



# Praktijkproef Regelbare Drainage proefbedrijf Rusthoeve 2010-2014

Eindverslag praktijkproef naar de effecten van regelbare en verdiept aangelegde drains  
op klei in Zeeland

P.N.M. Schipper, M. Heinen, P. Jansen, L. Stuyt en P. Dik



---

# Praktijkproef Regelbare Drainage proefbedrijf Rusthoeve 2010-2014

Eindverslag praktijkproef naar de effecten van regelbare en verdiept aangelegde drains  
op klei in Zeeland

P.N.M. Schipper<sup>1</sup>, M. Heinen<sup>1</sup>, P. Jansen<sup>1</sup>, L. Stuyt<sup>1</sup> en P. Dik<sup>2</sup>

1 Alterra, Wageningen UR

2 Grontmij Nederland B.V.

Dit onderzoek is uitgevoerd door Alterra Wageningen UR en Grontmij Nederland in opdracht van en gefinancierd door de Provincie Zeeland en Waterschap Scheldestromen. Vanuit de Rijksoverheid is financiering beschikbaar gesteld via de regeling Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water en door de grensregio Vlaanderen-Nederland is subsidie beschikbaar gesteld in het kader van het Interregproject Interactief Waterbeheer. Ook is een bijdrage geleverd door het Ministerie van Economische Zaken, in het kader van kennisbasis onderzoek voor het thema Slim met Zoet (KB-project 14-001-064).

Alterra Wageningen UR  
Wageningen, juli 2015

---

Alterra-rapport 2639  
ISSN 1566-7197

---

Schipper, P.N.M., M. Heinen, P. Jansen, L. Stuyt en P. Dik, 2015. *Praktijkproef Regelbare Drainage proefbedrijf Rusthoeve 2010-2014; Eindverslag praktijkproef naar de effecten van regelbare en verdiept aangelegde drains op klei in Zeeland*. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2639. 114 blz.; 55 fig.; 12 tab.; 37 ref.

Trefwoorden: regelbare drainage, peilgestuurd, verdiepte drains, bodemvocht, vochttekorten, waterafvoer, waterkwaliteit, bewerkbaarheid bodem, gewasopbrengsten, stikstofisotopen, ion-selectieve sensoren

Dit rapport is gratis te downloaden van [www.wageningenUR.nl/alterra](http://www.wageningenUR.nl/alterra) (ga naar 'Alterra-rapporten' in de grijze balk onderaan). Alterra Wageningen UR verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2015 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E [info.alterra@wur.nl](mailto:info.alterra@wur.nl), [www.wageningenUR.nl/alterra](http://www.wageningenUR.nl/alterra). Alterra is onderdeel van Wageningen UR (University & Research centre).

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2639 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Peter Schipper

---

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
	1.1 Aanleiding	9
	1.2 Inzichten voorafgaand aan de veldproef	9
	1.3 Doelstelling	10
	1.4 Projectorganisatie	10
	1.5 Leeswijzer en rapportages	11
<b>2</b>	<b>Verantwoording locatiekeuze</b>	<b>13</b>
	2.1 Selectiecriteria proeflocatie	13
	2.2 Selectiecriteria proeflocatie	14
	2.3 Beoordeling geschiktheid	14
<b>3</b>	<b>Gebied- en perceelkenmerken</b>	<b>15</b>
	3.1 Selectiecriteria proeflocatie	15
	3.2 Ligging en maaiveld	15
	3.3 Ondiepe bodemopbouw	15
	3.4 Bodemchemie	16
	3.5 Watersysteem en hydrologie	17
<b>4</b>	<b>Inrichting van de veldproef</b>	<b>18</b>
	4.1 Drainagesysteem	18
	4.2 Meetprincipes	21
	4.3 Meetmethoden en -locaties	21
	4.4 Analysepakket en meetfrequentie	22
<b>5</b>	<b>Verloop van de proef</b>	<b>25</b>
	5.1 Inleiding	25
	5.2 Aanleg en inspectie proefopstelling	25
	5.3 Beheer drainagesysteem	26
	5.4 Implementatie van de metingen	27
	5.5 Validatie en betrouwbaarheid	28
	5.6 Bodembewerking en teelt	30
	5.7 Bemesting	30
<b>6</b>	<b>Resultaten en discussie</b>	<b>32</b>
	6.1 Inleiding	32
	6.2 Grondwaterstanden en werking drains (vraag 1 en 2)	33
	6.3 Waterbalansen en afvoer meetsloot	40
	6.4 Waterkwaliteitspatronen	45
	6.5 Zoet-zoutpatronen	53
	6.6 Denitrificatie en stikstofisotopen (vraag 6)	54
	6.7 Emissies per type drainagesysteem (vraag 7 en 8)	59
	6.8 Analyse first-flusheffecten op de waterkwaliteit	63
	6.9 Stofbalans meetsloot	70
	6.10 Agronomische aspecten (vraag 10, 11 en 12)	74

---

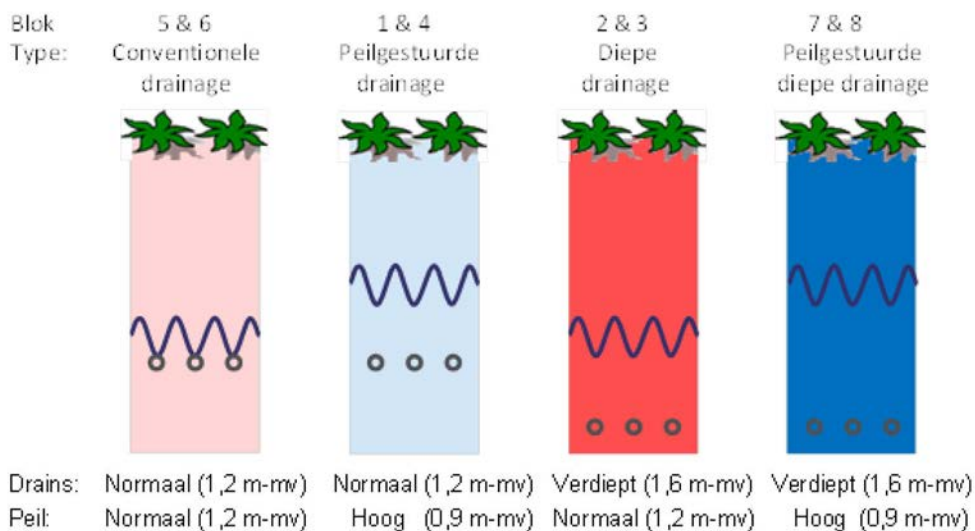
<b>7</b>	<b>Modellering drainafvoer en waterkwaliteit</b>	<b>77</b>
7.1	Inleiding	77
7.2	Modelbeschrijving	77
7.3	Resultaten en Discussie	79
7.4	Conclusies modelsimulaties FUSSIM2D	85
<b>8</b>	<b>Extrapolatie met geschiktheidskaarten</b>	<b>86</b>
8.1	Werkwijze	86
8.2	Drainagegeschiktheidskaarten	86
8.3	Belemmeringen voor opschaling peilgestuurde drainage	89
8.4	Mogelijkheden voor stimulering	89
<b>9</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>90</b>
9.1	Opzet en uitvoering van de proef	90
9.2	Beantwoording onderzoeksvragen	91
9.3	Opschaling resultaten naar geschiktheidskaart	93
9.4	Aanbevelingen voor de proeflocatie	94
	<b>Literatuur</b>	<b>95</b>
	<b>Bijlage 1 Grafieken en tabellen waterkwaliteit</b>	<b>97</b>
	<b>Bijlage 2 Detailinformatie FUSSIM2D</b>	<b>105</b>
1	Modelinvoer	105
2	Modeluitvoer (figuren)	106
	<b>Bijlage 3 Achtergrond 'Natural Abundance' Stikstofisotopen</b>	<b>109</b>
	<b>Bijlage 4 Uitklapbare legenda met indeling proefblokken</b>	<b>112</b>

# Samenvatting

Te hoge gehalten aan nutriënten in het oppervlaktewater – en dan vooral stikstof – vormen in Zeeland een knelpunt om waterkwaliteitsdoelen te bereiken. De vraag is of peilgestuurde diepe drainage op landbouwgronden een effectieve maatregel is om de nutriëntenbelasting terug te dringen.

Modelstudies en praktijkproeven tonen dat peilgestuurde drainage in beginsel voordelen biedt voor de waterkwaliteit en bovendien de vochthuishouding in het perceel verbetert voor de agrariër. Echter, de werking is vooral op zandgronden onderzocht en niet op zavel en kleigronden met zoute kwel die kenmerkend zijn voor Zeeland. Daarom is op een perceel van proefboerderij de Rusthoeve in Zeeland een praktijkproef voor peilgestuurde diepdrainage uitgevoerd.

De proef is in 2010 aangelegd en omvat 8 blokken van 80 x 60 m. Hierop zijn 4 typen drainage aangelegd: met een conventioneel dan wel een verhoogd ontwateringsniveau, in combinatie met conventioneel dan wel verdiept aangelegde drains. Iedere behandeling is in duplo uitgevoerd.



Gedurende 4 meetjaren zijn de drainafvoer, grondwaterstanden en chemische samenstelling van het drainagewater en grondwater bemeaten. Ter controle zijn ook metingen uitgevoerd in een sloot die alleen door drain- en grondwater van de blokken 1-4 wordt gevoed. De meetopstelling is gericht op het opstellen van een water- en stikstofbalans alsmede het in beeld brengen van zoute kwel en denitrificatieprocessen in de bodem. Hiervoor zijn, naast conventionele laboratoriumanalyses, diverse experimentele methoden ingezet, waaronder ion-selectieve elektroden voor chloride, nitraat en ammonium, stikstofisotopen-metingen en SORBI-cellen voor het meten van vrachten van nutriënten. In het laatste najaar zijn bij 4 blokken automatische bemonsteringskasten geïnstalleerd waarmee het drainwater hoogfrequent en debiet-proportioneel is bemonsterd. Ook zijn toen 2 optische nitraatsensors bijgeplaatst.

Gedurende de uitvoering van de proef en de analyse van de meetresultaten is naar voren gekomen dat de duplo's niet helemaal met elkaar vergelijkbaar zijn. Met name blok 4 en blok 5 zijn weinig representatief voor de bedoelde behandeling; blok 4 voerde weinig water af omdat het ontwateringspeil hoog lag ten opzichte van het naastgelegen blok en de aangrenzende sloot. Blok 5 voerde ook relatief weinig water af doordat de drains hoger lagen dan het bij de regelput ingestelde traditionele ontwateringspeil en bovendien bleken hier de oude drains niet allemaal onklaar gemaakt te zijn. Hierdoor is drainwater afgevoerd zonder dat dit in de regelput is geregistreerd.

---

### **Wat zijn de effecten van peilgestuurde drainage (verhoogd peil)?**

In grote lijnen kan uit de proef worden geconcludeerd dat met de peilgestuurde drains:

- de grondwaterstanden gemiddeld hoger zijn (10 cm nabij de sloot en 20 cm midden in het perceel);
- de hoeveelheid water die hierdoor *extra* in de kleibodem wordt vastgehouden, gering is en waarschijnlijk alleen in extreem droge voorjaren leidt tot significant minder droogteschade;
- minder water naar de sloot wordt afgevoerd;
- de piekafvoeren naar de sloot minder groot zijn;
- minder stikstof en chloride naar de sloot wordt afgevoerd;
- de bewerk- en berijdbaarheid van de bodem niet negatief door het verhoogde peil wordt beïnvloed.

In de peilgestuurde blokken is het ontwateringsniveau 30 cm hoger ingesteld dan in de niet-peilgestuurde. De grondwaterstanden zijn dan vooral aan het begin van het groeiseizoen hoger. Hierdoor kunnen gewassen in droge perioden in principe langer profiteren van het neerslagoverschot dat door de regelbare drainage extra in de bodem is vastgehouden. De extra waterberging die hiermee ten goede komt aan de gewasgroei is echter beperkt, doordat de zavelgronden door de textuur weinig gevoelig zijn voor droogte. In een modelmatige exercitie komt naar voren dat alleen in heel droge voorjaren de regelbare drainage enkele procenten meer gewasopbrengsten geeft. De gemeten gewasopbrengsten gaven dan ook geen significante verschillen tussen de blokken te zien. Het verhoogde ontwateringspeil heeft gedurende de proef geen nadelig effect gehad op de bewerk- en berijdbaarheid van de bodem. Ook met een agro-hydrologische modellering die voor de interpretatie van de proef is uitgevoerd, is berekend dat het verhoogde ontwateringspeil de berijdbaarheid niet negatief beïnvloedt.

In de proef komt duidelijk naar voren dat de peilgestuurde drains beduidend minder water, stikstof en chloride afvoeren. De zout- en stikstofbelasting naar het oppervlaktewater nemen daardoor af. Peilgestuurde drainage leidt niet duidelijk tot lagere zout- en stikstofconcentraties, maar draagt waarschijnlijk wel bij aan een betere oppervlaktewaterkwaliteit doordat meer neerslag wat dieper door de bodem naar de sloot stroomt. Dit lateraal uitstromende grondwater heeft een betere kwaliteit dan drainagewater, doordat tijdens de langere en diepere bodempassage meer nitraat wordt afgebroken.

### **Wat zijn de effecten van verdiept aangelegde drains?**

Uit de proef komt naar voren dat in de blokken met de verdiept aangelegde drains:

- de drainage net zo goed functioneert als de ondiepere drains;
- meer nitraat in de bodem wordt afgebroken en daardoor minder nitraat uitspoelt;
- het drainwater qua chemische samenstelling zouter en meer gebufferd is;
- concentratieschommelingen in het drainwater die optreden bij piekafvoeren ('first-flush') minder groot zijn.

De dieper aangelegde drainbuizen leiden duidelijk tot meer denitrificatie en dus een lagere uitspoeling van nitraat.

Door de aanleg van het drainagesysteem zal er een nieuw evenwicht in de bodem ontstaan. Over de meetperiode lijkt voor het zoutgehalte uit zowel de ondiepe als diepe drains reeds een stabiele situatie te zijn bereikt. Mede op basis van een modellering wordt geen belangrijke verandering van de zoet-zoutevenwichten in de ondiepe bodem verwacht. Dat de watersamenstelling van de diepe drains vrij sterk verschilt met de ondiepe, zal daarom naar verwachting van blijvende aard zijn.

Als na een droge periode met lage grondwaterstanden flinke afvoerpieken op gang komen door hevige neerslag (aangeduid als first-flush), is tijdens de eerste uren een duidelijke stijging van nitraat en een daling van chloride in het drainwater waargenomen. Na een dag of paar dagen zijn de waarden weer vrij constant. Zo'n stijging van nitraat is ook op grotere schaal in peilgebieden van de provincie Zeeland met nitraatsensoren waargenomen. Uit de metingen in het najaar van 2013 en de modellering blijkt dat dit effect bij de verdiept aangelegde regelbare drains sterk wordt gedempt. Met uitgevoerde agro-hydrologische modellering kan dit fenomeen goed worden verklaard.

### **Wat zijn de effecten vanuit landbouwkundig perspectief?**

Door de aanleg van het drainagesysteem is de grond verstoord, hetgeen de beheerder van de proefboerderij merkte aan het ploegen dat tijdelijk zwaarder was geworden. Echter, het eerste oogstjaar na de aanleg werd ervaren dat de structuur van de bodem zodanig was hersteld dat er



sprake was van een landbouwkundig optimale situatie. Alle drains, en dus ook de verdiept aangelegde drains, blijken vanuit landbouwkundig perspectief naar behoren te functioneren. De diepere drains voerden grondwater weliswaar enigszins trager af, maar wel snel genoeg om de grondwaterstanden effectief te beheersen.

In de meetperiode zijn geen duidelijke effecten van de verschillende drainagesystemen op gewasgroei en oogstproducten waargenomen. Zoals aangegeven, is de invloed van regelbare drainage op de gewasgroei gering doordat de zavelige bodem bodemvocht goed vasthoudt en de capillaire nalevering van grondwater voldoende groot is. In de internationale literatuur over peilgestuurde drainage komt naar voren dat het effect op de gewasopbrengsten niet significant met veldexperimenten is aangetoond. Als reden wordt daarbij vooral aangevoerd dat andere invloeden zoals ziektes, plagen en de bedrijfsvoering veel invloed hebben op de gewasopbrengsten.

### Welke combinatie is dan het gunstigst?

De effecten van de 4 typen drainage zijn in het onderstaande schema samengevat. De effecten zijn afgezet ten opzichte van de referentie (blok 6): conventioneel peil en normale draindiepte.

		meest representatieve blokken peilgestuurd (30 cm opzet) verdiepte aanleg drainbuizen	6 nee nee	1 ja nee	2 & 3 nee ja	7 & 8 Ja Ja
Bedrijf	werking van de drains		0	0	0	0
	berijdbaarheid perceel		0	0	0	0
	vochtvoorziening gewas / minder droogtestress		0	0/+	0	0/+
Waterkwantiteit	waterconservering: grondwaterstand voorjaar		0	+	0	+
	waterconservering: minder drainafvoer		0	+	0	+
	verwerking hevige neerslag / infiltratiecapaciteit		0	0	0	0
	aftoppen piekafvoeren		0	+	0/+	+
Waterkwaliteit	meer denitrificatie / minder nitraatuitspoeling		0	0	+	+
	nitraatgehalte drainwater		0	0	+	++
	chloride gehalte drainwater		0	0	-	+
	pieken in nitraat concentraties bij first-flush		0	0	+	+
	stikstofbelasting (nitraat) oppervlaktewater		0	0	0/+	++
	chloridebelasting oppervlaktewater		0	+	0	++

0 geen effect

0/+ positief, niet significant

+

++ sterk positief

De combinatie van peilgestuurde drainage met verdiept aangelegde drains biedt duidelijk de meeste voordelen en scoort op geen van de criteria ongunstig ten opzichte van de referentie

---

## Aanbevelingen

### *Operationeel houden proeflocatie*

Gelet op de aanzienlijke investering in de inrichting van de proeflocatie, de ervaring die is opgedaan en de verkregen locatie-specifieke kennis, verdient het aanbeveling het proefveld geschikt te houden voor mogelijke (vervolg)proeven. De voorzieningen op het proefveld zijn zodanig afgewerkt dat meetprogramma's vrij eenvoudig opnieuw opgestart kunnen worden.

### *Langer meten*

Vergeleken met internationale proeven naar regelbare drainage is de meetperiode van 4 jaar kort. Langer doorzetten van de metingen zal meer zekerheid geven over de effecten die optreden tijdens sterk afwijkende weerjaren, weersextremen en andere teelten en bodembewerkingen.

### *Benutten voor wetenschappelijke experimenten*

De proeflocatie kan zeer goed benut worden om wetenschappelijke experimenten uit te voeren. Zo kan verdere kennis worden ontwikkeld over de wijze waarop met regelbare drainage gestuurd kan worden op factoren die bepalend zijn voor gewasopbrengsten en diffuse belasting van grond- en oppervlaktewater.

### *Aandacht voor modelleren en extrapoleren*

Het accent van de proef lag sterk op het uitvoeren van metingen. Aan modellering is naar verhouding weinig aandacht en tijd besteed. Aanbevolen wordt om op basis van de verzamelde data modellen op te zetten. De inzet van modellen vergroot het inzicht in de werking van de verschillende behandelingen en maakt het mogelijk varianten op deze behandelingen door te rekenen en de verkregen inzichten naar andere gebieden te extrapoleren.

### *Regelbare drainage op andere eilanden*

Gebleken is dat regelbare drainage duidelijke voordelen biedt voor het watersysteem en voor agrariërs een goede mogelijkheid biedt om, ten opzichte van niet regelbare drainage, te sturen op een zo gunstig mogelijke vochtvoorziening en ontwatering met minder uitspoeling van nutriënten en minder risico's voor zoutschade. Daarom wordt aanbevolen om regelbare drainage ook op andere eilanden te stimuleren. Voor een brede implementatie is het gunstig als goede voorbeelden dicht in de buurt gedemonstreerd kunnen worden. Daar waar regelbare drainage als pilot wordt aangelegd, verdient het aanbeveling om het ontwerp en de aanleg te begeleiden en daarbij met name na te gaan welke draandiepte en configuratie gunstig is voor zowel de drainerende werking als de waterkwaliteit en hoe met geringe kosten de regelbare drainage gemonitord kan worden.

# 1 Inleiding

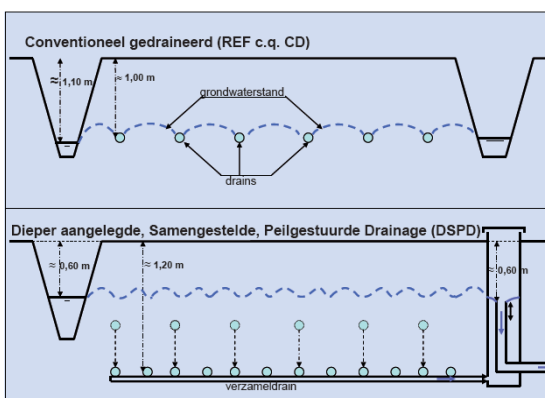
## 1.1 Aanleiding

Hoge nutriëntengehalten vormen een van de grootste knelpunten in de binnendijkse oppervlakte-waterlichamen in Zeeland om de doelen voor de Europese Kaderrichtlijn Water te bereiken. Voor deze brakke binnenwateren vormt met name stikstof het probleem. Een belangrijke bron van stikstof in het landelijk gebied is landbouwgrond. Voor een deel wordt dit veroorzaakt door landbouwkundig gebruik, voor een deel door aanvoer van zoute kwel en voor een deel zijn historische belasting en atmosferische depositie de oorzaak.

## 1.2 Inzichten voorafgaand aan de veldproef

Onder regelbare drainage wordt het volgende principe verstaan:

De afzonderlijke drainagebuizen monden niet rechtstreeks uit in een sloot, maar in een verzameldrain. Deze komt op zijn beurt weer uit in een verzamelput waarin het peil regelbaar is. Doorgaans wordt er een hoger peil gehanteerd dan bij conventionele drainage. Ook zijn de drains bij dit systeem vaak dieper en op kortere onderlinge afstand aangelegd dan bij de tot nu toe gebruikelijke drainage. (www.innovatielocaties.nl)



Uit theoretisch onderzoek (van Bakel 2008, Evans *et al.*, 1995; Wesstrom & Messing, 2007) blijkt dat peilgestuurde diepe drainage tot lagere nutriëntenuitspoeling leidt en daarmee in potentie een geschikte maatregel is om de waterkwaliteit te verbeteren.

- Nitraat kan effectief in de bodem worden afgebroken bij een langere verblijftijd in een anaerobe zone. Door het hogere peil en verdiept aanleggen van de drains volgt neerslagwater een langere bodempassage. Zo treedt meer denitrificatie op waardoor de uitspoeling van stikstof afneemt.
- In zwaardere gronden verloopt een groot aandeel van de uitspoeling via scheuren die aansluiten op het drainagesysteem. Door drainagebuizen tot onder het bereik van de bodemscheuren aan te leggen, wordt kortsluitstroming via deze weg verhinderd. Pieken in afvoer en concentraties van nutriënten worden zo afgevlakt.

Bovendien zijn ook hydrologische en landbouwkundige voordelen te verwachten.

- De piekafvoeren naar het oppervlaktewatersysteem kunnen afnemen door met actief beheer de drainagepeilen voorafgaand aan neerslagpieken te verlagen (minder wateroverlast).
- Door het hogere peil wordt het water beter vastgehouden, zodat er mogelijk minder snel beregend hoeft te worden.
- Omgekeerd is het peil ook makkelijk te verlagen zodat het land sneller berijdbaar is voor voorjaarswerkzaamheden.
- Samengestelde drainage met drains op korte onderlinge afstand en ruim onder de grondwater-spiegel bevordert – in beginsel – de herverdeling van water in een perceel. Dit leidt tot een uniformere verdeling en betere beheersing van (te) hoge en lage grondwaterstanden.

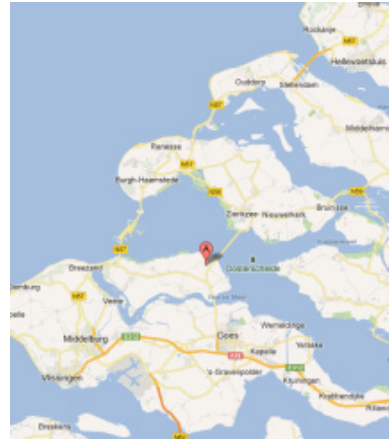
Het systeem wordt nu vooral toegepast op zandgrond en in het buitenland. Het is echter onbekend of peilgestuurde diepe drainage op kleigrond (de meest voorkomende grondsoort in Zeeland) werkt, of

de veronderstelde positieve effecten ook optreden en wat de effecten zijn op de aanvoer van stikstof met zoute kwel. Mogelijke neveneffecten van verdiepte drainaanleg in kwelgebieden zijn een toename van zoute kwelafvoer (mogelijk te voorkomen door het hogere drainagepeil) en een grotere kans op verstopping van drains door menging van aeroob en anaeroob water.

## 1.3 Doelstelling

De provincie Zeeland is samen met de ZLTO en Waterschap Scheldestromen een onderzoek gestart om de effecten van peilgestuurde drainage in de praktijk te testen. De kern van het onderzoek is een veldexperiment op een perceel van de proefboerderij de Rusthoeve, dat representatief is voor de zeeleigronden in Zeeland. De proef is uitgevoerd in de periode mei 2010 tot begin 2014 door Grontmij, Alterra en Praktijkonderzoek Plant en Omgeving.

Doel is om in het veld vast te stellen of peilgestuurde drainage de uitspoeling van nutriënten naar het oppervlaktewater reduceert en tegelijk de landbouw helpt om in droge tijden het water beter vast te houden en in natte tijden het perceel nog even goed te kunnen ontwateren.



Locatie veldproef (proefboerderij Rusthoeve).

## 1.4 Projectorganisatie

### Periode 2009-2012

Het project is eind 2009 gestart met het volgende team:

Projectteam:

- Martin van der Schans (Grontmij, vanaf 2010 projectleiding)
- Lodewijk Stuyt (Alterra, ontwerp & inspectie drainagesysteem, onderzoek regelbare drainage)
- Piet Groenendijk (Alterra, kwaliteitsborging waterkwaliteit)
- Joop Harmsen (Alterra, metingen sensoren en sorbicellen)
- Peter Schipper (Grontmij, projectleiding tot 2010, sinds 2010 Alterra, ontwerp meetstelsel, onderzoek effecten drainage en waterkwaliteit)
- Jan van Kleef (Alterra, aanleg en onderhoud technische meetinstallaties)
- Elfriede Burger (Grontmij, bemonstering en onderhoud meetopstelling)
- Hanneke Kooman (Grontmij, bemonstering meetopstelling)
- Antonie van den Toorn (Alterra, aanleg peilbuizen en cups)
- Christy van Beek (Alterra, interpretatie N-isotopen)
- Hanneke Heesmans (Alterra, metingen N-isotopen)
- Abco de Buck (PPO, agronomische aspecten)
- Rinze van der Schoot (PPO, agronomische aspecten)
- Maarten van de Werf (Alterra, vooronderzoek)
- Gert-Jan Noij (Alterra, vooronderzoek)

Begeleidingsgroep:

- André van de Straat (Provincie Zeeland)
- Marloes van Tilburg (Provincie Zeeland)
- Welmoed Hollemans (Provincie Zeeland)
- Rien Klippel (Waterschap Scheldestromen)
- Carla Michielsen, later vervangen door Johan Elshof (beiden ZLTO)
- Sam de Vlieger (bedrijfsleider proefboerderij de Rusthoeve)

---

In december 2012 is op basis van de tot de zomer van 2012 verzamelde metingen een eindrapport opgesteld (Grontmij-rapport 'Eindrapportage praktijkproef Rusthoeve, 18 december 2012', documentnummer GM 0083591).

### **Periode medio 2012-2014**

Na de zomer van 2012 zijn de metingen voortgezet tot januari 2014. In het najaar van 2013 is in 4 blokken hoogfrequent de waterkwaliteit van het drainwater bemeten om concentratieveranderingen tijdens piekafvoeren beter in beeld te kunnen krijgen. Hiervoor zijn 4 geautomatiseerde bemonsteringskasten geïnstalleerd (zogenaamde Isco's) waarmee debiet-proportioneel het drainwater van blok 1, 2, 6 en 8 is bemonsterd. Aanvullend daarop zijn in de regelputten 6 en 8 nieuwe optische nitraatsensoren van de provincie geplaatst.

In 2013 is door Hendrik Staarink voor zijn masteropleiding aan de WUR een modelering van de vochthuishouding in blok 7 uitgevoerd en in 2014 heeft Xu Xin voor haar masterstudie aan de WUR onderzoek gedaan naar de betrouwbaarheid van de nieuw ingezette nitraatsensoren en het effect van first-flush op het concentratieverloop van nitraat en het zoutgehalte en daaraan te relateren stofvrachten. Ter ondersteuning is in 2014 ook een tweedimensionale modelstudie uitgevoerd naar het water- en stoftransport in een transect op de blokken 5-6-7-8.

De begeleiding is in deze periode verzorgd door André van de Straat (Provincie), Rien Klippel (Scheldestromen) en Johan Elshof (ZLTO).

Het project kon over de gehele periode worden uitgevoerd op de Rusthoeve door toestemming en actieve medewerking van Sam de Vlieger.

### **Leveranciers:**

Het project is mede uitgevoerd door de volgende leveranciers:

- Barth Drainage B.V. voor aanleg van het drainagesysteem
- Sandee voor graafwerkzaamheden
- Thierry Rottiers (Elscolab, thans Multisense) voor levering en advisering m.b.t. ion-selectieve elektroden

### **Financiering**

Het onderzoek is gefinancierd door de Provincie Zeeland, ZLTO en Waterschap Scheldestromen. Vanuit de Rijksoverheid is financiering beschikbaar gesteld via de regeling Innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water. Daarnaast is het een deelproject van het Interregproject Interactief Waterbeheer, waarvoor de stuurgroep grensregio Vlaanderen-Nederland subsidie beschikbaar heeft gesteld.

De voortzetting van de metingen na de zomer van 2012 is gefinancierd door de provincie en het Waterschap. Alterra heeft daarbij ook middelen ingezet vanuit haar kennisbasisonderzoek.

## **1.5 Leeswijzer en rapportages**

De onderhavige rapportage behandelt de resultaten van alle metingen die tot januari 2014 zijn uitgevoerd en de conclusies die daaruit kunnen worden getrokken. Per hoofdstuk wordt het volgende behandeld:

- H2: keuze en onderbouwing locatiekeuze praktijkproef
- H3: beschrijving perceelkenmerken voor aanvang van de proef
- H4: ontwerp van het drainagesysteem en meetopzet
- H5: verloop van de proef
- H6: presentatie meetresultaten, interpretatie en beantwoording onderzoeksvragen, onderverdeeld naar de effecten op de waterkwantiteit, -kwaliteit en gewasopbrengsten
- H7: geschiktheidskaarten regelbare drainage in de Provincie Zeeland
- H8: conclusies en aanbevelingen

---

In de figuren en tabellen is ten behoeve van het overzicht steeds de kleurstelling voor de 4 typen behandelingen aangehouden: **rood/blauw** = **niet/wel** peilgestuurd; licht/**donker** = niet/**wel** verdiept. Ter ondersteuning van de interpretatie is een uitklapbare bijlage opgenomen waarin de 8 blokken in deze kleuren en accenten zijn weergegeven.

*Eerdere rapportages:*

Zoals aangegeven, was in 2012 een eindverslag opgesteld voor de praktijkproef waarin de meetresultaten tot de zomer van 2012 waren verwerkt. Het onderhavige rapport is in feite een actualisatie en aanvulling op dit rapport met daarin verwerkt de metingen die tot 2014 zijn verricht.

In 2012 zijn voor de technische achtergronden de volgende deelrapportages opgesteld:

1. Beperking zoekruimte d.m.v. GIS-analyse
2. Vooronderzoek en detailontwerp proefopstelling Rusthoeve
3. Verslag aanleg drainagesysteem
4. Tussentijdse evaluatie meetresultaten Rusthoeve winterseizoen 2010 – 2011
5. Evaluatie functioneren van ion-selectieve elektroden
6. Landbouwkundige aspecten Praktijkproef Rusthoeve in 2010
7. Landbouwkundige aspecten Praktijkproef Rusthoeve in 2011
8. Verslag proef en controle meetresultaten Rusthoeve 2010–2012<sup>1</sup>
9. Drainagegeschiktheidskaarten en handvaten voor opschaling

Van deze rapportages is deelrapport 8 (verslag proef en controle meetresultaten) geactualiseerd. Dit door de meetdata aan te vullen met de nieuwe metingen en de gehele meetdataset die is opgenomen in een aparte database te controleren, corrigeren en waar nodig en mogelijk gaten in de meetreeksen op te vullen (rapport 8). Dit deelrapport vormt in feite de basis voor de weergave en interpretatie van de verzamelde meetgegevens.

---

<sup>1</sup> Geactualiseerd 3-12-2014 (Grontmij-rapport).

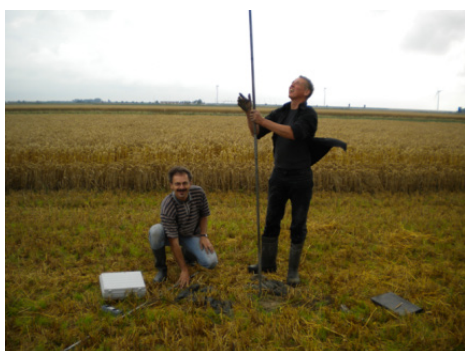
---

## 2 Verantwoording locatiekeuze

### 2.1 Selectiecriteria proeflocatie

Bij selectie van de onderzoeklocatie is allereerst gekeken of een aantal karakteristieke kenmerken voor Zeeuwse bodems op het perceel voorkomt:

- Akkerbouwperceel.
- Buisdrainage aanwezig.
- Een zavel (of lichte klei) bodem. Bij te hoge kleigehalten bestaat het risico dat de drainagebuizen niet goed gaan werken en daardoor onvoldoende drainagewater afvoeren.
- Een Holocene deklaag van 3 tot 8 m dikte. Een dikke deklaag bemoeilijkt het slaan van diepe peilbuizen en vormt een belemmering voor kwelstroming.
- Een zoet-zoutgrensvlak op maximaal 4 m diepte en zoute kwel die uittreedt naar de sloten. Het onderzoek dient ook inzicht te geven in de effecten van diepdrainage op het aantrekken van zoute en nutriëntenrijke kwel. Het watervoerend pakket dient dus onder mariene invloed te staan. Bij de locatiekeuze is daartoe gebruikgemaakt van een prikstok die in het veld snel inzicht geeft in het zoutgehalte van het grondwater (zie foto hieronder).



*Veldonderzoek met prikstok.*

Daarnaast speelden ook praktische overwegingen voor het onderzoek een rol:

- Afwezigheid van veenlagen.  
Veenlagen in de bovenste 2,5 meter verstoren het diepteprofiel van nitraat.
- Waterhuishoudkundige inrichting.  
Voor de proef is hydrologische isolatie van het proefperceel gewenst.
- Perceelvorm.  
Voor de proef is een rechthoekig blok van circa 4 ha noodzakelijk.
- Afstand tot elektriciteit.  
Voor de meetopstelling is elektriciteitsvoorziening noodzakelijk.
- Ondergrondse leidingen en kabels.  
Deze kunnen de aanleg van drainage belemmeren.

Aanvankelijk was gekozen voor een locatie in Graauw, ten noorden van Hulst in Zeeuws-Vlaanderen. Uit veldonderzoek bleek deze locatie bij nader inzien niet geschikt door veen- en ongestructureerde kleilagen op het dieptetraject dat relevant is voor de werking van diepe en conventionele drainage. Bovendien trad er geen zoute kwel op.

---

## 2.2 Selectiecriteria proeflocatie

Vervolgens is gezocht naar een alternatieve locatie. Eerst zijn mogelijk geschikte percelen in de gehele Provincie Zeeland geïdentificeerd door middel van een GIS-analyse. Via de ZLTO is gepolst welke bedrijven interesse toonden. Op deze bedrijven is een kort veldonderzoek uitgevoerd om informatie te verzamelen over bodemgesteldheid, is gesproken met de perceeleigenaar en is de aan- en afwateringssituatie geïnventariseerd. Tot slot is de geschiktheid van de percelen beoordeeld aan de hand van bovenstaande selectiecriteria.

## 2.3 Beoordeling geschiktheid

De Rusthoeve scoorde positief op alle bovenstaande punten m.u.v. de afstand tot elektriciteit en ondergrondse leidingen. Dit heeft tot aanvullende kosten geleid. Conclusie is dat het perceel op de Rusthoeve representatief is voor lichte tot matig zware zavelgronden in Zeeland. Voor meer informatie wordt verwezen naar de deelrapportage 'Beperking zoekruimte d.m.v. GIS-analyse'.



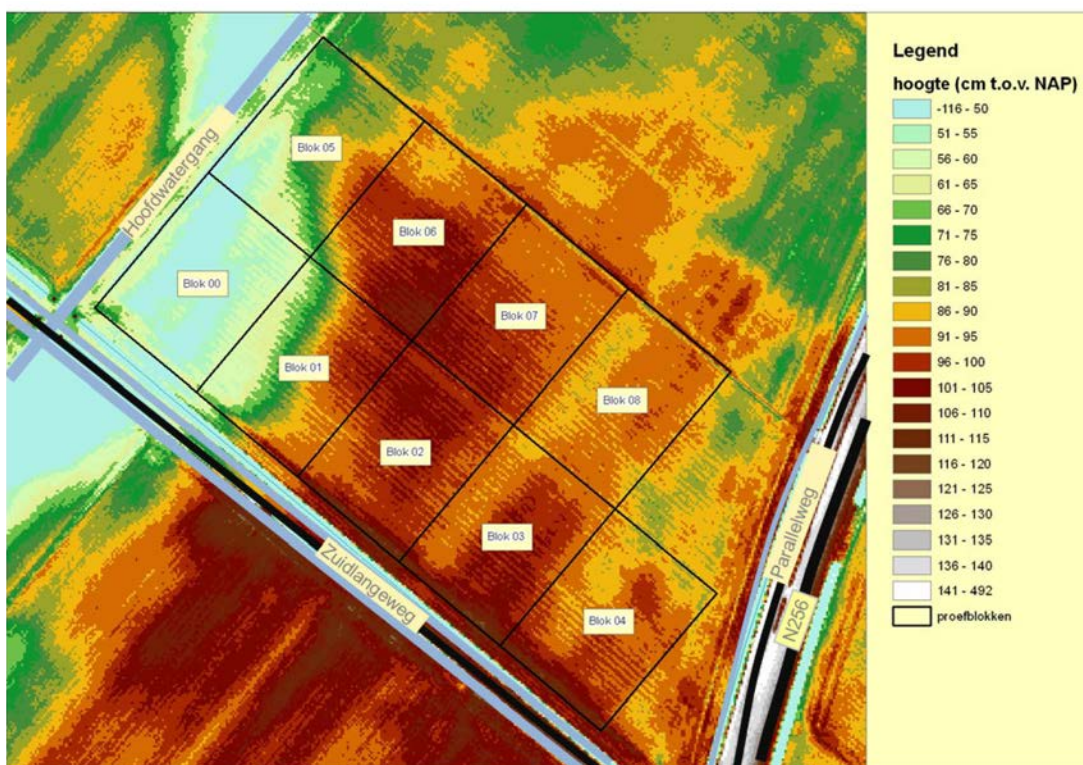
## 3 Gebied- en perceelkenmerken

### 3.1 Selectiecriteria proeflocatie

Voorafgaand aan de proef is een bodemkundig veldonderzoek uitgevoerd als basis voor het ontwerp en om de uitgangssituatie vast te leggen. De resultaten worden hierna toegelicht. Voor meer informatie wordt verwezen naar de deelrapportage 'Vooronderzoek en detailontwerp'.

### 3.2 Ligging en maaiveld

Het proefperceel Rusthoeve ligt aan de oostkant van Noord-Beveland, ten zuiden van Colijnsplaat. Uit de hoogtekkaart is op te maken dat aan de westzijde van het perceel een laagte van een dichtgeslibde kreek aanwezig is. De maaiveldhoogte binnen het perceel varieert van circa NAP +0,2 m aan de westkant tot meer dan NAP +1,0 m aan de zuidkant (Figuur 3.1).



**Figuur 3.1** Hoogteligging maaiveld.

### 3.3 Ondiepe bodemopbouw

De bodemopbouw is ontstaan door geleidelijke opslibbing onder invloed van eb- en vloedbeweging. Hierbij is een gelaagdheid ontstaan die typerend is voor gronden in op- en aanwas- polders die in Zeeland veel voorkomen. Kalkrijke, kleiige en zandige lagen wisselen elkaar af.

De bouwvoor of toplaag bestaat voornamelijk uit matig lichte zavel (12-17,5% lutum) en zware zavel (17,5-25% lutum). Op draandiepte is het kleigehalte iets lager en varieert van zeer lichte zavel

(8-12% lutum) tot zware zavel (17,5-25% lutum). Bij een aantal boringen begint de slappe (niet volledig gerijpte) ondergrond al binnen 1,5 m –mv. De grond behoort volgens de bodemkaart tot de kalkrijke poldervaaggronden (Mn.A). Het watervoerende (zand)pakket begint op een diepte van 5,0 tot 5,5 m onder maaiveld.

De zuidelijk gelegen proefblokken 1-4 hebben een lichtere profielopbouw dan de noordelijk gelegen velden 5-8. Wel komen in meerdere boringen in de zuidelijke proefblokken dieper dan 1 m lagen voor met 5 tot 20% organische stof (humeus tot venig).

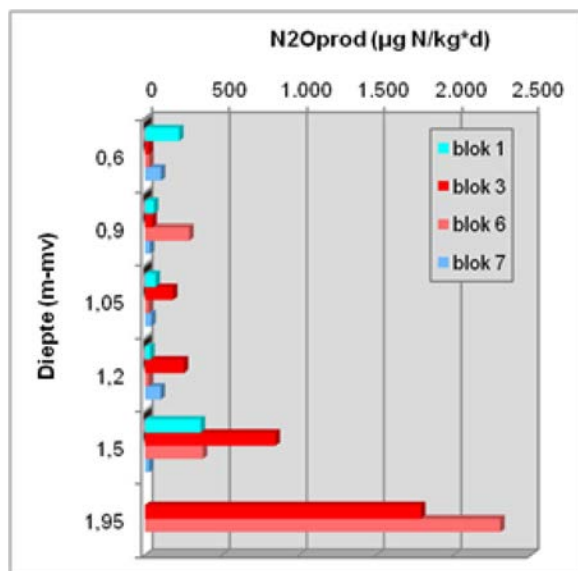
Uit de diepe boringen blijkt dat onder het gelaagde pakket met kalkrijke afzettingen op 2,5 à 3 m diepte een veenlaag voorkomt die bestaat uit rietveen of rietzeggeveen. Deze veenlaag heeft een dikte van ongeveer 40 cm.

Geconcludeerd wordt dat de bodem tot op een diepte van 180 cm –mv voldoende doorlatend en gestructureerd is voor de aanleg van drainage. Er is geen significant risico op instroming van bodemmateriaal.

### 3.4 Bodemchemie

De potentiële denitrificatie is een eigenschap die aangeeft hoe goed de bodem in staat is om stikstof af te breken. Om dit te onderzoeken, zijn op 4 plaatsen ongestoorde bodemmonsters gestoken. Hiervan is in het laboratorium onder geconditioneerde omstandigheden het nitraat-reducerende vermogen bepaald van bodemmonsters uit blok 1, 3, 6 en 7 op 6 diepteniveaus vanaf 60 cm tot 1.80 à 1.95 cm. Op een diepte van 1.80-1.95 cm zijn alleen van blok 3 en 6 geschikte monsters genomen. De resultaten, weergegeven in Figuur 3.2, laten zien dat er al ondiep in het bodemprofiel denitrificatie mogelijk is in het perceel. Onder de traditionele draindiepte (1,2 m –mv) neemt de potentiële denitrificatie toe. De extreem hoge waarden rond 1,95 m –mv zijn gemeten in een veenlaag. De invloed van de potentiële denitrificatie wordt zichtbaar in het verloop van de gemeten nitraatconcentraties met de diepte (hoofdstuk 6).

Het is niet mogelijk om op basis van deze metingen uitspraken te doen over de ruimtelijke variabiliteit van potentiële denitrificatie in de percelen.



**Figuur 3.2** Verloop potentiële denitrificatie op verschillende diepteniveaus.

---

## 3.5 Watersysteem en hydrologie

Het perceel wordt aan drie zijden omringd door een sloot. De hoofdwatgang ten westen heeft een streefpeil in de zomer van NAP -0,7 m en in de winter van NAP -1,0 m. In de praktijk treden in perioden met veel neerslag tijdelijk hogere waterpeilen op. In droge perioden zakken de peilen uit. De zuidelijke kavelsloot heeft een bodemhoogte rond NAP -0,7 m en is niet permanent watervoerend. De oostelijke sloot ligt nog iets hoger en voert alleen in natte omstandigheden water af. De westelijke en zuidelijke sloot hebben een afwaterende functie. De gemiddelde drooglegging (= afstand maaiveldhoogte tot waterpeil in de sloten) van de proefblokken bedraagt 1,6 m, hetgeen vrij fors is.

Het perceel was voorafgaand aan de proef op conventionele wijze gedraineerd op een diepte van 1,3 m en een drainafstand van circa 12 m.

Op basis van boorprofielen en gerichte opnamen is een gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) bepaald van 0,6 tot 0,8 m -mv. De gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) varieert van 1,5 tot 1,9 m -mv.

Om een indruk te krijgen van de aanwezigheid van zoute kwel is tijdens de bodemkartering in elk boorgat tot een diepte van 2,3 m het elektrisch geleidingsvermogen gemeten (EGV). De gemeten EGV-waarden lopen uiteen van 184 tot 3150 mS/m, waarbij de hoogste waarden zijn gemeten aan de zuidrand van proefblok 1 t/m 4. Op alle locaties is dus sprake van beïnvloeding door zoute kwel, maar de beïnvloeding is aan de zuidrand van proefblok 1 t/m 4 groter dan in het noordelijk deel van het perceel.

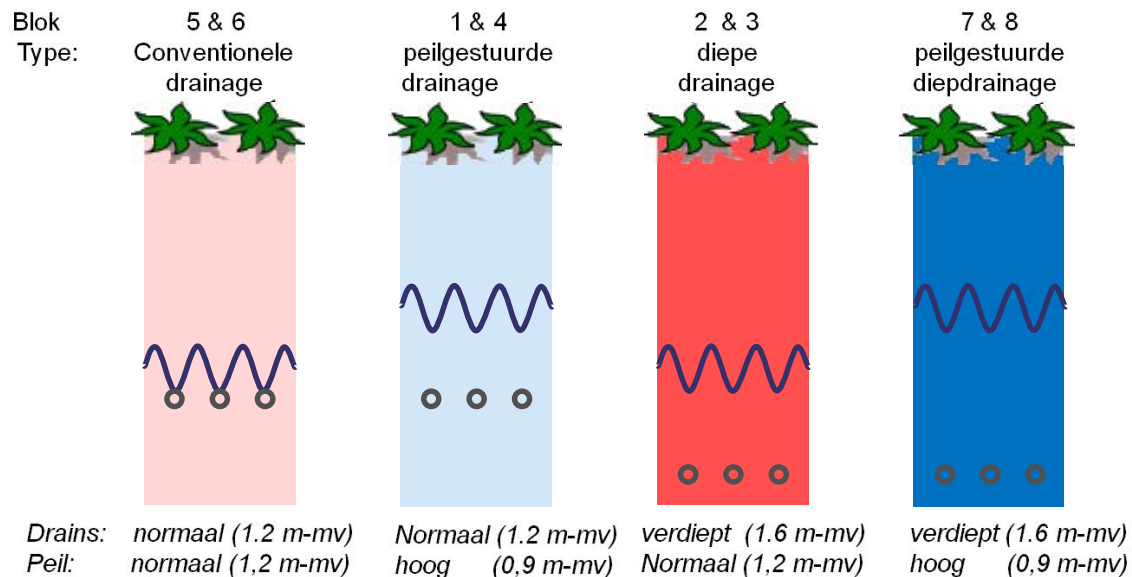
# 4 Inrichting van de veldproef

## 4.1 Drainagesysteem

De drainage is in vier verschillende varianten aangelegd:

- Conventionele drainage: dit is de referentiesituatie met drains op 1,2 m -mv en een uitstroompeil op 1,2 m -mv;
- Peilgestuurde conventionele drainage: tijdens de proef is een verhoogd peil gehanteerd van 0,9 m -mv in plaats van 1,2 m -mv.
- Conventionele verdiepte drainage: de drains zijn op 1,6 m -mv aangelegd in plaats van 1,2 m -mv en hebben een uitstroompeil van 1,2 m -mv.
- Peilgestuurde verdiepte drainage: de drains zijn verdiept aangelegd op 1,6 m -mv en tijdens de proef is een hoger peil ingesteld van 0,9 m -mv.

Zoals aangegeven, is in de figuren en tabellen ten behoeve van het overzicht steeds de kleurstelling voor de 4 typen behandelingen aangehouden zoals in Figuur 4.1 is aangegeven. Deze figuur is, ter ondersteuning van de interpretatie, ook uitklapbaar in Bijlage 4 opgenomen.



**Figuur 4.1** Drainagevarianten.

- Alle proefblokken zijn in duplo uitgevoerd. De ligging van de blokken en algehele configuratie van de proef is weergegeven in Figuur 4.3.
- Elk proefblok is 36 m breed en 80 m lang. Ze bestaat uit 6 drains met een onderlinge afstand van 6 m. Alle blokken zijn dus intensiever gedraineerd dan de uitgangssituatie.
- Rondom de proefblokken is een bufferzone gehanteerd van 12 m (2 drains) met een vergelijkbaar peil als het proefblok. De bufferdrains van de blokken zijn onderling verbonden met een collectordrain; een collectordrain voor de buffers met een hoog peil en een andere collectordrain voor de buffers met een laag peil.
- Iedere 'behandeling' is dus  $36 + 12 + 12 = 60$  m breed.
- Alle drains voeren water af via een ondergrondse verzameldrain die aangesloten is op een verticaal georiënteerde, cilindervormige meet- en regelput (zie Figuur 4.2).
- Het peil (de ontwateringsbasis) wordt geregeld via een verticale uitstroompijp in de regelput.

- Debietmeters produceren alleen bij voldoende debiet betrouwbare metingen. Daarom is gewerkt met een pomp die bij een ingesteld peil aanslaat.
- De regelputten zijn niet voorzien van uitstroompunten naar de sloot. Dit om risico's op lekkage te vermijden die de resultaten van de proeven zouden kunnen versluieren. Achteraf is geconcludeerd dat het handiger is om een overloopconstructie in de putten te maken omdat de pompen af en toe (met name bij noodweer) door stroomstoring niet goed functioneerden.
- Alle bestaande drains binnen de proefblokken zijn met behulp van een kettinggraver automatisch 'doorgesneden' tijdens de aanleg van de nieuwe drainages.
- Drains aan de rand van het perceel 4 en 8 zijn op enige afstand vanaf de grens van de proefblokken afgedopt, zodat geen gronddeeltjes kunnen inspoelen.

Daarnaast is nog een aantal ingrepen gedaan aan het omliggende watersysteem:

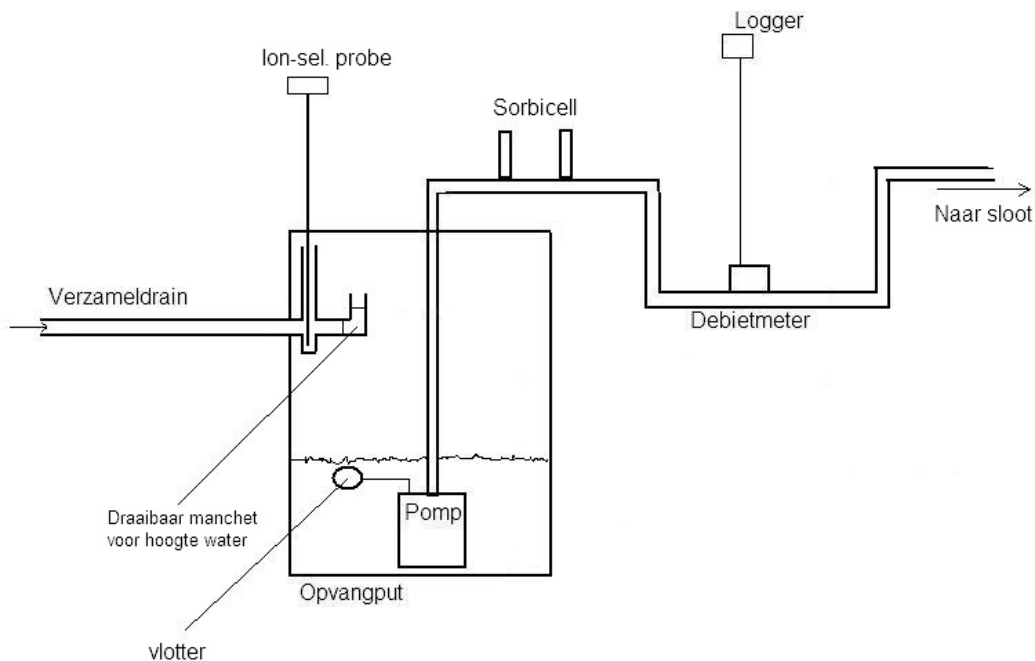
- De zuidwestelijke sloot is afgedamd en als meetsloot gebruikt. Hier wateren de drains van blok 1 t/m 4 via de meet- en regelputten op af. De bufferdrains wateren achter de dam af, waardoor het mogelijk is de water- en stoffenbalans van de proefblokken met de meetsloot te vergelijken.
- De bestaande afwaterende functie van de zuidelijke sloot wordt overgenomen door de sloot die ten zuidwesten van de Zuidlangeweg ligt.



