Ontwikkeling van drainagesystemen: Water afvoeren - vasthouden - aanvullen

JANINE DE WIT, GÉ VAN DEN EERTWEGH, JOS VAN DAM, COEN RITSEMA EN RUUD BARTHOLOMEUS

Voldoende zoet water is noodzakelijk voor waterafhankelijke sectoren als landbouw, natuur, drinkwaterbedrijven en industrie. Zelfs in laaggelegen gebieden als Nederland wordt de disbalans tussen watervraag en wateraanbod steeds groter, naarmate waterbeheer, watergebruik en klimaat verder veranderen. Dit artikel is een samenvatting van een peer-reviewed artikel waarin een overzicht is gegeven van de veranderde drainagepraktijk in Nederland, met name van ontwikkelingen in gebruik en ontwerp van buisdrainage tussen 1950-2020: van water afvoeren, naar afvoeren én vasthouden en afvoeren én vasthouden én aanvullen. Op basis van Nederlandse veldproeven met regelbare drainage met subirrigatie en internationale literatuur, geven we inzicht in de componenten van de waterbalans die beïnvloed worden door drainage en subirrigatie. Op basis hiervan geven we een doorkijk naar of en hoe regelbare drainage met subirrigatie ingepast kan worden in het regionale watersysteem.

Extended abstract

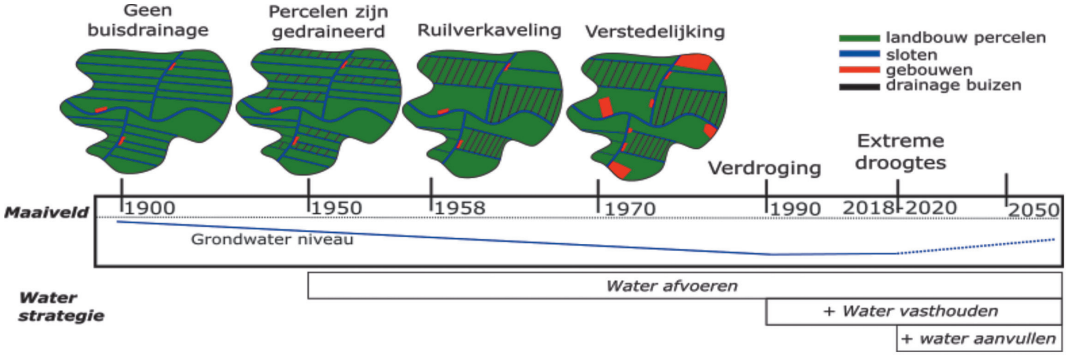
Inleiding

In laaggelegen deltagebieden als Nederland maken factoren als klimaatverandering, economische groei, verstedelijking en een toename in voedselvraag het complex om voldoende zoet water te garanderen voor alle sectoren. Daarnaast zal ook de frequentie en omvang van extreem droge en natte weercondities toenemen. Het huidige Nederlandse watersysteem is onvoldoende ingericht om op deze extremen te anticiperen.

In Nederland zijn in de 20e eeuw veel landbouwpercelen ontwaterd door water snel af te voeren. Na de Tweede Wereldoorlog nam de bevolkingsgroei toe, evenals de voedselvraag. Om aan deze voedselvraag te voldoen moest de gewasproductie omhoog. Landbouwpercelen zijn daarvoor intensiever ontwaterd, waardoor grondwaterstanden verder verlaagd zijn, onder andere door het aanleggen van buisdrainage (Afbeelding 1).

Naast de ontwatering van landbouwpercelen vond er tussen 1960-1980 ook ruilverkaveling plaats. Hierdoor zijn landbouwpercelen groter geworden en is de ontwatering verder geïntensiveerd. Ontwatering en stijging van de gewasopbrengsten hebben samen met andere factoren zoals verstedelijking en toename

van grondwaterwinning gezorgd voor een systematische daling van grondwaterstanden: verdroging[1] (Knotters en Jansen, 2005; Witte e.a., 2019).



Afbeelding 1: *Tijdlijn met ontwikkelingen die het Nederlandse landschap en grondwaterniveau beïnvloed hebben. Verdroging startte rond 1950; de waterstrategie was het afvoeren van water. Om gewasgroei te bevorderen, verschoof dit vanaf 1990 naar i) het afvoeren van water om wateroverlast te voorkomen en ii) water vast te houden waar nodig. Vanaf 2018 is de waterstrategie veranderd naar i) water afvoeren om wateroverlast te voorkomen, ii) water vasthouden en iii) water aan te vullen om droogtestress te voorkomen.*

Naast maatregelen om wateroverlast te voorkomen, zijn maatregelen voor het vasthouden van water nodig om ook te kunnen anticiperen op te droge condities. In dit artikel richten we ons specifiek op het benutten van buisdrainage in gebieden met relatief ondiepe (1 - 3 m-mv) freatische grondwaterstanden op de hoge zandgronden, vanwege de hoogste urgentie met betrekking tot steeds verder uitzakkende grondwaterstanden en de toegenomen vraag naar irrigatiewater. Het doel van dit artikel is inzicht geven in de ontwikkelingen van drainagesystemen in combinatie met de bijbehorende drainagestrategie en de consequenties voor het grond- en oppervlaktewatersysteem. We geven in de volgende paragrafen een beknopt overzicht van:

- verschillende vormen van buisdrainage en de ontwikkelingen in de tijd;
- het effect van deze systemen op componenten van de waterbalans;
- overwegingen voor het inpassen van de systemen in het regionale waterbeheer.

