

# Effectgerichte maatregelen tegen fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden

Effecten van maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden met een slechte kwaliteit van oppervlaktewater vanwege fosfaat

R.P.J.J. Rietra, P.N.M. Schipper, B.M.A Kroonen-Backbier



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH





# Effectgerichte maatregelen tegen fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden

Effecten van maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden met een slechte kwaliteit van oppervlaktewater vanwege fosfaat

R.P.J.J. Rietra<sup>1</sup>, P.N.M. Schipper<sup>1</sup>, B.M.A Kroonen-Backbier<sup>2</sup>

1 Wageningen Environmental Research

2 Wageningen Plant Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoeksthema '6<sup>e</sup> Actieprogramma' (projectnummer BO-43-012.02-039).

Wageningen Environmental Research  
Wageningen, februari 2024

---

Gereviewd door:

Inge Regelink, onderzoeker (WENR)

Akkoord voor publicatie:

Gert Jan Reinds, teamleider van Duurzaam Bodembeheer, WENR

Rapport 3325

ISSN 1566-7197

---

R.P.J.J Rietra, P.N.M. Schipper, B.M.A. Kroonen-Backbier, 2024. *Effectgerichte maatregelen tegen fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden; Effecten van maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden met een slechte kwaliteit van oppervlaktewater vanwege fosfaat*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3325. 86 blz.; 30 fig.; 35 tab.; 158 ref.

In het zandgebied zijn veel beken waar door af- en uitspoeling van landbouwgronden hoge fosfaatgehalten voorkomen die een goede waterkwaliteit belemmeren. Dit is onder andere de situatie rondom de Peel en delen van de Gelderse Vallei. Er is behoefte aan inzicht welke maatregelen effectief zijn om de af- en uitspoeling van fosfor te verminderen. Met veld- en laboratorium experimenten is gekeken naar de bijdrage van oppervlakkig afspoeling, het voorkomen van lokale hot-spots en effecten van bekalken. Dit heeft nieuwe inzichten opgeleverd in de fosfor belasting van oppervlakkige afspoeling en in maatregelen die mogelijk effectief zijn voor het verminderen van de af- en uitspoeling.

In the Dutch sandy areas, there are many streams where high phosphate levels occur due to surface runoff and leaching from agricultural lands which impede good water quality. There is a need to understand which measures are effective in reducing phosphorus runoff and leaching. Field and laboratory experiments have been conducted to assess the contribution of surface runoff, the occurrence of local hot-spots and effects of liming. This has provided new insights into the phosphorus loading from surface runoff and into measures that may be effective in reducing leaching and runoff.

Trefwoorden: fosfor, fosfaat, afspoeling, uitspoeling, landbouwgronden, fosfaatverzadiging, bekalken, zuurgraad, vernatting, hot-spots, retentie.

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/646515> of op [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research) (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2024 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research). Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- 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.

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

---

# Inhoud

<b>Verantwoording</b>	<b>5</b>
<b>Woord vooraf</b>	<b>7</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1 Probleemstelling	11
1.2 Onderzoeksvragen	12
1.3 Werkwijze	13
1.4 Leeswijzer	13
<b>2 Bestaande kennis effectieve P-maatregelen</b>	<b>14</b>
2.1 Voorgaande onderzoeken naar maatregelen	14
2.2 Overzicht effectiviteit maatregelen	15
2.3 Literatuur oppervlakkige afspoeling fosfor	16
<b>3 P-afspoeling aardappelpercelen en stroomgebied Catsop</b>	<b>18</b>
3.1 Inleiding	18
3.2 Doelstelling	18
3.3 Monitoring experiment afspoeling op percelen	19
3.4 Monitoring afspoeling stroomgebied Catsop	22
3.5 Resultaten monitoring afspoeling percelen	23
3.6 Discussie afspoeling aardappelpercelen	30
3.7 Resultaten afspoeling stroomgebied Catsop	31
3.8 Discussie afspoeling stroomgebied Catsop	34
<b>4 Effect beekverbreding (bezinkpoelen)</b>	<b>35</b>
4.1 Inleiding	35
4.2 Doelstelling	36
4.3 Theorie	36
4.4 Methode	36
4.5 Discussie	40
<b>5 Invloed grondwaterstanden</b>	<b>41</b>
5.1 Inleiding	41
5.2 Methode invloed grondwaterstand	41
5.3 Resultaten invloed grondwaterstand	42
5.4 Discussie invloed grondwaterstand	45
<b>6 Hotspots</b>	<b>46</b>
6.1 Inleiding hotspots	46
6.2 Doelstelling hotspots	46
6.3 Methode	46
6.4 Resultaten	47
6.5 Discussie hotspots	50
<b>7 Effect bekalken</b>	<b>52</b>
7.1 Inleiding bekalken	52
7.2 Methode bekalken	52
7.3 Resultaten bekalken	53
7.4 Discussie bekalken	56

---

<b>8</b>	<b>Overige P-maatregelen</b>	<b>58</b>
8.1	Risico P-afspoeling percelen vrije-uitlooppluimvee	58
8.2	P vastleggen met ijzerrijk kwelwater	60
8.3	Verminderen afspoeling bij graslandvernieuwing	61
8.4	Discussie overige P-maatregelen	62
<b>9</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>63</b>
9.1	Maaiveldafstroming	63
9.2	Uitspoeling	63
9.3	Aanbevelingen	64
<b>Literatuur</b>		<b>66</b>
<b>Bijlage 1</b>	<b>Proefpercelen maaiveldafvoer</b>	<b>73</b>
<b>Bijlage 2</b>	<b>Effect drempels op water en P-afspoeling</b>	<b>77</b>
<b>Bijlage 3</b>	<b>P en Fe in bovenste grondwater zandregio Nederland</b>	<b>80</b>
<b>Bijlage 4</b>	<b>Neerslag en vochtgehalte tijdens maaiveldafstroming aardappel</b>	<b>82</b>

---

# Verantwoording

Rapport: 3325

Projectnummer: 5200047109

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Onderzoeker

naam: Inge Regelink

datum: 8 december 2013

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Gert Jan Reinds

datum: 10 januari 2024





---

# Woord vooraf

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van LNV om te helpen bij het 6<sup>e</sup> Actieprogramma Nitraatrichtlijn. Dank voor Meindert Commelin (WUR), Richard Schiffelers (WPR), Jantiene Baartman en Piet Peters (WUR) voor het gebruikmaken van de monsters en analyses van het water en sediment in Catsop. Ook dank aan de medewerkers van proefboerderij Vredepeel en Unifarm voor het uitvoeren van de veldproeven, Willy de Groot (WENR) voor de verzadigde doorlatendheidsmetingen en medewerkers van CBLB-WUR en vakgroep Bodembioogie (WUR) voor de uitvoering van de laboratoriumexperimenten. Dank voor de medewerking van Gabriel Zwart (Waterschap Limburg), Arend Jan Cuperus (Arvalis) LTO, Sjaak Jenniskens, melkveebedrijf Lijten-Kelder en Jan Classens voor het mogelijk maken van het veldwerk in Noord-Limburg en Oost-Brabant.



---

# Samenvatting

In het zandgebied zijn veel beken waar door af- en uitspoeling van landbouwgronden hoge fosfaatgehalten voorkomen die een goede waterkwaliteit belemmeren. Dit is onder andere de situatie rondom de Peel en delen van de Gelderse Vallei. Er is behoefte aan inzicht welke maatregelen effectief zijn om daar de af- en uitspoeling van fosfor te verminderen. Uit onderzoeken komt naar voren dat met bronmaatregelen (minder bemesten) de af- en uitspoeling van fosfor niet sterk verminderd. Daarom is meer potentie te verwachten van maatregelen die ingrijpen in de transportroute en maatregelen die in kleine watergangen de retentie (verwijdering) van fosfor vergroten. Effectschattingen van zulke maatregelen leunen hoofdzakelijk op modelonderzoek omdat wetenschappelijk opgezette veldexperimenten schaars zijn. Daarom is in het voorliggende onderzoek ingezet op veld- en laboratorium experimenten. Het onderzoek richtte zich op drie onderzoeksvragen: (1) Wat is de bijdrage van oppervlakkige afspoeling van percelen met een helling?, (2) Wordt fosfaatuspoeling vanuit landbouwgronden veroorzaakt door diffuse uitspoeling of lokale hotspots? en (3) is het bekalken van gronden met hoge fosfaattoestanden effectief om de uitspoeling te verminderen? De metingen in laboratorium en veldproeven leidden tot de volgende uitkomsten:

1. De P-concentraties bij maaiveldafstroming van bemonsterde akkerbouwpercelen in Noord-Limburg en Oost-Brabant en in een stroomgebied in Zuid-Limburg waren met 0,13 tot 2 mg P-PO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> hoger dan de doelstelling voor de beken (meestal 0,11 mg P-PO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup>). Vergeleken met de totale berekende af- en uitspoeling is de bijdrage van de gemeten afspoeling kleiner dan 18%. In een hellend stroomgebiedje in Zuid-Limburg is de gemeten afspoeling groter dan de gemiddeld berekende af- en uitspoeling. Hier wordt de oppervlakkige afspoeling hoofdzakelijk bepaald door het aan sediment gebonden fosfor. Dit kan een belangrijke bijdrage aan de fosforbelasting van de beken geven. Drempels tussen de ruggen van aardappelpercelen en ruitzaaien bij mais verminderde in alle veldexperimenten de afspoeling van water, fosfaat en sediment, of had geen effect. Het effect kon niet goed gekwantificeerd omdat daarvoor (veel) meer herhalingen nodig zijn. Op sommige percelen waren na een hoosbui in de zomer de drempels niet meer zichtbaar.
2. Metingen van Waterschap Limburg laten in sommige oppervlaktewateren zeer hoge fosfaatconcentraties zien, zoals in de omgeving van de Kabroekse beek (zomergemiddeldes van 0,6 mg P L<sup>-1</sup>). In dit gebied zijn behalve landbouw geen andere bronnen van fosfor aanwezig en worden veel plassen op de landbouwpercelen waargenomen. De hier uitgevoerde steekproef van bodem en grondwater (30 punt locaties) laat zien dat de concentraties in het bovenste grondwater laag zijn en de bodems geen opvallend lage bindingscapaciteit voor fosfaat hebben. De diffuse uitspoeling van fosfor kan hier niet de hoge P-concentraties in het oppervlaktewater verklaren. Generieke maatregelen voor deze bodems zijn daarom op voorhand niet effectief om de fosforbelasting van het oppervlaktewater te verminderen. Om hier effectieve maatregelen te nemen, is het nodig om met lokaal onderzoek hotspots voor de af- en uitspoeling van fosfor te identificeren. Deze noodzaak komt ook naar voren in regionale bronnenanalyses van nutriënten, omdat in diverse gebieden waar landbouw de enige significante bron is, de berekende af- en uitspoeling niet de hoge fosforgehalten in de oppervlaktewaterlichamen kunnen verklaren.
3. Het effect van bekalken is onderzocht met laboratorium experimenten voor drie bemonsterde zandgronden. Deze experimenten tonen dat met een relatief hoge bekalking (doel pH 6,5) van de bemonsterde fosfaatrijke kalkloze zandgronden (pH≈5,5), de P-concentraties in het bodemvocht sterk (tot een factor 3) worden verlaagd. Deze maatregel zou dus effectief kunnen zijn om uitspoeling te verminderen en is goedkoop uitvoerbaar.