Verbinden drain met collector.

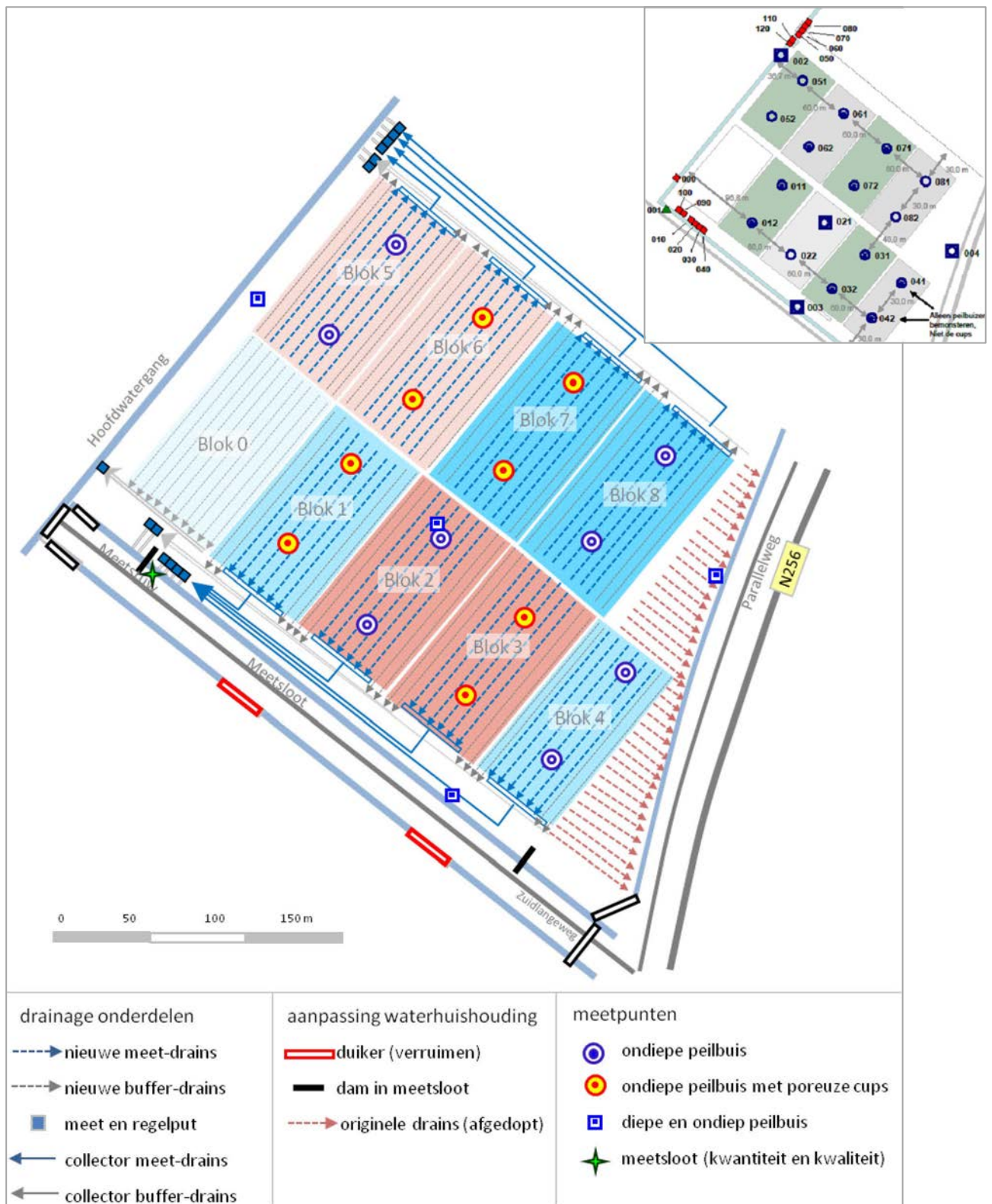
Regelputten en elektrakast.

Aanleg stuw in meetsloot.



**Figuur 4.2** Dwarsdoorsnede meet- en regelput.





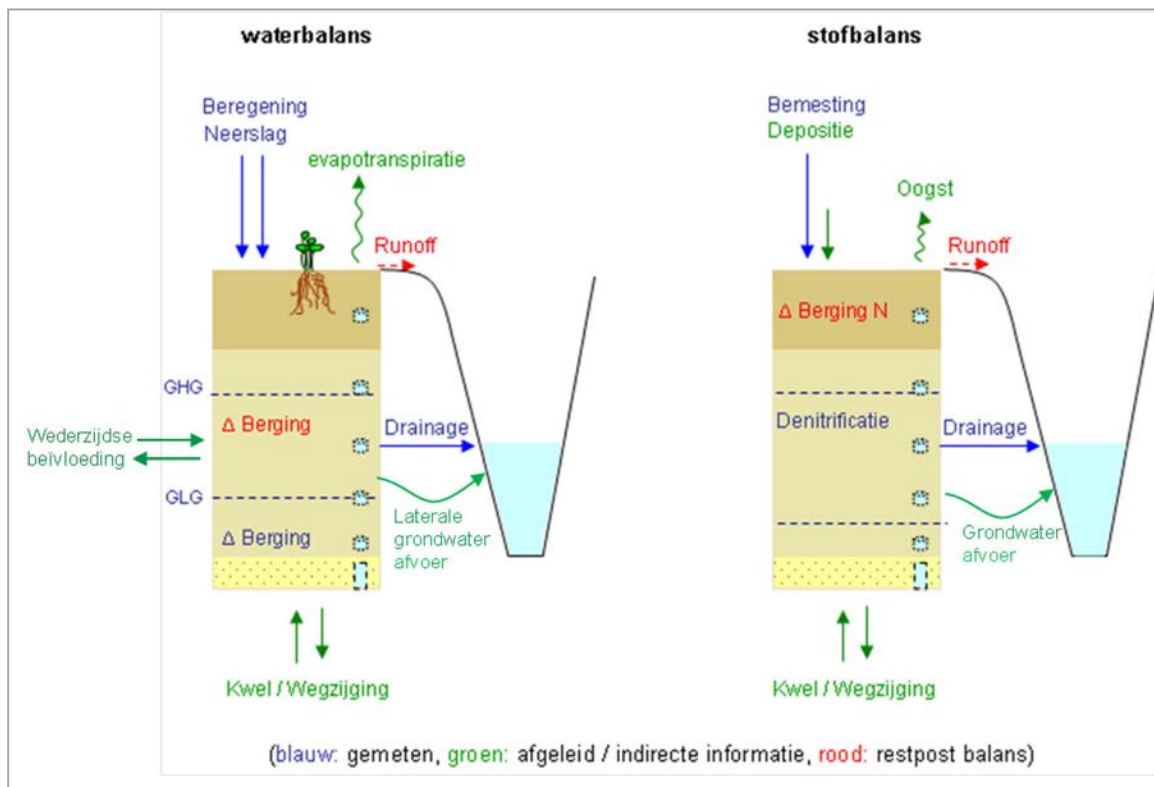
**Figuur 4.3** Ligging blokken en meetlocaties. Inzet rechtsboven: nummers peilbuizen en regelputten.

## 4.2 Meetprincipes

De effecten op waterkwaliteit en hydrologie zijn bepaald door het opstellen van water- en stofbalansen in de percelen en de meetsloot. Deze balanstermen zijn weergegeven in Figuur 4.4. Duidelijk is dat een deel van de balanstermen direct wordt gemeten en een deel afgeleid uit metingen of geschat op basis van literatuur. De rood gekleurde termen vormen sluitposten in de balans.

Om de kwel- en afbraakprocessen in beeld te krijgen, worden diverse geochemische componenten gemeten waaronder N-isotopen om denitrificatie van stikstof te bepalen. De metingen worden uitgevoerd in drains, peilbuizen in het watervoerend pakket en in cups op verschillende diepten om de overgangen van watertypen te detecteren.

Tot slot vinden oogstbepalingen plaats om de agronomische effecten van het systeem te kwantificeren. Met de monitoring van grondwaterstanden en debieten kan de technische werking van het drainagesysteem worden gecontroleerd.



**Figuur 4.4** Onderzoeksmethode water- en stofbalans.

## 4.3 Meetmethoden en -locaties

- De sloot- en drainafvoer is in de regelputten continu bemonsterd met een debietmeter en ion-selectieve elektroden. Daarnaast zijn regelmatig handmatige metingen uitgevoerd van de waterpeilen en is de waterkwaliteit in het lab onderzocht.
- In de blokken zijn freatische peilbuizen geplaatst (2 per blok). Deze zijn tijdelijk ondergronds afgewerkt gedurende oogstperiode en grondbewerkingen.
- In 4 blokken zijn cups geplaatst op diepten van 0,5 tot 2,5 m -mv voor het nemen van (onverzadigde) watermonsters.
- In ieder meetjaar (2010-2013) is in ieder blok een oogstproef gedaan en zijn de agronomische handelingen geregistreerd.

De meetlocaties zijn weergegeven in Figuur 4.3.

## 4.4 Analysepakket en meetfrequentie

De analysepakketten en bijbehorende meetfrequenties zijn weergegeven in Tabel 4.1:

- Wekelijkse bemonstering aan het begin van de proef op concentratie om de ion-selectieve elektroden te testen. En vervolgens minder frequent, afhankelijk van of er al dan niet drainafvoer optreedt.
- Ion-selectieve sensoren registreren de belangrijkste parameters  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$  en EGV continu. De bemonstering wordt gebruikt om ion-selectieve elektroden te corrigeren.
- Continue afvoermeting van de drains en meetsloot.
- De grondwaterstanden en stijghoogten worden continu geregistreerd met drukopnemers
- Het grondwater (cups en diepe peilbuizen) wordt om de 2 maanden gemeten.

Voor een uitgebreidere toelichting op de proefopzet wordt verwezen naar de deelrapportage met vooronderzoek en meetontwerp.

Tabel 4.1

Analysepakket en meetfrequentie (september 2010 – juni 2012).

Type meting	Meetfrequentie	Analysepakket
<i>Drainafvoer</i> (8 meetlocaties) en meetsloot		
Waterkwaliteitsmonster	Uitspoelseizoen: 1x per 3 weken Zomer: 1x per 2 maanden *	pH, EGV, nutriënten ***
SORBI-cellen	Tijd- en debiet-proportioneel	Afgestemd op nutriënten (stikstof en fosfor)
Ion-selectieve elektrode	Continue registratie	Temperatuur, $\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{Cl}^-$ , EGV
Debietmeter/ stuwafvoer	Continue registratie	Cumulatief $\text{m}^3$
<i>Peilbuizen</i> (16 freatisch; 4 in watervoerend pakket)		
Stijghoogte	Continue registratie	Druk en luchtdruk
<i>Grondwatercups</i> (8 meetlocaties x 6 meetdieptes) & <i>peilbuizen</i> (4 in watervoerend pakket)		
Waterkwaliteitsmonster	1 x per 2 maanden **	pH, EGV, nutriënten ***

\* In totaal 30 meetronden

\*\* In totaal 12 meetronden

\*\*\* Nutriënten =  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , IC (Inorganic Carbon), TC (Total Carbon),  $\text{NH}_4^+$ , NTS (Natural Total Solids). In 8 meetronden zijn bovendien extra analyses uitgevoerd op stikstofisotopen ( $\text{N}^{14/15}$ ), macro-ionen (S, P, Na, Ca, K, Mg, Fe, Mn) en zware metalen (Al, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).

Zoals aangegeven in hoofdstuk 1 is in het najaar van 2013 in een viertal regelputten het drainwater intensief in de tijd bemonsterd door de installatie van zogenaamde ISCO's waarmee debiet-proportioneel watermonsters zijn verzameld. Maximaal kunnen in die ISCO's 24 flessen gevuld worden. De ISCO's waren begin september 2013 geïnstalleerd, maar het duurde tot het weekend van 14-15 oktober totdat de eerste drainafvoer op gang kwam. In 3 dagen viel toen echter zo'n 100 mm. Hierop was de automatische bemonstering niet ingesteld, zodat een deel van de gevulde monsterflessen blootstond aan een tweede vulling. Hiermee is bij de verwerking en interpretatie zo veel mogelijk rekening gehouden.

Tabel 4.2 geeft een compleet overzicht van alle metingen die voor de regelputten zijn uitgevoerd en Tabel 4.3 de metingen van het bodemvocht (dat wat via de poreuze cups in de bodem is verzameld).





Per monsterronde is niet van iedere cup een bodemvochtmonster genomen omdat – afhankelijk van de vochttoestand van de bodem – de cups niet altijd voldoende water leverden. Ook is er niet altijd voldoende water uit de cups onttrokken om alle chemische analyses uit te kunnen voeren. In totaal zijn tijdens de 11 meetrondes 371 bodemvochtmonsters genomen. Deze zijn geanalyseerd op de volgende parameters:

- Temp, pH, EGV
- Nutriënten: nitraat (+ nitriet), ammonium, totaal-stikstof, fosfaat
- Overige stoffen: anorganisch koolstof, totaal koolstof, natrium, kalium, calcium, magnesium, ijzer, mangaan en aluminium

In totaal zijn 7850 chemische analyses uitgevoerd.

Tabel 4.3

Overzicht uitgevoerde metingen bodemvocht percelen.

nr	datum	lab-code	blok: cup code:	analyse bodemvocht perceel							
				blok 1		blok 3		blok 6		blok 7	
				011c	012c	031c	032c	051c	052c	071c	072c
1	23-sep-10	m10 630		5	6	5	6	5	0	3	5
2	30-nov-10	m10 830		5	5	5	6	6	6	5	4
3	22-feb-11	m11 102		5	5	3	6	6	6	6	5
4	5-apr-11	m11 174		2	4	1	4	6	3	5	3
5	21-jun-11	m11 317		2	5	2	6	4	4	5	5
6	2-aug-11	m11 388		0	4	2	5	4	3	4	4
7	27-sep-11	m11 459		0	5	2	5	6	4	5	5
8	13-dec-11	m11 624		4	4	2	3	6	6	5	3
9	28-feb-12	m12 078		4	5	2	3	5	5	4	3
10	4-apr-12	m12 136		4	6	2	3	5	5	4	4
11	12-jun-13	m13 222		6	6	0	5	6	4	4	5
<b>totaal aantal monsters:</b>				<b>37</b>	<b>55</b>	<b>26</b>	<b>52</b>	<b>59</b>	<b>46</b>	<b>50</b>	<b>46</b>

---

# 5 Verloop van de proef

## 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt verslag uitgebracht over het verloop van de aanleg en uitvoering van de veldproef. Voor uitgebreidere informatie wordt verwezen naar de deelrapportages 'Aanleg drainagesysteem', 'Agronomie 2010', 'Agronomie 2011' en 'Verslag veldproef'.

## 5.2 Aanleg en inspectie proefopstelling

Het drainagesysteem is aangelegd door Barth drainage BV in de periode van 26 t/m 29 april 2010. Hierbij is dagelijks toezicht geweest op de locatie door Alterra, Grontmij, Rusthoeve en de provincie.

Het weer was gedurende en ruime tijd voorafgaand aan de aanleg droog. Hierdoor was de kans op verslapping van de bodem gering. Wel zijn door de droge weersomstandigheden vrij grote brokken bodemmateriaal op het land blijven liggen. Na afloop is het perceel daarom met een woeler bewerkt. De indruk is dat het drainagebedrijf zeer netjes en secuur heeft gewerkt. Om foutieve aansluitingen te voorkomen, lagen alle collectordrains op een onderlinge afstand van 1 m en op afzonderlijke diepten. De gebruikte materialen voldeden voor zover te controleren aan de specificaties.

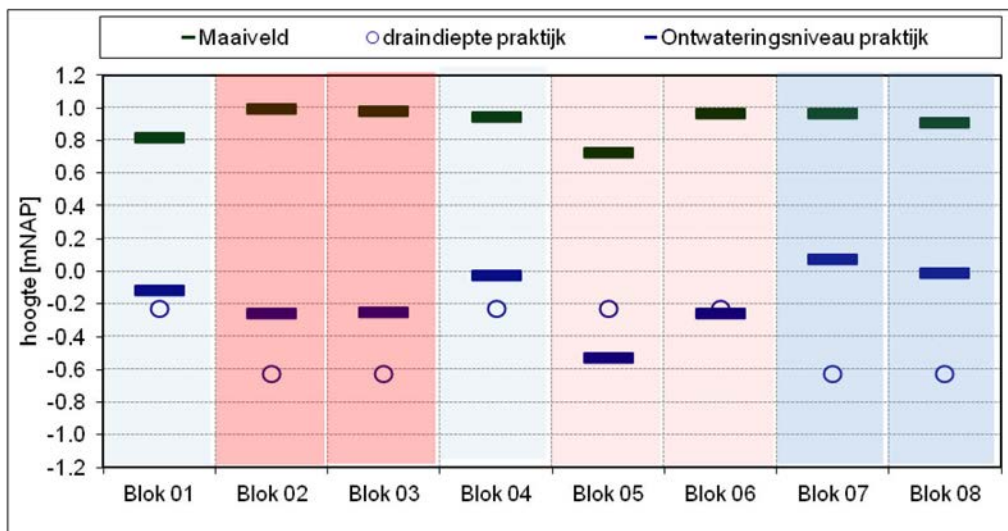


*Drainagemachine in actie.*

Gedurende aanleg zijn met behulp van een laserplane de drains op een vaste NAP-diepte aangelegd; NAP  $-0,23$  m voor de traditionele buisdiepte en NAP  $-0.63$  m voor de verdiepte drainbuizen. Door de hoogteverschillen van het maaiveld liggen de buizen ten opzichte van maaiveld niet op uniforme diepte (zie Figuur 5.1).

Op het perceel waren nog oude drainbuizen aanwezig op een diepte van ongeveer 1 a 1,2 m  $-mv$ . Deze oude drains mondden uit in de hoofdwatergang en de diepe greppel langs de Deltaweg. Omdat de nieuwe drains hier haaks op zijn aangelegd, zijn door de aanleg de oude drains onklaar gemaakt. Gedurende de proef zijn tijdens de veldbezoeken ook lopende oude drainbuizen waargenomen. Wel is na het schonen van een hoofdwatergang eind 2014 geconstateerd dat er toch een aantal oude drainbuizen ter hoogte van blok 5 water afvoerde. Kennelijk is dus toch een deel van de oude drains niet helemaal onklaar gemaakt. Gelet op de diepteligging van de nieuwe (buffer)drains (zie Figuur 5.2), is dit ook aannemelijk voor blok 5 en mogelijk ook voor een deel van blok 6. Voor de andere blokken lijkt dit, gelet op de diepte van de drains, niet aannemelijk.

Het maaiveld van blok 5 lag gemiddeld zo laag dat de diepte van de drainbuizen, die was ingesteld op NAP, hoger is komen te liggen dan het traditioneel ten opzichte van maaiveld ingestelde ontwateringsniveau. In feite is daardoor dit blok niet geheel representatief voor de bedoelde behandeling (ondiepe drainbuizen en traditioneel ontwateringspeil), omdat het blok door de hoge ligging van de drainbuizen in feite een wat verhoogd ontwateringspeil heeft. Daarbij moet ook weer worden bedacht dat juist in dit blok niet alle oude drainbuizen onklaar zijn gemaakt, waardoor nog enkele dieper liggende oude drainbuizen water afvoeren.



**Figuur 5.1** Overzicht van de hoogtes drainagesysteem (vanaf november 2010).

Na aanleg is een video-inspectie van het drainagesysteem uitgevoerd. Er is geverifieerd dat het aantal aansluitingen op de collectorbuis klopte met het ontwerp en of het systeem horizontaal lag.

In zowel proefblok 3 als 7 was één aansluiting met troebel water. Dit duidt mogelijk op een beschadiging of vervuiling van de drain met bodemmateriaal gedurende de aanleg.



*Video-inspectie.*

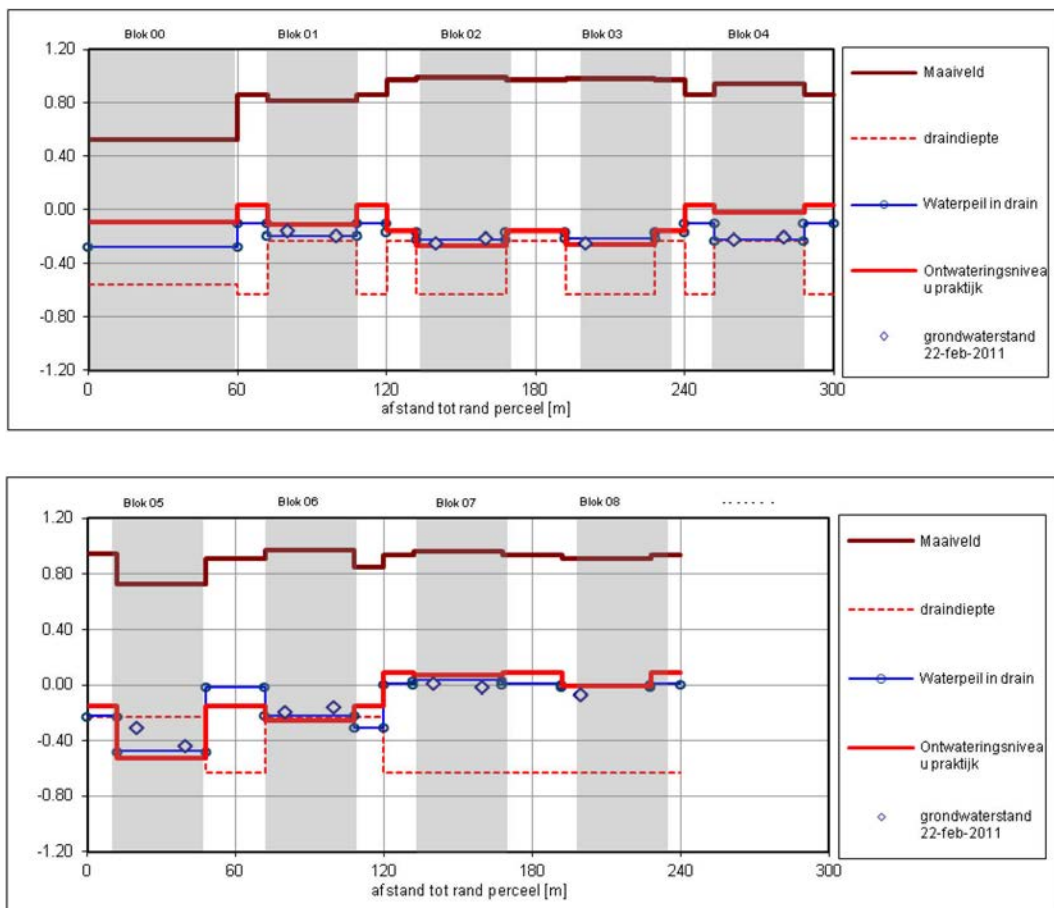
De meetopstelling waaronder de peilbuizen, ion-selectieve elektroden en SORBI-cellen is gerealiseerd na aanleg van het drainagesysteem. Direct na aanleg zijn de hoogtes van het systeem ingemeten (waterpassing).

De ontwateringsniveaus zijn door verschillende medewerkers enkele malen gecontroleerd gedurende de meetperiode. Op basis van variaties in de gemeten waarden is een betrouwbaarheidsinterval (STDEV) geschat van de peilen van 0.02 m t.o.v. de bovenkant van de regelput. Fluctuaties worden veroorzaakt door onnauwkeurigheden in uitlezen met het cm-meetlint (met name als er veel wind staat) en doordat de balken waaraan de drainmonden zijn opgehangen na enkele maanden wat doorgebogen waren en zijn vervangen. De absolute NAP-hoogte is tweemaal ingemeten.

### 5.3 Beheer drainagesysteem

De peilen in de regelputten zijn kort na aanvang van de proef in november 2010 eenmalig naar boven bijgesteld. Voor de conventionele ontwateringsbasis was namelijk ten onrechte uitgegaan van polderpeil in plaats van de oorspronkelijke draindiepte. Bovendien was het maaiveld ter plaatse van de regelputten gebruikt als referentie en dat wijkt af van het gemiddelde maaiveld per proefblok. Vanaf november 2010 zijn de peilen ingesteld ten opzichte van de gemiddelde maaiveldhoogte per proefblok. Nadeel is dat er verschillen optreden in ontwateringsniveau ten opzichte van NAP waardoor de kans op laterale beïnvloeding toeneemt.

Figuur 5.2 toont de in praktijk gehanteerde ontwateringsniveaus en resulterende waterpeilen.



**Figuur 5.2** Ontwateringsniveaus en waterpeilen in een dwarsdoorsnede over de blokken.

Voor de ontwateringsniveaus geldt dat op enkele momenten pompen zijn uitgevallen en daardoor de afvoer werd geblokkeerd. Dit gebeurde met name in de periode 13 tot 16 februari 2011 (putten 1-3) en in 2012 van 14 augustus tot 9 oktober (alle putten). Bij de interpretatie wordt hiermee rekening gehouden door steeds in die periodes de dan geldende ontwateringsniveaus en daaruit af te leiden opbolling van de grondwaterstand omhoog bij te stellen.

## 5.4 Implementatie van de metingen

De meeste metingen zijn volgens plan verlopen. Wel is een aantal kanttekeningen te plaatsen. Zo was alle meetapparatuur pas in november 2010 operationeel, terwijl de drains al in september afvoerden.

Gedurende het onderzoek zijn de toevoerslangen naar de suctioncups op 1 meetlocatie kapot gebeten. Deze trokken daardoor niet meer vacuüm, waardoor geen monsters konden worden genomen. Het bleek niet mogelijk dit euvel snel te herstellen waardoor een aantal metingen ontbreekt.

Daarnaast hebben de ion-selectieve elektroden gedurende het uitspoelingsseizoen 2010/2011 een deel van de tijd niet goed gefunctioneerd. Met name de  $\text{NH}_4^+$ -elektroden vertoonden kuren in perioden dat deze droogvielen door lage grondwaterstanden/ waterpeilen in de regelput. Ook zijn door het berekenen van ionenbalansen en controles op vuistregels voor redoxcondities en geleidbaarheid voor enkele monsters resultaten van de labanalyses van het drainwater



*Meetapparatuur in regelput.*



*Peilbuis met diver.*

gecorrigeerd of als onbetrouwbaar aangemerkt. In december 2011 zijn nieuwe instructies ontvangen van de leverancier voor onderhoud en zijn de elektroden dieper ingehangen zodat ze permanent onder water blijven. De storingen zijn nadien afgenomen. Hierdoor zijn voor het tweede meetjaar goede metingen beschikbaar van de drain- en slootwaterkwaliteit.



*Suctioncups.*

Uit een waterpassing voorafgaand aan en na afloop van de proef blijkt dat de bovenkant van de ondergegraven peilbuizen in het perceel gemiddeld 3 cm is veranderd. De oorzaak ligt vermoedelijk in het frequente op- en ondergegraven van de peilbuizen voor teeltbewerkingen.

Tijdens de proef zijn in samenwerking met RIVM diverse opzetten met SORBI-cellen getest om N- en P-uitspoeling tijds- en debiet-proportioneel te meten. Maar geen van deze SORBI-cellen bleek goed te werken. De metingen van N en P met SORBI-cellen bleken tot medio 2012 derhalve niet bruikbaar. Aanvankelijk was het de bedoeling om met de SORBI-cellen bestrijdingsmiddelen te meten, maar omwille van de samenwerking met RIVM is hiervan afgeweken en zijn in plaats daarvan de metingen in de cellen gericht op de nutriënten.

In de periode december 2012 tot maart 2013 is voor de SORBI-cellen in samenwerking met RIVM en Deltares een nieuwe meetopstelling getest waarin de cellen getest zijn in combinatie met zogenaamde Flow-Caps. Deze opstelling bleek beter te werken. De resultaten hiervan zijn opgenomen in Rozemeijer *et al.* (Deltares-rapport 2013).

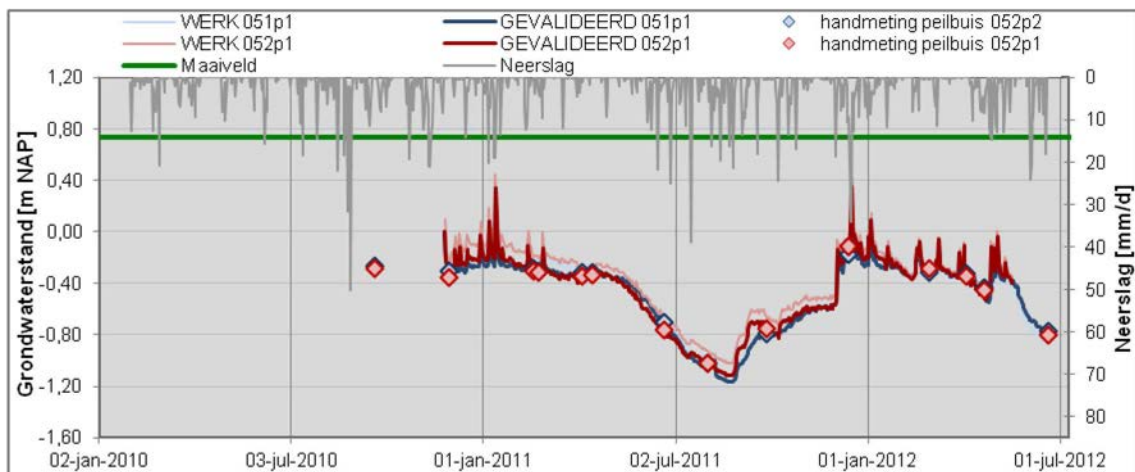
Tot slot zijn gedurende de proef enkele defecte divers en watermeters vervangen.

## 5.5 Validatie en betrouwbaarheid

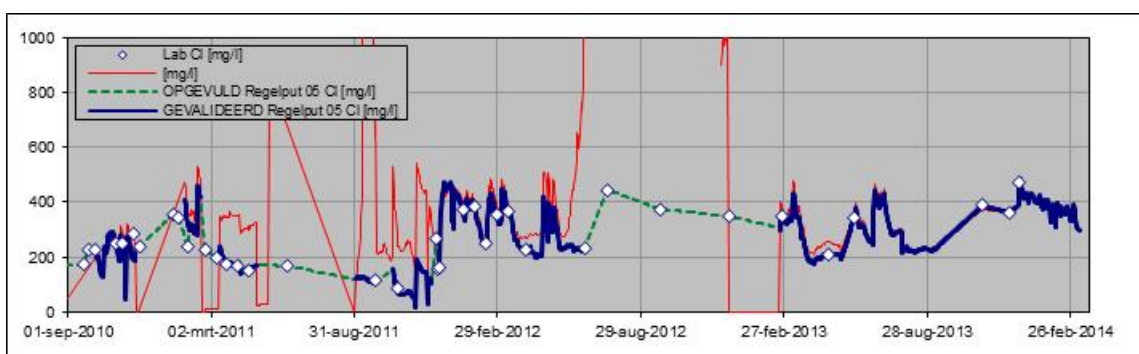
De continue metingen in drukopnemers, ion-selectieve elektroden en debietmeters zijn gevalideerd door te vergelijken met onafhankelijke handmatige metingen. Metingen zijn zodanig ex-post gecorrigeerd dat ze altijd overeenkomen met handmetingen.

Figuur 5.2 illustreert de correctie van grondwaterstanden die met drukopnemers zijn gemeten. De correcties zijn gering ten opzichte van de variatie van de standen in de tijd. Figuur 5.3 illustreert de correctie van concentraties die indirect met de ion-selectieve elektroden zijn gemeten. Om tot een sluitende stofbalans op dagbasis te komen, zijn ontbrekende metingen met ion-selectieve elektroden opgevuld door lineaire interpolatie. Bij deze correctie valt de sterke stijging van het ongecorrigeerde signaal in juni 2011 op. Dit kan komen doordat in die periode geen afvoer was en de elektrode mogelijk droog is komen te staan. Omdat geen van de handmatige metingen verhoogde concentraties liet zien, is voor interpolatie de lage concentratie aangehouden. Op de vrachtberekeningen heeft dit geen invloed, omdat de drains in de zomer niet afvoerden.





**Figuur 5.2** Correctie grondwaterstanden drukopnemers op basis van handmatige metingen. Lichtblauw/rood = ongecorrigeerd; donkerblauw/rood = gecorrigeerde gegevens.



**Figuur 5.3** Correctie chloridegehalten ion-selectieve elektroden op basis van in het laboratorium gemeten concentraties van de watermonsters. De rode lijn geeft de ongecorrigeerde concentratie, de blauwe lijn de gecorrigeerde en gevalideerde data, de groene lijn de opvulling in perioden dat meetgegevens ontbreken.

Bij defecte watermeters is de afvoer geschat door de geregistreerde pompduur te vermenigvuldigen met pompcapaciteit of door de afvoer te correleren aan andere proefblokken in perioden dat er wel afvoer is gemeten. Dat de divers in de peilbuizen af en toe zijn uitgevallen en daardoor geen continue reeksen gaven gaf weinig problemen voor de interpretatie, omdat in ieder perceel 2 peilbuizen staan.

Voor laboratoriumanalyses van de waterkwaliteit is de elektronenbalans bepaald en een visuele interpretatie uitgevoerd door gecorreleerde parameters te plotten.

Tabel 5.1 geeft de geschatte betrouwbaarheid van de meetresultaten. Voor de ion-selectieve elektroden is de betrouwbaarheid alleen voor het tweede meetjaar bepaald. De mate van betrouwbaarheid is opmerkelijk gunstig gezien alle storingen in het eerste meetjaar. Voor een nadere onderbouwing van de geschatte betrouwbaarheden wordt verwezen naar het deelrapport 'Verslag veldproef' (Van der Schans, 2012). Geconcludeerd wordt dat de metingen voldoende betrouwbaar zijn voor interpretatie van de proef.

Tabel 5.1

*Schatting betrouwbaarheid metingen.*

Type meting	STDEV betrouwbaarheidsinterval
Neerslag	10% *
Verdamping	10% *
Afvoer meetsloot (tot 2013)	20% *
Afvoer drains	3% *
Slootpeil	0.02 m
Peilen drainagesysteem	0.01 m
Grondwaterstanden	0.04 m **
Labanalyse	Verschildt per stofgroep.
Ion-selectieve elektrode (NO3)	2% (log-schaal) ^ ~17% (normale schaal)
Nutriënten SORBI	n.v.t. ^^
Potentiële denitrificatie	Onbekend
Teeltgegevens	Zeer nauwkeurig (kwalitatief oordeel)
Oogstopbrengst	4%

\* Fout is op dagbasis groter dan aangegeven waarde; wel geldig op bv. decadebasis.

\*\* 0.08 m tijdens op- en ondergraven peilbuis.

^ Mits in werking en dus alleen in perioden dat er vrijwel dagelijks afvoer is.

^^ De meeste tijd van meetperiode hebben de cellen niet gewerkt. De periode dat de SORBI cellen wel werkten was te kort om een betrouwbaarheid aan te geven.

## 5.6 Bodembewerking en teelt

Wegens het moment van aanleg van de drainage tijdens het groeiseizoen in april 2010 was bruine boon een van de weinige gewassen die nog kon worden gezaaid. Ook voor bruine boon was de zaaidatum van 1 juni aan de late kant. Hoewel de opbrengst goed was, kon het gewas door de natte weersomstandigheden in augustus en september niet meer worden geoogst; het gewas is ondergewerkt. Een deel van blok 3 en 4 bleek in latere instantie ingezaaid met CGo-groenbemester. Hier is extra nalevering aan stikstof te verwachten.



*Bruine bonen 2010.*

Gedurende de winter 2010/2011 lag het perceel braak. Vervolgens is in maart 2011 suikerbiet gezaaid. De oogst vond plaats in oktober van datzelfde jaar.

Tot slot is voor de winter 2011/2012 nog tarwe ingezaaid. In de winter gaven de jong ontwikkelde tarweplanten beperkte gewasbedekking op het perceel. De tarwe is in augustus 2012 geoogst.

De Rusthoeve gaf aan dat bij het diepploegen in najaar 2010 de tractor in het onderzoeksperceel meer weerstand ondervond dan in het daarnaast gelegen perceel dat niet opnieuw was gedraineerd. Mogelijk hangt dit samen met de veranderingen in de structuur van de bodem door de sleuven voor aanleg van de drains. Te hoge grondwaterstanden lagen, gezien de peilbuismetingen, immers niet voor de hand. Overigens zijn de oogsthoeveelheden normaal en duidt niets erop dat deze door aanleg van de drainage minder zijn. Bij de oogst van 2011 viel vooral op dat blok 1 en 2 bijzonder nat waren. De machines hadden moeite bovenop te blijven.

## 5.7 Bemesting

Op de percelen is tijdens het groeiseizoen enkele malen stikstofbemesting toegepast. Ook zijn de percelen met stikstof belast door atmosferische depositie. De hoeveelheden bemesting, atmosferische



---

depositie en gewasopname zijn hieronder voor 2010 en 2011 weergegeven. Het N- en P-bodemoverschot is de hoeveelheid die via mest wordt toegediend plus de atmosferische depositie minus de gewasopname (ervan uitgaande dat de gewassen worden geoogst).

#### 2010 Bonen

- Stikstofbemesting 2010: 27 kg/ha
- P-bemesting: 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha
- Atmosferische depositie: 20 kg N/ha (Milieucompendium RIVM)
- Gewasopname: niet van toepassing (ondergewerkt)
- N-bodemoverschot: 55 kg N/ha
- P-bodemoverschot: nihil

#### 2011 Suikerbieten

- Stikstofbemesting 2011: 162 kg/ha
- P-bemesting: 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha
- Atmosferische depositie: 20 kg N/ha
- Gewasopname stikstof: 189 kg N/ha (N-gehalte bieten 1,8 kg N/ton)
- Gewasopname fosfor: 42 kg P/ha (P-gehalte in bieten 0,4 kg/ton)
- N-bodemoverschot: 162 + 20 - 189 = -7 kg N/ha
- P-bodemoverschot: 0 - 42 = -42 kg P/ha

#### 2012 Wintertarwe (oogst van 10 ton tarwe per ha)

- Stikstofbemesting 2012: 243 kg/ha
- P-bemesting: 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha
- Atmosferische depositie: 20 kg N/ha (Milieucompendium RIVM)
- Gewasopname stikstof: schatting 250 kg N per ha<sup>2</sup> (niet gemeten)
- Gewasopname fosfor: onbekend
- N-bodemoverschot: 243+20-250= +13 kg N/ha
- P-bodemoverschot: onbekend

#### 2013 Aardappels (oogst van gemiddeld 61.8 ton per ha)

- Stikstofbemesting 2013: 243 kg/ha
- P-bemesting 2013: 98 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha
- Atmosferische depositie: 20 kg N/ha (Milieucompendium RIVM)
- Gewasopname stikstof: schatting 245 kg N per ha<sup>3</sup> (niet gemeten)
- Gewasopname fosfor: 57 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha (niet gemeten)<sup>4</sup>
- N-bodemoverschot: 243+20-245= +18 kg N/ha
- P-bodemoverschot: 98 - 57 = 41 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha

Het eerste jaar, 2010, was er ondanks de geringe bemesting sprake van een significant N-overschot omdat het gewas is ondergewerkt. In de regel wordt het organische stikstof in het ondergewerkte gewas vrij snel omgezet in anorganisch en dus mobiel stikstof (ammonium en vervolgens nitraat). Op perceel 3 en 4 was het bodemoverschot nog groter door de toegepaste groenbemester; hoeveel dit effect is, kan door ontbrekende gegevens hierover niet worden achterhaald. Het tweede jaar is sprake van evenwicht door de relatief hoge gewasopname. De bonen waren eigenlijk te laat gezaaid; het gewas is in oktober niet geoogst maar ondergewerkt. Doordat in 2010 geen P-bemesting is toegepast, was er geen P-overschot.

In het daaropvolgende jaar 2011 was er een significant P-tekort ('P-uitmijning'). De opbrengsten van de suikerbieten (2011) en wintertarwe (2012) zijn door de bedrijfsvoerder als redelijk ervaren. In de jaren 2012 en 2013 was er een licht N-overschot.

---

<sup>2</sup> Stikstof in hoogproductieve wintertarwe. Effecten van hoge stikstofgiften op de stikstoftoestand in gewas en bodem. 2000 - A. Darwinkel en H.H.H. Titulaer - PPO-AGV.

<sup>3</sup> Opbrengst aardappels gemiddeld 61.8 ton per ha en uitgaand van 200 kg N/ha en een opbrengst van 50 ton aardappels per ha (naar Van Dijk & Van Geel, 2010).

<sup>4</sup> Naar een nieuw P-bemestingsadvies akkerbouw - testgewas aardappel, 2015, Bussink, Doppenberg, Van den Berg, Van Wijk, NMI, PPO-AGV.

---

# 6 Resultaten en discussie

## 6.1 Inleiding

Het doel van het onderzoek is om in het veld vast te stellen wat de effecten zijn van peilgestuurde drainage op de waterkwantiteit (extra berging, reductie piekafvoeren), waterkwaliteit (uitspoeling van nutriënten, zware metalen en bestrijdingsmiddelen) en de gewasopbrengsten. In hoofdstuk 1 is een aantal mogelijke voordelen en neveneffecten van peilgestuurde diepe drainage benoemd. Dit hoofdstuk behandelt in hoeverre deze voordelen en neveneffecten ook zijn opgetreden op het proefperceel aan de hand van de volgende vragen.

Onderzoeksvragen waterkwantiteit:

1. Wordt met peilgestuurde drainage extra water in de bodem vastgehouden?
2. Werken de dieper aangelegde drains net zo goed als ondiepe drains?
3. Welk aandeel van het neerslagoverschot wordt via de drains afgevoerd?
4. Welk aandeel van de slootafvoer is afkomstig uit drains?
5. Nemen door peilsturing de afvoerpieken naar het oppervlaktewatersysteem af?

Onderzoeksvragen waterkwaliteit:

6. Wat zijn de effecten van peilgestuurde diepe drainage op de kwaliteit van het grondwater?
7. Wat zijn de effecten van peilgestuurde diepe drainage op de kwaliteit van het drainwater?
8. Wat zijn de effecten van peilgestuurde drainage op waterkwaliteit in het oppervlaktewatersysteem? Met andere woorden: hoe verhoudt de kwaliteit van het drainagewater zich tot ontvangend oppervlaktewater?
9. Treedt tijdens hevige afvoer kortsluitstroming op van neerslagwater naar de drains? Met andere woorden: zijn er aanwijzingen voor kortsluitstroming naar de drains via scheuren in de klei met pieken in stofgehalten tot gevolg?

Onderzoeksvragen gewasopbrengsten:

10. Leidt aanleg van peilgestuurde drains tot meer verstoring van de bodem en navenante oogstderving als traditionele drainage?
11. Leidt peilgestuurde diepdrainage tot hogere gewasopbrengsten?
12. Leidt peilgestuurde diepdrainage tot een betere bereikbaarheid in natte perioden?

Om deze vragen te beantwoorden zijn de grondwaterstanden, afvoeren, concentraties en stofvrachten en gewasopbrengsten nader geanalyseerd. Op dagbasis zijn water- en stofbalansen vastgesteld en relaties afgeleid tussen grondwaterstanden en afvoeren.

Bij het vergelijken van de blokken geldt enerzijds dat de vier typen behandelingen in duplo zijn uitgevoerd. Maar er is voorzichtigheid geboden bij onderlinge vergelijking, omdat er door variatie in bodemopbouw en afstand tot sloten duidelijke verschillen zijn tussen de noordelijke en zuidelijke blokken. Bovendien ligt blok 5 grotendeels in een oude kreekbedding en heeft daarbij door de relatief lage maaiveldligging een duidelijk ondiepere ontwatering dan in het ontwerp was beoogd.

## 6.2 Grondwaterstanden en werking drains (vraag 1 en 2)

De gemeten grondwaterstanden zijn weergegeven in Figuur 6.1. In ieder blok zijn ook het ontwateringsniveau van de drains, waterpeil in de naastgelegen sloten en afvoer weergegeven. Wanneer de grondwaterstanden boven het ontwateringsniveau uitkomen, voeren de drains water af. Als de stijghoogte in het watervoerend pakket (omgerekend naar zoet water) boven de grondwaterstand en/of het slootpeil uitkomt, treedt kwel op naar het perceel en/of de sloot.

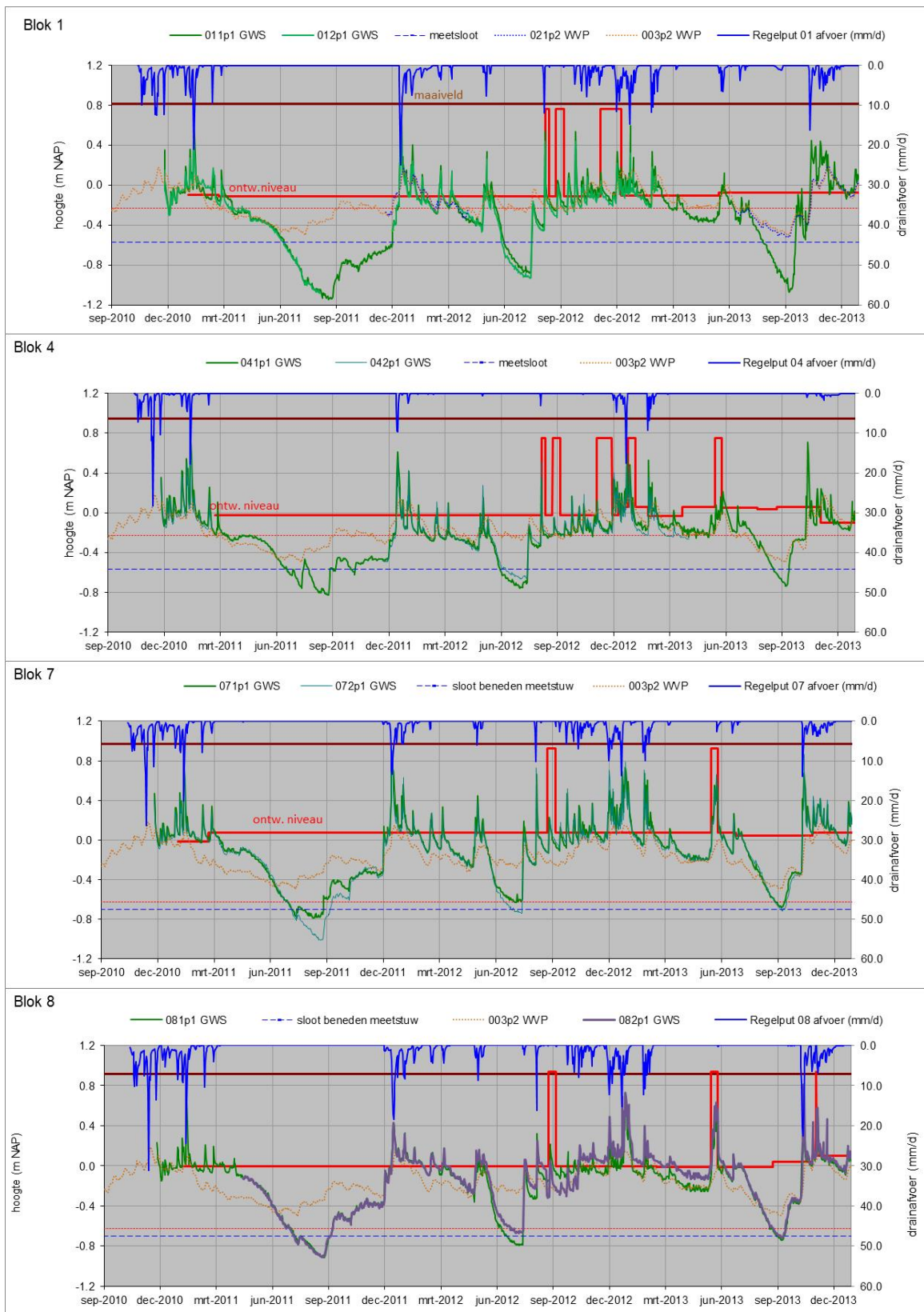
Uit het grondwaterstandsverloop (Figuur 6.1) vallen de volgende patronen op:

- De grondwaterstanden in verschillende behandelblokken volgen een vergelijkbaar patroon: in de winterperioden (het afvoerseizoen) stijgen de grondwaterstanden na hevige neerslag en dalen na een bui binnen een periode van enkele dagen weer naar het oorspronkelijke niveau. Alle percelen lijken dus goed gedraineerd.
- In de peilgestuurde blokken (1, 4, 7 en 8) dalen de grondwaterstanden al snel onder het ontwateringsniveau (rode lijn), terwijl de grondwaterstanden in de niet-peilgestuurde blokken langer boven het traditionele ontwateringsniveau blijven. Dit brengt met zich mee dat de niet-peilgestuurde drains langer blijven afvoeren. Wat opvalt, is dat met name in blok 4 de grondwaterstanden snel uitzakken (en de afvoer stopt). Hier is geen duidelijke verklaring voor gevonden; mogelijk is er sterkere laterale beïnvloeding door de relatief hoge ligging van maaiveld en daaraan gekoppelde peilen. Anderzijds laat blok 8, dat ook aan de zuidoostzijde van het proefveld ligt en een vergelijkbare maaiveldhoogte heeft, wel grotere afvoeren zien.
- In de zomer zakken grondwaterstanden in alle blokken ver beneden het ontwateringsniveau uit. Omdat de potentialen van het freatische grondwater dan lager zijn dan in het watervoerende pakket, treedt in de zomer kwel vanuit het watervoerende pakket op. Deze kwel is kennelijk beperkt, anders zouden de grondwaterstanden niet zo ver uitzakken. In de winterperioden is de stijghoogte van het grondwater in het watervoerend pakket ongeveer op het niveau van de freatische grondwaterstanden.
- Op blok 3 na zakt het peil in de zomer in de peilgestuurde blokken ten opzichte van het ontwateringsniveau wat dieper uit dan de traditionele blokken en in de natte perioden stijgt het peil in de peilgestuurde blokken over het algemeen wat sneller. Dit houdt vermoedelijk verband met het drainageniveau, dat in de peilgestuurde blokken hoger is. In het traject waarin het grondwater tussen hoog en normaal peil (0,9-1,2 m –mv) daalt, bevatten de peilgestuurde blokken meer bodemvocht. Bij een gelijkblijvende verdamping van de blokken blijft deze 'voorsprong' bestaan.
- De gemiddelde grondwaterstand van de peilgestuurde blokken is 5 cm (normale draandiepte) tot 17 cm (verdiepte draandiepte) hoger dan de niet-peilgestuurde blokken.

