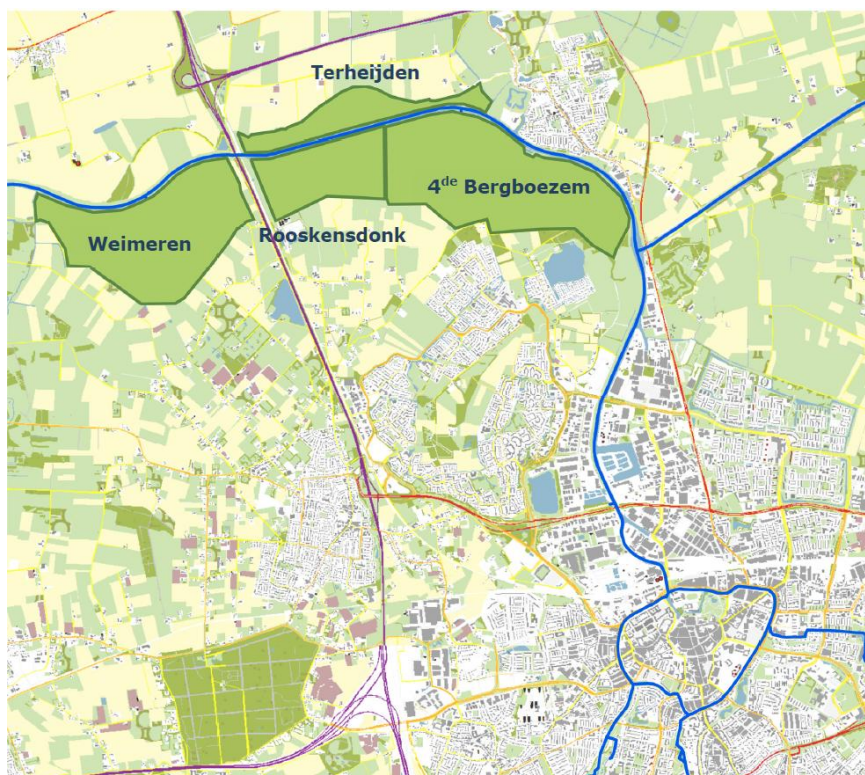
Mark en Aa of Weerij

- In Vlaanderen, in het gebied rond Rijkevorsel-Wortel, vindt ruilverkaveling plaats. Een doel hierbij is om meer ruimte te creëren voor berging in de waterlopen en infiltratie in natuurlijke depressies (vasthouden en berging).
- In het Nederlandse deel van de Mark, net ten noorden van de landsgrens, is een hermeanderingsproject in uitvoering. De oude gekanaliseerde watergang blijft hierbij aanwezig als hoogwatergeul (berging en afvoeren).
- Ter hoogte van de Trambrug in Breda wordt in de aankomende jaren een tweede watergang gegraven met hieromheen mogelijkheden voor recreatie. Tijdens hoogwater kan hier extra water afgevoerd worden.
- In de Chaamse beken is 10 kilometer aan ecologische verbindingszone aangelegd. Uit de NBW-studie blijkt dat deze maatregel een grote positieve invloed heeft gehad op het verminderen van wateroverlast en kostenefficiënt (investeringskosten t.o.v. voorkomen schade over 35 jaar) is gebleken. Het oppervlak waar de kans op inundatie groter is dan de norm, is door deze ingrepen met meer dan de helft (van 32 naar 13 hectare) afgenomen.

MDV Boezem

- Benedenstrooms van Breda zijn vier bergboezems aangelegd ten behoeve van de bescherming van Breda tijdens hoge afvoeren (Figuur 4-1). Eén bergboezem (de 4^e Bergboezem) wordt gestuurd ingezet, de andere drie overstroom via een vaste overloopkade. De afvoer van de MDV-boezem is sterk afhankelijk van het peil op het VZM. Het verval tussen Breda en het VZM bedraagt onder gemiddelde omstandigheden ca. 0,1 m. Dit verval loopt tijdens (maatgevende) hoogwater-omstandigheden op naar ca. 1,5 m (bij een max. peil op het VZM van 0,5 mNAP). Verhoogde peilen op het VZM stremmen de afvoer van de MDV-boezem in belangrijke mate. Door de inzet van de bergboezems kan de MDV Boezem tijdelijk meer water uit het

bovenstroomse deel afvoeren waardoor waterstanden in de stadsmark lager worden.



Figuur 4-1. Bergboezems met rechtsonder de stad Breda. (OHB, 2013).

Tabel 1. Capaciteit van de bergboezems ten noorden van Breda (OHB, 2013).

	Laagste punt inundatiekade	Bergingsvolume
Terheijden	NAP+0,85 m	1,0 miljoen m ³
Weimeren	NAP+1,13 m	3,2 miljoen m ³
Rooskensdonk	NAP+1,20 m	1,2 miljoen m ³
4 ^{de} bergboezem	Gestuurd, inlaatwerk	3,1 miljoen m ³

4.1.3 Overige onderzochte maar nog niet geplande maatregelen

Kleine Aa/ Molenbeek

- Het verlagen van de inlaat van de waterberging Zuidrand (zuidrand van Breda) zorgt dat ook minder extreme afvoerpieken gereduceerd kunnen worden. De gebruiksfrequentie zal hierdoor toenemen, met als bijkomend nadeel dat het bergingsvolume al (deels) opgebruikt kan zijn voordat de piekafvoer optreedt.
- Baggeren van enkele aangezande watergangen (met name traject Kletterwater bij Roosendaal), om de afvoercapaciteit te vergroten en daarmee de overstromingskans te verkleinen.

Mark en Aa of Weerij

- In de NBW-rapportage cluster Bovenmark zijn de effecten van beekherstel in de Bovenmark op waterstanden bij Breda gekwantificeerd. Hierin wordt geconcludeerd dat bij gebeurtenissen met een grote herhalingsdij (T100) de omvang het overstroomd gebied bovenstrooms toeneemt, maar dat dat niet resulteert in een daling van waterstanden benedenstrooms. Ook uit het OHB onderzoek blijkt dat er een stapeling van maatregelen bovenstrooms van Breda nodig is om waterstanden in Breda zelf te verlagen.
- Achterloopsheid bij de stuwen Bieberg, Blauwe Kamer en Galde zou voorkomen kunnen worden door de aanleg van kades in het verlengde van deze stuwen. Dit zou kunnen zorgen voor meer berging en meer controle over de afwatering. Ook zorgt het vertragen van de afvoer in de Mark voor een groter faseverschil tussen de Mark en Aa of Weerij, omdat de afvoerpiek van de Aa of Weerij normaliter sneller Breda bereikt dan de afvoergolf uit de Mark. Uit de OHB-studie blijkt dat dit de piekafvoer van de Mark met 4,5-10,5 % verminderd kan worden bij een T100 afvoer (Figuur 4-2).

	Waterstandverandering (m)			Reductie van de piekafvoer
	Bieberg	Blauwe Kamer	Galder	
Faseverschil vergroten	0,12	0,43	0,21	4,5%
Berging vergroten	0,18	0,74	0,53	6,5%
Berging vergroten + sturing	0,18	0,78	0,58	10,5%

Figuur 4-2. Effecten van maatregelen door maatregelen op de Bovenmark op waterstanden bij de stuwen in de Mark en piekafvoer bij de Trambrug in Breda.

- Voor het bevorderen van een meer natuurvriendelijke inrichting van de beek wordt echter ook gekeken naar het verwijderen van (één van) de stuwen. Deze belangen botsen dus.

- Het gestuurd in kunnen zetten van de overige bergboezems ten noorden van Breda zou een groot effect hebben op waterstanden in de noordelijke Singels. Hierbij zou een combinatie met het verbinden van bergboezems Weimeren en Rooskensdonk (d.m.v. een duiker) een extra positief effect hebben.
- In het OHB-rapport wordt geconcludeerd dat de maatregelen benedenstrooms van Breda (i.e. berging) effect hebben op waterstanden in de Noordsingels en MDV-boezem, terwijl maatregelen bovenstrooms (i.e. water beter vasthouden, ruimte voor water in de beekdalen) effect kunnen hebben over het gehele gebied benedenstrooms van die maatregel.

4.2 Beperken van droogterisico's

4.2.1 Typen maatregelen

Om nadelige effecten van droogte in Nederland te reduceren wordt gebruik gemaakt van drie typen maatregelen.

- Vasthouden: dit zijn maatregelen die ervoor zorgen dat water minder snel wordt afgevoerd. Hieronder vallen dus maatregelen die het ontwateringssysteem aanpassen door bijvoorbeeld de ontwatering te verondiepen, peilverhoging in te voeren, sloten te dempen of buisdrainage te verwijderen.
- Meer erin: meer water kan de bodem ingebracht worden middels infiltratie- of MAR systemen. Daarnaast kan het verbeteren van de bodemstructuur, het aanpassen van het landgebruik naar gewassen die minder verdampen de grondwateraanvulling verhogen en afkoppelen van het bebouwd gebied. Het effect van bodemstructuur-verbetering op de infiltratiecapaciteit lijkt echter gering.
- Minder eruit: hieronder valt het verminderen van onttrekkingen voor industrie, drinkwater en beregening. Beregening vindt plaats in droge periode met ondiep grondwater, terwijl de industrie en drinkwateronttrekkingen op grotere diepte het hele jaar door plaatsvinden en een structureel verlagend effect op grondwaterstanden en kwel hebben.

Bovenstaande maatregelen zijn allemaal gericht op het verhogen van grondwaterstanden en vergroten van de sponswerking. Dit betekent dat het landschap het vermogen heeft te functioneren als een spons die zich vol laat lopen in tijden van veel water, dit water vasthoudt en kan leveren in tijden van droogte wanneer dit water nodig is. De focus ligt op het vasthouden en bergen van neerslag tijdens het natte seizoen, waardoor de beschikbare hoeveelheid (grond)water groter is tijdens het droge seizoen

ten opzichte van een landschap dat dit water niet vasthoudt. Idealiter draagt de sponswerking op deze manier bij aan zowel het beperken van de kans op overstromingen (inclusief wateroverlast) als het beperken van de kans op (extreme) droogte (bron: Deltares, 2024a). Maar deze win-win-situatie blijkt in veel gevallen niet te werken. Hierop wordt verder ingegaan in paragraaf 4.3.