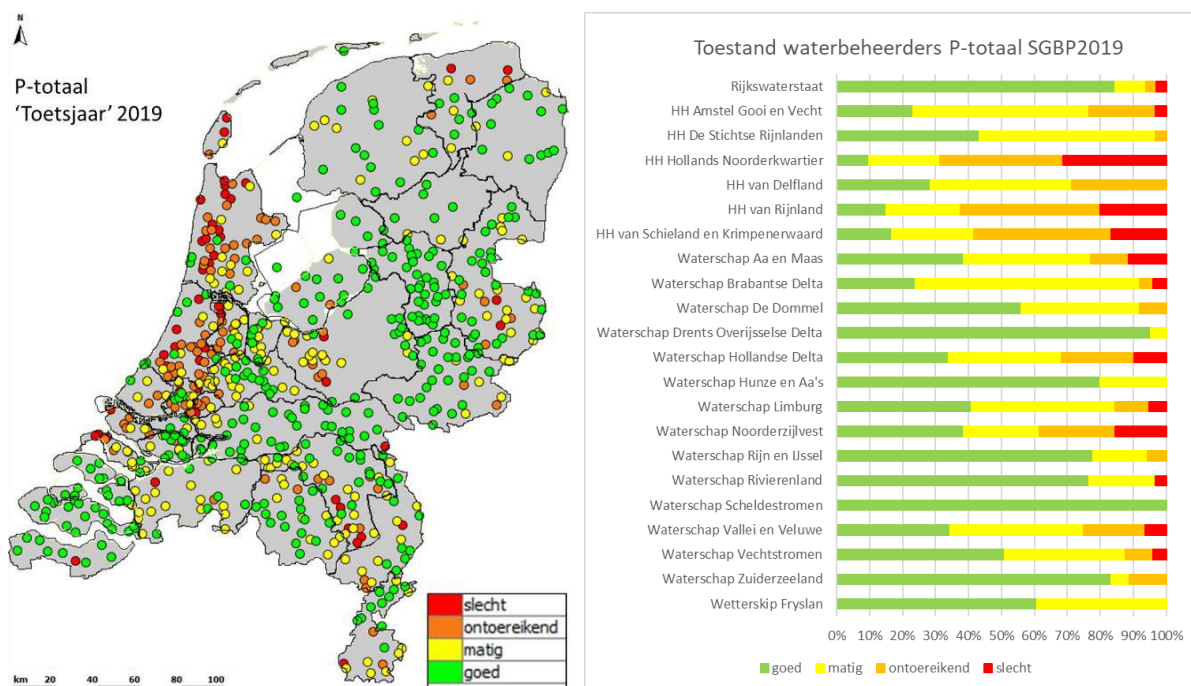
Het onderzoek heeft nieuwe inzichten opgeleverd in de fosfor belasting van oppervlakkige afspoeling en in maatregelen die mogelijk effectief zijn voor het verminderen van de af- en uitspoeling. In het laatste hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan om de effectiviteit van nieuwe type maatregelen zoals het bekalken verder te onderzoeken en met lokaal onderzoek hot-spots te identificeren.



# 1 Inleiding

## 1.1 Probleemstelling

Zowel stikstof als fosfor is in veel type wateren bepalend voor de beoordeling van de toestand voor de Kader Richtlijn Water (KRW) ten aanzien van algen en ondergedoken waterplanten (Verdonschot and Verdonschot 2021). Hoewel de nutriëntenbelasting door het milieubeleid (mestwetgeving, aanpak puntbronnen e.a.) na circa 1985 sterk is afgenomen, belemmeren anno 2019 de hoge concentraties aan fosfor en/of stikstof in veel oppervlaktewateren de ecologische KRW-doelen. De beoordeling van fosfor in 2019 voor de wateren is goed, matig, ontoereikend of slecht bij resp. 48, 28, 13 en 7% (CLO 2020). De recentste beoordeling geeft ongeveer hetzelfde beeld.<sup>1</sup> Voor de KRW-beoordeling van de toestand van stikstof en fosfor zijn doelen opgesteld voor de zomerhalfjaargemiddelde concentraties in het oppervlaktewater. In stromende wateren is dat voor fosfor meestal 0,11 mg P/l. Bij overschrijding wordt aangenomen dat de ecologische doelen worden belemmerd. In circa 50% van de regionale oppervlaktewaterlichamen worden het KRW-doel voor fosfor overschreden (zie Figuur 1).



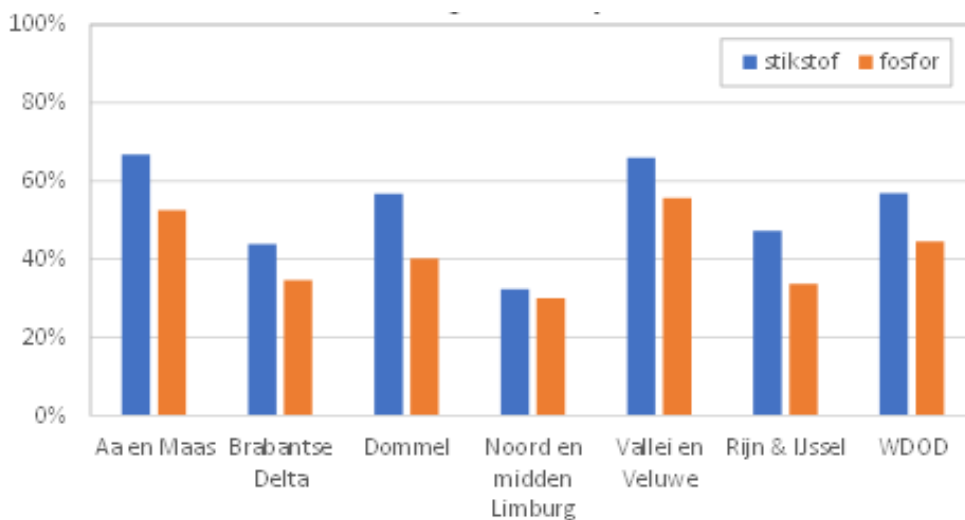
**Figuur 1** Toetsresultaten 2019 KRW-doelen voor P-totaal, links de beoordeling per KRW-meetpunt (oppervlaktewaterlichaam), rechts per waterbeheerder (%) voor 'Toetsjaar' 2019, Groen: goed; geel: matig; oranje: ontoereikend; rood: slecht (van Duijnhoven et al. 2019).

Door actief mestbeleid sinds de jaren negentig van de vorige eeuw komen minder nutriënten in het water terecht, maar recente studies hebben uitgewezen dat er desondanks in veel gebieden nog een grote opgave is om de waterkwaliteit voor nutriënten voldoende te verbeteren (Knoben et al. 2021; Verdonschot and Verdonschot 2021). Een te hoge nutriëntenbelasting van oppervlaktewater belemmert in een deelstroomgebied niet alleen ter plekke een goede ecologische kwaliteit, maar kan ook in benedenstroomse wateren – en dus ook in kustwateren – een goede kwaliteit belemmeren. Dit wordt aangeduid als afwenteling.

<sup>1</sup> Stroomgebiedbeheerplannen Rijn, Maas, Schelde en Eems 2022-2027, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat 2022.

Uit- en afspoeling van de meststoffen stikstof en fosfor vanuit landbouwgronden hebben een belangrijk aandeel in de nutriëntenbelasting van oppervlaktewateren. Uit regionale bronnenanalyses die door de WUR zijn uitgevoerd voor onder andere Brabant, Limburg, Gelderland en Drenthe komt naar voren dat de landbouw een belangrijke bijdrage heeft in de nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater, en dan met name door de af- en uitspoeling van stikstof en fosfor uit de landbouwpercelen. Deze conclusies van regionale bronnenanalyses worden bevestigd door de resultaten van landelijke studies (Galen et al. 2020; Groenendijk et al. 2016).

In het zomerhalfjaar, de periode waarin de toestand voor de nutriënten in het oppervlaktewater voor de KRW wordt beoordeeld, is de bijdrage van de uit- en afspoeling in de totale belasting in de Maasregio ongeveer 31% (zie Figuur 2) en in Gelderland ongeveer 55%. Jaargemiddeld is deze bijdrage aanmerkelijk groter, omdat de af- en uitspoeling in het winterhalfjaar groter is door het neerslagoverschot, terwijl de lozingen van RWZI's door het jaar vrij constant zijn en de belasting door inlaat van Rijkswateren in de zomer juist groter is.



**Figuur 2** Aandeel af- en uitspoeling vanuit landbouwgronden in de totale stikstof- en fosforbelasting van diverse waterschappen: zomerhalfjaargemiddelde 2014-2017 (WDOD 2011-2017) (Tabel 2.1 in (Galen et al. 2020)).

Aanpassingen in het stelsel van fosfaatgebruiksnormen en een hogere onttrekking van fosfaat (P) lijken een beperkte invloed te hebben op de P-uitspoeling in de komende vijftien jaar (Groenendijk and van Boekel 2017). Het realiseren van KRW-doelen voor fosfaat is derhalve niet uitsluitend mogelijk met behulp van generiek beleid. Evenmin heeft generiek beleid invloed op afvoer van sedimentair gebonden P dat reeds in de sloot(bodem) aanwezig is. Meer lokale en routegerichte maatregelen zijn daarom een noodzakelijke aanvulling in die regio's waar af- en uitspoeling van fosfor uit landbouwgronden sterk bijdraagt aan de belasting van oppervlaktewater.

## 1.2 Onderzoeksvragen

Door het Ministerie van LNV is daarom aan de WUR gevraagd om onderzoek te doen naar effectgerichte maatregelen die de af- en uitspoeling van fosfor naar de regionale oppervlaktewateren kunnen verminderen. Hiermee worden maatregelen bedoeld die aanvullend zijn op het generieke mestbeleid en meer lokaal en routegericht van aard zijn. Dit wordt in het navolgende aangeduid als 'effectgerichte P-maatregelen'. Weliswaar zijn er diverse onderzoeken uitgevoerd naar effectgerichte P-maatregelen, maar de effectschattingen van die onderzoeken leunen hoofdzakelijk op modelstudies of literatuur vanuit het buitenland. Voor de Nederlandse situatie zijn daarvoor weinig wetenschappelijke experimenten uitgevoerd. Er is dus duidelijk behoefte aan experimenteel onderzoek naar de effectiviteit van maatregelen om de af- en

---

uitspoeling van fosfor naar regionale oppervlaktewateren te verminderen. De focus ligt hierbij op het zandgebied. De onderzoeksvragen zijn daarom:

- Onderbouw effectschattingen met maatregelen via veldexperimenten
- Verken potenties van diverse andere type maatregelen

## 1.3 Werkwijze

Vanaf 2019 is, in samenwerking met enkele waterschappen, een aantal experimenten voor effectgerichte P-maatregelen opgezet. Deze experimenten zijn:

1. Effect blokkeren oppervlakkige afstroming (afspoeling) fosfor
  - Opvangen oppervlakkig afstromend water en sediment ('maaiveldafvoer') op aardappelpercelen op zand in Noordoost-Brabant en Noord-Limburg en aardappelpercelen op löss in Zuid-Limburg, met herhalingen, waar voor het experiment ruggen zijn aangelegd met en zonder drempels;
  - Opvangen afstromend water en sediment van een stroomgebied in Zuid-Limburg.
2. Effect beekverbreding (door Waterschap Rijn en IJssel aangeduid als 'poelen') op het afvangen van fosfor in Gelderland (Waterschap Rijn & IJssel)
  - Installatie automatische bemonsteringsapparatuur inclusief debietmetingen voor en na de instroom van de poel;
  - Opvangen beekslib.
3. Effect hoge grondwaterstanden op fosfaatgehalte bovenste grondwater
  - Bemonstering bovenste grondwater met 112 peilbuizen in twee aaneengelegen percelen met blijvend grasland (Bennekom); 10 bemonsteringen gedurende drie jaar, die inzicht geven in de fosfaatgehalten als functie van de grondwaterstand t.o.v. maaiveld.
4. Identificeren hotspots voor P-uitspoeling op basis van P-gehalten in de bodem
  - Bemonstering van 30 meetlocaties in landbouwbodems, op drie diepteniveaus (0-30, 30-60 en 60-90 cm) en P-concentratie van het bovenste grondwater bij hoge grondwaterstanden op landbouwpercelen in het stroomgebied van de Kabroekse Beek (Noord-Limburg).
  - Data-analyse LMM-metingen.
5. Effect bodemadditieven
  - PH-afhankelijke schudtesten in het laboratorium met bekalkte en onbekalkte grondmonsters.
  - Incubatie-experimenten waarbij kalk is toegevoegd aan bodemmonsters en met metingen de effecten daarvan op de P-indices (PAL, Pw, P-CaCl<sub>2</sub>) en uitspoelconcentraties van P zijn bepaald. Per grond zijn vier herhalingen uitgevoerd en drie doseringen kalktoevoeging. Na elf maanden zijn de grondmonsters geanalyseerd. Voor dit rapport waren drie grondmonsters gereed.
6. Risico's P-afspoeling percelen met vrije-uitloopkippen (pluimvee)
  - Visuele inspecties Lunterse beek en literatuuronderzoek.