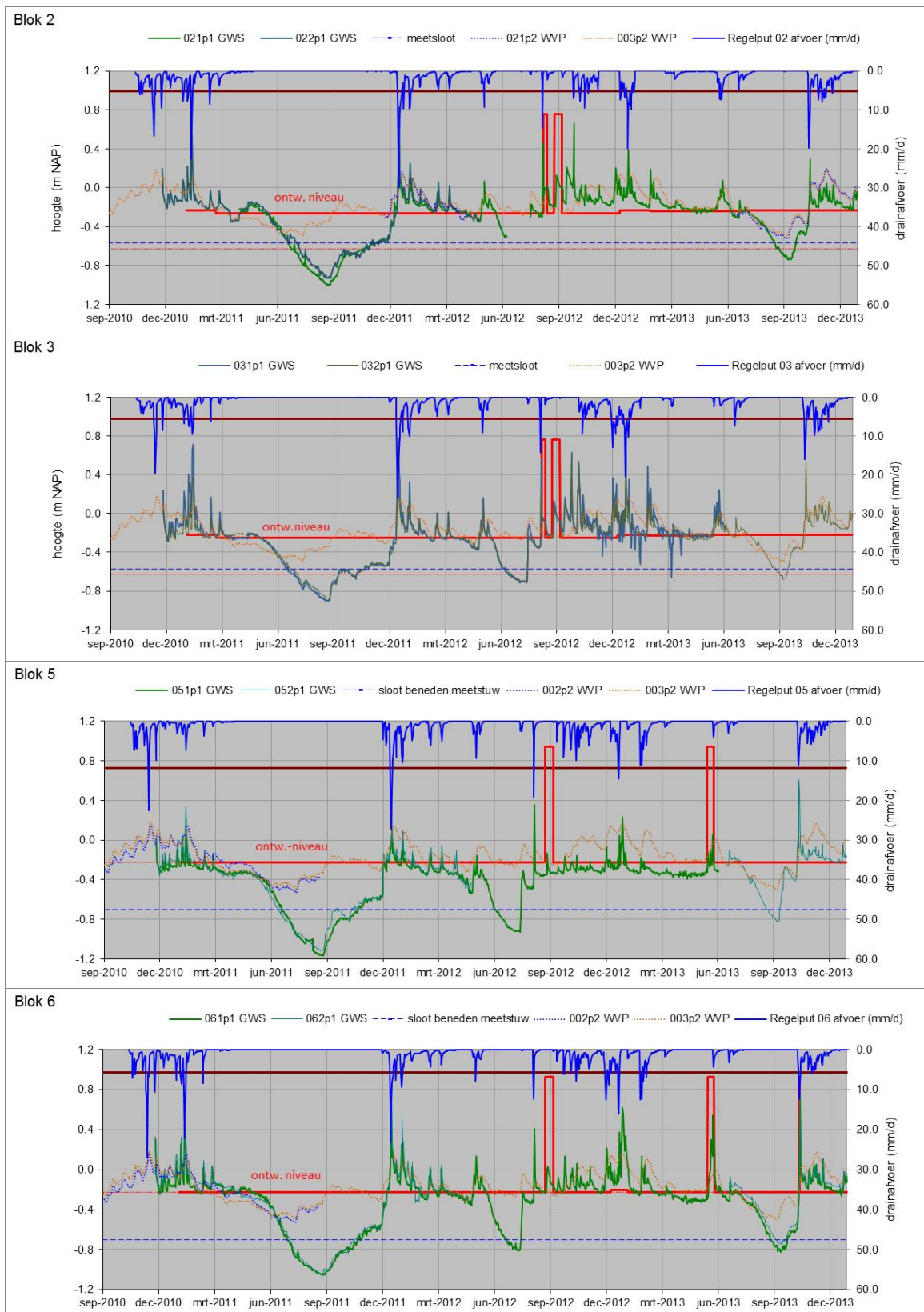
### **Nadere statistische analyse opbolling grondwaterstanden en afvoeren:**

Uit de geregistreerde grondwaterstanden (Figuur 6.1) zijn de grondwaterstanden geselecteerd die hoger waren dan het drainagepeil. In principe treedt dan ook afvoer op, wat meestal ook het geval is<sup>5</sup>. Ontbrekende waarnemingen van een van de twee meetbuizen per blok zijn aan de hand van het verband tussen beide aangevuld. Wanneer van beide buizen waarnemingen ontbreken, zijn van die datum alle waarnemingen (ook van de afvoeren) verwijderd, zodat waarnemingsreeksen goed vergelijkbaar zijn. De gegevens van blok 4 zijn niet gebruikt, omdat door de relatief hoge maaiveldligging en daarbij het relatief hoge ontwateringsniveau erg weinig water via de drains is afgevoerd. Verder zijn de waarnemingen teruggebracht tot het gemiddelde van de 4 behandelingen. In Figuur 6.2a zijn de grondwaterstanden ten opzichte van het drainageniveau en in Figuur 6.2b de afvoeren als overschrijdingsduurlijnen weergegeven.

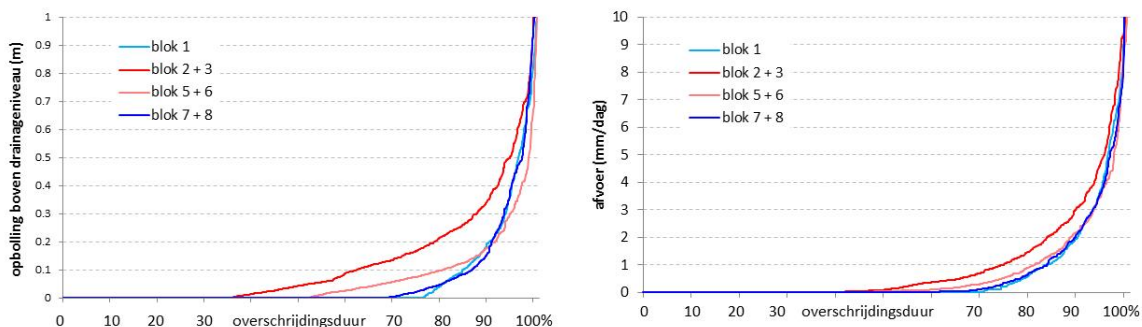
<sup>5</sup> Als de dagen waarop dat het geval is worden uitgezet tegen de afvoer, bleken de matige correlaties voor de afzonderlijke blokken ( $r^2$  van 0,20-0,35) met 0,2 toe te nemen.



**Figuur 6.1a** Gemeten grondwaterstanden (GWS), stijghoogten in watervoerend pakket (WVP) en drainafvoeren voor de proefblokken met peilgestuurde drainage. In de figuur zijn de ontwateringsniveaus en waterpeilen van beide sloten weergegeven.



**Figuur 6.1b** Gemeten grondwaterstanden (GWS), stijghoogten 1e wvp en drainafvoeren voor de proefblokken met conventionele drainage. In de figuren zijn de ontwateringsniveaus en waterpeilen van beide sloten weergegeven. Blok 5 heeft een conventioneel waterpeil van 1,2 m -mv, maar de ontwateringsbasis is door de hoge aanlegdiepte van de drains in de praktijk hoger.



**Figuur 6.2** Overschrijdingsduur van grondwaterstanden boven drainageniveau (a) en de afvoer (b) van de 4 behandeltypen. De afvoer, in het figuur tot 10 mm/dag, loopt op enkele piekmomenten op tot 25 mm/dag. De afvoercapaciteit is van alle systemen derhalve erg goed, want de maximale capaciteit van traditionele drainage wordt in het algemeen geschat op circa 14 mm/d.

De figuren 6.2a en 6.2b laten vergelijkbare sequenties zien.

- Peilgestuurde drainage met normale draindiepte (blok 1 en 4) kent de kortste periode grondwaterstanden boven maaiveld en afvoer (30% van de tijd), de snelste wisselingen in grondwaterstanden en de kleinste afvoer.
- Peilgestuurde drainage met verdiepte drains (blok 7 en 8) heeft nog steeds een korte periode grondwaterstanden boven drainageniveau en afvoer, maar deze is iets langer dan bij normale draindiepte.
- Conventionele drainage met normale draindiepte heeft langdurig waterstanden boven drainiveau en ook de tijd met afvoer is het langst (50% van de tijd).

Resumerend kan worden gesteld dat peilgestuurde drainage voor een snellere stijging en daling van hoge grondwaterstanden zorgt en een kleinere afvoer die in een kortere periode plaatsvindt dan conventionele drainage.

### Trendanalyse afvoeren 2010-eind 2013

In Figuur 6.3 staan de cumulatieve afvoeren van de blokken en het neerslagoverschot per kwartaal. Vanwege het overzicht zijn de blokken gesplitst in de zuidelijke blokken 1 t/m 4 en de noordelijke blokken 5 t/m 8.

Bij de interpretatie van deze afvoeren dient rekening te worden gehouden met de verschillen tussen de ontwateringsniveaus van de drains en de sloten. Deze zijn ten opzichte van NAP:

Sloot zuidzijde	Blok 1	Blok 2	Blok 3	Blok 4	Sloot westzijde	Blok 5	Blok 6	Blok 7	Blok 8
-0,57	-0.11	-0.26	-0.25	-0.02	-0,70	(-0,53)	-0.26	0.07	-0.01

De sloten hebben een relatief laag waterpeil en hebben daarom een drainerende werking op de aangrenzende blokken (blok 1-4 en blok 5). Blok 5 heeft in feite door de ten opzichte van maaiveld ondiepe drainbuizen een ontwateringsniveau van NAP -0,23 m ipv NAP -0,53 m.

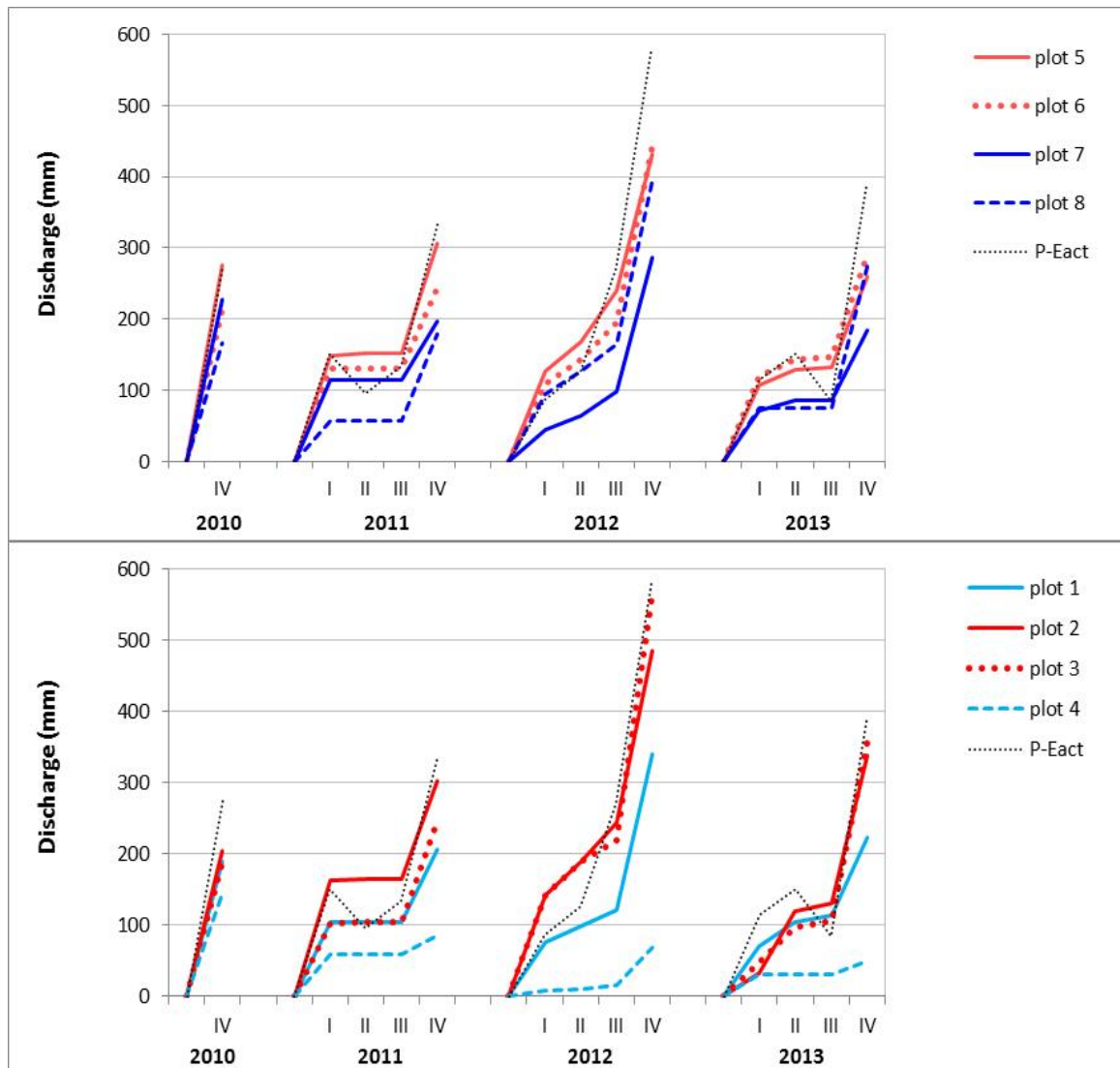
Uit de afvoerpatronen wordt het volgende afgeleid:

- Blok 4 heeft een relatief zeer lage afvoer. Dit komt waarschijnlijk omdat het ontwateringsniveau ten opzichte van blok 3 en de zuidelijke (meet)sloot relatief hoog is.
- 2011 en 2013 hadden een neerslagtekort in de zomer (kwartaal II en III) en 2012 een neerslagoverschot. In 2011 stagneerde daarbij de afvoer van alle drains, in 2013 stagneerde de afvoer alleen in de blokken 7, 8 en 4.
- Het achterblijven van de afvoer bij het neerslagoverschot duidt op wegzijging en/of een laterale, uitgaande, grondwaterflux. In 2012 was dat duidelijk het geval bij de blokken 1 en 7. Het



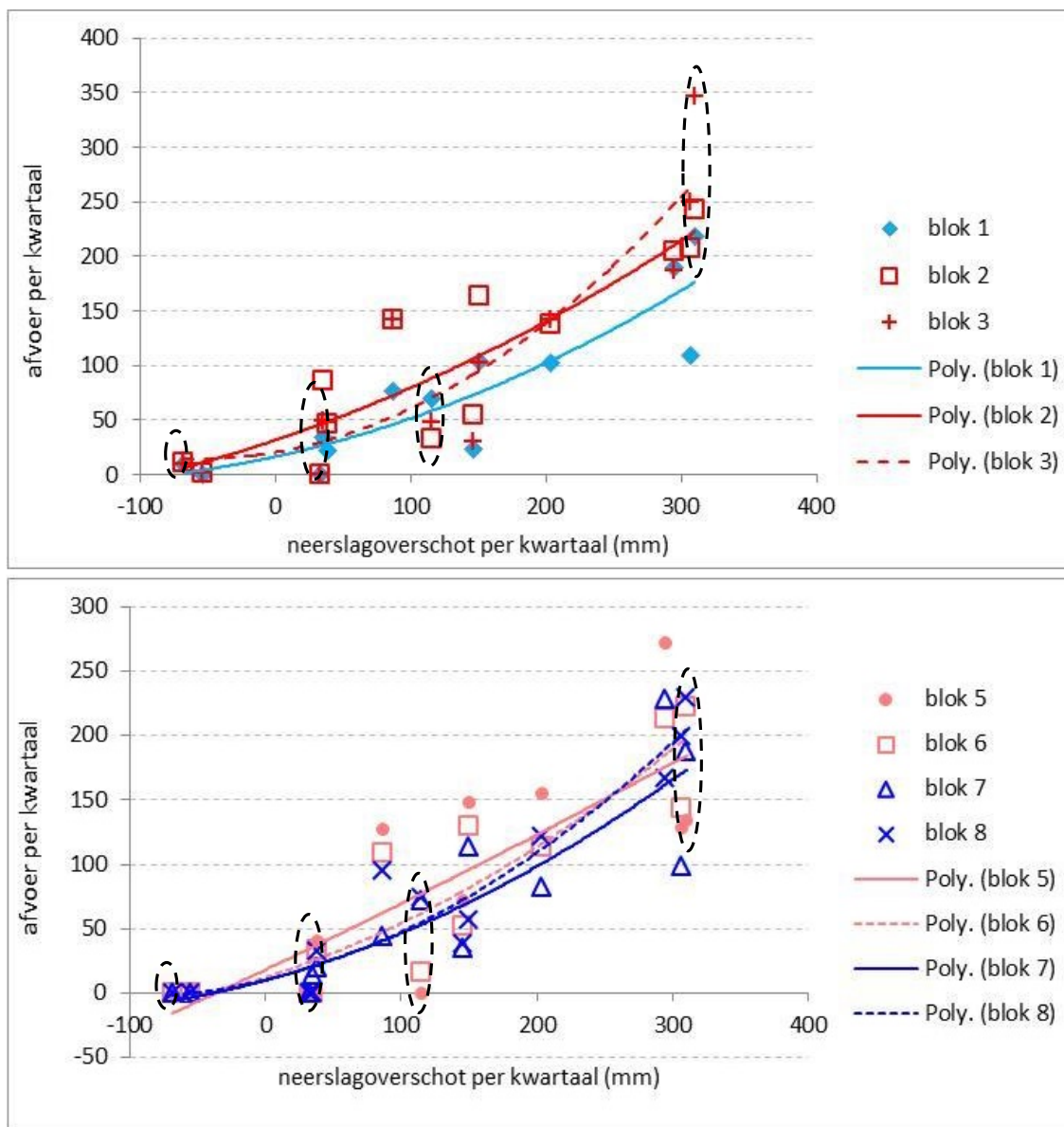
neerslagoverschot en de afvoer van de blokken 2 en 3 lopen gelijk op. Netto vindt hier weinig kwel/wegzijing en laterale stroming plaats.

- De blokken met traditionele ontwateringsniveaus geven een duidelijk hogere afvoer dan de blokken met peilgestuurde drains.
- Blokken met verdiept aangelegde drains hebben ongeveer eenzelfde drainerende werking als blokken met ondiep aangelegde drains.



**Figuur 6.3** Per kwartaal gecumuleerde neerslagoverschot en afvoeren van de 8 blokken.

In Figuur 6.4 staan de drainafvoeren per kwartaal uitgezet tegen het neerslagoverschot. Ook hier zijn de blokken 1 t/m 4 en 5 t/m 8 apart weergegeven. De kwartalen uit 2013 zijn omcirkeld. Deze metingen zijn als laatste aan de meetreeksen toegevoegd.



**Figuur 6.4** Verband tussen de kwartaalafvoeren (2010-IV t/m 2013-IV) en het neerslagoverschot. De kwartalen van 2013 zijn met de stippelijntje omcirkeld.

Het werd voor mogelijk gehouden dat de drains in de loop der tijd minder goed konden gaan functioneren. Uit Figuur 6.4 blijkt dat dat niet het geval is. De punten passen goed in de verbanden die door de regressielijnen zijn weergegeven. De afvoeren bij het neerslagoverschot van 114 mm zijn weliswaar aan de lage kant, maar bij een neerslagoverschot van 148 mm waren ze nog lager. Voor blok 4 is alleen de afvoer in het 4e kwartaal van 2010 vergelijkbaar met de andere blokken. (NB Dat niet alle punten goed op de lijn liggen, komt door verschillen in berging op de overgang van de kwartalen. Er zijn geen systematische verschillen tussen de verschillende behandelingen.)

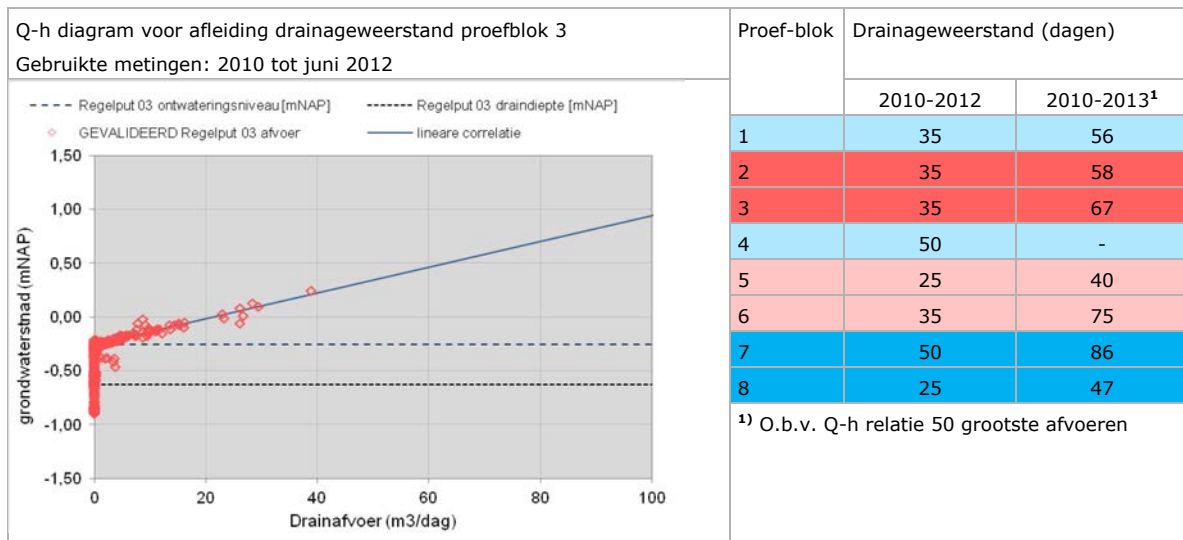
### Drainageweerstanden

Het functioneren van de drainage is ook gekwantificeerd door analyse van Q-h diagrammen. In Figuur 6.5 is voor proefblok 3 de gemeten afvoer (x-as) uitgezet tegen de gemiddelde gemeten grondwaterstanden (y-as) op dagbasis. Deze analyse is voor alle blokken uitgevoerd voor de meetperiode tot juni 2012.

Door deze punten is een regressie getrokken die snijdt met het ontwateringsniveau. De helling van deze lijn is gelijk aan de drainageweerstand. Deze weerstand blijkt vergelijkbaar voor conventionele en verdiepte percelen. Deze analyse is ook uitgevoerd voor de volledige meetperiode (tot eind december 2013). Dit geeft ongeveer dezelfde resultaten. Wel is bij deze analyse naar voren gekomen dat als, afgezien van piekafvoeren, rekening wordt gehouden met een vertraging van 1 dag, een



betere correlatie wordt verkregen tussen de opbolling en drainafvoer. Als de relatie tussen de opbolling en drainafvoer wordt afgeleid op basis van alleen de 50 grootste afvoeren, wordt een iets hogere drainageweerstand afgeleid. Uit deze analyse komt ook naar voren dat de afvoer van de dieper liggende drainbuizen iets trager op gang komt dan de ondiepe drains. Voor de modellering van blok 7 met het model SWAP is door Staarink (2014) een drainageweerstand afgeleid van 66 dagen. Dit sluit redelijk aan bij de waarde die op basis van de Q-h relaties zijn afgeleid.



**Figuur 6.5** Drainageweerstand per proefblok, afgeleid op basis van het quotiënt van de gemeten afvoer en de gemeten opbolling tussen de drains. De draindiepte (blok 2, 3, 7 en 8) blijkt niet van invloed op de hier afgeleide drainageweerstand. De kleurstelling/legenda van de proefblokken is conform Bijlage 4.

Voor landelijke geohydrologische modellen wordt uitgegaan van een drainageweerstand van 70 dagen bij ondiep aangelegde drainbuizen (110 cm -mv), terwijl daarbij voor dieper aangelegde drainbuizen een significant hogere drainageweerstand wordt ingeschat, namelijk 130 en 140 dagen bij een drainbuisdiepte van respectievelijk 140 en 150 cm -mv (Veldhuizen *et al.*, 2008). De hier afgeleide drainageweerstanden zijn daarmee vergeleken aan de lage kant en voor de diepere drainbuizen wordt niet een duidelijk grotere weerstand afgeleid. In het algemeen kan ook gesteld worden dat de drains in alle type blokken goed functioneren.

### Waterconservering

Uit de metingen van de grondwaterstanden kan direct worden afgeleid dat in de peilgestuurde blokken de grondwaterstand hoger is dan in de blokken met een traditioneel ontwateringsniveau. In de peilgestuurde blokken is de ontwateringsniveau ongeveer 30 cm hoger dan in de traditionele. Hierdoor is in de zuidelijke blokken de grondwaterstand in de peilgestuurde blokken gemiddeld ongeveer 10 cm hoger dan de traditionele en in de noordelijke blokken ongeveer 20 cm. Het verschil in de zuidelijke blokken is minder groot door de grotere drainerende invloed van de (meet)sloot.

In het modelonderzoek van Staarink (2014) komt naar voren dat de hogere grondwaterstanden weinig effect hebben op de waterbeschikbaarheid voor het gewas in droge perioden. Dit komt vooral door de bodemfysische eigenschappen van de ondiepe bodem (zavel). De vochthuishouding van deze zavelige bodems is in de uitgangssituatie (traditionele drainage) zodanig dat de vochtvoorziening van het gewas in de meeste jaren niet beperkend is. Het zavelige profiel heeft een goed waterbergend vermogen en kan ook redelijk capillair naleveren. Daarom levert peilopzet voor het gewas weinig extra waterbeschikbaarheid. In jaren met droogte kan in de orde van 5 à 10 mm extra water effectief worden vastgehouden. Met effectief wordt bedoeld dat deze 5 à 10 mm ook extra door het gewas wordt verdampt. Dit levert dan enkele procenten extra gewasopbrengst op. Bij zandige gronden is het effect van peilopzet op de waterberging en gewasopbrengst groter.

### Vraag 1: Wordt met peilgestuurde drainage extra water in de bodem vastgehouden?

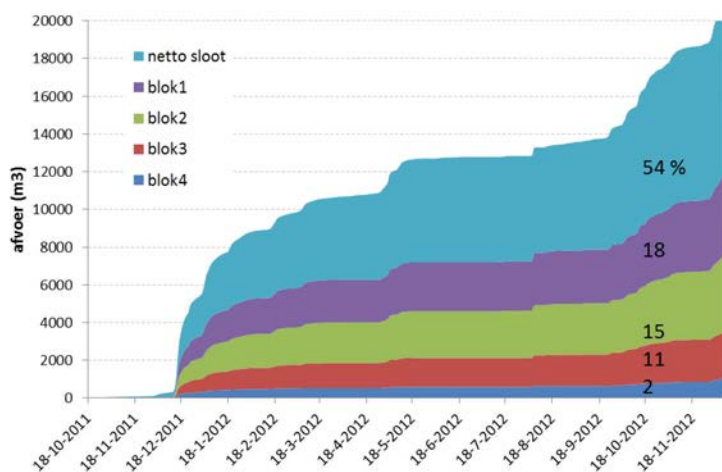
*Antwoord:* Ja. De hoeveelheid extra berging is van tijdelijke aard en geringer dan de verhoging van de ontwateringsbasis: De gedane verhoging van de ontwateringsbasis met 30 cm resulteerde in een 10 cm hogere grondwaterstand nabij de slootrand en 20 cm in de proefblokken in het midden van het perceel. Uit modelberekeningen blijkt dat de gewasverdamping weinig toeneemt, doordat ook in de uitgangssituatie de vochtvoorziening in de meeste jaren niet beperkend is. Het zavelige profiel heeft een goed waterbergend vermogen en kan ook redelijk capillair naleveren. In jaren met droogte kan in de orde van 5 à 10 mm extra water worden vastgehouden, dat effectief aan gewasverdamping kan bijdragen. Dit levert dan enkele procenten extra gewasopbrengst op.

### Vraag 2: Werken de verdiept aangelegde drains net zo goed als ondiepe drains?

*Antwoord:* Ja, want de piekgrondwaterstanden worden in alle blokken snel afgevlakt en de voor ieder proefblok experimenteel vastgestelde drainageweerstanden zijn ongeveer even groot. De diepere drains voeren wel enigszins trager het water af, zij het voldoende snel om de grondwaterstanden effectief te kunnen beheersen.

## 6.3 Waterbalansen en afvoer meetsloot

Specifiek is in de data gekeken hoe de afvoer van de meetsloot zich verhoudt tot de afvoer van de blokken die op de meetsloot afvoeren. Figuur 6.6 geeft inzicht in de aandelen van de afvoer van de blokken 1, 2, 3, en 4 op de totale afvoer van de meetsloot. De periode waarop het figuur is gebaseerd, loopt van 18 oktober 2011 tot 11 december 2012. Voor de analyse van de slootafvoer en daarvoor af te leiden waterbalansen zijn de meetgegevens na december 2012 ongeschikt geacht. Dit omdat bij enkele tussentijdse controles gebleken is dat de sensor bij de v-stuw iets in hoogte was verschoven (wellicht door slootonderhoud) en dat er in de sloot nabij de v-stuw zeer welige planten groeiden en het v-schot daardoor deels verstopt raakte.

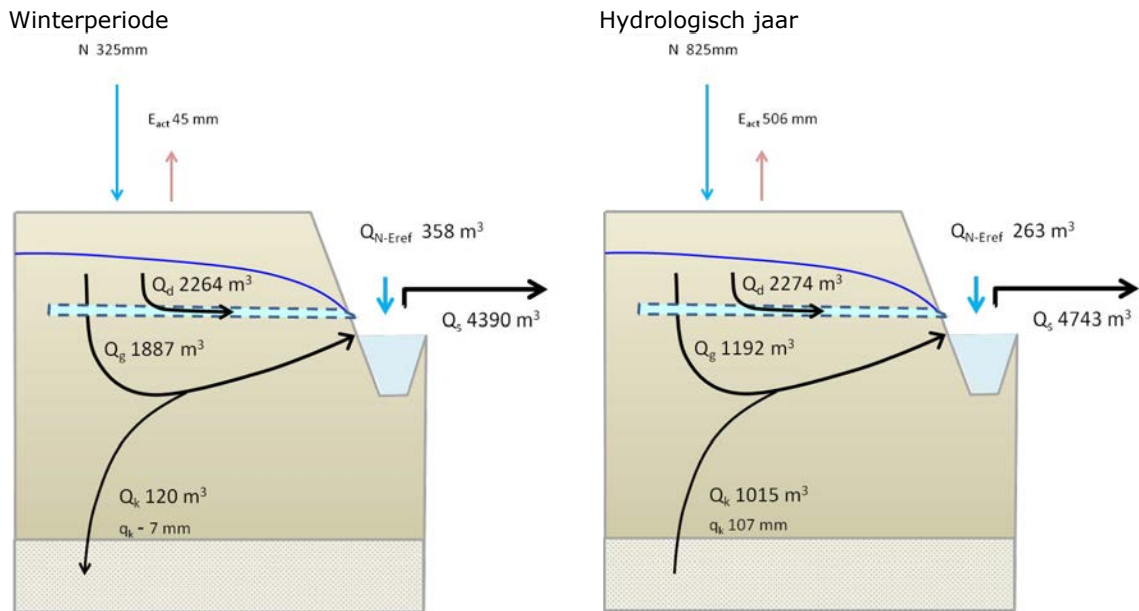


**Figuur 6.6** Cumulatieve afvoer meetsloot en het aandeel van de hierop aangesloten blokken.

De som van de afvoer van de andere blokken blijft aanzienlijk achter bij de afvoer van de meetsloot. Over de hele periode gaat het om iets minder dan de helft. Verder valt op dat in perioden waarin de blokken niet afvoeren, de sloot nog wel (wat) afvoert, bijvoorbeeld tussen 18-3-2012 en 18-4-2012. Deze hoeveelheden zijn gering, waaruit geconcludeerd kan worden dat de kwel vanuit het watervoerende pakket voornamelijk via de drains naar de sloot stroomt.

*Waterbalans drains proefblok 1-4 (18 oktober 2011 t/m 1 april 2012):*

Voor de interpretatie van de metingen is ook de waterbalans voor de drains en meetsloot opgesteld voor de afvoerperiode van 18 oktober 2011 t/m 1 april 2012 (zie rode lijnen in Figuur 6.4. In deze periode zijn de debieten en bijbehorende concentraties van zowel de meetsloot als de hierop aangesloten drains betrouwbaar gemeten. In de navolgende periode zijn de debieten van de sloot minder goed bekend door storingen in de meetapparatuur en door de welige begroeiing van oever- en waterplanten rond de meetstuw. De waterbalans van de meetsloot en de drainblokken 1-4 die erop lozen, is schematisch weergegeven in Figuur 6.7.



**Figuur 6.7** Waterbalans meetsloot voor winterperiode 18-10-2011 t/m 31-03-2012 (links) en hydrologisch jaar 01-04-2011 t/m 31-03-2012 (rechts).

Het neerslagwater op de proefblokken wordt afgevoerd via de drains en uitwisseling met ondiep grondwater. De meetsloot wordt gevoed door de drains, lateraal toestromend grondwater (ondiep grondwater + kwel) en direct neerslagoverschot.

De waterbalans van het drainblok luidt als volgt:

$$Q_d = A * [N - ET_{act} + q_g] \quad [1]$$

$$2264 \text{ m}^3 = 11640 \text{ m}^2 * [0,355 \text{ m} - 0,045 \text{ m} + 0,116 \text{ m}]$$

Met:

- $Q_d$  = drainafvoer ( $\text{m}^3$ )
- $N - ET_{act}$  = neerslag minus actuele verdamping (m)
- $q_g$  = netto flux ondiep grondwater (m)
- $A$  = afstromend oppervlak

In het navolgende wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende oppervlakken:

- $A_d$  = oppervlak drainageblokken ( $4 * 2910 \text{ m}^2 = 11640 \text{ m}^2$ )
- $A_s$  = oppervlak meetsloot ( $1470 \text{ m}^2$ )
- $A_o$  = ontwaterend oppervlak, het (nader te bepalen) gebied waarvandaan grondwater naar de meetsloot toestroomt

*Neerslag en verdamping proefperceel ( $N - ET_{act}$ ):* In de beschouwde periode viel 355 mm neerslag en de referentiegewasverdamping bedroeg 112 mm. De actuele gewasverdamping is berekend door de referentieverdamping te vermenigvuldigen met gewasfactoren voor suikerbieten, graan en

braakliggende grond (decadewaarden gewasfactoren behorende bij referentie-gewasverdamping (Hooghart 1988). Dit resulteert in een actuele verdamping van 45 mm en dus een neerslagoverschot van 310 mm.

*Drainafvoer ( $Q_d$ ):* De drainafvoer is ook direct gemeten en bedraagt 2264 m<sup>3</sup> (= 194 mm).

*Ondiep grondwater ( $q_g$ ):* Het deel van het neerslagoverschot dat niet door de drains ( $q_d$ ) wordt afgevoerd, stroomt naar het ondiepe grondwater. Over de beschouwde periode bedroeg het neerslagoverschot 310 mm en is door de drains (blok 1-4) 194 mm afgevoerd. Het deel van het neerslagoverschot dat via het grondwater wordt afgevoerd, bedraagt 116 mm.

*Bergingsverandering:* Door de opzet van deze waterbalans wordt geen bergingsverschil berekend. De grondwaterstanden zijn aan het begin 0,24 meter lager dan aan het eind van de winterperiode, zodat voor de vochtbalans van de bodem rekening moet worden gehouden met bergingsverandering. In werkelijkheid zal een deel van de 116 mm  $q_g$  niet direct worden afgevoerd, maar leiden tot stijging van de grondwaterstand en dus in de bodem worden geborgen. Als de waterbalans van het drainblok over een langjarige situatie wordt opgesteld, zal het bergingsverschil gering zijn.

*Waterbalans meetsloot (18 oktober 2011 t/m 1 april 2012)*

Zoals aangegeven, wordt de meetsloot gevoed door de drains, lateraal toestromend grondwater (ondiep grondwater + kwel) en direct neerslagoverschot. Hiervoor geldt de volgende waterbalansformule:

$$Q_s = Q_d + A_s [N - ET_{ref}] + A_g [q_g + q_k] \quad [2]$$
$$4390 = 2264 + 1470 * [0.355 - 0.112] + 16100 [0.116 \text{ m} + -0.007]$$

Met:

- $Q_s$  = debiet sloot (m<sup>3</sup>)
- $Q_d$  = debiet drains (m<sup>3</sup>)
- $A_{sloot} [N - ET_{ref}]$  = slootoppervlak (m<sup>2</sup>) \* neerslagoverschot (m)
- $A_g [q_g + q_k]$  = ontwaterend oppervlak (m<sup>2</sup>) \* [flux ondiep grondwater + flux kwel (m)]

De drainafvoer  $Q_d$  en  $q_g$  ondiep grondwater zijn bekend uit de waterbalans van proefblok 1-4. De overige termen worden hierna toegelicht.

*Slootafvoer ( $Q_s$ ):* De slootafvoer is gemeten voor de periode en bedraagt 4390 m<sup>3</sup>.

*Neerslagoverschot sloot [ $N_s - E_s$ ]<sub>direct</sub>:* Het directe neerslagoverschot bedraagt 0,244 m. Vermenigvuldigd met de slootlengte (294 m) en effectieve slootbreedte (5 m) = 358 m<sup>3</sup>.

*Kwel ( $q_k$ ):* De kwel kan berekend worden op basis van de gemeten stijghoogteverschillen tussen het watervoerende pakket (6 m -mv) en het freatische grondwater en de deklaagweerstand ( $q_k = dH/c$ ). De deklaagweerstand bedraagt volgens REGIS in de omgeving 150 à 400 dagen; volgens het grondwatermodel van de provincie Zeeland bedraagt deze in de omgeving 160 dagen. Conform een waterbalansstudie op nabijgelegen percelen van de Rusthoeve (Eertwegh 1999) is een deklaagweerstand aangehouden van 300 dagen. Voor de beschouwde periode levert dit een kwelflux op van -7 mm. Er is in deze winterperiode dus gemiddeld sprake van enige wegzijging.

*Ontwaterend oppervlak ( $A_g$ ):* Nu het debiet van de sloot, drains, neerslagoverschot van de sloot, de grondwaterflux en kwel bekend is, resteert één onbekende term in de waterbalans, namelijk het oppervlak waarover het grondwater en de kwel naar de meetsloot wordt afgevoerd. Invulling van alle bekende termen in de waterbalans levert een afvoerend oppervlak van 16100 m<sup>2</sup>.

Ter controle is het oppervlak, waarover het grondwater en de kwel naar een sloot worden afgevoerd, ook geschat door voor het hele perceel de dichtstbijzijnde waterloop te bepalen. Dit levert een afvoerend oppervlak naar de meetsloot van circa 2,6 ha, dat grotendeels blok 1 t/m 4 omvat en een klein deel van blok 6. Met de waterbalans is dus een kleiner afvoerend oppervlak geschat dan verwacht mag worden op basis van de configuratie van de proef. Verschillen zijn mogelijk veroorzaakt

---

doordat de meetsloot een hoger peil heeft, iets smaller en minder geschoond is (hogere intreeweerstand) dan de westelijke sloot. Daarnaast kan variatie in bodemopbouw e.d. ook een rol spelen. Deze schatting van het afvoerend oppervlak is redelijk in overeenstemming met hetgeen op basis van de configuratie van de proef kan worden verwacht.

*Evaluatie waterbalans en laterale grondwaterstroming ( $q_g$ ):* Uit deze waterbalans volgt dat de aangelegde drains meer dan de helft van het neerslagoverschot in blok 1-4 afvoeren naar de meetsloot (194 mm) en dat de rest naar het grondwater infiltreert en via de bodem naar het oppervlaktewater wordt afgevoerd (125 mm). Deze laterale grondwaterstroming wordt waarschijnlijk sterk gedreven door het stijghoogteverschil tussen het freatische grondwater en het oppervlaktewaterpeil. Analyse van de aanvoertermen op dagbasis bevestigt een sterke correlatie tussen de laterale grondwaterafvoer en het verschil tussen de grondwaterstand en het slootpeil.

*Waterbalans hydrologisch jaar 01 april 2011 t/m 01 april 2012*

In Figuur 6.7 is ook de waterbalans weergegeven voor het hydrologisch jaar 01 april 2011 t/m 01 april 2012. De balansposten zijn op vergelijkbare wijze geschat als voor de winterperiode, waarbij het volgende wordt opgemerkt:

- De neerslag is identiek aan het langjarige gemiddelde 1981-2010 (= 825 mm), maar door de hogere verdamping (647 mm i.p.v. gemiddeld 610) was deze periode 37 mm droger dan gemiddeld. Bovendien viel in het voorjaar en zomer relatief weinig neerslag en later in het jaar juist meer.
- De grondwaterstanden aan het eind en begin van de waterbalansperiode zijn nagenoeg gelijk. Hierdoor mag met meer zekerheid worden aangenomen dat eventuele bergingsveranderingen in de onverzadigde zone verwaarloosbaar zijn.
- Voor de periode t/m 18 oktober 2012 is de slootafvoer wegens een defect aan de meetapparatuur geschat op basis van correlatie met freatische grondwaterstanden, zoals weergegeven in Figuur 6.5. De afvoermetingen worden daarom minder betrouwbaar geacht.

Belangrijk verschil in de resultaten is dat gedurende het hydrologische jaar netto kwel optreedt door de uitzakkende freatische grondwaterstanden, terwijl in de wintermaanden sprake is van netto-wegzijing. Overigens kan in de winterpraktijk ter plaatse van de sloot nog wel kwel optreden onder invloed van het lagere slootpeil.

Het afvoerend oppervlak is met 0,8 ha minder in lijn met het oppervlak van 2,6 ha dat is geschat op basis van de configuratie van de proef. In paragraaf 6.9 wordt een chloridebalans opgesteld, ook om meer zekerheid te krijgen over de waterfluxen.

Vraag 3: Welk aandeel van het neerslagoverschot wordt via de drains afgevoerd?

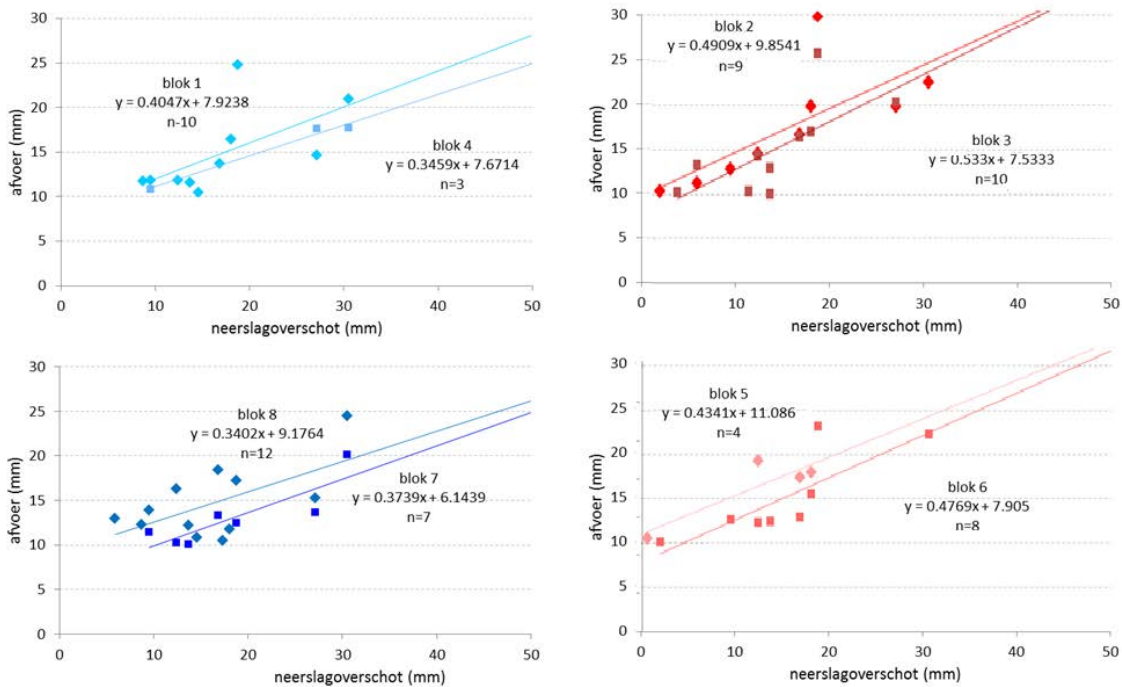
*Antwoord:* De drains voeren in het winterhalfjaar twee derde (65%) van het neerslagoverschot af. De rest infiltreert naar het diepere grondwater en wordt lateraal afgevoerd naar de meetsloot. De meetsloot heeft door het lage slootpeil dus een sterk drainerende werking op het grondwater van de aangrenzende blokken 1-4.

Vraag 4: Welke aandeel van de slootafvoer is afkomstig uit drains?

*Antwoord:* De slootafvoer bestaat voor bijna de helft (50%) uit drainafvoer. Het water in de meetsloot bestaat naast drainafvoer vooral uit laterale ondiepe grondwaterstroming en voor een klein deel uit directe neerslag en zoute kwel.

### Nadere analyse piekafvoeren

Een sterke toename van de af- en uitspoeling van stoffen vindt vaak plaats onder bijzondere omstandigheden, zoals erg grote afvoeren na extreme neerslaghoeveelheden. In Figuur 6.8 staan de afvoeren die in de meetperiode groter waren dan 10 mm/dag, uitgezet tegen het neerslagoverschot op die dag<sup>6</sup>.



**Figuur 6.8** Verband tussen neerslagoverschot en grote afvoeren (> 10 mm/dag).

**Tabel 6.1**

Reconstructie afvoeren in mm tijdens de extreem natte periode 11-15 oktober 2013

Neerslag overschot	Blok 1	Blok 2	Blok 3	Blok 4	Blok 5	Blok 6	Blok 7	Blok 8
101 mm	80 mm	99 mm	91 mm	42 mm	99 mm	88 mm	68 mm	80 mm

Bij deze analyse zijn blok 4 en 5 weinig representatief. Blok 4 voert namelijk door de relatief hoge ligging relatief weinig drainwater af en blok 5 heeft door de hoge drainbuisdiepte in feite een ruim 20 cm hoger ontwateringspeil dan het bedoelde conventionele peil. Bovendien functioneren in blok 5 nog enkele delen van oude dieper liggende drains omdat deze bij het graven van de nieuwe drainsleuven niet kapot zijn gereden.

Afgezien hiervan blijkt uit de regressieanalyse dat piekafvoeren bij de traditionele blokken groter zijn dan de peilgestuurde (grotere offset en helling). Verder lijkt het dat de blokken met de traditionele ontwateringsdiepte wel minder vaak (minder dagen) piekafvoeren van meer dan 10 mm vertonen. De regressievergelijkingen uit Figuur 6.8 zijn gebruikt om een schatting te geven van de afvoer die plaats heeft gevonden tijdens de extreem natte periode van 11-15 oktober 2013. In 5 dagen tijd is toen 100 mm neerslag gevallen en zijn grote delen van het perceel, met name blok 0, 1 en 5, blank komen te staan en van blok 6 was de regelput door een niet goed werkende pomp volgelopen. In Tabel 6.1 staan de (op basis van de regressie) berekende afvoeren. Wat opvalt, is dat

<sup>6</sup> Bij erg lage afvoeren is een vertraging van 1 dag aantoonbaar voordat afvoer op gang komt, bij natte omstandigheden blijkt dit niet het geval.

---

van de blokken met het normale drainagepeil (2, 3, 5 en 6) – die dus de grootste buffercapaciteit hebben – de afvoer dicht in buurt komt van het neerslagoverschot. De afvoer van de andere blokken is wat lager.

Vraag 5: Nemen door peilsturing de piekafvoeren naar het oppervlaktewatersysteem af?

*Antwoord:* Ja, de blokken met traditioneel peil geven de hoogste piekafvoeren, maar het lijkt er ook op dat deze minder vaak een piekafvoer van meer dan 10 mm vertonen.

## 6.4 Waterkwaliteitspatronen

Het doel van de veldproef op de Rusthoeve is om de effecten van peilgestuurde diepe drainage op nutriëntenbelasting van het omliggende oppervlaktewater en zoute kwel in beeld te brengen. Hiertoe zijn metingen uitgevoerd van de kwaliteit van het grondwater op verschillende diepteniveaus alsmede het drainagewater en het water in de meetsloot. Ook is het grondwater geanalyseerd op stikstofisotopen. In het navolgende wordt een overzicht gegeven van gemeten waterkwaliteitspatronen en de zoet-zoutverdeling. Hierna worden enkele processen behandeld die van belang zijn bij de interpretatie, waaronder stikstofisotopen (denitrificatie), redox (drainverstopping) en preferente stroming. Tot slot worden fluxen en stofbalansen afgeleid voor stikstof en chloride om de effecten van verschillende behandelingen te kwantificeren.

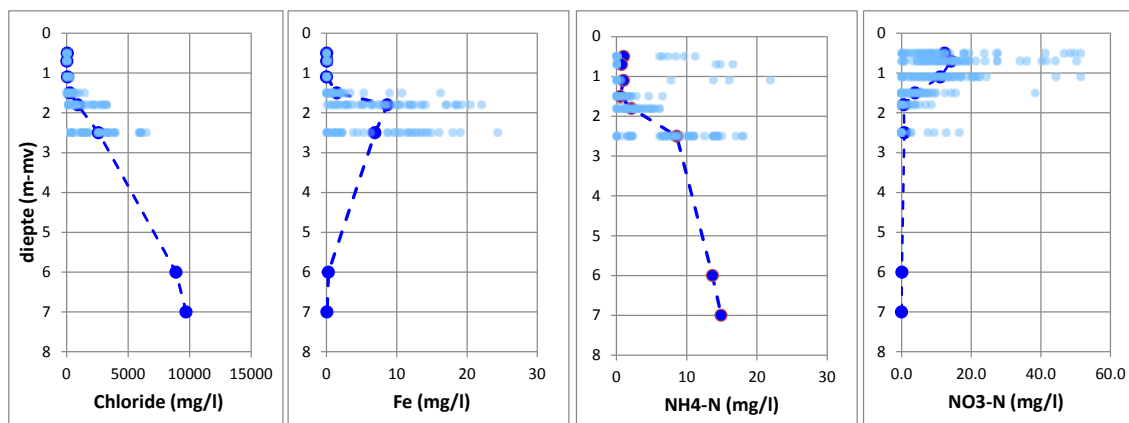
### **Samenstelling bodemvocht, ondiep en diep grondwater**

De kwaliteit van het bodemvocht en bovenste grondwater is gemeten door poreuze cups in de blokken. In 4 blokken zijn cups geplaatst op 6 dieptes: 0,5 / 0,7 / 1,1 / 1,5 / 1,8 en 2,5 m –mv. Deze zijn periodiek bemonsterd en in het laboratorium geanalyseerd op het volgende pakket: chloride, sulfaat, nitraat, fosfaat, totaal fosfor, anorganisch koolstof, totaal koolstof, ammonium, totaal stikstof, natrium, kalium, calcium, magnesium, ijzer, mangaan en aluminium. Ook is tweemaal het analysepakket uitgebreid met zware metalen (arseen, cadmium, chroom, koper, nikkel, lood en zink). Het diepe grondwater in het eerste watervoerende pakket is gemeten in de peilbuisfilters onder de deklaag op een diepte van 6-7 m –mv.

In Bijlage 1 zijn enkele algemene figuren van de dataset opgenomen die de correlaties weergegeven van in het veld en lab gemeten geleidbaarheid (EGV) en tussen de EGV, chloride, anorganisch koolstof en natrium. Hieruit blijkt dat de in het veld gemeten geleidbaarheid (EGV) goed overeenkomt met de EGV-bepaling in het laboratorium van dezelfde watermonsters. Ook is, zoals kan worden verwacht, een goede correlatie tussen het chloridegehalte en de geleidbaarheid.

Voor enkele kenmerkende parameters zijn de gemeten concentraties weergegeven tegen de diepte in Figuur 6.9. Het gemiddelde per diepteniveau is in de figuur donkerblauw aangegeven.





**Figuur 6.9** Gemeten concentraties grondwater (cups en peilbuisfilters) uitgezet tegen de diepte. De stippellijn geeft per diepteniveau de gemiddelde concentraties. De peilbuisfilters op 2 m diepte zijn niet in de figuur opgenomen, omdat deze door de lengte van het filter (0,5 m) minder representatief zijn dan de cups rond deze diepte.

Uit Figuur 6.9 blijkt dat chloride en ammonium toenemen met de diepte, terwijl nitraat met de diepte afneemt. Dit is in overeenstemming met de geohydrologische situatie en bijbehorende algemene geochemische patronen. Op 6 m diepte begint het watervoerende pakket. Het grondwater hierin is zout en gereduceerd (geen nitraat). Bovenin is juist het tegenovergestelde het geval, het bovenste grondwater is oxisch (zuurstof en nitraat aanwezig) en door de neerslag zoet. Op enige diepte verdwijnt nitraat door reductie. Gelet op de ijzergehalten ligt het redoxfront waarbij nitraat wordt afgebroken op een diepte rond 1½ à 2 m -mv.

