

PROGRAMMA LUMBRICUS

Integrale benadering van een
klimaatrobuuste inrichting en beheer
van stroomgebieden
Een overzicht



2021
05

PROGRAMMA LUMBRICUS

Integrale benadering van een
klimaatrobuuste inrichting en beheer
van stroomgebieden

Een overzicht





NAAR EEN KLIMAATROBUUSTE INRICHTING EN EEN KLIMAATROBUUST BEHEER VAN STROOMGEBIEDEN

Wat zijn de uitdagingen als het gaat om de beschikbaarheid van voldoende zoet water? Hoe geef ik vorm aan klimaatrobuust bodem- en waterbeheer? Hoe hangen maatregelen met elkaar samen en hoe kunnen ze elkaar versterken? Welke kennis is voorhanden? Verschillende onderzoeksprojecten in Nederland leveren een bijdrage aan het oplossen van de bodem- en waterproblematiek die speelt op de hoge zandgronden. Dit document beschrijft de hiervoor binnen Lumbricus ontwikkelde integrale denkwijze en de wijze waarop bestaande en nieuwe kennis hiervoor ingezet kunnen worden. Het document geeft toegang tot de vergaarde inzichten en kennis, via links naar onderliggende [Deltafacts](#)¹ en daar weer aan ten grondslag liggende rapporten. Zo ontstaat een overzicht van alle ingrediënten voor ontwerp en uitvoering van een klimaatrobuust watersysteem in de praktijk.

Ingrediënten voor het implementeren van een klimaatrobuust bodem- en watersysteem door het op stroomgebiedsniveau geïntegreerd toepassen van (innovatieve) maatregelen op het gebied van governance, bodem, ondergrond en water.

¹ Deltafacts zijn online kennisdossiers met een korte, krachtige samenvatting van de 'state-of-the-art' kennis over een bepaalde kennisvraag op het gebied van waterbeheer, klimaatverandering en waterkwaliteit.

INHOUD

1	WAAROM WERKEN AAN EEN KLIMAATROBUUST BODEM-WATERSYSTEEM?	4
	Wateraanbod en watervraag	4
	Anticiperen op grilliger weer	5
2	WAT IS EEN KLIMAATROBUUST WATERSYSTEEM OP DE HOGE ZANDGRONDEN?	7
	Gebiedsspecifieke uitdagingen van de hoge zandgronden	7
	Bodem-water-maatschappij	9
3	INGREDIËNTEN VOOR EEN KLIMAATROBUUSTE INRICHTING VAN HET WATERSYSTEEM	10
	Denken en werken vanuit een integrale benadering	10
3.1	Inrichten & beheren: welke maatregelen kun je nemen?	14
	Natuurlijker inrichten van de beek(omgeving)	16
	Verbeteren natuurlijke spons- en bufferwerking van de bodem	20
	Technische ingrepen in de hydrologie	24
3.2	Opschalen & combineren: wat is het effect (lokaal en regionaal)?	28
	Rekenmodellen voor perceelschaal	30
	Rekenmodellen voor regionale schaal	34
	Effectmodules voor landbouw en natuur	39
3.3	Implementeren & uitvoeren (governance): hoe regelen we het?	42
4	SAMEN VERDER	50
5	LITERATUURLIJST	52
	Colofon	55



➤ HOOFDSTUK 1

Waarom werken aan een klimaatrobuust bodem-watersysteem?

WATERAANBOD EN WATERVRAAG

Nederland wordt geconfronteerd met toenemende droogteschade aan landbouw en natuur, toenemende schade aan aquatische systemen (beken en vennen) en toenemende druk op waterbeschikbaarheid voor toepassingen zoals industrie en de productie van drinkwater ([Figuur 1](#)). Om dit tij te keren, worden, onder meer binnen het Deltaprogramma Zoetwater, strategieën ontwikkeld om de [zoetwatervoorziening](#) op lange termijn veilig te stellen.

Verschillende sectoren staan voor de uitdaging in te spelen op de effecten van klimaatverandering: grilliger weer en langdurige droge perioden. Zo is grondwaterafhankelijke natuur afhankelijk van specifieke

standplaatscondities, zoals bodemvochtregime maar bijvoorbeeld ook de zuurgraad van de bodem. De watervoerendheid van beken en vennen voor het in stand houden van ecologische waarden (KRW) staat onder druk. De vraag naar drinkwater neemt toe tijdens droge zomers, net als de irrigatievraag vanuit de landbouw om gewassen van voldoende water te voorzien. Voor het Deltascenario STOOM² geldt dat de druk op het (grond)watersysteem alleen maar verder toe zal nemen. Niet alleen door een grotere watervraag vanuit de landbouw, maar ook vanuit de burger en de industrie (Pronk et al., 2020). Kortom: de vraag naar zoet water neemt toe. Watervraag en wateraanbod raken steeds meer uit balans.

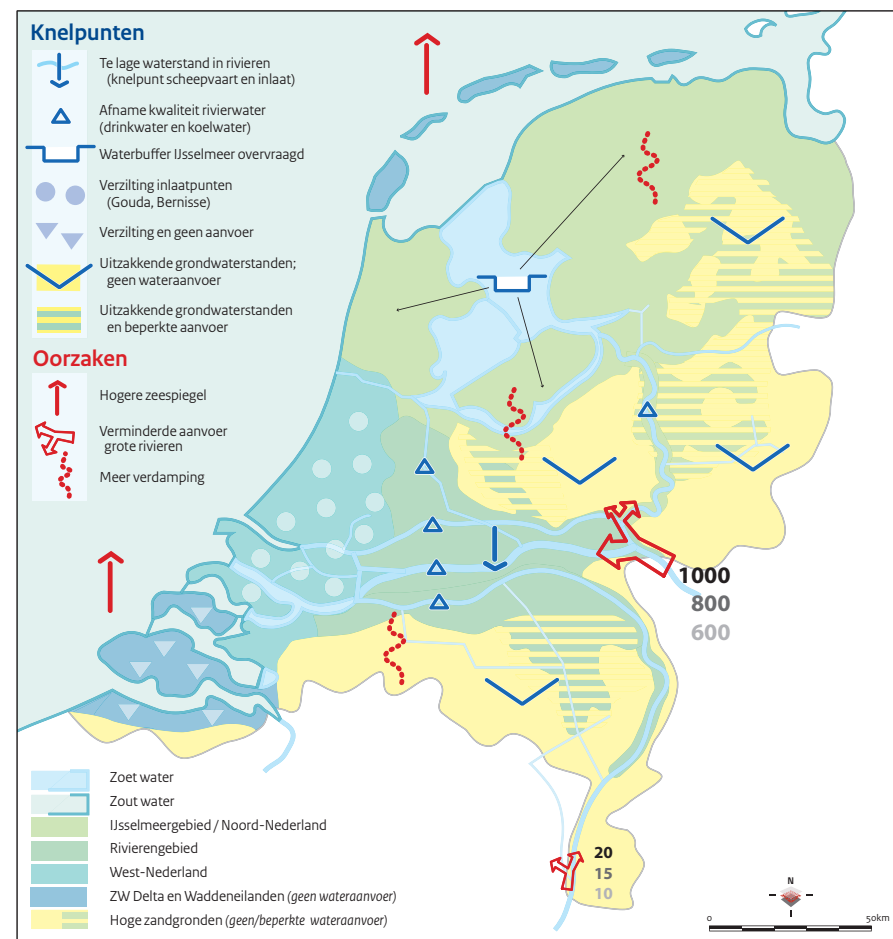
ANTICIPEREN OP GRILLIGER WEER

In de zomer van 2016, bij de aanvang van het programma Lumbricus, hadden delen van Nederland te kampen met hevige wateroverlast. Dat zulke extreem natte periodes steeds vaker afgewisseld zouden worden met langdurig droge periodes was bekend. Maar dat we in de jaren 2018-2020 ook daadwerkelijk geconfronteerd zouden worden met extreme droogtes in alle componenten van het watersysteem, had niemand voorzien. De extreme jaren hebben geleid tot een toenemend gevoel van urgentie bij alle actoren in het watersysteem. We hebben als waterbeherend Nederland de laatste vijf jaar veel ervaren en geleerd over zowel de natte als droge kant van ons watersysteem. De relevantie om in te grijpen is voor iedereen duidelijk, evenals de overtuiging dat we alleen samen de problemen kunnen oplossen.

De extreme droogtes en piekbuien met wateroverlast stellen ons voor een duidelijke opgave; het gaat er niet alleen om dat wateroverschotten op een goede manier worden afgevoerd, maar we moeten ook toe naar een wijze van (grond)waterbeheer waarbij verschillende bronnen van water (neerslag, oppervlaktewater, grondwater, maar ook gezuiverd restwater) efficiënt en verantwoord worden vastgehouden, benut en aangevuld, zodat we perioden van droogte beter kunnen overbruggen.

FIGUUR 1

Knelpunten in de zoetwatervoorziening in Nederland in de 21^e eeuw en hun oorzaken



² <https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/kennisontwikkeling/deltascenarios>

De uitdaging ligt onder meer in de verschillende tijdschalen waarop droogte en wateroverlast zich manifesteren: wateroverlast komt en gaat snel (incidenteel), terwijl droogte langzaam intreedt en lang naijlt (structureel). Als we de hogere zandgronden klimaatrobust willen inrichten en beheren, zal enerzijds het wateraanbod vergroot of beter beheerd moeten worden, en anderzijds de watervraag moeten worden verminderd. Daarnaast moeten grondwaterstanden op een dusdanig niveau zijn, dat de natuurlijke vegetatie in haar waterbehoefte kan voorzien. Ook voor ecologisch herstel van beeksystemen is waterbeschikbaarheid de belangrijkste randvoorwaarde. Werken aan een klimaatrobuste inrichting van gebieden is geen sinecure; als we 'binnen het bakje' blijven kijken, gaan we het bijvoorbeeld voor de ecologie niet redden. Hetzelfde geldt voor de landbouw, op het moment dat we alleen maar naar het perceel kijken. Het gaat om een integrale uitdaging, waarbij we verschillende gebruiksfuncties (van aquatische en terrestrische natuur, landbouw, tot stedelijk gebied), belangen, doelen en onderwerpen (waterkwaliteit, waterkwantiteit, governance) zullen moeten beschouwen. Het programma Lumbricus geeft handvatten om aan deze uitdaging op klimaatrobuste wijze invulling te geven.

GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Zoetwatervoorziening](#)





HOOFDSTUK 2

Wat is een klimaatrobuust watersysteem op de hoge zandgronden?

GEBIEDSSPECIEKE UITDAGINGEN VAN DE HOGE ZANDGRONDEN

De hoge zandgronden ([Figuur 2](#)) kennen een aantal gebiedsspecifieke uitdagingen als het gaat om het functioneren van het bodem- en watersysteem. Daar waar een groot deel van Nederland van water voorzien kan worden vanuit het hoofdwatersysteem (grote rivieren en IJsselmeer), is dat voor de hoge zandgronden maar beperkt of niet mogelijk. Het overgrote deel van de hoge zandgronden is neerslagafhankelijk. Het moet het doen met het water dat er is of valt. Daarnaast zijn hoge zandgronden grotendeels vrij afwaterend (onder vrij verval). De bronnen voor zoetwater zijn daarmee anders dan in laag-Nederland (met veel mogelijkheden voor wateraanvoer, sterk peilgestuurd) en daarmee ook de manier hoe hier mee om te gaan.

Uit de knelpuntenanalyse voor de 21^e eeuw van het Deltaprogramma Zoetwater ([Klijn et al., 2012](#)) blijkt dat voor zandgronden in Oost-, Midden- en Zuid-Nederland sprake is van verder uitzakkende grondwaterstanden als we geen of beperkt maatregelen nemen. Met name in gebieden met geen of beperkte aanvoermogelijkheden van water via het hoofdwatersysteem ([Figuur 1](#)). En dat terwijl op die hoge zandgronden de zomergrondwaterstanden in de afgelopen eeuw al gemiddeld met ongeveer 50 cm gezakt zijn ([Knotters & Jansen, 2005](#)). Kortom: de beschikbaarheid van voldoende zoet water staat onder druk. Ook het niveau van de grondwaterstanden staat onder druk, waarvan landbouw, natuur en infrastructuur schade ondervinden.

Met een waterbeheer dat onvoldoende is aangepast aan het toekomstige, meer grillige klimaat, zullen watertekorten en daarvan afgeleide effecten verder toenemen. Voor de hogere zandgronden kan dat gaan om een schadepost voor de landbouw van 200 miljoen euro in een droog jaar ([Ter Maat & Van der Vat, 2015](#)). De gemiddelde droogteschade voor de landbouw kan in 2050 ongeveer 2,5 keer groter worden dan nu (Zoetwatervoorziening Oost Nederland, 2012). Schade aan natuur laat zich lastiger in euro's uitdrukken, maar is niet minder belangrijk ([Van den Eertwegh et al., 2020](#)). Uit de recent verschenen MKBA-analyse van het Deltaprogramma Zoetwater volgt dat vergaande veranderingen van landgebruik en waterbeheer nodig zijn om onomkeerbare schade aan grondwaterafhankelijke natuur te voorkomen ([Mens et al., 2020](#)). Adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte op landbouw en natuur én druk op andere functies als drinkwater te beperken, zijn dus nodig. Dit is ook opgenomen in het Deltaplan Zoetwater, waarin voor de hoge zandgronden wordt ingezet op het vasthouden en besparen van water.

De Nederlandse zandgebieden zijn vanuit het verleden vooral ingericht om water snel af te voeren en zo natschade en wateroverlast te voorkomen. Alleen kun je ook te intensief ontwateren en afwateren, dus teveel water afvoeren. Water dat je in de vrij-afwaterende delen van Nederland, de hoge zandgronden, dan ook echt kwijt bent.

Na de extreme neerslag in de zomer van 2016 in Zuidoost-Nederland - met als gevolg veel wateroverlast - volgden de zomers van 2018 en 2019 met aanzienlijke watertekorten in grote delen van het land voor met name natuur en landbouw (Van den Eertwegh *et al.*, 2020). Ook in 2020 was het weer zeer droog. Het KNMI heeft bevestigd dat in het binnenland van Nederland zulke droogtes vaker verwacht mogen worden als gevolg van klimaatverandering³; de droogtes van afgelopen jaren zijn dus geen toeval. De keerzijde van een op afvoeren ingericht watersysteem is dat dezelfde gebieden in neerslagarme perioden steeds meer last van droogte krijgen. Dit proces wordt versterkt door toegenomen grondwatergebruik (onttrekkingen, verdamping, langer groeiseizoen, andere neerslagverdeling, meer maaiveldafvoer, etc.) in combinatie met de typische zandbodemeigenschappen. Het huidige watersysteem, de veranderingen in het grondgebruik en de klimaatverandering confronteren ons met een veranderde wateropgave:

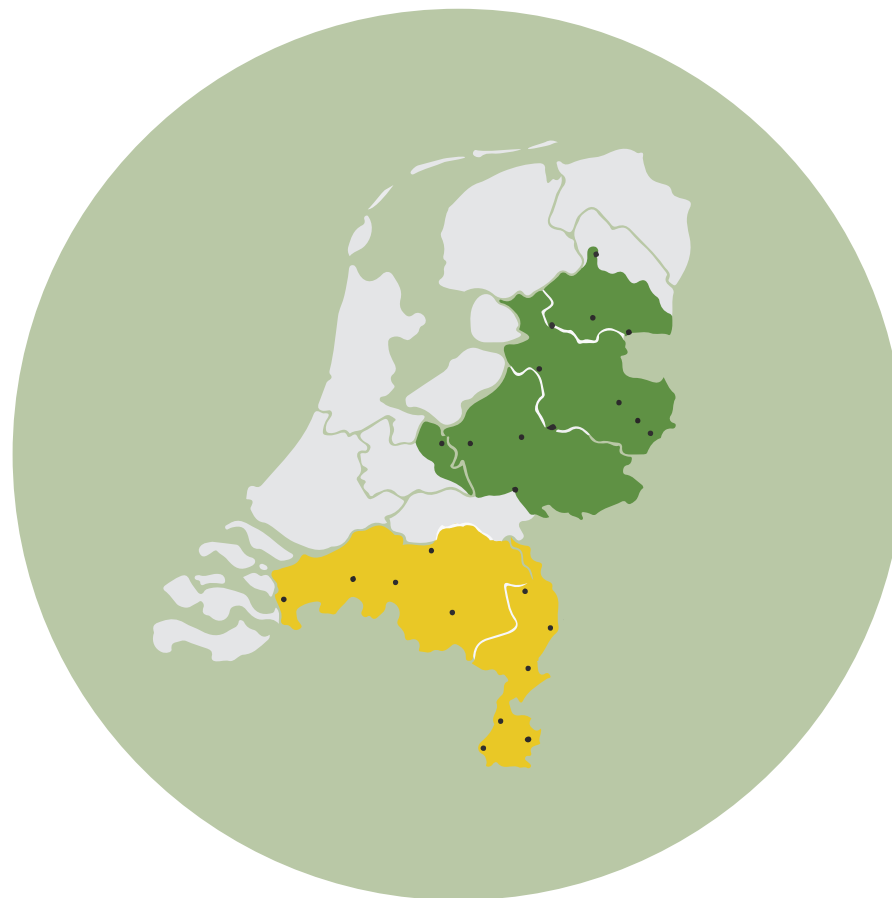
We moeten toe naar een bodem- en (grond)waterbeheer waarbij meer water langer (gecontroleerd) wordt vastgehouden, en er een nieuwe balans ontstaat tussen vasthouden, gebruiken en afvoeren.

De bestaande, verschillende bronnen van water kunnen efficiënter en meer verantwoord worden benut, het grondwater moet meer worden aangevuld en afvoer moet worden beperkt. Dit dient zo te gebeuren dat de effecten van langdurige perioden van droogte verminderd worden, maar waarbij we waar nodig nog steeds kunnen anticiperen op (zomer)piekbuien om wateroverlast te beperken. Hierbij dienen vooral de bodem en ondergrond als waterbuffer.

³ <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/vaker-droogte-in-het-binnenland>

FIGUUR 2

Hoge zandgronden in Nederland, met zowel Oost- als Zuid-Nederland ([bron](#)).



Kennis van, en inzicht in de doorwerking van ingrepen door het hele watersysteem zijn van belang om te beoordelen of maatregelen ook verantwoord kunnen worden toegepast. Dit geldt voor waterkwantiteit (zorgen voor een grotere waterbeschikbaarheid voor de ene sector, kan leiden tot een tekort voor de ander), maar óók voor de waterkwaliteit (een kleine verandering in waterstromen kan grote effecten hebben op de waterkwaliteit). Beide aspecten dienen dan ook in samenhang te worden beschouwd.