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een korte beschrijving van de bekende maatregelen. Hoofdstuk 3 t/m 8 bevatten de onderzochte maatregelen, met steeds een inleiding, materiaal & methoden en discussie. De conclusies staan in hoofdstuk 9. In de tekst worden veel Engelse termen gebruikt: *run-off*, *review*, *state of the art* etc. Er is geprobeerd om Nederlandse termen te gebruiken voor begrippen als er een Nederlandstalig term is die veel gebruikt wordt. Bij afkortingen wordt de gebruikelijke Engelse afkorting gebruikt met de oorspronkelijke term: bijvoorbeeld voor de analysetechniek SFA (*segmented flow analyse*).

---

## 2 Bestaande kennis effectieve P-maatregelen

### 2.1 Voorgaande onderzoeken naar maatregelen

Een doorrekening van een beperkt aantal bekende maatregelen is gedaan voor het Zesde en Zevende Actieprogramma Nitraatrichtlijn (Groenendijk et al. 2021; Groenendijk and van Boekel 2017; Groenendijk et al. 2017). Er zijn in Nederland (Schoumans et al. 2014) en in het buitenland, met name voor gebieden met vergelijkbare problemen zoals Vlaanderen (ILVO 2015) en Delaware (VS), (Osmond et al. 2019) veel studies gedaan naar de effecten van nieuwe of innovatieve maatregelen op verminderen van fosfaat af- en uitspoeling naar oppervlaktewater. De effecten van een aantal nieuwe maatregelen zijn gekwantificeerd via modellen en experimenten (Noij et al. 2009).

Het onderzoek van Noij et al. (2009) focuste op zes maatregelen:

1. Blokkeren maaiveldafvoer
2. Buisdrainage
3. Diepe samengestelde peil gestuurde buisdrainage
4. Uitmijnen
5. Moerasbufferstroken
6. Vloevelden

Een recent overzicht van nieuwe maatregelen geeft de BOOT-lijst (Verloop et al. 2018), waarvan er enkele relevant kunnen zijn voor fosfaat:

7. Drempels in ruggenteelt
8. Bodembedekking
9. Gebruik baggerpomp voor effectief sloot baggeren. Aangezien hoge fosforgehalten in de waterbodem de basis vormen voor hoge fosfaatconcentraties in oppervlaktewater (Smolders et al. 2017), kan het baggeren een rol spelen bij het verwijderen van fosfor uit het watersysteem.

Maatregelen die in het buitenland effect hebben en relevant zijn voor Nederland:

10. Additieven, zoals bekalken of gips (Andersson et al. 2016; Arai et al. 2005; Bergström et al. 2015; Murphy and Stevens 2010; Simonsson et al. 2018).
11. Beekverbreding/stimuleren van P-sedimentatie. Er is onderzoek gedaan in Verenigde Staten en Canada, daar heet het vaak '*ag-retention-pond*' (Chrétien et al. 2016).

Voor het Zevende Actieprogramma Nitraat en het addendum daarbij<sup>2</sup> zijn ter ondersteuning van een gebiedsgerichte aanpak per regio de volgende additionele maatregelen bediscussieerd en effecten ervan op basis van expertkennis ingeschat:

- uitmijnen van P-rijke bodems (Timmermans and van Eekeren 2016);
- verbod uitspoelingsgevoelige open teelten;
- multifunctionele bufferstroken (ingericht voor het optimaal afvangen van nutriënten);
- brede beekdalen (brede bufferzones in beekdalen);
- zuiveren drainagewater met ijzerzand (voor opgelost P) (Chardon et al. 2022) of houtsnippers (voor N) (Jansen et al. 2019);
- zuiveren oppervlaktewater (zuiveringsmoerassen, defosfateren).

Het effect van brede bufferzones (100-250 m) in beekdalen in het zuidelijke en oostelijke zandgebied op de af- en uitspoeling is indicatief berekend door Groenendijk (2021b). Voor de regionale (provincie) invulling van het Nationaal Programma Landelijk Gebied zijn in het oostelijke en zuidelijke zandgebied vooral deze brede bufferzones in beeld. Multifunctionele bufferstroken (Zak et al. 2018) of zogenaamde '*riparian buffers trips*' zijn vaak onderzocht in met name de VS (Anderson et al. 2018).

---

<sup>2</sup> Ministerie Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit 2022. Addendum 7<sup>e</sup> actieprogramma Nitraatrichtlijn en derogatie. Brief naar Tweede Kamer 25 februari 2022, DGA-PAV / 22073076.



In januari 2023 is door de Europese Commissie een beschikking afgegeven voor de afbouw van de Nederlandse Derogatie. In de brief van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit over de implementatie van de derogatiebeschikking (LNV 2023) en 7<sup>e</sup> Actieprogramma Nitraatrichtlijn is aangegeven dat de maatregelen over vanggewassen en het verplicht aanhouden van bufferstroken waarop niet bemest mag worden, ingaan per 2023.

## 2.2 Overzicht effectiviteit maatregelen

Voor het onderzoeksprogramma Kennisimpuls Waterkwaliteit is een reviewstudie uitgevoerd naar de beschikbare kennis over de effectiviteit van maatregelen om de af- en uitspoeling van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater te verminderen (Groenendijk et al., 2022). Dit onderzoek geeft een overzicht en update van de kennis over maatregelen en is onder andere gebruikt in de Nationale Analyse Waterkwaliteit (Van Gaalen et al., 2021) om een state-of-the-artbeeld te schetsen van de effectiviteit van maatregelen en om realistische aannames te doen in modelberekeningen waarmee effecten van maatregelen worden gekwantificeerd. De beschikbare kennis is verder gebundeld in een toegankelijke Deltafact van Stowa (Schipper et al. 2022b).

In Tabel 1 zijn de maatregelen weergegeven waarvoor in de reviewstudie samenvattingen zijn samengesteld met beschrijvingen van de referentiesituatie, de maatregel, het toepassingsgebied, gerapporteerde effecten op nitraat en de N- en P-belasting van het oppervlaktewater, mogelijke neveneffecten en een mogelijke aanpak om de maatregel in de invoer van het Landelijke Waterkwaliteitsmodel (LWKM) te verwerken. Deze 25 maatregelen betreffen die van het Zesde Actieprogramma Nitraatrichtlijn en een aantal van de BOOT-lijst, zoals deze door het supportteam DAW zijn voorgedragen voor de beschrijving van praktijkgerichte gegevensbladen in een studie van Verloop et al. (2018).

**Tabel 1** Overzicht van de besproken maatregelen op en langs het veld die leiden tot een verminderde belasting van nutriënten naar het grond- en oppervlaktewater.

Categorie	Maatregel	6 <sup>e</sup> AP	DAW
Mestvolume	1. Voorwaarden en gebruiksnormen voor scheuren grasland op zand- en lössgrond	X	
	2a Aanpassing indeling fosfaatklassen en bijbehorende fosfaatgebruiksnormen	X	
	2b Verruiming P-norm bij toepassen org. stofrijke meststoffen op bouwland	X	
	3. Afstemmen bemesting op de N-mineralisatie		X
Mesttoediening	4. Rijenbemesting van maïs op zand- en lössgrond	X	
	5. Verschuiven uitrijdperiode drijfmest bouwland	X	
	6. Verruimen uitrijdperiode vaste mest op grasland	X	
	7. Latere voorjaarstoediening van dierlijke mest op gras- en maisland		X
	8. Optimaliseren stikstofwerking van mest		X
Mestsamenstelling	9. Drijfmest verdunnen bij uitrijden		X
	10. Toepassing van minder uitspoelingsgevoelige minerale N-meststoffen		X
	11. Inzet van compost en organische mest		X
Gewas	12. Eisen aan de teelt van vanggewassen en groenbemesters	X	
	13a Optimaliseren van landgebruik met gras en mais		X
	13b Toepassing van vruchtwisseling op een melkveebedrijf, gericht op behoud en opbouw van organische stof		X
	14. Verlenging van de leeftijd van grasland		X
	15. Gebruik van diepwortelende gewassen en rustgewassen		X
	16. Op tijd zaaien en goed verzorgen van een vanggewas		X
	17. Bodembedekking door toepassing van groenbemesters, tussengewassen en vanggewassen		X
Grondbewerking	18. Drempels bij ruggenteelten op klei- en löss (6 <sup>e</sup> AP) en andere gronden (DAW)	X	X
	19. Voorkomen van bodemverdichting door aanpassen wiellast		X
Waterhuishouding	20. Toepassen van onderwaterdrainage in veengebieden		X
Overig	21. Voorkomen erfafspoeling nutriënten	X <sup>1</sup>	
Inrichting	22. Onbemeste stroken langs waterlopen	X <sup>1</sup>	
	23. Natte bufferstroken		X
End-of-pipe	24. Gebruik baggerpomp voor effectief sloot baggeren		X
	25. Verwijdering van fosfaat uit drainagewater		X

Benoemd in 6<sup>e</sup> Actieprogramma, uitwerking in DAW.

---

Voor stikstof worden brongerichte maatregelen, i.e. maatregelen t.a.v. stikstofbemesting, als een effectieve manier beschouwd voor de verbetering van waterkwaliteit. Voor fosfaat is de historische bodemvoorraad meestal groot en hebben maatregelen gericht op bemesting niet snel genoeg effect om de oppervlaktewaterkwaliteitsdoelen in 2027 te kunnen halen. Voor fosfor zijn daarom vooral routemaatregelen (blokkeren drainage en/of verminderen risico's oppervlakkige afstroming) en effectgerichte maatregelen (afvangen en zuiveren) in en om de waterloop nodig om de belasting naar het oppervlaktewater te verminderen. Hieronder vallen de maatregelen in bovenstaande tabel met nummers 4, 5, 7, 16-23 en 25.

## 2.3 Literatuur oppervlakkige afspoeling fosfor

Onderzoek (modelstudies en experimenten) wijst erop dat oppervlakkige afspoeling van fosfor naar het oppervlaktewater een belangrijk aandeel kan vormen in de totale af- en uitspoeling. Oppervlakkige afspoeling, ook wel aangeduid als maaiveldafspoeling en internationaal als *'run-off'* of *'surface-run-off'*, wordt beïnvloed door een aantal factoren, waaronder de ruwheid van het maaiveld, de grondsoort, teeltwijze, helling en omvang van het perceel en vochtthuishouding. Visueel is oppervlakkige afstroming op een perceel zichtbaar als er plassen op het maaiveld komen te staan die in contact kunnen komen met de greppel of sloot die aan het perceel grenst. Deze plassen ontstaan bij neerslag als:

- a. de intensiteit van de neerslag groter is dan de infiltratiecapaciteit van de landbouwbodem. Dit wordt in de literatuur (Sinha et al. 2016) aangeduid als *'Horton overland flow'*.
- b. als de onderliggende bodem met water verzadigd is. Dit wordt in de literatuur (Sinha et al. 2016) aangeduid als *'Dunne overland flow'*.