4.2.2 Uitgevoerde maatregelen

Eind 2021 hebben dertien Noord-Brabantse partijen (zoals waterschappen, milieuorganisaties en drinkwaterbedrijven) een Grondwaterconvenant gesloten. In dit convenant staan vijf doelen (bouwstenen) waaraan de partijen samen willen werken. Hieronder vallen specifiek de typen maatregelen die genoemd zijn onder paragraaf 4.2.1. Per doel staat beschreven welke concrete acties de partijen voor 2027 zullen nemen. Een concrete uitwerking van het eerste doel in het Grondwaterconvenant is om in 2027 de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstanden in maart/april (GVG) 10 cm (in lagere nattere gebieden zoals de beekdalen) tot 35 cm (in hogere infiltratiegebieden) verhoogd te hebben ten opzichte van 2002 (Deltares en KnowH2O, 2023).

Daarnaast heeft een onafhankelijke adviescommissie in 2022 een advies uitgebracht voor het realiseren van een droogte-robuust (grond)watersysteem en voor een watergebruik-strategie in 2040 in Noord-Brabant, genaamd "Zonder water, geen later" (Geesteranus et al., 2022). Daarin worden twaalf adviezen gegeven, waaronder het verminderen van onttrekkingen tot 100 miljoen m³/jaar, het extra infiltreren van 100-150 miljoen m³/jaar, en het toepassen van onttrekkingsbeperkende buffers rondom natuurgebieden. Daarbovenop geeft de landelijke beleidsbrief 'Water en Bodem sturend' grondwater uit 2022 een centrale plek in de uitgangspunten en structurerende keuzes.

In de Brabantse natuurgebieden wordt al gewerkt aan herstel van natuurlijke beekdalen. Zo lopen in het Merkske veldproeven om water langer vast te houden middels het leggen van takkenbossen in de beek, aanpassingen aan het maaibeheer en het ophogen van de beekbodem. Op die manier wordt gestreefd naar een natuurlijke dynamiek van het peilregime en een verhoogde basisafvoer. Veel maatregelen in het Merkske en de Chaamse Beken zijn genomen met het oog op de Kaderrichtlijn Water (KRW) en hebben als doel de stroming en watervoerendheid van de beken te verhogen.

Omdat de Mark in het verleden sterk rechtgetrokken is, is er minder waterberging in de bedding en snellere waterafvoer naar Nederland. Ook heeft dit geleid tot een lagere beekstructuur en ecologisch slechtere

situatie. Er is nood aan een combinatie van effectgerichte (aanleg van overstromingszones, meanders) en brongerichte (verhoogde infiltratie en water vasthouden in de bodem) inspanningen om de piekafvoeren te reduceren. De VMM werkt al vele jaren aan een verbeterende situatie door een gedeeltelijk herstel door het inschakelen van bestaande meanders, het uitgraven van een aantal gedempte meanders en andere structuurmaatregelen in de bestaande bedding zoals het plaatsen van keerkribben. In het Hollands Diep is een pomp geplaatst zodat in droge tijden extra water naar de Mark aangevoerd kan worden. Dit heeft alleen effect op bollengebieden.

4.3 Droogtemaatregelen versus wateroverlastmaatregelen

Een klimaatrobuust watersysteem is een zo natuurlijk mogelijk watersysteem dat zowel kan omgaan met extreem natte als extreem droge situaties. Het liefst nemen we maatregelen die voor beide situaties, droogte en wateroverlast, gunstig doorwerken.

In de huidige situatie wordt het neerslagoverschot snel afgevoerd door het intensieve ontwateringstelsel aan waterlopen, sloten en drainagebuizen met lage ontwateringspeilen. Dit bemoeilijkt de aanvulling van het bodem- en grondwater. Droogtemaatregelen zijn erop gericht om de sponswerking te herstellen en het overschot van water in de winterperiode langer vast te houden voor benutting gedurende droge tijden. Voor het vrij-afwaterende zandgebied zal dit resulteren in hogere grondwaterstanden.

Daar zit echter meteen het grote dilemma en tegelijkertijd één van de belangrijkste uitdagingen richting een klimaatrobuust watersysteem: droogtemaatregelen om water langer vasthouden zorgen voor een 'vollere spons' waardoor er bij extreme neerslaggebeurtenissen niet veel water meer bij kan en de kans op wateroverlast en piekafvoeren juist sterk toeneemt.

Berekeningen met een offline gekoppeld grondwater -en overstromings-model voor het Chaamse beken stroomgebied (ten zuiden van Breda in het Mark stroomgebied) (Deltares, 2024b) laten als gevolg van droogtemaatregelen een flinke toename van overstromingen zien bij buien die eens per 2 jaar (60% hogere piekafvoer), per 10 jaar of 100 jaar (33% hogere piekafvoer) voorkomen. Grondwaterstanden stijgen boven maaiveld waardoor het regenwater versneld richting de sloten en beken stroomt. Bij minder extreme buien biedt de ondergrond vaak wel

voldoende ruimte om de volledige hoeveelheid neerslag te bergen waardoor de afvoer juist vertraagd wordt en de kans op wateroverlast benedenstrooms minder wordt.

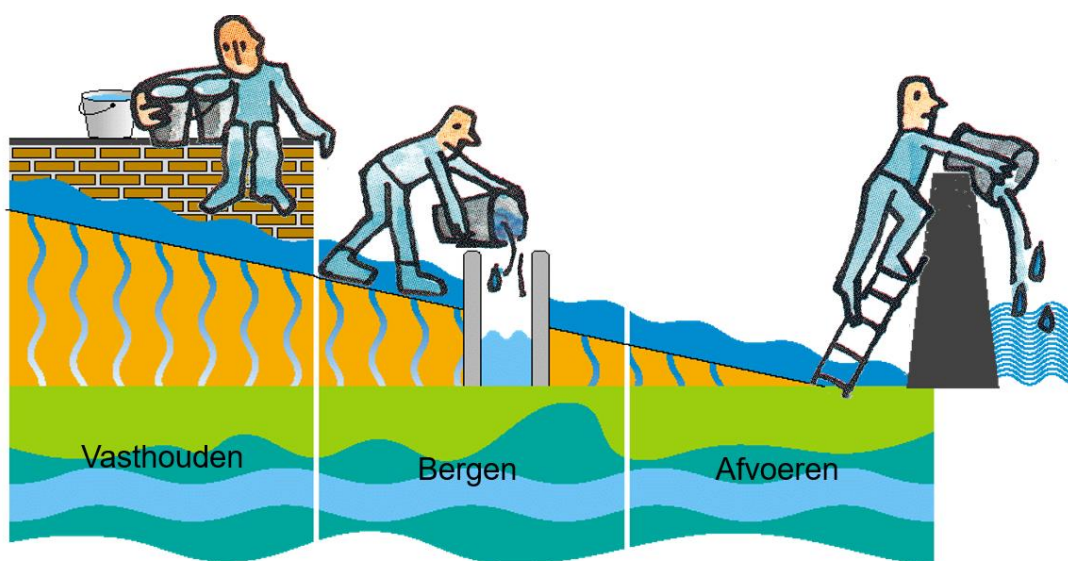
Het is zoeken naar maatregelen die beide kanten opwerken; hoge grondwaterstanden en langer water vasthouden versus het voorkómen van wateroverlast en overstromingen. Maar waarschijnlijk zijn er geen maatregelen voorhanden die op landschapsschaal beide kanten effectief zijn. Er dient daarom te worden gedacht aan combinaties van droogte- en overstromingsmaatregelen.

Gezien de visie en voornemens van rijk, provincies en waterschappen om structureel hogere grondwaterstanden te realiseren om verdroging van de natuur te bestrijden, beken watervoerend te houden, en meer water beschikbaar te hebben voor landbouw en drinkwater tijdens droge zomers, is het logisch om als eerste stap het watersysteem daarop in te richten. Te lage grondwaterstanden treden niet alleen op tijdens extreme droge jaren; grondwaterstanden zijn structureel te laag. Aanpassingen in het gehele stroomgebied zijn nodig om structureel de grondwaterstand 20 tot 50 cm te verhogen.

Zoals hierboven al aangeven, zal dit leiden tot grotere kans op wateroverlast en overstromingen tijdens extreme neerslaggebeurtenissen. Daarom is de uitdaging om met de nieuw ontworpen situatie met hogere grondwaterstanden, te bepalen waar welke maatregelen nodig en zinvol zijn om de kans op wateroverlast en overstroming in risicogebieden te verkleinen.

Deze volgorde is eerder ook al naar voren gebracht door het onderzoeksprogramma Waterbeheer 21^{ste} eeuw met de trits 'vasthouden – bergen – afvoeren' (zie Figuur 6-3). Dat betekent: eerst zoveel mogelijk het neerslagoverschot vasthouden in de bodem ofwel de spons vullen en grondwaterstanden verhogen, dan het water bergen in het oppervlaktewater of op maaiveld en dan pas afvoeren. Vasthouden is iets wat continu en overal in het gebied moet plaatsvinden. Bij voorkeur wordt het winterwater zo hoog mogelijk in het stroomgebied en zolang mogelijk gedurende het groeiseizoen vastgehouden. Het bergen van water is met name van toepassing tijdens flinke en juist extreme natte perioden wanneer het oppervlaktewatersysteem vol begint te raken. Voor deze situaties dient er extra bergingsruimte te worden gealloceerd langs de grotere waterlopen en in beekdalen waar het overtollig water vrij kan overstromen zonder nadelige gevolgen voor natuur, landbouw en bebouwing. Heel effectief kan het tijdelijk bergen op maaiveld zijn waar

veel meer ruimte beschikbaar is. Vroeger vervulden lokale laagtes in het landschap en vennetjes de natuurlijke functie om het water langer op het maaiveld vast te houden maar door egalisatie en drooglegging zijn deze grotendeels verdwenen (90% van alle vennen zijn de laatste 100 jaar verdwenen). Herstel van deze lokale laagtes en vennetjes of juist actief bergen van water op maaiveld kan benedenstrooms overstromingen voorkomen. Daarnaast zal na de natte periode het water langzaam de grond in trekken waardoor het ook nog eens het grondwater aanvult. Wellicht is dit de combinatie van maatregelen waarmee zowel watertekorten als wateroverlast gereduceerd wordt.



Figuur 4-3. De trits 'vasthouden – bergen – afvoeren' uit onderzoeksprogramma Waterbeheer 21^{ste} eeuw.

5 Indicatoren

Om te bepalen wanneer het te droog of te nat is, worden hydrologische indicatoren gebruikt. Een deel van deze indicatoren zijn algemeen bekend in het internationale werkveld van waterbeheer. Andere indicatoren zijn specifiek afgestemd om te bepalen of men voldoet aan de wet- en regelgeving in een land of regio. Met name op het gebied van hoge afvoeren en de vertaling naar waterveiligheid is er een grote verscheidenheid van indicatoren die gericht zijn op het al dan niet voldoen aan wet en regelgeving. Op het gebied van droogte zijn er diverse hydrologische indicatoren, maar de meeste daarvan worden niet gekoppeld aan normen. Naar aanleiding van de droge jaren in het afgelopen decennium (2018, 2022) vindt op dit gebied veel ontwikkeling plaatsvindt.