BODEM-WATER-MAATSCHAPPIJ

Om de bodem en het grondwater als waterbuffer te kunnen gebruiken, zal het proces van bodemdegradatie in de landbouw moeten worden tegengaan. Bodemdegradatie ontstaat bijvoorbeeld door overmatig/intensief bodemgebruik en grondbewerking, maar ook door het toepassen van zware machines onder ongunstige condities (nattigheid). Bodemdegradatie uit zich in een verandering van de fysische eigenschappen (door verdichting neemt bijvoorbeeld het poriënvolume af en daarmee de infiltratiecapaciteit van de bodem), of in een verandering van de chemische en biologische toestand (bijvoorbeeld resulterend in weinig tot geen bodemleven). Het versterkt daarmee direct de droogte- en natschade en zorgt daarnaast indirect voor steeds minder goede benutting van (toegediende) mineralen en meststoffen. Naast een afname van de landbouwproductie leidt dit tot eutrofiëring van grond- en oppervlaktewater en een toename van de gebiedsreactie op neerslaggebeurtenissen: meer en hogere afvoerpieken met kans op wateroverlast benedenstrooms. Bijkomend effect is dat bij een gedegradeerde bodem de beworteling achteruit gaat en de mogelijkheid om water en nutriënten op te nemen, afneemt. Dat kan vervolgens weer leiden tot verder afnemende bodemvruchtbaarheid en productiviteit en verhoogde kans op verliezen van nutriënten. Je komt terecht in een vicieuze cirkel waar je uit wilt geraken.

Naast de genoemde waterhuishoudkundige en bodemkundige aspecten, wordt onze maatschappij zelf complexer, een maatschappij waarin diverse actoren werken aan hun eigen toekomst en hun stem doen gelden. Efficiënt en klimaat- of toekomstbestendig bodem- en waterbeheer vraagt om afweging van kosten en baten, mogelijke bijsturing van wet- en regelgeving en maatregelen op maat. De veranderende maatschappelijke benadering vraagt om meer betrokkenheid en transparantie. Er zijn ontwikkelingen naar nieuwe regionale vormen van samenwerking (o.a. participatie) met meer partijen.



HOOFDSTUK 3

Ingrediënten voor een klimaatrobuuste inrichting van het watersysteem

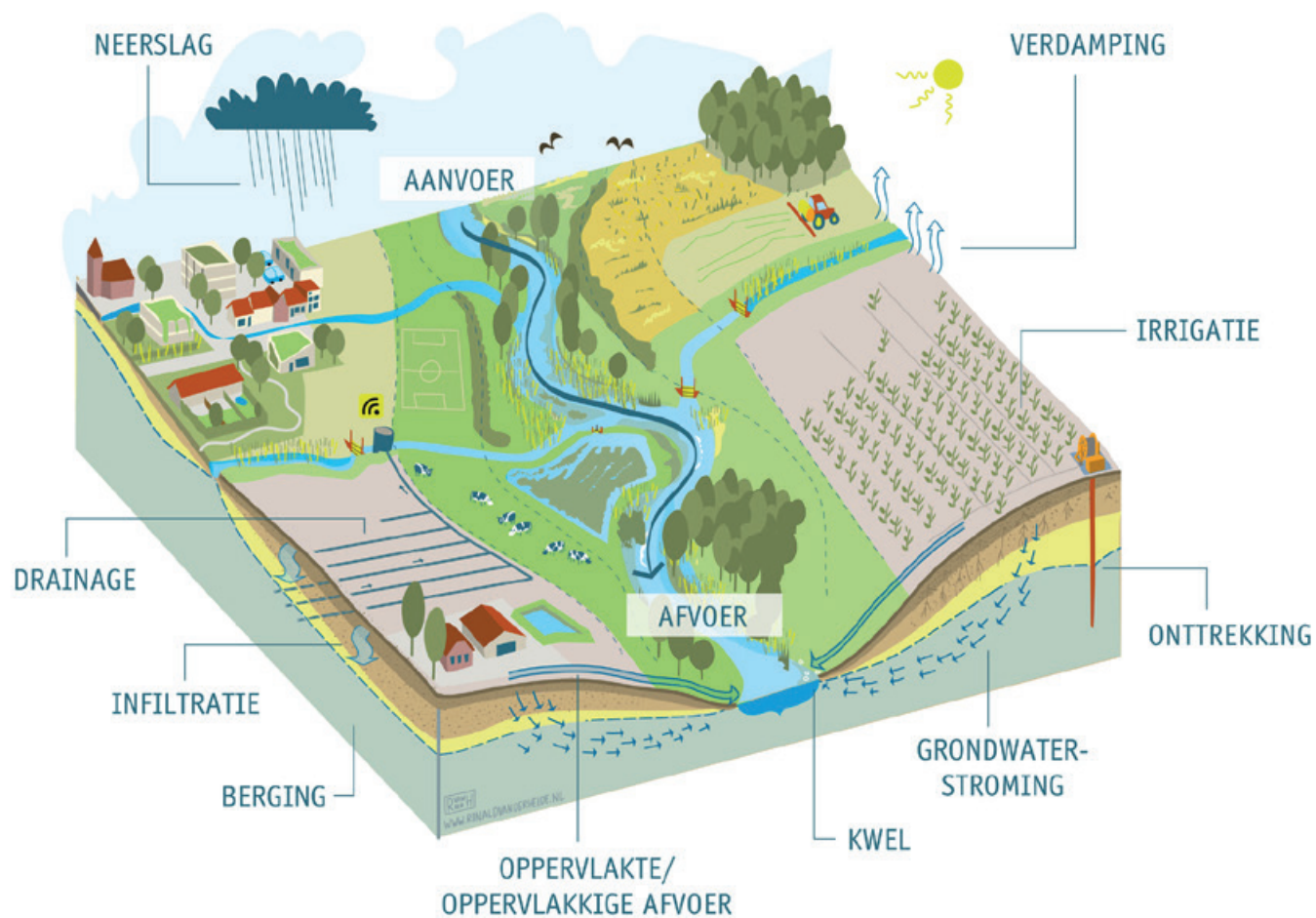
DENKEN EN WERKEN VANUIT EEN INTEGRALE BENADERING

Waterstromen zijn verbonden in het landschap. Dit geldt zowel voor het natuurlijke watersysteem van oppervlaktewater, grondwater, neerslag en verdamping, als voor het gebruik van het watersysteem door landbouw, industrie en stad, drinkwaterproductie en afvalwaterzuivering.

De basis voor het werken aan een klimaatrobuust bodem-watersysteem ligt in het verkrijgen van inzicht in de waterbalans ([Figuur 3](#)). Als je de waterbalans van een gebied kent, kun je bekijken welke balansposten je zou willen beïnvloeden en wat daarvoor de juiste ingrepen zijn. Door een grillig verloop van

FIGUUR 3

Dwarsdoorsnede van een beekdal en termen van de waterbalans. Maatregelen moeten bijdragen aan een grotere beschikbaarheid van water en een kleinere druk op het grondwater. De sleutel tot een klimaatrobuust stroomgebied is dat je vanuit verschillende compartimenten enerzijds werkt aan het vergroten van de aanvulling van grondwater en anderzijds aan het verminderen van de afvoer uit een systeem.



neerslag en een hogere vraag naar water voor verdamping, verandert de natuurlijke beschikbaarheid van water. Minder water sijpelt de grond in, omdat drainage en oppervlakkige afvoer zorgen voor vroegtijdige afvang van het water. Infiltratie van water in de bodem naar het diepere grondwater wordt hierdoor beperkt. Compensatie via aanvoer van water uit het hoofdwatersysteem is in het gebied van de hoge zandgronden vaak maar beperkt, of in het geheel niet mogelijk. Daarnaast neemt de vraag naar water vanuit het grondwatersysteem voor onder meer irrigatie toe (onttrekking). De beschikbaarheid van water neemt af en de vraag neemt toe, waardoor kwel voor kwelafhankelijke natuur en de basisafvoer van beken afneemt. Voor een robuuste zoetwatervoorziening op de zandgronden geldt dat het van belang is water vast te houden (berging) in een stroomgebied en de afvoer van water te beperken.

We moeten werken aan een afvoer die past bij het systeem. Deze afvoer is bij voorkeur stuurbaar en kan daarmee zo nodig afgeremd worden. Eén en ander in zo goed mogelijke harmonie met de grondgebruiksfuncties.

Vanuit verschillende compartimenten in het watersysteem kun je hieraan werken; er zijn meer mogelijkheden om aan de ‘afvoerknop’ te draaien. Cruciaal is om maatregelen die ingrijpen op de waterbalans in samenhang te beschouwen en inzicht te hebben in de doorwerking van een maatregel door het hele watersysteem. Je kunt doen wat je wilt om de grondwateraanvulling te vergroten, of minder te onttrekken, maar als de voorraad die je hiermee opbouwt, wordt afgevoerd, heeft geen enkele maatregel zin. Afvoer geldt, naast verdamping, veelal als de grootste onttrekking vanuit het watersysteem. Afwatering gebeurt niet alleen in de waterlopen in beheer van een waterschap, maar ontstaat juist door ontwatering via de (particuliere) haarkvaten van het watersysteem. Maatregelen om de afvoer te remmen, vragen daarom de inzet van, en afstemming tussen, verschillende gebruikers.

Het toewerken naar een klimaatrobuust bodem- en watersysteem gebeurt op ver-

schillende schaalniveaus binnen een landschap (ruimte) én in de tijd ([Figuur 4](#)). Deze verschillende schaalniveaus zijn ook met elkaar verbonden. Zo kan een maatregel op een agrarisch perceel bijdragen aan verbeterde groeicondities voor gewassen op perceelsniveau (perceel-agrariër). Voorbeelden daarvan zijn het verbeteren van de infiltratiecapaciteit van de bodem door het vergroten van het bodemleven, of het vasthouden van water met innovatieve drainagesystemen. Echter, deze maatregelen dienen ook het regionale oppervlaktewaterbeheer, doordat piekafvoeren beperkt kunnen worden (regio-waterschap). Ten slotte zorgen de maatregelen ervoor dat er minder water uit een gebied via het oppervlaktewater wordt afgevoerd, maar infiltreert in de bodem en het grondwater aanvult. Dit versterkt de beschikbaarheid van voldoende zoet water voor meerdere actoren in een gebied: natuur, landbouw, industrie en drinkwater (regio-alle actoren). Belanghebbenden/actoren moeten worden betrokken bij de effecten van maatregelen, voor hun directe eigen belang, maar ook voor indirecte belangen en eventueel tegenstrijdige belangen in het beheer en gebruik van het regionale systeem. Ondertussen moet er voldoende schoon water overblijven voor benedenstroomse gebruikers op een grotere schaal.

**Samen maken we gebruik van hetzelfde watersysteem.
Samen moeten we het op orde brengen en houden.**

De volgende paragrafen bieden verschillende ingrediënten om aan de slag te gaan met een klimaatrobuuste inrichting van het watersysteem (het overkoepelende doel). Steeds wordt antwoord gegeven op de vraag waar en hoe je kunt ingrijpen, hoe dit doorwerkt in de regionale waterbalans ([Figuur 3](#)) en hoe ingrepen in verschillende delen van het watersysteem onderling samenhangen. De ingrediënten zijn uitgewerkt in de volgende onderdelen:

- 1 Inrichten & beheren: welke maatregelen kun je nemen?
- 2 Opschalen & combineren: wat is het effect (lokaal en regionaal)?
- 3 Implementeren & uitvoeren (governance): hoe regelen we het?

Onderdeel 1 richt zich op het nemen van maatregelen in het veld ([Figuur 4, 1A-C](#)). Onderdeel 2 geeft kennis en middelen om de effecten van maatregelen op de beschikbaarheid van water voor het gewas, maar ook de regionale doorwerking van de maatregelen te duiden ([Figuur 4, 2A-C](#)). Onderdeel 3 is van belang om de (technische) kennis van de werking van maatregelen in te bedden in de (dagelijkse) praktijk van zowel grondgebruikers als de beheerder van het regionale watersysteem ([Figuur 4, 3](#)). Een klimaatrobuuste inrichting van gebieden wordt alleen bereikt als de onderdelen in samenhang worden beschouwd; elk ingrediënt is nodig.

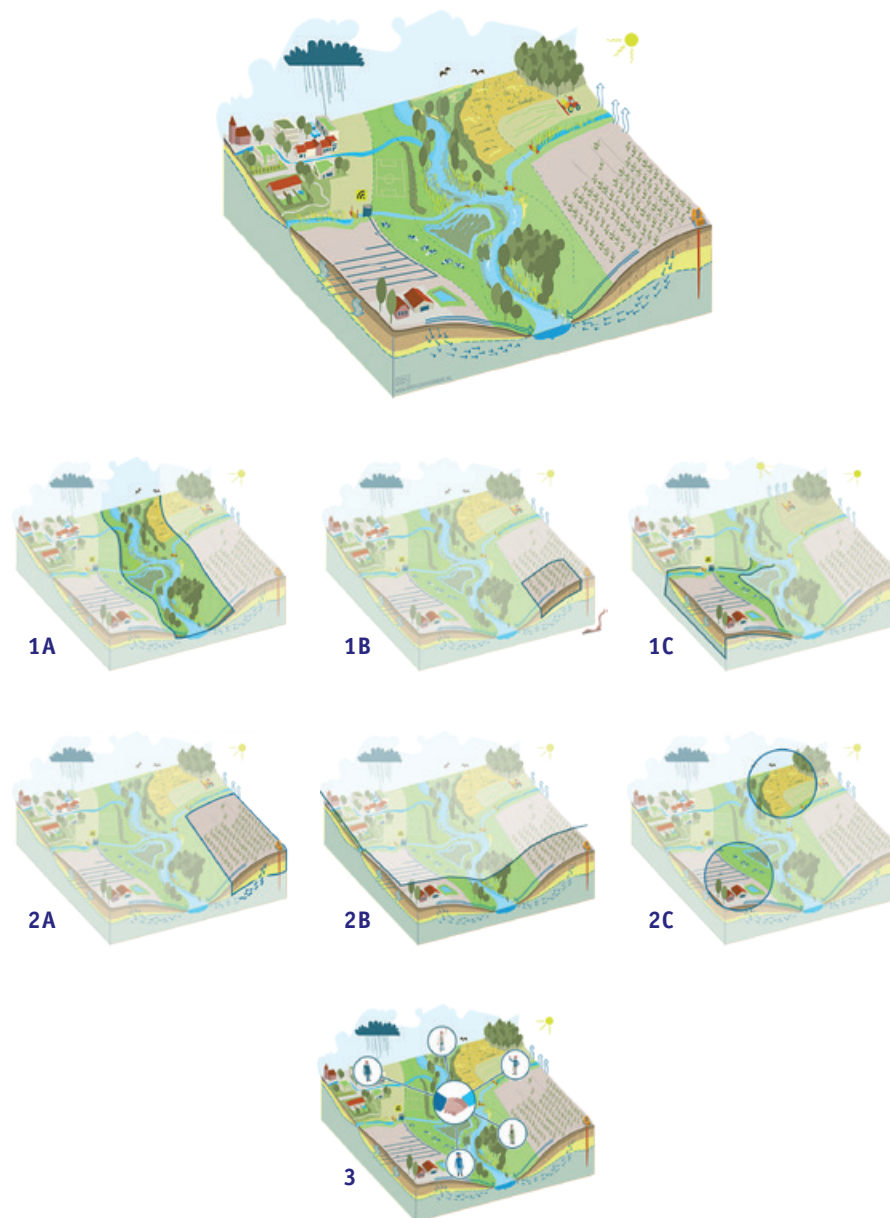
Lumbricus heeft op elk van deze onderdelen kennis ontwikkeld. Daarnaast is er ook kennis beschikbaar vanuit andere programma's. Deze programma's worden niet expliciet uitgelicht, maar er wordt wel naar verwezen.

FIGUUR 4

Actoren en waterstromen als essentiële onderdelen van een klimaatrobuust stroomgebied. Actoren en waterstromen zijn verbonden. Met elk van de uitgelichte onderdelen kun je aan de slag gaan, kun je gaan rekenen aan de effectiviteit van maatregelen, of kun je gaan starten met een (gebieds)proces om de benodigde samenwerking en maatregelen ook daadwerkelijk vorm te geven.

- 1A: In en rond de beek
- 1B: Water- en bodemmaatregelen
- 1C: Technische ingrepen
- 2A: Rekenmodellen voor perceelschaal
- 2B: Rekenmodellen voor regionale schaal
- 2C: Effectmodules voor landbouw en natuur
- 3: Governance en gebiedsproces

Door te klikken op een specifiek onderdeel word je doorverwezen naar de betreffende achtergrondinformatie.



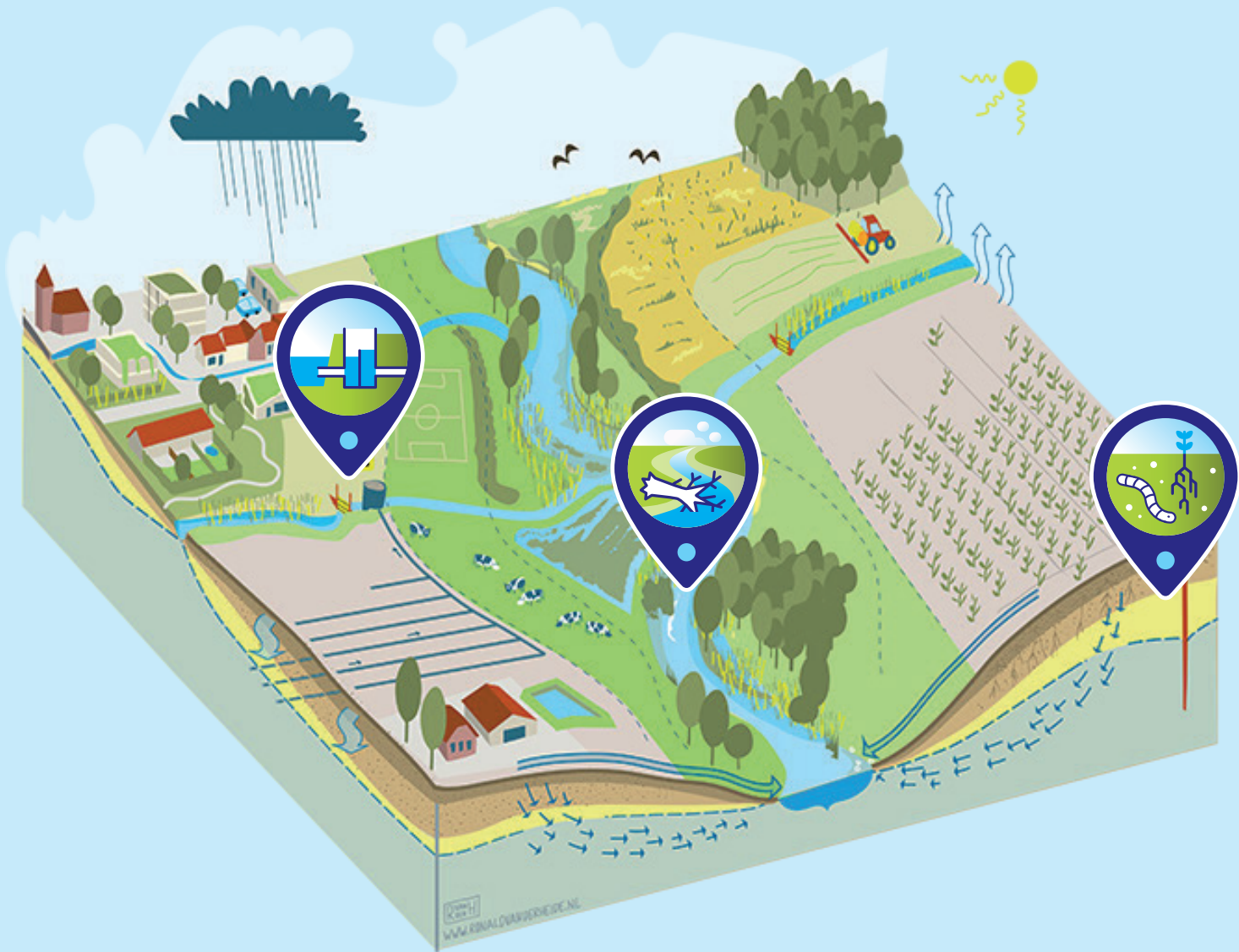
3.1 INRICHTEN & BEHEREN: WELKE MAATREGELEN KUN JE NEMEN?