Horton-flow treedt meestal op in de zomer (bij hevige onweersbuien) en Dunne-flow meestal in de winter tijdens lange natte perioden met hoge grondwaterstanden. Watertransport door ondiepe bodem wordt aangeduid als *'subsurface flow'* (Sinha et al. 2016). In sterk hellende gebieden kan ook erosie belangrijk zijn. In de Nederlandse situatie zal niet vaak sprake zijn van significante winderosie of afschuiving van grond. Erosie via regenwater is in principe hetzelfde als oppervlakkige afstroming waarbij gronddeeltjes van de akker in het oppervlaktewater terecht komen.

Oppervlakkige afspoeling is moeilijk te modelleren (Schipper et al. 2022b; van Bakel et al. 2018) en metingen ter onderbouwing van de modellen voor afspoeling zijn zeer beperkt (Groenendijk et al. 2016; Jansen et al. 2013). Omdat concentratiemetingen veelal ontbreken, is de fosfaatconcentratie in run-off water in de meeste onderzoeken eenvoudig gerelateerd aan de P-status van de grond (Schipper et al. 2021a; Vadas et al. 2005), maar de bijdrage van de afspoeling van P-houdende bodemdeeltjes is complex: erosie hangt af van veel factoren (Askar et al. 2021). Het aandeel oppervlakkige afspoeling in de totale af- en uitspoeling van oppervlaktewater is eerder gemodelleerd op basis van waterverzadiging van de bovengrond, is daarmee afhankelijk van de grondwaterstand en bodemtype en varieert van minimaal 0,4% bij mais op veen tot 41,6% bij gras op klei bij Gt VII\* (Jansen et al. 2013). Afspoeling kan dus lokaal, zoals in heuvelachtige gebieden, een belangrijke transportroute zijn. Naast de fosfaatgehalten, het bodemtype en de bodembedekking is de schaal waarop de processen plaatsvinden belangrijk bij erosie: hoe langer de route waarop erosie plaatsvindt of hoe groter het perceel, hoe dieper de greppels worden, en hoe hoger de sedimentconcentraties in het maaiveldafvoer (Wang et al. 2021a; Zheng et al. 2015).

Modelberekeningen suggereren dat het blokkeren van maaiveldafvoer de fosforbelasting van oppervlaktewater met 10 à 40% kan doen dalen (Noij et al. 2008). Blokkeren is een extra interessant type maatregel, omdat uitvoering ervan datzelfde jaar effect heeft op het verminderen van de afvoer van fosfor naar het oppervlaktewater. Daarnaast is het verbeteren van de waterinfiltratie voor waterconserving relevant. Blokkeren kan ook zorgen voor minder erosie, en daarmee minder transport via het verplaatsen van sediment en daaraan gebonden fosfaat. Overigens, naast waterverlies en fosfaatafvoer, zou oppervlakkige afspoeling ook een onderschatte route kunnen zijn bij gewasbeschermingsmiddelen (Commelin et al. 2022; Gaalen et al. 2020).

Onderzoek naar het effect van drempels (*'barbuttes'*) tussen aardappelruggen in Nederland in 2002 (Geelen et al. 2004) en Wallonië in 2009 en 2010, suggereerde veel minder afspoeling van water en sterke een daling van sedimentafspoeling (Euben et al. 2018). Daarnaast zijn drempels in Vlaanderen sinds 2016 een

---

verplichte maatregel bij aardappel in zeer hoge erosiegevoelige percelen (Departement Landbouw & Visserij 2021). De drempels bestaan uit losgemaakte grond die steeds op ongeveer 1 m van elkaar tussen de aardappelruggen gemaakt worden en zijn ongeveer 10 à 15 cm hoog. De ervaring in Vlaanderen en Nederland is dat er geen negatieve gevolgen zijn vastgesteld voor gewasopbrengst en er meer water beschikbaar is voor het gewas (Reubens et al. 2012). Ingeschat is dat het blokkeren van oppervlakkige afvoer het kosteneffectiefst is van een reeks maatregelen (Noij et al. 2009). Er zijn wel vragen gerezen over de effectiviteit bij vlakke gronden en andere gronden dan lössgrond, en vragen over de uitvoerbaarheid (Verloop et al. 2018). In al deze onderzoeken is niet gekeken naar de effecten op maaiveldafspoeling van fosfaat.

Het blokkeren kan door bufferstroken aan te leggen waarop niet bemest wordt en die zo ingericht worden dat een belangrijk deel van het oppervlakkig afspoelende fosfor wordt afgevangen in de perceelrand. De effectiviteit hiervan kan ingeschat worden met de volgende formule:

$$P_{eff} = 0.895(1 - e^{-0.16 \times \text{bufferstrookbreedte}}) \times \left(\frac{\text{perceelomtrek}}{\text{bufferstrooklengte}}\right)^{0.5}$$

Het eerste deel van de gehanteerde formule voor de zuiveringsfractie  $P_{eff}$  volgt uit een meta-analyse naar de zuivering van bufferstroken (Zhang et al. 2010). Bufferstroken van 5 m breedte hebben volgens deze formule een zuiverend vermogen van ongeveer 50%, stroken van 2 m breed zuiveren circa 25%. Dit zuiverend vermogen wordt vervolgens gecorrigeerd voor de lengte aan bufferstrook ten opzichte van de perceelomtrek (tweede deel van formule), waarbij is aangenomen dat een kortere strook een hoger zuiverend vermogen heeft, omdat deze strook naar verhouding meer run-off-water te verstouwen krijgt. Om er rekening mee te houden dat in de zomer het zuiverende vermogen van de bufferstrook hoger is dan in de winter, wordt  $P_{eff}$  verhoogd met 50% voor water dat afspoelt via Horton-flow.

Het verhogen van waterinfiltratie in een landbouwperceel leidt tot minder afspoeling van fosfor naar het oppervlaktewater. Daarnaast zorgt het voorkomen van erosie voor minder P-afspoeling via sedimenttransport. Maatregelen voor het verhogen van de waterinfiltratie hebben meestal betrekking op structuurverbetering, een verminderde bodembewerking, mulching en teeltmaatregelen zoals bodembedekking. De effectiviteit van de verhoogde waterinfiltratie kan worden gedefinieerd als het percentage vastgehouden water in vergelijking tot water bij een controle (bijvoorbeeld: 5 mm t.o.v. 10 mm), en als de hoeveelheid extra infiltratie ten opzichte van de totale neerslag (bijvoorbeeld: 5 mm t.o.v. 300 mm). Het effect op de verhoogde P-infiltratie van een maatregel wordt gedefinieerd als het percentage vastgehouden P ten opzichte van P dat passeert bij de controle (hoeveelheid g P ha<sup>-1</sup> bij de behandeling min controle gedeeld door controle).

Specifieke maatregelen voor het afvangen van water en sediment worden genomen in de vorm van bijvoorbeeld wisselstroken, bodembewerking en gewassen in contouren, grasstroken, dammen, terrassen (Mekonnen et al. 2015) of hekken met fijnmazig gaas (Vinten et al. 2014). De 'sediment trapping efficiency' (STE) van een maatregel wordt gedefinieerd als het percentage vastgehouden sediment in vergelijking met het sediment bij de controle (Mekonnen et al. 2015).

---

## 3 P-afspoeling aardappelpercelen en stroomgebied Catsop

### 3.1 Inleiding

In dit deel van onderzoek (methoden in paragraaf 3.3) worden de effecten gemeten van drempels bij aardappelruggen op fosfaatafspoeling: onderscheid wordt gemaakt tussen afspoeling via water en afspoeling via sediment. Ook wordt gekeken naar verschillen tussen diverse typen drempels en aardappelruggen. Het onderzoek is uitgevoerd bij in totaal acht percelen, verspreid over 2020 en 2021, en verdeeld over relatief vlakke zandpercelen en lösspercelen met een helling.

Naast drempels in ruggen wordt ook onderzoek gedaan bij mais. Ruitzaaien van mais wordt in Duitsland sinds 2000 onderzocht (Markus et al. 2000) waarbij diverse aspecten worden genoemd: verhogen gewasproductie, verminderen van onkruid (Morente et al. 2013) en het verminderen van erosie (Reckleben and Brandenburg 2019). Ruitzaaien is in 2015 in Nederland geïntroduceerd door de komst van geschikte machines (van Schooten et al. 2019) en onderzocht op één lössperceel met zes verschillende zaaistrategieën: afstand tussen rijen van 37,5 cm, 50 cm en 75 cm, met gelijkzaai van vanggewas en ruitzaai van mais. Het onderzoek concludeert dat er aanwijzingen zijn dat ruitzaaien leidt tot minder maaiveldafstroming van water (Kroonen-Backbier and van Haperen 2023), maar zijn er nog geen metingen van de effecten op maaiveldafstroming van fosfor.

Er wordt bij maaiveldafvoer onderscheid gemaakt in (1) grondwaterstand-gerelateerde maaiveldafvoer (bij hoge grondwaterstanden) en (2) infiltratiecapaciteit-gerelateerde maaiveldafvoer (bij hevige buien), waarbij (1) met name optreedt bij aaneenhoudende buien in de winter en (2) bij buien met een zeer hoge intensiteit, die vooral in de zomerperiode optreden (van Bakel et al. 2018). Het onderzoek heeft dus alleen betrekking op infiltratie-gerelateerde maaiveldafvoer. De hypothese is dat verruwing van de bodem via 1) drempels tussen aardappelruggen, 2) van de aardappelrug zelf, 3) en van vanggewas tussen mais, leidt tot minder maaiveldafstroming en daarmee minder maaiveldafstroming van fosfaat. Het onderzoek is uitgevoerd in de zomer en het betreft dus situaties met hevige buien waarbij de infiltratiecapaciteit van de bodem onvoldoende is. Daarom wordt bij de analyse gekeken naar de neerslagintensiteit.

Daarnaast zijn fosfaatmetingen (zie methoden in paragraaf 3.4) gedaan in water en sediment in oppervlakkige afvoer op één locatie in Zuid-Limburg (Catsop), waar al intensief bemonsterd is voor onderzoek naar afspoeling van gewasbeschermingsmiddelen (Commelin et al. 2022).

### 3.2 Doelstelling

- Inzicht in hoeveelheden en samenstelling (slib, P-gehalte) oppervlakkig afstromend water in aardappelpercelen, en een hellend stroomgebied ('catchment').
- Inzicht in effect drempels op de afspoeling.

De hypothese is dat oppervlakkige afspoeling van in water opgelost fosfor voorkomen kan worden door een betere waterinfiltratie in de zomer. Verondersteld wordt dat minder oppervlakkige afstroming leidt tot zowel minder erosie van fosfaathoudende bodemdeeltjes als van opgelost fosfaat. In de zomer, na groundbewerking, is er intensief contact tussen water en bodemdeeltjes, waardoor de fosfaatconcentratie in het geprecipiteerde water in evenwicht komt met de grond (Sharpley 2003).

### 3.3 Monitoring experiment afspoeling op percelen

#### Onderzoekslocaties

De locaties zijn gekozen in Noord- en Zuid-Limburg vanwege ervaring met drempels tussen aardappelruggen, en in en nabij Noord-Limburg omdat het in of nabij een waterlichaam ligt ('AEF-bovenloopjes Noord-Limburg<sup>3)</sup>) met relatief hoge fosforgehalten. De karakteristieken van de percelen zijn weergegeven in Tabel 2 en de ligging van de percelen en de onderzoeklocaties zijn gegeven in Bijlage 1.