Voor meer details verwijzen we naar De Wit e.a. (2022).

Buisdrainagesystemen

Conventionele buisdrainage

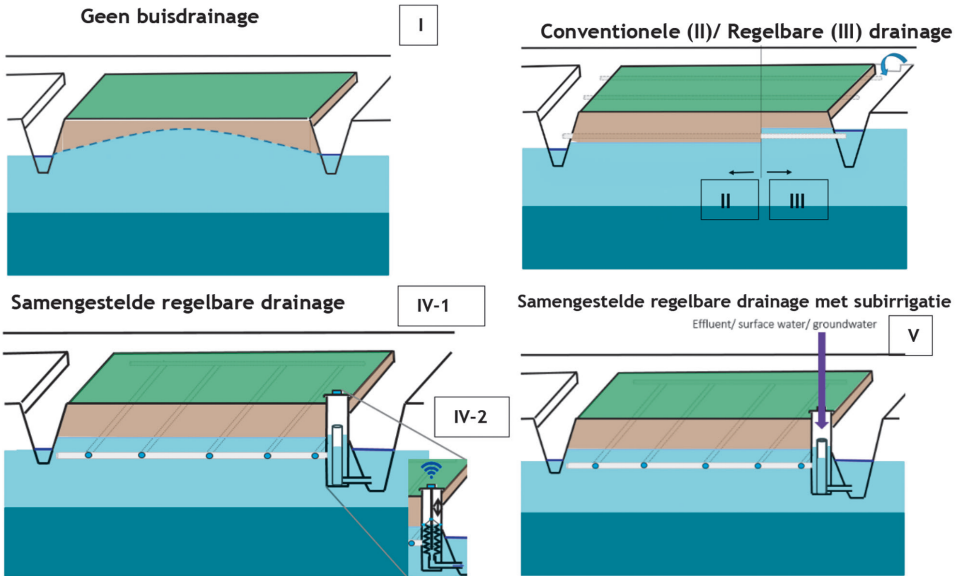
Conventionele drainage bestaat uit afzonderlijke drainagebuizen die afvoeren op een sloot (Afbeelding 2-II). De drainagebuizen zijn hoger aangelegd dan het gehandhaafde slootpeil; de drainage gaat door totdat het grondwaterpeil lager is dan de hoogte van het drainagesysteem (Stuyt, 2013). Conventionele drainage is na de Tweede Wereldoorlog op grote schaal aangelegd (Stuyt, 2013). Het primaire doel van conventionele drainage is het verlagen van hoge

1 https://www.clo.nl/onderwerpen/verdroging

grondwaterstanden in de winter en het vroege voorjaar ten behoeve van de grondbewerking en het voorkomen van wateroverlast tijdens het groeiseizoen (Ritzema e.a., 2006). Buisdrainage leidt tot een vlakkere grondwaterspiegel dan in de situatie zonder drainage (Afbeelding 2-I). Conventionele drainage kan echter ook leiden tot droogtestress in de zomerperiode, omdat er dan minder water beschikbaar is dan in de situatie zonder drainage (Tan e.a., 2002). Tegenwoordig bevat ongeveer 34% van het Nederlandse landbouwareaal buisdrainage (Massop en Schuiling, 2016).

Regelbare drainage

Regelbare drainage kent een aantal varianten. Een eenvoudige variant bestaat uit afzonderlijke drainagebuizen die uitmonden in de sloot, vergelijkbaar met conventionele drainage, waarbij het slootpeil wordt gebruikt om de drainage te regelen (Afbeelding 2-III). Als een hoger slootpeil ervoor zorgt dat de drains niet vrij kunnen uitstromen, dan wordt de drainage beperkt. Conventionele drainage is op deze manier aangepast om de afvoer te kunnen regelen via het waterpeil in een sloot. Het doel van regelbare drainage is i) onnodige drainage te voorkomen en water te behouden in het regionale watersysteem tijdens regenval, en ii) de piekafvoeren te verminderen.