Om de beschikbaarheid van water voor verschillende gebruikers en functies te verbeteren, kan water langer in gebieden worden vastgehouden. Hieraan is invulling te geven door het gebruik van natuurlijke processen, bijvoorbeeld door in beekdalen te werken aan tragere afvoersystemen, of door de spons- en bufferwerking van de bodem en het grondwatersysteem te verbeteren in hoger gelegen gronden.



Binnen het bodem-watersysteem gaat het bij het gebruik van technische maatregelen onder meer om het toepassen én goed gebruiken van (innovatieve) systemen voor actief beheer van grondwaterstanden, bodemvochtcondities en oppervlaktewaterpeilen tot in de haarvaten van het watersysteem. Zo wordt grond- en oppervlaktewater waar mogelijk tijdig vastgehouden en grondwater aangevuld waar nodig. Als wateroverlast dreigt, kan tijdig ruimte worden gemaakt door water af te voeren.







1A NATUURLIJKE INRICHTEN VAN DE BEEK(OMGEVING)

SLEUTELWOORDEN

Bouwen met natuur, maaibeheer, peilen en vegetatie

Het natuurlijker inrichten van beken, bijvoorbeeld door 'te bouwen met natuur', zorgt voor een tragere afvoer uit gebieden en leidt ertoe dat water langer wordt vastgehouden in de bodem en in de ondergrond hoger in het gebied. Zo werken maatregelen in en direct om een beek regionaal door.

HELPT BIJ HET BEANTWOORDEN VAN DE VRAAG:

- Hoe kom ik op de lange termijn tot klimaatrobuuste stroomgebieden?
- Hoe kan ik de effecten van droogte beperken?
- Hoe kan ik de afvoer uit mijn gebied vertragen?
- Hoe kan ik de effecten van wateroverlast beperken?
- Hoe kan ik water vasthouden in de ondergrond?
- Hoe maak ik gebruik van natuurlijke oplossingen?
- Hoe kan ik de doelstellingen van de KRW realiseren?
- Hoe herstellen we natuurwaarden in stroomgebieden?

ACHTERGROND

Waterafvoer vertragen kan op meerdere manieren. Door een beek te laten meanderen (kronkelen) stroomt het minder snel van A naar B. Maar ook het minder diep

maken van de beek zorgt ervoor dat de afvoer naar de beek wordt vertraagd: water wordt beter vastgehouden in de bodem en ondergrond hoger in het gebied. In bovenlopen van watersystemen kan vegetatieontwikkeling worden toegestaan om water langer vast te houden. Helemaal natuurlijk maken van beken gaat in veel gevallen niet, omdat naast het voorkómen van watertekorten ook functies als veiligheid tegen overstromingen en wateroverlast voor de landbouw moeten worden afgewogen. Het optimaliseren van beheer van vegetatie in watergangen is van belang om waterkwantiteits- en ecologiedoelen op elkaar af te stemmen.

OPGEDANE INZICHTEN

- Het nemen van (half)natuurlijke maatregelen (ook wel bekend als **Bouwen met Natuur**) kan ervoor zorgen dat er vanuit een vaak sterk gereguleerde huidige situatie in een beek een nieuwe dynamische evenwichtstoestand ontstaat waarin afvoer van water naar, maar ook uit de beek wordt vertraagd. Te denken valt aan het suppleren van zand in de beek, of het verminderen van onderhoud.

Bouwen met Natuur (BmN) is het actief gebruik maken van natuurlijke processen in beken en omliggende oevers om te anticiperen op de uitdagingen van de toekomst zoals wateroverlast en verdroging, en dit te koppelen aan een verbetering van het bekecosysteem. Het is een andere manier van denken over het inrichten van het landschap, waarbij zoveel mogelijk gebruik gemaakt wordt van natuurlijk potentieel. Dus bouwen mét de natuur in plaats van bouwen tegen de natuur. Je kunt denken aan het terugbrengen van kronkels in de rivier (meanderen), de rivier meer ruimte geven voor periodieke overstromingen, het verminderen van onderhoud en het aanbrengen van natuurlijke structuren (bijvoorbeeld dood hout). Natuurlijke processen kunnen zo veerkracht geven aan het systeem om te kunnen meebewegen met (klimaat)veranderingen. In algemene zin betekent dat voor de meeste beeksystemen dat maatregelen in het stroomgebied in relatie tot de afvoercharacteristiek altijd gericht zijn op een toename van de basisafvoer en een afvlakking van de piekafvoer. Vertrekpunt bij elke toepassing van BmN in regionale watersystemen is een goed in-



zicht in de landschapsecologische en -hydrologische context van de betreffende beek of kleine rivier, beekdalbreed (Makaske *et al.*, 2020). Ook op de hoge zandgronden zijn er grote verschillen in landschappelijke setting, van snelstromende beken op zandige terrasranden tot langzaam stromende beken in venige valleien. Aansluiten bij de natuurlijke processen blijft altijd maatwerk. Vanuit het concept BmN gere-deneerd zijn er vijf generieke aangrijpingspunten om het systeem natuurlijker en klimaatrobuster te maken: afvoer, verhang, oever- en beddingssubstraat, dimensies (breedte-diepte-verhouding bedding; inundatievlakte) en levende en dode vegetatie (o.a. dood hout).

Door de beekloop te verlengen wordt de afvoer van water uit het watersysteem ver-traagd. Een natuurlijke ontwikkeling van een rechtgetrokken waterloop naar een natuurlijk meanderende beek door het verwijderen van oeverbeschoeiing of steen-stort is vaak geen begaanbare weg. Vanuit het perspectief van BmN is het aanleggen van een ondergedimensioneerde initiële geulloop waarna de beek of rivier het pro-fiel zelf kan vormgeven, een adequate maatregel. Het oever- en beddingssubstraat van de beek bepalen in sterke mate de natuurlijke dimensies van een beek en de mor-fodynamiek. Geulen in zandig substraat hebben een grotere breedte-diepte-verhou-ding en van nature een hogere morfodynamiek dan substraten van meer coherent materiaal (leem, klei, veen) (Candel, 2020). Ondiepere brede beddingen dragen bij aan het verhogen van de drainagebasis van het beekdal en hebben positieve invloed op de grondwaterstand in de aangrenzende gronden. Door variatie in de stroming is in slingerende en meanderende beeklopen de substraat- en habitatdiversiteit van de bedding groter dan in rechte lopen.

Even belangrijk als de stroming van water door de beekloop is het transport van sediment door de geul. Vaak is dit aspect onderbelicht in de planvorming. In veel beeksystemen is een tekort aan transporteerbaar sediment waardoor verticale ero-sie optreedt en beddingen steeds dieper in het landschap komen te liggen, met als gevolg een diepere drainage. Ook na hermeanderen moet er voldoende sediment ter beschikking zijn om de natuurlijke beweging van sediment door de geul weer te laten optreden. Zandsuppletie kan worden ingezet om beekbeddingen op BmN-wijze

te verhogen, maar ook als maatregel om een tekort aan transporteerbaar sediment aan te vullen (Maas *et al.*, 2021).

Met gericht vegetatiebeheer kan worden gestuurd in de ontwikkeling van de beek. Een natuurlijk vegetatiebeheer (zonder begrazen en maaïen) leidt in de meeste ge-vallen tot de ontwikkeling van een bosstruweel op de oevers binnen tien jaar. Vanaf dan vallen ook de eerste bomen in de geul en wordt op een natuurlijke wijze dood hout toegevoegd aan het substraatpallet van de beek. Bos op de oevers zorgt er ook voor dat oevererosie wordt beperkt en zich langzaam een dynamisch evenwicht in-stelt. Daarnaast geeft bos schaduw aan de beek en zal de vegetatie in de beek te-ruglopen. Begrazing remt de natuurlijke bosontwikkeling, waardoor de vegetatie open blijft en oevers gevoeliger blijven voor afkalving. Een negatief effect bij een te grote begrazingsdruk is dat oevers vertrapt worden en de beek na uitvoering van de maatregelen niet in staat is een natuurlijke oevermorfologie te ontwikkelen. Beide beheertypen naast elkaar voeren leidt tot een grotere habitatdiversiteit, waardoor het leefgebied van beek- en beekdalsoorten toeneemt. In beeksystemen waar de ont-wikkelingsmogelijkheden van bos op de oevers (bijvoorbeeld om waterveiligheidsre-den) beperkt zijn, kan dood hout worden ingebracht. Dood hout kan ook worden ingezet om dynamiek aan de morfologische ontwikkeling van de geul toe te voegen, of de afvoer te vertragen. Uit onderzoek blijkt dat de inbreng van dood hout slechts een korte periode afvoervertragend werkt. De geul past haar morfologie aan aan de veranderde situatie, waardoor de afvoer weer normaliseert. Inbreng van dood hout kan ook de verticale erosie niet remmen (Geertsema *et al.*, 2020; Maas *et al.*, 2021).

➤ **Aangepast vegetatie- en maaibeheer in waterlopen kan bijdragen aan een goede balans tussen het beperken van wateroverlast en het verbeteren van de aquatische ecologie. Het kan ook een bijdrage leveren aan droogtebestrijding. Er moet wel rekening worden gehouden met het door klimaatverandering verhoogde risico op lokale piekbuien.**

De vegetatie in waterlopen bepaalt in belangrijke mate de snelheid waarmee water wordt afgevoerd. De vegetatie moet niet alleen voor waterkwantiteitsbeheer worden beheerd, maar ook voor waterkwaliteitsdoelen en ecologische doelen. Te veel vegetatie kan de doorstroming verminderen en wateroverlast tot gevolg hebben. Tegelijkertijd is vegetatie belangrijk voor het ecologisch functioneren van aquatische ecosystemen. In het huidige beheer wordt veel gebruik gemaakt van peilmetingen bij stuwen als deze real-time worden gemeten en hydraulische analyses op basis van algemene kenmerken van watergangen. Daarnaast is expert judgement van de beheerders in het veld belangrijk, of wordt er direct gereageerd op signalen van aangelanden. Dit werkt naar behoren vanuit het oogpunt van wateroverlast. Vanuit andere gezichtspunten, zoals het nastreven van ecologische doelen, is het problematischer. Veel maaien leidt tot ecologische schade door bijv. habitatverlies. Door een toenemende complexiteit - denk aan het afstemmen van het beheer op diverse gebruikersgroepen (landbouw, natuur, recreatie, stedelijk gebied), maar ook aan veranderingen in klimaat (meer extreme buien en meer droogteperioden) - neemt de behoefte aan nieuw maaibeheer én beleidstransparantie hierover toe.

Met name voor het waterkwantiteitsbeheer is inzicht nodig in de relatie tussen het voorkomen van vegetatie en de daarbij behorende verandering in ruwheid. Met een beter inzicht in de hoeveelheid, locatie en ontwikkelingssnelheid van vegetatie kan risicogestuurd maaibeheer worden ontwikkeld. Dit maaibeheer richt zich op locaties waar daadwerkelijk te veel vegetatie is, terwijl het op andere plekken kan worden gespaard om ecologische doelen te halen. Methoden om tot een meer ecologisch verantwoord en risicogestuurd maaibeheer te komen zijn maaibos, dottermaaien, stroombaanmaaien en verschillende maaistrategieën voor het bevorderen van ecologische doelen.

Een binnen Lumbricus ontwikkeld beekruwheidsmodel biedt handvatten om te analyseren hoe effectief een maaibeurt is geweest, hoe ruwheid van een watergang door het seizoen verandert als gevolg van de toename aan vegetatie en welke risico's er zouden zijn geweest als er niet gemaaid was in de betreffende watergang. Tevens kan met satellietbeelden van hoge resolutie (TripleSat en Superview) een goede analyse

worden gemaakt van regelmatig terugkerende 'hotspots' van hoge bedekkingen met vegetatie die kunnen helpen bij het bepalen van effectieve maaibeheerstrategieën ([Penning et al., 2020](#)).

GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Peilen en vegetatie in stromende wateren](#)
- [Monitoringstrategieën voor het meten van de effectiviteit van beekherstelprojecten](#)
- [Ontwikkelpaden voor een natuurlijker functioneren van beken en riviertjes](#)
- [Bouwen met Natuur maatregelen in beken](#)
- [Bomen, Bos en Waterbeheer](#)
- [Blauwe diensten](#)



1B VERBETEREN NATUURLIJKE SPONS- EN BUFFERWERKING VAN DE BODEM

SLEUTELWOORDEN

Bouwen met natuur, bodemleven, infiltratie, toevoegen substraat, nitraat, maaiveldafvoer

Een goede bodemstructuur en een goed bodemleven verbeteren de infiltratie van neerslag in de bodem. Maar ze zorgen er ook voor dat water beter wordt vastgehouden en planten dieper kunnen wortelen. Hierdoor verbetert de vochtvoorziening voor het gewas en vermindert de behoefte voor irrigatie uit grond- en oppervlaktewater. Maatregelen die nuttig zijn voor de agrariër, kunnen zo ook bijdragen aan het verbeteren van de waterbeschikbaarheid op regionaal niveau. Maar ze vergen wel een lange adem.

HELPT BIJ HET BEANTWOORDEN VAN DE VRAAG:

- Hoe moet ik droogte bestrijden?
- Hoe kan ik de afvoer uit mijn gebied vertragen?
- Hoe kan ik water vasthouden in de ondergrond?
- Hoe kan ik de doelstellingen van de KRW realiseren?
- Hoe kan ik zorgen voor een gezonde bodem voor agrariër en watersysteem?

ACHTERGROND

Een bodem die in goede conditie verkeert, zet een tijdelijk neerslagoverschot om in een vochtvoorraad in de bodem, waardoor een periode met neerslagtekort geheel of gedeel-

telijk kan worden overbrugd. De bufferende werking van de bodem vermindert daarmee de benodigde watersysteemcapaciteit voor zowel waterafvoer als wateraanvoer. Een verlaging van de oppervlakkige afvoer is gunstig voor de waterkwaliteit door vermindering van erosie en oppervlakkige afspoeling van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen. Werken aan verbetering van de bodemkwaliteit is werken aan organische stof, bodemchemie, bodemleven, bodemstructuur, waterhuishouding en beworteling. Bodemverbeterende maatregelen grijpen dan ook vaak aan op meerdere elementen van de bodemkwaliteit (zie ook [Bodem als buffer](#)). [Rekenmodellen](#) kunnen worden gebruikt om de effecten van bodemeigenschappen op het bodem-watersysteem te simuleren.

OPGEDANE INZICHTEN

- **Het verhogen van het organisch-stofgehalte kan onder meer bijdragen aan de water- en nutriëntenbeschikbaarheid van gewassen en de bewerkbaarheid van de bodem. Maar het toevoegen van organische stof, door het opbrengen van substraat zoals compost of slootmaaisel, kan ook leiden tot extra uitspoeling van nitraat naar het grondwater.**

Over het belang en het effect van organische stof voor de bodemkwaliteit en het watervasthoudend vermogen van de bodem is veel informatie vastgelegd in de [Deltafact organische stof](#). Er bestaan verschillende initiatieven waarbij wordt getracht het gehalte organische stof in de bodem te verhogen door het toevoegen van substraat. Afbraak van organisch materiaal levert echter ook nitraat op, dat kan uitspoelen naar het grondwater. Agrariërs (en waterbeheerders) zullen bij het toedienen van substraat rekening moeten houden met de daaruit vrijkomende nutriënten; de dosering van andere meststoffen kunnen ze daar dan op aanpassen. Het stikstofgehalte en de afbraaksnelheid (humificatiecoëfficiënt) van het substraat moeten hiervoor bekend zijn. Dit vraagt om aanvullend inzicht in de afbraaksnelheid van verschillende substraten en de relatie met nitraatuitspoeling, voordat de maatregelen op grotere schaal toegepast kunnen worden. Het zonder voorwaarden toelaten van toediening van organisch materiaal vormt een risico voor de kwaliteit van het grondwater en daarmee ook voor het oppervlaktewater.



Het is van belang dat de normen voor nitraatconcentraties niet worden overschreden en de risico's hierop dienen per locatie inzichtelijk gemaakt te worden. Uit metingen in een veldproef bij de Raam, waar verschillende typen substraat werden opgebracht (insectensubstraat, compost), en een veldproef in het stroomgebied van de Vecht (bokashi), volgt dat nitraatconcentraties in het grondwater tijdens het winterseizoen hoger zijn onder de behandelde plots in vergelijking met de referentiesituatie ([De Weert et al., 2020](#); Heinen (red.), 2021). Voor het op langere termijn verhogen van de organische-stofgehaltes van de bodem, met de mogelijk bijkomende voordelen voor de bodemgezondheid en het water- en nutriëntenvasthoudend vermogen, is persistent organisch materiaal waarschijnlijk beter dan snel afbrekend organisch materiaal. Door de snelle afbraak en uitspoeling van de in de proef gebruikte substraten is het blijvende positieve effect voor de bodemgezondheid waarschijnlijk nihil.

Bij het toedienen van organisch materiaal kunnen agrariërs in het bemestingsplan bezuinigen op de andere meststoffen om overdosering en uitspoeling van nutriënten te voorkomen. Hierbij kan de bemesting bestaan uit een combinatie van snel afbrekend organisch materiaal, waarbij het vrijkomende nitraat snel door het gewas opgenomen kan worden, en persistent organisch materiaal dat de bodemgezondheid op langere termijn verbetert.

➤ **Pendelende regenwormen (*Lumbricus terrestris*) kunnen de bodemstructuur en infiltratie van water verbeteren en beworteling naar diepe lagen bevorderen, waardoor gewassen droogtetoleranter worden. Het introduceren van regenwormen is echter geen sinecure; zo is het voedingsaspect nog veelal onderbelicht voor succesvolle introductie en vermenigvuldiging.**

In Nederland komen 18 soorten regenwormen voor die kunnen worden onderverdeeld in drie groepen: strooiselbewonende, bodembewonende en pendelende regenwormen. Met hun gangenstelsel kunnen regenwormen de waterinfiltratie verhogen. Specifiek de pendelende regenworm kan met zijn diepe verticale gangen de waterinfiltratie verdrievoudigen en de beworteling naar diepe lagen bevorderen,

waardoor grasland en andere gewassen droogtetoleranter worden. Nadelen van de pendelende regenworm zijn dat hij niet op alle graslandpercelen voorkomt en zich maar traag verspreidt.