**Tabel 2** Karakteristieken van percelen met maatregelen in aardappel (A) en mais (M). De helling is gemeten in het veldje waarin water en sediment opgevangen wordt.

locatie	Jaar	Gewas	Voorvrucht*	Helling %	P-CaCl <sub>2</sub> ** (mg P/kg)	P-AL***	Bodem	Lutum %	OS %	Coördinaten
1 Baneheide	2020	A	l	6,5 ± 0,7			Löss			195020, 314325
2 Wijnandsrade	2020	A	u	3,9 ± 0,3			Löss	18		190607, 322522
3 Ysselsteyn	2020	A	g	2,5 ± 0,4			Zand			387127, 192221
4 Veulen	2020	A	s	0,6 ± 0,3			Zand			387282, 196664
5 Huls	2021	A	s	6,4	4,9	56	löss	11	2,8	195516, 317615
6 Wijnandsrade	2021	A	t	4,7	2,1	35	löss	12	2,0	190780, 322573
7 Deurne	2021	A	m	2,0	7,2	75	Zand	2	3,8	184227, 384136
8 Sevenum	2021	A	p	0,7%	7,1	107	zand		3,6	200160, 379581
9 Wijnandsrade	2021	M	s	5,3%			löss	10	2,5	190686, 322909
	2022									

\* grasland (g), luzerne (l), mais (m), prei (p), suikerbiet (s), tarwe (t), uien (u).

\*\*Indicatief: verschillende laboratoria.

\*\*\*P-AL in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 gram.

Normale teeltmaatregelen wat betreft bemesting, plaag- en onkruidbestrijding zijn gehanteerd voor het verbouwen van aardappel en mais. De aardappelen (ras: Fontane) zijn gepoot met een rijafstand van 75 cm (afstand tussen aardappelruggen), met een afstand in de rij van 34 cm, resulterend in 4500 poters per ha.

#### Monitoring

Bij negen akkerbouwpercelen op zand en löss is in de zomer de P-afspoeling via water en sediment gemeten. De gekozen locaties hebben een helling van 0,7 à 2,0% bij zand en 3,9 à 6,5% bij löss. Bij één perceel is de P-afspoeling tijdens de teelt van mais en daarna gemeten: in zomer en winter. Bij aardappel is gekeken naar het effect van verschillende typen aardappelruggen, het effect van drempels (zie foto's Figuur 3). Bij mais is gekeken naar het effect van ruitzaaien en/of gelijkzaai: bij ruitzaai wordt mais wordt niet in één rij, maar in een zigzagpatroon gezaaid, en bij gelijkzaai wordt samen met mais een vanggewas gezaaid. Ook is in één stroomgebiedje van 38 hectare (Catsop, Zuid-Limburg) de afspoeling via water en sediment gemeten.



**Figuur 3** Meetopstelling bemonstering maaiveldafvoer en sediment ruggenteelt aardappels (links opvangbak, midden onlinemetingen neerslag en bodemvocht, rechts aanleg drempels in ruggen (foto's: Brigitte Kroonen-Backbier).

<sup>3</sup> Het KRW-waterlichaam AEF-bovenloopjes Noord-Limburg watert af op de Groote Molenbeek en bestaat uit een aantal verspreid liggende bovenlopen met een algemeen ecologische functie en zijn voornamelijk gelegen in landbouwgebied.

De methode om water en sediment op te vangen, is eerder gebruikt (Geelen et al. 2004) en bestaat uit een driehoekige metalen bak van 2,25 m breed die horizontaal is aangebracht aan de onderzijde van vier aardappelruggen, waarbij de bak aan de onderzijde uitmondt in een plastic bak van 80 liter. Om afspoeling naar het te onderzoeken plot vanuit bovenstrooms gelegen land te voorkomen, zijn op 9,5 m van de opstelling platen gezet tussen de aardappelruggen. Bij de plots in het maisperceel zijn ook schotten geplaatst om zijwaartse waterafstroming te voorkomen.

Elk te onderzoeken plot heeft daarom een breedte van 2,25 m, tussen vier aardappelruggen, en een lengte van 9,5 m, de afstand tussen de driehoekige bak, en de platen tussen de aardappelruggen. Een plot heeft daarmee een oppervlak van 21,37 m<sup>2</sup>. De metalen driehoekige bak en de plastic bak van 80 liter (Figuur 4) zijn overdekt met plastic om invang van regen te voorkomen.

De hoeveelheid maaiveldafstroming, water en sediment, is bepaald na elke regenbui door met een meetlint de waterhoogte in de plastic opvangbak te meten. De relatie tussen de waterhoogte en de hoeveelheid water is gekalibreerd: 300 mm water in de bak is 80 L. Na het vaststellen van de waterhoogte is een watermonster genomen en is het water uit de bak geschept met een beker. Daarna is met een meetlint de hoogte van het sediment in de bak gemeten en is een sedimentmonster genomen. De water- en sedimentmonsters (200 ml) zijn voorzichtig geschept uit de bak. De hoeveelheid maaiveldafvoer van water is gecorrigeerd voor de hoeveelheid maaiveldafvoer van sediment in de opvangbak. De opvangbak is schoongespoeld na de bemonstering. Water- en sedimentmonsters zijn na bemonstering op dezelfde dag ingevroren.



**Figuur 4** Opvangbak voor bemonstering van maaiveldafvoer en sediment (foto: Kroonen-Backbier).

De behandelingen bij locatie 1 t/m 8 (Tabel 3) is steeds: (1) aardappelruggen zoals de boer die in de praktijk aanlegt, (2) inclusief drempels tussen de aardappelruggen, waarbij de drempels liggen op een afstand van ongeveer 1 m van elkaar. Bij twee locaties zijn additioneel nog twee behandelingen toegevoegd: (3) gitterrollen zonder drempels en (4) grimme met drempels. De behandeling met gitterrollen geeft een ruigere aardappelrug. Het poten van de aardappel met de grimme pootmachine geeft een ruigere aardappelrug dan normaal. Ruige aardappelruggen hebben mogelijk een betere waterinfiltratie en minder oppervlakkige afstroming. Bij locaties met twee behandelingen (locatie 2, 3, 4, 6 en 7) zijn de behandelingen in triplo uitgevoerd. Bij locaties met 3 en 4 behandelingen (locatie 1 en 5) zijn de behandelingen in duplo aangelegd. Bij locatie 9 is een de proef uitgevoerd bij mais.

De behandelingen zijn in triplo of duplo uitgevoerd. Daarbij liggen de verschillende behandelingen om en om naast elkaar op een helling.

De rij afstand tussen de aardappelruggen is steeds 75 cm. Het aantal gepote aardappels is steeds 4500 per ha. De afstand tussen de gepote aardappels is steeds 35 cm. Het gebruikte aardappelras was Fontane (veld 5, 6, 7). Het maisras is LG 31276 (Limagrain, Nederland; LG seeds).

**Tabel 3** Behandelingen in acht aardappelpercelen (veldjes: 2,25 x 9,5 m =21,375 m<sup>2</sup>).

	Code	Naam maatregel	Omschrijving maatregelen	Locaties	Aantal herhalingen
1	Ref A	Zonder drempels	Referentie aardappelruggen	1 t/m 8	3; 2 bij locatie 1 en 5
2	Drempel	Met drempels	Aardappelruggen met drempels	1 t/m 8	3; 2 bij locatie 1 en 5
3	Ruig	Gitterrollen	Aardappelruggen met ruige structuur	1 en 5	2
4	Drempel B	Met drempels, Grimme	Aardappelruggen met ruige structuur, en drempels	5	2

Voor het maken van de behandelingen zijn verschillende machines gebruikt.

Normaal wordt mais gezaaid op een rijafstand van 75 cm en een tussenruimte van 14 cm in de rij. In een perceel (WR8) in Wijnandsrade zijn in de zomer van 2021 effecten getest van andere afstanden tussen de planten. Mais is normaal gezaaid, gezaaid met een rijafstand van 50 cm en in een ruitvorm gezaaid met een afstand van 37,5 cm en een tussenruimte van 28 cm in de rij (Tabel 4). De effecten van de behandelingen op waterafspoeling zijn op een ander perceel in Valkenburg bepaald (Kroonen-Backbier and van Haperen 2023). Hier worden de effecten op P-afspoeling bepaald. Na de zomer is beperkt ook doorgemeten in de winter van 2021-2022 (Tabel 5).

**Tabel 4** Behandelingen in maisperceel in zomer 2021 (veldjes: 2,25 x 9,5 m =21,375 m<sup>2</sup>). Locatie 9 (Wijnandsrade WR8).

Baknr's	Object: maatregelen in zomer	Aantal herhalingen
W1+ W12	Maisrijen op 75 cm afstand (gangbaar)	2
W2 + W11	Maisrijen op 50 cm	2
W3 + W10	Maisrijen op 37,5 cm (ruitzaaiverband)	2
W4 +W8	Maisrijen op 75 cm met gelijkzaai rietzwenk	2
W5 + W7	Maisrijen op 50 cm met gelijkzaai rietzwenk	2
W6 + W9	Maisrijen op 37,5 cm (ruitzaaiverband) met gelijkzaai rietzwenk	2

In Bijlage 1 wordt een uitgebreide beschrijving gegeven van het management per locatie.

**Tabel 5** Behandelingen in de winter 2021-2022 na teelt van mais (veldjes: 2,25 x 9,5 m =21,375 m<sup>2</sup>). Locatie 9 (Wijnandsrade WR8).

Baknr's	Object: maatregelen in zomer	Sporen aanwezig	Sporen lossen/ bewerken	Zaaibed bereiding	Vanggewas	Aantal herhalingen
1	Maisrijen op 75 cm	nee	ja	ja	wintertarwe	1
2	Maisrijen op 75 cm	nee	ja	nee	nee	1
3	Maisrijen op 75 cm	nee	nee	Nee	nee	1
4	Maisrijen op 75 cm met gelijkzaai rietzwenk	ja	nee	nee	rietzwenk	1
5	Maisrijen op 75 cm met gelijkzaai rietzwenk	nee	nee	nee	rietzwenk	1
6	Maisrijen op 50 cm met gelijkzaai rietzwenk	ja	ja	nee	rietzwenk	1

### Monitoring neerslag, temperatuur en bodemvochtgehalte bij percelen

In 2021 zijn op alle vier locaties weerstations (WolkyTolky) geplaatst voor een nauwkeurige meting van de neerslag, temperatuur en bodemvochtspanning (sensor: watermark). De weerstations zijn geplaatst in de onderzoekspercelen. De bodemvochtspanning wordt bepaald op één locatie in een aardappelrug en is dus slechts indicatief voor de respons op de neerslag.

## 3.4 Monitoring afspoeling stroomgebied Catsop

### Onderzoekslocatie

Op één locatie is intensief de afspoeling van P gemonitord in 2019, 2020 en 2021. Het betreft een locatie nabij Catsop (gemeente Stein) bestaande uit zeven percelen in een gebied van 38 ha die bij veel regen oppervlakkige afvoer van water geven. De hoogte varieert van 76 m bij het meetpunt tot 105 en 118 m boven NAP met hellingen van 2 tot 10%, gemiddeld 6%. Het bodemtype is löss. In het gebied liggen twee percelen, samen 23 ha, die akkerbouwmatig gebruikt worden: gerst, aardappel, tarwe, suikerbiet en witlof. De rest bestaat uit weilanden en een appelboomgaard.

Hier is vanaf juni 2018 tot aug 2021 door Meindert Commelin van de leerstoelgroep Bodemfysica en Landbeheer van de WUR intensief water en sediment bemonsterd op gewasbeschermingsmiddelen (Commelin et al. 2022) en is eerder bemonsterd voor de ontwikkeling van het LISEM-model (De Roo et al. 1996). Voor het onderhavige onderzoek is het water en sediment vanaf 2020 ook bemonsterd op fosfor. In Catsop wordt oppervlakkige afstromend water via een greppel opgevangen in een vijver. Daarin stroomt het water via een goot naar een sloot die in contact staat met het regionale oppervlaktewater. Met de monitoring zijn de hoeveelheid en samenstelling bepaald van het water en sediment dat via die greppel wordt afgevoerd. De ligging is weergegeven Figuur 5 (RD: 182369, 327583)).