Hydrologische indicatoren kunnen dus gebruikt worden om de ernst van een droogte of hoge afvoer te duiden, en om te bepalen of aan wet of regelgeving voldaan wordt. Daarnaast worden in het waterbeheer socio-economische indicatoren gebruikt om de impact van een droogte- of overstromingsgebeurtenis te kwantificeren. Deze impact wordt doorgaans gekwantificeerd als schade in euro's, maar kan bijvoorbeeld ook worden weergegeven als het aantal getroffen.

Voor het berekenen van een indicator worden hydrologische en/of socio-economische modellen gebruikt. Er is een grote verscheidenheid aan dit soort modellen en elk model gebruikt een andere soort invoerdata en genereert een andere soort uitvoerdata. Daardoor is niet elk model geschikt voor het berekenen van elke hydrologische en/of socio-economische indicator.

Tussen Vlaanderen en Nederland bestaan er verschillen in zowel hydrologische als socio-economische indicatoren. Bovendien worden in beide regio's verschillende modellen gehanteerd om deze indicatoren in kaart te brengen. In dit hoofdstuk worden de meest gebruikte hydrologische indicatoren besproken, met aandacht voor de verschillen tussen Vlaanderen en Nederland. Daarbij wordt ingegaan op hun geschiktheid om betrouwbare en relevante data te genereren voor de betreffende indicatoren.

5.1 Indicatoren voor wateroverlast

5.1.1 Hydrologische indicatoren

Metingen

Voor het vaststellen van indicatoren voor wateroverlast is de beschikbaarheid van meetresultaten essentieel. Metingen kunnen zelf als indicator dienen om bijvoorbeeld de relatieve natheid of droogte van een gebied aan te duiden. Hydrologische en hydrodynamische modellen worden op basis van deze metingen gekalibreerd en gevalideerd.

Belangrijke meetresultaten zijn:

- Neerslagmetingen
- Afvoermetingen
- Waterstandsmetingen

Neerslagmeetstations zijn beschikbaar in zowel Nederland (via het KNMI) als Vlaanderen (via het KMI, VMM en HIC). Zowel in Nederland als Vlaanderen zijn meerdere meetpunten aanwezig in het stroomgebied.

Waterstandsmetstations zijn ook aanwezig in het gebied. Deze worden onder andere gebruikt voor het opstellen van debiet-peilrelaties. Een debiet-peilrelatie wordt doorgaans empirisch vastgesteld op basis van gelijktijdige metingen van waterstand en afvoer. Zodra deze relatie betrouwbaar is vastgesteld, kunnen waterstandsmetingen worden gebruikt om continue het debiet te schatten d.m.v. een debiet-peilrelatie. Tijdreeksen van debieten kunnen gebruikt worden om overschrijdingskansen van bepaalde afvoeren vast te stellen. Deze zijn onder meer belangrijk bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen.

In het Vlaamse deel van het stroomgebied zijn vijf meetlocaties waar waterhoogtes gemeten worden (ter hoogte van stuwen en een watermolen in de Mark). Daarnaast zijn er in de Mark twee gebieden waar een QH relatie gebruikt wordt om afvoeren af te leiden. In Nederland zijn verspreid over het stroomgebied meerdere meetpunten waar zowel waterstand als afvoer worden gemeten.

Waterstandsmetingen kunnen een belangrijke functie hebben voor het instellen van waarschuwniveaus voor hoog- en/of laagwater. Voor het kalibreren en valideren van hydrologische en hydraulische modellen zijn metingen van debieten en waterstanden essentieel.

Modellen

Door middel van hydrologische en/of hydrodynamische modellen kunnen andere veelgebruikte indicatoren berekend worden. Hydrologische modellen kunnen bijvoorbeeld het effect van veranderingen in landgebruik op de afvoer simuleren. Hydrodynamische modellen kunnen daarnaast in kaart brengen welke gebieden overstromen en de bijbehorende waterdiepte, stroomsnelheden en duur van de inundatie berekenen (met een bijbehorende overschrijdingskans). Dit is met name in vrij afwaterende regionale watersystemen belangrijk. Ook kunnen in hydrodynamische modellen de effecten van maatregelen in het watersysteem (zoals de breedte, lengte of diepte van de waterloop) op waterstanden, overstroomd gebied en afvoerpatroon in kaart gebracht worden. In Nederland worden deze modellen dan ook gebruikt bij de normering, waarbij in kaart wordt gebracht welke gebieden overstromen bij een bepaalde overschrijdingskans. In Vlaanderen worden hydrodynamische modellen met name gebruikt om het effect van ingrepen in het watersysteem te beoordelen. Daarnaast worden deze ook gebruikt voor het bepalen van overstromingsgevoelige gebieden en de kans op overstroming in deze gebieden.

5.1.2 Socio-economische indicatoren

Er zijn veel socio-economische indicatoren die gebruikt kunnen worden om de impact van een overstroming weer te geven. Enkele veelgebruikte indicatoren zijn:

- Materiële schade – bijvoorbeeld per categorie landgebruik (bebouwd, kapitaalintensieve landbouw).
- Slachtoffers
- Getroffenen
- Schade aan infrastructuur – de indirecte schade doordat infrastructuur ontoegankelijk is door beschadiging.
- Ecologische impact.
- Sociale impact.

Hoewel de indicatoren in verschillende studies vaak hetzelfde zijn, is de manier van berekenen vaak afhankelijk van de beschikbare data. Vrijwel alle indicatoren hebben ruimtelijke (grid-formaat) beeld nodig van het overstroomd gebied met de waterdiepte. Sommige software pakketten die schade- en slachtoffer berekeningen gebruiken ook kaarten met maximale stroomsnelheden en overstromingsduur. Het hangt dus sterk van de hydrologische en hydraulische modeluitvoer af welke indicatoren met welke methodologie berekent kunnen worden.

5.1.3 Modelkeuze

In het stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek en Mark, is het verkrijgen van een ruimtelijk beeld van het overstromingsoppervlak gewenst om de volgende redenen:

- Het gebied is vrij afwaterend, waardoor de ruimtelijke verdeling van een overstroming over het gebied kan verschillen
- De normering (in Nederland) is gerelateerd aan overstroomd oppervlak, waardoor resultaten vergelijkbaar zijn.
- Het effect van maatregelen op de ruimtelijke verdeling van overstromingen kan hierdoor in kaart gebracht worden
- Overstroomd gebied is nodig voor het berekenen van socio-economische indicatoren

De huidige modellering vindt daarom ook met name met gekoppelde hydrologische en hydrodynamische 1D/2D modellen plaats. In Hoofdstuk 6 wordt verder ingegaan op de beschikbare modellen en modelkeuze.

5.2 Indicatoren voor droogte

5.2.1 Hydrologische indicatoren

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3.2 zijn er componenten in het grondwatersysteem die met verschillende reactietijd reageren op een meteorologische droogte. Van snel naar langzaam zijn dat: bodemvocht, grondwaterstanden en grondwaterafvoer. Aangezien grondwaterstanden het eenvoudigst zijn om te meten, is het monitoringsnetwerk daarvan het meest uitgebreid in tijd en ruimte. In de praktijk worden deze dan ook gebruikt om droogte te monitoren, te vergelijken met langjarige gemiddelden, en om te gebruiken voor besluiten rondom maatregelen. Andere indicatoren zijn bijvoorbeeld de kwelstroom en verdamping (transpiratie ten opzichte van potentiële verdamping). Met de grondwatermodellen – die verder worden beschreven in het volgende hoofdstuk – kunnen genoemde grondwatercomponenten zoals verdamping, bodemvocht, grondwaterstanden, kwelfluxen en langjarige gemiddeldes zoals GLG, GVG en HG3 berekend worden.

Afvoeren en waterstanden in beken en rivieren kunnen ook een indicator vormen voor de droogte in een gebied. Indicatoren die hieronder vallen zijn bijvoorbeeld:

- Droogval van beken. Wanneer beken niet of nauwelijks aanvoer krijgen vanuit grotere rivieren of kanalen, daalt de afvoer mee met de grondwaterstanden.

- Laagste jaarlijkse waterstand/debiet in een rivier, kanaal of beek.
- Duur onder een bepaalde waterstand of debiet. Dit specifieke debiet kan bijvoorbeeld het 90^e percentiel of de afvoer in een welbekend jaar met extreem droge zomer zijn.
- Basisafvoer. Dit is de afvoer die (zo goed als) onafhankelijk is van regen en gevoed wordt door berging uit grondwater of oppervlaktewateren. Deze component daalt daarom laat ten opzichte van andere indicatoren in perioden van droogte.

In Vlaamse studies worden combinaties van afvoeren en grondwaterniveaus als indicatoren toegepast. Bodemvocht wordt ook regelmatig gebruikt (meer relevant voor landbouw). Aangezien de baseflow wordt gevoed door grondwater, wordt baseflow soms ook als overkoepelende indicator voor droogte gebruikt.

5.2.2 Socio-economische indicatoren

Droogte kan grote effecten hebben op de maatschappij, met name op de landbouw, natuur en drinkwaterbeschikbaarheid. Om dit effect te kwantificeren wordt gebruik gemaakt van een aantal indicatoren en impactmodellen die hieronder verder worden toegelicht.

Landbouw

Lage grondwaterstanden en kwelstromen en hoge transpiratie zorgen voor een verminderde gewasopbrengst. In Nederland wordt het effect van droogte op de landbouw dikwijls berekend met de WaterWijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018). Op basis van de hydrologische indicatoren GxG en gemiddelde kwelflux, en het bodemtype te vergelijken met de gewenste condities van verschillende gewassen, berekent deze tool de opbrengstderving.

In Vlaanderen kan de impact van droogte op de landbouw ingeschat worden met behulp van modellen. Men combineert hierbij een grondwatermodel zoals SW-GM en een gewasmodel zoals Aquacrop.

Terrestrische natuur

De GxG en gemiddelde kwelflux zijn ook een goede indicator voor verdroging van natuur. De WaterWijzer Natuur (Witte et al., 2018) kan daarmee (en de stikstofdepositie) voor natuurgebieden in Nederland berekenen wat de kansrijkheid van vegetatietypen is. De Impact van droogte op natuur kan bepaald worden op basis van het grondwaterpeil. Het INBO introduceerde de indicator 'Droogte in grondwaterafhankelijke ecosystemen' waarbij wordt gekeken naar het aantal dagen per jaar waarin het grondwaterpeil onder een kritisch minimum komt (INBO, 2024).