In een tweejarig onderzoek (Heinen (red.), 2021) is onderzocht of de pendelende regenworm op grasland op zandgrond kan worden geïntroduceerd, overleeft en zich vermenigvuldigt. In een proefopstelling op blijvend grasland zijn volwassen pendelende regenwormen in april 2019 geïntroduceerd. In november 2019 konden nog 33% van de geïntroduceerde regenwormen worden teruggevonden. Echter in juli 2020 was dit nog maar 6%. Procentueel werden er in juli wel veel meer jonge pendelende wormen gevonden (50%) dan in november 2019. Dit betekent wel dat er een zekere vermenigvuldiging heeft plaatsgevonden, hoewel dit relatief laag is geweest. Ook is in de proefopstelling onderzocht of lossere grond de introductie en overleving kan vergroten. De overleving blijkt in losse grond niet veel groter dan in het blijvend grasland zelf; wel gingen de pendelende wormen dieper in de lossere grond. Er lijkt ook een relatie te zijn met de allochtone wormenpopulatie. Als er veel strooiselbewonende wormen zitten die vergelijkbaar voedsel eten als pendelende regenwormen, dan lijkt er een zekere mate van concurrentie tussen wormengroepen. Hoewel de wormen in de proefopstelling werden gevoerd met vaste mest, lijkt het voedingsaspect nog onderbelicht bij de introductie en vermenigvuldiging van pendelende regenwormen.

➤ **Het vergroten van de infiltratiecapaciteit van de bodem, bijvoorbeeld door wormgangen, kan bijdragen aan het beperken van maaiveldafvoer. Echter: niet elke maatregel zorgt ook voor een blijvende verbetering.**

Hoewel bekend is dat maaiveldafvoer en plasvorming op grote schaal in Nederland voorkomen, is in vergelijking tot andere hydrologische routes nog weinig bekend over de precieze bijdrage van maaiveldafvoer aan de afvoer van water en stoffen. In een natte situatie komen plasvorming en maaiveldafvoer sneller voor doordat minder water in de bodem kan worden geborgen. Om modelconcepten te verbeteren en de effectiviteit van maatregelen om de infiltratiecapaciteit van bodems te

vergroten en maaiveldafvoer te beperken te kwantificeren, is kennis nodig over de vraag waar en wanneer maaiveldafvoer voorkomt.

In een veldproef (Heinen (red.), 2021; Kaandorp *et al.*, 2021) is het effect van verschillende maatregelen op maaiveldafvoer tegen het licht gehouden, als een eerste indicatie van de werking van maatregelen. Deze maatregelen zijn 1) de [vertidrain](#), 2) wormen en 3) de graslandwoeler. Na uitvoer van de maatregelen op proefvlakken, is voor een zomersituatie en een wintersituatie neerslag nagebootst met beregening. De hoogste infiltratiesnelheden werden gemeten in de plots met (geboorde) wormgangen. De wormgangen waren vlak voor de metingen aangebracht zodat zeker was dat ze aanwezig waren. Het aanbrengen van vertidrainen en het losmaken d.m.v. woelen had enkele maanden voorafgaand aan de metingen plaatsgevonden, zodat de toestand in de bodem niet veel meer verschilde van die in de referentiebehandeling. Dit geeft aan dat beheer en onderhoud van de infiltratiebevorderende maatregelen van groot belang zijn. De praktische ervaringen van de binnen Lumbricus toegepaste veldproef zijn zeer waardevol voor vervolgonderzoek om de effectiviteit van maatregelen gedegen te onderbouwen en effecten te kwantificeren.

➤ **Het inzaaien of telen van gewassen met diepere beworteling maakt ze minder kwetsbaar voor droogte, maar bodemverdichting en een lage voederwaarde beperken de potenties van deze maatregel.**

Dit blijkt uit een proef en demo's binnen Lumbricus (Heinen (red.), 2021) gericht op maatregelen voor een diepere en intensievere beworteling van ruwvoergewassen in de melkveehouderij, met als doel het tegengaan van ondergrondverdichting en het verminderen van opbrengstverliezen door droogte.

Op basis van wetenschappelijke studies in het buitenland is gebleken dat sorghum kan wortelen in verdichte lagen. Omdat sorghumrassen beschikbaar komen voor het Noordwest-Europese klimaat, als aanvulling of vervanging van snijmaïs, zijn

er testen uitgevoerd in een meerjarig proefveld in Nederland (Van den Akker *et al.*, 2021). De voorlopige resultaten laten zien dat sorghum weliswaar een fijner en intensiever wortelstelsel heeft dan maïs en ook een hogere wortelmassa kan hebben in diepere lagen (tot 50 cm gemeten), maar dat dit zich niet vertaalt in vermindering van ondergrondverdichting. De variatie in beworteling was bij sorghum rasafhankelijk (met name biomassa-typen met geringe voederwaarde hebben een diepere beworteling). Daarnaast lijkt sorghum gevoelig voor lage bodemtemperaturen en te droge bovengrond na het zaaien en tijdens de kiemingsfase, waardoor de plant zich met name in de extreem droge zomers van 2018 en 2019 niet optimaal ontwikkelde. Mogelijk heeft dit de wortelgroei geremd.

Naast de proef met sorghum is bij twee melkveehouders in Stegeren geëxperimenteerd met grassen en gras-kruidentmengsels voor diepere beworteling en minder droogtegevoeligheid. Rietzwenkgras heeft een duidelijk dichtere beworteling dan gras-kruidentmengsels en Engels raaigras, en ook de hoogste productie. De voederwaarde is echter laag. Het kruidentmengsel bevatte twee seizoenen na het inzaaien weinig andere kruiden dan smalle weegbree en toonde geen bijzonder diepe beworteling. Het gaf een iets lagere productie met een iets hogere voederwaarde dan puur Engels raaigras. Het belang van diepere en intensievere beworteling wordt ingezien door betrokken melkveehouders, maar de voederwaarde van rietzwenkgras valt tegen. Daarom wordt aanbevolen om mengsels in te zaaien met een lager aandeel rietzwenkgras.

GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Belang van organische stof voor het waterbeheer](#)
- [Blauwe diensten](#)
- [Bodem als buffer](#)
- [Natte teelten](#)
- [Peilen en vegetatie](#)
- [Sturingsinstrumenten vitale bodem](#)
- [Zoetwater zelfvoorzienendheid van de landbouw](#)



1C TECHNISCHE INGREPEN IN DE HYDROLOGIE

SLEUTELWOORDEN

Drainage, subirrigatie, haarvaten, slimme stuwen, alternatieve bronnen, (online) anticiperen

Met hydrologische maatregelen tot in de haarvaten van het watersysteem, maar ook door gebruik te maken van de ondiepe ondergrond, kunnen waterbeheerders vroegtijdig anticiperen op zowel wateroverlast als watertekorten. Naast het vasthouden van water, kan grondwater actief worden aangevuld. Dit alles vraagt wel om een goede afstemming tussen agrariërs en waterbeheerders; er moet immers voldoende water beschikbaar zijn voor alle functies. Door grondwater aan te vullen met water dat anders snel afgevoerd zou worden uit een gebied, wordt de zelfvoorzienendheid van een regio vergroot.

HELPT BIJ HET BEANTWOORDEN VAN DE VRAAG:

- Hoe moet ik droogte bestrijden?
- Hoe kan ik wateroverlast voorkomen?
- Hoe kan ik de afvoer uit mijn gebied vertragen?
- Hoe kan ik water vasthouden in de ondergrond?
- Hoe kan ik grondwater aanvullen (lokaal en regionaal)?
- Hoe kan ik actief sturen op de weersverwachting?

ACHTERGROND

Weersomstandigheden binnen Nederland leiden in toenemende mate tot de behoefte aan uitgekiend perceelsmanagement, waarbij lokale beheermaatregelen belangrijk zijn om het bodemwater goed te beheren, zowel in ruimte als tijd. Deze maatregelen richten zich zowel op aspecten van waterkwantiteit als waterkwaliteit en zowel op grondwater als oppervlaktewater. Kansen en risico's dienen zorgvuldig te worden afgewogen. Waar zijn win-win situaties te realiseren voor verschillende belanghebbenden (agrariërs, waterschappen, drinkwaterbedrijven, natuurbeheer) door scherpere sturing in het waterbeheer? Hiervoor kunnen innovatieve middelen worden ingezet voor beter watermanagement op het perceel, die leiden tot én meer en beter water vasthouden in het watersysteem én tot een betere watervoorziening van het gewas. [Rekenmodellen](#) kunnen worden gebruikt om de effecten van technologische maatregelen op het bodem-watersysteem te simuleren.

OPGEDANE INZICHTEN

- Regelbare drainage met subirrigatie kan zorgen voor een hogere grondwaterstand en betere groeicondities voor gewassen op perceelschaal, maar ook tot vermindering van de druk op het regionale grondwatersysteem. Wel vraagt de maatregel extra water uit bijvoorbeeld oppervlaktewater.

Regelbare drainage is ontwikkeld om zowel grondwater te kunnen afvoeren als water gecontroleerd vast te kunnen houden op een perceel. Dit systeem maakt het mogelijk om piekafvoeren te verminderen, waardoor benedenstrooms wateroverlast vermeden of gereduceerd kan worden. Het systeem heeft het voordeel dat het grondwaterniveau en de bodemvochtcondities actief gestuurd kunnen worden. Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) ([Van den Eertwegh et al., 2013](#)) is een continu regelbaar drainagesysteem waarin het drainageniveau via telemetrie op afstand ingesteld en bestuurd kan worden. KAD is voorzien van sensoren en dataloggers die het beheer van het systeem en het effect daarvan kunnen meten en vastleggen. Met behulp van een KAD-management-algoritme dat gebruik maakt van actuele



meetgegevens van de hydrologische toestand in een perceel, de weersverwachting en [modelsimulaties](#), kan er geautomatiseerd tijdig geanticipeerd worden op te droge of natte (groei)condities.

Regelbare drainagesystemen kunnen ook ‘omgekeerd’ worden gebruikt om subirrigatie te realiseren, waardoor er drie gebruiksmogelijkheden ontstaan: draineren, vasthouden en aanvoeren. Zo kan gestuurd worden op optimale condities voor het gewas en kan een agrariër het bodemvochtgehalte op zijn perceel actief beheren; hierdoor neemt in principe de beregeningsbehoefte af. De wortelzone van de vegetatie moet door subirrigatie, eventueel via capillaire opstijging, gevoed worden. Via subirrigatie moet dus een verhoging van de grondwaterstand gerealiseerd worden. De effectiviteit van subirrigatie voor de gewasopbrengst hangt af van het type gewas, bodemopbouw, bodemtype en het regionale grondwatersysteem. De mate van wegzijging naar de ondergrond is voor een groot deel bepalend voor de hoeveelheid water die nodig is om de grondwaterstand op een gewenst niveau te houden. Er treedt minder verlies op door interceptieverdamping bij subirrigatie dan bij beregening. Wanneer sprake is van enige weerstand tegen wegzijging, is de benodigde netto wateraanvoer voor subirrigatie lager dan voor beregening ([Bartholomeus et al., 2019](#)). De totale wateraanvoer bij subirrigatie is wel hoger dan bij beregening, maar het meeste water gaat naar de ondergrond en blijft dus behouden in het watersysteem (De Wit *et al.*, 2021b). Daarmee is dit ook een maatregel die enerzijds van belang is voor een agrariër, maar ook een rol speelt in het aanvullen van het regionale grondwatersysteem. Goed gebruik en beheer van de systemen is cruciaal. Of en hoe de maatregel, inclusief goed beheer, kan worden ingepast in het regionale watersysteem kan worden berekend met [ruimtelijke hydrologische modellen](#) die hiervoor geschikt zijn gemaakt. Vanaf 2018 wordt het KAD-systeem met subirrigatie via een waterpomp op zonne-energie toegepast in Stegeren, waarbij sinds 2019 de bediening van het systeem geautomatiseerd is (De Wit *et al.*, 2021a).

Voor subirrigatie kan gebruik gemaakt worden van verschillende bronnen van zoet water, zoals oppervlaktewater, lokaal grondwater en gezuiverd restwater (De Wit *et*

al., 2021b). De keuze voor de bron hangt af van de beschikbaarheid van water en de kwaliteit van het bronwater. Daarnaast heeft deze keuze invloed op het gehele watersysteem. Hergebruik van restwater, bijvoorbeeld, kan helpen om de druk op het grondwater te verminderen, maar heeft ook invloed op afvoeren. Naast waterkwaliteit is dus aandacht voor een goede balans tussen lokale watervraag en regionale waterbeschikbaarheid essentieel.

➤ **Slimme stuwen, zoals de SAWAX, zijn een manier om het door het waterschap gevoerde peilbeheer tot in de haarvaten van het watersysteem effect te laten hebben en water vast te houden.**

In gebieden die voor water afhankelijk zijn van de regen die valt en de grondwater- en bodemvochtvoorraad die er is, moet er slim(mer) worden omgegaan met draineren en het afvoeren van overtollig water. Dat begint al in de haarvaten. Het betreft vaak kavelsloten, die niet in operationeel beheer zijn bij het waterschap, maar bij een particulier, zoals een boer of landgoedeigenaar. De ‘slimme’ stuw [SAWAX - Smart Adaptive Waterlevel eXtender](#) (Van Bakel *et al.*, 2020) is een innovatief instrument dat perceeleigenaren en waterschappen in staat stelt om slimmer met het waterbeheer in kavelsloten van percelen om te gaan. Waar KAD direct inspeelt op de (grond)waterhuishouding van een perceel/kavel, werkt de SAWAX via de kavelsloot en het oppervlaktewaterpeil indirect door op alle aangesloten bovenstrooms gelegen percelen.

De SAWAX is een slimme stuw die als doel heeft in hellende gebieden water gecontroleerd vast te houden in perceels- en kavelsloten, die onder de huidige omstandigheden geen optimaal peilbeheer kennen. De SAWAX is een mechanische stuw. Deze kan automatisch en autonoom, dus zonder centrale sturing, tot een 0,5 m hogere waterstand in de bovenstrooms gelegen kavelsloten realiseren dan de waterstand aan de benedenstroomse, peilbeheerste zijde, veelal een leggerwaterloop in beheer bij het waterschap. Hierdoor wordt het bereik van het door het waterschap gevoerde peilbeheer over een veel grotere oppervlakte effectief. Dit levert een be-

tere functiebediening op. Ook kan hierdoor meer water worden vastgehouden en geborgen in het voorjaar, bij het opzetten van het peil van winter- naar zomerpeil, of in perioden waarin geanticipeerd gaat worden op voorspelde droge perioden.

De hoogte van de stuwdrempel van de SAWAX is afhankelijk van het benedenstroomse waterpeil. Instelbare drijvers bepalen hoeveel hoger de stuwdrempel is, vergeleken met dat benedenstroomse peil. Bovenstrooms wordt zo mechanisch-automatisch een hoger stuwpeil ingesteld. Hierdoor kan er tijdens een afvoersituatie meer water geborgen worden in watergangen in de haarvaten én, nog belangrijker, zal de ontwatering van aangrenzende percelen door deze watergangen gereduceerd worden. Dit leidt tot het vasthouden van meer grondwater in de aangrenzende percelen. Als de afvoer stagneert, zal het peil in de watergangen bovenstrooms van de SAWAX langer hoger blijven. Mocht het waterpeil uitzakken tijdens droog weer, en/of vanwege wegzijging naar het grondwater, dan kan er water aangevoerd worden vanaf de benedenstroomse zijde. Water op een hoger peil bovenstrooms kan via infiltratie de aangrenzende percelen (deels) van water voorzien.

Het is van belang om zich te realiseren dat het slagen van de SAWAX en het management ervan mede afhangt van het benedenstrooms gevoerde (stuw)peilbeheer. Het effect van de SAWAX wordt groter als het benedenstroomse waterpeil hoger is en/of de drijvers zo worden ingesteld, dat ze een groter peilverschil realiseren. Toepassing van de SAWAX is een manier om de samenwerking tussen waterschap en perceeleigenaren vorm te geven. Samen hebben ze er belang bij om het waterbeheer klimaatbestendiger te maken dan nu het geval is. Als beide partijen afspraken maken over het te voeren stuwpeilbeheer, dan wordt het waterbeheer effectief tot in de haarvaten.

Sinds november 2018 staat de SAWAX (versie 2.0) opgesteld in een standaard duiker in een kavelsloot te Stegeren (De Wit *et al.*, 2021b). Deze versie is voorzien van een wateraanvoervoorziening via een waterpomp op zonne-energie. Oppervlaktewater benedenstrooms van de SAWAX kan opgepompt worden en via de duiker naar het bovenstroomse deel van de kavelsloot met een hoger waterpeil stromen.

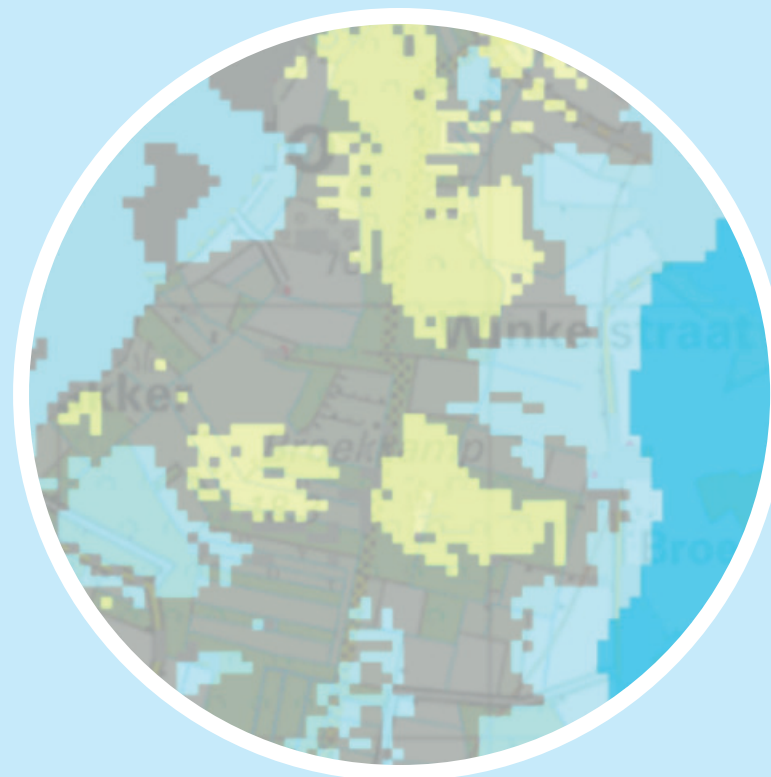
GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Regelbare drainage](#)
- [Hergebruik van effluent](#)
- [Bodem als buffer](#)
- [Bodemvocht gestuurd beregenen](#)
- [Onderwaterdrainage](#)
- [Remote sensing waterkwantiteits- en waterkwaliteitsbeheer](#)
- [Waterreservoirs op bedrijfsniveau](#)
- [Blauwe diensten](#)
- [Beregening](#)
- [Monitoringstrategieën voor het meten van de effectiviteit van beekherstelprojecten](#)

3.2 OPSCHALEN & COMBINEREN: WAT IS HET EFFECT (LOKAAL EN REGIONAAL)?

Uit de voorafgaande paragrafen komt naar voren dat maatregelen voor een klimaat-robuuste inrichting van stroomgebieden op verschillende schalen en locaties binnen een stroomgebied genomen kunnen worden. Innovaties zijn echter pas succesvol als ze maatschappelijk zijn ingebed en ook maatschappelijke waarde creëren. Voor maatschappelijke inbedding gelden vier dimensies die beschouwd moeten worden: technologie, economie, regulering en sociaal-cultureel (zie ook: [§ 3.3 Implementeren & uitvoeren \(governance\): hoe regelen we het?](#)).