Voor de ligging en karakteristien van het gebied is de waterafvoer alleen bij relatief grote buien gemeten. Het waterdebiet wordt automatisch gemeten met een flow meter. Het water wordt bemonsterd door een gekoelde automatisch bemonsteraar (ISCO Inc. Nebraska USA) en vult elke 12 minuten twee polyethyleen monsterflessen van 500 ml. Het maximumaantal monsterflessen dat gevuld kan worden, is 24. De watermonsters inclusief het sediment zijn na één of twee dagen opgehaald en ingevroren. De twee tegelijk bemonsterde flessen worden apart behandeld: de inhoud van één fles wordt gedroogd bij 105°C voor het bepalen van de sedimentconcentratie, de tweede fles wordt gebruikt voor het verkrijgen van een water- en sedimentmonster voor chemische analyse. In het laboratorium worden de monsters voor analyse in een dag ontdooid en gecentrifugeerd. Het centrifugaat wordt afgeheveld in een monsterpotje, en het sediment is uit de buis geschept. Het sedimentmonster is in een bekersglas gedroogd bij 40°C. Na weging van beide monsters zijn de monsters ingevroren voor analyse. Bij kleine hoeveelheden sediment zijn de sedimentmonsters van achtereenvolgende monsters samengevoegd om voldoende materiaal (>3 gram) te krijgen voor analyse.



**Figuur 5** Meetopstelling voor bemonstering van maaiveldafvoer en sediment aan Sickendaelweg te Catsop (foto: Google Street View, sept. 2021): a) zicht stroomopwaarts richting zuidoost, b) zicht stroomafwaarts richting noordwest.

De weergegevens bij Catsop worden gehaald uit KNMI-weerstation nummer 380 (N 50.905 E 5.762, 113 m boven NAP), en is 3,8 km van het onderzoeksgebied.



---

### Chemische analyses afspoeling

De bemonsterde locaties zijn weergegeven in Tabel 6. Een dag voor de analyses zijn de monsters ontdooid. De watermonsters van locatie 1 t/m 9 zijn zonder filtratie geanalyseerd op totaal Al, Ca, Fe, P met ICP-AES conform ISO 6966, en na filtratie op nitraat+nitriet, ammonium, totaal stikstof, en orthofosfaat met een gesegmenteerde flow analyse (SFA) met spectrofotometrische detectie conform NEN-ISO 15923-1. De watermonsters van locatie 10 zonder filtratie geanalyseerd op totaal Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, P, S met ICP-AES conform ISO 6966, na filtratie op nitraat+nitriet, ammonium, totaal stikstof, en orthofosfaat met een 'segmented flow analyse' (SFA) met spectrofotometrische detectie conform NEN-ISO 15923-1, en Cl met een discrete methode conform ISO 15682, pH met een pH meter, en EC met een geleidbaarheidsmeter.

De sedimentmonsters van locaties 1 t/m 8 en 10 zijn geanalyseerd op vochtgehalte (40°C), en na luchtdrogen en colloïdalen op 50 µm, op het gehalte aan in een ammoniumoxalaat-oxaalzuur oplosbaar fosfor ( $P_{ox}$ ), aluminium ( $Al_{ox}$ ) en ijzer ( $Fe_{ox}$ ) (alle in mmol/kg) volgens NEN 5776. Het fosfaatbindend vermogen (FBV) en de fosfaatbezetting van het monster (DPS; 'degree of P saturation') is berekend volgens Van der Zee et al. (1990), respectievelijk:  $FBV = 0,5(Al_{ox} + Fe_{ox})$ , en  $DPS = P_{ox} FBV^{-1}$ . Alle analyses zijn uitgevoerd door CBLB-WUR te Wageningen. Het laboratorium werkt conform ISO 17025 en is niet geaccrediteerd. Totaal N en totaal P is van de sedimentmonsters van locatie 10 bepaald na destructie met  $H_2SO_4/H_2O_2$ -Se en analyse met SFA, en koolstof na oxidatie met kaliumdichromaat/ $H_2SO_4$  volgens Kurmies en een spectroscopische meting omgezet chromaat (Walinga et al. 1992). Van 10 luchtdroge sedimentmonsters van locatie 10 (28 mei en 18 aug. 2019) zijn ook  $CaCl_2$ -extracties gedaan en organisch P: het verschil tussen totaal anorganisch P na verbranding van organische stof in een oven bij (550 °C) en zonder verbranding, en beide na destructie in 0,5 M  $H_2SO_4$  (Kuo 1996) en destructie in Fleischmann zuur (1:1  $HNO_3/H_2SO_4$ ) (Houba et al. 1993). Tien sedimentmonsters zijn geanalyseerd op P met ICP-AES, en P- $PO_4$  met een SFA conform NEN 15923-1, na een 1:10 met 0,01 M  $CaCl_2$  (Houba et al. 2000). In 2021 is een mengmonster gemaakt van de sedimentmonsters van locatie 5 t/m 8 en is hiervan zijn het lutumgehalte en de korrelgrootteverdeling bepaald via zeven en pipet (<2 µm, <16 µm, <50 µm, >50 µm) conform NEN 5753.

Op 18 september 2020 is de infiltratiesnelheid bepaald bij locatie 2, 3 en 4 (Wijnandsrade, Ysselsteyn en Veulen). Twee metingen zijn gedaan bij locatie 2 en 3 en één bij locatie 6: steeds op 6 m bovenstrooms en een benedenstrooms van plot 6. De methode is de dubbelringmethode (Massop et al. 2012). De kleine ring wordt in de grotere buitenring geplaatst. Voorzichtig wordt water binnen de ringen gegoten tot 16 cm +mv. De daling van het waterpeil is gemeten als functie van de tijd en is een maat voor de doorlatendheid van de bodem. Door het bodemoppervlak tussen de binnen- en de buitenring te verzadigen, wordt laterale stroming voorkomen.

## 3.5 Resultaten monitoring afspoeling percelen

Om de locaties met elkaar te vergelijken, is in Tabel 6 het aantal dagen met veel neerslag gegeven, en het aantal dagen met maaiveldafstroming. In 2021 is het weer gedetailleerd gemeten op locatie 5 t/m 9 (neerslag per minuut). In het jaar 2020 zijn geen gedetailleerde weergegevens beschikbaar, waardoor hier de meest nabij gelegen KNMI neerslagstations zijn gebruikt met neerslag per dag. Daarom zijn voor de vergelijking alleen de cijfers per dag gebruikt in onderstaande tabel in vergelijking tot het aantal dagen met oppervlakkige afstroming. Ter vergelijking zijn ook de data van Catsop toegevoegd in de tabel, waarvan de resultaten in paragraaf 0 apart worden besproken.

**Tabel 6** Cumulatieve neerslag, het aantal dagen met veel neerslag en het aantal dagen met oppervlakkige afstroming ('maaiveldafstroming'). Gewas: aardappel (A) of mais (M).

	Locatie	Gewas	metingen		Neerslag mm	Aantal dagen**			
			start	Einde		>5 mm/d	>10 mm/d	>20 mm/d	maaiveld afstroming
1	Baneheide	A	13-6-2020	28-8-2020	229**	11	8	3	6
2	Wijnandsrade	A	9-6-2020	31-8-2020	253**	12	9	4	5
3	Ysselsteyn	A	9-6-2020	21-8-2020	137***	6	3	1	3
4	Veulen	A	18-6-2020	21-8-2020	118***	5	2	1	3
5	Huls	A	14-5-2021	3-7-2021	430*	22	8	3	8
6	Wijnandsrade	A	27-6-2021	10-8-2021	302*	17	10	3	5
7	Deurne	A	15-5-2021	13-8-2021	337*	22	8	5	6
8	Sevenum	A	26-5-2021	29-6-2021	266*	16	8	3	4
9	Wijnandsrade	M	27-6-2021	10-8-2021		Zie 6			7
		M	7-12-2021	22-2-2022	174*				
10	Catsop	****	15-3-2019	20-10-2019	378	23	12	4	10
		****	23-2-2020	15-11-2020	464	34	12	4	15

\* op locatie gemeten met weerstation op locatie.

\*\* KNMI-station 962 Ubachsberg.

\*\*\* KNMI-station 921 Venray: per dag, geen gedetailleerde cijfers beschikbaar.

\*\*\*\* diverse percelen.

### Verschillen tussen locaties

In 2020 is de verzadigde infiltratiesnelheid gemeten op locatie 2, 3 en 4. De verzadigde laminaire infiltratiesnelheid bij locatie 2 (löss), 3 en 4 (beide zand) was respectievelijk 6, 171 en 253 cm/dag. De onverzadigde infiltratiecapaciteit bij locatie 2, 3 en 4 was respectievelijk 23, 342 en 673 cm/dag. In 2021 zijn op vier locaties de neerslag gemeten en het bodemvochtgehalte met een bodemsensor. De bodemvochtmetingen geven steeds aan dat het bodemvochtgehalte toeneemt tot verzadiging (dan is de spanning nul) vlak voordat er water afspoelt (zie 0). De verzadiging en oppervlakkige afvoer, treden meestal op als er veel regen valt in een kort tijdsbestek (1 à 30 mm in één uur, zie Tabel 35 in 0). De verzadiging treedt steeds eerst op bij de sensor op 10 cm diepte en snel daarna bij de sensor op 30 cm diepte. Dit beeld past bij 'Dunne overland flow': oppervlakkige afstroming zodra de bovengrond verzadigd is.

Voordat de maaiveldafstroming wordt besproken, worden eerst de chemische analyses van het water en sediment besproken. In Tabel 7 staan de gemiddelde concentraties van het ongefiltreerde water per locatie (in Bijlage 2 staan de gemiddelde data per behandeling en locatie). De verschillen tussen de twee type fosfaatmetingen, P gemeten met ICP-AES en P-PO<sub>4</sub> met SFA, zijn gering, wat erop wijst dat er in de opgevangen wateroplossingen weinig andere vormen van fosfaat zijn dan orthofosfaat (PO<sub>4</sub>). Dat wil zeggen dat het afgespoelde water geen colloïdaal fosfaat bevat.

De metingen van de andere parameters geven hoge tot zeer hoge ammonium- en nitraatconcentraties. De metingen van Fe en Al geven aan dat er soms colloïdale deeltjes (bodemdeeltjes) in de monsters zaten (Fe is maximaal 1,3 mg/l), en calcium (Ca) is mogelijk relevant vanwege de stabiliteit van bodemdeeltjes. De hoge ammonium (NH<sub>4</sub>) concentraties t.o.v. nitraat (NO<sub>3</sub>) zijn kenmerkend voor maaiveldafstroming, omdat in aerob bodemvocht door nitrificatie bijna altijd alle stikstof in de vorm van nitraat voorkomt. Bijvoorbeeld in het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) wordt in bodemvocht gemiddeld 137 mg/l NO<sub>3</sub> (nitraat) en 0,1 mg/l NH<sub>4</sub> gemeten (<https://lmm.rivm.nl/Tabel/2019/Nitraat>, <https://lmm.rivm.nl/Tabel/2019/Ammonium>). De aanwezigheid van ammonium in het afgespoelde water duidt op verliezen van ammonium vanuit recente bemesting.