Aquatische natuur

Droogte heeft impact op de habitat van aquatische ecologie door waterbeschikbaarheid en de waterkwaliteit. De waterbeschikbaarheid is belangrijk voor de connectiviteit tussen leefgebieden, maar ook de stroomsnelheid en schuilplekken. De juiste temperatuur en gehalten van zuurstof, substraat en bijvoorbeeld stikstof zijn ook cruciaal voor de leefbaarheid. Environmental flows zijn een set aan diverse hydrologische parameters die een beeld geven van het afvoerregime (bijvoorbeeld hoog water, laag water, duur en timing) en daarmee aangeven welke soorten daarin kunnen (over)leven. De REACT Toolbox kan bijvoorbeeld gebruikt worden om dit te kwantificeren. Tevens geeft droogval van beken ook al een goed eerste beeld.

Voor de waterkwaliteit wordt vaak gekeken naar normen uit de Kader Richtlijn Water (KRW). De KRW Verkenner is een instrument dat gebruikt kan worden om de ecologische en chemische kwaliteit van het oppervlaktewater te berekenen.

Vlaanderen hanteert een ecologisch minimumdebiet ter hoogte van meetpunten van de VMM. Indien dit minimumdebiet onderschreden wordt, treedt er structurele schade op aan het aquatische ecosysteem en worden onttrekkingsverboden uitgevaardigd. Ook waterpeilen voor zowel oppervlakte- als grondwater worden gebruikt als indicatoren voor de staat van een ecosysteem. Metingen van waterkwaliteit worden beheerd door verschillende instanties (VMM, Vlaamse Waterweg, ...). Een toename in concentratie van diverse stoffen in het water zoals nutriënten en zuurstof maar ook in temperatuur, wordt gebruikt als droogte indicator.

Drinkwater

Het drinkwater wordt in Vlaanderen door meerdere partijen beheerd: AGSO, Aquaduin, De Watergroep, Farys, Pidpa, en Water-link (in dit stroomgebied wordt het drinkwater beheerd door Pidpa). Elk van deze partijen voert eigen waterkwaliteitsmetingen uit op de innamelocatie van het ruwwater. Op basis van eigen limieten wordt bepaald of het ruwwater geschikt is voor behandeling tot drinkwater.

In Nederland is tijdens extreem droge jaren in principe voldoende grondwater beschikbaar voor drinkwater, maar de onttrekking ervan wordt beperkt door vergunningen. Deze vergunningen zijn er om negatieve effecten zo veel mogelijk te voorkomen. Overmatige grondwateronttrekking leidt tot structureel lagere grondwaterstanden en minder kwel met structurele verdroging van de natuur tot gevolg.

Sommige drinkwaterbedrijven lopen tijdens extreem droge zomers tegen de vergunningsruimte aan. Dan zijn overschrijdingen van de maandvergunning door piekvragen een knelpunt. Winvergunningen zijn vaak al volledig benut en er is nauwelijks operationele reserve en/of er zijn onvoldoende beschikbare vergunde bronnen om aan de piekvraag te voldoen. Deze knelpunten ontstonden tijdens piekvragen in de extreme droge zomers van 2018 en 2022. Aan de drinkwaterbehoefte is echter voldaan omdat er tijdelijk meer werd onttrokken dan volgens de maandvergunning werd toegestaan.

6 Beschikbare modellen

Omdat een stresstest zich richt op extreme weerssituaties die niet vaak (of mogelijk nog nooit) zijn voorgekomen, zijn modellen nodig om te kunnen bepalen hoe het watersysteem onder dergelijke omstandigheden functioneert. Vaak wordt de rand van een stroomgebied gebruikt als buitenrand van een hydrologisch model. Wanneer een stroomgebied in meerdere landen ligt, is de landsgrens vaak een deel van de modelrand. De modelschematisatie over de grens heen is dan zeer gelimiteerd.

6.1 Oppervlaktewatermodellen

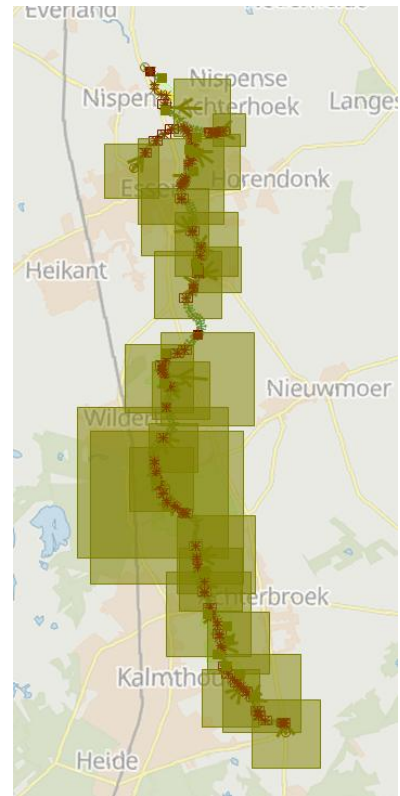
Er zijn drie verschillende softwarepakketten waar modellen in geïmplementeerd zijn in het stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek en de Mark die ook gebruikt worden door de lokale waterbeheerders:

- **Sobek 2** is een ouder softwarepakket voor hydrologische en hydraulische modellering, ontwikkeld door Deltares. Het werd in Nederland veel gebruikt voor het modelleren van waterbeweging in rivieren, polders, stedelijke gebieden en watersystemen. Inmiddels wordt Sobek 2 gefaseerd vervangen door D-HYDRO. Sobek 2 wordt niet meer verder ontwikkeld.
- **D-HYDRO Suite** is de opvolger van Sobek 2 en ondersteunt zowel 1D- als 2D-modellering. Ook is er een interne versie die zowel 1D als 2D stroming kan simuleren op flexibele rasters. D-HYDRO is open source en wordt met name in Nederland toegepast door waterschappen, Rijkswaterstaat en adviesbureaus.
- **Autodesk InfoWorks ICM** is een commercieel softwarepakket en ondersteunt zowel 1D- als 2D-modellering. Het pakket is met name sterk in stedelijke toepassingen en wordt veel gebruikt door gemeenten, ingenieursbureaus.

Hieronder worden de betreffende modellen verder toegelicht.

6.1.1 Infoworks ICM: Kleine Aa model

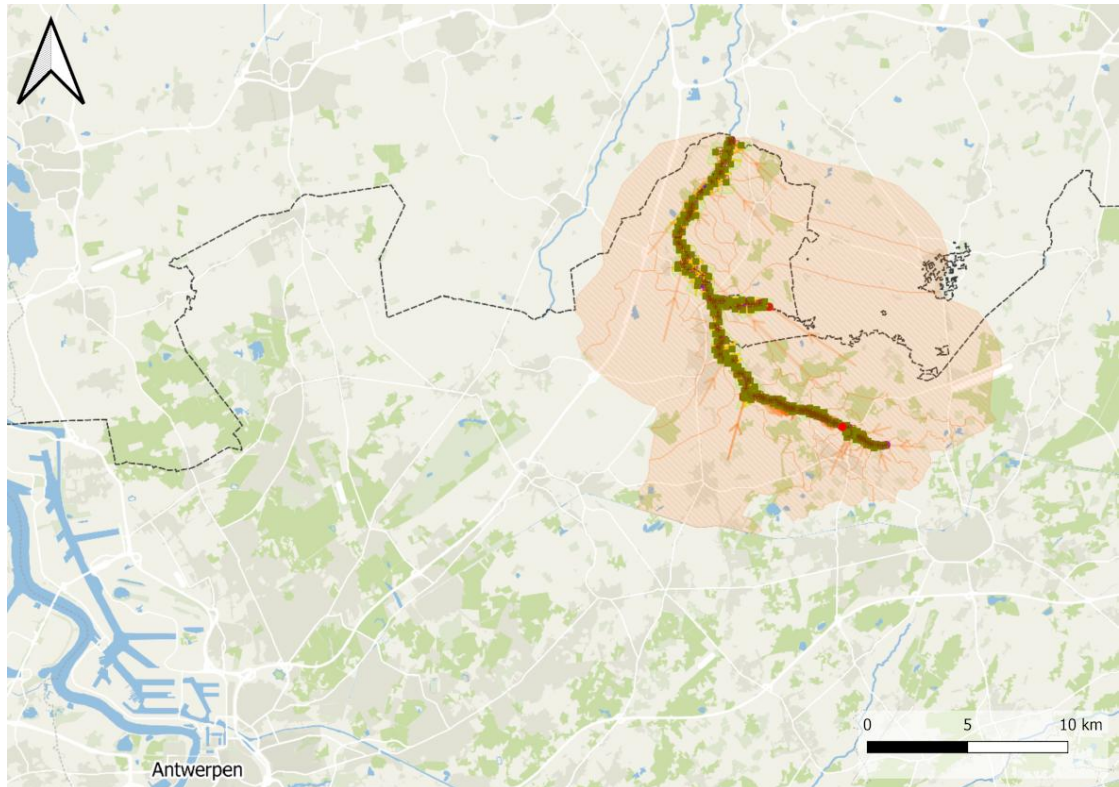
Het Kleine Aa model beslaat het Vlaamse gedeelte van de Kleine Aa (Figuur 6-1). Dit model is eigendom van de Provincie Antwerpen (Dienst Integraal Waterbeheer). Het model is gebouwd in de InfoWorks RS software en het betreft een 1D hydraulisch model. Het doel van dit model is om de effecten van aanpassingen in het watersysteem (zoals hermeandering en waterberging) door te rekenen. De InfoWorks RS software is niet meer beschikbaar voor nieuwe gebruikers, daarom is het model omgezet naar InfoWorks ICM. Deze omzetting is uitgevoerd door Autodesk t.b.v., maar hierbij is een deel van de data uit het model verloren gegaan en moet het model verder aangepast en opnieuw gekalibreerd worden. Om dit model draaiend te krijgen is dus veel tijd nodig en is aanvullende data vanuit de Provincie Antwerpen nodig.



Figuur 6-1. Het Kleine Aa model in de Autodesk InfoWorks software. De deelstroomgebieden worden weergegeven als vierkanten waarbij de grootte van het vierkant evenredig is met de grootte van het stroomgebied.