***Afbeelding 2**: Een overzicht van ontwikkelingen in drainagesystemen tussen 1950-2020. Agrarische velden startten zonder drainage (I), opgevolgd door aanleg van conventionele drainage (II) en regelbare drainage (III), samengestelde drainage geregeld met een vast mechanisme (IV-1) of online aansturing (IV-2). De meest recente toepassing is samengestelde regelbare drainage met subirrigatie, in combinatie met een vast mechanisme of online aansturing (V).*

Samengestelde regelbare drainage

Samengestelde regelbare drainage bestaat uit een drainagesysteem waarbij de afzonderlijke drainagebuizen aan het einde van het perceel door één verzamelbuis met elkaar zijn verbonden (Afbeelding 2-IV-1). De verzamelbuis is verbon-

den met de regelput en de regelput is verbonden met een aangrenzende sloot. Het verschil tussen regelbare drainage en samengestelde regelbare drainage is dat het drainageniveau bij samengestelde regelbare drainage voor één landbouwperceel wordt geregeld in de regelput door de agrariër, in plaats van via het slootpeil door een waterbeheerder voor een groter gebied. De regelput bevat veelal een pvc-pijp (ook bekend als 'pijpje van Van Iersel') als stuwconstructie; de hoogte van de uitstroomopening van de pijp bepaalt de stuwhoogte. Het waterpeil in de regelput is gelijk aan de waterdruk in de drainagebuizen. Dit systeem maakt het mogelijk om water vast te houden binnen landbouwpercelen, regelbaar door de agrariër:

1 Water afvoeren om het grondwaterpeil te verlagen tijdens natte periodes. De afvoer via drainage kan worden verminderd en geregeld. Drainage vindt plaats als het waterniveau in de regelput hoger is dan de 'stuwhoogte' in de regelput.
2 Water vasthouden in het bodemwatersysteem om snelle daling van de grondwaterstand tijdens droge perioden te voorkomen en de grondwaterstand tijdens perioden van regenval te verhogen. Het vasthouden van water vindt plaats als het niveau van de stuw in de regelput hoger is dan de waterstand in de regelput.

Klimaatadaptieve drainage

Klimaatadaptieve drainage (KAD) is een innovatief voorbeeld van samengestelde regelbare drainage, waarbij de stuwconstructie in de regelput automatisch online gestuurd kan worden (Van den Eertwegh e.a., 2013) (Afbeelding 2-IV-2). Een belangrijk verschil tussen 'standaard' samengestelde regelbare drainage en KAD is het proces van het beheren van het drainageniveau in de regelput. Bij KAD kan het drainageniveau online en traploos worden geregeld, bij het 'basis'-systeem kan dit enkel handmatig. Door het KAD-systeem te combineren met een KAD-management-algoritme kan het gewenste drainageniveau automatisch worden ingesteld op basis van weersvoorspellingen en de actuele hydrologische status van het veld (Bartholomeus e.a., 2015). In het Programma Lumbricus en het TKI project KLIMAP is deze sturing operationeel gemaakt op een perceel in Stegeren (Overijssel).

Samengestelde regelbare drainage met subirrigatie

De huidige (samengestelde) regelbare drainagesystemen kunnen worden aangepast naar systemen met subirrigatie (Afbeelding 2-V), door (extern) water in de regelput aan te voeren. Dit water kan rechtstreeks of door actief pompen in de regelput stromen. Als het waterpeil in de regelput hoger is dan het grondwaterniveau, infiltreert water vanuit de drainagebuizen in de bodem. Het doel van subirrigatie is het grondwaterniveau te verhogen en zo ook het bodemvochtgehalte in de wortelzone.
Deze laatste vorm van buisdrainage kan dus:

1 water afvoeren (waarvoor een drainagesysteem in beginsel bedoeld is);
2 water vasthouden om onnodige drainage te voorkomen;
3 grondwater aanvullen indien er een bron van water beschikbaar is.

Voor subirrigatie moet een externe waterbron beschikbaar zijn. Dit kan oppervlaktewater zijn (Smith e.a., 1985), water uit bassins (Drury e.a., 1996), gerecy-

cled drainagewater (Allred e.a., 2003), grondwater (Bartholomeus e.a., 2018a) of behandeld (industrieel of huishoudelijk) restwater (Bartholomeus e.a., 2017; Bartholomeus e.a., 2018b; Narain-Ford e.a., 2020).

Samengestelde gestuurde drainage met subirrigatie wordt toegepast in verschillende veldexperimenten in de Nederlandse pleistocene hooglanden (zie De Wit e.a. (2021) voor een samenvatting uit het programma Lumbricus[2]). Ook in het buitenland is ervaring opgedaan met subirrigatie via drainagebuizen. Voor een aantal gedocumenteerde toepassingen geeft Tabel 1 de fysische karakteristieken en het effect van subirrigatie op het grondwaterniveau en de gewasopbrengst. Uit Tabel 1 blijkt dat het grondwaterniveau met ± 50 cm verhoogd wordt als gevolg van subirrigatie. De procentuele gewasopbrengst is in elke veldproef gestegen, afhankelijk van de fysische karakteristieken, gewas en meteorologie.