In deze sectie wordt invulling gegeven aan de technologische inbedding van maatregelen door het toepassen van rekenmodellen. Rekenmodellen kunnen worden gebruikt om inzicht te krijgen in de doorwerking van lokale maatregelen op regionale schaal en voor het optimaliseren van de waterhuishouding in stroomgebieden. Rekeninstrumenten vormen daarmee een belangrijke schakel in het vertalen van de effecten van lokale maatregelen naar het niveau van het regionale stroomgebied. Het zijn middelen waarmee kan worden geduïd hoe en waar maatregelen effectief zijn, en wat het effect is van een combinatie van maatregelen in een stroomgebied.







2A REKENMODELLEN VOOR PERCEELSCHAAL

SLEUTELWOORDEN

Infiltratie, gewasgroei, drainage, subirrigatie, Waterwijzer Landbouw

Met modellen zoals SWAP-WOFOST en Hydrus2D kunnen de effecten van perceelmaatregelen (bijv. gewaskeuze, bodemverbetering, subirrigatie) op de lokale waterbalans én de gewasgroei worden gesimuleerd. Hiermee zijn het belangrijke instrumenten om maatregelen te ontwerpen en vóóraf inzicht te hebben in de werking van een maatregel voor een specifieke situatie.

HELPT BIJ HET BEANTWOORDEN VAN DE VRAAG:

- Hoe kan ik de effecten van maatregelen op perceelschaal doorrekenen?
- Wat is het effect van maatregelen op de waterbalans?
- Hoe werken maatregelen door op de gewasgroei?
- Hoe kan ik het beheer van maatregelen / systemen het best inrichten in de tijd?

ACHTERGROND

Een (klimaat)robuuste vertaling van waterhuishoudkundige condities naar gewasopbrengst wordt gebaseerd op de essentiële processen die de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer beschrijven. Een veel gebruikt model om op perceelschaal de processen in de wisselwerking tussen bodem-water-plant-atmosfeer modelmatig te beschrijven is [SWAP](#) (Soil-WaterAtmosphere-Plant), gekoppeld aan

[WOFOST](#) (WORLD FOOD STUDIES). SWAP beschrijft de waterbalans in de onverzadigde zone en deels in het bovenste grondwater (Soil-Water) in relatie tot meteorologische (klimaat) gegevens (Atmosphere) en gewasopname en gewasgroei (Plant). Het is een ééndimensionaal model dat rekent op dagbasis, waarmee snel een groot aantal modelschematisaties voor lange perioden kunnen worden doorgerekend. SWAP in combinatie met het gewasgroeimodel WOFOST vormt tevens de basis voor de [Waterwijzer Landbouw](#). Modellen als [Hydrus-2D](#) kunnen de grondwaterstroming in 2D in beeld brengen. Voor het rekenen op [regionale schaal](#) is het MetaSWAP-concept beschikbaar. Cruciale data voor berekeningen met SWAP en MetaSWAP zijn bodemfysische data, geordend en ontsloten via de Staringreeks 2018 ([Heinen et al., 2020](#)) en de Bodemfysische EenhedenKaart ([BOFEK](#)). Vaak worden dan ook de [combinaties van \(model\)instrumenten SWAP-MetaSWAP-WOFOST](#) toegepast.

Modellen als SWAP en Hydrus2D kunnen worden toegepast om de effecten van maatregelen op perceelschaal te simuleren. Dit betreft maatregelen voor het verbeteren van het watervasthoudend vermogen en de infiltratiecapaciteit van de bodem. Ook zijn ze geschikt om maatregelen die betrekking hebben op de drainagesituatie, zoals regelbare drainage met subirrigatie, te ontwerpen en de effecten ervan te analyseren. Met zulke modelinstrumenten kunnen ook verschillende toepassingsvarianten van een maatregel worden verkend en (klimaat)scenario's worden doorgerekend. Deze modelverkenningen kunnen als ondersteuning dienen bij gesprekken tussen grondgebruikers en waterbeheerders over het optimale ontwerp en beheer van perceelsmaatregelen.

OPGEDANE INZICHTEN

- **Bodeminfiltratie zonder en met verticale (worm)gangen kun je in rekenmodellen schematiseren via een aangepaste beschrijving van de poriëngrootteverdeling, zodat het effect van de maatregel op de waterhuishouding kan worden gesimuleerd.**



Om meerdere redenen is het goed dat er biologische activiteit is in de bodem. Hierbij kunnen [wormen](#) een bijdrage leveren aan het verbeteren van de infiltratiecapaciteit van de bodem. Voor met name de wormsoorten die diepe, verticale wormgangen onderhouden geldt dat deze wormgangen onder natte omstandigheden kunnen bijdragen aan het verminderen van [oppervlakkige afvoer](#) en dus aan het verbeteren of verhogen van de infiltratie. De aanwezigheid van dergelijke grotere poriën in de bodem geeft aan dat de verdeling van de poriëngroottes wordt aangepast.

Aan het SWAP-model is een module toegevoegd, die goed in staat blijkt te zijn om gemeten [infiltratiesnelheden](#) (onder verzadigde omstandigheden) te reproduceren. De aanwezigheid van verticale wormgangen leidt tot een hogere infiltratiesnelheid: zowel gemeten als gemodelleerd. Uiteraard maakt het niet uit hoe die verticale gangen zijn ontstaan: mechanisch aangebrachte gangen (vertidrainen) kunnen ook op deze manier beschouwd worden. Wel is het zo dat het onderhouden van die gangen belangrijk is, en dat doen de wormen in principe van nature, mits de omstandigheden in de bodem goed zijn door goed bodemmanagement. In sectie 2A [Rekenmodellen voor regionale schaal](#) wordt ingegaan op de gesimuleerde effectiviteit van wormgangen voor zandgronden in Nederland.

Naast de gewoonlijke piek aan poriënstralen van de bodemmatrix, ontstaat er een tweede piek die de wormgangen representeren. De landelijke schematisatie van de bodemfysische eigenschappen (Staringreeks; BOFEK2012) gaat standaard uit van een beschrijving zonder een tweede piek in poriëngroottes. In *Lumbricus* is een alternatieve, theoretische beschrijving van de bodemfysische eigenschappen toegepast die geschikt is om zo'n zogenaamde bi-modale poriëngrootteverdeling te kunnen beschouwen (Heinen *et al.*, 2021). Hierbij wordt de stroming in deze gangen niet expliciet gemodelleerd, maar worden de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van de lagen bij aanwezigheid van deze gangen aangepast. De extra benodigde parameters (drie) worden daarbij afgeleid uit het aantal wormgangen en hun diameter. Vervolgens kunnen het watergehalte en de doorlatendheid bij verzadiging worden aangepast. De genoemde aanpassing gaat ervan uit

dat de beschikbare informatie over waterretentie en doorlatendheid (Staringreeks, BOFEK2012) betrekking heeft op situaties zonder wormgangen. Situaties met wormgangen kunnen dan daaruit worden afgeleid.

➔ **Het toepassen van uiteenlopende manieren van grondbewerking (zoals ploegen en strokenfrees) kan in modellen worden beschreven als een verandering in de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van de bodem. Op deze manier kan zowel het effect van uiteenlopende vormen van grondbewerking worden gekwantificeerd op watervasthoudend vermogen als aanvoer vanuit de ondergrond.**

Aan het eind van een achtjarige proef, waarin verschillende vormen van grondbewerking zijn vergeleken op gewasreacties (maïsopbrengst), zijn voor de behandelingen ploegen en strokenfrees de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van de bovenlagen bepaald en van enkele bodemlagen daaronder. Visueel lijkt het zo dat in de bouwvoor er meer water in de strokenfrees-behandeling dan in de ploegen-behandeling aanwezig is, maar de waterbeschikbaarheid voor het gewas blijkt vrijwel gelijk te zijn. De doorlatendheid onder wat drogere omstandigheden is voor de strokenfrees-behandeling wel lager. In de laag onder de bouwvoor is duidelijk dat de dichtheid voor de ploegen-behandeling wat groter is, waardoor er minder water onder nattere omstandigheden kan worden geborgen.

Uit SWAP-simulaties voor vier beschikbare diepteprofielen (Heinen *et al.*, 2021) blijkt dat er een klein verschil is in transpiratiereductie (verschil tussen de potentiële en werkelijke transpiratie) bij maïs als gevolg van droogtestress over de periode 1980-2010; gemiddeld was droogtestress een fractie minder voor de ploegen-behandelde plots dan voor de strokenfrees-behandelde plots (zuurstofstress en indirecte schade waren verwaarloosbaar). Zoals gezegd was de statische waterbeschikbaarheid in de wortelzone (0-30 cm) volgens de waterretentiekarakteristiek vergelijkbaar. De enige reden waarom er dan een klein verschil ontstaat in feitelijke waterbeschikbaarheid kan mogelijk verklaard worden doordat de aanvoer

vanuit de ondergrond van de ploegen-behandeling beter is dan die voor de stroken-frees-behandeling. Deze zogenaamde kritieke opwaarts mogelijke waterflux is voor het geploegde profiel een stuk beter dan voor het profiel onder de strokenfrees behandeling.

➤ **Door het combineren van modelsimulaties met veldmetingen kunnen continu voorspellingen worden gedaan én kan het beheer van bijvoorbeeld klimaatadaptieve drainagesystemen (automatisch) worden aangepast aan de actuele situatie en de weersverwachting.**

Het uitgangspunt in sturing van regelbare en klimaatadaptieve drainage is dat het drainageniveau zo lang mogelijk zo hoog mogelijk blijft om zoveel mogelijk water in het systeem vast te houden, zonder overmatige zuurstofstress en daarmee natschade voor de plant te veroorzaken.

Regelbare drainage met subirrigatie is erop gericht om water vast te kunnen houden in de bodem van landbouwpercelen en aan te vullen waar dat nodig is. Als er wateroverlast dreigt, kan tijdig ruimte worden gemaakt door water af te voeren. In het [Klimaat Adaptieve Drainage \(KAD\)-systeem](#) kan het drainageniveau bepaald worden met de balg, die handmatig of automatisch ingesteld kan worden. Traditioneel richt regelbare drainage zich op het instellen van een bepaalde grondwaterstand. Echter, een grondwaterstand heeft een indirect effect op het de bodemvochtcondities in de wortelzone en hiermee op de water- en zuurstofbeschikbaarheid voor plantenwortels. Droogte- en natschade wordt ook bepaald door factoren als neerslag, verdamping, temperatuur en planteigenschappen. Het KAD-systeem richt zich in de aansturing daarom niet op het instellen van een optimale grondwaterstand, maar op het minimaliseren van droogte- en natschade door plantstress. Deze stress integreert de processen in het bodem-plant-atmosfeer systeem, waardoor het een relevanter managementdoel is voor optimale gewasgroei en gewasopbrengst én kan worden gesimuleerd met SWAP. Regelbare drainage met subirrigatie kan in SWAP worden geschematiseerd door gebruik te maken

van de zogenaamde ‘extended drainage’ module, waarmee het waterpeil in de putten van het systeem dynamisch gemodelleerd kan worden (De Wit *et al.*, 2021a). Tevens is het mogelijk om een gegeven hoeveelheid wateraanvoer op te geven.

Door SWAP te combineren met het kalibratie-algoritme PEST kunnen modelsimulaties worden gecombineerd met veldmetingen om zo bijvoorbeeld voorspellingen te doen en het beheer van KAD-systeem aan te passen aan de actuele situatie en de weersverwachting. Dit is operationeel gemaakt in een zogenaamd KAD-management-algoritme ([Bartholomeus *et al.*, 2015](#); De Wit *et al.*, 2021a). Dit algoritme bestaat dagelijks uit drie opeenvolgende stappen. Ten eerste vindt er kalibratie met data-assimilatie van SWAP met PEST plaats. Deze eerste stap bestaat uit offline kalibratie (voor het bepalen van de bodemfysische eigenschappen en de drainageweerstand van het perceel), online kalibratie (voor een optimale schatting van de actuele onderrandvoorwaarde) en online data-assimilatie (voor het reproduceren van de gemeten vochtcondities van de laatste dag, als startpunt voor de voorspelling). De offline kalibratie is gebaseerd op alle beschikbare gemeten grondwaterstanden en bodemvochtgehalten, de online kalibratie op alleen de metingen van de laatste 31 dagen en de online data-assimilatie op alleen metingen van de laatste dag. In een tweede stap wordt een voorspelling gedaan op basis van de actuele weersverwachting. Ten slotte wordt de mate waarin het KAD-niveau moet worden bijgesteld, bepaald met SWAP.

GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Regelbare drainage](#)
- [Bodem als buffer](#)
- [Bodemvocht gestuurd beregenen](#)
- [Onderwaterdrainage](#)
- [Belang van organische stof voor het waterbeheer](#)
- [Beregening](#)
- [Verdamping](#)



2B REKENMODELLEN VOOR REGIONALE SCHAAL

SLEUTELWOORDEN

Regionale modellering, grondwaterstanden, grondwaterstroming, afvoer, verdamping, MetaSWAP, WOFOST, MODFLOW, D-Flow FM

Regionale modelanalyses, die de ruimtelijke samenhang tussen grond- en oppervlaktewater en het effect van maatregelen in het bodem-watersysteem procesmatig beschrijven, zijn een onmisbare link om tot een goede afweging van maatregelen voor een klimaatrobuste inrichting van stroomgebieden te komen. Daarnaast zijn ze van belang om het gesprek te voeren tussen de verschillende actoren en draagvlak te verkrijgen voor een goede mix van maatregelen.

HELPT BIJ HET BEANTWOORDEN VAN DE VRAAG:

- Hoe kan ik de effecten van maatregelen op regionale schaal doorrekenen?
- Welke instrumenten zijn daarvoor beschikbaar?
- Welke maatregelen kunnen met regionale modellen worden doorgerekend en waarvoor zijn ze niet/minder geschikt?
- Hoe werken maatregelen in diverse zones van het watersysteem door in het regionale watersysteem?
- Welke combinaties van maatregelen zijn mogelijk en hoe beïnvloeden deze elkaar?

ACHTERGROND

Maatregelen kunnen lokaal effect hebben, maar de uitstralingseffecten en regionale doorwerking van maatregelen zijn daarmee nog niet helder. Ook is het niet eenvoudig om in te schatten wat het gecombineerde effect is van maatregelen, als deze in grotere delen van een gebied genomen worden. Ruimtelijke (regionale) modellen zijn bij uitstek geschikt om dergelijke effecten te kwantificeren. Tevens kunnen maatregelen worden gecombineerd en de effecten onder verschillende klimaatscenario's worden beschouwd. Zowel de ruimtelijke effecten op grondwaterstanden als op fluxen (kwel, afvoer, verdamping) kunnen worden geduid. Ruimtelijke modellen beschrijven de wisselwerking van grondwater met de onverzadigde zone, gewas en atmosfeer weliswaar in minder detail dan SWAP, maar ze geven goed inzicht in de ruimtelijke verdeling van de effecten en de doorwerking op het regionale (grond)watersysteem.

OPGEDANE INZICHTEN

- De koppeling van de modellen voor grondwater en onverzadigde zone (MODFLOW-MetaSWAP) en een model voor simulatie van gewasgroei (WOFOST) zorgt ervoor dat de gewasontwikkeling in regionale hydrologische modellen dynamisch en daarmee realistischer kan worden gemodelleerd. Dit werkt door in de berekende verdamping, grondwateraanvulling en grondwaterstanden.

Waar in het verleden maatregelen sterk gericht waren op het voorkomen van nat-schade, zoeken we nu naar een optimale balans tussen het voorkomen van nat-schade én droogteschade, waarbij optimalisatie van maatregelen en beheer dus nog belangrijker is. Hiervoor is het onder andere van belang om de interactie tussen gewas en hydrologie door het jaar heen beter te kunnen modelleren, ook op regionale schaal. Ook voor analyse van de effecten van klimaatscenario's moet rekening worden gehouden met een gewijzigde terugkoppeling tussen het gewas en de onverzadigde zone. In de huidige regionale grondwatermodellen, zoals MIPWA, wordt gebruik gemaakt van de koppeling van de modellen MetaSWAP en



MODFLOW, eventueel uitgebreid met een oppervlaktewatermodule of model zoals D-HYDRO. In deze modellen wordt aangenomen dat de gewasontwikkeling elk jaar hetzelfde verloopt. Door in de regionale hydrologische modeltoepassingen ook een koppeling te maken met het gewasgroeimodel WOFOST worden de bodem-water-atmosfeer processen in meer detail en daarmee naar verwachting beter gesimuleerd en wordt optimaal gebruik gemaakt van de actuele kennis over gewasgroei die is ontwikkeld in het kader van de [Waterwijzer Landbouw](#). Met deze koppeling kan de kennis die is opgedaan in het Waterwijzertraject, worden toegepast in combinatie met gedetailleerde berekeningen van de regionale grondwatermodellen. Binnen Lumbricus is de technische implementatie gerealiseerd van de koppeling tussen MODFLOW-MetaSWAP en WOFOST in combinatie met zuurstofstress, zoals gemodelleerd in Waterwijzer Landbouw met [SWAP-WOFOST](#). De modeluitkomsten van de nieuwe koppeling zijn geverifieerd aan de hand van SWAP-WOFOST berekeningen. Daarnaast is een eerste toepassing op een regionaal grondwatermodel (deelmodel Vechtstromen-gebied) beoordeeld (Van Walsum & Kroon, 2018). De koppeling is ook ingezet in de regionale proof-of-concept analyse van regelbare drainage met subirrigatie (zie hierna).

➤ **Een nieuwe MetaSWAP-module voor regelbare drainage met subirrigatie maakt het mogelijk om deze maatregel ruimtelijk door te rekenen, de doorwerking van de maatregel op het regionale systeem en bijbehorende functies te kwantificeren én de eventuele inpassing in het systeem te optimaliseren.**

Om regelbare drainage met subirrigatie op regionale schaal te kunnen modelleren, is een nieuwe MetaSWAP-module ontwikkeld. Hiertoe is kennis uit [Waterwijzer Landbouw](#) en [aansturing van peilgestuurde drainage en subirrigatie](#) in MetaSWAP geïmplementeerd. De regionale toepassing van de nieuwe module is getest voor twee gebieden. Met een versie van het MIPWA-model geoptimaliseerd voor het gebied rond de Vecht en met het regionaal model van Waterschap Aa en Maas, zijn berekeningen uitgevoerd aan de maatregel ‘regelbare drainage met subirrigatie’. Dit zijn beide iMODFLOW-MetaSWAP modellen. Voor de berekeningen zijn de mo-

dellen geactualiseerd met de laatste versie van de bodemfysische database (o.b.v. de Staringreeks 2018) en is de koppeling met het gewasgroeimodel WOFOST gerealiseerd (Pouwels *et al.*, 2021).