6.1.2 InfoWorks ICM: Mark model

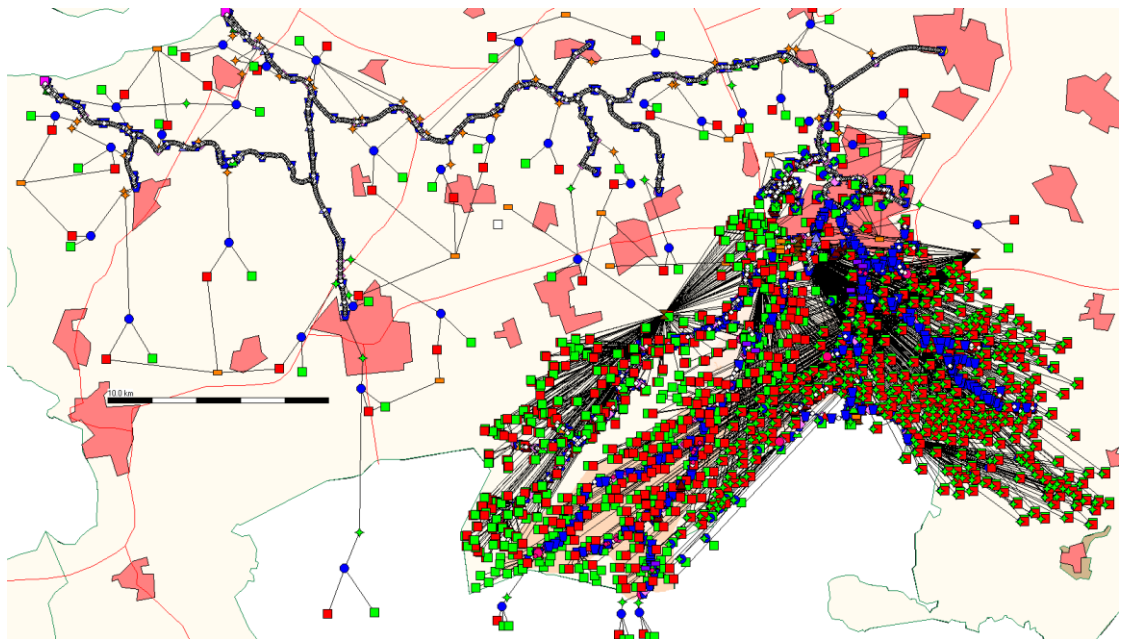
Het Mark model beslaat het Vlaamse gedeelte van de Mark en het Merkske, inclusief het Nederlands deel van het Merkske (Figuur 6-2). Dit model is eigendom van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). Het model is initieel opgebouwd in de InfoWorks RS software en door de VMM omgezet naar InfoWorks ICM. Dit model is daarna echter niet opnieuw gekalibreerd of gevalideerd (net zoals het Kleine Aa model). Dit model werd in InfoWorks RS gebruikt om maatregelen door te rekenen en afvoervoorspellingen te maken. Dit model is volledig 1D en bevat profielen van de waterlopen en overstromingsvlakten naast de beek. Het is mogelijk om dit uit te breiden naar 1D/2D met een flexibel meshgrid. Het model kan in de Infoworks ICM software ook gekoppeld worden aan een hydrologisch model, wat in dit geval PDM betreft. Het hydrologisch PDM-model moet ook nog gekalibreerd worden.



Figuur 6-2: Kaartvoorstelling van het hydrodynamische model van de Mark en het Merkske in Autodesk Infoworks ICM software. Elk deelstroomgebied is afgebakend en voedt de Mark of het Merkske als een puntbron (oranje pijl).

6.1.3 Optimalisatie Hoogwaterbescherming Breda (OHB) model

Het Optimalisatie Hoogwater Breda (OHB) model is gemaakt door HKV Lijn in Water in opdracht van Waterschap Brabantse Delta. Dit model is gebouwd in de Sobek 2 software en is een 1D/2D model. Het doel van het model is in beeld brengen hoe kwetsbaar Breda is voor wateroverlast vanuit de (Stads)Mark, en het doorrekenen van het effect van aanpassingen zoals waterberging, m.n. de inloop van de bergboezems benedenstrooms van Breda. Voor dit doel zijn de eerder genoemde IGA-modellen gesimplificeerd en gekoppeld. De sturing van de 4^e bergboezem is nog niet ingebouwd in dit model. Het OHB-model omvat het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Mark, Aa of Weerij en Molenbeek, waarbij met name de eerste twee beken uitgebreid gemodelleerd zijn (Figuur 6-3). Dit model omvat zowel een hydrologische component (rainfall-runoff) als een hydraulische component.



Figuur 6-3. De schematisatie van het OHB model in Sobek-2. Ten zuiden van de rainfall-runoff knopen te zien die het Vlaamse deel van het stroomgebied omvatten.

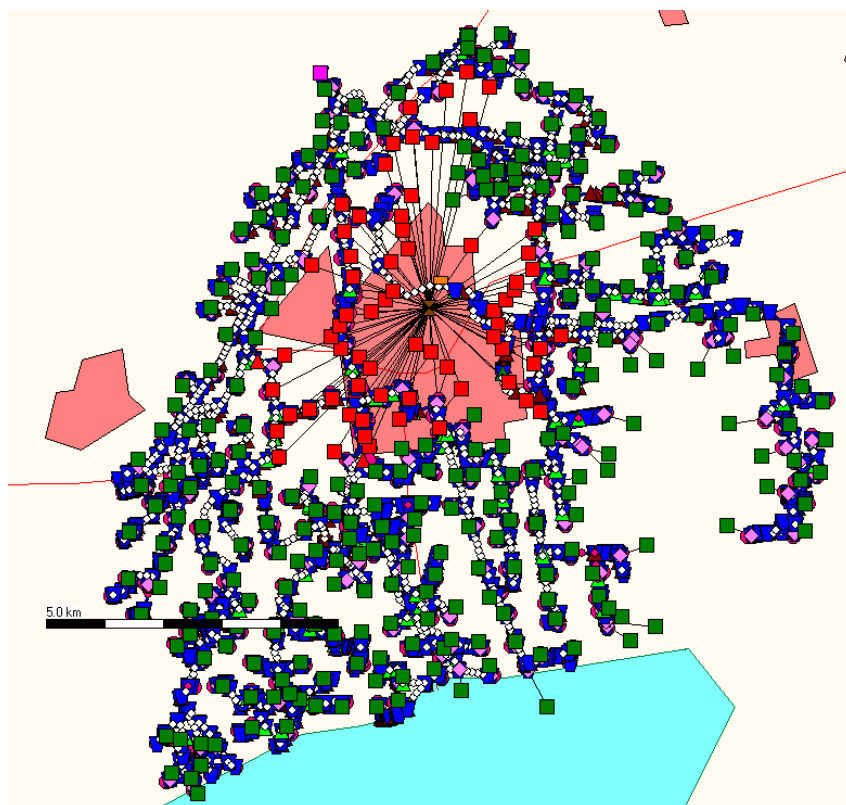
6.1.4 Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) modellen

De wateroverlast modellen zijn gemaakt in het kader van het (Nederlandse) Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW), en worden daarom ook wel NBW-modellen genoemd. De modellen zijn gebouwd in Sobek 2 door Witteveen & Bos in opdracht van Waterschap Brabantse Delta gedurende 2013/2014. Deze modellen zijn met name ingericht om te bepalen welk (percentage van het) oppervlak te maken kan krijgen met wateroverlast. Deze modellen zijn daarom gedetailleerd. De modellen bevatten echter geen 2D-grid maar maken gebruik van een "waterverspreider" die surplus water verdeelt op basis van hoogte-gegevens. Om die reden is het model opgedeeld in deelstroomgebieden (Figuur 6-4). Een voorbeeld van een schematisatie van een van de deelgebieden is weergegeven in Figuur 6-5. Er zijn ook enkele schematisaties beschikbaar van het bekennetwerk in Vlaanderen, maar hier zijn geen hydraulische constructies in opgenomen.

In het kader van het Nationaal Bestuursakkoord Water zijn in een eerdere fase andere versies van NBW-modellen geïmplementeerd. Deze modellen zijn gebouwd door Tauw en waren onderdeel van een Integrale Gebiedsanalyse (IGA) en zijn daarom bekend als de IGA-modellen. Het is onduidelijk in hoeverre deze modellen als basis voor de NBW-modellen gediend hebben.



Figuur 6-4. De opdeling in deelstroomgebieden van de NBW-modellen.



Figuur 6-5. De modelschematisatie in Sobek 2 van het stroomgebied van de Molenbeek.

6.1.5 D-Hydro modellen WBD

Voor het Nederlandse deel van de Aa of Weerij, Mark en Molenbeek wordt op het moment een D-Hydro model gebouwd door of in opdracht van WBD.

Deze modellen zijn op het moment in een vergevorderd stadium, maar zijn nog niet gekalibreerd.

6.1.6 D-Hydro model Chaamse beken

Voor het deelstroomgebied van de Chaamse beken is een D-Hydro model ontwikkeld (Wittman et al., preprint) Dit model is gebaseerd op een oud Sobek model. Dit model is (offline) gekoppeld met het een MODFLOW-grondwatermodel. Deze samenstelling van modellen is gebruikt om het effect van Nature-Based Solutions, gericht op het verminderen van droogte, op wateroverlast te testen. Het model is dus enkel beschikbaar voor een deelstroomgebied, maar de gebruikte methode zou in aangepaste vorm gebruikt kunnen worden in dit onderzoek.

6.1.7 Tygron model Chaamse beken

Voor het stroomgebied van de Chaamse beken is de impact van Nature Based Solutions getest d.m.v. modelsimulaties in een Tygron model. Dit model draait op een GPU, waardoor het erg korte rekentijden kan halen. Het model heeft echter nog geen uitgebreide opties om water-gerelateerde infrastructuur zoals duikers in te bouwen en rekent enkel 2D. Het model lijkt hierdoor vooral geschikt om te evalueren hoeveel water er naar de beken stroomt of vastgehouden wordt door natuurlijke landschapselementen, maar minder geschikt om volumes en overstromingen vanuit de beken mee te modelleren. Verder is het aantal cellen en het grondoppervlak in het model gelimiteerd, waardoor gebruik voor het hele stroomgebied van de Mark en Kleine Aa/Molenbeek niet mogelijk is