**Tabel 7** Gemiddelde concentraties in ongefilterde maaiveldafvoer (mg L<sup>-1</sup>).

	Locatie	Jaar	gewas	P	P-PO4	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	Fe	Al	Ca	Aantal
1	Baneheide	zomer 2020	A	0,9 ±1,1	0,8 ±1,1	4	5	0,1	0,05	7	34
2	Wijnandsrade	zomer 2020	A	0,6 ±0,6	0,6 ±0,6	1	4	0,1	0,03	16	26
3	Ysselsteyn	zomer 2020	A	2,4 ±2,7	2 ±2,3	16	6	0,4	0,07	24	16
4	Veulen	zomer 2020	A	0,8 ±1,2	0,6 ±1	44	96	0,1	0,03	70	9
5	Huls	zomer 2021	A	1,1 ±0,4	1,1 ±0,3	1	4	0,1	0,11	6	55
6	Wijnandsrade	zomer 2021	A	3 ±3,1	2,4 ±2,5	14	26	0,4	0,27	49	12
7	Deurne	zomer 2021	A	0,7 ±0,5	0,6 ±0,4	10	10	0,1	0,06	5	33
8	Sevenum	zomer 2021	A	1,0 ±1,7	0,9 ±1,5	2	10	0,1	0,03	21	20
9	Wijnandsrade	zomer2021	M	0,4 ±0,3	0,3 ±0,2	1	40	0,1	0,04	46	75
		winter 2021-2022	M	1,6 ±3,2	1,2 ±2,3	1	6	0,7	0,84	15	42
10	Catsop	2019+2020		0,7 ±0,4	0,5 ±0,3	0,6	4	0,5	0,7	12	171

**Tabel 8** Gemiddelde P-, Fe- en Al-gehalten (mmol kg<sup>-1</sup>) en DPS van sediment\*<sup>2</sup>

	Locatie	Jaar	P	Fe	Al	Mn	DPS	aantal
1	Baneheide	2020	17 ±8	28 ±7	42 ±10	5 ±1	0,38 ±0,09 * <sup>4</sup>	17
2	Wijnandsrade	2020	13 ±1	25 ±2	45 ±4	6 ±1	0,37 ±0,02	18
3	Ysselsteyn	2020	24 ±7	41 ±14	9 ±2	1 ±0	0,97 ±0,07	3
4	Veulen	2020	13 ±4	16 ±5	15 ±7	1 ±1	0,86 ±0,17	8
5	Huls	2021	24 ±11	48 ±29	70 ±45	8 ±3	0,44 ±0,06	35
6	Wijnandsrade	2021	* <sup>2</sup>					
7	Deurne	2021	103 ±69	122 ±79	106 ±68	3 ±2	0,87 ±0,07	27
8	Sevenum	2021	28 ±10	30 ±10	35 ±12	2 ±1	0,87 ±0,03	18
9	Wijnandsrade	2021	* <sup>3</sup>					
	Wijnandsrade	2022	* <sup>3</sup>					
10	Catsop	2019/2020	33 ± 17	86 ± 43	65 ± 37	10 ±4	0,44 ±0,07	57
	Kalkloze zand	Landelijk	13 ± 8	36 ± 43	34 ±20		0,40 ± 0,26	595
	Loss	onderzoek	13 ± 4	50 ± 15	32 ±13		0,33 ± 0,12	54

\*<sup>1</sup> DPS= 2 P<sub>ox</sub> / (Fe<sub>ox</sub>+Al<sub>ox</sub>), van sedimentmonsters, waarbij P, Fe en Al in mmol/kg.

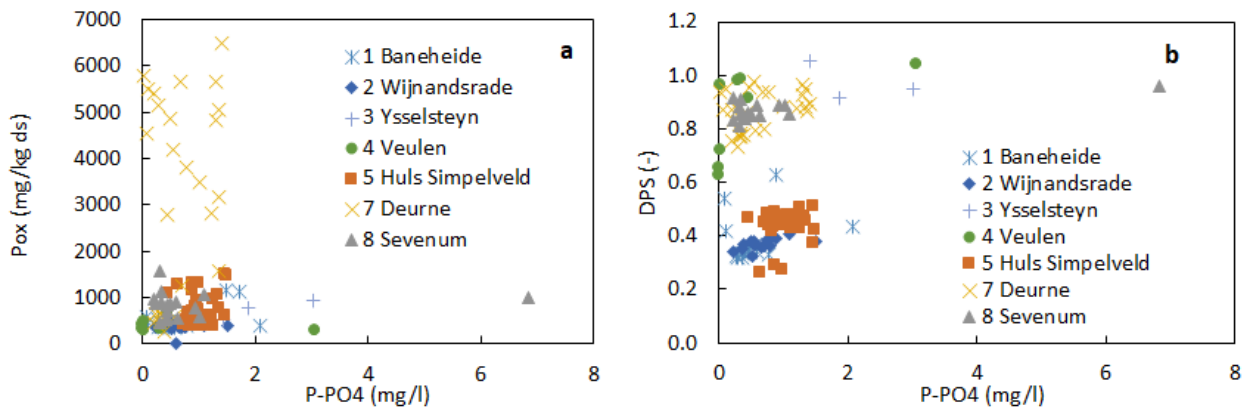
\*<sup>2</sup> Dit betreft fosfaatbezetting van grondmonsters, en niet fosfaatverzadiging voor bodemprofiel zoals in Schoumans et al. (2004).

\*<sup>3</sup> Geen sediment verzameld.

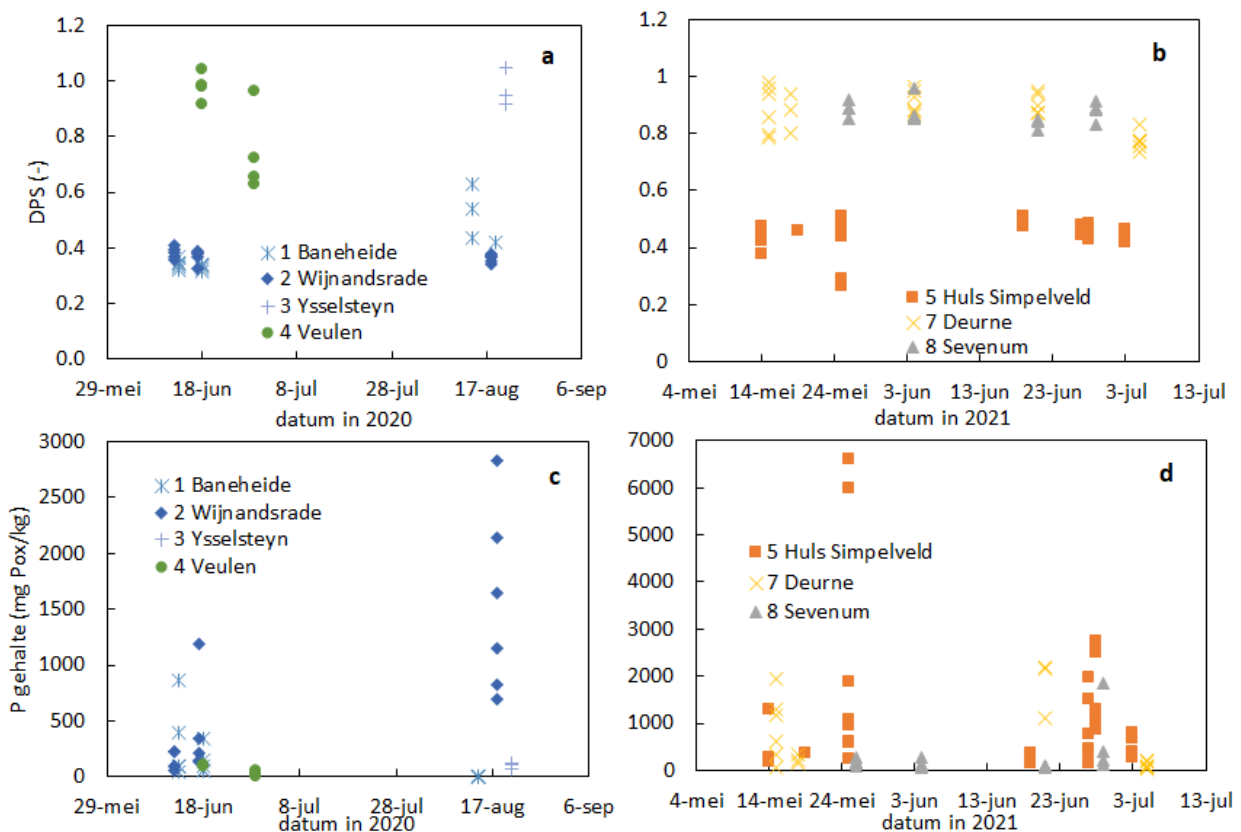
\*<sup>4</sup> Exclusief twee monsters met DPS>1. Inclusief die twee monsters is het gemiddelde 0,58.

De fosforgehalten van het sediment variëren sterk tussen locaties, en enigszins per locatie (Tabel 8, Figuur 6a in mg/kg) terwijl de variatie in fosfaatbezetting (DPS; Figuur 6b) per locatie gering is. De fosfaatbezetting (DPS) varieert ook nauwelijks als functie van bemonsteringstijd (Figuur 7). De fosfaatbezetting in het sediment uit de zandgronden (3,4,7,8) is veel hoger dan de löss locaties (1,2,6,9,10). De fosfaatbezetting is met 0,8 of hoger, bij de zandgronden (locaties 3, 4, 7, 8) veel hoger, als het vergeleken wordt met DPS-waarden voor de bouwvoor van kalkloze zandgronden (0-30 cm -mv) in landelijk onderzoek: 0,40 ± 0,26 (n=112) (LSK-onderzoek) (Finke et al. 2001). Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat deze monsters zijn genomen in de praktijkpercelen die in het voorjaar bemest zijn, terwijl regulier P-onderzoek van de bodem in de winter gebeurt. De fosfaatbezetting bij het sediment van de löss-locaties (1, 2, 6, 9, 10) is met 0,37 tot 0,44 licht hoger dan de DPS voor de bovengrond van lössbodems (0-30 cm -mv) in LSK: 0,33 ± 0,12 (n=54) (Finke et al. 2001). De P<sub>ox</sub>-, Fe<sub>ox</sub>- en Al<sub>ox</sub>-gehalten van de sedimenten (in mmol per kg in tabel, en mg/kg in figuur) zijn veel hoger dan de bodemmonsters in de landelijke dataset (LSK) en geeft aan dat een meer reactieve fractie uit de bodem erodeert. De relatieve standaarddeviatie bij de fosfaatbezetting (DPS) (standaarddeviatie/gemiddelde gehalte) is veel kleiner dan de relatieve standaarddeviatie bij de P<sub>ox</sub>-, Fe<sub>ox</sub>- en de Al<sub>ox</sub>-gehalten. Er is dus tussen bemonsteringstijdstippen een groot verschil in het P<sub>ox</sub>- gehalte van het sediment, maar de DPS is ongeveer constant. De verschillen in het P<sub>ox</sub>-gehalte tussen de tijdstippen worden dus veroorzaakt door verschillen in het aandeel fijne, ijzerhoudende gronddeeltjes in het sediment, omdat die deeltjes de drager zijn voor fosfaat.

De fosfaatbezetting in de bouwvoor van zandgronden ( $0,40 \pm 0,26$ ) en de fosfaatbezetting in het sediment van de onderzoekslocaties op zand ( $0,97 \pm 0,07$ ,  $0,86 \pm 0,17$ ,  $0,87 \pm 0,07$ ,  $0,87 \pm 0,03$ ), hebben een klein bereik aan waarden, maar verschillen sterk. Dit is relevant, omdat een meting van alleen sedimentmassa, in combinatie met de fosforgehalten in de bouwvoor, een onderschatting geeft van de hoeveelheid fosfor die afspoelt. Het onderzoek toont aan dat fosfaatgehalten in het sediment fors hoger zijn dan in de bouwvoor.