Tabel 1: *Beknopt literatuuroverzicht gefocust op i) effecten van samengestelde regelbare drainage ('sub') vergeleken met systemen zonder subirrigatie ('geen sub') voor grondwaterniveau, relatieve toename van gewasopbrengst ('gewas'), gewassoort ('type'), en aangevoerd water ('hoeveelheid') en periode (d), ii) de karakteristieken van het buizensysteem: gebruikte waterbron en drainafstand en draindiepte. Een uitgebreidere tabel staat in De Wit e.a. (2022).*

Referentie	Land	Bodem	Grondwaterniveau		Gewas		Wateraanvoer		Waterbron	Drainkarakteristieken	
			Geen sub (m-mv)	Sub (m-mv)	Opbrengst (%)	Type (-)	Hoeveelheid (mm)	Periode (d)		Afstand (m)	Diepte (m)
Hooghoudt (1952)	NL	Zware klei	1.0	0.40/ 0.45	+ 84	Hooi	4 mm/d	100	Oppervlaktewater	2.0	0.6/ 0.8
Drury e.a. (1996)	Canada	Klei / leem	1991: 1.22, 1992: 0.92, 1993: 1.30, 1994: 1.10	1991: 0.95, 1992: 0.55, 1993: 0.60, 1994: 0.50	-	-	109 (1991, 1993, 1994) 5.7 (1992)[4]	± 76	Irrigatiebassin	7.5	0.6
Ng e.a. (2002)	Canada	Zandige leem	1.31	0.82	+ 64	maïs	183.9	60	Oppervlaktewater (meer)	6.1	0.60
Allred e.a. (2003)	USA	Klei	-		Droge jaren + 34.5 + 38.1	 maïs Soja bonen	-		Hergebruik afvoerwater	2.4 to 4.9	0.76 to 0.91
					Natte jaren + 14.4 + 9.7	 maïs Soja bonen					
					Gemiddelde + 19.6 + 17.4	 maïs soja bonen					
Wesström e.a. (2014)[1]	Zweden	Zandige leem	0.30 to 0.70 (zonder subirrigatie)		+ 6-10 + 20	aardappels tarwe	2002: 60 2003: 80	-	-	16	1
Jouni e.a. (2018)[2]	Iran	Ziltige klei	1.11	0.71	+ 27	tarwe	731	± 242	-	80	2.0

[1]: De veldproeven waren conventionele drainage en regelbare drainage, beide met subirrigatie.

[2]: De opbrengst van tarwe van de veldproeven 'free drainage' en 'controlled drainage at 70 cm' zijn weergegeven.

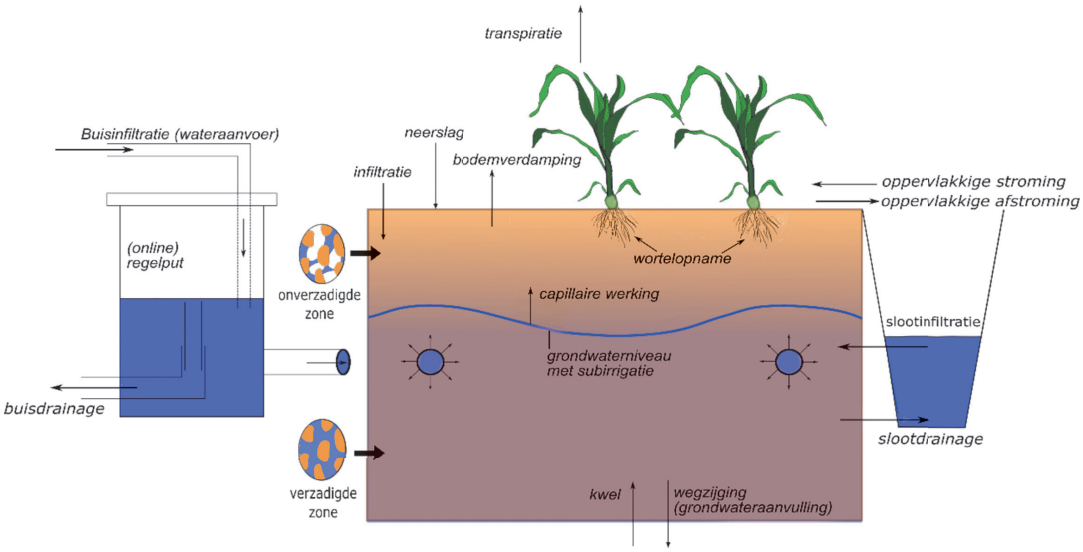
Effecten van drainagesystemen op componenten van de waterbalans

Drainagesystemen hebben een direct effect op het (grond)watersysteem en op alle componenten van de waterbalans op veldschaal (Afbeelding 3).