De overige waterkwaliteitsmetingen van het bodemvocht staan samengevat in Tabel 6.2. Ter vergelijking is ook de kwaliteit van het grondwater in het eerste watervoerende pakket weergegeven. De kwaliteit per afzonderlijke blok is opgenomen in Bijlage 1 (Tabel B1.1 en B1.2)

**Tabel 6.2**

*Waterkwaliteit bodemvocht en dieper grondwater, gemiddeld per diepteniveau. De concentraties zijn gemiddeld over de gehele meetperiode (september 2010 tot juni 2013).*

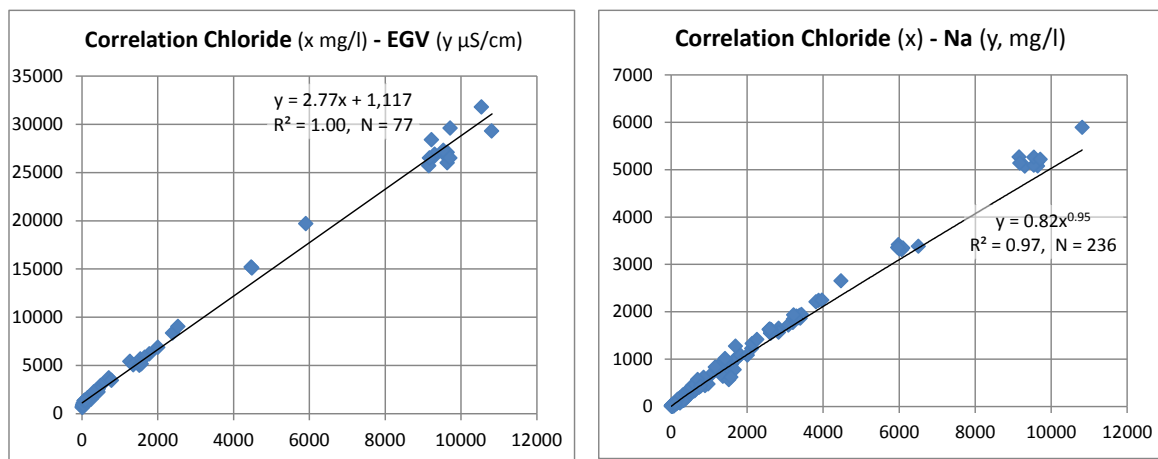
Diepte m-mv	Aantal monsters	Cl mg/l	NO3-N mg/l	NH4-N mg/l	P-PO4 mg/l	IC mg/l	S mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Fe mg/l	d15 N vs. Air
0.5	50	53	12.4	1.0	0.02	60	27	24	3	142	7	0.0	18
0.7	63	28	14.2	0.7	0.02	69	26	23	2	158	7	0.0	20
1.1	62	69	11.1	1.0	0.04	87	32	43	4	172	12	0.0	14
1.5	65	261	3.9	0.6	0.32	112	35	157	14	182	30	1.5	19
1.8	67	906	0.6	2.1	1.90	176	24	536	36	193	86	8.7	18
2.5	65	2596	0.8	8.6	5.56	290	11	1511	75	221	213	6.9	14
6 en 7	16	8992	0	13.8	3.6	285	289	4983	171	353	635	0.2	15

De chloridemetingen geven aan dat de invloed van de zoute kwel goed zichtbaar is tot 2 à 2,5 m -mv. Op het traject rond de draandiepte (1,1 à 2,5 m -mv) zijn de verschillen in de kwaliteit groot, zowel in tijd als van plaats tot plaats. Uit de metingen komen geen patronen naar voren die wijzen op invloed van de 4 verschillende drainageconfiguraties. Uit deze metingen kan verder worden afgeleid dat naast de chloridegehalten ook andere voor diep grondwater te relateren parameters (IC, ammonium, natrium, kalium, magnesium) sterk toenemen in de diepte. De zoet-zoutpatronen zijn verder uitgewerkt in paragraaf 6.5.

Figuur 6.10 toont enkele duidelijke correlaties tussen kwaliteitsparameters. De chloridegehalten blijken, zoals verwacht, sterk gecorreleerd met het geleidingsvermogen. Als de parameters per blok afzonderlijk worden beschouwd, is de correlatie vergelijkbaar. Chloride blijkt ook opvallend sterk gecorreleerd met natrium. Dit bevestigt de invloed van het mariene (NaCl) type diepe grondwater dat



vanuit het watervoerende pakket door de kweldruk met name in de zomer in de deklaag opwelt. De correlatie met calcium is dan ook zeer gering.

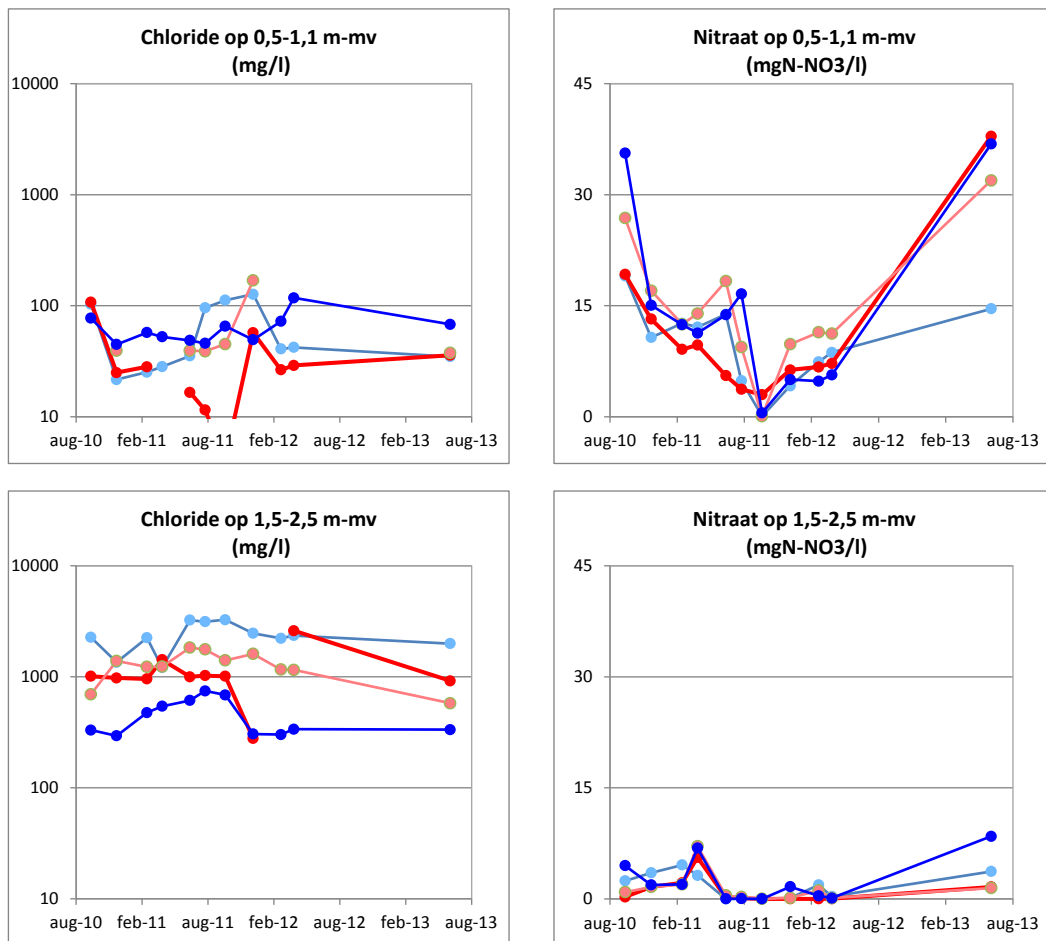


**Figuur 6.10** Correlaties tussen chloride, geleidbaarheid (EGV) en natrium in het bodemvocht. Trends en fluctuaties in waterkwaliteit bodemvocht

De concentraties nutriënten in het grondwater worden door diverse factoren beïnvloed, waaronder fluctuaties in N-/P-overschotten door bemesting en oogst. Voor het onderzoek is het ook belangrijk om na te gaan of de aanleg van de drainage van invloed is op de metingen en of er al een stabiele eindsituatie is ontstaan. Zoals eerder aangegeven, is de chemische samenstelling van het bodemvocht in plot 1, 3, 6 en 7 gemeten door op vaste locaties (2 per plot) watermonsters te nemen uit poreuze cups die op verschillende dieptes waren ingegraven (0,5/0,7/1,1/1,5/1,8/2,5 m -mv). De belangrijkste trends in de waterkwaliteit van het poriewater komen tot uitdrukking voor chloride en nitraat. Figuur 6.11 geeft hiervan het verloop in de tijd. Per bemonsteringsdatum is steeds het gemiddelde weergegeven voor 2 dieptetrajecten: 0,5-1,1 en 1,5-2,5 m -mv.

Dat de concentraties van nitraat in het tweede meetjaar veel lager zijn, komt mede doordat het N-overschot (bemesting + atmosferische depositie minus gewasopname) in het tweede meetjaar erg gering was; veel van het stikstof is immers opgenomen en afgevoerd door het gewas (suikerbieten). Mogelijk is er bij de aanleg van drainage meer stikstof vrijgekomen dan bij reguliere grondbewerking door menging met diepere bodemlagen onder de bouwvoor. In het laatste meetjaar zijn de nitraatconcentraties weer sterk toegenomen, omdat in dat voorjaar relatief veel mest is toegepast.

De zoutgehalten vertonen een duidelijke seizoenfluctuatie. Ze nemen gedurende de winter geleidelijk af en in de zomer toe. Dit kan goed verklaard worden door het patroon van de kwel vanuit het eerste watervoerende pakket (zomers kwel, in de winter wegzijging, zie Figuur 6.1). Afgezien van de seizoenfluctuaties is geen trend in de tijd over de gehele meetperiode zichtbaar.



**Figuur 6.11** Trends in gemeten concentratie ondiepe (0,5-1,1 m) en diepe (1,5-2,5 m) cups.

### Samenstelling drainagewater

De resultaten van de in het laboratorium gemeten drainwaterkwaliteit zijn weergegeven in Tabel 6.3 en Figuur 6.12 – 6.13. Hierbij zijn de volgende bewerkingen uitgevoerd:

- In Tabel 6.3 zijn alleen de metingen meegenomen in de berekening van gemiddelden als in de betreffende put afvoer is gemeten. Dit omdat in perioden zonder afvoer het water soms lang in de put bleef staan en daar chemische reacties konden plaatsvinden.
- In de periode oktober 2013 tot december 2013 is in 4 van de 8 putten hoogfrequent de kwaliteit gemeten. Deze zijn niet meegenomen bij de berekening van de gemiddelden, omdat deze periode dan voor de helft van de putten onevenredig zwaar zou meewegen.
- In Figuur 6.12 zijn ook de naar afvoer gemiddelde concentraties weergegeven. Deze zijn in navolging van vergelijkbare wetenschappelijke studies aangeduid als 'Flow Weighted Mean Concentrations' (FWMC).
- Figuur 6.13 toont voor chloride en nitraat het verloop van de concentraties in de tijd.

Bij de interpretatie moet worden bedacht dat blok 4 en 5 minder representatief zijn dan hun duplo's (blok 1 en 6); blok 4 omdat door de relatief hoge ligging de drains erg weinig water hebben afgevoerd en blok 5 door de ten opzichte van maaiveld hoge ligging van de drains en het feit dat hier niet alle oude drains onklaar waren gemaakt.

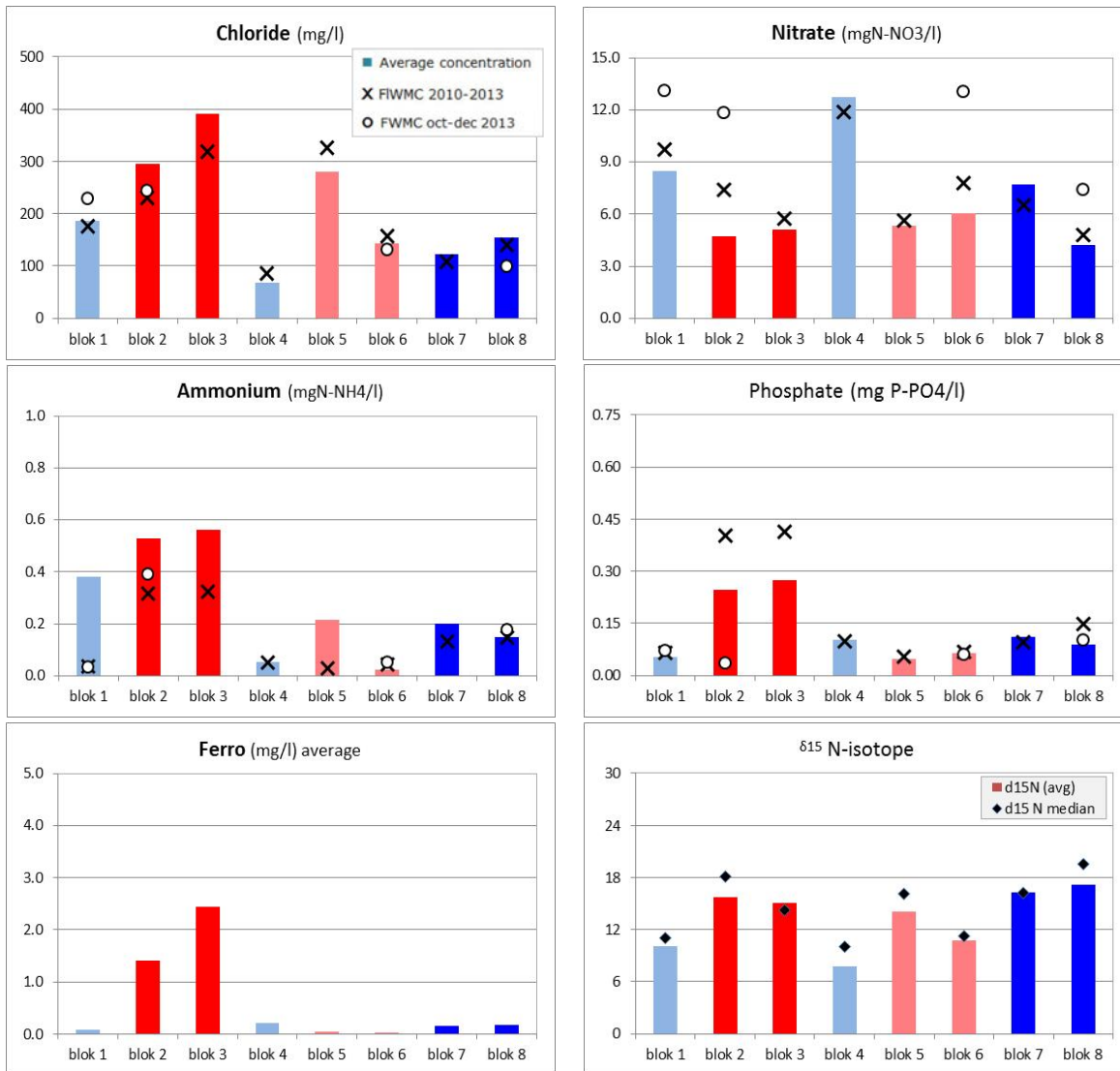
Tabel 6.3

Waterkwaliteit drainagewater regelputten en meetsloot. De concentraties zijn gemiddeld over de gehele meetperiode (september 2010 tot december 2013). De sporemetalen zijn opgenomen in Bijlage 1 (Tabel B1.3).

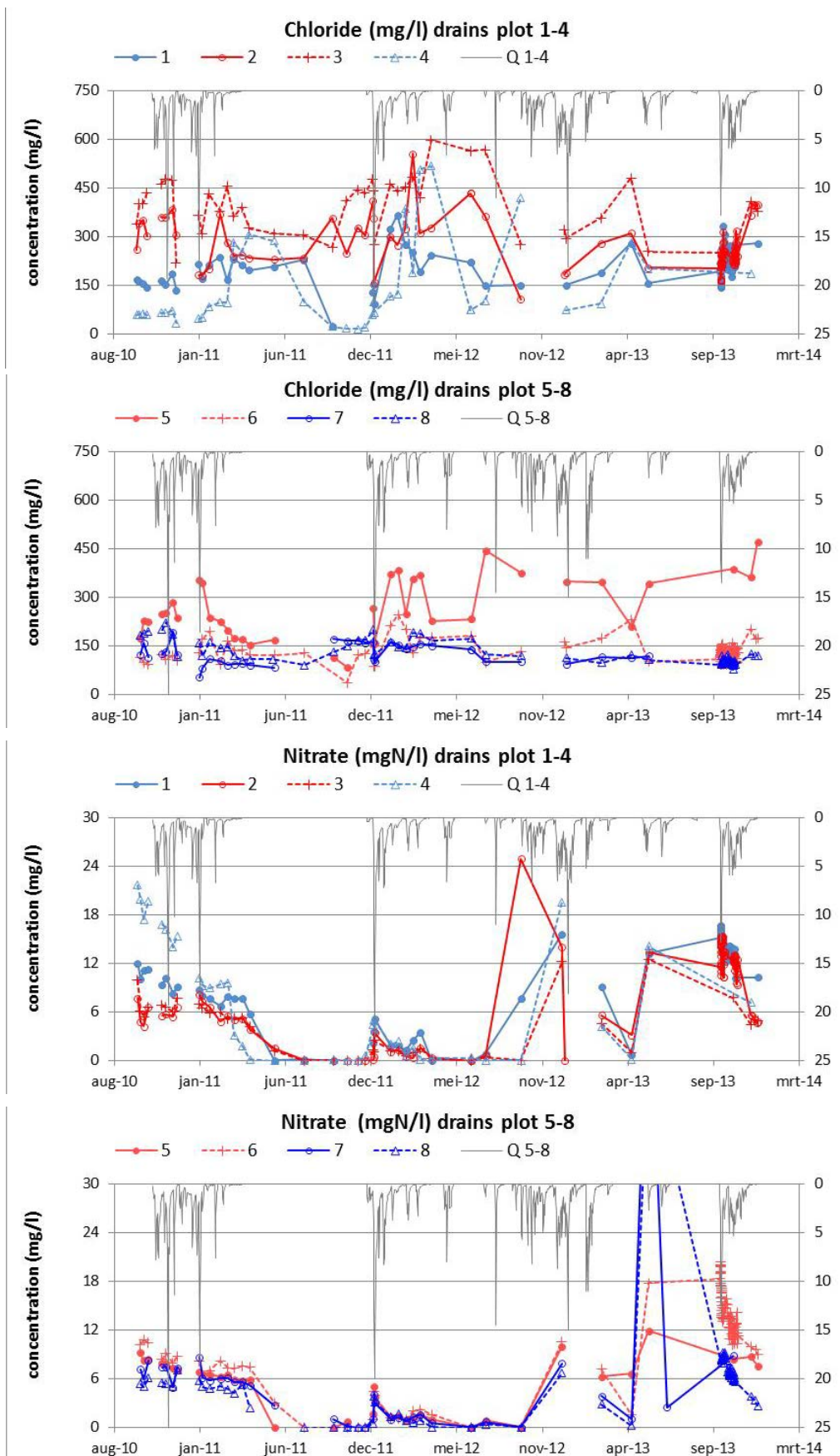
Drain blok	Aantal monsters	Cl mg/l	NO <sub>3</sub> -N mg/l	NH <sub>4</sub> -N mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l	IC mg/l	S mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Fe mg/l	d15 N vs. Air
1	20	187	8.5	0.4	0.05	120	18	91	5	193	14	0.1	10
2	30	296	4.7	0.5	0.25	131	33	166	10	223	25	1.4	16
3	30	391	5.1	0.6	0.27	135	25	216	11	206	27	2.4	15
4	13	67	12.7	0.1	0.10	108	22	34	4	180	8	0.2	8
5	28	280	5.3	0.2	0.05	120	12	137	6	177	17	0.0	14
6	25	143	6.1	0.0	0.06	124	13	89	6	208	14	0.0	11
7	20	122	7.7	0.2	0.11	118	19	66	6	194	14	0.2	16
8	20	155	4.2	0.2	0.09	122	9	95	8	165	16	0.2	17
Sloot	38	897	1.9	0.1	0.1	129	20	535	19.7	193	73	9.4	11

Uit Tabel 6.3 blijkt dat het drainagewater meestal vrij zoet is, kalkrijk (hoog calcium en alkaliteit) en vrij lage gehalten bevat aan fosfaat en fosfor. Stikstof komt zowel voor in de vorm van nitraat als ammonium, hoewel het aandeel ammonium gemiddeld gezien vrij klein is. Bij toenemende zoutgehalten neemt het aandeel ammonium sterk toe. De gehalten variëren sterk, hetgeen enerzijds verklaard kan worden door de grote verschillen in de zoutgehalten in het traject van 1 tot 6 m -mv. Een heel kleine verschuiving in de diepte van het zoutfront levert al snel relatief grote verschillen rond het niveau van de drains. Anderzijds kunnen de verschillen komen doordat het enige tijd duurt voordat de veroorzakende processen in evenwicht zijn met de nieuwe situatie. Er kunnen echter geen duidelijke trends voor het verloop van de gehalten in de meetperiode (2010 t/m 2013) worden afgeleid.

De laatste kolom geeft de verhouding weer van de N15-stikstof zoals gemeten in het drainwater-isotoop ten opzichte van stikstof in de lucht. Bekend is dat door denitrificatie deze verhouding toeneemt, omdat micro-organismen die betrokken zijn bij denitrificatie relatief weinig N15 omzetten. Het resterende nitraat dat niet is afgebroken, is dan relatief zwaar. De diepere drains hebben een hogere N15-verhouding, hetgeen erop duidt dat hier meer denitrificatie heeft plaatsgevonden. Dit wordt verder beschreven in paragraaf 6.6.



**Figuur 6.12** Concentraties drainagewater september 2010 tot december 2013: gemiddelden en naar afvoer gewogen gemiddelden (FWMC). Voor ijzer en d15N zijn geen vrachten en dus geen FWMD berekend.



**Figuur 6.13** Verloop chloride- en nitraatconcentraties in de tijd. De som van de afvoer van de blokken in op de tweede y-as weergegeven (m<sup>3</sup>/d).

---

Uit Figuur 6.12 komt duidelijk het effect van de behandelingen op de concentraties naar voren. Ten opzichte van de conventionele drains (blok 6) hebben de blokken met eenzelfde ontwateringspeil maar diepere drains (blok 2-3), hogere chloride-, ammonium-, opgelost ijzer- en fosfaatgehalten en een lager nitraatgehalte. De drains met een verhoogd ontwateringspeil en diepere drains (blok 7-8) hebben ten opzichte van de blokken met eenzelfde ontwateringspeil maar ondiepe drains, een duidelijk lager nitraatgehalte, een wat hoger fosfaat- en ijzergehalte en een duidelijk hogere dN15-verhouding.

De dieper gelegen drains (blok 2, 3, 7 en 8) hebben de laagste nitraatgehalten en tegelijk ook hogere ammonium-, fosfaat-, ijzer- en arseengehalten dan de ondiepe drains. Dit duidt op een beperkte invloed van zoute kwel en gereduceerde condities. De oxidatie van dit ijzer in de regelputten van diepe drains laat een duidelijk zichtbare roestkleur achter op de wanden van de regelput. De hogere 15N-verhouding in de diepe drains is een aanwijzing dat in het door deze drains afgevoerde grondwater meer nitraat door denitrificatie is afgebroken dan het water dat door de ondiepe drains wordt afgevoerd. Overigens zijn de verschillen tussen de blokken voor redoxafhankelijke stoffen in het eerste uitspoelingsseizoen (winter 2010/2011) minder duidelijk zichtbaar dan in de periode daarna. De metingen die vanaf het najaar van 2012 tot het eind van de meetperiode zijn uitgevoerd (eind 2013), bevestigen het beeld dat in de voorafgaande meetperiode is verkregen.

In de ondiep gelegen drains (blok 1, 4, 5 en 6) wordt zoeter grondwater met hogere nitraatgehalten afgevoerd. Van de sporenmatalen worden met name van zink, en in mindere mate lood, hogere gehalten aangetroffen. Dit duidt op jonger grondwater en een beperktere denitrificatie dan in de diepe drains. De verschillen zijn met name duidelijk wanneer we blok 1-4 en blok 5-8 alleen onderling vergelijken. Hierbij moet bedacht worden dat het zoute kwelwater dat ter plaatse van blok 1-4 al voor aanvang van de proef dichter aan maaiveld reikte dan in blok 5-8.

Door het hogere ontwateringsniveau in de peilgestuurde drains (blok 1, 4, 7 en 8) wordt zoeter grondwater afgevoerd (iets lager chloridegehalte) dan in de drains met het traditionele ontwateringsniveau. Dit lijkt ook logisch, ervan uitgaande dat het neerslagwater wat langer wordt vastgehouden en aldus meer zoet water in de deklaag wordt geborgen.

Voor stikstof is zoals aangegeven een duidelijke trend in de tijd waarneembaar; in de eerste winterperiode zijn vrij hoge nitraatgehalten gemeten met ook vrij hoge pieken. In de tweede winterperiode zijn de concentraties beduidend lager en afgevlakt en in het derde meetjaar nemen deze weer sterk toe door de hogere bemesting. Dit patroon is in overeenstemming met de kwaliteit van het bodemvocht (Tabel 6.2). In grote lijnen komt in de nitraatmetingen een sterke relatie naar voren met het bemestingsniveau, het gewas en het resulterende bodemoverschot. Voor het eerste meetjaar is mogelijk ook de intensieve grondbewerking bij de aanleg van de drains van invloed geweest, omdat dit ertoe kan hebben geleid dat het aanwezige organisch gebonden stikstof versneld is omgezet in anorganisch stikstof.

Eind mei 2013 zijn 2 weken nadat kunstmest is uitgereden zeer hoge nitraatgehalten gemeten in het drainwater van blok 7 en 8 (respectievelijk 54 en 45 mgN-NO<sub>3</sub>/l). In het drainagewater van de overige blokken was het nitraatgehalte tussen de 12 en 18 mgN-NO<sub>3</sub>/l. Alle blokken voerden eind mei drainagewater af. Nadere controle van deze uitschieters wijzen niet op een fout in de chemische analyse, want de gehalten zijn in overeenstemming met de totaalstikstofmetingen. Er zijn verder geen aanwijzingen voor deze twee uitschieters. Een mogelijke verklaring is dat het te maken zou hebben gehad met de toediening van de kunstmest, bijvoorbeeld als korrels onbedoeld direct in de regelput terecht zijn gekomen.

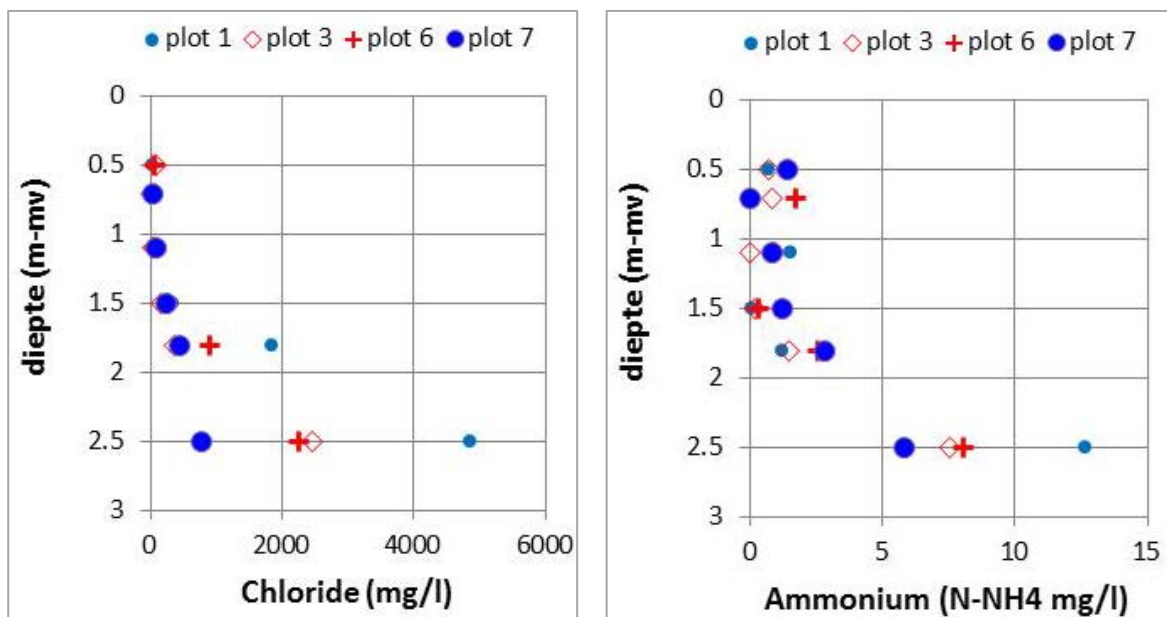
## 6.5 Zoet-zoutpatronen

Het verdiept aanleggen van drains leidt in theorie tot een dikkere zoetwaterlens en daarmee een lager risico op verzilting van de wortelzone. De kortere afstand tussen drain en watervoerend pakket geeft een lagere bodemweerstand, waardoor het zoutgehalte in de drainafvoer toeneemt. Een verhoogde ontwateringsbasis kan ertoe leiden dat de zoute kwel naar de drains afneemt. De vraag is wat de effecten op de zoet-zoutverdeling zijn als verdiepte aanleg van drains wordt gecombineerd met een verhoogde ontwateringsbasis.

### Dikte zoetwaterlens

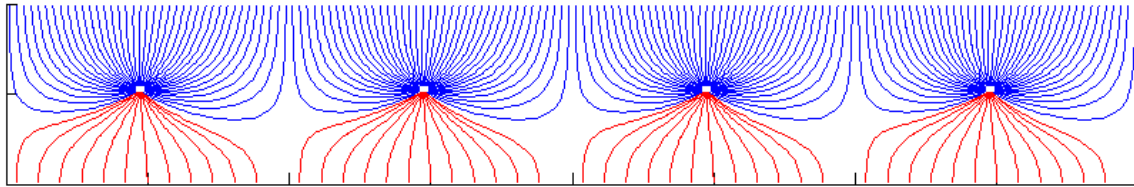
De chloridegehalten en ammonium in het ondiepe grondwater zijn in Figuur 6.14 weergegeven met de diepte. Er is te zien hoe het chloridegehalte en ammonium in de bovenste 1,0 m constant zijn. Dieper dan 1,5 m -mv neemt het zoutgehalte toe met de diepte. Het chloridegehalte in het watervoerend pakket (6 m -mv) bedraagt zelfs 9500 mg/l; dit komt overeen met het zoutgehalte van 50% verdund zeewater. Ook voor ammonium is een sterke toename met de diepte waar te nemen; met name onder draindiepte.

De chloridegehalten in cups zijn op draindiepte lager dan de chloridegehalten in de drains. De ondiepe drains (blok 1 en 6) hebben in de winterperiode een gemiddeld chloridegehalte van 195 mg/l, terwijl het chloridegehalte in de cups op 1,1 m -mv (de draindiepte) hier 145 mg/l is. Dit zelfde geldt voor de diepe drains (296 mg/l in de drains en 185 mg/l in cups op 1,5 m -mv). Blijkbaar vormt zich tussen de drains een iets dikkere zoetwaterlens dan ter plaatse van de drains en trekken de drains door menging een kleine hoeveelheid zout kwelwater aan. Dit is overeenkomstig de waarnemingen van Van Staveren & Veldstra (2011) en een theoretische stromingsbeeld voor situaties met zwakke kwel dat in Figuur 6.15 is weergegeven.



**Figuur 6.14** Diepteprofiel chloride en ammonium gehalten in de bodemvocht.





**Figuur 6.15** Stromingsbeeld van neerslag (blauwe lijnen) en zwakke zoute kwel (rode lijnen). De zoute kwel blijft gemiddeld gezien onder drainniveau, maar vormt een soort vingers richting de drains.

Geconcludeerd wordt dat op de percelen een duidelijke zoetwaterlens aanwezig is en dat de overgangszone naar zouter grondwater begint op ongeveer 1,8 m –mv.

Peilsturing leidt mogelijk tot een reductie in verzilting van de wortelzone. Door de extra waterberging aan het begin van het groeiseizoen treedt in droge perioden minder capillaire nalevering van zouter grondwater uit diepere lagen op. Of de dikte van deze zoetwaterlens wordt beïnvloed door de behandelingen kan niet direct uit de metingen van het bodemvocht worden afgeleid. De theorie dat peilopzet leidt tot een dikkere zoetwaterlens en daarmee de zoute kwel terugdringt, wordt verder getest in hoofdstuk 7 (modellering drainafvoer en waterkwaliteit).

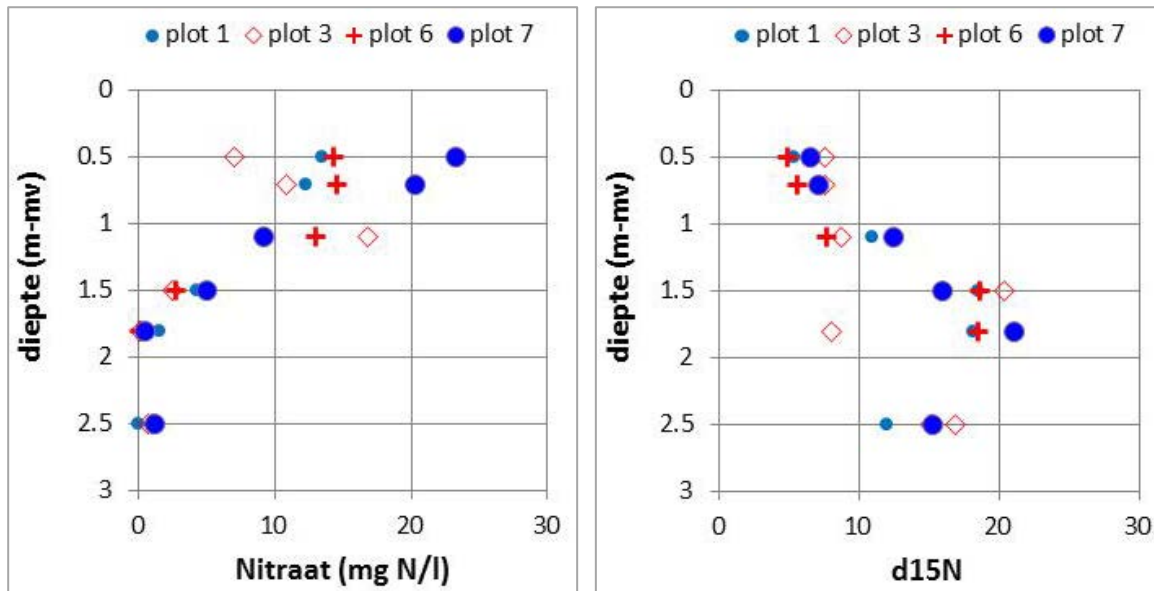
Om meer inzicht te verkrijgen in variaties in de drainwaterkwaliteit tijdens piekafvoeren en het effect van diepere drains op de zout-zoutpatronen, zijn in het najaar van 2013 hoogfrequent watermonsters genomen met automatische bemonsteringsapparatuur (zogenaamde ISCO's) bij regelput 1, 2, 6 en 8 en zijn 2 optische nitraatsensoren bijgeplaatst in put 6 en 8. Ook is aansluitend een modelonderzoek uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn apart weergegeven in paragraaf 6.8.

## 6.6 Denitrificatie en stikstofisotopen (vraag 6)

Om inzicht te verkrijgen in de bronnen van stikstof en het optreden van denitrificatie, zijn metingen verricht aan stikstofisotopen. Hierbij wordt gebruikgemaakt van de natuurlijke verhouding van de stikstofisotopen  $^{14}\text{N}$  en  $^{15}\text{N}$ . In Bijlage 3 staat meer achtergrondinformatie over deze zogenoemde natural abundance-methode.

### *Toename $\delta^{15}\text{N}$ met diepte*

De isotopenverhouding in het ondiepe grondwater is in Figuur 6.16 weergegeven als promillage relatief naar de  $^{14}/^{15}\text{N}$  in atmosferische  $\text{N}_2$ . Metingen tijdens de vorstperiode (2012) zijn niet meegenomen, omdat gedurende strenge vorstperioden bodemaggregaten worden 'opengebrouwen' door het uitzettende ijs. Hierbij komt stikstof vrij die nog niet is beïnvloed door biologische processen en dus een relatief hoge  $\delta^{15}\text{N}$ -waarde heeft.

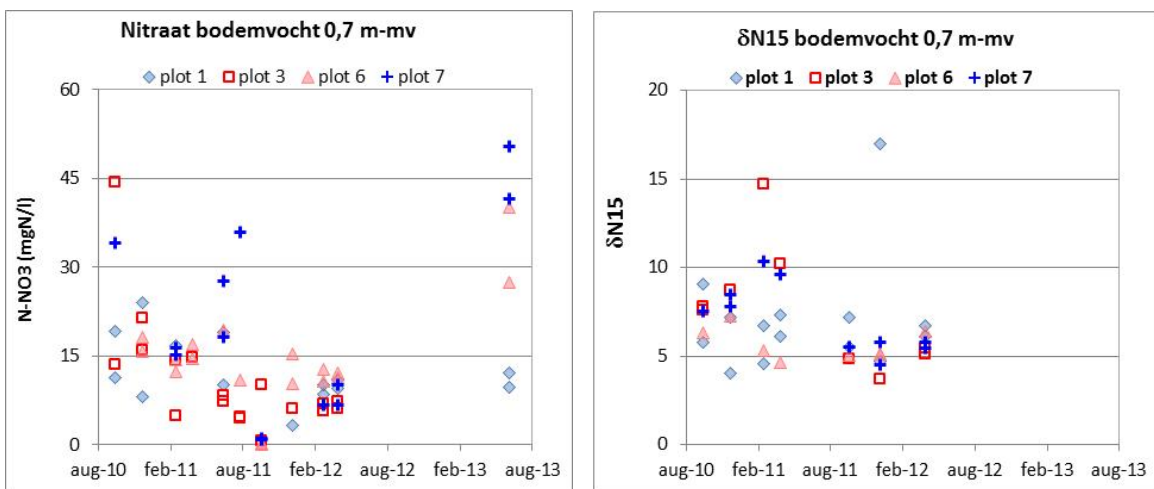


**Figuur 6.16** Verloop van  $\delta^{15}\text{N}$  en  $\text{NO}_3^-$  gedurende de periode september 2010 tot december 2011.

Uit Figuur 6.16 blijkt duidelijk dat nitraat sterk met de diepte afneemt, terwijl  $\delta^{15}\text{N}$  juist met de diepte toeneemt. Vanaf 1,8 m -mv is nog nauwelijks nitraat in het bodemvocht aanwezig is. De toename van  $\delta^{15}\text{N}$ , vooral in combinatie met de afnemende nitraatgehaltes, duidt op het optreden van een biologisch afbraakproces. Immers, micro-organismen die  $\text{NO}_3^-$  afbreken, hebben een voorkeur voor de opname van  $^{14}\text{N}$ . Bij omzetting neemt het aandeel van het zwaardere isotoop  $^{15}\text{N}$  toe. Geconcludeerd kan worden dat nitraat onder invloed van microbiële processen in de bodem wordt afgebroken en dat deze denitrificatie vooral plaatsvindt tussen de 1,5 en 1,8 m -mv.

#### Herkomst nitraat bovenste grondwater

In Figuur 6.17 is het verloop aangegeven van nitraatgehaltes en stikstofisotopen in het bodemvocht op 0,7 m -mv. Deze metingen zijn representatief voor het grondwater dat naar de verzadigde (anaerobe) zone wegzijgt. Uit de figuur blijkt dat de  $\text{NO}_3^-$  concentraties het hoogst zijn in de maanden augustus en september. In de zomer wordt het perceel bemest en treedt nitrificatie op onder invloed van de hogere temperaturen. In de winter nemen de nitraatgehaltes af door verdunning met jong hemelwater en denitrificatie.



**Figuur 6.17** Nitraatconcentraties (links) en stikstofisotopen (rechts) in ondiep grondwater. Per proefblok zijn de metingen in 2 afzonderlijke cups weergegeven op een diepte van 0,7 m -mv.

De  $\delta^{15}\text{N}$ -waarden zijn opvallend constant, zowel ruimtelijk als in de loop van de tijd. De vrij constante waarden geven aan dat de relatieve bijdragen van verschillende type bronnen, zoals kunstmest, nitrificatie en atmosferische depositie, vermoedelijk redelijk constant zijn in ruimte en tijd. De nitraatconcentraties en daarmee de belasting van het ondiepste grondwater vertonen veel meer variatie.

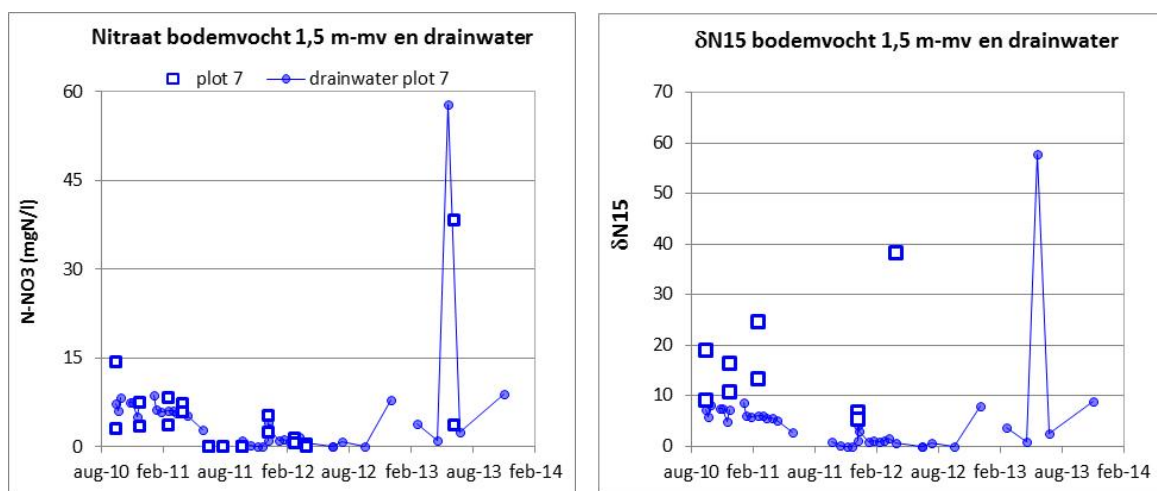
Wat ook opvalt is, zoals eerder gesignaleerd, de schommeling van de nitraatgehalten in de tijd; hoge waarden in het meetjaar 2010/ 2011, relatief lage in de winter van 2011/2012 en weer hoge waarden in juni 2013. De hoge waarden in het eerste meetjaar komen waarschijnlijk door een sterke toename van nitrificatie van organische stikstof door omwoelen en oxidatie van de bodem bij aanleg van de drainage. De hoge waarden in 2013 komen voort uit de hogere mestgiften in dat voorjaar.

Tot slot is geen duidelijk effect waarneembaar van de blokken op de  $\text{NO}_3$ -gehalten en  $^{14/15}\text{N}$ -belasting van het ondiepe grondwater. Bij een hoger ontwateringspeil zijn de omstandigheden in principe gunstiger voor denitrificatie (hogere grondwaterstanden). Het verloop van de nitraatgehalten in de tijd en de ruimtelijke verschillen zijn echter dusdanig groot dat dit effect tussen de blokken niet in de metingen van het bodemvocht waarneembaar is.

#### Denitrificatie op draindiepte

In Figuur 6.18 is het verloop van nitraat en de stikstofisotopen van het grondwater op draindiepte weergegeven. De aanleg van drainage is in het eerste meetjaar ook op grotere diepte terug te zien. In zowel drains als cups op draindiepte zijn verhoudingsgewijs hoge nitraatgehalten gemeten met een gemiddelde van 7 mg-N/l. Bovendien is de verhouding  $\delta^{15}\text{N} / \text{NO}_3$  (= 2,5) relatief laag. Blijkbaar trad maar beperkte aanreiking van  $^{15}\text{N}$ -isotopen op door nitrificatie- en denitrificatieprocessen.

In het tweede meetjaar 2011/2012 zijn de nitraatgehalten in de drains en in cups op draindiepte beduidend lager (gemiddeld 2 mg-N/l) en neemt de verhouding  $\delta^{15}\text{N} / \text{NO}_3$  toe van 2,5 naar 10. Dit duidt op een toename van denitrificatie en verklaart, in combinatie met de lagere  $\text{NO}_3$ -belasting van het bovenste grondwater (zie Figuur 6.17 en Bijlage 3), de afgenomen nitraatgehalten op draindiepte. In het derde meetjaar zijn geen isotopenmetingen verricht. Zoals eerder vermeld, is eind mei een opvallend hoog nitraatgehalte gemeten in het drainagewater. Kort daarna is ook een erg hoog nitraatgehalte in het bodemvocht op 1,5 m diepte gemeten. Half mei is kunstmest uitgereden en kort daarna is het gaan regenen. Dit heeft dus tot deze hoge nitraatconcentraties geleid.



**Figuur 6.18** Nitraatconcentraties (links) en stikstofisotopen (rechts) in grondwater op draindiepte (cups 1,5 m -mv) en in drains voor proefblok 7.

### Invloed drainagetype

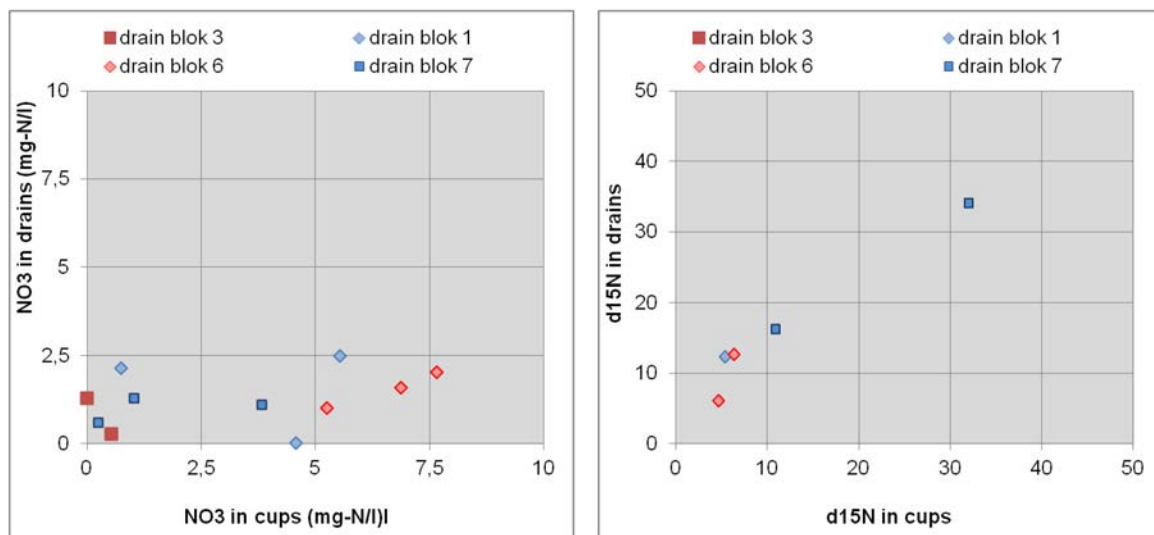
In Figuur 6.12 waren al de nitraatconcentraties en stikstofisotopen in het drainagewater per blok weergegeven. Hieruit komt duidelijk het effect van de draindiepte op het drainwater tot uitdrukking; de blokken met de diepe drains hebben namelijk lagere nitraatgehalten en hogere  $\delta^{15}\text{N}$ -waarden. Dit geeft aan dat bij diepe drains meer denitrificatie plaatsvindt dan bij de ondiepe drains. Dit vertaalt zich in lagere nitraatgehalten. De verklaring voor de verschillen in drainwatersamenstelling ligt in de denitrificatie die optreedt in het dieptetraject tussen de ondiepe en diepe drains. Dit is terug te zien in Figuur 6.17, waar de nitraatgehalten op de diepteligging van ondiepe drains (1,1 m –mv) duidelijk hoger zijn dan op de diepteligging van diepe drains (1,5 m –mv). Voor  $\delta^{15}\text{N}$  is een omgekeerde trend waargenomen.

### Preferente stroming

Bij preferente stroming stroomt water via goed doorlatende delen van de bodem versneld vanaf maaiveld naar de drains. In droge perioden kunnen zelfs in zware klei kleischeuren ontstaan waardoor het water nog sneller de drains bereikt.

In Figuur 6.19 zijn de nitraat- en  $\delta^{15}\text{N}$ -gehalten in de drains vergeleken met de cups op draindiepte. De cups zijn representatief voor de grondwatersamenstelling midden tussen de drains. Hieruit blijkt dat de nitraatgehalten in de cups beduidend lager zijn dan de drains. Terwijl de  $\delta^{15}\text{N}$  waarden juist hoger zijn in de drains. Dit kan goed verklaard worden door het stromingsbeeld zoals schematisch is weergegeven in Figuur 6.14. Nabij de cups is hoofdzakelijk sprake van verticale stroming. Voordat dit water onder invloed van neerslag uittreedt bij de drains, zal het nog wat dieper door het bodemprofiel stromen en daar nog meer dan op 1,5 m diepte onder invloed komen van denitrificatie. Ook kan in de drainagebuizen zelf nog denitrificatie plaatsvinden, met name als hier organisch materiaal is gekomen en het water lang in de drains blijft staan.

Geconcludeerd wordt dat er geen significante N-uitspoeling is waargenomen door preferente stroming of kortsluitstroming.



**Figuur 6.19** Scatterplot van nitraat (links) en  $\delta^{15}\text{N}$  (rechts) in drains versus cups op draindiepte. De cups zijn geselecteerd overeenkomstig de draindiepte: in blok 1 en 6 zijn dat de cups op 1,1 m –mv en in blok 3 en 7 1,5 m –mv). De figuur toont alleen meetdata in de afvoerperiode 2011/2012. De kleurstelling/legenda van de proefblokken is conform Bijlage 4.

### Conclusie denitrificatieprocessen

Geconcludeerd wordt dat denitrificatie kan optreden in het volledige bodemprofiel. Dieper aangelegde drains hebben lagere nitraatgehalten dan ondiepe drains doordat extra denitrificatie optreedt in het dieptetraject tussen 1,1 en 1,5 m –mv. Peilsturing heeft geen meetbare invloed op denitrificatie en nitraatgehalten in het drainwater.

---

Vraag 6: Welke effecten heeft peilgestuurde diepe drainage op de kwaliteit van het grondwater?

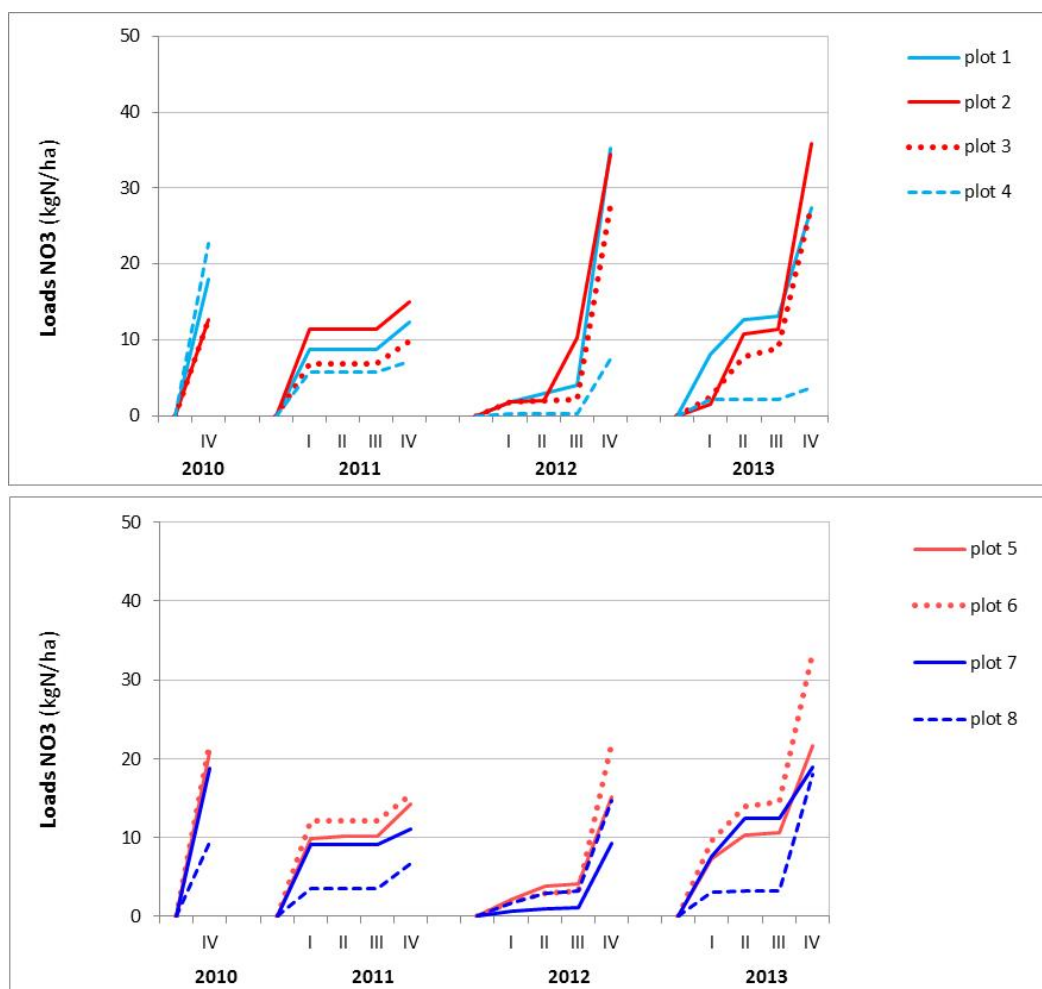
*Antwoord:* Uit analyse van de meetgegevens kan worden geconcludeerd dat aanleg van peilgestuurde diepe drains ten opzichte van traditionele drains ertoe leidt dat meer nitraat wordt afgebroken en dat zout kwelwater door het hogere ontwateringsniveau minder omhoog komt. Dit effect is waarschijnlijk sterk afhankelijk van de geohydrologische situatie (dikte en weerstand deklaag, kwel/wegzijing, aanwezigheid drainerende watergangen).