6.1.8 Reflectie software

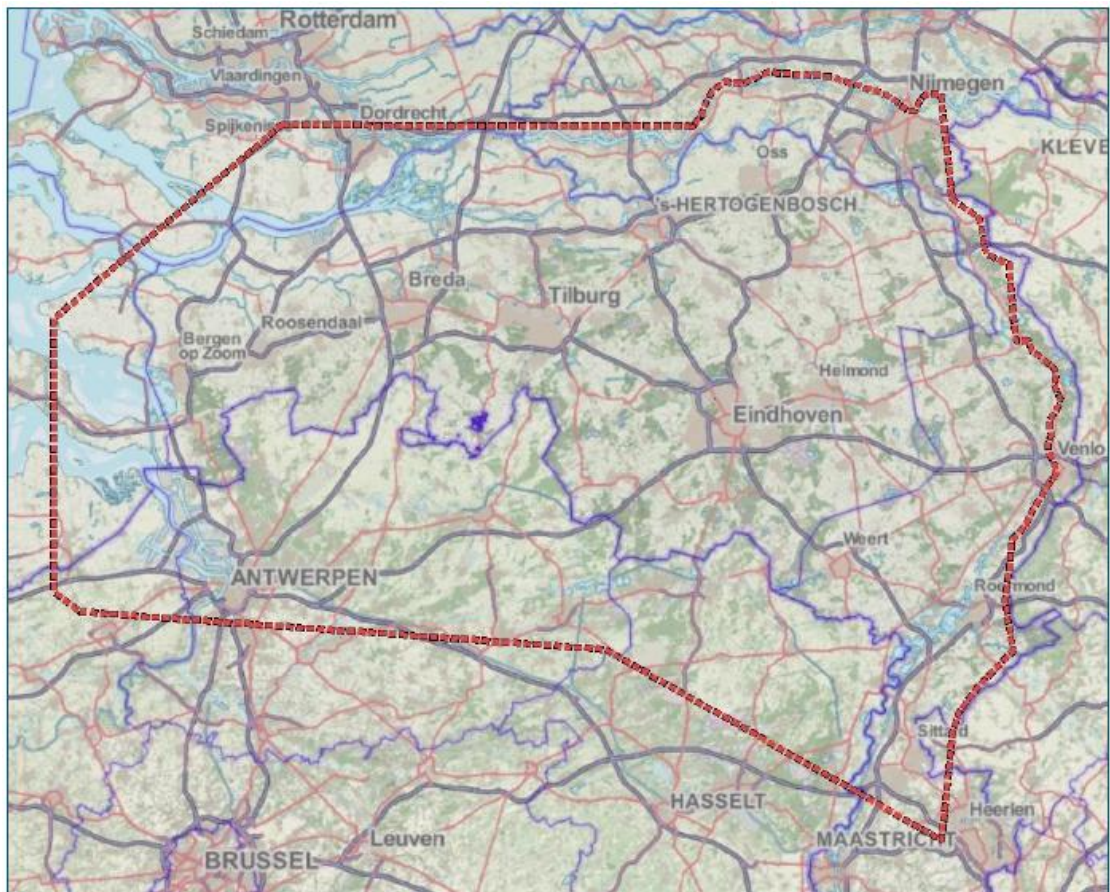
Op dit moment zijn er dus drie softwarepakketten die gebruikt worden binnen het stroomgebied en die ook toegepast kunnen worden voor het gehele stroomgebied; dit zijn Sobek 2 en D-Hydro in Nederland en Autodesk Infoworks ICM in Vlaanderen. In Bijlage A *Vergelijking modelsoftware* zijn argumenten voor en tegen het gebruik van een van deze softwarepakketten opgenomen.

6.2 Grondwatermodellen

6.2.1 Brabant Model

Sinds 2012 heeft Noord-Brabant een gebiedsdekkende databank, waarmee modellen kunnen worden afgeleid voor lokale tot provinciale schaal. Het model is ontwikkeld door de waterschappen Brabantse Delta, de Dommel en Aa en Maas, in samenwerking met Brabant Water, de Provincie Noord-Brabant en Royal Haskoning DHV (Nederlands Hydrologisch Instrumentarium, 2024). Het instrumentarium is onder andere ingezet voor de analyse van het Deltaplan Hoge Zandgronden.

Het modelgebied beslaat de beheergebieden van de drie waterschappen met daaromheen wat marge, waaronder een deel van Vlaanderen (zie Figuur 6-6). Het gehele stroomgebied van de Mark valt daarmee in het modelgebied. Het model kan gedraaid worden met een celgrootte van 25 meter.

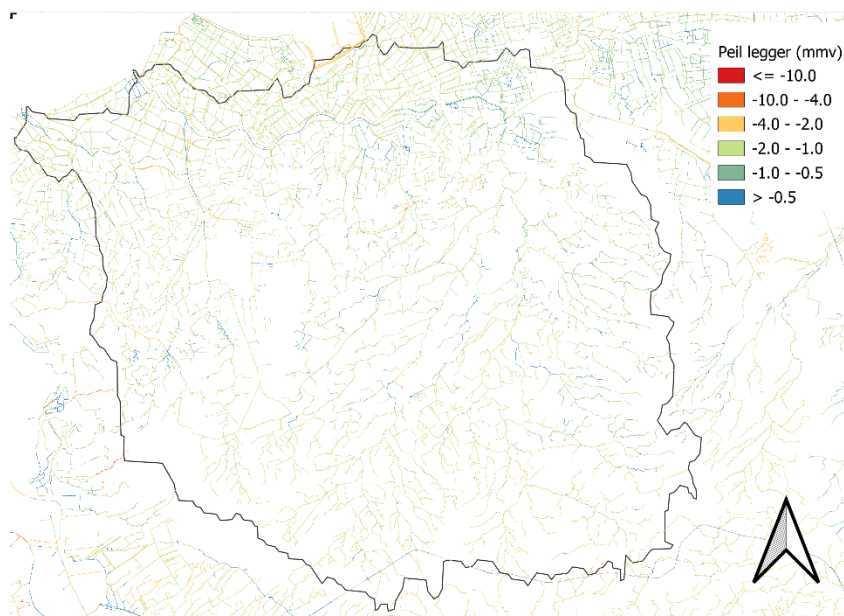


Figuur 6-6 Modelgrenzen van het Brabantmodel. Bron: Verhagen et al., 2019.

Het Brabant Model is in 2008 afgestemd op de geologie in Vlaanderen (Verhagen et al., 2015). Daarbij zijn de bestanden aangesloten op de

Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV). Het bleek dat de Nederlandse en Vlaamse geologische schematisatie en de namen van de formaties van elkaar verschillen. Om een abrupte verandering in geohydrologie bij de grens te voorkomen, wordt in de schematisatie rekening gehouden met het geleidelijk overgaan van het karakter in type lagen. Het betrekken van de gegevens uit de Vlaamse databank helpt bij een beter begrip van de Nederlandse geohydrologie. Met het model dat zich tot in Vlaanderen uitstrekt werd bijvoorbeeld aangetoond dat het intrekgebied van de winningen reikt tot het Kempisch Plateau (in plaats van de Ardennen, wat nog regelmatig wordt gedacht).

Figuur 6-7 laat het winterpeil in het secundaire watersysteem in het stroomgebied zien ten opzichte van maaiveld. De meeste ontwatering vindt dus plaats tussen 1 en 2 m onder maaiveld.



Figuur 6-7 Winterpeil van het leggersysteem ten opzichte van maaiveld in het Mark stroomgebied volgens het Brabant Model.

Voor de schematisatie van het Vlaamse geohydrologisch systeem in het Brabant Model geldt het volgende:

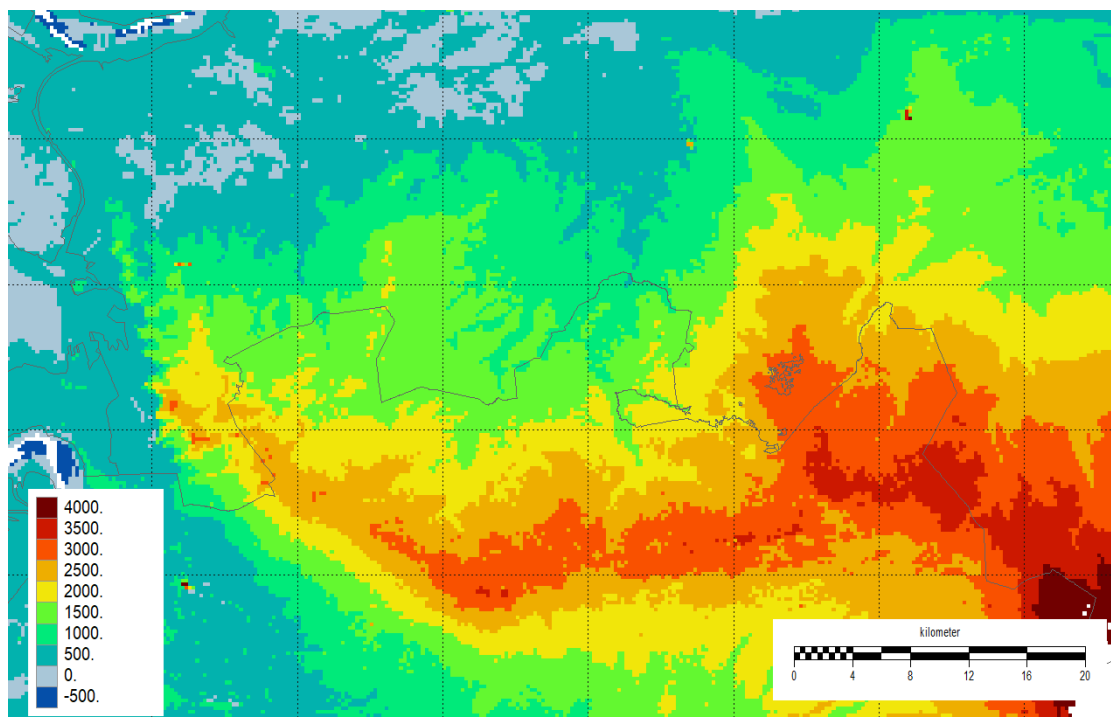
- Onttrekkingen in Vlaanderen zijn niet opgenomen
- Beregeningslocaties zijn in Vlaanderen zijn niet opgenomen
- Ontwatering:
 - o Er is een apart drainagesysteem voor Vlaanderen gedefinieerd in het model op 250 m resolutie. In dit systeem zijn het peil en de conductance apart aangegeven voor het Vlaamse deel. De conductance in Vlaanderen is echter constant aangenomen (in elke cel 625 m/d), terwijl het peil ten opzichte van maaiveld wel varieert over het gebied.

- Er is geen buisdrainage aanwezig in het Vlaamse gedeelte van het stroomgebied.
- Het secundaire watersysteem zit samen met het Nederlandse gebied in het model met een resolutie van 25x25m.
- Er is een aparte Surface Overland Flow package met een resolutie van 25x25m voor België wat ervoor zorgt dat grondwaterstanden niet verder kunnen stijgen dan maaiveld. Dit is dubbelop met het drainagesysteem.
- Het landgebruik is heel grof geschematiseerd met grote recht afgesneden vlakken met dezelfde landgebruikscodes.
- De meteorologie/grondwateraanvulling in België is gedefinieerd binnen 3 zones waarbinnen de meteorologische condities ruimtelijk uniform zijn.

Recent is een verbeterslag gemaakt aan de geologische schematisatie in het model door RHDHV. RHDHV is op dit moment bezig met het kalibreren van de nieuwe geologische lagen, waarna Brabantse Delta dit halverwege 2025 zal opnemen in het model.