Eerste proof-of-concept analyses (Pouwels *et al.*, 2021) tonen aan dat het met het nieuwe modelconcept mogelijk is het regionale effect van subirrigatie op de gewasverdamming en de grondwaterstanden te kwantificeren, evenals het watergebruik van de maatregel. Uit analyses van de nieuwe module voor het Vechtgebied en omgeving Deurnsche Peel, blijkt dat de watervraag van subirrigatie groot is (zie ook de experimenten met [regelbare drainage en klimaatadaptieve drainage met subirrigatie](#)), maar ook dat af en toe natschade kan optreden in het model. Om uiteindelijk tot een goede afweging te komen van de haalbaarheid, de effecten op de gewasopbrengst en omliggende (natuur)gebieden, is informatie nodig over de waterbeschikbaarheid en moeten de sturingsregels per eenheid aangepast worden op de lokale omstandigheden. Ten aanzien van het modelleren van de waterbeschikbaarheid biedt de nieuw ontwikkelde dynamische koppeling tussen het grondwaterinstrumentarium (MODFLOW-MetaSWAP) en het oppervlaktewatermodel D-Flow FM belangrijk perspectief (zie hierna).

➤ **Met de nieuwe dynamische koppeling tussen regionale modellen voor grondwater en onverzadigde zone (MODFLOW-MetaSWAP) en een model voor oppervlaktewater (D-Flow FM) kan de interactie tussen grond- en oppervlaktewater gedetailleerd en gekoppeld worden doorgerekend. Dit biedt bijvoorbeeld de mogelijkheid om hydrologische simulaties uit te voeren voor extreme situaties en voor lokale situaties waarbij interactie tussen grond- en oppervlaktewater een grote rol speelt, bijvoorbeeld bij wateraanvoer tijdens droge perioden.**

Om regionale modelberekeningen uit te kunnen voeren voor extreme situaties en voor lokale situaties waarbij interactie tussen grond- en oppervlaktewater een grote rol speelt, zijn MODFLOW, MetaSWAP en D-Flow FM softwarematig gekoppeld, waardoor fluxen tussen de verschillende componenten dynamisch uitgewisseld

kunnen worden (Minnema *et al.*, in voorbereiding). De koppeling biedt de ruimtelijke flexibiliteit om zowel met een volledige 1D2D D-Flow FM model te koppelen, of alleen met het 1D-gedeelte van D-Flow FM. De gekoppelde software is getest voor een aantal hypothetische testmodellen, en voor het gebied 'De Hooge Raam' binnen het gebied van Waterschap Aa en Maas. Door deze nieuwe koppelingstechniek kunnen bestaande regionale MODFLOW-MetaSWAP-modellen en bestaande D-Flow FM-modellen in de toekomst ook als gekoppeld instrumentarium ingezet gaan worden. Voorbeelden van toepassing zijn de analyse van hydrologische extremen, maar bijvoorbeeld ook het berekenen van het effect van een gewijzigd ([meer natuurlijk](#)) peilregime in een beek op de grondwaterstanden in een gebied, of analyseren waar of wanneer beschikbaarheid of aanvoercapaciteit van oppervlaktewater limiterend wordt voor [subirrigatie](#) (gebruik makend van de nieuwe module voor regelbare drainage met subirrigatie).

➤ **Het in gebruik nemen en onderhouden van state-of-the-art regionale modellen bij waterschappen is van groot belang om de klimaatrobuuste inrichting van gebieden vanuit de waterbeheerder daadwerkelijk vorm te geven.**

Naast het ontwikkelen van nieuwe modelconcepten is in Lumbricus geïnvesteerd in de samenwerking en kennisoverdracht tussen kennisinstellingen en waterschappen. Zo is er intensief samengewerkt aan het operationaliseren van het grondwaterinstrumentarium van Waterschap Aa en Maas. De samenwerking heeft er toe geleid dat het waterschap het state-of-the-art regionale grondwaterinstrumentarium met gebruikmaking van de nieuwste modelconcepten zelfstandig in kan zetten ten behoeve van onderzoek, beleidsontwikkeling en analyse van inrichtings- en beheermaatregelen. Zo is ook de koppeling van MetaSWAP-WOFOST in nauwe samenwerking operationeel gemaakt in het regionale hydrologische model van Waterschap Aa en Maas, heeft het waterschap eigenstandig analyses uitgevoerd met de in Lumbricus ontwikkelde MetaSWAP-module voor regelbare drainage met subirrigatie en analyses uitgevoerd om de regionale effecten van diverse lokale maatregelen voor klimaatrobuuste inrichting in beeld te brengen. Dit proces is

zeer waardevol gebleken voor zowel kennisinstelling als waterschap. Wat behelst het voor een waterschap om nieuwe modelconcepten te operationaliseren voor haar dagelijkse werk? Wanneer moet je vanuit het waterschap een dergelijke stap zetten en wat levert het op?

➤ **Een stofstromenanalyse stelt je in staat om een kwantitatieve inschatting te maken van de routes (bijv. via drains of juist via dieper grondwater) waarlangs nutriënten in het oppervlaktewater terechtkomen. Dit levert inzicht op in de effectiviteit van verschillende maatregelen en levert tevens input op voor verbetering van monitoringprogramma's en modellering van water- en stofstromen.**

Om te bepalen welke maatregelen gericht op het verbeteren van de waterkwaliteit waar effectief zijn, is een goed beeld van bronnen, routes en processen binnen het gebied nodig. Met combinatie van continue waterkwaliteitsmetingen en routings kunnen de 'hot moments' en 'hotspots' van nutriëntenverliezen in beeld gebracht worden en kunnen maatregelen zeer gericht ingezet worden om de waterkwaliteit in stroomgebieden en in benedenstroomse waterlichamen te verbeteren. Toepassing van de stofstromenanalyse is gericht op de bepaling van de route/de afvoercomponent waarlangs water en opgeloste stoffen in het oppervlaktewater terechtkomen.

Binnen Lumbricus is een stofstromenanalyse toegepast op de Vecht tussen Hardenberg en Ommen, met de tools en de metingen die beschikbaar waren in 2018 ([Rozemeijer et al., 2018](#)). Voor de analyse is gebruik gemaakt van waterkwaliteitsmetingen uit meerdere meetnetten in combinatie met berekende afvoercomponenten uit het regionaal grondwatermodel. De volgende afvoercomponenten zijn onderscheiden: oppervlakkige afvoer, afvoer via drainagebuizen, afvoer van ondiep grondwater, afvoer van diep grondwater. Hiermee is inzicht verkregen in de bijdrage van verschillende fluxen aan de afvoer en de vrachten van chloride, nitraat, ammonium en fosfaat richting de Vecht. Uit de analyse komt naar voren dat de nutriëntrijke samenstelling van het bovenste grondwater en de ondiepe

routes naar het oppervlaktewater de grootste belasting vormen voor het oppervlaktewater en dus bepalend zijn voor de waterkwaliteit. Dat betekent dat in dit geval maatregelen die het nutriëntenoverschot in percelen omlaag brengen of die nutriënten afvangen vanuit die specifieke hydrologische route, met name van belang zijn voor het verbeteren van de waterkwaliteit.

Voor modellen die gebruikt worden om bijvoorbeeld de effecten van bodemverbetering voor het oppervlaktewater (afvoeren en waterkwaliteit) te berekenen, is het van belang dat de verdeling van water tussen oppervlakkige afstroming, drainage en ondiepe en diepere grondwaterstroming klopt. Vooral voor de snelle en dynamische ondiepe routes is dit een uitdaging, mede omdat meetinformatie voor een goede kalibratie ontbreekt. Een grote onbekende qua monitoring is oppervlakkige afstroming. Een betere inschatting van het belang van [oppervlakkige afstroming](#) als route voor water en nutriënten is nodig voor een verbeterde modellering en voor het gericht nemen van maatregelen. Veel landbouwmaatregelen hebben invloed op oppervlakkige afstroming en/of stroming via drains. Het wordt aanbevolen om modelconcepten te verifiëren en indien nodig aan te passen aan de hand van gemeten afvoeren via oppervlakkige afstroming en drains.

➤ **Het regionale effect van wormgangen en zogenoemde vertidrainen kan op basis van de huidige nationale bodemschematisatie nog niet worden geduid.**

In de sectie [Rekenmodellen voor perceelschaal](#) is omschreven hoe het model SWAP is aangepast om rekening te kunnen houden met de aanwezigheid van verticale [wormgangen of vertidrainen](#). Daarmee is het mogelijk om situaties met en zonder wormgangen door te rekenen voor alle beschikbare zandbodems in Nederland ([BO-FEK2012](#) eenheden 301-327, met [Staringreeks2018](#)). Voor de periode 1980-2019 bleek op basis van de berekeningen dat de zandprofielen zonder wormgangen de meeste regenbuien van de afgelopen 40 jaar goed kunnen verwerken en dat er heel weinig oppervlakkige afvoer wordt gesimuleerd (Heinen *et al.*, 2021; Pouwels *et al.*, 2021). De toegevoegde waarde van wormgangen is dan nihil. Alleen op zandprofielen met

een zaveldek (ca. 5% zandareaal in Nederland) wordt enige effectiviteit gevonden, omdat de doorlatendheid van het zaveldek soms wel beperkend is. Het betekent dat op basis van deze nationale schematisatie we nog niet in staat zijn om aan te geven hoe effectief dergelijke wormgangen in zandbodems in de praktijk kunnen zijn. Ter informatie, voor andere type bodems in Nederland is er wel sprake van toename van infiltratie (en dus minder oppervlakkige afvoer) bij aanwezigheid van wormgangen. In Lumbricus is deze maatregel niet toegepast in regionale modellen vanwege de lage gesimuleerde effectiviteit voor zandgronden (gegeven de huidige landelijke fysische kenmerken). Wanneer in de toekomst betere data over de fysische eigenschappen beschikbaar komen, kan het effect van de aanwezigheid van wormgangen (en eventueel vertidrainen) op regionale schaal als volgt geanalyseerd worden: ofwel eerst kan worden gekeken wat het regionale effect is door de gesimuleerde infiltratie met SWAP op te leggen als input voor MetaSWAP, ofwel de benodigde bodemfysische invoertabellen voor MetaSWAP worden geconstrueerd op basis van de aangepaste waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken.

Waarom er in de praktijk op zandgronden toch af en toe infiltratieproblemen (en plasvorming) wordt waargenomen kan liggen aan lokale [bovengrondverdichting](#) waardoor de infiltratiecapaciteit afneemt. Dergelijke informatie is echter niet op landelijk schaal beschikbaar en kan alleen theoretisch onderzocht worden.

GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Verdamping](#)



2C EFFECTMODULES VOOR LANDBOUW EN NATUUR

SLEUTELWOORDEN

Landbouw, natuur, droogte, natschade, Waterwijzer Landbouw, Waterwijzer Natuur

Met de Waterwijzer Landbouw en de Waterwijzer Natuur kunnen de effecten worden bepaald van maatregelen op gewasopbrengsten (landbouw) en op de standplaatsfactoren voor natuurdoelen. In de waterwijzers komen maatregelen, regionale modelanalyses en beleidsdoelen samen. Daarmee zijn de instrumenten belangrijk voor het afwegen van maatregelen en het betrekken van verschillende actoren.

HELPT BIJ HET BEANTWOORDEN VAN DE VRAAG:

- Hoe kan ik de effecten van maatregelen op regionale schaal doorrekenen?
- Welke instrumenten zijn beschikbaar om de effecten van waterbeheer(maatregelen) en klimaatverandering op terrestrische natuur en landbouwopbrengsten in te schatten?

ACHTERGROND

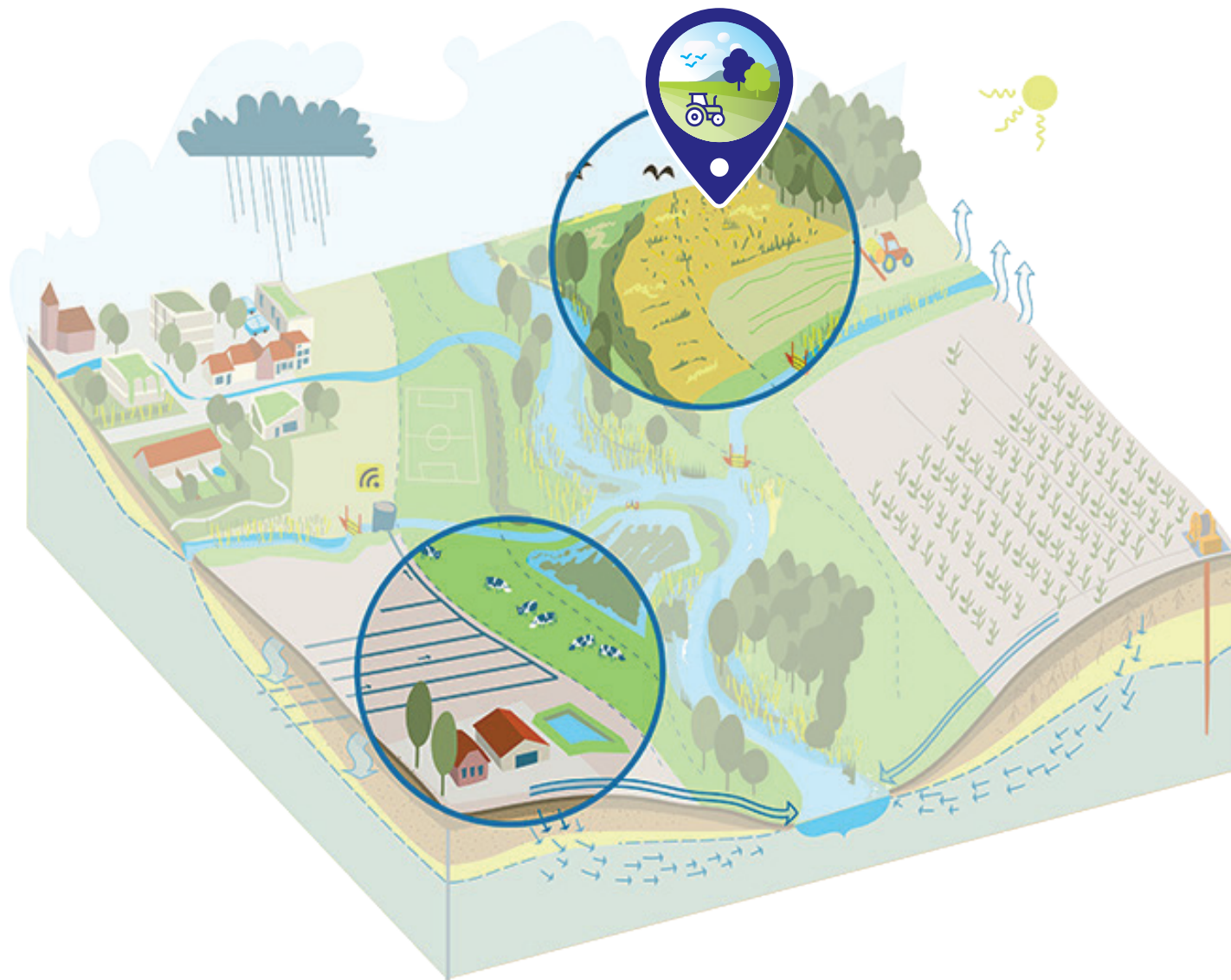
Landbouw en natuur stellen specifieke eisen aan de waterhuishouding, vooral aan beschikbaar water in de wortelzone. Tot voor kort hielden beoordelingssystemen geen rekening met de gevolgen van klimaatverandering voor landbouwopbreng-

sten en natuurdoelen. De [Waterwijzer Landbouw en de Waterwijzer Natuur](#) doen dat wel. De instrumenten kunnen worden gebruikt voor het vaststellen van schade aan landbouw en natuur, maar ook voor het optimaliseren van de waterhuishouding. Beide instrumenten houden zoveel mogelijk rekening met relevante processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer die door klimaatverandering of door veranderingen in het waterbeheer kunnen worden beïnvloed. Dankzij gebruiksvriendelijke schillen die om alle complexiteit heen zijn gebouwd, zijn ze eenvoudig te gebruiken.

OPGEDANE INZICHTEN

- De Waterwijzer Landbouw kan naast het vaststellen van schade aan landbouw worden gebruikt voor het optimaliseren van de waterhuishouding. Een gebruiksvriendelijke schil maakt regionaal maatwerk mogelijk.

Bij het nemen van bodem- en watermaatregelen om de hogere zandgronden klimaatrobuster te maken, is het goed vooraf te weten wat de effecten ervan zijn op de functies van de bodem. Wat voor effect hebben maatregelen bijvoorbeeld voor de gewasopbrengsten van boeren in een gebied? Hiervoor heeft STOWA de Waterwijzer Landbouw (WWL) laten ontwikkelen. Deze is binnen Lumbricus doorontwikkeld en toegepast in twee proeftuinen ([Heinen et al., 2017](#)). Dit betrof een verkenning van de toepassing van de WWL-tabel voor het gebied Stegeren bij de Vecht en voor de Raam. Bij de pilot Stegeren ging de aandacht vooral uit naar het effect van hydrologische maatregelen en bij de Raam juist naar het effect van klimaatverandering. Belangrijk van zulke toepassingen is dat modelontwikkeling en modeltoepassing deels parallel kunnen plaatsvinden: in de toepassing wordt duidelijk welke verbeteringen voor WWL nodig zijn. De belangrijkste verbeterwensen zijn dan ook geadresseerd (zie www.waterwijzer.nl). Niet voor alle verbeter suggesties zijn al bruikbare oplossingen, maar voor de zandgronden lijkt de huidige WWL-tabel goed bruikbaar. Validatie van het instrumentarium is zeker nodig, maar volgt later na Lumbricus.



Met het onderliggende instrumentarium van de Waterwijzer Landbouw (de gekoppelde modellen (SWAP-WOFOST) is het mogelijk specifieke situaties / 'events' na te rekenen. Zo is er een specifieke situatie met flinke wateroverlast (zomer 2016) doorgerekend en is het desastreuze effect daarvan op de gewasopbrengst bij maïs inzichtelijk gemaakt. Bij de doorontwikkeling van WWL binnen Lumbricus is geconstateerd dat de insteek op basis van de landelijke bodemfysische eenhedenkaart (BOFEK) en berekeningen voor de vijf meteorologische hoofdstations slecht aansluit bij de kennis op regionale schaal. Daarom is in nauwe samenwerking met Waterschap Aa en Maas een gebruiksvriendelijke schil voor [regionale maatwerktoepassing \(WWL Regionaal\)](#) ontwikkeld (Mulder *et al.*, 2021). Door waterschappers bij Vechtstromen, Aa en Maas en Limburg is reeds met WWL Regionaal gewerkt en zij hebben geconcludeerd dat gebruikmaken van lokale bodem- en grondwatergegevens en meteodata van lokale weerstations tot beduidend andere resultaten kan leiden die beter aansluiten bij de dagelijkse praktijk in die regio's.