Met aanvullend (model)onderzoek kan voorspeld worden of en waar dit gunstige effect in andere gebieden zal optreden. Hiervoor zijn dan wel gegevens noodzakelijk over de geohydrologische opbouw, de drainagesituatie en natuurlijk de fysische en chemische samenstelling van de bodem (tot circa 2 m).

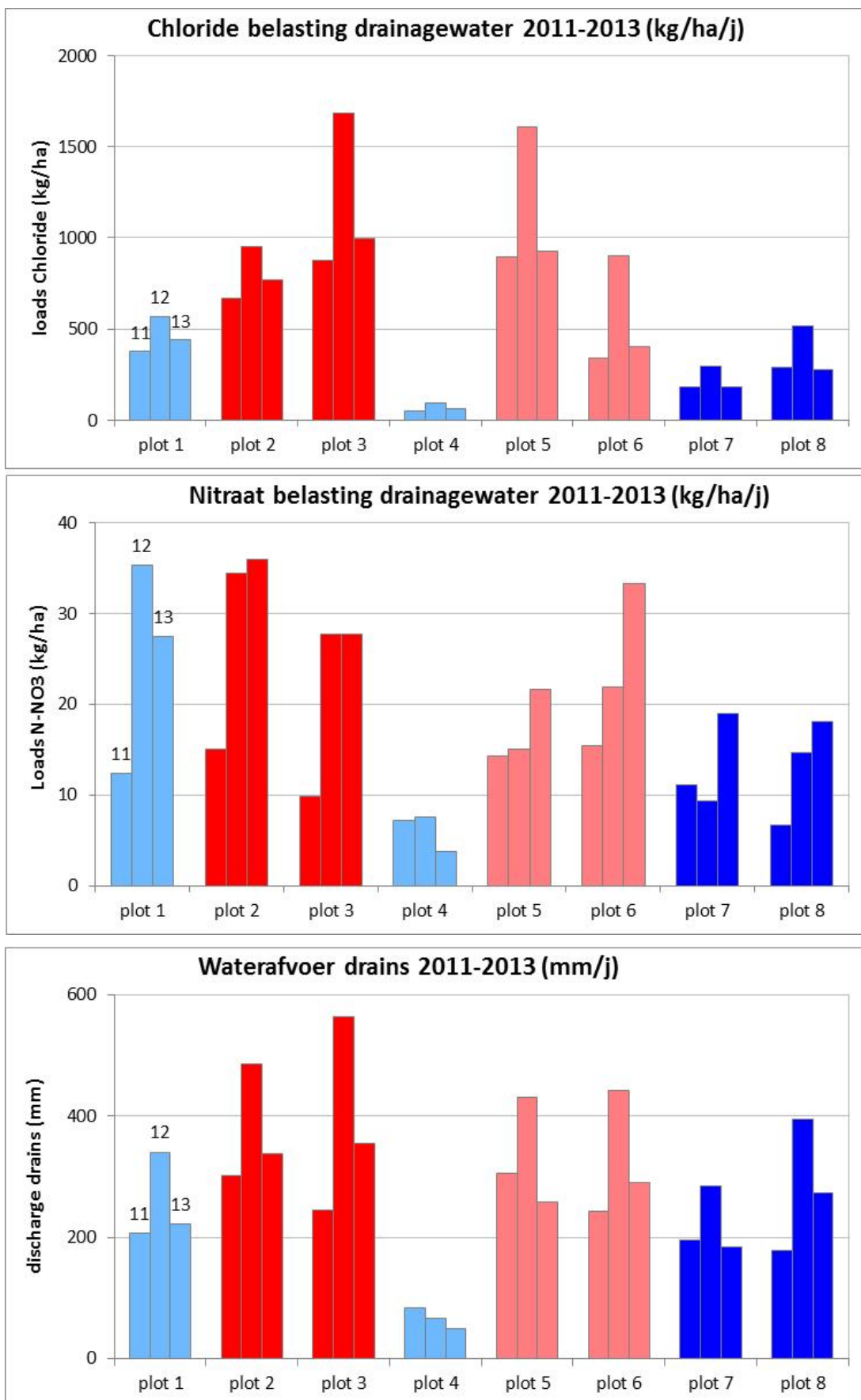
## 6.7 Emissies per type drainagesysteem (vraag 7 en 8)

Om te kunnen zien welk type behandeling het oppervlaktewater meer/minder met nutriënten belast, zijn vrachtberekeningen uitgevoerd. Zoals in hoofdstuk 4 is aangegeven, zijn de meetreeksen van de labanalyses op dagbasis aangevuld met behulp van de ion-selectieve sensormetingen. Voor de sensoren zijn hiertoe de reeksen eerst zodanig gecorrigeerd dat ze op de tijdstippen dat ook een watermonster is genomen, de waarden overeenkomen met de betreffende labanalyse. Vervolgens is per meetreeks voor zowel chloride als nitraat nauwgezet gekeken in hoeverre tussen 2 labanalyses de meetreeks continu gemaakt kan worden met de meetwaarden van de sensor of dat teruggegrepen moet worden op lineaire interpolatie. De zodanig continu gemaakte meetreeksen zijn opgenomen in de opgeleverde database (Excel).

Met de op dagbasis continu gemaakte meetreeksen voor afvoer en concentraties zijn de vrachten berekend voor de gehele meetperiode. De resultaten hiervan zijn voor nitraat cumulatief, steeds beginnend vanaf het uitspoelseizoen, weergegeven in Figuur 6.20. De totale chloride- en stikstofvrachten voor de 3 genoemde perioden (winter-zomer-winter) zijn weergegeven in Figuur 6.21. In Figuur 6.22 zijn op eenzelfde wijze de naar afvoer gewogen concentraties weergegeven (vracht/debiet).

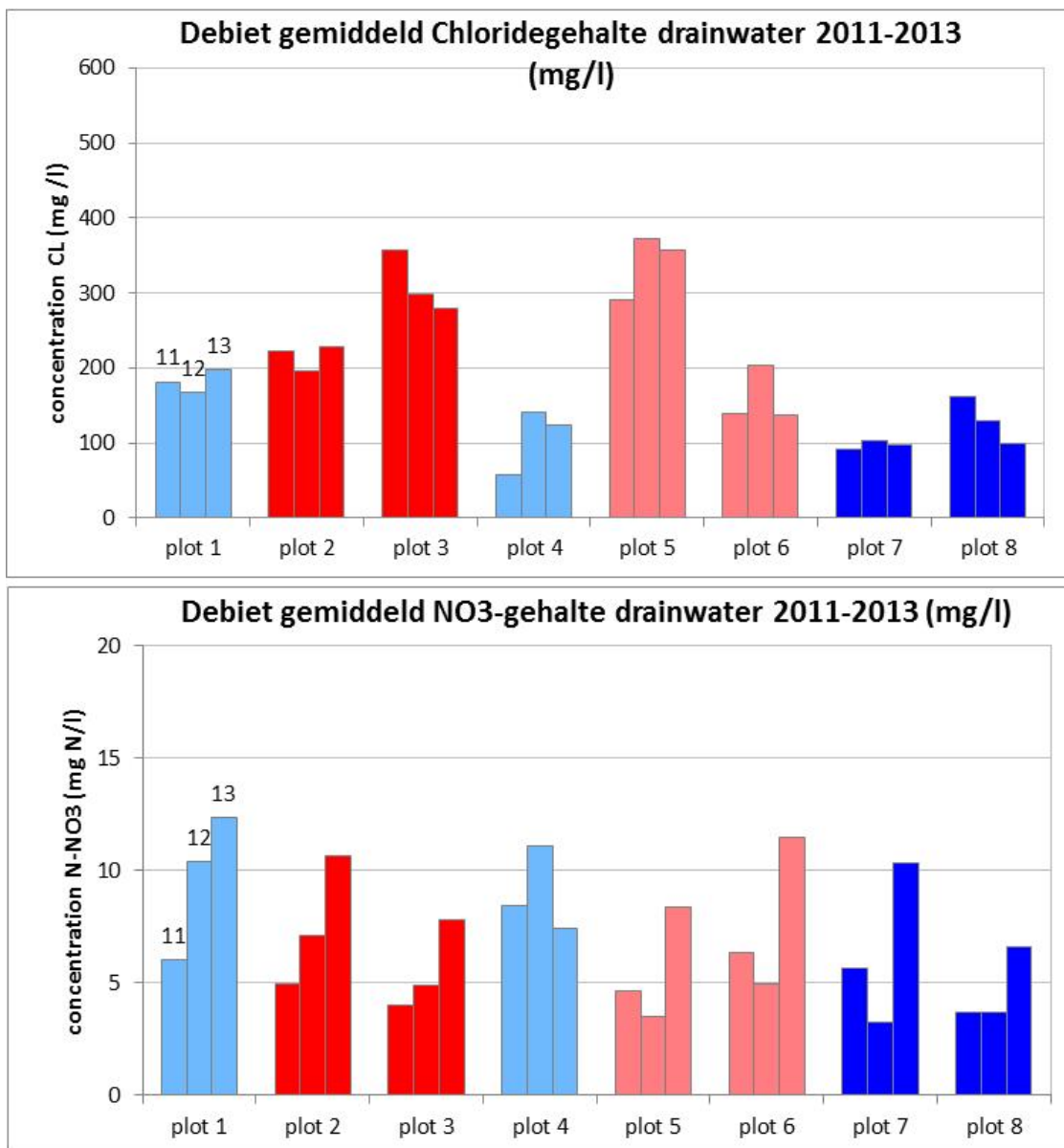


**Figuur 6.20** Verloop totale nitraatuitspoeling per blok, per jaar cumulatief vanaf 1 oktober.



**Figuur 6.21** Chloride- en nitraatbelasting oppervlaktewater voor de 3 meetjaren (2011-2013). Ten behoeve van de interpretatie is onderin de waterafvoer voor de 3 meetjaren weergegeven.





**Figuur 6.22** Debiet-gemiddelde concentraties nitraat en chloride voor de 3 meetjaren.

Uit de weergegeven kwaliteitspatronen en vrachten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De peilgestuurde blokken geven een aanzienlijk lagere chloridebelasting.
- De peilgestuurde blokken met verdiept aangelegde drains geven een aanzienlijke lagere nitraatbelasting.
- De naar afvoer (debiet) gewogen gemiddelde nitraatconcentraties zijn het laagst in de peilgestuurde blokken met de verdiept aangelegde drains en het hoogst in de peilgestuurde blokken met de ondiepe drains.
- De naar afvoer gemiddelde chlorideconcentraties zijn relatief hoog in blok 3 en 5 en relatief laag in blok 4, 7 en 8.
- De naar afvoer gewogen concentraties variëren voor stikstof en zijn vergelijkbaar met de concentraties in het water dat wordt uitgemalen door het nabijgelegen gemaal de Valle.

Bij deze interpretatie moet worden bedacht dat blok 4 weinig representatief is door de erg lage waterafvoeren en dat blok 5 relatief laag is en hierdoor waarschijnlijk meer (zoute) kwel aantrekt.

Omdat in het najaar van 2013 hoogfrequent is gemeten, zijn de berekeningen van de gemiddelde concentraties en hieruit af te leiden vrachten in die periode het betrouwbaarst. De voor die periode gemiddelde concentraties zijn weergegeven in Tabel 6.4.

Tabel 6.4

Gemiddelde nitraat- en chlorideconcentraties najaar 2013.

	Aantal metingen	NO3 (mgN/l)	Cl (mg/l)
plot 1	65	14.2	207
plot 2	72	12.5	237
plot 6	85	14.1	126
plot 8	46	7.0	102

Uit deze metingen komt duidelijk naar voren dat het drainagewater van blok 8 aanzienlijk lagere nitraatconcentraties heeft en de zuidelijke blokken hogere chlorideconcentraties.

Vraag 7: Wat zijn de effecten van peilgestuurde diepe drainage op de kwaliteit van het drainwater?

Er zijn duidelijke verschillen in de chloride- en nitraatgehalten voor de behandelingen.

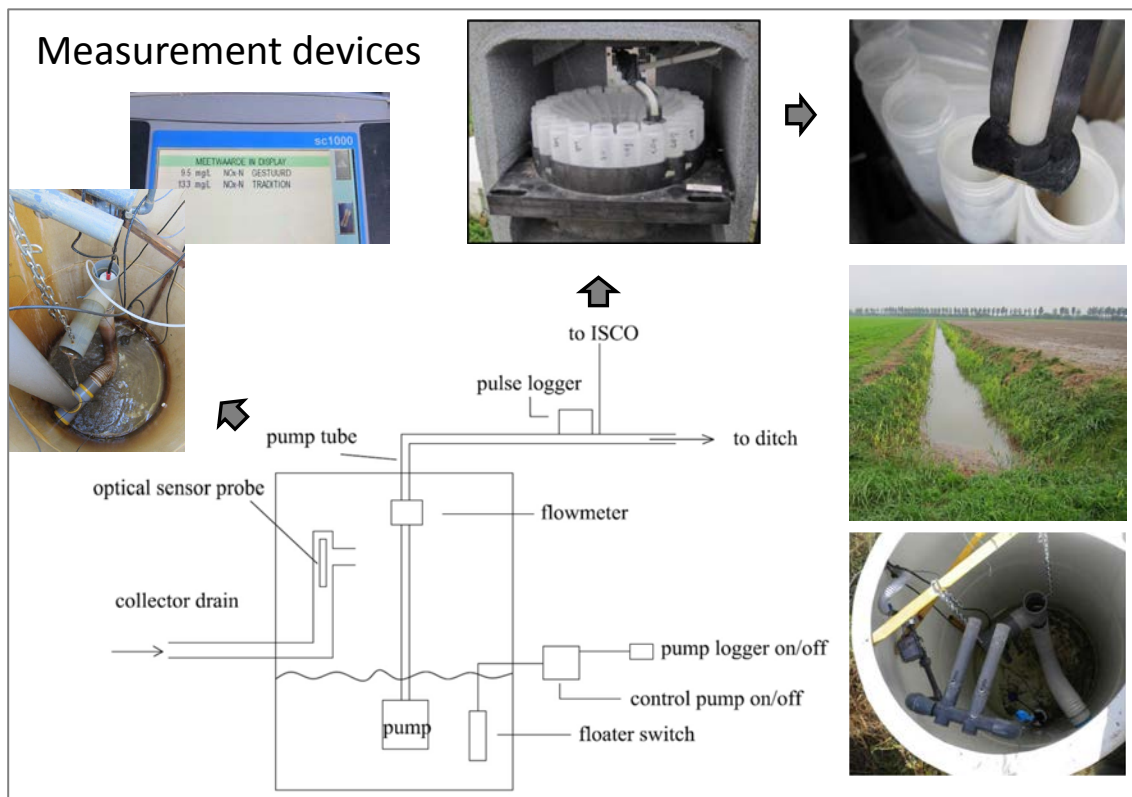
De chlorideconcentratie in het bodemvocht neemt sterk toe met de diepte en juist rond de draandiepte. Dit leidt tot grote verschillen in het zoutgehalte in het drainwater. De metingen van de chlorideconcentraties zijn niet eenduidig. Bij de verdiept aangelegde drains met het conventionele peil (gemiddeld) de zoutgehalten aanzienlijk hoger. De verdiepte drains in de peilgestuurde blokken geven echter lage concentraties.

De behandelingen met de verdiepte drains geven de laagste nitraatconcentraties. Hier is ook de afbraak het hoogst, gezien de isotopenverhoudingen van stikstof. De dieper gelegen drains voeren derhalve meer gereduceerd grondwater af, daardoor is de chemische samenstelling anders (hogere gehalten ammonium, ijzer, fosfaat, arseen) en is meer nitraat door denitrificatie afgebroken.

## 6.8 Analyse first-flusheffecten op de waterkwaliteit

In het najaar van 2013 zijn hoogfrequent watermonsters genomen van het drainagewater uit blok 1, 2, 6 en 8 en is een optische nitraat sensor bijgeplaatst in de regelputten van 6 en 8.

Figuur 6.23 geeft schematisch weer hoe welke metingen zijn verricht.



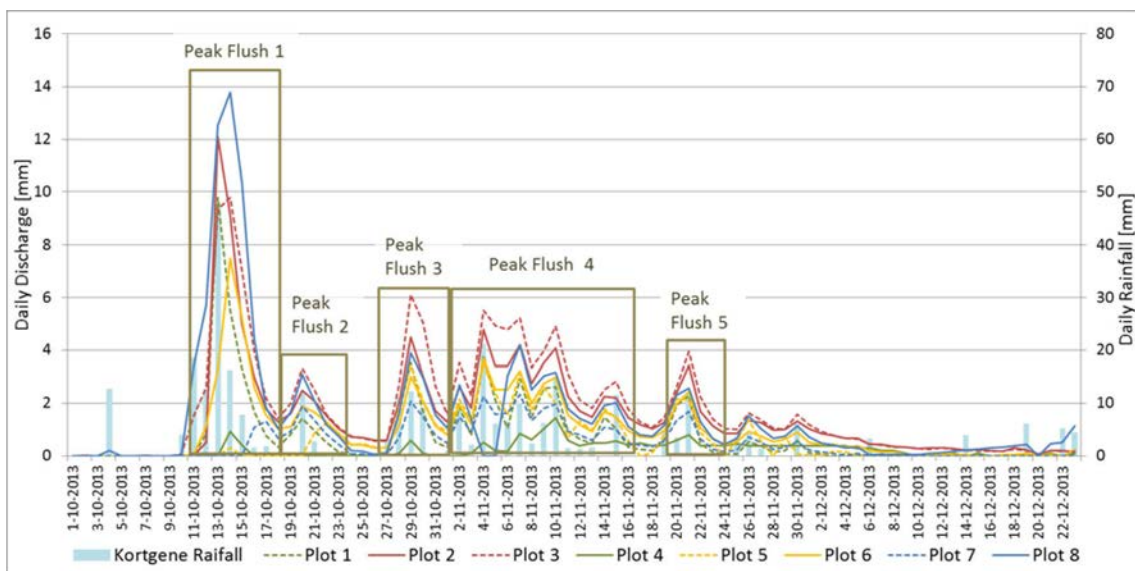
**Figuur 6.23** Tekening regelput en foto's van de ophanging en uitlezing van de nitraatsensor (linksboven), de ISCO waarin hoogfrequent drainwater in de monsterflessen is verzameld (boven), de westelijke sloot en bovenaanzicht van de regelput met de debietmeters, de pomp en vlotter.

De hoogfrequente metingen zijn vooral uitgevoerd om inzicht te krijgen in het verloop van de concentraties (met name nitraat) tijdens piekafvoer. Vanaf medio augustus 2013 was de meetopstelling hiervoor gereed. Het duurde tot het tweede weekend in oktober eer de eerste afvoer op gang kwam. Die eerste afvoergolf was heel groot, omdat er dat weekend uitzonderlijk veel regen was gevallen. Figuur 6.24 geeft de verschillende afvoerpieken weer die sinds dat weekend tot eind 2013 zijn waargenomen. Deze worden in Tabel 6.5 kort omschreven.

**Tabel 6.5**

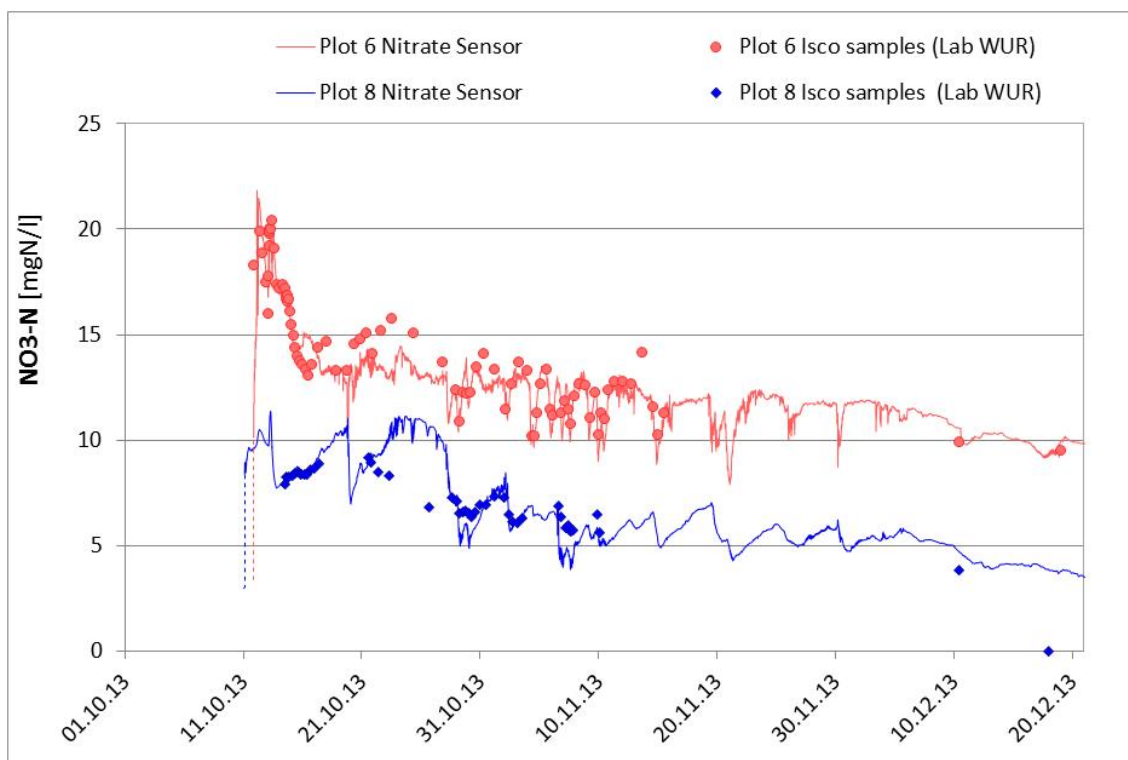
*De onderscheiden piekafvoermomenten in het najaar van 2013*

Piek	Duur	Karakteristiek
1	12-10 tot 18-10 2013	Grote piekafvoer bij hevige neerslag (90 mm in 3 dagen), na enkele maanden zonder afvoer
2	19-10 tot 24-10-2013	Kleine piek in de afvoer kort na piekafvoer 1
3	26-10 tot 31-10 2013	Middelgrote piekafvoer (6 mm/d) veroorzaakt door 2 vrij intensieve regenbuien (regenbui $\approx 10$ mm)
4	01-11 tot 16-11-2013	Enkele middelgrote piekafvoeren, steeds kort na vrij hevige regenbuien (5 buien van regenbui $\approx 10$ mm)
5	20-11 tot 24-11 2013	Middelgrote piekafvoer na een enkel hevige regenbui ( $\approx 10$ mm)



**Figuur 6.24** De te onderscheiden piekafvoeren in het najaar van 2013.

Het verloop van de nitraatconcentraties in de tijd is het meest nauwkeurig gemeten in het drainage-water van blok 6 en 8, omdat daar optische nitraatsensoren waren geïnstalleerd en hoogfrequent watermonsters zijn verzameld met de ISCO's. De chemische samenstelling van deze watermonsters is bepaald in het laboratorium van de WUR. Figuur 6.25 geeft de resultaten van deze gecombineerde metingen weer.



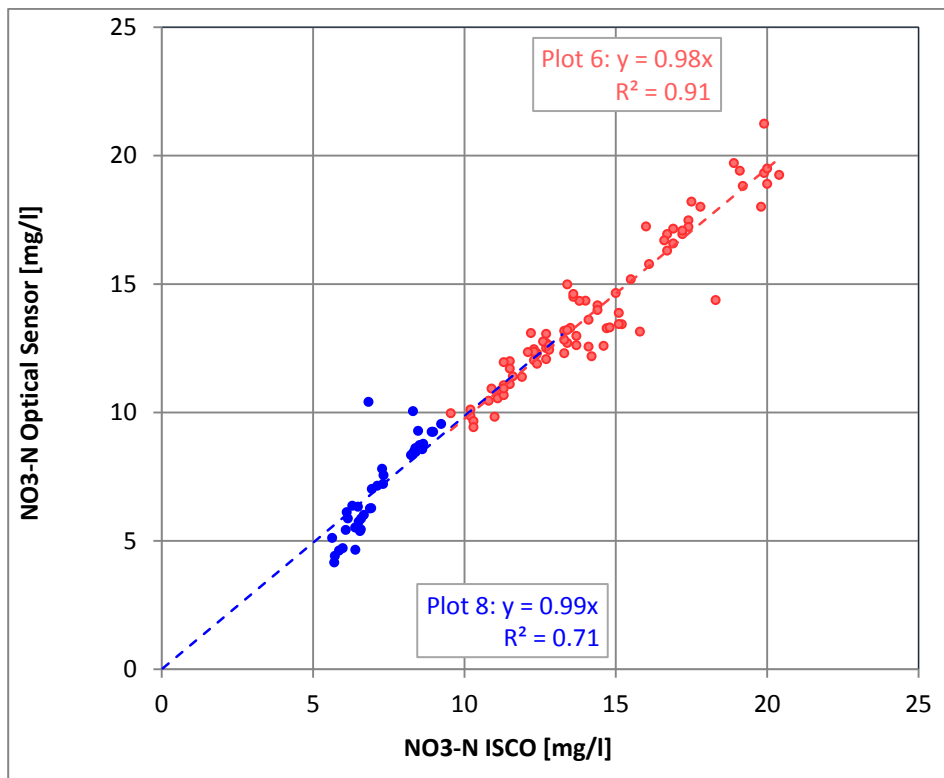
**Figuur 6.25** Concentratieverloop nitraat in het drainwater van blok 6 en 8 zoals gemeten met behulp van de ISCO's (monsternamen en analyse in het laboratorium van de WUR) en de nitraatsensor. De stippellijnen geven de concentraties van de nitraatsensor in de paar uur net voordat de afvoer in de regelput op gang kwam.

Uit Figuur 6.25 komen enkele belangrijke patronen naar voren:

- De nitraatconcentratie in het drainagewater van blok 6 is de gehele periode bijna 2 keer zo hoog als van blok 8.
- De nitraatconcentraties stijgen bij aanvang, met name in regelput 6; kort daarna dalen deze weer en na enkele dagen zijn de concentraties vrij constant.
- Net voordat de afvoer op gang kwam, gaven de nitraatsensoren relatief lage waarden. Dit komt hoogst waarschijnlijk omdat het water rond de sensor lang heeft stilgestaan (er was enkele maanden geen afvoer) en in dit stagnante water het nitraat deels was afgebroken.
- De waarden van de optische nitraatsensor lijken goed overeen te komen met de laboratoriumanalyses.

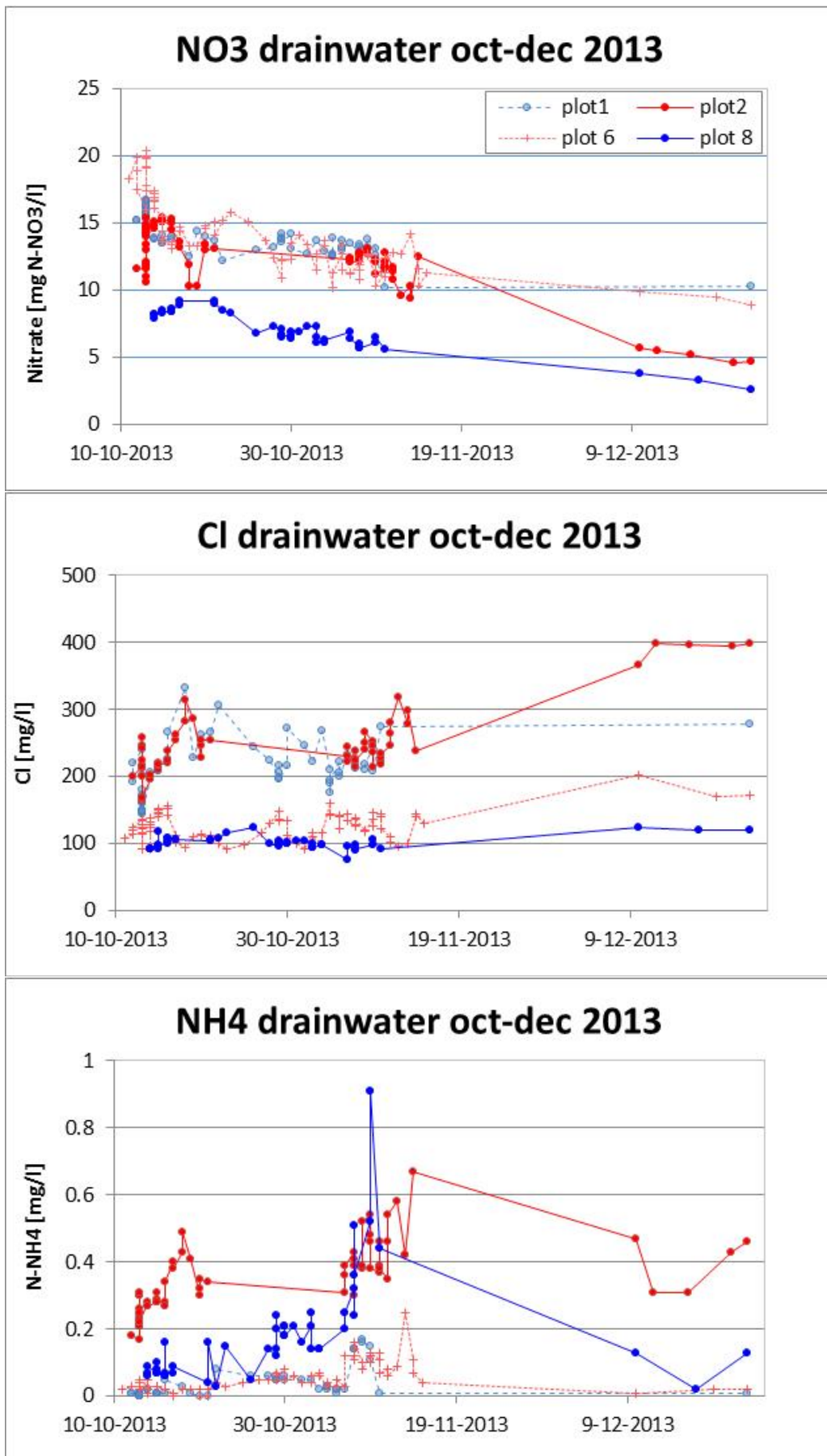
Om te analyseren in hoeverre de nitraatsensor overeenkomt met de laboratoriummetingen, is van ieder watermonster zo nauwkeurig mogelijk de periode van de monstername bepaald en is ter vergelijking voor deze periode een gemiddelde waarde berekend van de nitraatsensor. Voor de eerste afvoerpiek is bij de bepaling van de monsterperiode op pragmatische wijze rekening gehouden met het feit dat diverse monsterflessen tijdens de hevige afvoer onbedoeld meerdere keren zijn gevuld.

Het resultaat van deze analyse is weergegeven in Figuur 6.26. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de nitraatsensor goed correspondeert met de laboratoriummetingen. Daarbij kan ook geconcludeerd worden dat deze optische nitraatsensoren veel beter functioneren dan de ion-selectieve nitraatsensoren die vanaf de start van de proef waren geïnstalleerd.



**Figuur 6.26** Vergelijking optische NO<sub>3</sub>-sensor met de chemische analyses (laboratorium WUR) van de watermonsters die met de automatische bemonsteringskasten (ISCO's) zijn verzameld.

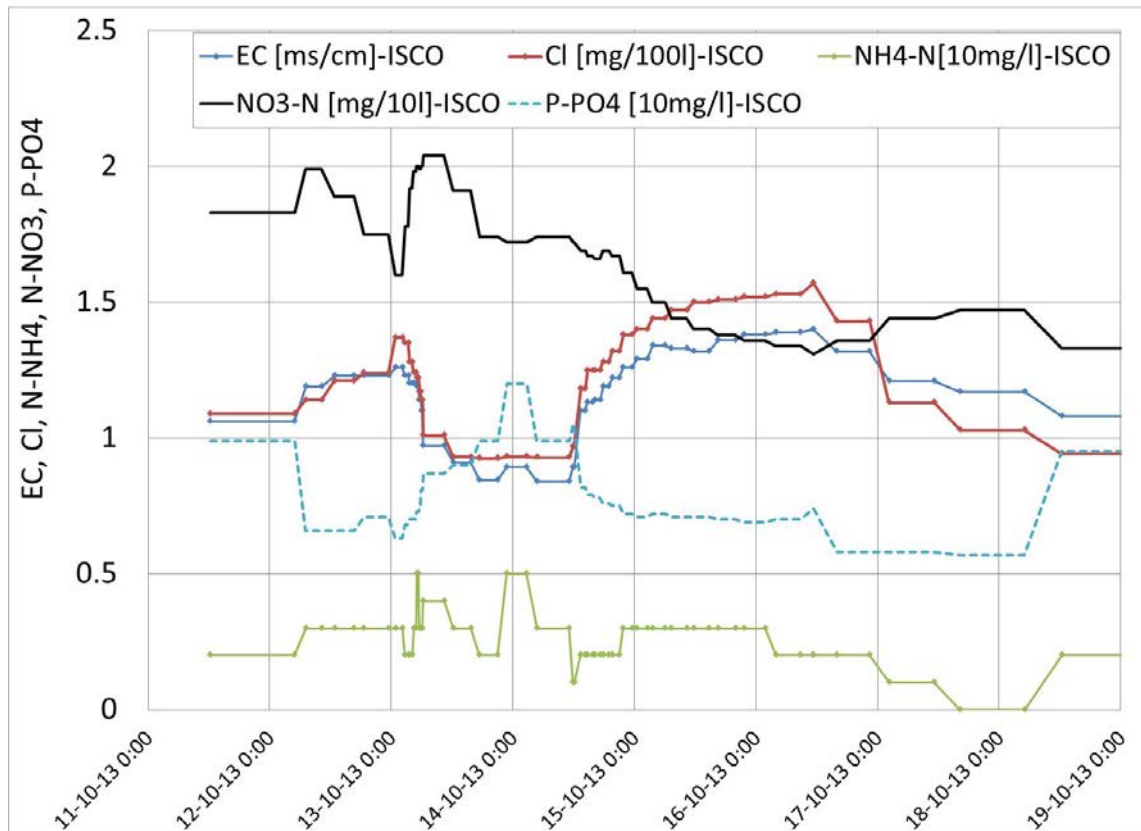
Figuur 6.27 geeft naast nitraat het concentratieverloop van de overige kenmerkende waterkwaliteitparameters. Duidelijk is te zien dat de diepe drains lagere nitraatgehalten vertonen en hogere ammoniumgehalten. Verder lijken de schommelingen in concentraties bij de diepe drains minder groot dan de ondiepe en treden de grootste veranderingen op in oktober.



**Figuur 6.27** Verloop nitraat, chloride en ammonium in drainagewater najaar 2013.



Om de patronen meer in detail te bestuderen, is in Figuur 6.28 nader ingezoomd op de periode van 11 tot 19 oktober (piekafvoer moment 1). In de figuur is de schaal voor de verschillende stoffen zodanig aangepast dat de patronen goed zichtbaar zijn.

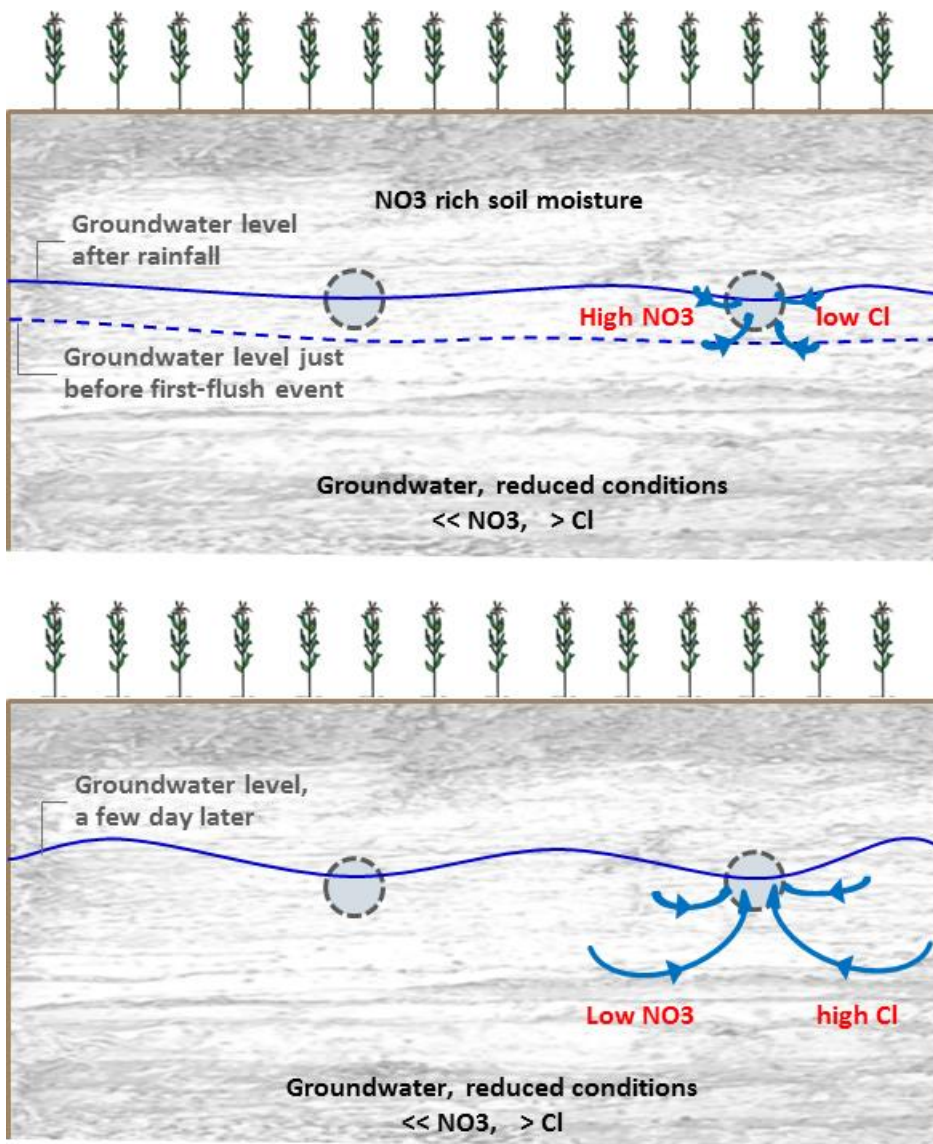


**Figuur 6.28** Verloop nitraat, chloride, elektrisch geleidingsvermogen (EC), fosfaat en ammonium in het drainagewater van blok 6 tijdens de eerste afvoergolf.

Uit Figuur 6.28 komt duidelijk naar voren dat wanneer nitraat toeneemt, chloride juist daalt en vice versa. Verder is het patroon van het elektrische geleidingsvermogen (EC) in overeenstemming met dat van chloride. De ammonium- en fosfaatgehalten zijn relatief laag. De patronen van de in Figuur 6.28 weergegeven parameters komen globaal overeen met de andere 4 blokken (blok 1, 2 en 8). Het drainwater in blok 8 vertoont de minst sterke schommelingen in concentraties.

De mogelijke verklaring voor de concentratieveranderingen tijdens de first-flush wordt geïllustreerd in Figuur 6.29. Als de afvoer na lange tijd van lage grondwaterstanden door hevige neerslag op gang komt, bestaat het drainagewater voornamelijk uit jong water, een menging van neerslagwater en het nog aanwezige bodemvocht in de onverzadigde zone. Een paar dagen later neemt de opbolling van het grondwater tussen de drains toe, waardoor onder invloed van potentiaalverschil grondwater van grotere afstand en dieper in het bodemprofiel naar de drains stroomt. De verhouding tussen recentelijk geïnfilteerd neerslagwater en ouder grondwater neemt dan af. Het grotere aandeel ouder grondwater is door de invloed van kwel zouter en in het algemeen meer onderhevig geweest aan reductie.





**Figuur 6.29** Schematische weergave drainafvoer op het moment dat tijdens hevige neerslag afvoer op gang komt (first-flush, bovenste figuur) en de drainafvoer een paar dagen/weken later.

Met de hoogfrequente metingen zijn vrij nauwkeurig de vrachten en de naar afvoer gewogen gemiddelde concentraties af te leiden van het drainagewater. Dit geeft verder inzicht in de invloed van de schommelingen in concentraties en de verschillen tussen de blokken. Tabel 6.6 geeft de naar afvoer gewogen concentraties van de kenmerkende stoffen en Figuur 6.30 de cumulatieve vrachten van nitraat. Hierbij zijn alleen de hoogfrequente blokken weergegeven.

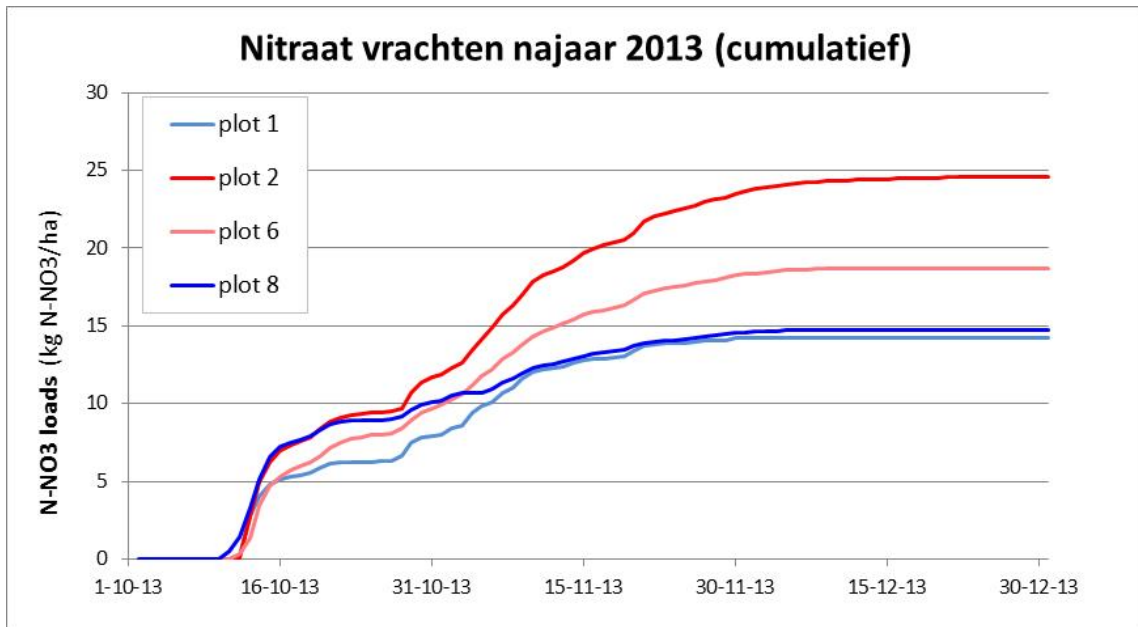
**Tabel 6.6**

*Naar afvoer gewogen gemiddelde concentraties drainagewater najaar 2013.*

Stof	eenheid	Blok 1	Blok 2	Blok 6	Blok 8
N-NO3	mg N/l	13.1	11.8	13.1	7.4
N-NH4	mg N/l	0.03	0.39	0.05	0.18
Cl	mg /l	228	244	131	99
P-PO4	mg P/l	0.07	0.03	0.06	0.10

Uit Tabel 6.6 blijkt dat de naar afvoer gewogen nitraatconcentraties in het blok 8 duidelijk lager zijn dan in de overige blokken. Ook die van blok 2 zijn deze lager dan blok 1 en 8. Dit bevestigt de

conclusies over het effect van de dieper liggende drains (meer denitrificatie). Uit Figuur 6.30 komt naar voren dat de vrachten van de regelbare drains significant lager zijn dan de niet-regelbare drains. Hierbij moet worden bedacht dat de in blok 6 gemeten afvoeren minder hoog waren dan zou worden verwacht, omdat tijdens de hevige neerslag van medio oktober zeer grote plassen op het perceel kwamen te liggen ter plaatse van blok 5, blok 6, blok 0 (ten westen van 1) en delen van blok 1 en dat deze door middel van het graven van greppels oppervlakkig en dus niet via de drains zijn afgevoerd. Dit geldt dus, zij in het mindere mate, ook voor blok 1.



**Figuur 6.30** Cumulatieve vrachten nitraat najaar 2013.

Samengevat kunnen de volgende conclusies worden getrokken uit de first-flushanalyse:

- De twee optische nitraatsensoren geven opvallend betrouwbare meetresultaten.
- Tijdens de eerste afvoergolf stijgt bij het op gang komen van de afvoer het nitraatgehalte vrij sterk, bereikt binnen enkele uren dan de hoogste waarden en daalt vervolgens in de orde van 1 à 2 dagen weer naar de normale waarden. Chloride vertoont het tegenovergestelde patroon.
- Tijdens de latere afvoergolven zijn de schommelingen in nitraatgehalten iets minder groot.
- De nitraatgehalten in de diepe drains zijn duidelijk lager dan in de ondiepe drains.

Vraag 8: Treedt tijdens hevige afvoer kortsluitstroming op van neerslagwater naar de drains? M.a.w.: zijn er aanwijzingen voor kortsluitstroming naar de drains via scheuren in de klei?

*Antwoord:* Tijdens het najaar 2013 is met een hoge frequentie de kwaliteit van het drainwater gemeten. Hierbij komt naar voren dat bij een afvoerpiek na een periode van droogte nitraat aanvankelijk stijgt en chloride dan juist afneemt. Dit effect wordt afgevlakt bij diepe drains. De concentratieverschillen duiden niet op scheurvorming. Na circa 1 à 2 dagen zijn de concentraties weer op het normale niveau.

---

## 6.9 Stofbalans meetsloot

Peilgestuurde drainage leidt tot lagere stikstofuitspoeling via de drains doordat meer water via de deklaag lateraal naar de drains stroomt. Om inzicht te geven in de effecten op oppervlaktewaterkwaliteit, is ook de herkomst van het oppervlaktewater bepaald en in hoeverre het nitraat in het grondwater wordt afgebroken voordat het de meetsloot bereikt.

### *Herkomst chloride*

Ter aanvulling van de waterbalans kan inzicht in de voeding van de meetsloot worden verkregen door ook een balans op te stellen voor chloride. Chloride is een stof die niet reageert met de bodem en de verschillen tussen het chloridegehalte in het kwelwater, neerslagwater en ondiepe grondwater zijn groot.

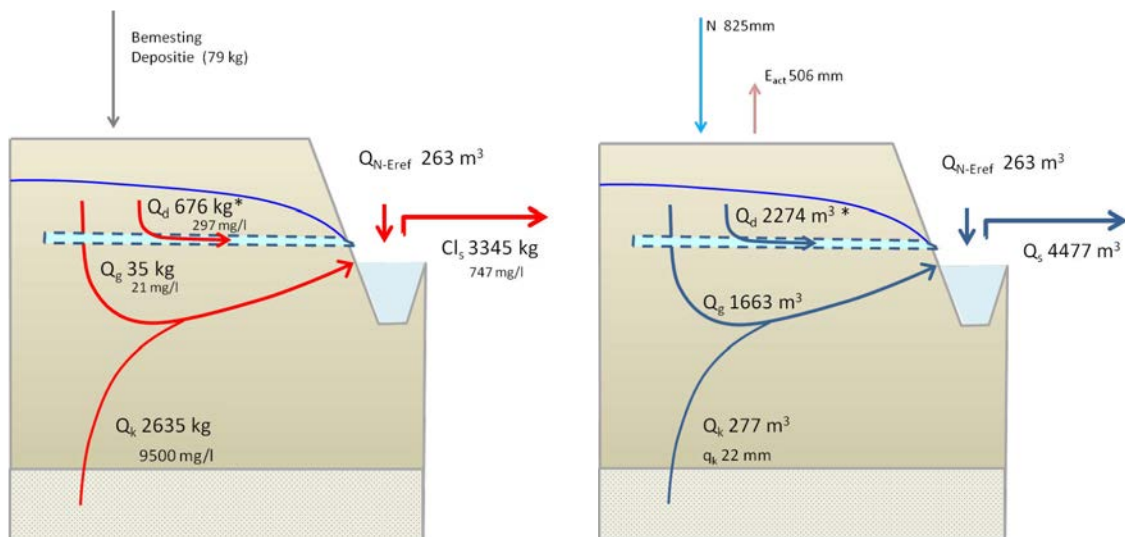
De meetsloot wordt gevoed met chloride door de drains, diffuus toestromend grondwater en, zij het wellicht te verwaarlozen, atmosferische depositie. De chloridevracht van het diffuus toestromende grondwater is een menging van ondiep infiltrerend regenwater en grondwater, dat vanuit het watervoerende pakket opkwelt richting het ondiepere grondwater in de deklaag. De langjarige chloridebalans van de sloot is dan:

$$Q_s \cdot Cl_s = Q_d \cdot Cl_d + A(q_g \cdot Cl_g + q_k \cdot Cl_k) \quad [3]$$

Met:

- $Cl_s$  = chloridegehalte sloot ( $\text{kg/m}^3$ )
  - $Cl_d$  = chloridegehalte drains ( $\text{kg/m}^3$ )
  - $Cl_g$  = chloridegehalte ondiep infiltrerend grondwater ( $\text{kg/m}^3$ )
  - $Cl_k$  = chloridegehalte kwelwater watervoerend pakket ( $\text{kg/m}^3$ )
- zie voor overige termen  $Q_s$ ,  $Q_d$ ,  $A$ ,  $q_g$  en  $q_k$  formule [1]

De stofbalans is berekend over de periode 1 april 2011 t/m 1 april 2012, maar beschouwt in feite de langetermijnverhouding tussen kwel en infiltratie. De stofbalans wordt namelijk in belangrijke mate beïnvloed door de zoutgehalten rondom de meetsloot en drains. De huidige verdeling van het zoutgehalte in de deklaag is een resultante van kwel en infiltratie tijdens en in de jaren voor aanvang van de proef. De verschillende balanstermen zijn in Figuur 6.31 weergegeven.



Chloridebalans meetsloot 1-4-2011 tot 31-3-2012

Waterbalans meetsloot 1-4-2011 tot 31-3-2012

**Figuur 6.31** Chloride- en waterbalans meetsloot voor de periode april 2011 tot april 2012.

\*  $Cl_d$  676 kg; hiervan is 629 kg afkomstig van kwel uit het watervoerend pakket; \*\*  $Q_d$  2274 m<sup>3</sup>; hiervan is 66 m<sup>3</sup> afkomstig van kwel uit het watervoerend pakket

De chloride- en waterbalans van de meetsloot is met de volgende uitgangspunten bepaald:

- *Slootafvoer ( $Q_s$ )*: De slootafvoer is gemeten en bedraagt 4477 m<sup>3</sup>.
- *Chloridegehalte sloot ( $Cl_s$ )*: De naar afvoer gewogen gemiddelde chloridegehalten in de sloot zijn 747 mg/l. De afgevoerde chloridevrachten van de meetsloot komen daarmee op 3772 kg.
- *Drainafvoer ( $Q_d$ )*: De drainafvoer is gemeten en bedraagt 2264 m<sup>3</sup>.
- *Chloridegehalte drain ( $Cl_d$ )*: De naar afvoer gewogen gemiddelde chloridegehalten in de drain zijn 298 mg/l. Via drains wordt 676 kg aangevoerd naar de meetsloot.
- *Ondiep infiltrerend grondwater ( $q_g$ )*: Dit is het neerslagoverschot dat niet door de drains wordt afgevoerd. Het bedraagt 2346 m<sup>3</sup>.
- *Chloridegehalte ondiep infiltrerend grondwater ( $Cl_g$ )*: Het chloridegehalte van ondiep infiltrerend grondwater is afgeleid uit de metingen die aan de cups op 0,7 m -mv zijn verricht. Van de 43 metingen op 8 locaties is de mediane concentratie 21 mg/l. De gemiddelde concentratie is 134 mg/l, maar hier zaten enkele hoge metingen bij in droge perioden die beïnvloed zijn door zoute kwel en derhalve niet representatief voor percolatiewater. Er is ook gekeken naar de meest ondiepe cups (0,5 m -mv); de concentraties hiervan geven ongeveer dezelfde mediane waarde, maar met een bredere spreiding.
- *Chloridegehalte kwel watervoerend pakket ( $Cl_k$ )*: Het mediane chloridegehalte van het kwelwater bedraagt, volgens de metingen in de peilbuisfilters die op 6 tot 7 m diepte in het watervoerende pakket staan, 9544 mg/l. Dit is ook ongeveer het gemiddelde, indien één uitbijter van 4400 mg/l wordt weggelaten (deze meenemen zou een gemiddelde concentratie geven van 9150 mg/l).
- *Ontwaterend oppervlak ( $A_g$ ) & Kwel ( $q_k$ )*: Zowel de kwel als het ontwaterend oppervlak is niet direct gemeten en bovendien is er onduidelijkheid over de betrouwbaarheid van eerdere schattingen op basis van alleen de waterbalans (zie paragraaf 6.3). Door naast de stofbalans ook de waterbalans op te stellen conform vergelijking [2], geeft twee vergelijkingen met twee onbekenden:

$$\text{Vergelijking [2]} \quad Q_s = Q_d + A_s \cdot [N - ET_{ref}] + A_g \cdot [q_g + q_k]$$

$$4477 = 2274 + 1470 \cdot 0,179 + A_g \cdot [0,131 \text{ m} + q_k]$$

$$\text{Vergelijking [3]} \quad Q_s \cdot Cl_s = Q_d \cdot Cl_d + A_g \cdot [q_g \cdot Cl_g + q_k \cdot Cl_k]$$

$$3345 = 676 + A_g \cdot [0,1944 \cdot 21 \cdot 10^{-6} + q_k \cdot 9500 \cdot 10^{-6}]$$

Hieruit wordt een ontwaterend oppervlak van 1,3 ha afgeleid en een kwelflux van 22 mm/jaar. De genoemde variaties van de chlorideconcentraties in het infiltratiewater en kwelwater hebben weinig invloed op de kwelschatting.