2 www.stowa.nl/lumbricus

Voor de verschillende vormen van buisdrainage zijn de volgende aspecten met betrekking tot componenten van de waterbalans van belang:

- **Geen buisdrainage:** werkelijke transpiratie (T_{act}) kan laag zijn als gevolg van te natte omstandigheden. Oppervlakkige afvoer en slootdrainage zijn juist hoog door de nattere omstandigheden.
- **Conventionele drainage:** Vergeleken met 'geen drainage' neemt de afvoer via buisdrainage toe, en de grondwateraanvulling en oppervlakkige afvoer nemen af. T_{act} neemt toe als gevolg van minder zuurstofstress. Overmatige drainage en daardoor te lage grondwaterstanden in de zomer kunnen echter leiden tot droogtestress en verminderde T_{act}.
- **Regelbare drainage:** Vergeleken met 'conventionele drainage' neemt de buisdrainage af en de grondwateraanvulling toe. T_{act} neemt voornamelijk toe, maar kan afnemen bij een slechte beheer van het systeem (dat wil zeggen: door te nat gecreëerde omstandigheden).
- **Samengestelde regelbare drainage:** de waterbalanscomponenten zijn vergelijkbaar met regelbare drainage.
- **Samengestelde regelbare drainage met subirrigatie:** Tijdens perioden van drainage (afvoer) zullen de waterbalanscomponenten vergelijkbaar zijn met die van samengestelde regelbare drainage. In perioden van subirrigatie zullen de componenten buisinfiltratie, grondwateraanvulling en T_{act} toenemen ten opzichte van samengestelde regelbare drainage. Slootpeilen rondom het veld zijn van belang omdat een ondiep grondwaterpeil met lage slootpeilen leidt tot laterale drainage en directe afvoer naar de sloot, een onbedoeld en ongunstig effect (Giardini e.a., 1995). Als het slootpeil niet wordt aangepast neemt dus ook 'slootdrainage' toe.



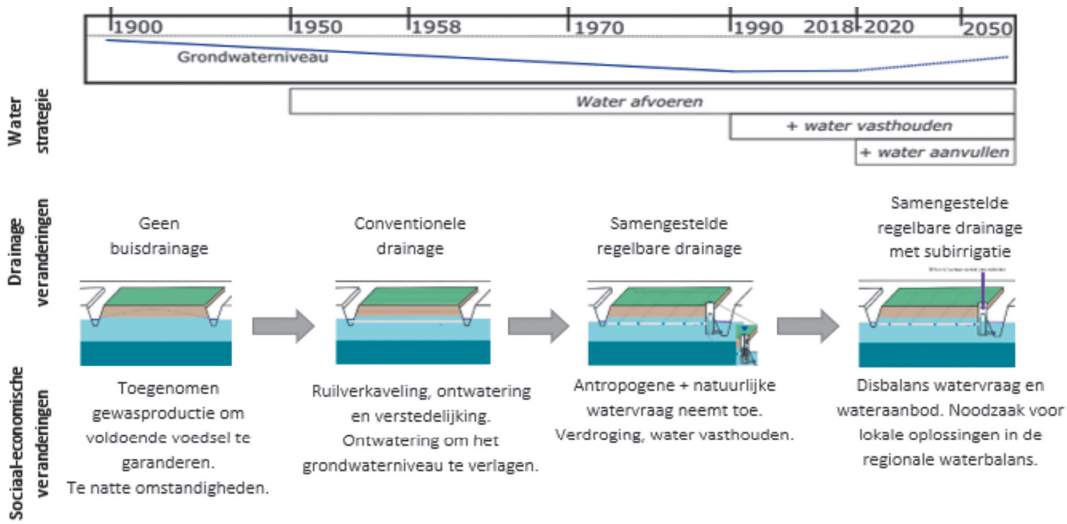
Afbeelding 3: *De bodemwaterkolom op veldschaal met bijbehorende waterbalanscomponenten.*

Inpassen van regelbare drainage met subirrigatie in het regionale watersysteem

Veranderingen in drainagesystemen werden voornamelijk veroorzaakt door veranderingen in landgebruik als gevolg van sociale en economische veranderingen, zoals duidelijk blijkt uit de literatuur, met structureel lagere grondwaterstanden tot gevolg (Afbeelding 4). Hoewel het Nederlandse waterbeheer zich al in een proces bevindt naar een meer klimaatadaptieve aanpak (Van der Brugge e.a., 2005), is een veerkrachtig bodemwatersysteem nodig om te kunnen anticiperen op de verwachte (toekomstige) weersextremen (Afbeelding 1).

Literatuur, modelberekeningen en veldproeven laten zien dat regelbare drainagesystemen kunnen bijdragen aan het vasthouden van water, ten opzichte van conventionele drainagesystemen. Daarnaast kan subirrigatie worden toegepast om het grondwater actief aan te vullen. Op deze manier zou de waterbeschikbaarheid voor gewassen klimaatadaptiever beheerd kunnen worden. Uit de literatuur blijkt echter ook dat het water dat met subirrigatie is geïnfiltreerd maar voor een beperkt deel door de planten kan worden opgenomen (transpiratie). Een groter deel vult het (regionale) grondwatersysteem aan. Bovendien kan de totale hoeveelheid water die gebruikt wordt voor subirrigatie groot zijn. Dit kan een aanzienlijke druk op de beschikbare (regionale) zoetwaterbronnen leggen.

Regelbare drainage met subirrigatie is de afgelopen decennia in de literatuur beschreven, waarbij de nadruk lag op effecten op lokale schaal. Ondanks dat subirrigatiesystemen op perceelschaal worden toegepast, moeten ze wel ingepast worden in het regionale watersysteem en het beheer ervan. Er zal niet zondermeer overal en altijd een bron voor subirrigatie beschikbaar zijn.