6.2.2 Landelijk Hydrologisch Model

Het Nederlandse Landelijk Hydrologisch Model (LHM) modelleert, net als het Brabant Model, de hydrologische processen in de verzadigde en onverzadigde zone, voor het grondwater en oppervlaktewater. De berekeningen worden gedaan op dagbasis en met een ruimtelijke resolutie van 250m x 250 m. Het model is gericht op de simulatie van gemiddelde en droge situaties. Met het model kunnen bijvoorbeeld grondwaterstanden, stijghoogten in diepere watervoerende pakketten, kwel- en wegzijgingsfluxen en de uitwisseling tussen het grond- en oppervlaktewater worden berekend. Beregeningsbehoefte wordt automatisch berekend op basis van het vochttekort in de wortelzone. Daarnaast wordt met een Distributie Model (DM) de verdeling van oppervlaktewater uit het hoofdwatersysteem (onder andere de Rijn en de Maas) berekend en verdeeld over de verschillende regionale oppervlaktewateren in Nederland. Zo kan op regionaal (via submodel Mozart) en landelijk (via DM) niveau de beschikbaarheid van oppervlaktewater in beeld kan worden gebracht. Bij de waterverdeling tijdens perioden van watertekort wordt rekening gehouden met prioritering tussen watergebruikers in lijn met de verdringingsreeks. Op <http://www.nhi.nu/nl/> is uitgebreide informatie beschikbaar over de modelinvoer en concepten van het LHM, inclusief geohydrologische opbouw, ontwatering, onttrekkingen en berekeningbehoefte.

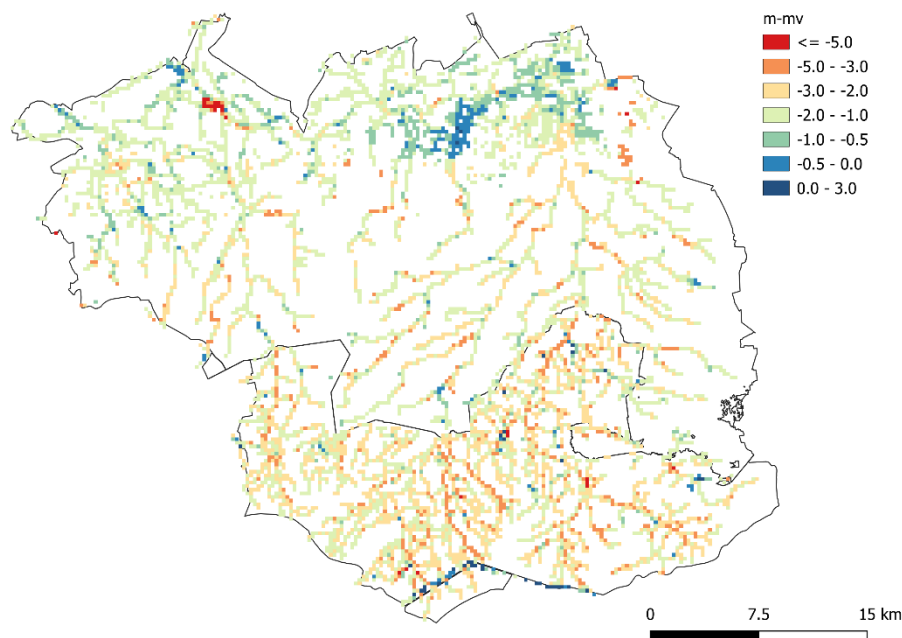


Figuur 6-8 Maaiveld (in cm boven NAP) in het stroomgebied volgens het LHM. De zwarte dunne lijn geeft de landsgrens aan.

Figuur 6-8 toont het maaiveld zoals is opgenomen in het LHM. Hierin is te zien dat het hele Mark stroomgebied daarbij wordt meegenomen. Het maaiveld is in het Vlaamse gedeelte op hetzelfde detailniveau meegenomen. Dit geldt echter niet voor alle invoer van het model.

- De bodem in Vlaanderen is geschematiseerd met één zandtype.
- Onttrekkingen zijn niet opgenomen in het model van het Mark stroomgebied in Vlaanderen
- Berekening in Vlaanderen is niet opgenomen in het model
- Ontwatering
 - Drainage, sloten en greppels zijn niet specifiek opgenomen in het Vlaamse deel. De grotere waterlopen zijn wel gedefinieerd.
 - De conductance van de waterlopen en drainage is wel ruimtelijk variabel gemodelleerd in Vlaanderen. Voor een aantal deelgebieden is de conductance overal gelijk aan 1 gekozen.
 - De beken en waterlopen zijn samen met het Nederlandse gedeelte opgenomen op 25x25m resolutie. Figuur 6-9 toont het peil ten opzichte van maaiveld.
- Het landgebruik is geschematiseerd als alleen grasland.
- Bijna het hele stroomgebied valt binnen dezelfde meteorologische zone (gebaseerd op hetzelfde meteorologische station Woensdrecht). Tot ongeveer 5 km vanaf de grens zijn verdamping en neerslag op hoge resolutie gemodelleerd. Daarbuiten zijn voor het Vlaamse gebied ruimtelijk uniforme waarden toegepast.

- In België is er geen Mozart-DM schematisatie om de waterverdeling van het hoofdwatersysteem te berekenen. Aangezien in het Vlaamse deel van het stroomgebied geen grote waterlopen zijn, heeft dat geen significante invloed.



Figuur 6-9 Peil van het primaire watersysteem (waterlopen) in het Mark stroomgebied ten opzichte van maaiveld volgens het LHM.

6.2.3 Vlaams grondwatermodel

In Vlaanderen zijn er grondwatermodelleringen doorgevoerd voor het volledige Vlaamse gebied. Dit gebeurde door Sumaqua in het kader van de droogte-impactberekeningen voor het Klimaatportaal Vlaanderen (VMM Vlaanderen). Daarnaast zijn er modelleringen in het kader van onderzoek aan zowel KU Leuven als VUB. Het KU Leuven model, SM-GW (Moustakas & Willems, 2024), heeft net als het Nederlandse LHM een grid-grootte van 250 m en houdt rekening met de voornaamste hydrologische processen inclusief capillaire opstijging en impact via/op gewasgroei. Het model werkt volgens een 2D-simplificatie van het MODFLOW-principe: Er wordt 2D horizontale grondwaterstroming gemodelleerd met verticaal geaggregeerde lagen. De gebruikte tijdsresolutie is dagelijks. In het model zijn drainage, grondwateronttrekkingen en irrigatie geïmplementeerd.

Referenties

- Beleidsstafel wateroverlast en hoogwater (2022). *Voorkomen kan niet, voorbereiden wel: allemaal aan de slag. Eindadvies Beleidsstafel wateroverlast en hoogwater, December 2022.*
- Brevé, N. (2007) Integrale aanpak stroomgebied de Mark – Grensoverschrijdende samenwerking voor vismigratie. *Visionair*, nr. 4, juni 2007, 22-25
- CIW. 22 maart 2019. *Evaluatierapport Waterschaarste en Droogte 2018.*
- De Louw, P.G.B., R.J. Stuurman. Mogelijkheden voor watersysteem-optimalisatie door actief peilbeheer in het Merkske stroomgebied. TNO-rapport NTTG 97-277-B.
- De Louw, P.G.B., R.J. Stuurman, G. van Wirdum (2000). Ecohydrologische systeemanalyse van de Strijbeekse Heide. Bestrijding van verdroging vennen en beekdal. TNO-rapport NITG 00-212-B.
- De Louw, P.G.B., Witte, J. P., van den Eertwegh, G. A. P. H., Bartholomeus, R. P., Pouwels, J., & Hunink, J. (2022). Beter bestand tegen droogte: oplossingsrichtingen voor een hydrologisch goed functionerend grondwatersysteem in de zandgebieden van Nederland. *Stromingen: vakblad voor hydrologen*, 28(1), pp 3-21.
- De Louw, Perry, Dimmie Hendriks, Ali Meshgi, Marjolein van Huijgevoort, Ruud Bartholomeus, Gé van den Eertwegh. 2023. *Analyse Droogte 2022. Grondwater en Bodemvocht.*
- Deltares, augustus 2023. *Veranderingsrapportage LHM 4.3.* 11209235-000-BGS-0001.
- Deltares en KnowH2O, 2023, *Hoe kan het Brabantse grondwater weer structureel omhoog?*
<https://storymaps.arcgis.com/stories/12c0c4133fa54087937580470f2cce03>
- Deltares, januari 2024a. *Sponswerking van Landschappen in Nederland.* 11209224-003-ZWS-0001.
- Deltares, januari 2024b. *Sponswerking van landschappen in Nederland. Casestudie Chaamse Beken.* 11208012-000-ZWS-0005.
- Deltares, mei 2025. *Maatschappelijke effecten van droogte in een veranderd klimaat en afgeleide kengetallen voor maatschappelijke kosten-baten analyses.* 11211541-003-ZWS-0001.
- Expertenpanel Hoogwaterbeveiliging, juli 2022. *Weerbaar Waterland. Ons voorbereiden op wat al gebeurt.*
<https://www.vlm.be/nl/SiteCollectionDocuments/Water-Land-Schap/advies-weerbaar-waterland.pdf>

Geesteranus, M.M., Nijhof, A., Alkemade, F., Huysmans, M., Tops, P., Koekkoek, T. (2022), *Zonder water, geen later. Naar een omslag in het (grond)waterbeheer in Noord-Brabant*.

IPLO: website InformatiePunt LeefOmgeving:
<https://iplo.nl/thema/water/beheer-watersysteem/wateroverlast/wateroverlastnormen-regionaal-oppevlaktewater/>

INBO. (2024). *Droogte in grondwaterafhankelijke ecosystemen*. Geraadpleegd op 8 augustus 2024 via <https://www.vlaanderen.be/inbo/indicatoren/droogte-in-grondwaterafhankelijke-ecosystemen>

Mondeel, H.J., Witjes, Th.G.J., (2014). *Toetsing wateroverlast inzicht in de kans op inundatie vanuit waterlopen en de effectiviteit van maatregelen: hoofdrapport en deelrapporten clusters: Rondon Breda*,

Moustakas, S., Willems, P. (2024), 'Simplified spatially distributed, coupled soil moisture-groundwater model, evaluated for Flanders (Belgium)', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 102006

NHI (2024). Nederlands Hydrologisch Instrumentarium. *Brabant Model*. Geraadpleegd op 30 september 2024, van <https://nhi.nu/modellen/brabant-model>.

TNO – GDN (2024) BRO REGIS II v2.2.2. TNO - Geologische Dienst Nederland, <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen/kaart>; geraadpleegd op 18-09-2024.