Het kwelwater en infiltrerend grondwater lozen samen met een gemiddelde chlorideconcentratie van 1320 mg/l op de meetsloot. Het drainwater heeft een gemiddeld chloridegehalte van 297 mg/l. Aangezien de ondiepe cups een veel lager chloridegehalte hebben, betekent dat er vermoedelijk ook enig kwelwater in de drain terecht komt. Op basis van mengverhouding in de cups (21 mg/l) en het diepe grondwater (9500 mg/l) is een kwelflux direct naar de drains geschat van 6 mm/jaar. De totale kwel naar de deklaag bedraagt dan  $22 + 6 = 28$  mm/jaar.

Wat opvalt, is dat de kwel berekend op basis van de potentiaalverschillen en deklaagweerstand (107 mm/jaar) vrij hoog is in vergelijking met de kwel berekend op basis van chloridegehalten (28 mm/jaar). De hoge schatting wordt vermoedelijk veroorzaakt door het grote neerslagtekort in de beschouwde periode. Hierdoor zakten de freatische grondwaterstanden ver en was de kwel in het zomerhalfjaar van 2011 hoger dan in een gemiddelde situatie. De schatting op basis van chloridegehalten is waarschijnlijk meer representatief voor een langere periode.

#### *Herkomst nitraat en stikstofisotopen in de meetsloot*

Om de bronnen van nitraat in de meetsloot te kwantificeren, is gekeken naar de overeenkomst tussen nitraat en  $\delta^{15}\text{N}$  in het slootwater en in bekende bronnen:

$$Q [\text{NO}_3^-]_{\text{sloot}} = Q [\text{NO}_3^-]_{\text{drain}} + Q [\text{NO}_3^-]_{\text{gw}} + Q [\text{NO}_3^-]_{\text{kwel}} + Q [\text{NO}_3^-]_{\text{atm dep}} \quad [4]$$

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{sloot}} = \alpha \delta^{15}\text{N}_{\text{drain}} + \beta \delta^{15}\text{N}_{\text{gw}} + \gamma \delta^{15}\text{N}_{\text{kwel}} + \varepsilon \delta^{15}\text{N}_{\text{atm dep}} \quad [5]$$

Verder geldt  $\alpha + \beta + \gamma + \varepsilon = 1$ . Waarbij  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  en  $\varepsilon$  de relatieve bijdragen van nitraat zijn aan het slootwater van respectievelijk kwel, drains, lateraal toestromend grondwater en atmosferische depositie.

De  $\text{NO}_3^-$  en  $\delta^{15}\text{N}$  van het slootwater, drainwater en kwel uit het watervoerend pakket zijn gemeten. Voor atmosferische depositie zijn literatuurwaarden voor N-totaal beschikbaar en is  $\delta^{15}\text{N}$  per definitie gelijk aan nul. De waterbalanstermen  $Q$  zijn in bovenstaande paragraaf in beeld gebracht. Alleen van  $\text{NO}_3^-$  en  $\delta^{15}\text{N}$  in het lateraal toestromend grondwater is geen goede inschatting beschikbaar. Beide zijn lastig direct te meten, omdat er deels menging plaatsvindt met de zoutere kwel.

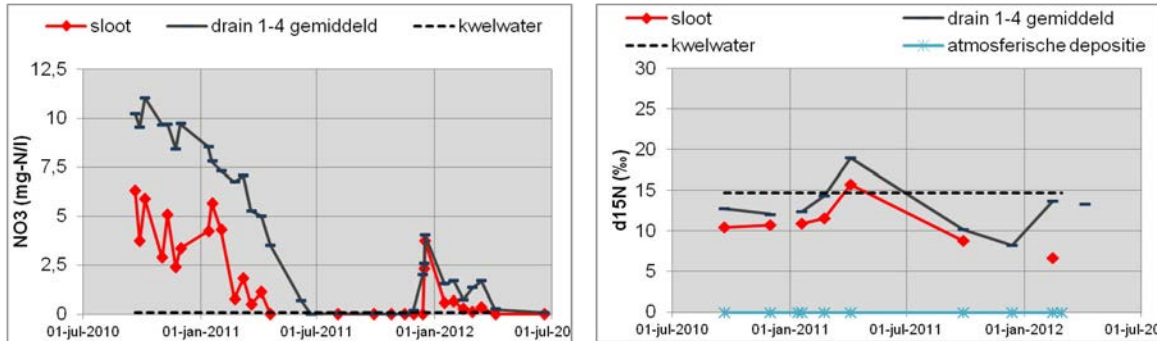
Het gemeten verloop van  $\text{NO}_3^-$  en  $\delta^{15}\text{N}$  is in Figuur 6.32 weergegeven. Wat opvalt, is dat in de meetsloot dezelfde fluctuaties optreden als in de drains, maar dat de nitraatgehalten in de sloot in de periode december 2011 tot april 2012 61% lager zijn. Dit geeft aan dat de drains een verhoudingsgewijs grote bijdrage leveren aan het nitraat in het slootwater en dat de andere bronnen lagere nitraatgehalten hebben of verdunnen.

Uit analyse van de stofbalans voor de periode 1 april 2011 tot 31 maart 2012 [4] blijkt dat de N-totaal uitspoeling van de sloot ongeveer even groot is als de  $\text{NO}_3\text{-N}$ -emissies via de drains. Hieruit kan worden afgeleid dat het lateraal toestromend grondwater vermoedelijk bijna geen nitraat bevat en er dus veel denitrificatie is opgetreden in water dat van het perceel wegstroomt.

Denitrificatie leidt tot verhoging van de  $\delta^{15}\text{N}$ . Maar de  $\delta^{15}\text{N}$  in de meetsloot is gemiddeld juist 23% lager dan in de drain. Dit is op zichzelf vreemd, aangezien er geen andere nitraatbronnen bekend zijn met lagere  $\delta^{15}\text{N}$ . Vermoedelijk is er zo veel denitrificatie opgetreden dat de nitraatbijdrage van het lateraal toestromend grondwater ( $\gamma$ ) zodanig gering is dat de toegenomen  $\delta^{15}\text{N}_g$  weinig effect heeft op de totale isotopenbalans in de meetsloot.

Ter controle is ook het nitraatgehalte bepaald door te zoeken naar monsters die representatief zijn voor lateraal toestromend grondwater. Hiervoor zijn samples gekozen met een chlorideconcentratie van rond de 1320 mg/l (750-2000 mg/l). Dit is namelijk de gemiddelde concentratie van het mengwater dat naar de sloot stroomt op basis van de chloridebalans. Dit resulteert voor  $\text{NO}_3^-$  in een mediaan van beneden de 0,1 mg-N/l en een  $\delta^{15}\text{N}_g$  van 15,5‰. (NB Het gemiddelde nitraatgehalte is 0,7 mg-N/l, maar dit wordt sterk beïnvloed door twee extreem hoge meetwaarden.) Ook op dagen dat er wel slootafvoer was maar geen drainafvoer zijn de gemeten nitraatgehalten in de meetsloot zeer laag. De metingen komen dus redelijk overeen met het nitraatgehalte dat is berekend op basis van stofbalans.

Een belangrijke aanname van bovenstaande analyse is dat er geen chemische processen optreden in de meetsloot met nitraat. Dit lijkt gerechtvaardigd gezien de DOC van circa 10 mg/l in de meetsloot. Daarnaast is aangenomen dat afgelopen jaren geen grote veranderingen hebben plaatsgevonden in de nitraatuitspoeling vanuit het perceel naar het ondiepe grondwater dat lateraal naar de drains toestroomt. Ook dit lijkt te rechtvaardigen. Er zijn immers geen grote veranderingen opgetreden in bemesting van het perceel (met uitzondering van de aanleg van het drainagesysteem) en eerder is al aangegeven dat er geen invloed is gemeten van peilsturing op de nitraatgehalten in het grondwater.



**Figuur 6.32** Nitraatconcentraties (links) en stikstofisotopen (rechts) in de meetsloot en bekende bronnen van de meetsloot. De nitraatgehalten en  $\delta^{15}N$  in de sloot zijn lager dan in drain en cup, maar vertonen wel een vergelijkbare fluctuatie.

#### Conclusie stofbalans meetsloot

In Tabel 6.7 zijn de verschillende bijdragen van water, nitraat en chloride aan de meetsloot weergegeven. De balansposten zijn vertaald naar het gecombineerde oppervlak van de meetsloot en proefblok 1-4, waardoor ze afwijken van hiervoor gepresenteerde waarden.

**Tabel 6.7**

*Water- en stofbalans voor de meetsloot gecombineerd met proefblok 1-4.*

Onderdeel	Sym-bool	Water		Chloride		Nitraat-N	
		mm	%	kg/ha	% Cl	kg/ha	% N
Neerslagoverschot direct op sloot	$q_s$	20	6%	0	0%	0,0	0%
Drainageafvoer	$q_d$	173	52%	36	1%	4,6	100%
Laterale grondwaterstroming	$q_g$	113	34%	24	1%	0,0	0%
Kwel direct naar sloot	$q_{ks}$	22	7%	2077	83%	0,0	0%
Kwel via drain	$q_{kd}$	4	1%	352	14%	0,0	0%
Slootafvoer	$q_s$	331	100%	2488	100%	4,6	100%

Geconcludeerd wordt dat:

- De best mogelijke schatting van langjarig kwel door de deklaag 26 mm/jaar is.
- De nitraatgehalten in de meetsloot in grote mate worden bepaald door de nitraatgehalten in de drains. Lateraal toestromend grondwater en neerslag hebben een beperkte bijdrage.
- Nitraat dat niet via de drains wordt afgevoerd maar lateraal via het grondwater naar de meetsloot stroomt, wordt grotendeels afgebroken. Er vindt dus denitrificatie plaats ook beneden drainniveau.

Ten aanzien van de representativiteit van de resultaten voor Zeeland moet worden bedacht dat drainblok 1-4 aan de rand van het perceel liggen en zo relatief sterk beïnvloed worden door het oppervlaktewater. Dit natuurlijk los van het gegeven dat in de rest van de provincie ook andere hydrologisch en geochemische condities voorkomen dan in de Rusthoeve.

## 6.10 Agronomische aspecten (vraag 10, 11 en 12)

### *Effecten aanleg drainagesysteem op de bodem*

De ervaring op de Rusthoeve tot nu toe is dat de grond is verstoord door aanleg van het drainage-systeem. De Rusthoeve gaf aan dat het ploegen tijdelijk zwaarder is geworden en bovendien bleek uit de waarnemingen dat de nutriëntenuitspoeling tijdelijk toenam.

Volgens de bedrijfsleider van de Rusthoeve was het duidelijk dat het minstens 1 oogstjaar na aanleg kost voordat de structuur van de bodem zodanig is hersteld van de aanleg van het drainagesysteem dat er sprake is van een landbouwkundig optimale situatie.

De aanleg van het drainagesysteem zelf vormt een landbouwkundig risico als hierdoor het gewas later wordt ingezaaid. Door de late aanleg in het groeiseizoen, de droge zomer en natte herfstperiode is het gewas na het eerste groeiseizoen niet geoogst. Toen het gewas eindelijk oogstrijp was, was het perceel te nat om te betreden met landbouwmachines zonder risico op bodemverslapping.

Desondanks is ook toen al in de proefoogst een redelijke gewasgroei vastgesteld wanneer rekening wordt gehouden met de droge zomer.

Uit de proefoogsten is gebleken dat de suikerbieten in het tweede meetjaar een goede opbrengst hebben geleverd – zowel qua gewasgroei als suikergehalte.

Vraag 10: Leidt aanleg van peilgestuurde drains tot meer versterking van de bodem en navenante oogstderiving dan traditionele drainage?

Antwoord: Nee (al is dit niet expliciet onderzocht), behalve mogelijk in het eerste jaar.

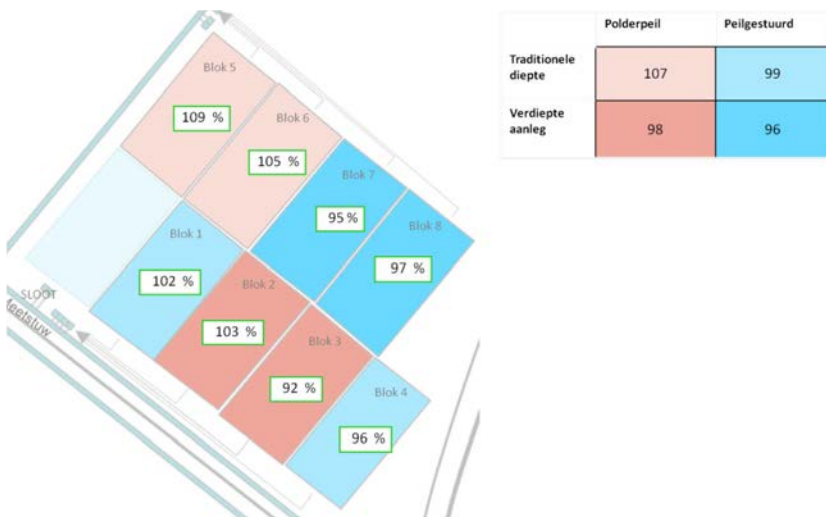
### *Gewasopbrengsten*

De gewasopbrengsten die per blok zijn bepaald zijn weergegeven in Figuur 6.33a (bonen 2010), 6.33b (suikerbieten 2011), 6.33c (tarwe 2012) en 6.33d (aardappels 2013).



**Figuur 6.33a** Gewicht opbrengst bonen (2010), relatieve schaal.

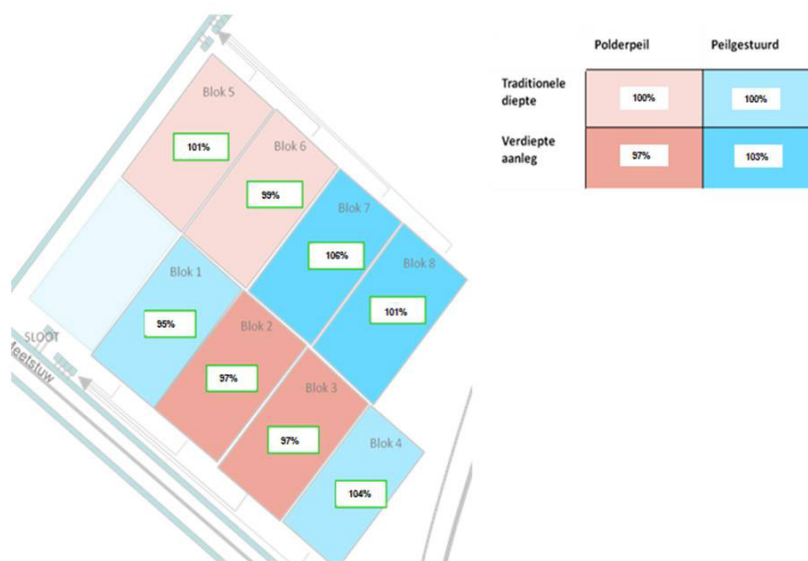




**Figuur 6.33b** Financiële opbrengst bieten (2011), relatieve schaal.



**Figuur 6.33c** Gewicht opbrengst tarwe (2012), relatieve schaal.



**Figuur 6.33d** Gewicht opbrengst aardappelen (2013), relatieve schaal.

---

Het is goed denkbaar dat in de opgetreden droge perioden de peilgestuurde drainage bijgedragen heeft tot betere gewasopbrengsten, omdat er meer water in de bodem is geborgen.

Op de percelen met peilgestuurde drainage treden in droge perioden 0,1 tot 0,2 m hogere grondwaterstanden op. De ruimtelijke variatie in grondwaterstanden binnen het perceel is waarschijnlijk aanzienlijk kleiner dan in de oorspronkelijke situatie. Tijdens het vooronderzoek vertoonden de GHG en GLG in boorprofielen een vrij grote ruimtelijke variatie. En daarnaast trad er een verschil van 0,1 m op tussen beide peilbuizen die tijdens het vooronderzoek operationeel waren. Na aanleg van de drainage zijn verschillen in grondwaterstanden tussen peilbuizen in de regel minder dan 0,05 m.

Desondanks is er in percelen met peilgestuurde drainage in 2010, 2012 en 2013 een vergelijkbare opbrengst gemeten als in de niet-peilgestuurde percelen. Figuur 6.33b laat zien dat de opbrengsten in het extreem droge jaar 2011 in het peilgestuurde perceel zelfs een paar procent lager waren. Mogelijk is er sprake van een vruchtbaarheidsverloop of zijn andere, ruimtelijk variërende factoren dominant(er).

Vraag 11: Leidt peilgestuurde drainage tot hogere gewasopbrengsten?

*Antwoord:* Nee, in dit type bodem is de vochtvoorziening goed doordat de bodem relatief veel water in de onverzadigde zone kan bergen.

Vraag 12: Leidt peilgestuurde diepdrainage tot betere berijdbaarheid van het perceel in natte perioden?

*Antwoord:* Door de intensievere drainage (kleinere drainafstand) zullen de grondwaterstanden sneller dalen na een intensieve bui. De praktijkervaring van de Rusthoeve is dat er geen merkbare verschillen zijn in de behandelingen. Dit komt overeen met de uitkomsten van het modelonderzoek met SWAP van Hendrik Staarink, waarin berekend is dat de berijdbaarheid bij de hier gehanteerde peilopzet niet verslechtert. In perioden met landbewerkingen kan vooraf tijdelijk het peil verlaagd worden.

---

# 7 Modelling drainafvoer en waterkwaliteit

## 7.1 Inleiding

Ter ondersteuning van de interpretatie van meetgegevens is modelonderzoek uitgevoerd met de volgende twee doelstellingen:

- Indicatie verkrijgen over mogelijke zijdelingse beïnvloeding tussen de behandelingen (blokken).
- Inzicht verkrijgen / beter begrijpen patronen van de  $\text{NO}_3\text{-N}$ - en  $\text{Cl}$ -concentraties in het drainwater bij first-flush / piekafvoer.

Het modelonderzoek is mede uitgevoerd in het kader van Kennisbasis onderzoek van de WUR.

## 7.2 Modelbeschrijving

FUSSIM2D is een tweedimensionaal simulatiemodel voor waterbeweging en stoffentransport in de bodem en het is in detail beschreven in Heinen (2001) en Heinen & de Willigen (1998; 2001). Daar waar eendimensionale modellen, zoals SWAP (Kroes *et al.*, 2008), alleen de verticale (in de diepte) stroming beschouwen, wordt in FUSSIM2D ook de horizontale stroming meegenomen. Op deze manier kan bijvoorbeeld stroming naar een drain nagebootst worden.

Bij een tweedimensionale schematisatie van de bodem wordt de bodem ingedeeld in lagen (net zoals bij SWAP), en vervolgens ook in kolommen (Figuur 2.1). Voor een dergelijk domein moeten de randvoorwaarden aan de boven- en onderzijde worden opgegeven, en tevens moeten randvoorwaarden aan de zijranden worden vermeld. Vaak worden deze randen als symmetrievlakken geïnterpreteerd, waarbij er dus geen stroming over de rand plaatsvindt. Maar er kan ook een drukhoogte worden opgelegd, bijvoorbeeld in het geval de rand grenst aan een sloot met bekend slootpeil.

De bodemfysische hydraulische eigenschappen (waterretentie, doorlatendheid) kunnen in principe per rekenelement worden opgegeven, maar is zoals gebruikelijk hier alleen op laag niveau gedaan.

Een drain wordt in deze modelbeschrijving als volgt beschouwd. Het rekenelement waarin de drain zich fysiek bevindt, krijgt een aangepaste doorlatendheid. Stroming naar dit rekenelement toe wordt dan gezien als afvoer via de drain. Details over deze aanpak zijn beschreven in Heinen (2014). Bij de berekening van de stroming naar de drain toe wordt rekening gehouden met een opgelegd ontwateringspeil van de drain.

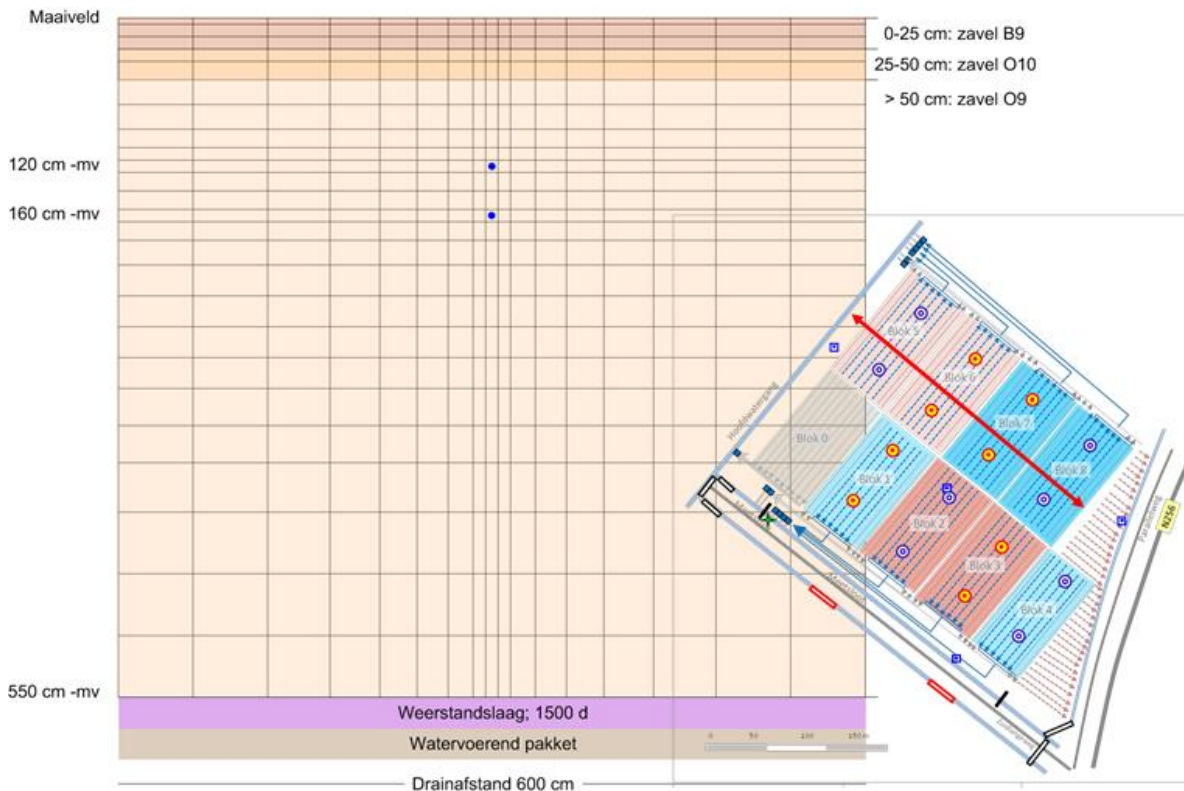
In deze studie is een bodemkolom van 550 cm diep beschouwd, analoog aan de SWAP-modellering van blok 7 (Staarink 2014). Op deze diepte is een flux-randvoorwaarde verondersteld. Deze flux werd dynamisch berekend aan de hand van stijghoogteverschillen tussen de gesimuleerde grondwaterstand en een gemeten tijdreeks van de stijghoogte van de onderliggende watervoerende pakket. Hierbij werd een weerstand verondersteld gelijk aan 1500 dagen, welke waarde volgde uit een SWAP-kalibratie (Staarink, 2014). De modelschematisatie is weergegeven in Figuur 7.1.

Voor de neerslag is uitgegaan van meteo-station Kortgene en voor verdamping het nabijgelegen hoofdstation Wilhelminadorp. Een belangrijk verschil met de SWAP-modellering is dat in SWAP voor de verdamping is gerekend met de methode Penman, terwijl met FUSSIM2D is gerekend met de referentie-gewasverdamping volgens Makkink. Met gewasfactoren is dit vertaald naar de actuele verdamping. Hierbij moet in FUSSIM2D onderscheid worden gemaakt tussen gewas en bodemtranspiratie. De verdeling hiertussen is ontleend aan de SWAP-modellering van blok 7 (Staarink 2014).

Stoffentransport in FUSSIM2D wordt gemodelleerd met de klassieke convectie-dispersie-vergelijking. Hierin zijn tevens opgenomen diverse bron- en puttermen. In deze studie zijn voor nitraat als brontermen beschouwd de bemesting en atmosferische depositie en als put-term opname door het

gewas en netto denitrificatie-mineralisatie. Bij gewasopname is een lineair verloop met de diepte verondersteld m.b.t. de relatieve bijdrage: 30% vanuit laag 0-15 cm tot 7.5% in laag 50-70 cm. Hierbij is een compensatieverdeling toegepast op basis van de relatieve vochtgehaltenes (cf. Heinen, 2014). Netto-denitrificatie is in deze studie als eerste orde afbraakproces beschouwd met een constante afbraakcoëfficiënt gelijk aan 0.001 per dag.

Voor chloride zijn geen put- en brontermen gebruikt (conservatief transport). Een belangrijke randvoorwaarde hierbij is het chloridegehalte van het kwelwater. Hiervoor is uitgegaan van de metingen van de watermonsters die met de diepe peilbuisfilters (6-7 m -mv) zijn verzameld.



**Figuur 7.1** Indeling in rekenelementen in het model FUSSIM2 voor het afwateringsdomein rond 1 drain (blauwe cirkel; hetzij op diepte 120 cm -mv, hetzij op diepte 160 cm -mv). De gebruikte Staringreeks bouwstenen (Wösten et al., 2001) staan vermeld aan de rechterzijde. Op 550 cm -mv is een weerstandsbiedende laag verondersteld met daaronder een watervoerend pakket met bekend tijdsverloop van de stijghoogte. Het model is opgezet in een dwarsdoorsnede over blok 5-8 (rode lijn inzet rechtsonder).

Om na te gaan of er mogelijk zijdelingse beïnvloeding bestaat tussen de behandelingen (blokken) is gekozen een dwarsdoorsnede te simuleren van blok 5, 6, 7 en 8. Deze situatie is gekozen omdat hierin de twee meest extreme behandelingen vertegenwoordigd waren: conventionele drainage zonder peilsturing versus diepdrainage met opgezette peilsturing. De rechterzijde van blok 8 werd als een symmetrievlak beschouwd (geen stroming over de rechter zijrand in het model) en aan de linkerzijde van blok 5 werd een sloot gemodelleerd met een constant waterpeil op 170 cm -mv. In het dwarsdoorsnedemodel zijn alle drains van de 4 blokken volgens de schematisatie uit Figuur 2.1 opgenomen.

Aanvullend zijn berekeningen uitgevoerd voor een uitsnede van een enkele drain in blok 6 en een in blok 7, precies zoals aangegeven in Figuur 7.1. Hierbij is geen stroming over de zijranden verondersteld. Simulaties zijn gestart op 1 januari 2011, waarbij de drukhoogteverdeling in de bodem in hydraulisch evenwicht was met een grondwaterstand op drainniveau. Simulaties werden uitgevoerd voor een

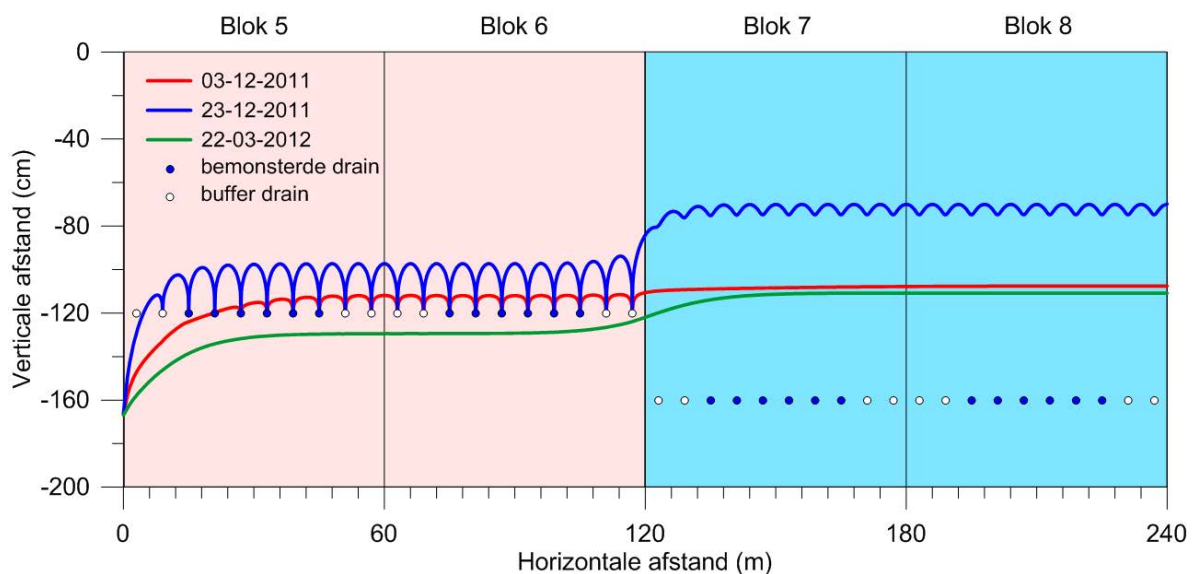
periode van 3 jaar: januari 2011 tot december 2013. De initiële verdeling van NO<sub>3</sub>-N en Cl was ingevoerd op basis van de gemeten bodemvochtconcentraties.

## 7.3 Resultaten en Discussie

Omdat niet alle benodigde randvoorwaarden en invoergegevens betrouwbaar aanwezig waren, is een formele kalibratie niet mogelijk. De beoordeling kan dan ook alleen maar kwalitatief plaatsvinden. Een totaaloverzicht van de uitvoer en vergelijking met beschikbare gemeten grondwaterstanden, drainafvoer en concentraties van het drainwater is weergegeven in Bijlage 2. Hieronder wordt in detail ingegaan op enkele piekafvoermomenten waarbij wordt gekeken naar het tijdsverloop van de concentraties in het drainwater.

### Dwarsdoorsnede modellering blok 5-6-7-8

De gemodelleerde grondwaterstanden in de dwarsdoorsnede van blok 5-6-7-8 voor drie momenten in het uitspoelseizoen 2011-2012 zijn weergegeven in Figuur 7.2.



**Figuur 7.2** Gesimuleerd verloop grondwaterstand op 3 momenten in het uitspoelseizoen 2011-2012.

Aan het begin van het uitspoelseizoen stijgt de grondwaterstand en als eerste beginnen de drains van blok 5 en 6 te draineren. Midden in het uitspoelseizoen functioneren alle drains, en aan het eind van het uitspoelseizoen zakt de grondwaterstand weer onder het ontwateringsniveau en functioneren alle drains niet meer. Opvallend in deze verlopen is:

- De invloed van het lage slootpeil op de drainage in blok 5 is soms groot, waarbij op sommige momenten ook enkele van de centrale drains niet functioneren. Dat verklaart waarom in blok 5 minder afvoer is gemeten dan in blok 6.
- Er is een zijdelingse beïnvloeding te zien op de grens tussen blokken 6 en 7. Echter, deze is vooral zichtbaar in de opbolling ter hoogte van de bufferdrains. De centrale, bemonsterde drains in blok 6 en in blok 7 hebben vrijwel identieke afvoer gegenereerd in het model (Tabel 7.1; kleine variatiecoëfficiënt).

Op basis hiervan is geconcludeerd dat de wederzijds beïnvloeding tussen de behandelingen (blokken) voldoende is afgevangen via de bufferdrains. Daarmee zijn de blokken als onafhankelijk te beschouwen. In het vervolg kunnen we volstaan met simulaties voor een enkelvoudige (model) drain voor een individueel blok.

Tabel 7.1

Gemiddelde en variatiecoëfficiënt voor de equivalente afvoer (voor drie jaar) van de zes centrale bemonsterde drains per blok volgens de simulatieberekening.

Blok	Afvoer (mm/3 jaar)	CV (%)
5	1105	11.3
6	1225	2.1
7	1036	3.0
8	1062	0.1

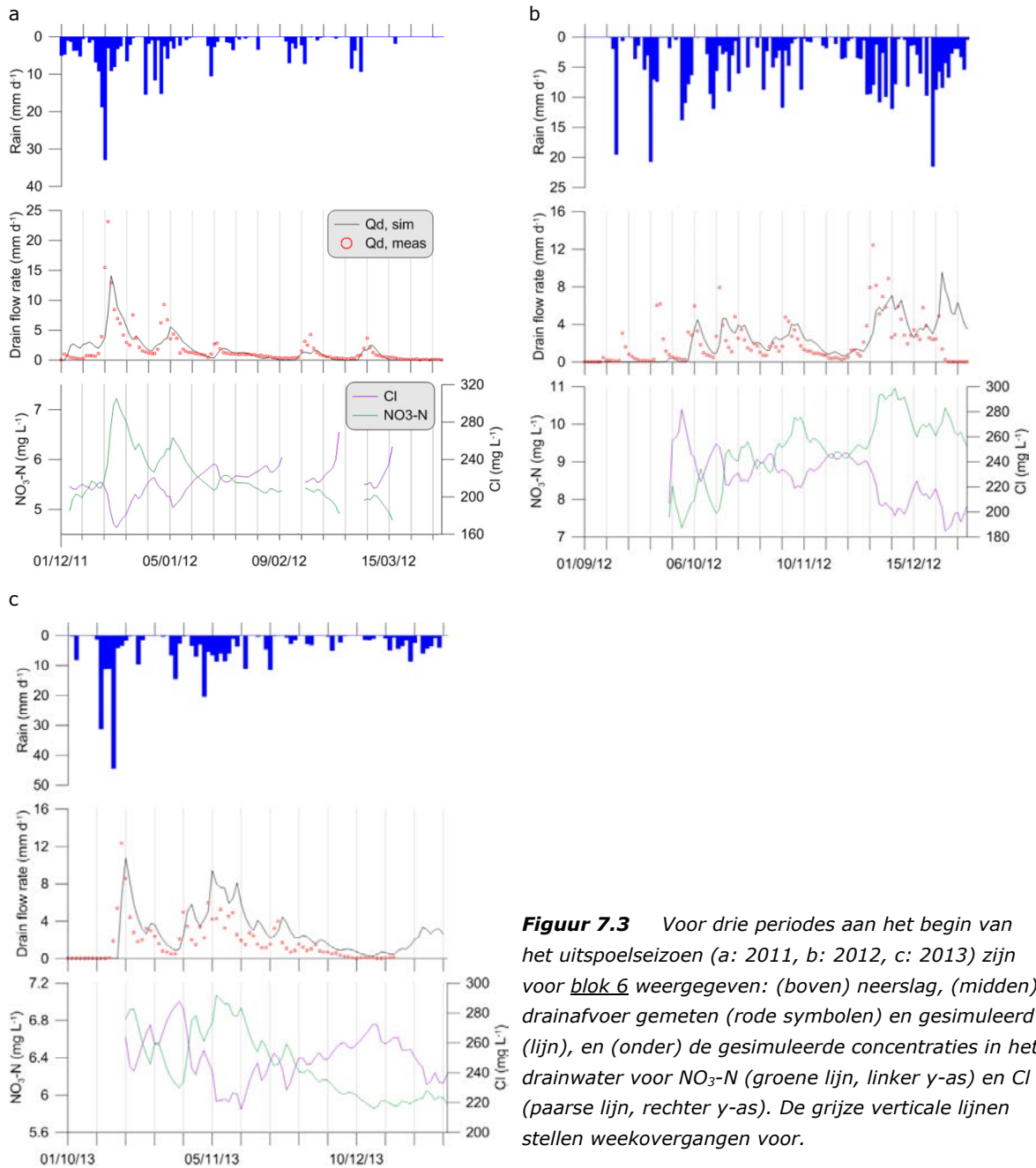
### Modellering drainage blok 6:

Voor de enkelvoudige drain simulaties voor blok 6 is gekeken naar de beginperiode van de drie uitspoelseizoenen (Figuur 7.3).

De startmomenten van de individuele afvoermomenten worden meestal – uitgezonderd de afvoerpieken in begin september 2012 – goed voorspeld door het model.

De overeenkomst tussen de gemeten en gesimuleerde concentraties in het drainwater komen minder goed met elkaar overeen (Bijlage 2). Voor nitraat is de overeenkomst met de gemeten drainwaterkwaliteit minder goed, met name is de dynamiek minder geprononceerd dan gemeten. Hierbij moet worden bedacht dat de geochemische processen in de bodem in het model sterk versimpeld zijn door uit te gaan van een constante netto-denitrificatiesnelheid. In werkelijkheid is deze afhankelijk van veel factoren, zoals de pH, temperatuur, beschikbaarheid en reactiviteit van organische stof en redoxomstandigheden. Zo is het bijvoorbeeld goed denkbaar dat juist tijdens afvoerpieken de condities voor afbraak minder gunstig zijn dan tijdens lage afvoeren (lage pH door neerslag, veel zuurstof dat qua reactiekinetiek gunstiger is voor afbraak dan nitraat, lage temperatuur). Ook zijn er onzekere aannames gedaan over gewasopname. Voor chloride zijn de afwijkingen waarschijnlijk te wijten aan de aannames over ruimtelijke variaties in variabiliteit in de ondergrondgehalten zoals die in de diverse cupjes-bemonsteringen naar voren is gekomen. Vandaar dat we hier alleen aandacht besteden aan de gesimuleerde drainconcentraties om een beter inzicht in het proces te verkrijgen.

Bij aanvang van het uitspoelseizoen 2011-2012 begonnen de drains eerst langzaam te lopen. Medio december 2011 trad een eerste hoge afvoerpiek op. Hierbij werd tijdens de toenemende tak van deze afvoerpiek een toenemende NO<sub>3</sub>-N concentratie in het drainwater gesimuleerd en gelijktijdig een afnemende Cl-concentratie. Tijdens de dalende tak van de afvoerpiek werd het tegenovergestelde gesimuleerd: een afnemende NO<sub>3</sub>-N-concentratie en een toenemende Cl-concentratie. Dit patroon herhaalt zich voor de daaropvolgende afvoermomenten, niet alleen in 2011, maar ook in 2012 en 2013 (Figuur 7.3). Voor een mogelijke verklaring wordt verwezen naar de sectie '*Blok 6 versus Blok 7*'.

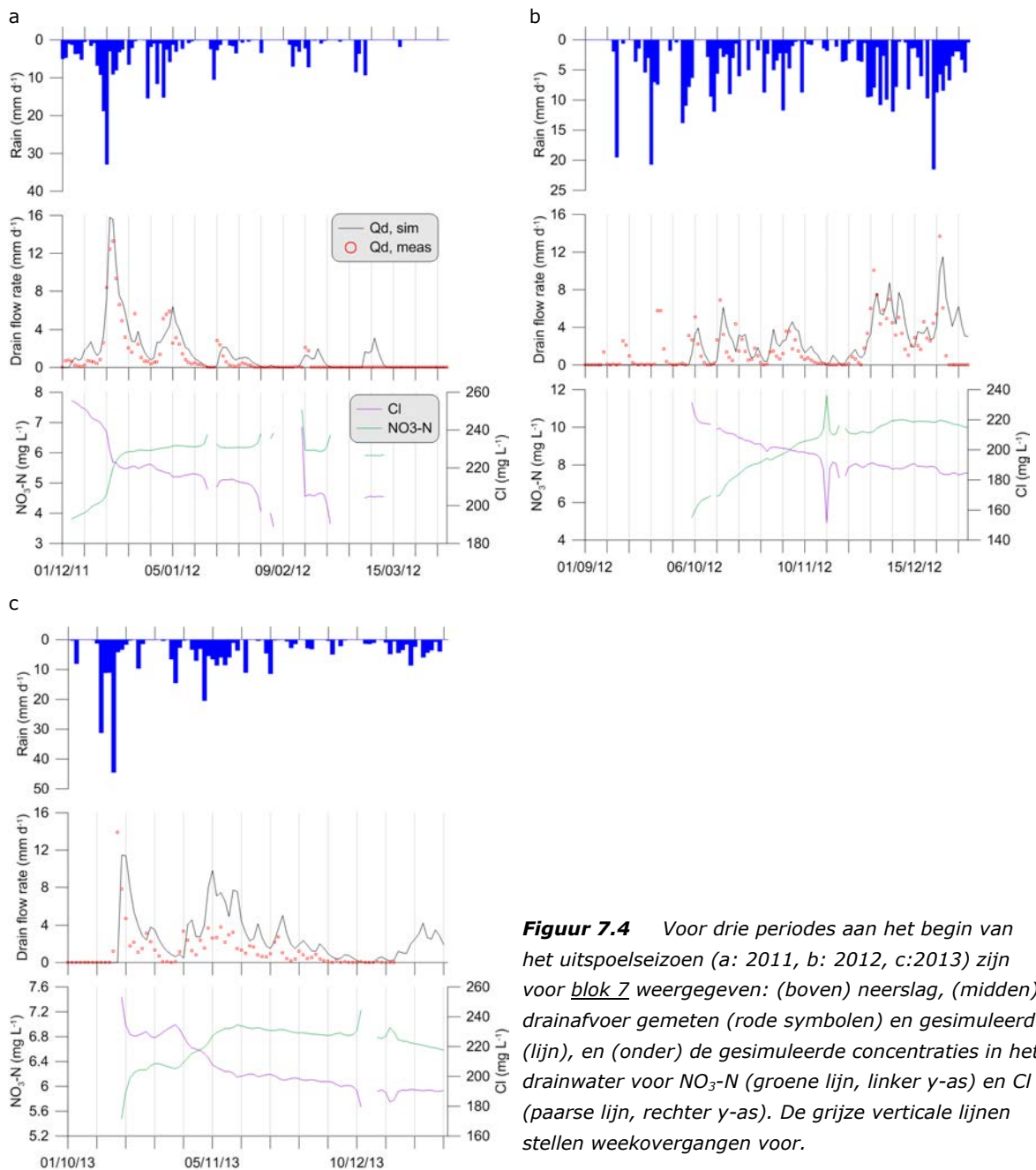


**Figuur 7.3** Voor drie periodes aan het begin van het uitspoelseizoen (a: 2011, b: 2012, c: 2013) zijn voor blok 6 weergegeven: (boven) neerslag, (midden) drainafvoer gemeten (rode symbolen) en gesimuleerd (lijn), en (onder) de gesimuleerde concentraties in het drainwater voor NO<sub>3</sub>-N (groene lijn, linker y-as) en Cl (paarse lijn, rechter y-as). De grijze verticale lijnen stellen weekovergangen voor.



## Modellering drainage blok 6

Voor de enkelvoudige drain simulaties voor blok 7 is gekeken naar de beginperiode van de drie uitspoelseizoenen (Figuur 7.4).

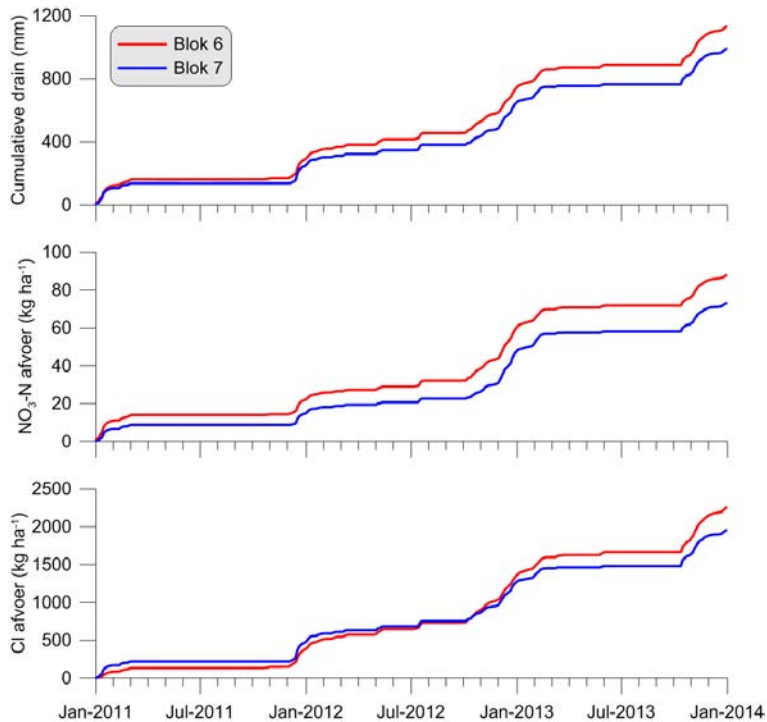


De startmomenten van de individuele afvoermomenten worden meestal – uitgezonderd de afvoerpieken in begin september 2012 – goed voorspeld door het model. Zie verder sectie 'Blok 6 versus Blok 7'. Een klein aandachtspunt betreft het feit dat medio februari 2012 de drainafvoeren een paar keer modelmatig kort achter elkaar af- en aansloegen. De berekende concentraties zijn voor die paar dagen namelijk niet representatief door afrondingsfouten bij delingen van de cumulatieve afvoer door de cumulatieve vracht. Op momenten dat het model een afvoer berekend van < 0.01 mm zijn daarom geen berekende concentraties in de figuren weergegeven.

### Vergelijking modelresultaat peilgestuurde en traditionele drainage: blok 7 versus blok 6

De gesimuleerde cumulatieve drainafvoer voor blok 6 was 14.3% hoger dan voor blok 7 (Figuur 7.5). Ook de gesimuleerde NO<sub>3</sub>-N- en Cl-afvoeren waren hoger in blok 6 dan in blok 7, respectievelijk 20.2% en 15.3% (Figuur 7.5). Dus, in het geval van diepdrainage met een verhoogde

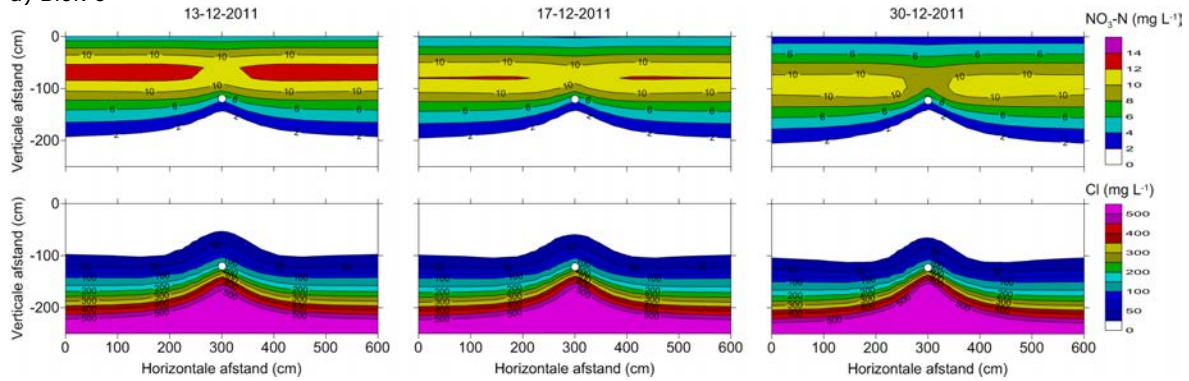
afwateringsbasis (cf. blok 7) wordt minder drainafvoer (water en  $\text{NO}_3\text{-N}$ ) gerealiseerd. De lagere Cl-afvoer is relatief van dezelfde orde als de lagere water afvoer. Voor  $\text{NO}_3\text{-N}$  wordt relatief gezien minder drainafvoer gesimuleerd dan de waterafvoer. Dat betekent dat er in blok 7 meer  $\text{NO}_3\text{-N}$  in het bodemprofiel is achtergebleven dan in blok 6. Dat heeft geleid tot meer denitrificatie in blok 7 dan in blok 6. Dat betekent dus dat hoewel er minder  $\text{NO}_3\text{-N}$  is afgevoerd naar het slootwater, er wel mogelijk meer  $\text{N}_2\text{O}$ -emissie heeft plaatsgevonden. Omdat er aan het eind van de simulatieperiode meer  $\text{NO}_3\text{-N}$  in het bodemprofiel is achtergebleven, blijft dit potentieel beschikbaar voor verliesposten (drainage, denitrificatie).



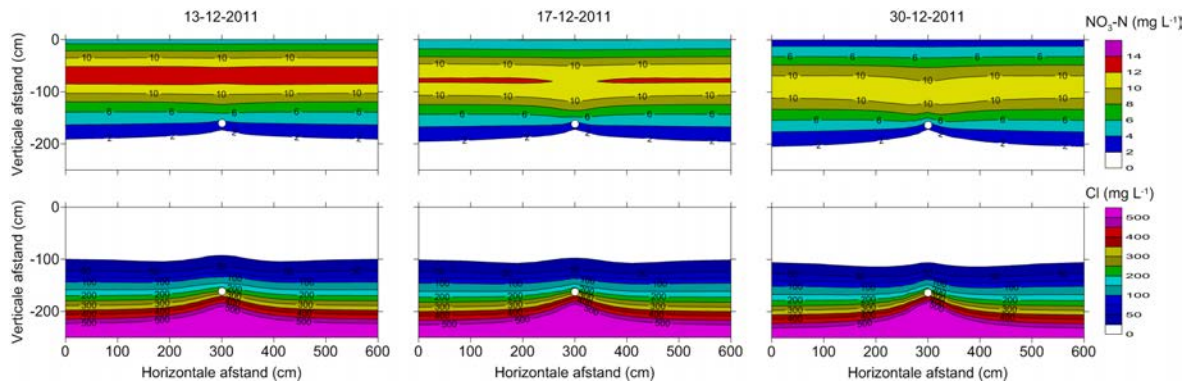
**Figuur 7.5** De gesimuleerde cumulatieve drainafvoer van water,  $\text{NO}_3\text{-N}$  en Cl voor blok 6 en 7.

Om iets meer inzicht te verkrijgen in het fenomeen van oplopende  $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentraties en afnemende Cl-concentraties bij toenemende drainafvoer en vice versa, zijn in Figuur 7.6 de concentratieprofielen voor  $\text{NO}_3\text{-N}$  en Cl voor beide blokken voor drie specifieke momenten rondom de eerste grote piekafvoer van medio december 2011 weergegeven: aan het begin (13-11-2011), ten tijde van de hoogste afvoer snelheid (17-12-2011) en na afloop van de piek (30-11-2011). Er zijn vervormingen van de concentratieprofielen rondom de drain zichtbaar. Met name voor Cl is te zien dat aan het eind van de periode de gradiënt onder de drain is toegenomen: de hogere concentraties liggen dicht bij de onderzijde van de drain. Dat zou erop kunnen duiden dat er relatief meer water van de zijkant en onderzijde de drain in stroomt. Dat zou dan verklaren dat de Cl in de loop de tijd toeneemt en omdat er daar lage concentraties van  $\text{NO}_3\text{-N}$  heersen, zou dat betekenen dat de  $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentraties afnemen. De toename van de  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentratie tijdens de eerste fase van de piekafvoer is lastiger zichtbaar. Bij blok 7 zien we wel dat de  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentratie aan de bovenzijde van de drain iets toeneemt. Deze analyse geeft een eerste kwalitatieve interpretatie van het getoonde fenomeen.

a) Blok 6



b) Blok 7



**Figuur 7.6** Gesimuleerd verloop van de concentratie  $\text{NO}_3\text{-N}$  (bovenste rij) en  $\text{Cl}$  (onderste rij) in de bovenste 250 cm van de bodem over de totale drainafstand voor drie tijdstippen rondom een drain afvoerpiek: aan het begin van de piek (13-12-2011), op het moment dat de afvoer het grootst is (17-12-2011), en nadat de afvoer piek is afgelopen (30-12-2011) voor a) blok 6 en b) blok 7. De drain is zichtbaar als een witte cirkel in het midden.