➤ **Met de Waterwijzer Natuur kan worden bepaald wat de effecten zijn van klimaatverandering en (aanpassingen in) het waterbeheer op de terrestrische vegetatie van natuurgebieden. Daarbij is het van belang een procesmatige simulatie van de standplaatsfactoren te maken.**

In 2012 heeft STOWA het initiatief genomen voor de ontwikkeling van de Waterwijzer Natuur (WWN). Ontbreekt het de waterbeheerder en beleidsmaker aan een dergelijk instrument, dan kan dat leiden tot een beleid en beheer dat onvoldoende is afgestemd op de natuur, en op een navenant suboptimale besteding van financiële middelen voor de natuur. De WWN is relevant voor zowel de overheid als voor gebiedspartijen om te weten of een investering in de natuur blijvend resultaat oplevert, of dat er op termijn een nieuwe investering nodig zal zijn.

Als basis voor WWN wordt het model [PROBE](#) (Witte *et al.*, 2015) gebruikt, waarmee effecten van verandering in de waterhuishouding en het klimaat op vegetatie kunnen worden voorspeld. De WWN wordt in fasen ontwikkeld. De eerste fase

heeft rekensoftware opgeleverd die via een gebruiksvriendelijke schil wordt aangestuurd (Witte *et al.*, 2018). Onder de gebruiksvriendelijke schil is niet alleen PROBE opgenomen, maar ook de 'abiotische randvoorwaarden natuur' van een aangepaste versie van WATERNOOD ([Runhaar & Hennekens, 2015](#)).

De Waterwijzer Natuur bestaat daarmee uit twee onderdelen: één waarmee onder het huidige klimaat kan worden getoetst of de waterhuishouding van een gebied in overeenstemming is met beoogde vegetatietypen (WATERNOOD), en één waarmee de ruimtelijke verspreiding van vegetatietypen kan worden voorspeld in afhankelijkheid van het waterbeheer en het klimaat (PROBE). In het voorspellingsmodel PROBE wordt de kansrijkdom van verschillende vegetatietypen berekend aan de hand van de vochttoestand, voedselrijkdom en zuurgraad van de bodem. PROBE is deels gebaseerd op deskundigenoordeel en deels op proceskennis. Om het model zo robuust mogelijk te maken, dient het deskundigenoordeel zoveel mogelijk te worden vervangen door proceskennis. Eerder zijn daarom de standplaatsfactoren zuurstofstress en droogtestress in WWN ingebouwd. Binnen Lumbricus zijn de kennisregels voor de standplaatsfactor zuurgraad vervangen door een procesmatige simulatie van de bodem-pH en is het resultaat daarvan vervolgens vertaald naar de voorspelling van vegetatie (Witte *et al.*, 2020).

GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Effecten klimaatverandering en waterbeheer op landbouw](#)
- [Effecten klimaatverandering en waterbeheer op terrestrische natuur](#)

3.3 IMPLEMENTEREN & UITVOEREN (GOVERNANCE): HOE REGELEN WE HET?

Beproefde maatregelen voor een klimaatrobuuste inrichting van hogere zandgronden zullen uiteindelijk ook opgeschaald en uitgerold moeten worden. De ervaring leert dat dit niet altijd eenvoudig of vanzelfsprekend is. Het Nederlandse bodem- en waterbeheer is uitdagend. Er liggen meerdere opgaven, er zijn veel partijen bij betrokken en de belangen en zienswijzen lopen soms flink uiteen. Daarnaast zijn de verantwoordelijkheden en bevoegdheden versnipperd en de rolopvattingen en rolverdelingen in ontwikkeling.

Het maken van plannen voor een klimaatrobuuste inrichting van stroomgebieden is een afweging van bijvoorbeeld natuurherstel- en klimaatadaptatiedoelen, rekening houdend met de wensen van gebruikers van de bodem- en watersystemen en dat in een context van onzekerheid over de vraag hoe landgebruik, klimaat en andere factoren zich in de toekomst gaan ontwikkelen. Hoe verbinden we keuzes die op de korte termijn gemaakt worden met doelen voor de lange termijn, zoals klimaatadaptatie en het sturen op meer natuurlijke watersystemen? En dat in een context van grote onzekerheden? Ofwel: hoe verbinden we de waan van de dag met visies voor de lange termijn?







3

IMPLEMENTEREN & UITVOEREN (GOVERNANCE): HOE REGELEN WE HET?

SLEUTELWOORDEN

Participatie, ontwikkelpaden, governance (juridisch, bestuurlijk, politiek), maatschappij, stakeholders

Je kunt nog zo goed weten hoe fysieke systemen werken en wat er technisch mogelijk en haalbaar is om te komen tot klimaatrobuuste hoge zandgronden, als je betrokken bewoners en instanties niet meekrijgt, kom je er nooit.

HELPT BIJ HET BEANTWOORDEN VAN DE VRAAG:

- Hoe betrek ik stakeholders bij de ontwikkeling naar een klimaatrobuust bodem-watersysteem?
- Hoe zorgen we ervoor dat kansrijke maatregelen worden uitgerold?
- Welke middelen van overheden zijn er om te sturen op een robuuste inrichting en robuust gebruik van gebieden?

ACHTERGROND

Bij bodem- en waterbeheerders roept de complexiteit veel 'hoe'-vragen op. Weten wat er nodig is en met welke maatregelen dit bereikt kan worden, volstaat niet. We moeten de weg naar realisatie vinden: hoe brengen we innovaties verder? Hoe verbinden we bodem en water met andere maatschappelijke opgaven? Hoe overbruggen we de kloven tussen het bodem- en waterbeheer en al die andere beleidsterreinen

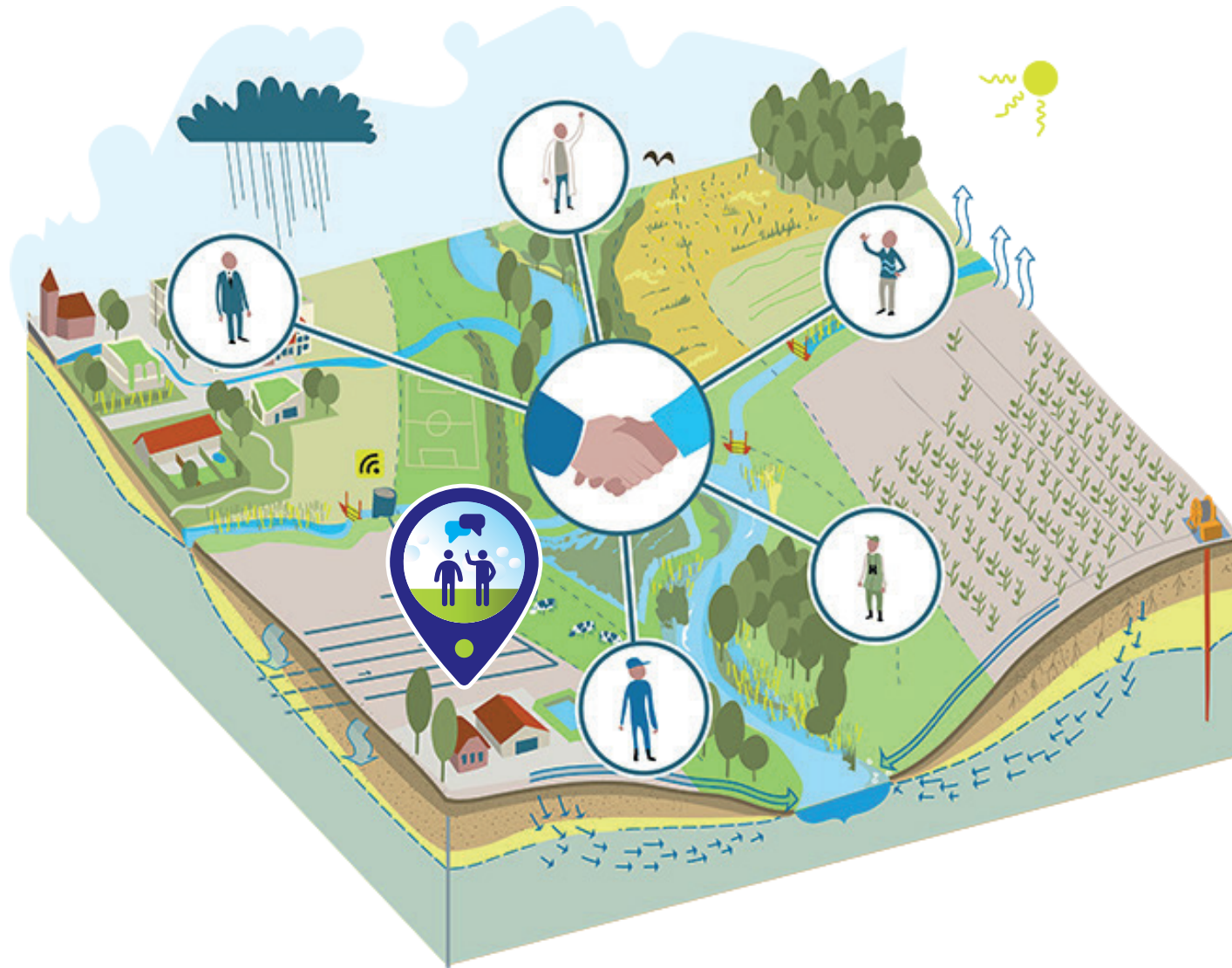
die relevant zijn en die zich uiten in verkokerde beleidsontwikkeling, versnipperde taken en bevoegdheden en gescheiden geldstromen? Hoe komen we van afzonderlijke maatregelen tot een integrale en gebiedsgerichte aanpak? Hoe geven we gebruikers en marktpartijen een prominentere rol in het bodem- en waterbeheer? Deze vragen gaan allemaal over de 'governance kant' van het bodem- en waterbeheer.

OPGEDANE INZICHTEN

- **Voor opschaling en een goede maatschappelijke inbedding van maatregelen moet je zowel technologische, economische als sociaal-culturele aspecten in acht nemen, evenals passendheid bij vigerende wet- en regelgeving.**

Het overkoepelende doel van Lumbricus is een klimaatrobuuste inrichting van de hoge zandgronden. Dat betekent dat beproefde maatregelen uiteindelijk ook opgeschaald en uitgerold zullen moeten worden. De ervaring leert dat dit niet altijd eenvoudig of vanzelfsprekend is. In een recent uitgebracht rapport van het Rathenau instituut ([Voorbij lokaal enthousiasme](#), [Lessen voor de opschaling van living labs](#), [Van den Broek et al. \(2020\)](#)), worden verschillende dimensies van maatschappelijke inbedding onderscheiden: technologie, economie, regulering en sociaal-cultureel. "In innovatieprocessen moet geleerd worden over al deze dimensies om innovaties ook maatschappelijk robuust te maken". Alle dimensies zijn we ook tegengekomen in Lumbricus. Dat illustreren we in dit document aan de hand van de pilots met [regelbare drainage in Stegeren](#).

Bij **technologische inbedding** zou je kunnen denken aan de relatie tussen de innovatie en de karakteristieken van het watersysteem waarin het experiment heeft plaatsgevonden. De regelbare drainage werkt relatief goed in Stegeren, mede omdat in dat gebied gemakkelijk water kan worden ingelaten dat benut kan worden. Opschaling van deze vorm van drainage naar gebieden waar dat niet kan, is niet een-op-een mogelijk en vereist lokaal maatwerk.





Bij **economische inbedding** gaat het om de vraag of de aanleg van de drainage financieel uit kan (inpasbaar is in de bedrijfsvoering van de boer). Omdat in het kader van Lumbricus een subsidie beschikbaar was, was de drempel laag om in te stappen. Als deze subsidie er niet zou zijn, zou de aanleg van de drainage dan uitkunt voor de betrokken boeren, is de behaalde winst (gewasopbrengst, minder arbeid) voldoende om de gemaakte kosten te rechtvaardigen?

De **passendheid bij wet- en regelgeving** is ook relevant. Als boeren de mogelijkheid hebben om tegen lage kosten grote hoeveelheden grondwater te onttrekken om te beregenen, is de prikkel om te investeren in maatregelen om water langer vast te houden, kleiner.

Bij **sociaal-culturele inbedding** is het de vraag of de betrokken boeren bepaalde routines, zoals het zo snel mogelijk afvoeren van water, of het beregenen met grondwater ten tijde van droogte, kunnen en willen aanpassen. Dezelfde vraag kan gesteld worden aan de andere betrokken organisaties.

➤ **Participatieve monitoring kan het gezamenlijk leren bevorderen. Het blijkt zowel voor de waterbeheerder als voor de individuele deelnemers leerzaam. Maar er zijn ook nog andere redenen om participatief te gaan monitoren.**

Participatieve monitoring zou je ook 'gezamenlijk monitoren' kunnen noemen. Participatieve monitoring houdt in dat je de monitoring van een maatregel, project of beleid gezamenlijk doet. Bij reguliere monitoring zijn het de inhoudelijke experts die een monitoringprotocol opstellen, een monitoringnet inrichten, data verzamelen en deze interpreteren. Bij participatieve monitoring worden belanghebbenden bij een maatregel of plan betrokken bij de monitoring van die maatregel of dat plan. Dat kan betekenen dat deze belanghebbenden daadwerkelijk ook (een deel van de) data gaan verzamelen, maar dat hoeft niet. Je kunt belanghebbenden ook betrekken bij: a) het ontwerp van de monitoring (wat zal worden gemonitord, hoe en door wie wordt dat gedaan?), b) de duiding of interpretatie van

de resultaten van de monitoring en c) het gesprek over mogelijke aanpassingen van getroffen maatregelen naar aanleiding van de resultaten van de monitoring of over aanpassingen van de wijze waarop wordt gemonitord.

Er zijn verschillende redenen (motieven) om participatief te monitoren. Een eerste mogelijke reden is dat er te weinig personele en financiële capaciteit aanwezig is in een organisatie om monitoring zelf (volledig) uit te kunnen voeren. Anderen betrekken bij het meten en monitoren kan dan een uitkomst zijn. Een tweede reden is dat je als waterbeheerder verwacht (ervarings)kennis te vergaren die je anders moeilijk zou kunnen vergaren. De gedachte hier is dat grondeigenaren [hun eigen bodem- en watersysteem](#) heel goed kennen, dat ze een bepaalde deskundigheid hebben die je goed kunt gebruiken wanneer je nadenkt over de uitvoering maar ook over de monitoring van maatregelen. Door ze te betrekken bij de monitoring, kun je meer leren over het functioneren van het bodem- en watersysteem dan wanneer je dat niet zou doen. Bij dit motief past bijvoorbeeld ook de gedachte dat als boeren grondwaterstanden meten, je extra meetpunten hebt om een [grondwater-model](#) te kunnen valideren. Een derde reden is het tegenovergestelde van datgene dat hierboven is gesteld. Je verwacht als waterbeheerder juist dat de deelnemers aan de monitoring hiervan kunnen leren, bijvoorbeeld doordat ze zodoende meer inzicht krijgen in het functioneren van het watersysteem of de effectiviteit van bepaalde [maatregelen](#). De verwachting kan bijvoorbeeld zijn dat het waterbewustzijn of het inzicht in het fysieke systeem van de deelnemers aan participatieve monitoring toeneemt. Een belangrijk vierde motief is dat je verwacht dat de steun voor bepaalde maatregelen of plannen toeneemt op het moment dat je belanghebbenden daar serieus bij betreft. Op een vergelijkbare manier kan je beargumenteren dat wanneer je belanghebbenden intensief betreft bij de monitoring van de effecten van maatregelen en de interpretatie van de verzamelde data, de steun voor de maatregel ook zal toenemen. Een vijfde en laatste reden is een relationeel motief. Een waterbeheerder kan een proces van participatieve monitoring starten omdat er een belang is om de relaties met partijen goed te houden, dan wel te versterken. Als partijen waar je om strategische redenen graag een goede relatie mee onderhoudt, graag zelf willen meten, kan je dat als waterbeheerder bewust

faciliteren om vertrouwen te winnen en krediet op te bouwen, ook als je daar inhoudelijk geen meerwaarde in ziet. In de praktijk kunnen meerdere motieven tegelijkertijd bestaan.

Binnen Lumbricus is op kleine schaal geëxperimenteerd met participatieve monitoring ([Bremán et al., 2019](#)). Uit de toepassing in Stegeren (Bremán et al., 2021) is geconcludeerd dat participatieve monitoring duidelijk van meerwaarde is geweest in deze casus. In de Raamvallei zijn mogelijkheden verkend voor de participatieve monitoring van peilopzet. De peilopzet in de Raamvallei ligt gevoelig bij een aantal partijen in het gebied. Door middel van het gebruik van de zogeheten CANVAS, een tool voor het opzetten van een participatief monitoringtraject, zijn aandachtspunten voor de participatieve monitoring op een systematische manier in beeld gebracht. Uit deze toepassing blijkt dat een participatief monitoringtraject ook consequenties heeft voor de interne organisatie van het waterschap. Het is belangrijk dat gebiedsregisseurs, monitoringspecialisten en gebiedsbeheerders een gedeeld beeld hebben van de doelstelling van participatieve monitoring.

➔ **Met de komst van de Omgevingswet in 2022 krijgen provincies en gemeenten de bevoegdheid om voor de biologische en fysieke bodemkwaliteit doelen en normen te stellen, én tevens de zorgplicht voor een biologisch en fysisch-chemisch gezonde bodem. Ze krijgen hiermee een belangrijk sturingsinstrument, maar ook een verantwoordelijkheid voor het realiseren van een robuust bodem-watersysteem.**

Overheden hebben een gereedschapskist om vorm te geven aan zorg voor de bodem. Vormgeven kan door bodembeleid te maken en bodemambities te formuleren en door vervolgens instrumenten in te zetten zoals communicatie, economische prikkels en wet- en regelgeving. In de praktijk wordt gewerkt met onderzoek, pilots, proeftuinen, kenniscafés en digitale platforms, gericht op informeren, kennisoverdracht en motivatie van land- en tuinbouwers. Er wordt gecommuniceerd, georganiseerd en met wat geld worden de kosten voor deelnemers beperkt

gehouden. Het opschalen van wat is geleerd, blijkt echter lastig. Veel land- en tuinbouwers zijn nog niet overtuigd van het verdienmodel en van de inpasbaarheid in de bedrijfsvoering. Het 'duwtje in de rug' blijft in de opschaling vaak hangen in vrijblijvendheid en het plukken van 'laaghangend fruit'. Het ontbreken van een bevoegdheid en plicht om te dwingen wordt als achilleshiel gezien: de zorg voor chemische bodemkwaliteit is goed vastgelegd in wet- en regelgeving, de zorg voor biologische en fysische bodemkwaliteit niet. Politiek draagvlak om transitie van alle bedrijven uit belastinggeld te betalen is er niet. Hoogstens is er de politieke wil om aan markregulering bij te dragen, maar daarvoor ontbreekt vooralsnog het juridisch instrumentarium. De land- en tuinbouwer kan daardoor op hoofdlijnen vrijelijk beslissen over zijn bedrijfsvoering en de omgang met de bodem. Met de komst van de Omgevingswet in 2022 worden de kaarten echter opnieuw geschud; de provincie en gemeente krijgen bevoegdheid en de zorgplicht om voor de biologische en fysische bodemkwaliteit doelen en normen te stellen. De verantwoordelijkheid voor de kwaliteit van de bodem in brede zin wordt allereerst bij de perceeleigenaar en gebruiker gelegd, waar dit tot ongewenste uitkomsten leidt komt er een zorgplicht voor gemeenten en provincies om doelen en normen te stellen. Het Aanvullingsbesluit bodem Omgevingswet regelt de zorgplicht en geeft de provincie, de gemeente en het waterschap bevoegdheden en taken. En daarmee kunnen de decentrale overheden de condities creëren waaronder economische, technische en culturele inpassing van de beoogde maatregelen haalbaar wordt.