Afbeelding 4: *Drainage-ontwikkelingen in Nederland gebeurde parallel aan sociaaleconomische veranderingen.*

Externe waterbronnen kunnen zijn: verzameld regenwater (Drury e.a., 1996), oppervlaktewater (Tan e.a., 1999) en verzameld drainagewater (Allred e.a., 2003). Naast deze relatief gebruikelijke waterbronnen wordt het gebruik van alternatieve waterbronnen, zoals gezuiverd restwater, onderzocht (Bartholomeus e.a., 2017; Narain-Ford e.a., 2021). Een waterbron moet van voldoende kwaliteit zijn om deze te kunnen gebruiken voor subirrigatie. Maar gezien de veranderingen van de waterbalanscomponenten als gevolg van subirrigatie (Afbeelding 3), ook wat betreft waterkwantiteit, moet de doorwerking van het watergebruik voor subirrigatie in het hele watersysteem worden gekwantificeerd. Er is nauwelijks literatuur beschikbaar over de toepassing van verschillende waterbronnen voor subirrigatie en de invloed van de gebruikte waterbron op het regionale watersysteem.

In veel landen zijn er concurrerende claims op veelal schaarse zoetwaterbronnen; de watervraag komt niet alleen uit de landbouwsector, maar ook uit de industrie, het drinkwater en de natuur (Zikos en Hagedorn, 2017). Wanneer subirrigatie op regionale schaal wordt toegepast, vereist de implementatie kennis van alle waterstromen, inclusief de antropogene watervraag van verschillende sectoren die al claims leggen op dezelfde waterbronnen (Pronk e.a., 2021). Daarnaast is efficiënt gebruik van waterbronnen nodig om het regionale grondwaterpeil op peil te houden (Xue e.a., 2017). In deze context is regelbare drainage met subirrigatie een bijzondere methode: water wordt gebruikt voor verhoging van transpiratie en gewasopbrengsten, terwijl (grond)wateronttrekkingen voor beregening worden beperkt, en het grondwater wordt aangevuld. Op deze manier kan met subirrigatie water binnen het regionale grondwatersysteem worden gehouden, dat anders afgevoerd zou zijn.

Om subirrigatie in het regionale watersysteem te kunnen opnemen, moeten inzichten in de regionale waterbeschikbaarheid en de doorwerking van het watergebruik voor subirrigatie door het hele watersysteem worden gekwantificeerd. Gezien de grote verschillen in waterbehoefte die in de literatuur zijn gevonden, is het duidelijk dat de waterbehoefte voor subirrigatiesystemen op regionale schaal bekend moet zijn, voordat deze op een verantwoorde manier in de regionale waterhuishouding kunnen worden opgenomen.

Een juiste implementatie van regelbare drainage met subirrigatie in het regionale watersysteem vraagt een integrale, stroomgebiedsbrede aanpak met verschillende uitdagingen:

- Inzicht is nodig in de ruimtelijke en temporele waterbeschikbaarheid voor subirrigatie.
- Een efficiënte watervoorziening en minimalisering van de wateraanvoer zouden kunnen worden bereikt door een geoptimaliseerde pompstrategie (Smith e.a., 1985).
- Voor de wateraanvoer kunnen ook andere waterbronnen dan oppervlaktewater worden gebruikt, zoals gezuiverd afvalwater uit RWZI's of industrie. Belangrijke voorwaarden zijn voldoende waterkwaliteit en beperkte negatieve neveneffecten tijdens de verspreiding door het gehele watersysteem (Pronk e.a., 2021).

Conclusie

Dit artikel geeft inzicht in de ontwikkeling van (buis)drainagesystemen in Nederland. Uit de literatuur komt duidelijk naar voren dat veranderingen in drainagesystemen vooral zijn veroorzaakt door gewenste aanpassingen in landgebruik als gevolg van sociaaleconomische ontwikkelingen. Het Nederlandse waterbeheer en het watersysteem zijn echter nog steeds gericht op ontwatering en het afvoeren van water (Ritzema en Stuyt, 2015; Ritzema en van Loon-Steensma, 2018). Om de disbalans in watervraag en wateraanbod én klimaatverandering tegemoet te komen, is het zaak de ontwatering te reduceren en meer water vast te houden, daar waar het als neerslag valt, en hogere grondwaterstanden te realiseren. Om dit te realiseren kunnen bestaande conventionele buisdrainagesystemen omgebouwd worden tot regelbare drainage. Als er ook wateraanvoer mogelijk is en er bronnen van zoet water voorhanden zijn, dan kan bovendien subirrigatie worden toegepast met hetzelfde systeem. Regelbare drainage met subirrigatie is vervolgens een middel om i) water af te voeren wanneer nodig, ii) water vast te houden op het perceel om onnodige drainage te voorkomen en iii) (grond)water aan te vullen. Dit systeem heeft het potentieel om 1) de groeiomstandigheden voor gewassen op veldschaal te verbeteren, 2) piekafvoeren op regionale schaal te verminderen, en 3) minder water af te voeren op regionale schaal en de grondwateraanvulling te verhogen. Het praktische management van deze systemen door agrariërs is wezenlijk: de bediening van het systeem bepaalt de effectiviteit en de gevolgen voor de waterhuishouding. De benodigde wateraanvoer voor subirrigatie kan groot zijn en er treedt in de praktijk ook grondwateraanvulling op. Dit betekent dat er voldoende beschikbaarheid van zoet water moet zijn in de regio. Daarom is een integrale beschouwing voor de implementatie van subirrigatie in het regionale systeem nodig, waaronder inzicht in de doorwerking van regelbare drainage met subirrigatie in het gehele watersysteem.