**Discussie modelresultaten**

Vanwege de verkennende opzet is het model vrij globaal gekalibreerd. Voor het vochttransport is uitgegaan van de parameters die zijn gehanteerd door Staarink die het SWAP-model heeft gekalibreerd voor plot 7 voor de periode 2010-medio 2012. Dit levert een bevredigende overeenstemming met de afvoeren, met name het moment van aanvang van de piekafvoeren. De grondwaterstanden lijken in de zomer volgens het model verder uit te zakken dan de metingen aangeven.

Voor chloride geldt conservatief transport. Met de initiële chloridegehalten die uit cupjes-metingen zijn afgeleid en het zoutgehalte van de kwel uit het watervoerende pakket, worden chloridegehalten in het drainwater voorspeld die qua orde van grootte overeenkomen met de metingen. De dynamiek daarin wordt minder goed voorspeld. Voor nitraat worden de gehalten sterk bepaald door het niveau van de bemesting, de gewasopname, mineralisatie en afbraak in de bodem (denitrificatie). Met de gegevens over de bemesting, de gewasopbrengsten en literatuurwaarde voor denitrificatiesnelheid, werden aanvankelijk gemiddeld te lage nitraatgehalten van het drainwater voorspeld. Daarop is de denitrificatiesnelheid iets naar beneden bijgesteld, zodat de gehalten qua orde van grootte overeenkomen met de metingen. De berekende dynamiek in concentraties tijdens de pieken is, evenals bij chloride, minder groot dan de metingen aangeven.

Meer inzicht in het fenomeen van oplopende  $\text{NO}_3\text{-}$  en afnemende  $\text{Cl}$ -concentraties tijdens de piekafvoeren kan worden verkregen door met het model te analyseren hoe de herkomst en verblijftijdverdeling van het drainwater veranderen gedurende de afvoerpieken. Met FUSSIM2D is dit mogelijk door tracers in de modellering mee te nemen (met voor iedere modellaag/dieptetraject een verschillende tracer).

---

## 7.4 Conclusies modelsimulaties FUSSIM2D

Met een tweedimensionaal simulatiemodel voor waterbeweging en stoffentransport kan stroming naar een drain goed worden gesimuleerd. Voor een praktijksituatie, hier voor proefbedrijf de Rusthoeve op zavelgrond, kan voor gegeven klimatologische omstandigheden de drainafvoer van water vrij goed worden berekend, zowel het tijdstip van aanvang alsook de hoeveelheid per afvoermoment.

Voor stoffen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ , Cl) simuleert het model concentraties in het afgevoerde drainwater die qua orde van grootte overeenstemmen met de (hoogfrequente) metingen, maar de gesimuleerde variaties van de concentraties zijn minder groot dan de metingen aangeven. Wel worden de trends van de concentratieveranderingen die zijn opgetreden tijdens de piekafvoeren redelijk goed voorspeld. Om de dynamiek beter te simuleren, is meer detail nodig over de ruimtelijke verdeling van de initiële concentraties en is voor nitraat waarschijnlijk een meer complexe rekenmethodiek nodig om de geochemische processen die bepalend zijn voor mineralisatie, denitrificatie-adequaat te simuleren. Verder is voor nitraat meer informatie over de gewasopname nodig.

Ondanks deze onzekerheden en afwijkingen tussen gesimuleerde en waargenomen dynamiek in concentraties, geeft het model goed inzicht in de effecten die optreden rondom een individuele piekafvoer en op de effecten van peilgestuurde drainage hierop. Voor een enkelvoudige piekafvoermoment, met name de eerste afvoer na een lange droge periode, wordt waargenomen dat de  $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie stijgt bij toenemende afvoer en dat gelijktijdig de Cl-concentratie afneemt. Wanneer de afvoer zijn hoogste piek heeft bereikt en weer afneemt, treedt het omgekeerde op: afnemende  $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie en toenemende Cl-concentratie. Op basis van gesimuleerde concentratieprofielen rondom de drain is enigszins plausibel gemaakt dat de eerste afvoer van de bovenzijde van de drain afkomstig is met relatief hoger  $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentraties en lage Cl-concentraties. Het omgekeerde effect kan verklaard worden doordat in een later stadium van de afvoer relatief meer water van de zijkant en onderzijde afkomstig is.

Bij niet-peilgestuurde, conventionele drainage (blok 6) is het gestelde fenomeen (kwalitatief) bij vrijwel alle gesimuleerde afvoerpieken zichtbaar geweest, maar niet allemaal in even sterke mate. Bij peilgestuurde diepdrainage (blok 7) is dit nog wel enigszins zichtbaar bij de eerste piekafvoer aan het begin van het uitspoelseizoen, maar is bij latere afvoerpieken veel minder zichtbaar. In totaal geeft peilgestuurde diepdrainage minder afvoer van water en daarmee ook minder afvoer van stikstof.

Het verdient aanbeveling om de hypothese verder te onderbouwen door met het model te analyseren hoe de herkomst en verblijftijdverdeling van het drainwater veranderen gedurende de afvoerpieken.

---

# 8 Extrapolatie met geschiktheidskaarten

## 8.1 Werkwijze

Uit de praktijkproef op de Rusthoeve en andere onderzoeken is een aantal mogelijke voordelen van peilgestuurde drainage naar voren gekomen. Belangrijk zijn het langer vasthouden van water en afbraak van stoffen die het oppervlaktewater verontreinigen waaronder nitraat. Deze voordelen gelden alleen onder bepaalde bodemkundige en hydrologische condities.

Voor het opschalen en breder toepassen van peilgestuurde drainage in Zeeland is het belangrijk om te weten waar peilgestuurde drainage kansrijk is en welke opgaven en knelpunten peilgestuurde drainage mogelijk verhelpt. Voor het onderhavige onderzoek is een geschiktheidskaart gemaakt waarop landbouwgebieden zichtbaar zijn die geschikt zijn voor peilgestuurde drainage. Voor dit onderdeel is samengewerkt met FutureWater en de BakelseStroom in het kader van dit project en het SBIR-project KlimaatAdaptieve Drainage ([www.futurewater.nl/kad](http://www.futurewater.nl/kad)). Voor een uitgebreider overzicht van de geschiktheidskaarten wordt verwezen naar de deelrapportage 'Drainagegeschiktheidskaarten en handvaten voor opschaling'.

De drainagegeschiktheid is als volgt bepaald:

1. Eerst is in beeld gebracht welke landbouwgronden drainagebehoefstig zijn.
2. Vervolgens is beoordeeld of de bodem en hydrologie peilgestuurde drainage toelaten.
3. De combinatie van stap 1 en 2 levert een kaart van landbouwgronden die drainagebehoefstig zijn én geschikt zijn voor peilgestuurde drainage.

Ad 1) De landbouwkundige behoefte aan peilgestuurde drainage is bepaald door een combinatie van bodemtype, grondwatertrap (Gt) en gewas. In Zeeland zijn bijna alle kleigronden met een landbouwkundige functie drainagebehoefstig.

Ad 2) Vervolgens is beoordeeld of bodem en hydrologie peilgestuurde drainage toelaten. De volgende situaties zijn ongeschikt voor peilgestuurde drainage:

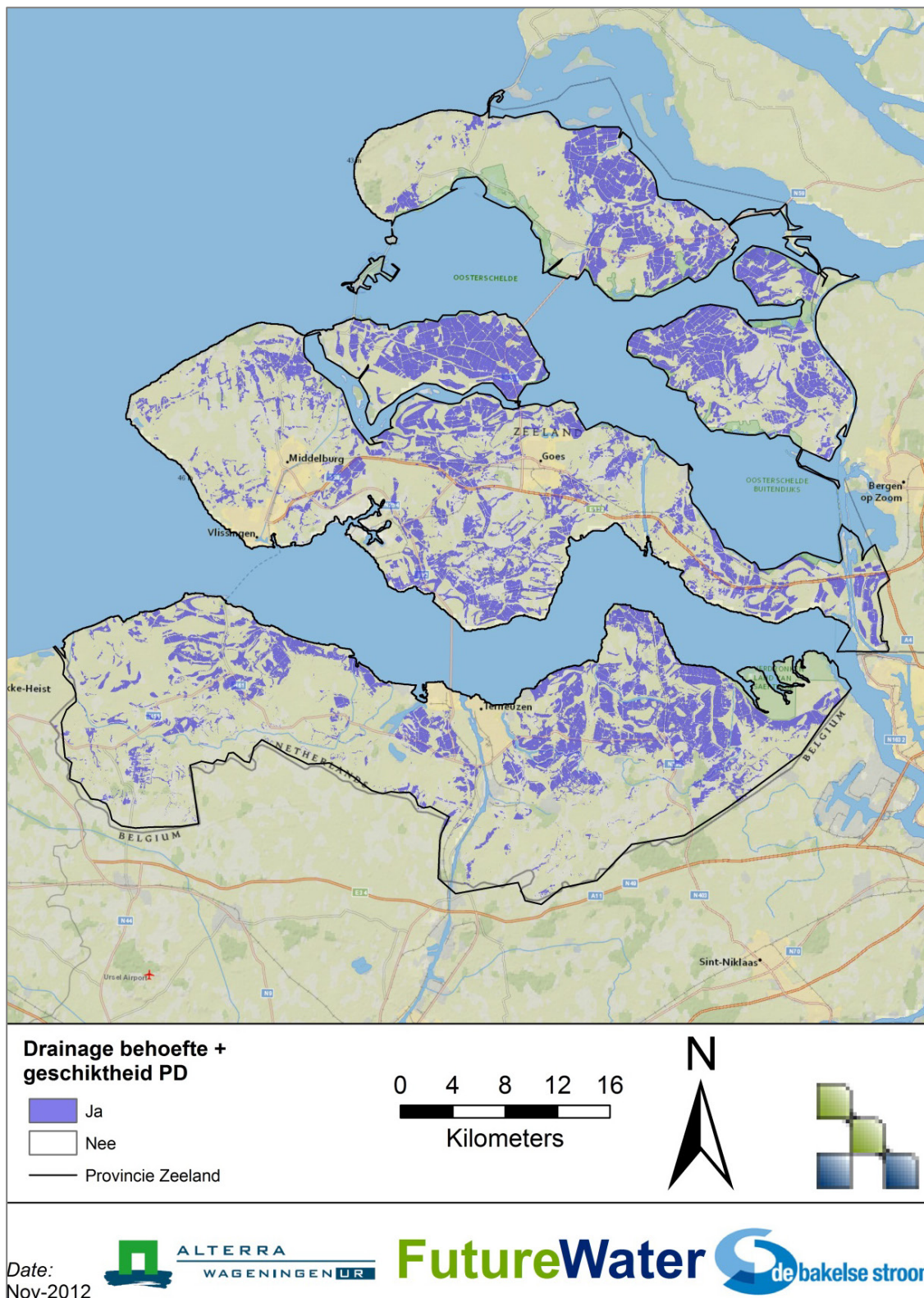
- Klei op draandiepte (in verband met doorlaatvermogen bodem is zwaardere klei een aandachtspunt bij de aanleg van diepere drains al is in Schoondijke, Zeeuws Vlaanderen zelfs infiltratie toegepast met een peilgestuurd drainagesysteem in de klei).
- Keileem op minder dan 0,6 m -v (drains onder storende lagen voeren te weinig water af. Dit criterium is met name van toepassing in andere provincies want keileem komt in Zeeland niet voor).
- Kwel in combinatie met ondiep voorkomende Calais-afzettingen (in verband met extra risico op ijzeraanslag).
- Te grote wegzijging (peilsturing is zinloos als water via de bodem uit het perceel wegstroomt).

Ad 3) De kaarten zijn in ArcGIS gemaakt en als rasterbestand beschikbaar.

## 8.2 Drainagegeschiktheidskaarten

De combinatie van drainagebehoefte, bodem en hydrologie bepaalt in welke gebieden peilgestuurde drainage een oplossing biedt voor de drainagebehoefte in de landbouw en waar deze, gegeven bodem en hydrologie, succesvol toegepast kan worden. Het areaal dat uit de combinatie komt, wordt met name gestuurd door de geschiktheidskaart. De drainagegeschiktheidskaart is weergegeven in Figuur 8.1.





**Figuur 8.1** Drainage geschiktheidskaart: de paarse gebieden zijn landbouwgebieden met een drainagebehoefte waar bodem en hydrologie peilgestuurde drainage mogelijk maken.

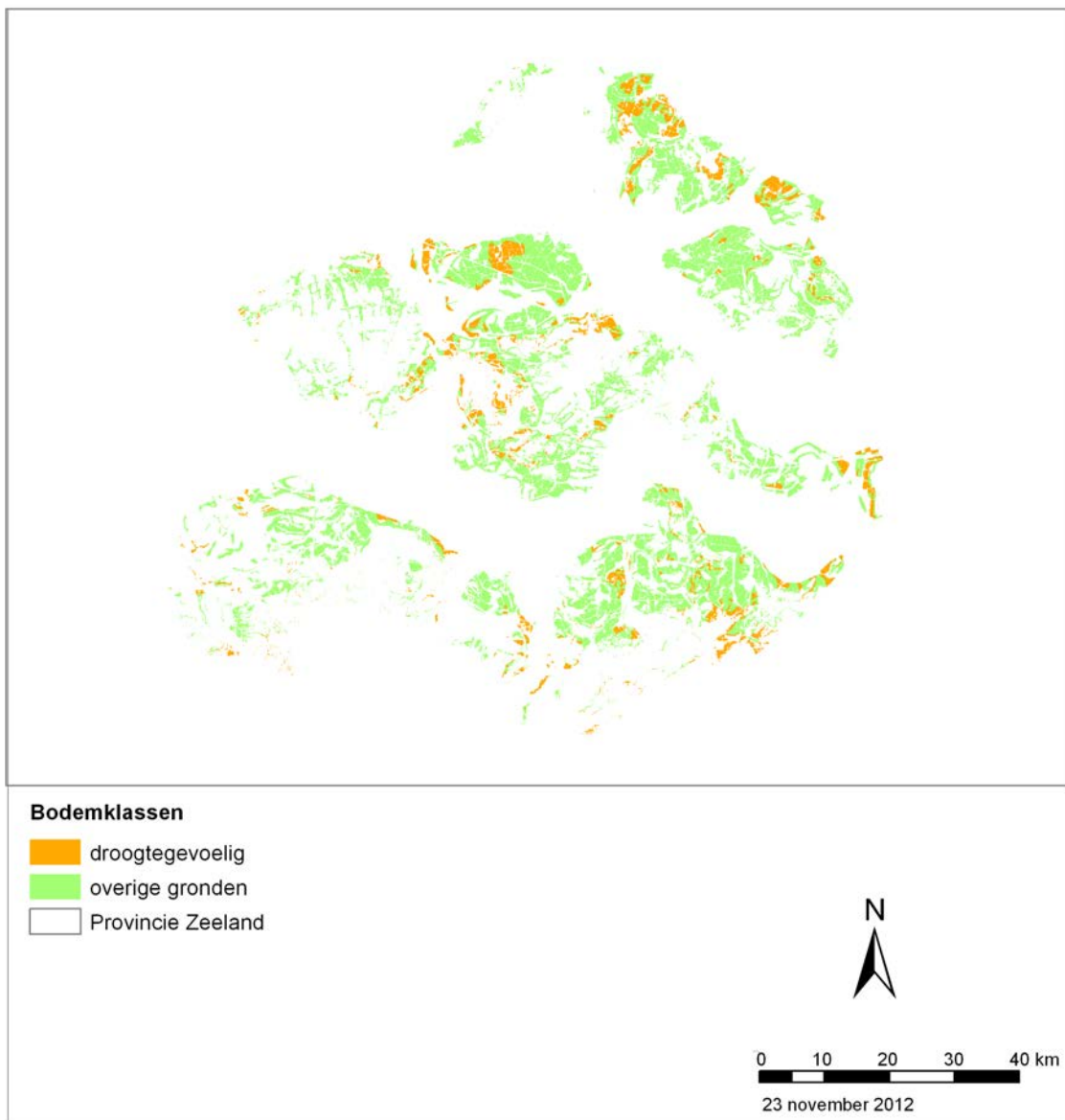
Naar verwachting zullen meer gronden geschikt zijn dan nu op de kaart is aangegeven:

- In delen van Zeeuws-Vlaanderen is de wegzijging mogelijk overschat waardoor wellicht een groter areaal geschikt is.
- Het risico van verstopping door ijzer wordt mogelijk overschat; andere delen van de provincie Zeeland (gebiedsbreed) zullen toch geschikt zijn voor peilgestuurde drainage.

Het verdient daarom aanbeveling om de risico's op verstopping nader te analyseren en de criteria voor de geschiktheidskaarten nader te bezien.

Voor de waterkwaliteitsbeheerder is peilgestuurde drainage met name daar interessant waar de KRW-normen voor nitraat worden overschreden en waar de landbouw een belangrijke bijdrage levert aan nitraatmissies. Uit de beschikbare meetdata blijkt dat in alle bemeten afwateringseenheden de N-gehalten hoger liggen dan de KRW-normen. Er zijn echter geen gebieden met duidelijk hogere N-gehalten. Er zijn dus ook geen gebieden aan te wijzen waar peilgestuurde drainage juist meer of minder bijdraagt aan het verbeteren van de waterkwaliteit.

Peilgestuurde drainage is met name interessant voor agrariërs op droogtegevoelige gronden die kampen met oogstderving of regelmatig moeten beregenen, en daar waar het waterschap zoet water aanvoert voor beregening van de landbouw. In Figuur 7.2 is aangegeven waar peilgestuurde drainage het meest kan bijdragen aan het oplossen van verdrogingsknelpunten door de droogtegevoelige gronden.



**Figuur 8.2** Geschiktheid peilgestuurde drainage als middel tegen droogte van gewassen; de in Figuur 8.1 blauw gearceerde gebieden zijn hier onderverdeeld in wel/niet droogtegevoelig.



---

Daarnaast kan peilgestuurde drainage interessant zijn in gebieden waar de zoet-zoutgrens dicht onder maaiveld ligt. Door instelling van een ondieper ontwateringsniveau wordt infiltratie van neerslagwater bevorderd en kan de beschikbare zoetwaterlaag vergroot worden.

## 8.3 Belemmeringen voor opschaling peilgestuurde drainage

Ter afronding van het onderzoek zijn telefonische interviews uitgevoerd met een aantal drainage-bedrijven die actief zijn in Zeeland. Op basis van deze interviews en gesprekken met de begeleidingsgroep zijn factoren te benoemen waarom peilgestuurde drainage in Zeeland nog relatief weinig wordt toegepast:

- Peilgestuurde drainage is in grote delen van de provincie Zeeland afwezig. Er zijn geen koplopers die een voorbeeld kunnen zijn voor collega-agrariërs. Het lijkt erop dat in gebieden in Zeeuws-Vlaanderen waar peilgestuurde drainage wel wordt toegepast, de agrariërs dit van hun burens overnemen en dat een drainagebedrijf de peilgestuurde drainage stimuleert.
- Er is geen informatie beschikbaar over de baten (in euro's) van peilgestuurde drainage voor agrarische bedrijven op zeekelegronden in Zeeland. Dit maakt het lastig voor de individuele agrariër om een investeringsafweging te maken voor de extra aanlegkosten.
- Een deel van de drainagebedrijven beschikt niet over de juiste materialen en voldoende ervaring om peilgestuurde drainage aan te leggen. Ze zullen het om die reden ook niet adviseren.
- De mogelijkheden voor peilgestuurde drainage zijn niet altijd helder of het is niet duidelijk wanneer peilgestuurde drainage toepasbaar is.
- Daarnaast is het niet algemeen bekend wanneer diepere drains toepasbaar zijn. Agrariërs en drainagebedrijven zijn bang dat diepere drains minder goed zullen functioneren als deze onder slecht doorlatende lagen liggen.
- Storende lagen kunnen via een bodemkundig vooronderzoek in kaart worden gebracht. Dergelijk vooronderzoek wordt in de praktijk niet altijd uitgevoerd, maar wel als de agrariër ervaart dat zijn perceel slecht afwatert of als de draineur dat nodig acht op basis van zijn ervaring in het betreffende gebied.
- Veel agrariërs ervaren het als een probleem dat peilgestuurde drains niet of moeilijker kunnen worden doorgespoten. Ze zijn bang dat drains hierdoor snel dichtslibben. In werkelijkheid zal de ijzeraanslag in de drainbuis minder zijn als de drains permanent onder water liggen; het is in het drainagewater opgeloste ijzer (i.c. ijzerhydroxide) slaat dan pas neer in de regelput zelf.

## 8.4 Mogelijkheden voor stimulering

Tijdens een werksessie met provincie, waterschap en ZLTO zijn mogelijkheden genoemd om peilgestuurde drainage te stimuleren. Subsidies en wetgeving liggen de komende jaren minder voor de hand. Wel zijn er diverse communicatietrajecten om voorlichting te geven zoals de hogescholen, werkgroepen van agrariërs en open dagen/studiedagen, bijvoorbeeld van de Rusthoeve. Daarnaast is het idee geuit om als vervolg op de proef op de Rusthoeve per eiland één demonstratieperceel met peilgestuurde drainage aan te leggen.

---

## 9 Conclusies en aanbevelingen

De centrale vraag is of peilgestuurde drainage op landbouwgronden in Zeeland (zavel/klei, zoute kwel) een effectieve maatregel is om de nutriëntenbelasting terug te dringen en of dit tegelijkertijd landbouwkundige voordelen biedt. Nu de praktijkproef 4 jaar loopt, kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

### 9.1 Opzet en uitvoering van de proef

- In het projectplan was aanvankelijk een perceel voorzien in Graauw. Die locatie bleek bij nader inzien niet geschikt. Door de zoektocht naar een geschikt perceel is later aangevangen met de proef dan voorzien.
- De opzet van de proef is qua configuratie (8 blokken, 4 typen behandelingen, bufferdrains, geïsoleerde meetsloot) geslaagd. De uitvoering in duplo en de meetsloot geven de noodzakelijke houvast om ondanks de heterogene veldsituatie goed inzicht te krijgen in de verschillen tussen de 4 typen drainage en onderliggende processen. Dit is essentieel om betrouwbare uitspraken over de werking en effecten van de drains te kunnen doen. Wel laten de duplo's flinke verschillen zien, wat deels veroorzaakt wordt doordat ze qua detailontwatering niet identiek zijn gebleken.
- De aanleg van de proef was uitvoeringstechnisch niet eenvoudig. Kritisch punt was met name om de drainagebuizen ondanks de maaiveldhoogteverschillen toch exact op de goede hoogte aan te leggen en ze goed aan te sluiten op de verzameldrains. Uit video-inspecties is gebleken dat dit goed is gelukt. Achteraf was het beter geweest om de draindieptes ten opzichte van NAP in te stellen in plaats van ten opzichte van maaiveld. De bufferdrains hadden achteraf beter afzonderlijk qua ontwateringsniveau aangesloten kunnen worden.
- De uitvoering van de metingen kende met name in de opstartfase enkele onverwachte technische knelpunten en storingen. Deze kwamen deels doordat met innovatieve meetapparatuur is gewerkt waarmee nog weinig ervaring in dit soort proeven is opgedaan (SORBI-cellen en ion-selectieve sensoren). Door regelmatige handmatige inspectie, bijstellingen en reparaties van de meetopstellingen zijn de meeste problemen verholpen. Er worden nu redelijk gestroomlijnd continue meetreeksen verzameld van de grondwaterstanden, waterafvoer (drains en meetsloot) en met sensoren enkele chemische parameters van het drainwater en de meetsloot. Handmatige metingen, regelmatige veldinspectie en incidentele reparaties van de meetopstellingen blijven echter noodzakelijk.
- Van de meetopstelling is geleerd dat het belangrijk is om sensoren zodanig te installeren dat ze altijd onder water staan (niet droogvallen). Dit is voor het meten van drainagewater in gebieden met een behoorlijke drooglegging niet zo maar op te lossen, want ook in een soort zwanehals constructie kan droogval optreden tijdens lange droge perioden. Juist als de afvoer weer op gang gaat komen, is het belangrijk dat de sensoren goed zijn afgesteld. Daarvoor is het onontbeerlijk de meetopstellingen uit te rusten met telemetrie.
- Verbeterpunt is de wijze waarop de sorbi-cellen geïnstalleerd moeten worden. Gebleken is dat pas na enkele testopstellingen duidelijk wordt wat een geschikte meetopstelling voor de sorbi-cellen is en met welke afstelling voor de deelstroom van het water die door de cel wordt gevoerd de cellen bruikbare informatie leveren. Dit vergt dus maatwerk en het uitproberen van proefopstellingen. Uiteindelijk is in samenwerking met het RIVM en Deltares met subsidie vanuit een ander project een geschikte opstelling gevonden om stikstof en fosfor te meten. Metingen voor bestrijdingsmiddelen zijn toen vanwege de kosten niet uitgevoerd.
- Bij het onderwerken van de peilbuizen in het perceel is de bovenkant van de peilbuis waaraan de divers hangen niet altijd exact gelijk gebleven. Het is daarom nuttig (nodig) om regelmatig een hoogtemeting uit te voeren.
- De agrarische bedrijfsvoering belemmert de proef niet en vice versa.
- Gaandeweg de proef is toegewerkt naar één database in Excel voor de kwantiteitsgegevens en één voor de waterkwaliteitsgegevens. Alle meetresultaten zijn hierin gestructureerd vastgelegd. De

---

controle en validatie van de data zijn eveneens in de beide databases opgenomen, waarna deze als basis voor de analyse en beantwoording van de onderzoeksvragen kan worden gebruikt.

## 9.2 Beantwoording onderzoeksvragen

Idealiter worden de onderzoeksvragen beantwoord als langjarige reeksen van de gemeten waterkwantiteit en -kwaliteit en gewasopbrengsten beschikbaar zijn. Dan is het risico minder groot dat de waarnemingen sterk beïnvloed zijn door de grilligheid van het weer. Bovendien komen de diverse bodemprocessen en waterkwaliteitspatronen pas na jaren in evenwicht met de nieuwe drainage-situatie. Dit is ook de reden geweest om de oorspronkelijke proefduur van 2 jaar te verlengen met een extra meetjaar. In het eerste jaar waren de metingen mogelijk nog sterk beïnvloed door de nulsituatie vóór aanleg van de nieuwe drains.

Na de meetperiode van 3 jaar kunnen al vrij duidelijke patronen worden gesignaleerd. De meeste onderzoeksvragen zijn al redelijk kwalitatief te beantwoorden. Hieronder worden de vragen en beantwoording daarvan kort beschreven. Deze zijn ook opgenomen en nader onderbouwd in hoofdstuk 6 (grijze kaders).

### *1. Wordt met peilgestuurde drainage extra water in de bodem vastgehouden?*

*Antwoord:* Ja. De hoeveelheid extra berging is van tijdelijke aard en geringer dan de verhoging van de ontwateringsbasis: de gedane verhoging van de ontwateringsbasis met 30 cm resulteerde in een 10 cm hogere grondwaterstand nabij de slootrand en 20 cm in de proefblokken in het midden van het perceel. Uit modelberekeningen blijkt dat de gewasverdamming weinig toeneemt, doordat ook in de uitgangssituatie de vochtvoorziening in de meeste jaren niet beperkend is. Het zavelige profiel heeft een goed waterbergend vermogen en kan ook redelijk capillair naleveren. In jaren met droogte kan in de orde van 5 à 10 mm extra water worden vastgehouden, dat effectief aan gewasverdamming kan bijdragen. Dit levert dan enkele procenten extra gewasopbrengst op.

### *2. Werken voor de beheersing van de grondwaterstanden de verdiept aangelegde drains net zo goed als ondiepe drains?*

*Antwoord:* Ja, want de piekgrondwaterstanden worden in alle blokken snel afgevlakt en de voor ieder proefblok experimenteel vastgestelde drainageweerstanden zijn ongeveer even groot. De diepere drains voeren wel enigszins trager het water af, zij het voldoende snel om de grondwaterstanden effectief te kunnen beheersen.

### *3. Welk aandeel van het neerslagoverschot wordt via de drains afgevoerd?*

*Antwoord:* De drains voeren in het winterhalfjaar twee derde (65%) van het neerslagoverschot af. De rest infiltreert naar het diepere grondwater en wordt lateraal afgevoerd naar de meetsloot. De meetsloot heeft door het lage slootpeil dus een sterk drainerende werking op het grondwater van de aangrenzende blokken 1-4.

### *4. Welke aandeel van de slootafvoer is afkomstig uit drains?*

*Antwoord:* De slootafvoer bestaat voor bijna de helft (50%) uit drainafvoer. Het water in de meetsloot bestaat naast drainafvoer vooral uit laterale ondiepe grondwaterstroming en voor een klein deel uit directe neerslag en zoute kwel.

### *5. Nemen door peilsturing de piekafvoeren naar het oppervlaktewatersysteem af?*

*Antwoord:* Ja, de peilgestuurde blokken geven minder hoge piekafvoeren, maar omdat de peilgestuurde blokken meer water lateraal grondwater afvoeren, lijken de verschillen van de totale afvoer (drains + laterale afvoer grondwater) met de niet-peilgestuurde blokken niet erg groot (in de orde van 10 à 25 % lagere piekafvoer).

### *6. Wat zijn de effecten van peilgestuurde diepe drainage op de kwaliteit van het grondwater?*

*Antwoord:* Uit analyse van de meetgegevens kan worden geconcludeerd dat aanleg van peilgestuurde diepe drains ten opzichte van traditionele drains ertoe leidt dat meer nitraat wordt afgebroken en dat zout kwelwater door het hogere ontwateringsniveau minder omhoogkomt. Dit effect is waarschijnlijk

---

sterk afhankelijk van de geohydrologische situatie (dikte en weerstand deklaag, kwel/wegzijing, aanwezigheid drainerende watergangen).

Met aanvullend (model)onderzoek kan voorspeld worden of en waar dit gunstige effect in andere gebieden zal optreden. Hiervoor zijn dan wel gegevens noodzakelijk over de geohydrologische opbouw, de drainagesituatie en natuurlijk de fysische en chemische samenstelling van de bodem (tot circa 2 m).

*7. Wat zijn de effecten van peilgestuurde diepe drainage op de kwaliteit van het drainagewater?*

*Antwoord:* Er zijn duidelijke verschillen in de chloride- en nitraatgehalten voor de behandelingen. De chlorideconcentratie in het bodemvocht neemt sterk toe met de diepte en juist rond de draandiepte. Dit leidt tot grote verschillen in het zoutgehalte in het drainwater. De metingen van de chlorideconcentraties zijn niet eenduidig. Bij de verdiepte draandiepte zijn bij het conventionele peil gemiddeld de zoutgehalten aanzienlijk hoger. De verdiepte drains in de peilgestuurde blokken geven echter lage concentraties.

De behandelingen met de verdiepte drains geven de laagste nitraatconcentraties. Hier is ook de afbraak het hoogst, gezien de isotopenverhoudingen van stikstof. De dieper gelegen drains voeren derhalve meer gereduceerd grondwater af, daardoor is de chemische samenstelling anders (hogere gehalten ammonium, ijzer, fosfaat, arseen) en is meer nitraat door denitrificatie afgebroken.

*8. Treedt tijdens hevige afvoer kortsluitstroming op van neerslagwater naar de drains bijvoorbeeld via scheuren in de klei?*

*Antwoord:* Tijdens het najaar 2013 is met een hoge frequentie de kwaliteit van het drainwater gemeten. Hierbij komt naar voren dat bij een afvoerpiek na een periode van droogte nitraat aanvankelijk stijgt en chloride dan juist afneemt. Dit effect wordt afgevlakt bij diepe drains. De concentratieverschillen duiden niet op scheurvorming. Na circa 1 à 2 dagen zijn de concentraties weer op het normale niveau.

*9. Wat zijn de effecten van peilgestuurde drainage op waterkwaliteit in het oppervlaktewatersysteem? M.a.w.: hoe verhoudt de kwaliteit van het drainagewater zich met het ontvangende oppervlaktewater?*

*Antwoord:* Het drainagewater van de blokken heeft voor stikstof een waterkwaliteit die vergelijkbaar is met het omliggende watersysteem. Hoe het drainagewater zich voor andere stofgroepen verhoudt tot het ontvangende oppervlaktewater is niet onderzocht. De waarneming dat de verdiepte aangelegde drains meer gereduceerd water afvoeren en dat met het hogere ontwateringsniveau lagere zoutvrachten worden afgevoerd, zijn aanwijzingen dat peilgestuurde drainage een belangrijk effect kan hebben op de kwaliteit van het ontvangende oppervlaktewater. Meer nitraatafbraak door verdiepte drains is enerzijds positief voor de regionale waterkwaliteit, vooral voor percelen met een groot nutriëntenoverschot of uitspoelingsgevoelige gronden. Dat verdiepte drains gepaard gaan met de afvoer van meer gereduceerd drainwater kan anderzijds ook nadelig zijn voor de regionale waterkwaliteit, omdat daarin meer fosfaat is opgelost. Dit kan echter grotendeels worden gecompenseerd doordat het gereduceerde water ook opgelost ijzer bevat, dat bij het uittreden van het water neerslaat en dan een groot deel van het fosfaat aan zich bindt.

*10. Leidt aanleg van peilgestuurde drains tot meer verstoring van de bodem en navenante oogstderiving dan traditionele drainage?*

*Antwoord:* Nee (al is dit niet expliciet onderzocht), behalve mogelijk in het eerste jaar. Er wordt bij peilgestuurde drainage op kortere afstand gedraineerd en dat leidt in principe tot meer verstoring, wat echter door de kortere drainafstanden tot minder problemen leidt. Na één groeiseizoen lijkt de bodemstructuur zich hersteld te hebben.

*11. Leidt peilgestuurde drainage tot hogere gewasopbrengsten?*

*Antwoord:* Nee, in dit type bodem is de vochtvoorziening goed doordat de bodem relatief veel water in de onverzadigde zone kan bergen.

*12. Leidt peilgestuurde drainage tot een betere berijdbaarheid van het perceel in natte perioden?*

*Antwoord:* Door de intensievere drainage (kleinere drainafstand) zullen de grondwaterstanden sneller dalen na een intensieve bui. De praktijkervaring van de Rusthoeve is dat er geen merkbare verschillen zijn in de behandelingen. Dit komt overeen met de uitkomsten van het modelonderzoek met SWAP

van Hendrik Staarink, waarin berekend is dat de bereikbaarheid bij de hier gehanteerde peilopzet niet verslechtert. In perioden met landbewerkingen kan vooraf tijdelijk het peil verlaagd worden.

De effecten van de 4 typen drainage zijn in het onderstaande schema afgezet ten opzichte van de referentie (blok 6): conventioneel peil en normale draandiepte. De criteria refereren aan de onderzoeksvragen; de nummers daarvan zijn tussen haakjes weergegeven.

		meest representatieve blokken	6	1	2 & 3	7 & 8
		peilgestuurd (30 cm opzet)	nee	ja	nee	Ja
		verdiepte aanleg drainbuizen	nee	nee	ja	Ja
Bedrijf	werking van de drains		0	0	0	0
	bereikbaarheid perceel		0	0	0	0
	vochtvoorziening gewas / minder droogtestress		0	0/+	0	0/+
waterkwantiteit	waterconservering: grondwaterstand voorjaar		0	+	0	+
	waterconservering: minder drainafvoer		0	+	0	+
	verwerking hevige neerslag / infiltratie capaciteit		0	0	0	0
	aftoppen piekafvoeren		0	+	0/+	+
water kwaliteit	meer denitrificatie / minder nitraat uitspoeling		0	0	+	+
	nitraat gehalte drainwater		0	0	+	++
	chloride gehalte drainwater		0	0	-	+
	pieken in nitraat concentraties bij first-flush		0	0	+	+
	stikstofbelasting (nitraat) oppervlaktewater		0	0	0/+	++
	chloridebelasting oppervlaktewater		0	+	0	++

0 geen effect

0/+ positief, niet significant

+ positief, significant

++ sterk positief

### 9.3 Opschaling resultaten naar geschiktheidskaart

Voor dit onderzoek zijn drainagegeschiktheidskaarten gemaakt die een ruimtelijk beeld geven van welke gebieden in Zeeland geschikt zijn voor peilgestuurde drainage. De kaarten die zijn gepresenteerd in hoofdstuk 7 kunnen worden gebruikt voor beleidsmatige toepassingen. Ook geven ze een indicatie van de geschiktheid op perceelniveau. Voor daadwerkelijke toepassing wordt geadviseerd een vooronderzoek uit te voeren.

Een belangrijke belemmering voor de bredere toepassing van peilgestuurde drainage in Zeeland is dat het systeem op veel eilanden nog helemaal niet wordt toegepast. Hierdoor kunnen agrariërs niet bij elkaar kijken hoe het systeem werkt en het zelf ook laten aanleggen als het bevalt. Drainagebedrijven beschikken nog niet altijd over ervaring en de juiste materialen. Ervaringen die zijn opgedaan in de Praktijkproef op de Rusthoeve en andere drainageprojecten (Regelbare Drainage/STOWA en SBIR-KAD/FutureWater) kunnen hierbij goed gebruikt worden.

Geadviseerd wordt om de komende periode de baten, waaronder hogere oogsten, beter in beeld te brengen, zodat agrariërs een investeringsafweging kunnen maken tussen peilgestuurde en conventionele drainage.

---

Tot slot zijn de voor- en nadelen van peilgestuurde drainage niet goed bekend bij agrariërs. Daarom is in de deelrapportage 'Drainagegeschiktheidskaarten en handvaten voor opschaling' een handreiking opgesteld met de resultaten van de praktijkproef op de Rusthoeve en potentiële voordelen. Dit kan gebruikt worden voor communicatie richting de landbouwsector in Zeeland.

## 9.4 Aanbevelingen voor de proeflocatie

### *Operationeel houden proeflocatie*

Voor de inrichting van de proeflocatie is een aanzienlijke investering gedaan voor het ontwerp en de aanleg van het drainage- en meetsysteem. Tijdens de meetperiode is ervaring opgedaan en is locatie-specifieke kennis verkregen. Het systeem werkt nu goed. Het verdient aanbeveling het proefveld geschikt te houden voor mogelijke (vervolg)proeven. Dit om zo veel mogelijk rendement uit de gedane investering te halen.

De peilbuizen en poreuze cups zijn in de percelen zodanig onder het maaiveld afgewerkt dat deze met de gewone grondbewerkingen intact blijven. De regelputten zijn in 2014 zodanig afgewerkt dat alle meetapparatuur is verwijderd en het drainwater vanuit de regelputten onder vrij verval naar de sloot afvoeren. Maar mede omdat de stroomvoorziening weer snel geregeld kan worden, kunnen afvoermetingen en kwaliteitsmetingen vrij eenvoudig weer worden opgestart.

Vergeleken met internationale proeven naar regelbare drainage is de meetperiode van 4 jaar nog kort. Het langer doorzetten van de metingen zal derhalve ook meer zekerheid geven over de effecten die optreden tijdens sterk afwijkende weerjaren, weersextremen en andere bodembewerkingen.

### *Benutten voor wetenschappelijke experimenten*

De proeflocatie kan ook zeer goed benut worden om wetenschappelijke experimenten uit te voeren. Bijvoorbeeld voor infiltratie van oppervlaktewater via drains om zo een grotere zoetwatervoorraad in de bodem op te bouwen. Dit is met name relevant voor gebieden in de zuidwestelijke delta, waar bij extreme droogte (gelet op klimaatverandering) de zoetwaterlens tijdens het groeiseizoen uitgeput kan raken (verzilting). Zo kan verdere kennis worden ontwikkeld over de sturing van regelbare drainage op de zoet-zoutverdeling van bodemvocht, de vocht- en nutriëntenhuishouding en daarmee op factoren die bepalend zijn voor gewasopbrengsten en diffuse belasting van grond- en oppervlaktewater met nutriënten.

### *Aandacht voor modelleren en extrapoleren*

Het accent van de proef lag sterk op het uitvoeren van metingen. Bij de interpretatie is veel aandacht besteed aan de controle en validatie van de meetresultaten en bewerkingen en interpolaties voor het berekenen van water-, stofbalansen en vrachten. Aan modellering is naar verhouding weinig aandacht en tijd besteed. Aanbevolen wordt om op basis van de verzamelde data modellen op te zetten. De inzet van modellen vergroot het inzicht in de werking van de verschillende behandelingen en om varianten op deze behandelingen door te rekenen. Modellering is ook behulpzaam bij de extrapolatie van de verkregen inzichten naar andere gebieden in de zuidwestelijke delta. Daarbij geldt dat de hier verzamelde meetdata zich goed lenen om de state-of-the-art agro-hydrologische modellen verder te ontwikkelen en toe te werken naar een integraal modelinstrumentarium voor de gewasgroei, rekening houdend met de beschikbaarheid van water (droogteschade), natschade (zuurstofstress), mineralen (N, P, K) en zoutschade.

### *Regelbare drainage op andere eilanden*

Gebleken is dat regelbare drainage duidelijke voordelen biedt voor het watersysteem en voor agrariërs een goede mogelijkheid biedt om, ten opzichte van niet regelbare drainage, te sturen op een zo gunstig mogelijke vochtvoorziening en ontwatering met minder uitspoeling van nutriënten en minder risico's voor zoutschade. Daarom wordt aanbevolen om regelbare drainage ook op andere eilanden te stimuleren. Voor een brede implementatie is het gunstig als goede voorbeelden dicht in de buurt gedemonstreerd kunnen worden. Daar waar regelbare drainage als pilot wordt aangelegd, verdient het aanbeveling om het ontwerp en de aanleg te begeleiden en daarbij met name na te gaan welke draindiepte en configuratie gunstig zijn voor zowel de drainerende werking als de waterkwaliteit en hoe met geringe kosten de regelbare drainage gemonitord kan worden.

---

# Literatuur

## Deelrapporten praktijkproef regelbare drainage proefboerderij Rusthoeve

1. GIS-analyse t.b.v. keuze geschikt perceel. H.T.L. Massop (Alterra), Grontmij rapport 2009.
2. Vooronderzoek en detailontwerp, M.L. van der Schans<sup>1</sup>, C van Beek<sup>2</sup>, F. de Vries<sup>2</sup>, I.G.A.M. Noij<sup>2</sup>, M. van der Werf<sup>2</sup>, W van Dijk<sup>3</sup>, Grontmij rapport juni 2011.
3. Aanleg drainagesysteem. L. Stuyt, P.N.M. Schipper en M.L. van der Schans<sup>1</sup>, Grontmij rapport 2011.
4. Tussentijdse evaluatie meetresultaten winterseizoen 2010-2011. M.L. van der Schans<sup>1</sup>, J. Harmsen<sup>2</sup> en L. Stuyt<sup>2</sup>, Grontmij rapport april 2011.
5. Evaluatie functioneren ion-selectieve elektroden. J. Harmsen<sup>2</sup>, J. van Kleef<sup>2</sup> en M.L. van der Schans<sup>1</sup>, Grontmij rapport 2011.
6. Landbouwkundige aspecten praktijkproef Rusthoeve 2010. R. van der Schoot<sup>3</sup> en A.J. de Buck<sup>3</sup>, Grontmij rapport 2010.
7. Landbouwkundige aspecten Praktijkproef Rusthoeve 2011, R. van der Schoot<sup>3</sup> en A.J. de Buck<sup>3</sup>, Grontmij rapport 2012.
8. Verslag veldproef Rusthoeve en controle meetgegevens. M.L. van der Schans<sup>1</sup>, J. van Kleef<sup>2</sup> en E. Burger<sup>1</sup>, Grontmij rapport 2012.
9. Verslag veldproef Rusthoeve en controle meetgegevens 2010-2014, P. Dik<sup>1</sup> en P.N.M. Schipper<sup>1</sup>, Grontmij rapport 2014.
10. Drainagegeschiktheidskaarten en handvaten voor opschaling. G.A.P.H. van den Eertwegh<sup>4</sup>, J. van Bakel<sup>5</sup>, L. Stuyt<sup>2</sup> en M.L. van der Schans<sup>1</sup>, Grontmij rapport december 2012.
11. Eindrapportage praktijkproef Rusthoeve, P.N.M. Schipper<sup>1, 2</sup> en M.L. van der Schans<sup>1</sup>, Grontmij 2012.

<sup>1</sup> Grontmij

<sup>2</sup> Alterra Wageningen UR

<sup>3</sup> Wageningen UR-PPO

<sup>4</sup> FutureWater

<sup>5</sup> Bakelse Stroom

## Modellering FUSSIM2D

- Dik, P.E., P. Schipper & J. van Kleef, 2014. Verslag veldproef en controle meetgegevens. Praktijkproef peilgestuurde diepdrainage in Zeeland. Grontmij, De Bilt.
- Heinen, M., 2001. FUSSIM2: brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. *Agronomie* 21: 285-296.
- Heinen, M. 2014. Correction of the Vimoke-Taylor concept representing drains in a numerical simulation model. *Vadose Zone Journal*, doi:10.2136/vzj2014.06.0066
- Heinen, M. and P. de Willigen, 1998. FUSSIM2 A two-dimensional simulation model for water flow, solute transport and root uptake of water and nutrients in partly unsaturated porous media, *Quantitative Approaches in Systems Analysis* No. 20, DLO Research Institute for Agrobiology and Soil Fertility and the C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen, The Netherlands, 140 p.
- Heinen, M. and P. de Willigen (eds.), 2001. FUSSIM2 version 5. New features and updated user's guide. Alterra rapport 363, Alterra, Wageningen, 164 p.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks & C.M.J. Jacobs, 2008. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Alterra-report 1649, Alterra, Wageningen.
- Schipper, P.N.M. & M.L. van der Schans, 2012. Eindrapportage Praktijkproef Rusthoeve. Onderzoek naar waterkwaliteitseffecten van peilgestuurde diepe drainage Zeeland. Grontmij, De Bilt, Grontmij project nummer 268353. Documentnummer GM-0083591. Versie D2.
- Staarink, H., 2014. Water conservation and controlled drainage. A modelling study for an experimental field in the Netherlands. Master Thesis, Water Resources Management Group, Wageningen University.



---

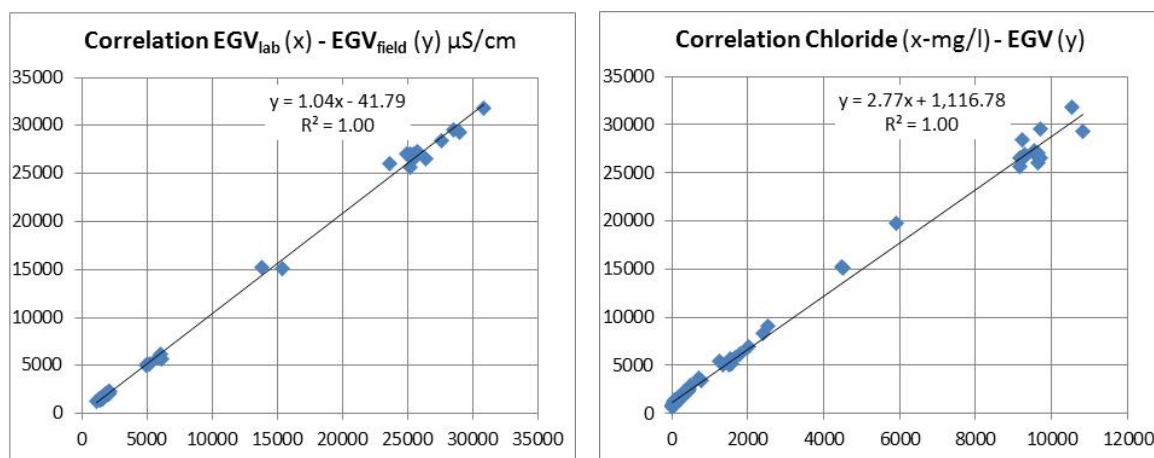
Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Goot & J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland. de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra-rapport 153, Alterra, Wageningen.

### Literatuur eindrapport

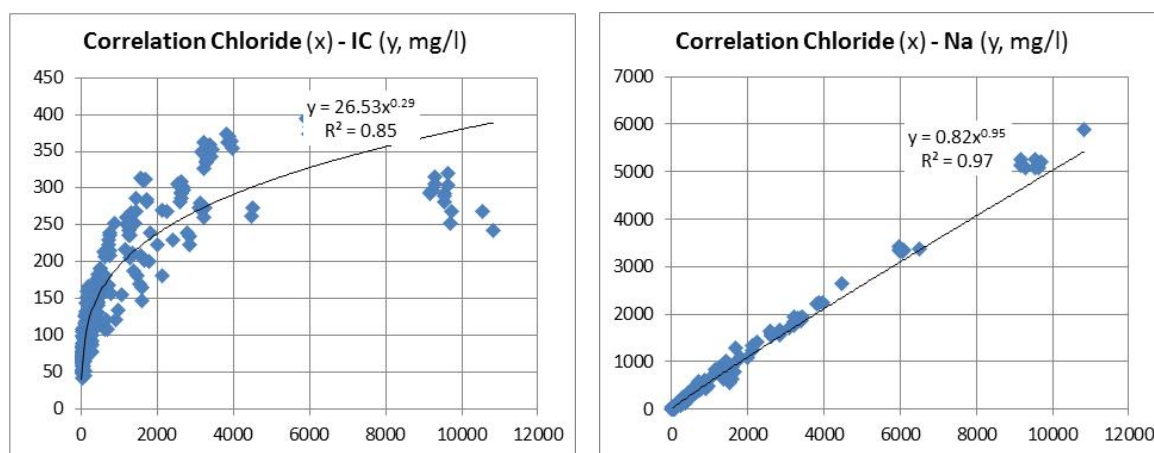
- Bakel, P.J.T. van, J. Peerboom en L.C.P.M. Stuyt, 2007. *Draineren tegen verdroging en voor een beter milieu: paradox of werkelijkheid*. H2O 1: 25-28. Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer.
- Bakel, P.J.T. van, E.M.P.M. van Boekel en G.J. Noij, 2008. *Modelonderzoek naar effecten van conventionele en samengestelde, peilgestuurde drainage op de hydrologie en nutriëntenbelasting*. Alterra-rapport 1647, april 2008.
- Bedard-Haughn, A., J.W. van Groenigen en C. van Kessel, 2003. Tracing <sup>15</sup>N through landscapes: potential uses and precautions. *Journal of Hydrology* 272 p. 175–190.
- Eertwegh, G.A.P.H. van den, J.R. Hoekstra en C.R. Meinardi, 1999. *Praktijkproef Nutriëntenbalans. Nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater via drainagewater van akkerbouwpercelen op zavelgrond*. Wageningen Universiteit, sectie Waterhuishouding, rapportnr. 75. Provincie Zeeland, Directie Ruimte, Milieu en Water. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Laboratorium voor bodem- en grondwateronderzoek. Eindrapport juni 1999.
- Evans, R.O., R.W. Skaggs en J.W. Giliam, 1995. *Controlled versus conventional drainage effects on water quality*. *Journal Of Irrigation And Drainage Engineering*. 121(4), 271–276. July/August 1995.
- Essink, G.E., P. de Louw, S. Stevens, B. de Veen, C. Prevo, V. Marconi en B. Goes, 2009. Voorkomen en dynamiek van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland – resultaten van een verkennende en provinciedekkende meetcampagne. TNO-rapport 2007-U-R0925/A.
- Griffioen, J., 2003. Kation-uitwisselingspatronen bij zoet/zout grondwaterverplaatsingen. *Stromingen* vol. 9 nr. 4
- Hooghart, J.C. en W.N. Lablans, 1988. *Van Penman naar Makkink; een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. Commissie voor hydrologisch onderzoek TNO, Rapporten en nota's No. 19, CHO TNO, 's-Gravenhage.
- Oenema, O., L. van Liere en O. Schoumans, 2005. *Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands*. *Journal of Hydrology*, Vol. 304, Issues 1–4, pp. 289-301.
- Stark, J.M. and S.C. Hart, 1996. Diffusion technique for preparing salt solutions, Kjeldahl digests, and persulfate digests for Nitrogen-15 analysis. *Soil Science Society American Journal* 60: 1846-1855.
- Staveren, G. en J. Velstra, 2012. Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland. Kennis programma Klimaat voor Ruimte. Projectnummer N20090333.
- Stuyfzand, P.J., 2008. Base Exchange Indices as Indicators of Salinization or Freshening of (Coastal) Aquifers. 20th Salt Water Intrusion Meeting, June 23-27, 2008 □ Naples, Florida, USA.
- Stuyt, L.C.P.M., F.J.E. van der Bolt, W.B. Snellen, P. Groenendijk, P.N.M. Schipper en J. Harmsen, 2012. Meer water met regelbare drainage?. STOWA 2012-33. ISBN 978.90.5773.570.7.
- 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, Wageningen.
- van Beek, C.L., M. Heinen and O.A. Clevering, 2007. Reduced nitrate concentrations in shallow ground water under a non-fertilised grass buffer strip. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 79: 81-91.
- Veldhuizen, A.A., P.J.T. van Bakel, T. Kroon, F. de Vries en H.Th.L. Massop, 2008. *Conceptualisatie en parameterisatie van landgebruik, bodem, berekening en buisdrainage in het NHI*. *Stromingen* jaargang 14, nummer 4. 2008
- Wesström, I. en I. Messing, 2007. *Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences. Uppsala, Sweden. *Agricultural Water Management* Volume 87, Issue 3, 16 February 2007, Pages 229–240.