Aanleiding genoeg om nu al voor te gaan sorteren op de genoemde ontwikkelingen, zodat druk opgebouwd wordt en er vanaf 2022 meters gemaakt worden. Dat vraagt om nu al na te denken over de passende doelen en normen. Immers dat gebeurt dan in de wetenschap dat er vanaf 2022 een afdoend gevulde gereedschapskist beschikbaar is. De vrees dat dit automatisch tot confrontatie met de sector leidt is niet gefundeerd, de zoektocht is naar de juiste afstemming van regels en economische prikkels. Vanaf 2022 gaat namelijk ook een aanzienlijk deel van de bijdragen vanuit het Europese gemeenschappelijke landbouwbeleid naar duurzame landbouwconcepten, dus naar integratie van productie, natuur en water. Dat betreft zowel de inrichting van percelen, inclusief herstel van blauwe elementen,

als ook de bedrijfsvoering. Boeren blijven inkomenssteun ontvangen, maar de richting verandert; verdienmodellen in de land- en tuinbouw veranderen dus. Provincies en gemeenten bereiden zich intensief voor op de komst van de Omgevingswet, de zorg voor biologische en fysische bodemkwaliteit en doel- en normstelling verdienen prioriteit, in afstemming met de financiële sectormiddelen die er aankomen. Natuurlijk wordt dit nog een enerverende reis, er zijn nieuwe bevoegdheden, maar ook een zorgplicht aan de zijde van de overheden. Er zijn sectormiddelen om bodembewust boeren haalbaar te maken door nieuwe businessmodellen te ontwikkelen. De uitdaging is deze op een manier te koppelen, die leidt tot draagvlak, uitvoering en opschaling. In dit speelveld zal omgevings- en bodembewust boeren ondersteund gaan worden, terwijl conventionele praktijken tegen de grenzen van bodemdoelen en normen aan zullen gaan schuren. Dit vergt van de zijde van de decentrale overheden zorgvuldige programmering van uitvoering. Daarbij zijn niet enkel land- en tuinbouwbodems relevant maar ook natuurbodems, bebouwde bodems en onderwaterbodems en aanpalende oevers. Het ligt voor de hand dat de provincies hier een coördinerende rol in gaan spelen en in overleg met gemeenten en waterschappen de verdere programmering en codificatie in doelen en normen ter hand nemen. Dat hierbij partijen als natuurbeheerders en land- en tuinbouwers ook betrokken zullen worden, volgt alleen al uit de principes van zorgvuldig bestuur. Meer hierover is vastgelegd in de 'Handreiking Uitvoeringsprogrammering Vitale Bodem Noord-Brabant' (Lulofs, 2021).

➤ **Adaptieve plannen houden rekening met onzekerheden, waardoor er heldere afwegingen gemaakt kunnen worden tussen investeringen op de korte termijn en de mogelijkheid om de strategie bij te sturen als de toekomst anders verloopt dan verwacht. Dat past in de methodiek van ontwikkelpaden.**

Klimaatverandering leidt ertoe dat waterschappen en provincies samen met andere actoren in het landelijk gebied nadenken over een klimaatbestendige inrichting van de Nederlandse zandgebieden. Dit vraagt om inzicht in de ruimtelijke, maatschappelijke en fysieke gevolgen van klimaatverandering op regionale schaal, in

mogelijke adaptatiemaatregelen in hun land- en watersystemen, en hoe die via gebiedsprocessen kunnen worden gerealiseerd. De vraag is welke methoden geschikt zijn om in deze context te plannen. Traditioneel gebruikte planningbenaderingen gaan uit van een voorspelbare toekomst, waardoor planning een optimalisatieopgave wordt van maatregelen om vaste doelen te bereiken. Deze aanpak is voor langetermijnplanning niet meer bruikbaar. We hebben immers te maken met klimaatonzekerheden en onvoorspelbare sociaaleconomische ontwikkelingen. Denk ook aan onzekerheden hoe decentrale overheden om zullen gaan met hun zorgplicht en het stellen van doelen en normen onder de Omgevingswet die in 2022 van start gaat. De vraag is nu hoe korte-termijnkeuzes gemaakt moeten worden met oog voor de lange termijn. Negeren van onzekerheid over de toekomst kan leiden tot foute keuzes; bijvoorbeeld omdat maatregelen na verloop van tijd inefficiënt blijken, of te duur, of dat ze het begin blijken van een verkeerd ingeslagen weg. Adaptieve plannen houden rekening met onzekerheden en geven de mogelijkheid om bij te sturen.

Binnen Lumbricus zijn belangrijke stappen gezet in de ontwikkeling naar een klimaatrobuust bodem- en watersysteem. Daarmee geeft het nog geen eindbeeld van hoe dit toekomstige systeem eruit moet zien. Wel worden handvatten geboden om stappen in de geleidelijke ontwikkeling naar een klimaatrobuust water- en bodemsysteem te zetten. Daarmee past het goed in de werkwijze van zogenaamde ontwikkelpaden. Een ontwikkelpad is namelijk geen éénduidige routebeschrijving om van A (niet-klimaatbestendig) naar B (klimaatbestendig) te komen, maar een methode om het proces en de besluitvorming ‘onderweg’ inzichtelijk te maken en te ondersteunen, zodanig dat op de langere termijn de veerkracht en het adaptieve vermogen van actoren en systemen structureel versterkt worden.



GERELATEERDE DELTAFACTS

- [Sturingsinstrumenten voor vitale bodem](#)
- [Best practices voor kennisvalorisatie](#)
- [Blauwe diensten](#)
- [Droogte stuurt functies](#)
- [Zoetwatervoorziening](#)
- [Ontwikkelpaden voor een natuurlijker functioneren van beken en riviertjes](#)
- [Beprijzen van water voor de landbouw](#)
- [Deltascenario's en adaptief deltamanagement](#)



HOOFDSTUK 4

Samen verder

Binnen Lumbricus zijn belangrijke stappen gezet in de ontwikkeling naar een klimaatrobuust bodem- en watersysteem. Daarmee geeft het nog geen eindbeeld van hoe dit toekomstige systeem eruit moet zien. Wel worden handvatten geboden om stappen te zetten in de geleidelijke ontwikkeling naar een klimaatrobust landschap, die bijvoorbeeld kunnen worden opgepakt in de [Nationale Omgevingsvisie](#).

Programma Lumbricus had niet in een betere periode plaats kunnen vinden. De onderzoeksperiode omvatte zowel een zomer met extreme neerslag, als een extreme droogte tot in alle compartimenten van het bodem-watersysteem. We hebben hierdoor en door de ontplooiende activiteiten en samenwerking binnen

Lumbricus veel ervaren en geleerd. Aan de ene kant over de fysische werking van het bodem-watersysteem, hoe maatregelen onder die condities wel of juist niet werken of anders beheerd moeten worden. Aan de andere kant over de governance-aspecten en het maatschappelijk draagvlak voor het nemen van maatregelen om goed voorbereid te zijn op de toekomst.

De droge jaren vanaf 2018 en de [oproep](#) vanuit onder andere de drinkwatersector en waterschappen om het watersysteem wezenlijk anders in te gaan richten, hebben het belang van de gezamenlijke opgave versneld. Meer dan voorheen is er het besef dat een klimaatrobuuste inrichting van gebieden een 'gezamenlijke taak' en een 'participatieve zaak' is. Samen verder!





HOOFDSTUK 5

Literatuurlijst

-
- Bartholomeus, R., Van Huijgevoort, M., Van den Eertwegh, G., Van Deijl, D., 2019. Efficiëntie van beregening en subirrigatie uit grondwater - Modelmatige analyses met SWAP en Hydrus-2D. KWR 2019.059, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus, R.P., Van den Eertwegh, G.A.P.H., Simons, G.W.H., 2015. Naar online en optimale sturing van Klimaat Adaptieve Drainage. Stromingen, 24(4): 27-41.
- Breman, B., Dijk, P., Meijerink, S., 2021. Evaluatie participatieve monitoring Stegeren.
- Breman, B.C., Kuindersma, W., Meijerink, S., Ellen, G.J., Wassink, W., Brugmans, B., Bolt, F.J.E.v.d., 2019. Participatieve monitoring in Lumbricus: een brug tussen innovatie en implementatie. Water Governance(1): 46-49.

- Candel, J.H., 2020. Ahead of the curve: channel pattern formation of low-energy rivers.
- De Weert, J., Rozemeijer, J., Cinjee, A., Van Vliesteren, E., Heinen, M., De Groot, W., 2020. Bodemverbeterende maatregelen: pilot met toevoegen organisch stof. Onderzoek naar mogelijk nitraatuitspoeling naar het grondwater. Deltares 1220765-000-BGS-0022, Deltares.
- De Wit, J., Van Huijgevoort, M., Van den Eertwegh, G., Van Deijl, D., Bartholomeus, R., 2021a. Technische rapportage veldproeven met watermaatregelen Stegeren. Ontwerp en monitoring van vijf veldproeven met (automatisch gestuurde) regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuw in Stegeren (2017-2020). KWR, Nieuwegein. In voorbereiding.
- De Wit, J., Van Huijgevoort, M., Van Deijl, D., Van den Eertwegh, G., Bartholomeus, R., 2021b. Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen. Veldproeven en modelanalyses in het zandgebied van Nederland voor een meer robuuste waterhuishouding op lokale en regionale schaal. KWR, Nieuwegein. In voorbereiding.
- Geertsema, T.J., Torfs, P.J., Eekhout, J.P., Teuling, A.J., Hoitink, A.J., 2020. Wood induced backwater effects in lowland streams. River Research and Applications.
- Heinen (red.), M., 2021. Samenvatting resultaten bodemmaatregelen: Lumbricus Bewuste Bodem. Wageningen, Wageningen Environmental Research.
- Heinen, M., Bakker, G., Wösten, J., 2020. Waterretentie-en doorlatendheidskarakteristieken van boven-en ondergronden in Nederland: de Staringreeks: Update 2018. 1566-7197, Wageningen Environmental Research.
- Heinen, M., Dik, P., Cruijsen, J., 2021. Aanpassing en toepassing SWAP gericht op bodem en hydrologische maatregelen. Deelrapport thema Bewuste Bodem in onderzoeksprogramma Lumbricus. Wageningen, Wageningen Environmental Research.
- Heinen, M., Mulder, M., Walvoort, D., Bartholomeus, R., Stofberg, S., Hack-ten Broeke, M., 2017. Praktijktoets Waterwijzer Landbouw in pilotgebieden de Raam en Vecht. STOWA-rapport 2017-44.
- Kaandorp, V., De Louw, P., Van Eekeren, N., Versteeg, C., 2021. Demonstratie Maatregelen Maaiveldafvoer - Lumbricus Bewuste Bodem. Deltares Rapport 1220765-013-BGS-0002.
- Klijn, F., van Velzen, E., ter Maat, J., Hunink, J., Baarse, G., Beumer, V., Boderie, P., Buma, J., Delsman, J., Hoogewoud, J., 2012. Zoetwatervoorziening in Nederland: aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw, Deltares.
- Knotters, M., Jansen, P.C., 2005. Honderd jaar verdroging in kaart. Stromingen: vakblad voor hydrologen, 11(4): 19-32.
- Lulofs, K.R.D., 2021. Handreiking Vitale Bodem Noord Brabant, Enschede, concept versie onder review, 31 december 2020.
- Maas, G.J., Van de Meij, W.M., Kramer, H., 2021. Zandsuppletie in stuwpasserende nevengeul Overijsselse Vecht. Monitoring morfodynamiek. Wageningen. Wageningen Environmental Research. In voorbereiding.
- Makaske, B., Maas, G., Candel, J., 2020. Handboek geomorfologisch beekherstel. Leidraad voor een stapsgewijze en integrale ontwerpaanpak (Herziene uitgave). STOWA-rapport 2020-36.
- Mens, M., Schasfoort, F., Hunink, J., Pouwels, J., Delsman, J., De Jong, J., 2020. Hydrologische en economische effecten van twee maatregelpakketten voor Deltaprogramma Zoetwater fase II. Deltares.
- Minnema *et al.*, in voorbereiding. Oppervlaktewatermodule de Hooge Raam.
- Mulder, M., Dik, P., Heinen, M., Bartholomeus, R., Van Dam, J., Hack-ten Broeke, M., 2021. Opties binnen Waterwijzer Landbouw in 2020. Van WWL-tabel versie 2.0.0 tot maatwerk met WWL-regionaal.
- Penning, E., Berends, K., Gaytoan Aguilr, S., 2020. Rapportage Lumbricus peilen en Vegetatie 2019 – Proeftuin Zuid. Deltares rapport 12207765-019.
- Pouwels, J., Van Walsum, P., Van Rens, C., Hunink, J., Heinen, M., Cruijsen, J., Veldhuizen, A., Nijsten, G.-J., 2021. Regionale analyse Lumbricus maatregelen. Deltares, in voorbereiding.
- Pronk, G.J., van Dooren, T.C.G.W., Stofberg, S.F., Bartholomeus, R.P., 2020. Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening (Managementsamenvatting en dataoverzicht op dia's) BTO 2020.011, KWR, Nieuwegein.
- Rozemeijer, J., Van den Eertwegh, G., Roelofsen, F., Van der Toorn, L., Van der Scheer, J., Klein, J., Hooijboer, A., De Louw, P., Van der Grift, B., Worm, B., 2018. Lumbricus stofstromenanalyse; routes van nutriënten uit metingen, Deltares.
- Runhaar, J., Hennekens, S., 2015. Hydrologische Randvoorwaarden Natuur; Versie 3, STOWA, WUR, KWR, Amersfoort.

- Ter Maat, J., Van der Vat, M., 2015. Cumulatieve effecten van externe ingrepen voor de zoetwatervoorziening in de 21e eeuw, Deltares.
- Van Bakel, J., Van den Eertwegh, G., Van Deijl, D., Mensink, J., 2020. SAWAX Slimme stuw voor optimaal waterbeheer. Verslag van een veldproef te Arriën 2015-2019.
- Van den Akker, J.J., Deru, J.G.C., Van agtmaal, M., Sleiderink, J., Noij, I.G.A.M., Heinen, M., 2021. Zuiniger met water in de melkveehouderij door de teelt van sorghum (werktitel). Rapport xxx Wageningen Environmental Research, Wageningen. Verschijnt maart 2021.
- Van den Broek, J., Van Elzakker, I., Deuten, J., 2020. Voorbij lokaal enthousiasme: lessen voor de opschaling van living labs.
- Van den Eertwegh, G., Bartholomeus, R., De Louw, P., Witte, F., Van Dam, J., Van Deijl, D., Hoefsloot, P., Van Huijgevoort, M., Hunink, J., America, I., Pouwels, J., De Wit, J., 2020. Rapportage Droogte Zandgronden Nederland Fase 2, behorende bij: Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden-en Oost-Nederland: het verhaal. Analyse van droogte 2018 en 2019 en tussentijdse bevindingen, Projectteam Droogte.
- Van den Eertwegh, G., van Bakel, P., Stuyt, L., van Iersel, A., Kuipers, L., Talsma, M., 2013. KlimaatAdaptieve Drainage: een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen. Eindrapportage Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling'. Referentienummer SBIR113008.
- Van Walsum, P., Kroon, T., 2018. Verbetering hydrologisch instrumentarium met koppeling WOFOST en zuurstofstress-simulatie - Lumbricus notitie
- Witte, J.-P., Nijp, J., Bartholomeus, R., de Wit, J., Kros, H., Reinds, G.J., van de Vries, W., 2020. Modelleren van de effecten van klimaat en waterbeheer op de bodem-pH met de waterwijzer natuur. 9057739143, STOWA-rapport 2020-39.
- Witte, J.P.M., Bartholomeus, R.P., Van Bodegom, P.M., Cirkel, D.G., Van Ek, R., Fujita, Y., Janssen, G.M., Spek, T.J., Runhaar, H., 2015. A probabilistic eco-hydrological model to predict the effects of climate change on natural vegetation at a regional scale. *Landscape Ecology*, 30: 835–854. DOI:10.1007/s10980-014-0086-z
- Witte, J.P.M., Runhaar, J., Bartholomeus, R.P., Fujita, Y., Hoefsloot, P., Kros, J., Mol, J., De Vries, W., 2018. De Waterwijzer Natuur. Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op terrestrische natuur. 48, STOWA-rapport 2018-44.
- Zoetwatervoorziening Oost Nederland, 2012. Regionale rapportage Regio Oost voor deelprogramma Zoetwater.



Amersfoort, februari 2021

Uitgave	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer Postbus 2180 3800 CD Amersfoort
Auteur	Ruud Bartholomeus (KWR, redactie)
Opdrachtgever	Programma Lumbricus
Eindredactie	Bert-Jan van Weeren
Illustraties	Studio Ronald van der Heide & Natasha Sena (blz 42)
Projectmanager	Klaasjan Raat (KWR)
Fotografie	Bas Worm, Ruud Bartholomeus, Lars Soerink (Vildafoto, blz. 4 & 10), Martijn Bronswijk (blz. 46)
Vormgeving	Shapeshifter.nl Utrecht

Met bijdragen van

Met bijdragen van: Bas Worm (WS Vechtstromen), Rob Ruijtenberg (STOWA), Erik van Slobbe (Wageningen Universiteit), Kris Lulofs (Universiteit Twente), Gé van den Eertwegh, Dion van Deijl (KnowH2O), Chris van Rens, Frank van der Bolt (WS Aa en Maas), Nick van Eekeren, Joachim Deru (Louis Bolk Instituut), Mirjam Hack-ten Broeke, Bas Breman, Marius Heinen, Gilbert Maas, Ralf Verdonshot, Paul van Walsum, Martin Mulder (Wageningen Environmental Research), Sander Meijerink (Radboud Universiteit), Geert-Jan Nijsten, Ellis Penning, Joachim Rozemeijer, Vince Kaandorp, Perry de Louw, Joachim Hunink, Janneke Pouwels, Timo Kroon, Bennie Minnema (Deltares), Jelmer Nijp, Janine de Wit, Marjolein van Huijgevoort, Klaasjan Raat (KWR), Marloes van der Kamp, Sander Bakkenist (WS Vechtstromen)

STOWA-rapportnummer 2021-05

ISBN 978.90.5773.925.5

Het kennisprogramma Lumbricus (www.programmalumbricus.nl) is een consortium bestaande uit Waterschap Aa en Maas, Waterschap Vechtstromen, Waterschap Limburg, STOWA, Deltares, KnowH2O, KWR Water Research Institute, Radboud Universiteit, Louis Bolk Instituut, Universiteit Twente, Wageningen Environmental Research en Wageningen Universiteit.

Copyright

De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

Disclaimer

Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.



UNIVERSITY OF TWENTE.



Mede mogelijk gemaakt door:



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

Provincie Noord-Brabant