Literatuur

Allred, B.J., L.C. Brown, N. Fausey, R.L. Cooper, W. Clevenger, G. Prill, G. La Barge, C. Thornton, D. Riethman en P. Chester (2003) Water table management to enhance crop yields in a wetland reservoir subirrigation system; in: *Applied Engineering in Agriculture*, vol 19, no 4, pag 407.

Bartholomeus, R., G. van den Eertwegh en M. van Huijgevoort (2018a) Subirrigatie met grondwater - Monitoring veldproef America, Waterschap Limburg. KWR 2018.029. KWR.

Bartholomeus, R.P., G.W.H. Simons en G.A.P.H. van den Eertwegh (2015) Anticipating on amplifying water stress: Optimal crop production supported by climate-adaptive water management. KWR 2015.062. KWR.

Bartholomeus, R.P., S.F. Stofberg, G.A.P.H. van den Eertwegh en D.G. Cirkel (2017) Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen - 2016. BTO 2017.062. KWR.

Bartholomeus, R.P., A.H. van Loon en M.H.J. van Huijgevoort (2018b) Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw - Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria. KWR 2018.089. KWR.

De Wit, J.A., C.J. Ritsema, J.C. van Dam, G.A.P.H. van den Eertwegh en R.P. Bartholomeus (2022) Development of subsurface drainage systems: Discharge – retention – recharge; in: *Agricultural Water Management*, vol 269, pag 107677.
De Wit, J.A., M.H.J. Van Huijgevoort, D. Van Deijl, G.A.P.H. Van den Eertwegh en R.P. Bartholomeus (2021) Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen - Veldproeven en modelanalyses in het zandgebied van Nederland voor een robuustere waterhuishouding op lokale en regionale schaal. KWR 2021.028. KWR.
Drury, C., C. Tan, J. Gaynor, T. Oloya en T. Welacky (1996) Influence of controlled drainage-subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss. Wiley Online Library.
Giardini, L., M. Borin, H. Belcher en F. D'Itri (1995) Subirrigation experiments in the Veneto Region (North-East Italy): a review of the period 1981-1989; in: *Subirrigation and controlled drainage*, vol, pag 207-223.
Knotters, M. en P. Jansen (2005) Honderd jaar verdroging in kaart; in: *Stromingen: vakblad voor hydrologen*, vol 11, no 4, pag 19-32.
Massop, H.T.L. en C. Schuiling (2016) Buisdrainagekaart 2015: update landelijke buisdrainagekaart op basis van de landbouwmeitellingen van 2012. Alterra, Wageningen-UR.
Narain-Ford, D.M., R.P. Bartholomeus, S.C. Dekker en A.P. van Wezel (2020) Natural Purification Through Soils: Risks and Opportunities of Sewage Effluent Reuse in Sub-surface Irrigation; in: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (Continuation of Residue Reviews)*, 1-33. Springer International Publishing, Cham.
Narain-Ford, D.M., R.P. Bartholomeus, B.W. Raterman, I. van Zaanen, T.T. Ter Laak, A.P. van Wezel en S.C. Dekker (2021) Shifting the imbalance: Intentional reuse of Dutch sewage effluent in sub-surface irrigation; in: *Science of the Total Environment*, vol 752, pag 142214.
Pronk, G.J., S.F. Stofberg, T.C.G.W. Van Dooren, M.M.L. Dingemans, J. Frijns, N.E. Koeman-Stein, P.W.M.H. Smeets en R.P. Bartholomeus (2021) Increasing Water System Robustness in the Netherlands: Potential of Cross-Sectoral Water Reuse; in: *Water Resources Management*, vol, pag.
Ritzema, H.P., H.J. Nijland en F.W. Croon (2006) Subsurface drainage practices: from manual installation to large-scale implementation; in: *Agricultural Water Management*, vol 86, no 1-2, pag 60-71.
Ritzema, H.P. en L.C.P.M. Stuyt (2015) Land drainage strategies to cope with climate change in the Netherlands; in: *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, vol 65, no sup1, pag 80-92.
Ritzema, H.P. en J.M. van Loon-Steensma (2018) Coping with Climate Change in A densely Populated Delta : A Paradigm Shift in Flood And Water Management in The Netherlands; in: *Irrigation and Drainage 67 (2018) s1; ISSN: 1531-0353*, vol, pag.
Smith, M.C., R.W. Skaggs en J.E. Parsons (1985) Subirrigation system control for water use efficiency; in: *Transactions of the ASAE*, vol 28, no 2, pag 489-0496.
Stuyt, L.C.P.M. (2013) Regelbare drainage als schakel in toekomstbestendig waterbeheer: bundeling van resultaten van onderzoek, ervaringen en indrukken, opgedaan in binnen-en buitenland. Alterra-rapport 2370. Alterra Wageningen UR.