# Bijlage 1 Grafieken en tabellen waterkwaliteit

Correlaties en patronen kwaliteit bodemvocht en grondwater.

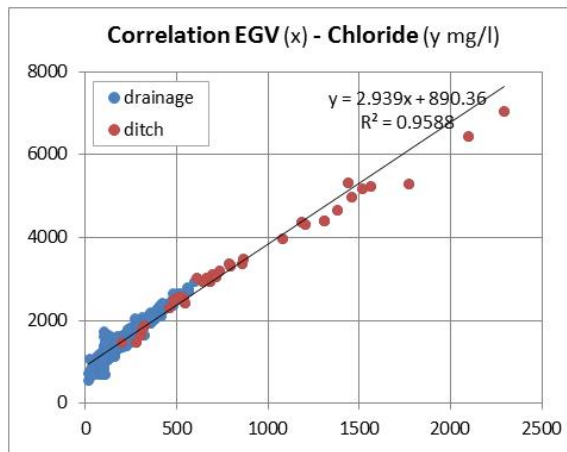
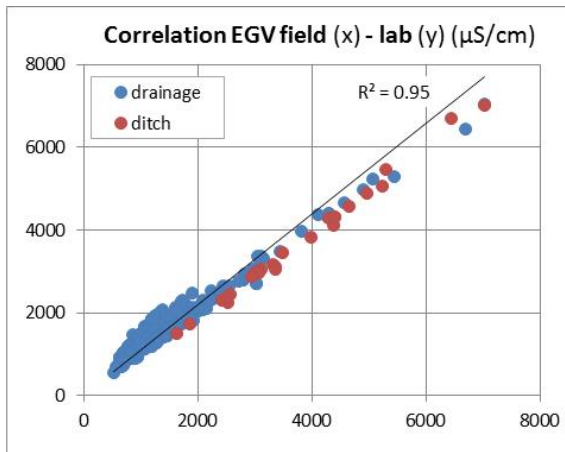


De correlaties tussen de geleidbaarheid (EGV) zoals gemeten in het veld komen goed overeen met de EGV-bepaling in het laboratorium van dezelfde watermonsters. Ook is er, zoals kan worden verwacht, een goede correlatie tussen het chloridegehalte en de geleidbaarheid.

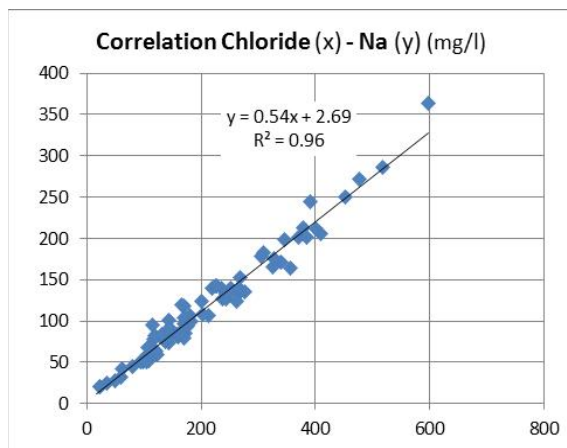
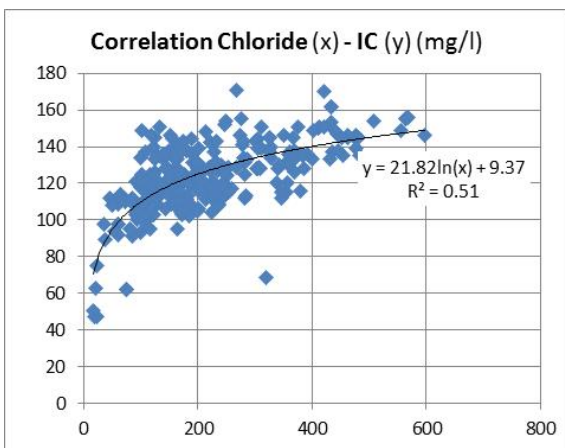


De correlatie tussen het chloridegehalte en anorganisch koolstof (IC) duidt erop dat naarmate het bodemvocht en het grondwater zouter wordt, het ook meer gerijpt en daardoor gebufferd is. Omdat de oorsprong van het zout voornamelijk het mariene-achtige (NaCl-type) water in het watervoerende pakket is, correleert het chloridegehalte niet goed met calcium, maar wel met natrium (Na).

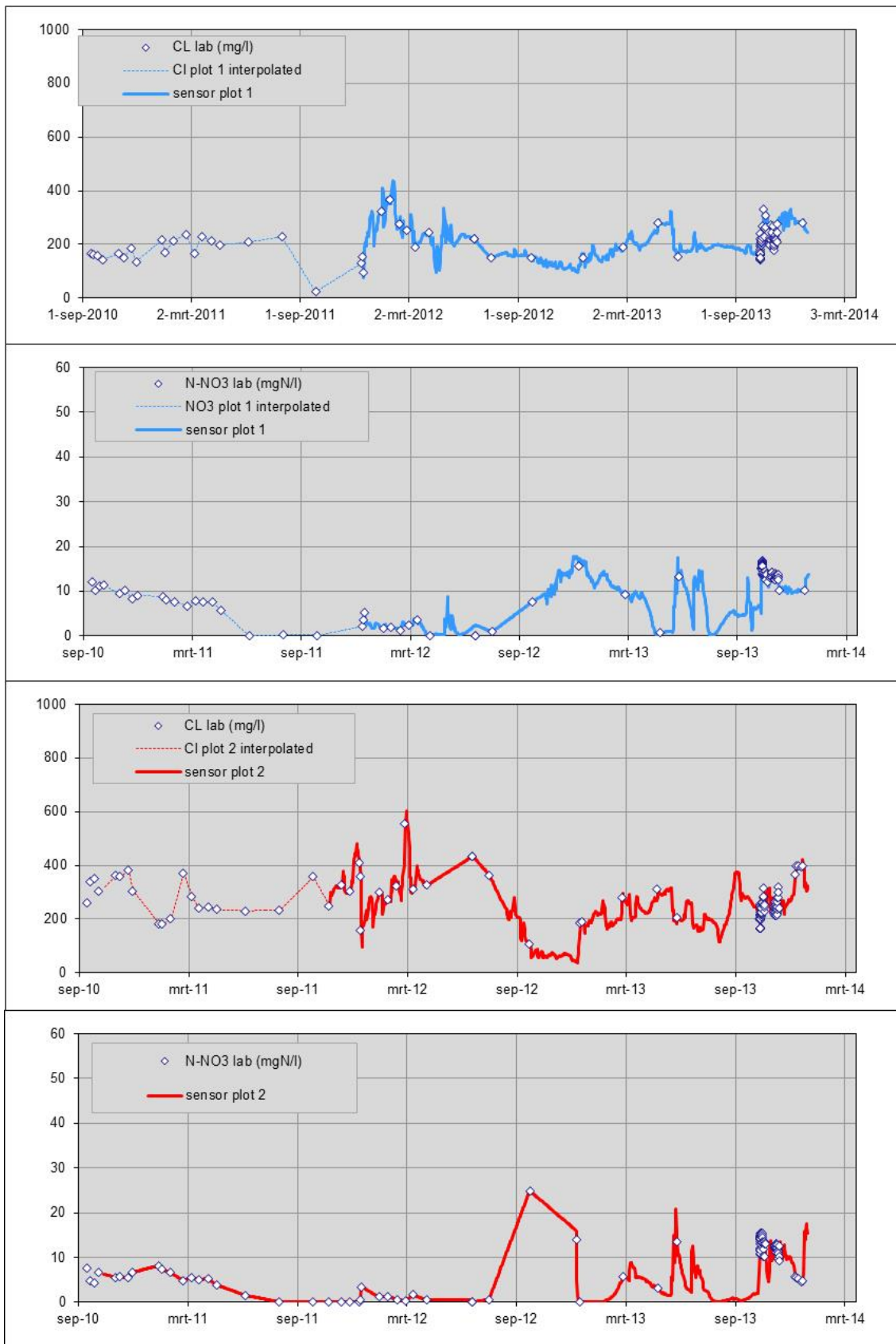
Correlaties en patronen kwaliteit bodemvocht en grondwater.



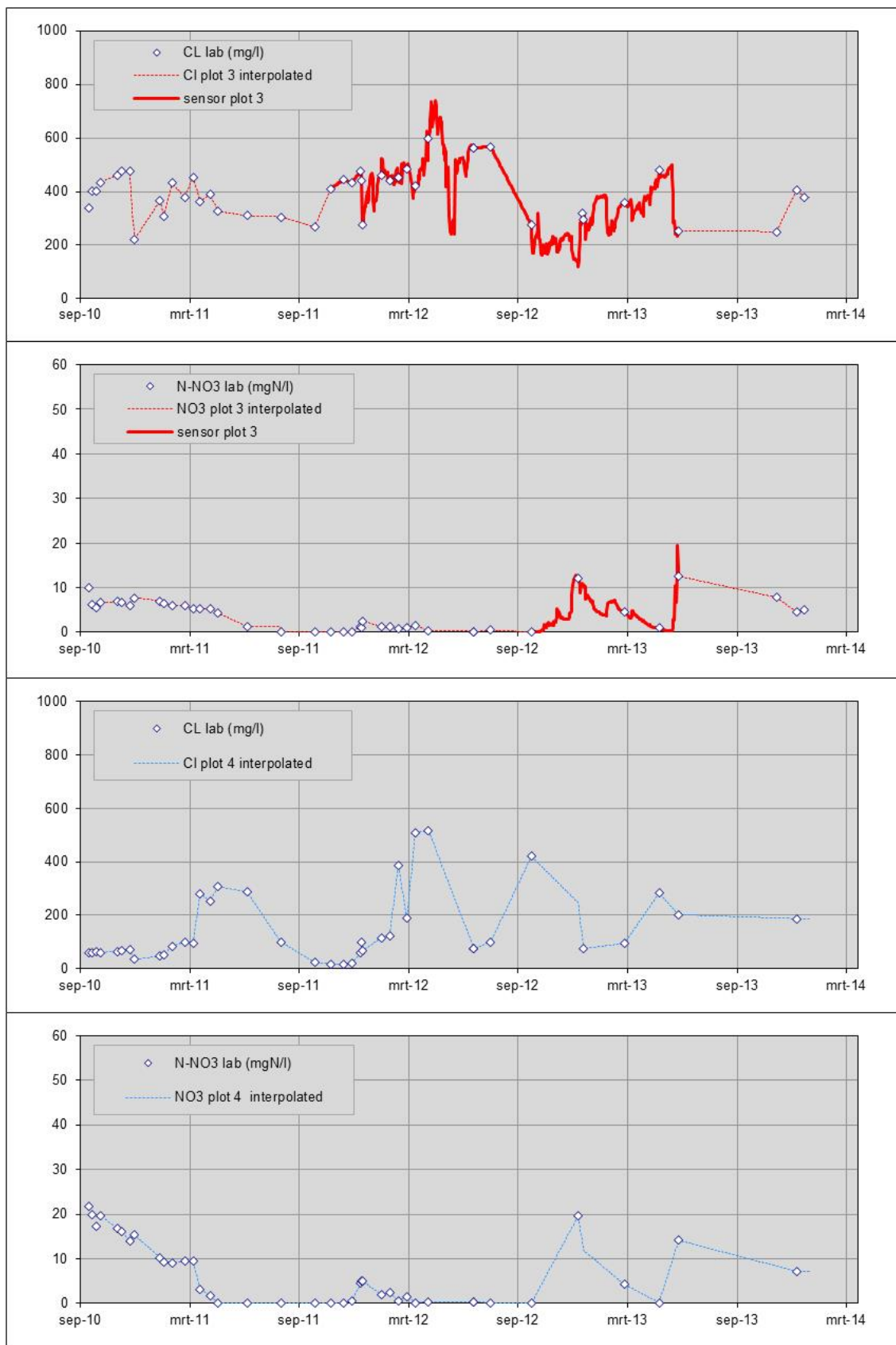
De correlaties tussen de geleidbaarheid (EGV) zoals gemeten in het veld, komen goed overeen met de EGV-bepaling in het laboratorium van dezelfde watermonsters. Ook is er, zoals kan worden verwacht, een goede correlatie tussen het chloridegehalte en de geleidbaarheid. In de figuren is het slootwater apart weergegeven is. De trendlijn is getrokken over zowel het drain- als slootwater. Opvallend is dat het slootwater veel zouter wordt dan het drainwater. Dit kan goed uit de waterbalans worden verklaard, omdat daarin duidelijk is geworden dat de sloot maar voor de helft door het drainwater wordt gevoed en dat de andere helft vooral de lateraal toestromend grondwater is. Dit grondwater wordt meer door de zoute kwel van het watervoerend pakket gevoed dan het water in de buisdrainage.



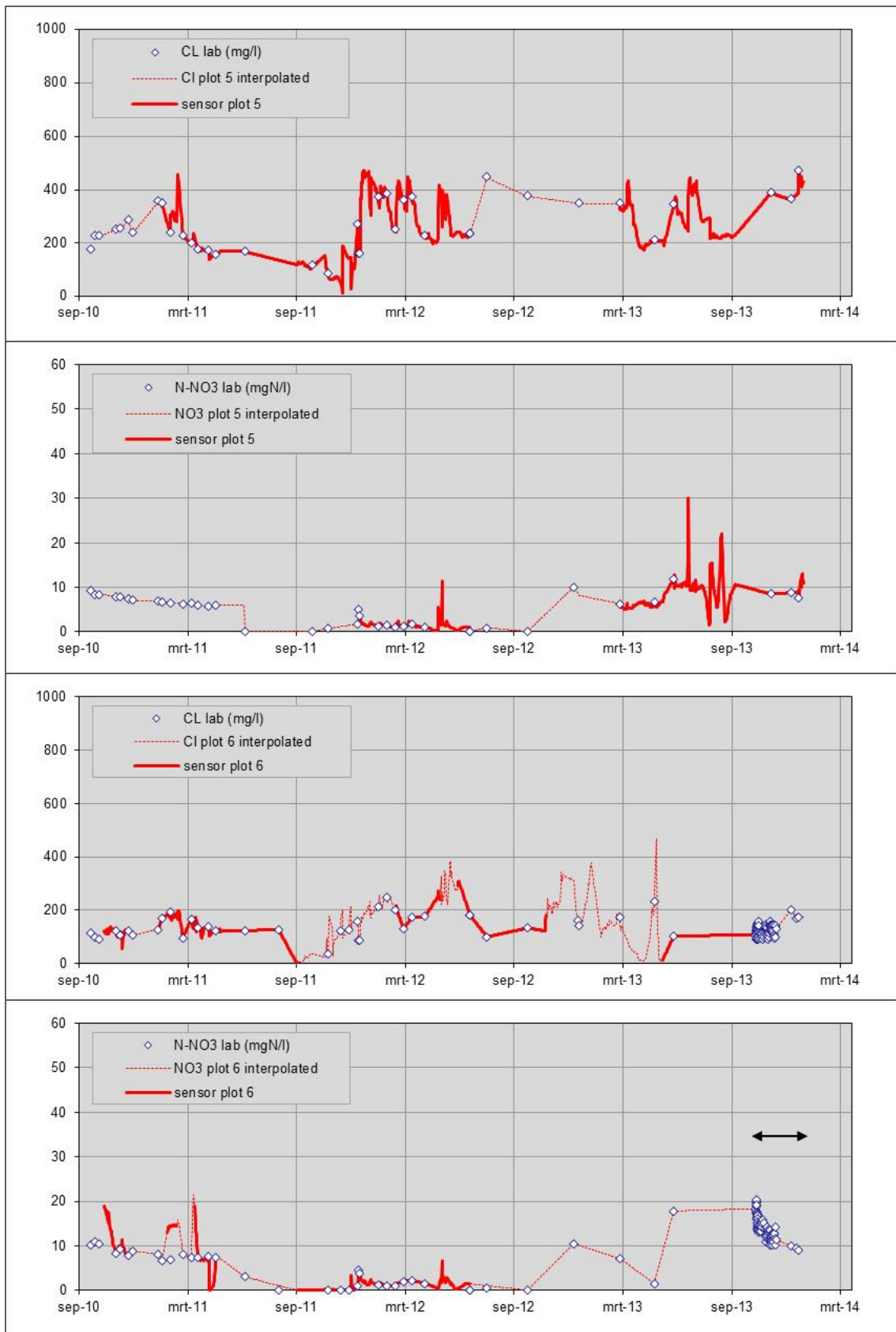
De correlatie tussen het chloridegehalte en anorganisch koolstof (IC) duidt erop dat naarmate het water in de drainbuizen zouter wordt, het ook meer gerijpt en daardoor gebufferd is. Omdat de oorsprong van het zout voornamelijk het mariene-achtige (NaCl-type) water in het watervoerende pakket is, correleert het chloridehalte niet goed met calcium, maar wel met natrium (Na).



Meetwaarden en opvulling tot continue reeksen nitraat en chloride voor vrachtberekeningen.

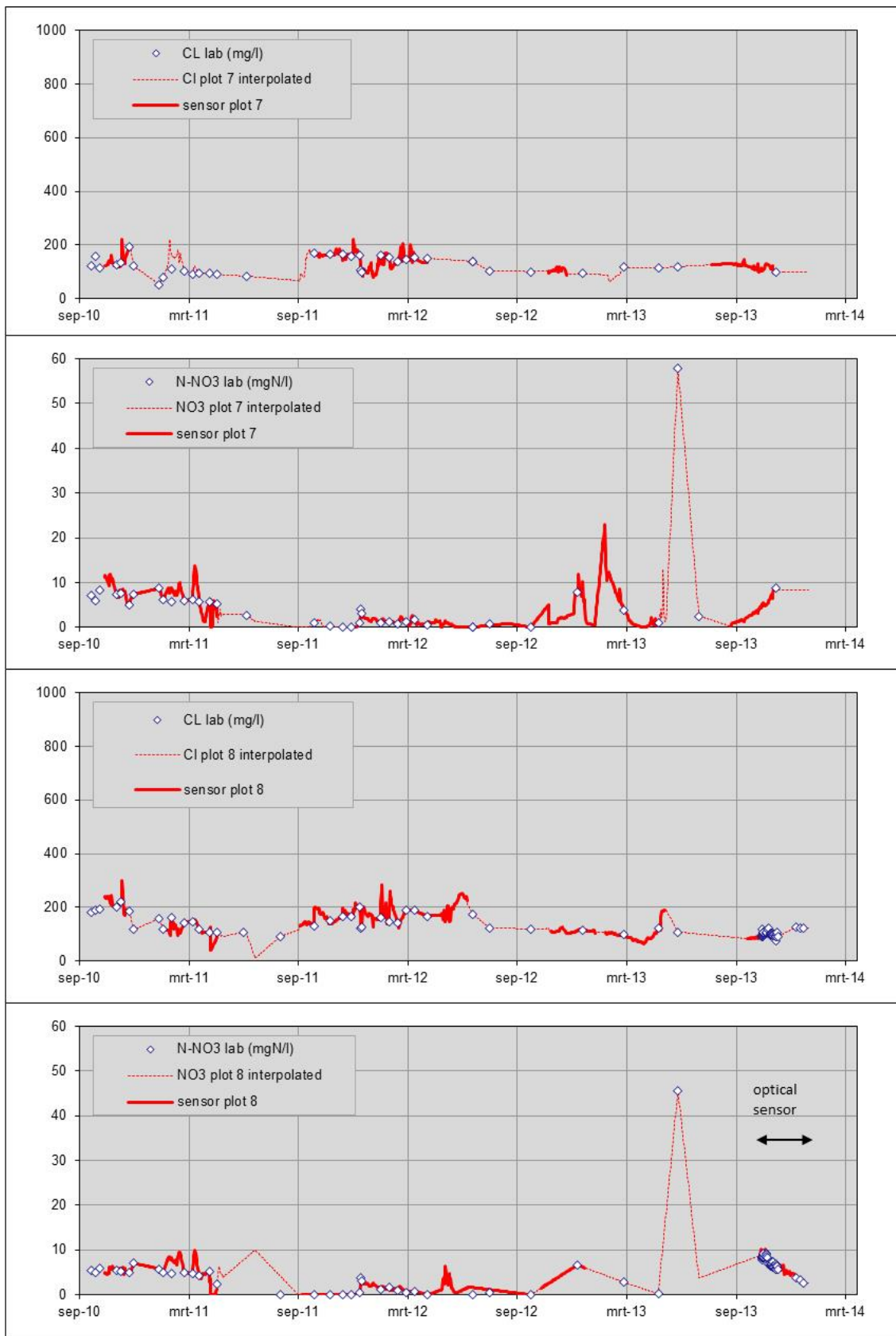


Meetwaarden en opvulling tot continue reeksen nitraat en chloride voor vrachtberekeningen (vervolg).



Meetwaarden en opvulling tot continue reeksen nitraat en chloride voor vrachtberekeningen (vervolg).





Meetwaarden en opvulling tot continue reeksen nitraat en chloride voor vrachtberekeningen (vervolg).



Tabel B1.1

Waterkwaliteit bodemvocht (cups), ondiep grondwater (cups 1,8-2,5 m en peilbuisfilter op 2 m-mv) en watervoerend pakket (peilbuisfilter op 6-7 m-mv). De peilbuisfilters hebben een lengte van 0,5 m.

waterkwaliteit	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub>	PO <sub>4</sub>	IC	NH <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg	Fe	<sup>15</sup> N
	mg/l	mgS/l	mgN/l	mgP/l	mg/l	mgN/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Detectielimiet	0.6	0.2	0.03	0.02	1.8	0.04	0.3	0.4	1.2	0.15	0.09	
aantal metingen:												
0,5-0,7 m -mv	42	40	113	113	35	113	40	40	40	40	40	65
1,1-1,5 m -mv	115	88	127	127	114	127	88	88	88	88	88	84
1,8-2,5 m -mv	125	95	132	132	126	132	95	95	95	95	95	35
peilbuis 2 m-mv	30	24	30	30	30	30	24	24	24	24	24	7
peilbuis wvp	16	10	16	16	16	16	10	10	10	10	10	3
<b>Gemiddelde Blok 1</b>												
0,5-0,7 m -mv	33	22	13	0.0	63	0.3	23	2	138	7	0.0	6
1,1-1,5 m -mv	204	38	7	0.0	83	0.9	104	7	178	18	0.5	14
1,8-2,5 m -mv	3352	35	1	3.6	276	6.9	1802	72	276	241	11.3	16
<b>Gemiddelde Blok 3</b>												
0,5-0,7 m -mv	43	39	9	0.0	74	0.8	31	3	177	9	0.0	8
1,1-1,5 m -mv	107	41	8	0.1	102	0.1	77	8	198	19	2.3	13
1,8-2,5 m -mv	1417	9	0	3.2	223	4.5	889	47	207	128	6.8	12
<b>Gemiddelde Blok 6</b>												
0,5-0,7 m -mv	37	17	14	0.0	62	1.6	13	2	135	5	0.0	5
1,1-1,5 m -mv	193	38	8	0.1	106	0.7	134	11	184	23	0.4	13
1,8-2,5 m -mv	1694	17	1	4.2	251	5.6	1046	65	204	154	8.8	16
<b>Gemiddelde Blok 7</b>												
0,5-0,7 m -mv	25	9	21	0.0	69	0.5	14	2	149	5	0.0	7
1,1-1,5 m -mv	158	23	7	0.5	114	1.1	101	13	161	28	0.8	14
1,8-2,5 m -mv	579	6	1	3.5	185	4.1	350	36	146	71	4.0	20
peilbuis 2 m-mv	587	23	1	0.3	149	1.0	260	15	264	48	0.9	24
peilbuis wvp	8992	289	0	3.6	285	13.8	4983	171	353	635	0.2	15

Tabel B1.2

Sporemetalen gemeten in bodemvocht, ondiep grondwater en watervoerend pakket. De metingen zijn gemiddeld over de meetperiode 2010 tot medio 2012 en 3 dieptetrajecten.

Waterkwaliteit	Al µg/l	As µg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Zn µg/l	
Detectielimiet		0,3	0,02	0,005	0,02	0,1	0,03	0,04	0,3
Gemiddelde Blok 1									
0,5-0,7 m -mv	4,29	1,65	0,05	0,63	1,63	1,68	0,03	5,38	
1,1-1,5 m -mv	8,53	2,55	0,03	0,28	1,65	1,73	0,07	5,58	
1,8-2,5 m -mv	9,63	14,11	0,01	1,83	0,15	0,83	0,03	2,42	
Gemiddelde Blok 3									
0,5-0,7 m -mv	10,12	3,90	0,03	0,57	2,14	1,89	0,05	4,57	
1,1-1,5 m -mv	10,00								
1,8-2,5 m -mv	12,73	0,39	0,00	0,88	0,80	0,42	0,13	2,70	
Gemiddelde Blok 6									
0,5-0,7 m -mv	12,22	3,34	0,04	0,37	2,70	2,77	0,10	5,50	
1,1-1,5 m -mv	14,25	2,93	0,03	0,17	1,13	2,99	0,03	4,93	
1,8-2,5 m -mv	13,15	14,51	0,01	1,38	0,14	0,56	0,03	1,86	
Gemiddelde Blok 7									
0,5-0,7 m -mv	28,48	7,08	0,04	0,77	3,89	2,71	0,13	35,90	
1,1-1,5 m -mv	9,61	12,79	0,04	0,23	1,20	3,33	0,08	6,50	
1,8-2,5 m -mv	7,91	20,43	0,00	0,45	0,27	1,45	0,03	2,95	
Peilbuis wvp	83,74	0,73	0,02	5,77	1,48	17,59	0,41	3318,88	

Tabel B1.3

Waterkwaliteit sporenmetalen drainagewater. Gemiddeldes meetperiode 2010-2012.

Waterkwaliteit	Al µg/l	As µg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Zn µg/l
Blok 1	7,16	0,03	0,32	1,78	2,89	0,12	35,33	7,16
Blok 2	3,15	0,04	0,28	1,69	2,37	0,13	16,80	3,15
Blok 3	14,84	0,09	0,67	2,74	3,72	0,24	8,33	14,84
Blok 4	4,29	0,06	0,29	2,51	3,37	0,29	8,70	4,29
Blok 5	3,24	0,04	0,34	1,84	3,30	0,29	4,93	3,24
Blok 6	3,60	0,03	0,31	2,39	2,87	0,15	5,30	3,60
Blok 7	8,81	0,05	0,17	2,39	2,63	0,18	4,53	8,81
Blok 8	30,44	0,06	0,39	2,22	4,62	0,15	2,40	30,44

# Bijlage 2 Detailinformatie FUSSIM2D

## 1 Modelinvoer

Voor de invoer van het model is uitgegaan van de gegevens beschikbaar in de database van het project 'Peilgestuurde diepdrainage Zeeland' (Dik *et al.*, 2014) en uit een eerdere modelanalyse met het model SWAP (Staarink, 2014). Hier worden enkele belangrijke gegevens korte weergegeven. In enkele gevallen is de benodigde invoer gebaseerd op 'expert judgement'.

**Klimaatgegevens:** de verdeling van ETref over Tp en Ep is gebaseerd op de verhouding Tp/Ep zoals gehanteerd in de SWAP-berekening.

mm	Neerslag	ETref	Tp	Ep	R-ETref
2011	825	629	350	279	196
2012	1026	606	372	234	420
2013	911	596	320	275	316

**Bodem hydraulische eigenschappen:** bouwstenen zavel B9 (0-25 cm), O10 (25-50 cm) en O9 (50+ cm) met een verhoogde doorlatendheid (factor 5).

**Onderrand:** gemeten tijdreeks stijghoogte watervoerend pakket en een weerstand van de weerstandsbiedende laag van 1500 d (uit kalibratie SWAP).

### Gewaskalender:

	Bieten	Tarwe	Aardappel
Zaai	15-03-11	09-11-11	17-04-13
Oogst	18-10-11	24-08-12	23-10-13
Gewenste N opname (kg N ha <sup>-1</sup> )	150	160	225
Gerealiseerde N opname (kg N ha <sup>-1</sup> )	150	160	225

**Depositie:** 20 kg N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> als natte depositie tijdens regenval, proportioneel ten opzichte van de jaarneerslag.

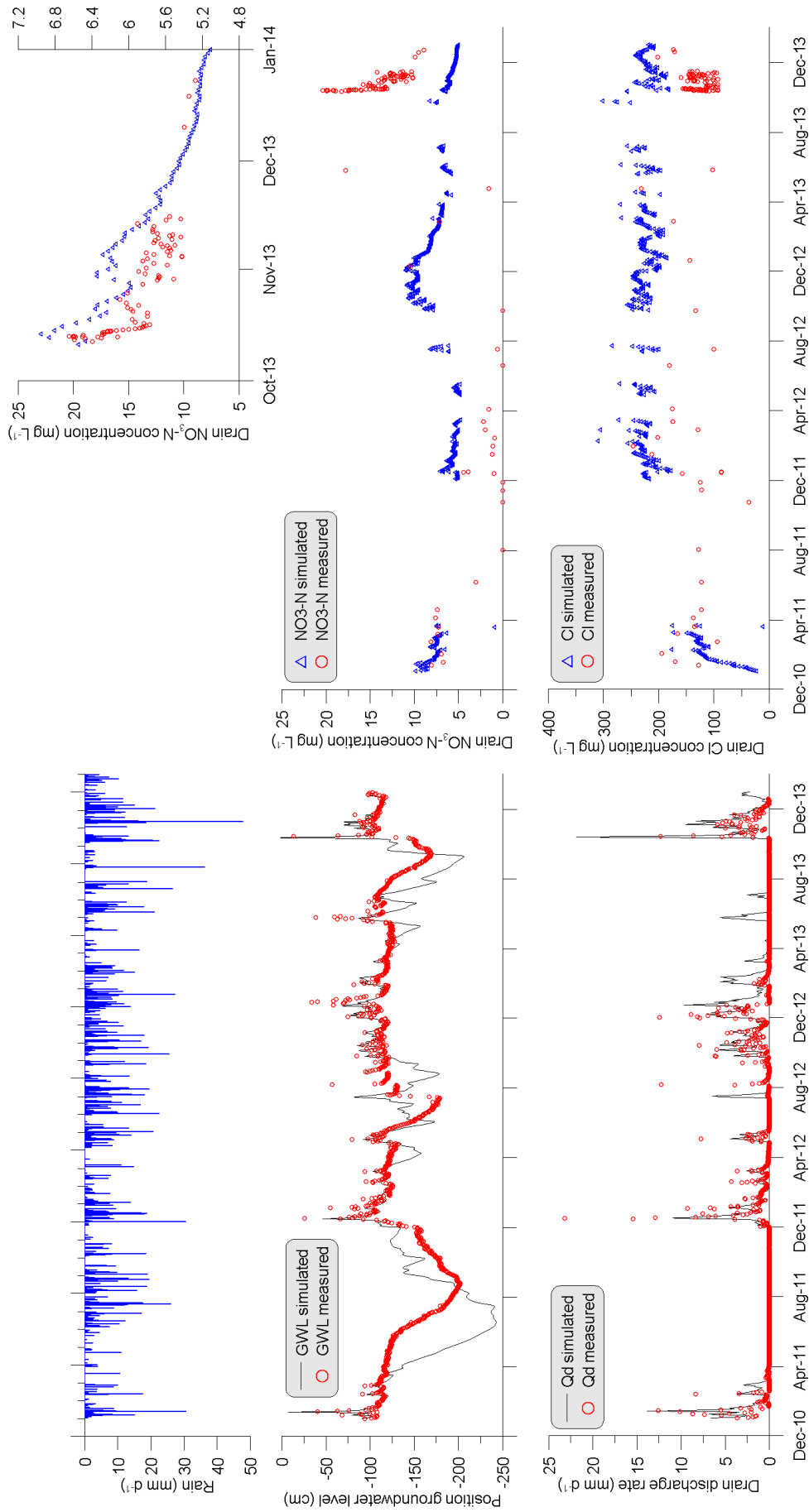
### Bemesting:

Datum	kg N ha <sup>-1</sup>
18-04-11	108
13-05-11	54
15-02-12	108
19-04-12	94.5
25-05-12	40.5
10-05-13	182
28-06-13	61

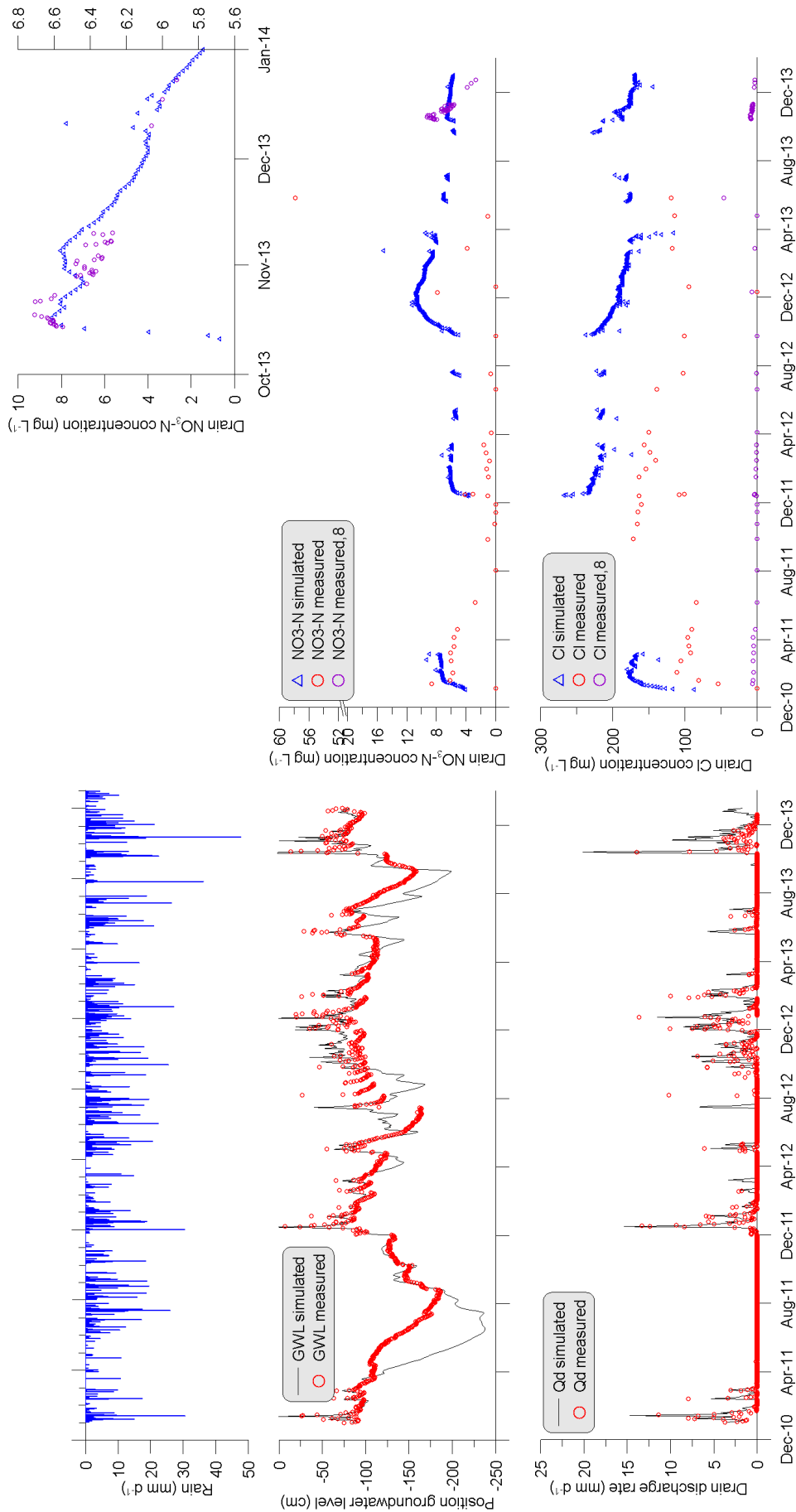
**Denitrificatie:** eerste orde afbraak met  $k = 0.001 \text{ d}^{-1}$

**Dispersielengte:** 20 cm (longitudinaal) en 1 (transversaal)

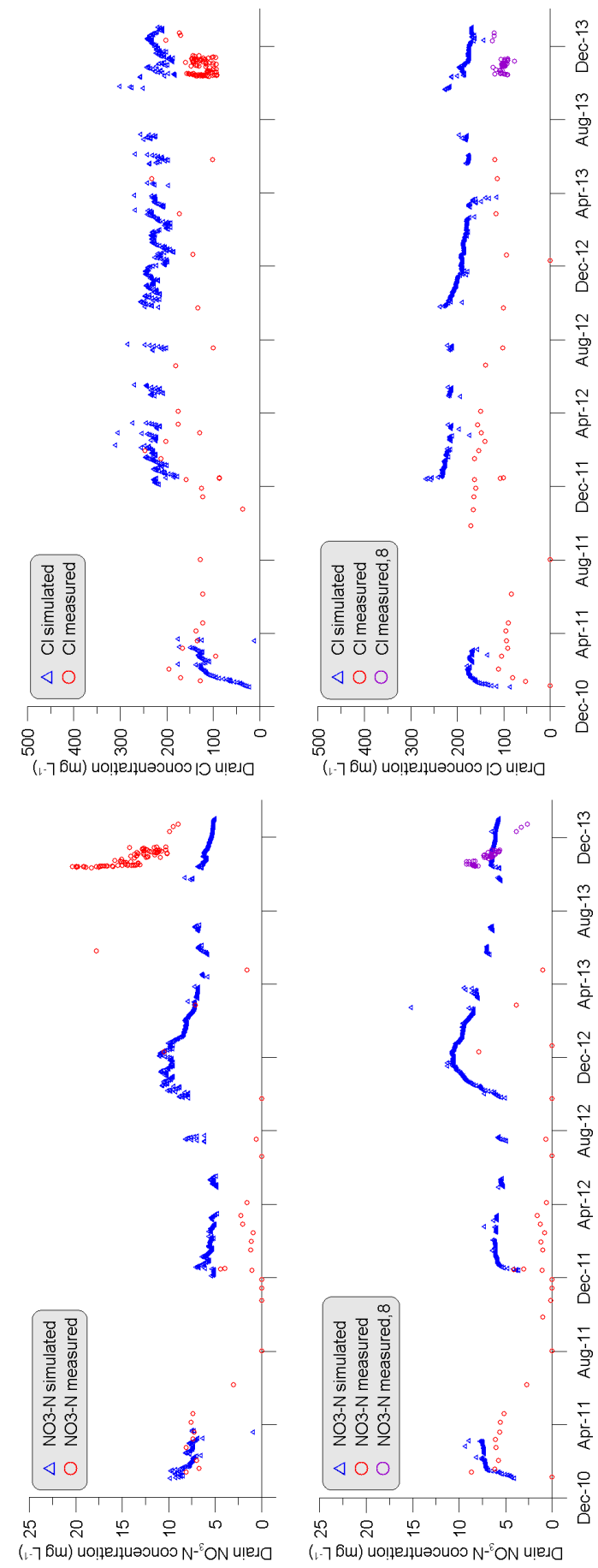
## 2 Modeluitvoer (figuren)



**Figuur B2-1.** (linksboven) Neerslag, (linksmidden) gemeten (symbolen) en gesimuleerd (lijn) verloop van de grondwaterstand, (linksonder) gemeten (symbolen) en gesimuleerd (lijn) verloop van de drainafoer, (rechtsboven) gemeten (ronde symbolen) en gesimuleerde (driehoekige symbolen) NO<sub>3</sub>-N concentratie drainwater, (rechtsboven) idem voor periode Oktober-December 2013, en (rechtsonder), gemeten (ronde symbolen) en gesimuleerde (driehoekige symbolen) Cl concentratie drainwater voor de totale simulatieperiode (Jan 2011 – Dec 2013) voor Blok 6.



**Figuur B2-2.** (linksboven) Neerslag, (linksmidden) gemeten (symbolen) en gesimuleerd (lijn) verloop van de drainafvoer, (rechtsmidden) gemeten (ronde symbolen) en gesimuleerde (driehoekige symbolen)  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentratie drainwater, (rechtsboven) idem voor periode Oktober-December 2013, en (rechtsonder), gemeten (ronde symbolen) en gesimuleerde (driehoekige symbolen) Cl concentratie drainwater voor de totale simulatieperiode (Jan 2011 – Dec 2013) voor Blok 7.



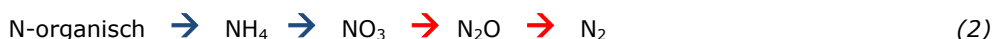
**Figuur B2-3.** Gemeten (ronde symbolen) en gesimuleerde (driehoekige symbolen) concentraties: (linksboven)  $\text{NO}_3\text{-N}$  Blok 6, (linksonder)  $\text{NO}_3\text{-N}$  Blok 7, (rechtsboven) Cl Blok 6, (linksonder) Cl Blok 7. Voor Cl zijn aan het eind van de meetperiode meetgegevens van Blok 8 (zelfde behandeling als Blok 7) gegeven omdat voor Blok 7 geen gedetailleerde meetreeks beschikbaar was.

# Bijlage 3 Achtergrond 'Natural Abundance' Stikstofisotopen

Denitrificatie is een microbiel proces waarbij nitraat ( $\text{NO}_3$ ) onder anaerobe, d.w.z. waterverzadigde omstandigheden, wordt omgezet tot stikstofgas ( $\text{N}_2$ ) volgens:



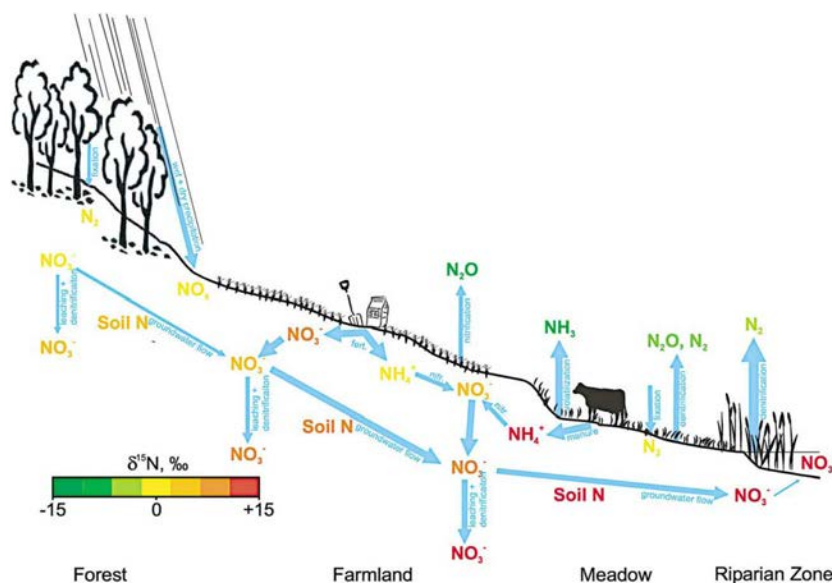
Uit vergelijking (1) blijkt dat er een tussenstap is waarbij lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) wordt gevormd, maar het merendeel wordt doorgaans 'doorgereduceerd' tot  $\text{N}_2$  (Van Groenigen *et al.*, 2005). Tegelijkertijd kan door nitrificatie, een aerob proces, nitraat ontstaan wat beschikbaar is voor denitrificatie. De totale stikstofomzetting ziet er dan als volgt uit:



Mineralisatie    nitrificatie    denitrificatie

In vergelijking 2 zijn (overwegend) aerobe processen met een blauwe pijl weergegeven en anaerobe processen met een rode pijl. Hoe dichter aerobe en anaerobe processen bij elkaar komen, hoe groter de verwijdering van ammonium en nitraat.

Stikstof (N) komt van nature in twee isotopen voor:  $^{14}\text{N}$  en  $^{15}\text{N}$ , waarbij 99.6337% van de stikstof in de atmosfeer bestaat uit  $^{14}\text{N}$ . Veel micro-organismen, waaronder denitrifereers, hebben een voorkeur voor het lichte isotoop ( $^{14}\text{N}$ ), waardoor de verhouding  $^{14}/^{15}\text{N}$  verandert (het wordt zwaarder). Van deze eigenschap kan gebruik gemaakt worden om stikstof-processen in de bodem en het grondwater te duiden, zoals geïllustreerd in Figuur 1.



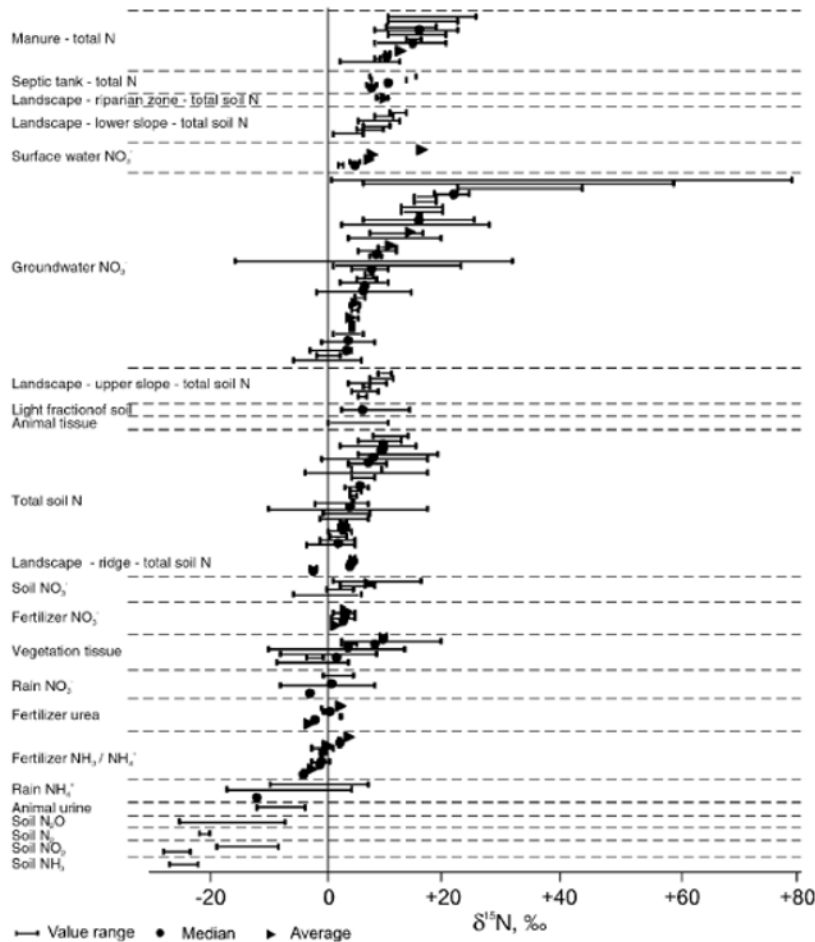
**Figuur B1.1** De invloed van bodemprocessen op de  $^{14}/^{15}\text{N}$  signatuur van stikstof in de bodem en het grondwater. Uit: Bedard-Haughn A., Groenigen J.v. and Kessel C.v. 2003. Tracing  $^{15}\text{N}$  through landscapes: potential uses and precautions. *Journal of Hydrology* 272: 175-190.

In de gangbare metingen worden stikstofconcentraties bepaald. Veranderingen in stikstofconcentraties kunnen veroorzaakt worden door verdunning en/of denitrificatie. Om uitsluitsel te geven over deze twee mogelijkheden, of een combinatie daarvan, wordt de  $^{14}/^{15}\text{N}$  verhouding gebruikt. Bij verdunning



met bijv. kwelwater zal de  $^{14/15}\text{N}$  verhouding proportioneel veranderen met de verdunning, terwijl bij denitrificatie het aandeel  $^{15}\text{N}$  zal stijgen

Met de  $^{14/15}\text{N}$  verhouding van nitraat kan ook de herkomst van nitraat bepaald worden. Er kan bijvoorbeeld onderscheid gemaakt worden tussen percolatiewater en kwelwater door op verschillende diepten in het profiel de  $^{14/15}\text{N}$  verhouding vast te stellen. Maar het is ook mogelijk om verder te gaan en de N bronnen te analyseren. Bij voldoende afwijkende signaturen kan met behulp van een eenvoudige mengverhouding bepaald worden welke deel van de nitraatvrucht afkomstig is van welke bron (Figuur 3). Hiermee is de bepaling van  $^{14/15}\text{N}$  ondersteunend aan de bronnen analyse met behulp van het zoutgehalte. Voor dit project worden kwelwater en kunstmest als potentiële bronnen geanalyseerd.

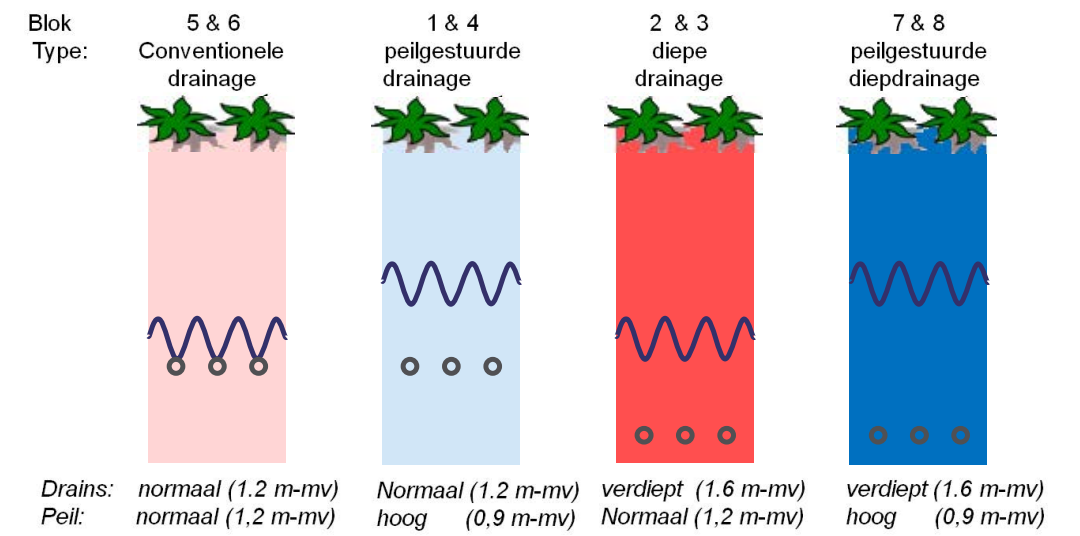


**Figuur B2.2** Variatie van  $\delta^{15}\text{N}$  in verschillende N compartimenten. Uit: Bedard-Haughn A., Groeningen J.v. and Kessel C.v. 2003. Tracing  $^{15}\text{N}$  through landscapes: potential uses and precautions. *Journal of Hydrology* 272: 175-190.

Voor het onderhavige onderzoek op de Rusthoeve is de  $^{14/15}\text{N}$  verhouding in grond- en drainwatermonsters bepaald met gebruik van micro-diffusie om nitraat te isoleren zoals beschreven in Stark & Hart (1996) en aangepast door Van Groeningen *et al.* (2005). N-totaal en  $^{15}\text{N}$  zijn gemeten op de UC Davis Stable Isotope Facility door middel van een 'continuous flow isotope ratio mass spectrometer' gas spectrometer (CF-IRMS, Europa Scientific, Crewe, UK) uitgerust met een aanpassing voor CN monsters. De  $^{15}\text{N}$  is gecorrigeerd voor achtergrond waarden door middel van blancs en uitgedrukt relatief naar  $^{14/15}\text{N}$  verhouding in atmosferische  $\text{N}_2$ .

# Uitklapbare legenda met indeling proefblokken

In de figuren en tabellen is ten behoeve van het overzicht steeds de kleurstelling voor de 4 type behandelingen aangehouden zoals hieronder weergegeven (rood/blauw = niet/wel peilgestuurd; licht/donker = niet/wel verdiept).



---

Bijlage 4    Uitklapbare legenda met  
indeling proefblokken



---

Alterra Wageningen UR  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[www.wageningenUR.nl/alterra](http://www.wageningenUR.nl/alterra)

Alterra-rapport 2639  
ISSN 1566-7197



---

Alterra Wageningen UR is hét kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

---



To explore  
the potential  
of nature to  
improve the  
quality of life



---

Alterra Wageningen UR  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 317 48 07 00  
[www.wageningenUR.nl/alterra](http://www.wageningenUR.nl/alterra)

Alterra-rapport 2639  
ISSN 1566-7197

Alterra Wageningen UR is hét kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