Van den Eertwegh, Gé, Ruud Bartholomeus, Perry de Louw, Flip Witte, Jos van Dam, Dion van Deijl, Peter Hoefsloot, Sharon Clevers, Dimmie Hendriks, Marjolein van Huijgevoort, Joachim Hunink, Niels Mulder, Janneke Pouwels en Janine de Wit. 2019. *Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Rapportage Fase 1: ontwikkeling van uniforme werkwijze voor analyse van droogte en tussentijdse bevindingen*.

Van de Velde, J., Franken, T. en Wolfs, V. (2025). Opstellen van GxG-kaarten voor Vlaanderen: eindrapport. Studie in opdracht van het Departement Omgeving en de Vlaamse Milieumaatschappij, 93 pp.

Verhagen, F., Ben van der Wal (Royal HaskoningDHV), Jos Moorman (waterschap Aa en Maas), Heleen Westerhof (waterschap De Dommel), Kees Peerdeman (waterschap Brabantse Delta) en Jelle van Sijl (Brabant Water). 2015. *Ontwikkeling Brabants grondwatermodel tot kennissysteem*. H2O. <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/ontwikkeling-brabants-grondwatermodel-tot-kennissysteem>

- Verhagen, F., van Steijn, T., van der Wal, B., Swierstra, W., Vermue, H. 2019. *Update Hydrologische Gereedheidskist Noord-Brabant*. Referentienummer: BF3823WATRP1902061020WM.
- Versteeg, R., Bakker, M. Hakvoort, H., (2013). *Optimalisatie Hoogwaterbescherming Breda: hoofdrapport & technische modelrapportage* (Nr. PR2358.10). HKV lijn in water.
- VRAG. 2021. *Uitwerking van een reactief afwegingskader voor prioritair watergebruik tijdens waterschaarste*. In opdracht voor CIW – Vlaamse Overheid (Vlaamse Milieumaatschappij, de Vlaamse Waterweg, het Departement Mobiliteit en Openbare Werken, het Departement Omgeving, het Departement Landbouw en Visserij, het Departement Economie, Wetenschap en Innovatie, en het Agentschap Natuur & Bos).
- Waterschap Brabantse Delta. 28 november 2018. *Hoofdrapport Evaluatie Droogte 2018*.
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw (2018). Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. STOWA, Amersfoort, Rapport 2018-48.
- Willems, P. (2007). Waterloopmodellering: aangepaste versie 2007 van de "Algemene methodologie voor de Administratie Waterwegen en Zeewezen - Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek". Katholieke Universiteit Leuven. Laboratorium voor Hydraulica: Leuven. 256 pp.
- Witteveen+Bos. (2014a). *Toetsing wateroverlast inzicht in de kans op inundatie vanuit waterlopen en de effectiviteit van maatregelen cluster Molenbeek*. Waterschap Brabantse Delta. Definitief d.d. 14 mei 2014.
- Witteveen+Bos. (2014b). *Toetsing wateroverlast inzicht in de kans op inundatie vanuit waterlopen en de effectiviteit van maatregelen cluster Bovenmark*. Waterschap Brabantse Delta. Definitief d.d. 24 april 2014.
- Witteveen+Bos. (2014c). *Toetsing wateroverlast inzicht in de kans op inundatie vanuit waterlopen en de effectiviteit van maatregelen cluster Aa of Weerijs*. Waterschap Brabantse Delta. Definitief d.d. 24 april 2014.
- Witteveen+Bos. Mei 2020. *Klimaatrobuuste Bovenlopen Beekstelsel Hoge Zandgronden*.
- Wittmann, C. D., de Louw, P., Schoonderwoerd, E., Kingma, V., Dahm, R., Peerdeman, K., & Penning, E. (2024). *Evaluating the effects of drought mitigation measures during flood events* [Preprint]. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5031130>

Bijlage A Vergelijking modelsoftware

Er zijn drie verschillende softwarepakketten waar modellen in gebouwd zijn in het stroomgebied van de Kleine Aa/Molenbeek en de Mark. Het gaat om de volgende drie softwarepakketten:

- **Sobek 2** is een ouder softwarepakket voor hydrologische en hydraulische modellering, ontwikkeld door Deltares. Het werd in Nederland veel gebruikt voor het modelleren van waterbeweging in rivieren, polders, stedelijke gebieden en watersystemen. Inmiddels wordt Sobek 2 gefaseerd vervangen door D-HYDRO. Sobek 2 wordt niet meer verder ontwikkeld.
- **D-HYDRO Suite** is de opvolger van Sobek 2 en ondersteunt zowel 1D- als 2D-modellering. D-HYDRO is open-source en wordt met name in Nederland toegepast door waterschappen, Rijkswaterstaat en adviesbureaus.
- **Autodesk InfoWorks ICM** is een commercieel softwarepakket en ondersteunt zowel 1D- als 2D-modellering. Het pakket wordt met name toegepast in stedelijke gebieden en wordt veel gebruikt door gemeenten, ingenieursbureaus en waterbeheerders.

Hieronder worden de positieve en negatieve kanten van het gebruik van een van de softwarepakketten voor toepassing binnen het JCAR-ATRACE project voor de Vlaams Nederlandse beken verder toegelicht.

De volgende kleurcodering is gebruikt:

- **Positief**
- **Overkomelijk**
- **Negatief**
- Belangrijk argument

Criterium	Sobek 2	D-Hydro Suite	Autodesk Infoworks ICM
Benodigde hoeveelheid werk om het model draaiend te krijgen	Er bestaan al meerdere Sobek modelschematisatie voor deelgebieden. Deze zijn eerder gebruikt. De NBW modellen gebruiken echter een overstromingsdiepte afgeleid uit de waterstand in de beken, deze zouden aangepast moeten worden. Het OHB-model heeft wel een onderliggend 2D-grid bij de Aa of Weerij en Mark.	Bestaande Sobekmodellen kunnen snel omgezet worden met gebruik van de "importeer knop". Er lijkt weinig informatie verloren te gaan bij het omzetten. Data uit Autodesk kan ook geïmporteerd worden in D-Hydro (tijdsintensiever)	<u>Het model is omgezet vanuit oude software en niet gekalibreerd. Dit zal dus opnieuw moeten gebeuren.</u> Er bestaat een functie om data uit Sobek 2 te importeren. De kwaliteit van deze import is waarschijnlijk slecht.

	Het importeren van de Vlaamse schematisatie in Sobek 2 is waarschijnlijk tijdsintensief.	Het model zal opnieuw gekalibreerd en gevalideerd moeten worden.	
Kwaliteit resultaten	Oudere software met een minder adaptief (vierkant) 2D-grid zorgt voor minder goede resultaten.	Voor het vergelijken van de RR-concept geen verschil met Sobek 2. Mogelijkheid tot neerslag op het 2D-grid Meerdere soorten 1D2D-koppeling mogelijk (embedded, lateral), in tegenstelling tot Sobek 2.	Model is m.n. ontwikkeld voor stedelijke toepassing. <u>De hydrologische component is minder gebaseerd op fysische processen. Minder geschikt voor scenario-analyse.</u> Mogelijkheid tot neerslag op het grid Meerdere soorten 1D2D-koppeling mogelijk (embedded, lateral), in tegenstelling tot Sobek 2
Flexibiliteit	Moeilijk importeren van schematisatie uit andere software	Relatief makkelijk importeren van schematisatie uit andere modellen (zowel uit Autodesk als Sobek) Gemakkelijker uitbreiden van het 2D-grid (verfijnen of juist grover maken).	Ervaring met importeren uit Sobek naar Autodesk is slecht, wel mogelijk.
Mate van volledigheid	Bestaat al voor NL Het OHB-model ¹⁰ heeft een beperkte schematisatie voor de Molenbeek, maar voor de Mark en Aa of Weerijds erg uitgebreid. De NBW modellen erg gedetailleerd en hebben geen 2D-grid.	Bestaat nog niet (maar kan wel alle vanuit de ander softwarepakketten importeren).	Bestaat gelimiteerd voor Vlaanderen
Rekentijd	Langzaamst	D-Hydro rekent waarschijnlijk sneller en kan makkelijker op het cluster gedraaid worden. Documentatie hierover is up to date.	Sneller dan Sobek, maar kan niet draaien op een Linux server.
Toekomstbestendigheid	Het uitbreiden van dit model zal waarschijnlijk veel meer werk zijn. Wordt niet meer doorontwikkeld.	<u>Makkelijker uit te breiden door backend toegang.</u>	Software zal waarschijnlijk voor lange tijd ondersteund blijven

¹⁰ Optimalisatie Hoogwaterbescherming Breda

		Wanneer het model later verder uitgebreid moet worden is het minder werk om dit in D-Hydro te doen dan in Sobek.	
Draagvlak	Modellen hebben zich eerder bewezen Wordt uitgefaseerd	Voorkeurssoftware voor andere gebruikers Nederland Software wordt nog ondersteund en er kunnen direct vragen gesteld worden aan ervaren gebruikers. WS De Dommel bouwt nu een D-Hydro model, WS Scheldestromen heeft die al, werken met D-Hydro zal dus sowieso nodig zijn.	Voorkeurssoftware voor andere gebruikers Vlaanderen
Gebruikersgemak	Backend aanpassingen doen is mogelijk, maar niet zo gebruikersvriendelijk als D-HYDRO Modellen zijn gekalibreerd en klaar voor gebruik (voor het Nederlandse deel).	<u>Bestanden in D-HYDRO (zoals randvoorwaarden, doorsnedes, etc.) zijn makkelijk aanpasbaar via backend.</u> DE UI is minder gebruiksvriendelijk dan InfoWorks Resultaten uit D-Hydro zijn makkelijker te verwerken (liggen scripts voor klaar).	<u>De modellen zijn enkel toegankelijk via de UI. Backend aanpassingen doen is hierdoor moeilijker.</u> De UI is gebruiksvriendelijker dan D-HYDRO
Toepasbaarheid methodologie toekomstige stroomgebieden.	Wordt waarschijnlijk niet gebruikt in een volgend stroomgebied	Voor toekomstige doelen is de koppeling tussen D-HYDRO en MODFLOW al eerder succesvol getest (Wittman et al.). Het D-Hydramodel bij WS Scheldestromen wordt al over de Grens een uitgebreid.	Kan ook gebruikt worden voor de Dommel (is ook een Info Works model beschikbaar)
Toegankelijkheid & ontwikkeling	SOBEK 2 wordt niet meer ondersteund. Weinig mensen kunnen werken met SOBEK 2.	Bevat naar verwachting meer bugs dan Infoworks vanwege doorgaande ontwikkeling Meer mensen binnen Deltares kunnen met D-Hydro werken.	Global gebruik en al bestaat al langere tijd. <u>Hoge kosten</u>