Tan, C., C. Drury, J. Gaynor en H. Ng (1999) Effect of controlled drainage and subirrigation on subsurface tile drainage nitrate loss and crop yield at the farm scale; in: *Canadian Water Resources Journal*, vol 24, no 3, pag 177-186.
Tan, C.S., C.F. Drury, J.D. Gaynor, T.W. Welacky en W.D. Reynolds (2002) Effect of tillage and water table control on evapotranspiration, surface runoff, tile drainage and soil water content under maize on a clay loam soil; in: *Agricultural Water Management*, vol 54, no 3, pag 173-188.
Van den Eertwegh, G.A.P.H., P.J.T. van Bakel, L. Stuyt, A. van Iersel, L. Kuipers, M. Talsma en P. Droogers (2013) KlimaatAdaptieve Drainage - Een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen - Samenvatting resultaten Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling'. FutureWater.
Van der Brugge, R., J. Rotmans en D. Loorbach (2005) The transition in Dutch water management; in: *Regional environmental change*, vol 5, no 4, pag 164-176.
Witte, J.P.M., W.J. Zaadnoordijk en J.J. Buyse (2019) Forensic hydrology reveals why groundwater tables in the province of Noord Brabant (the Netherlands) dropped more than expected; in: *Water*, vol 11, no 3, pag 478.
Xue, J., H. Guan, Z. Huo, F. Wang, G. Huang en J. Boll (2017) Water saving practices enhance regional efficiency of water consumption and water productivity in an arid agricultural area with shallow groundwater; in: *Agricultural] Water Management*, vol 194, pag 78-89.
Zikos, D. en K. Hagedorn (2017) Competition for Water Resources From the European Perspective; in: *Competition for water resources : experiences and management approaches in the US and Europe*, ed. J. R. Ziolkowska en J. M. Peterson, 19-35. Elsevier, Amsterdam.

Summary Development of drainage systems: discharge – retention – recharge

Sufficient freshwater is needed for water-dependent sectors such as agriculture, nature, drinking water production, and industry. However, even in low-lying, flood-prone countries like The Netherlands, climate change, weather extremes, economic growth, urbanization, land subsidence, and increased food production makes it more complex to guarantee sufficient freshwater for all sectors at the same time. Furthermore, the frequency and amplitude of extremely dry and wet weather conditions is expected to increase. The current Dutch water management system is not designed to anticipate on these extremes. Over the last decades, (subsurface) drainage of agricultural fields, land consolidation, and urbanization resulted in declining groundwater tables. Additionally, the fresh water demand of different sectors as mentioned increased, causing an increased pressure on the regional groundwater system. As a consequence, the annual groundwater table in sandy soil areas dropped over time with the effect that, nowadays, fresh water is becoming scarce in dry periods. Agricultural drainage could be decreased, resulting in larger groundwater recharge rates and higher groundwater tables. In this article we provide insight in the shifting drainage systems and management in the Netherlands (1950-2020), with the corresponding drainage systems, developing from conventional drainage (approx. 1950 - 1990), to controlled drainage (1990's onwards), climate adaptive drainage (2010 onwards), and systems combination with subirrigation (2018

onwards). Furthermore, we provide insight in the effect of subirrigation on groundwater levels and crop yields, based on both international literature and measurements of Dutch field pilots. Although subirrigation can contribute to improved soil moisture conditions for crop growth on field scale, we show that the water volume needed for subirrigation can be large and could put a significant pressure on the available regional water sources. Therefore, efficient and responsible use of the available external water sources for subirrigation (e.g. surface water, treated waste water, or groundwater) is required. Finally, a successful implementation of controlled drainage with subirrigation asks for correct farmer's management and implementation in the regional balance: it requires an integral, catchment-wide approach.

Auteurs

JANINE DE WIT
KWR Water Research Institute / Soil Physics and Land Management, Wageningen University & Research
janine.de.wit@kwrwater.nl

GÉ VAN DEN EERTWEGH
KnowH2O
eertwegh@knowh2o.nl

JOS VAN DAM
Soil Physics and Land Management, Wageningen University & Research
jos.vandam@wur.nl

COEN RITSEMA
Soil Physics and Land Management, Wageningen University & Research
coen.ritsema@wur.nl

RUUD BARTHOLOMEUS
KWR Water Research Institute / Soil Physics and Land Management, Wageningen University & Research.
ruud.bartholomeus@kwrwater.nl