**Figuur 6** a) Fosfaatgehalte ( $\text{mg P kg}^{-1} \text{ ds.}$ ) en b) fosfaatbezetting (DPS) van sedimentmonsters in relatie tot fosfaatconcentratie in het water ( $\text{mg P-PO}_4/\text{l}$ ).  $\text{DPS} = 2 P_{\text{ox}} / (\text{Fe}_{\text{ox}} + \text{Al}_{\text{ox}})$ .



**Figuur 7** Fosfaatbezetting (DPS) van sedimentmonsters (a, b), en fosforgehalten\* (c, d) in relatie tot bemonsteringstijdstip.  $\text{DPS} = 2 P_{\text{ox}} / (\text{Fe}_{\text{ox}} + \text{Al}_{\text{ox}})$ . Er waren geen sedimentmonsters bij locatie 6 Wijnandsrade. \*Fosforgehalten op basis van  $P_{\text{ox}}$ .

Onderzocht is of de granulaire samenstelling van het sediment afwijkt van de bouwvoorsamenstelling. De metingen aan het sediment suggereren een veel lagere fractie zand ( $>50 \mu\text{m}$ ) in het sediment (48%) dan de bouwvoor (81%) bij locatie 7 (zandgrond). Bij locatie 5 (lössgrond) is echter weinig verschil tussen de

deeltjesgrootte in sediment en grond (Tabel 9). De granulaire samenstelling is ook belangrijk, omdat de deeltjesgrootteverdeling bepalend is voor maatregelen waarbij bezinking van de deeltjes belangrijk is: hoe kleiner de deeltjes die je wilt laten sedimenteren, hoe groter de benodigde retentie-vijver is (Chrétien et al. 2016).

**Tabel 9** Granulaire samenstelling van mengmonster van sedimentmonsters.

Locatie	sediment				bouwvoor			
	< 2 µm	< 16 µm	< 50 µm	> 50 µm	< 2 µm	< 16 µm	< 50 µm	> 50 µm
5 Huls	16,5	38,5	77,8	14,0	15,1	30,5	80,6	17,7
7 Deurne	11,1	23,4	31,9	48,1	3,1	6	14,1	81,2
8 Sevenum	3,3	5,6	12,8	81,8	-	-	-	-

Verder is getoetst in hoeverre de fosfaatgehalten in sediment bestaan uit fosfaat gebonden aan Fe<sub>ox</sub> en Al<sub>ox</sub> (geadsorbeerde fosfaat) of deels bestaat uit calciumfosfaat, bijvoorbeeld door uitspoeling van restanten van dierlijke mest. Het aanzuren van mest laat meestal veel hogere oplosbare P-gehalten zien door het oplossen van calciumfosfaten (Regelink et al. 2021). Het effect van pH is ook relevant voor het effect van kalk (hoofdstuk 7) en de resultaten van deze proef zijn daarom opgenomen in hoofdstuk 7 (Figuur 22). Dit onderzoek naar de rol van aanzuren is uitgevoerd op sedimentmonsters met hoge tot zeer hoge fosfaatgehalten (Tabel 8) (P<sub>ox</sub> bij monster 5, 7 en 8 is resp. 753, 3201, 883 mg P/kg): DPS bij monster 5, 7 en 8 is gemiddelde 0,4, 0,9, en 0,9. Een dergelijke hoge fosfaatverzadiging wordt mogelijk veroorzaakt door de aanwezigheid van meststoffen. De beschikbaarheid in CaCl<sub>2</sub>, bij de laagste pH, ten opzichte van P<sub>ox</sub> is bij monster 5, 7 en 8, 4,1%, 0,3% en 3,2% van P<sub>ox</sub>. Dat geeft aan dat het fosfaat grotendeels gebonden is, maar de beschikbaarheid wel door pH beïnvloed kan worden. Overigens, het aanzuren bij mest geeft een veel hogere beschikbaarheid van fosfaat bij varkensmest (75-90%) en rundveemest (40-60%) (Regelink and Rietra 2021) dan hier wordt gevonden. De conclusie is dat het fosfaat in het sediment sterk gebonden is aan bodemdeeltjes en niet bestaat uit makkelijk oplosbare calciumfosfaten uit meststoffen.

**Tabel 10** Maaiveldafstroming (mm water, en kg P ha<sup>-1</sup>) en som van neerslag (mm\*) over meetperiode. Betreft som van een aantal bakken (n) per locatie.

Locatie	Gewas	n	Start-eind datum	Neerslag*	Afspoeling	Sediment	Water	Sediment #	% P via sediment
				mm	kg ha <sup>-1</sup>	kg P ha <sup>-1</sup>	kg P ha <sup>-1</sup>		
1 Baneheide	A	6	13-6 tot 28-8-20	229	10,2	1298	0,068	0,51	88
2 Wijnandsrade	A	6	9-6 tot 31-8-20	253	9,8	6727	0,058	2,67	98
3 Ysselsteyn	A	6	9-6 tot 21-8-20	137	1,0	84	0,010	0,13	93
4 Veulen	A	6	18-6 tot 21-8-20	118	2,2	198	0,014	0,17	92
5 Huls	A	6	14-5 tot 3-7-20	430	11,8	8623	0,122	7,62	98
6 Wijnandsrade	A	6	27-6 tot 10-8-21	302	4,3	0	0,003	0	0
7 Deurne	A	6	15-5 tot 13-8-21	337	13,0	1064	0,031	5,49	99
8 Sevenum	A	6	26-5 tot 29-6-21	266	3,8	949	0,024	1,33	98
9 Wijnandsrade	M	12	27-6 tot 10-8-21	302	4,4	232	0,068	**	
idem	M	6	7-12-21 tot 22-2-22	174	6,9	368	0,013	0,62	98

\* betreft neerslag van KNMI-stations (2020) of weerstations op meetlocatie (2021), zie ook Tabel 6.

# De P<sub>ox</sub>-gehalten van het sediment zijn gemeten als benadering van P-totaal in sediment.

\$ bakken overgelopen, geen P analyses (som geeft daarom onderschatting van werkelijke P-afstroming).

\*\*geen P-metingen aan sediment.

De metingen laten zien dat de maaiveldafstroming via water varieert van 0,003 tot 0,122 kg P ha<sup>-1</sup>, en dat de afstroming van P via sediment veel gevarieerder en groter is: 0- 7,62 kg P ha<sup>-1</sup>. De P-metingen in sediment zijn een benadering, omdat P<sub>ox</sub> is gemeten. P<sub>ox</sub> is bij Catsop is 66% van het totale P-gehalte (paragraaf 3.7).

Het verschil tussen de zomer en winter is gemeten op locatie 9 in Wijnandsrade. De totale neerslag in de meetperiode in de zomer van 28-6-2021 t/m 10-8-2022 was 302 mm, en hierbij was de afspoeling 4 mm. De totale neerslag in de meetperiode in de winter van 7-12-2021 t/m 22-2-2022 was 174 mm, en hierbij was de afspoeling 6,9 mm (Tabel 10). Opvallend is dat afspoeling plaatsvindt in de winter na kleine buien (neerslag in laatste 24 uur: Tabel 13), terwijl afspoeling in de zomer plaatsvindt na zware buien (neerslag in laatste 24 uur: Tabel 14).

Een probleem bij de uitwerking van de data zijn de missende metingen bij overgestroomde bakken. Het is duidelijk dat er veel afstroming is geweest, maar het is niet eenduidig hoe de P-afspoeling berekend kan worden. Optie 1: wanneer de bak was overstromd, voor het afgestroomde debiet het volume van de bak hanteren en concentratie hanteren van het bemonsterde water uit de bak, en daarbij de opmerking van overstromd. Optie 2: bij overstroming geen watervolume opgeven en de P-concentratie schatten op basis van andere metingen. Optie 1 is gehanteerd in de tabellen. In 2021 was er een overstroming van alle bakken op 4 juni 2021 bij locatie 7 (Deurne), op 15 juli 2021 bij locatie 9 (Wijnandsrade) en op 21 juni zijn bij locatie 7 de helft van de bakken overstromd en zijn geen water- en sedimentmonsters genomen. Bij twee andere locaties zijn enkele bakken overstromd, maar zijn wel monsters genomen (1 bak Deurne 15 mei 2021; 2 bakken Huls, 25 mei 2021). Een belangrijke constatering is derhalve dat na hevige regelval sommige bakken overstromd zijn en dat daarbij veel drempels nagenoeg weggespoeld zijn. Na zo'n hevige bui is daar dus geen 'afstromingsremmend' effect meer van de drempels.

### Maaiveldafstroming, en het effect behandelingen

Het effect van de behandelingen op de maaiveldafspoeling van water en sediment staat in Tabel 11, en het effect of de fosfaatuitspoeling via water en sediment in Tabel 12. De behandelingen waren het gebruik van drempels tussen aardappelryggen en het verruigen van de aardappelryggen via gitterrollen of het maken van de ruwere ryggen met de grimme.

**Tabel 11** Water- en sedimentafspoeling: effect per behandeling bij aardappelpercelen op som van maaiveldafstroming. Locatie 1 en 6 in duplo, rest in triplo. De behandeling met gitterrollen en grimme is alleen op locatie 1 en 5 uitgevoerd.

	Locatie	Water (mm of L m <sup>-2</sup> )				Sediment (kg ds ha <sup>-1</sup> )			
		ref	Drempel	Gitterrollen	Grimme +	ref	drempel	Gitterrollen	Grimme +
1	Baneheide	14,3	8,1	6,2		2310	424	317	
2	Wijnandsrade	10,4	9,1			5500	5160		
3	Ysselsteyn	1,3	0,8				137		
4	Veulen	2,2	2,1			425	336		
5	Huls	16,2	10,4	11,4	8,9	9283	6272	10619	3048
6	Wijnandsrade	4,4	4,3						
7	Deurne	12,7	13,4			987	993		
8	Sevenum	5,1	2,6			1197	890		

Locatie 6: overstromen van bakken, gerekend is met het maximaal volume in bak: geen %verlaging is berekend.

Het effect van drempels op waterafspoeling water is niet heel duidelijk (Tabel 11): meestal geeft het minder afspoeling. Maar mede door het geringe aantal herhalingen (duplo of triplo) zijn de effecten niet statistisch te toetsen en dus indicatief. De effecten lijken met name in de eerste maand verschillend als het aardappelloof de bodem nog niet volledig bedekt.

**Tabel 12** Fosforafspoeling via water en sediment: effect behandeling bij aardappelpercelen op som van maaiveldafstroming. Locatie 1 en 6 in duplo, rest in triplo. De behandeling met gitterrollen en grimme is alleen op locatie 1 en 5 uitgevoerd.

Locatie		P (kg P ha <sup>-1</sup> )				P sediment (kg P ha <sup>-1</sup> )			
		ref	drempel	Gitterrollen	Grimme +	ref	drempel	Gitterrollen	Grimme +
1	Baneheide	0,06	0,06	0,08		0,9	0,2	0,2	
2	Wijnandsrade	0,07	0,05			2,2	2,0		
3	Ysselsteyn	0,01	0,01				0,1		
4	Veulen	0,01	0,02			0,2	0,1		
5	Huls	0,16	0,13	0,12	0,08	8,6	3,4	5,5	4,7
6	Wijnandsrade	0,004	0,002						
7	Deurne	0,03	0,03			3,2	3,0		
8	Sevenum	0,03	0,02			1,3	0,8		

Locatie 6: overstromen van bakken.

Het effect van drempels op fosforafspoeling via water is klein (Tabel 12): meestal geeft het een iets lagere afspoeling. Drempels zorgen op alle acht locaties voor een verlaging van de maaiveldafstroming van P via sediment, maar ook hiervoor geldt dat het aantal herhalingen te klein is om het effect statistisch te kunnen kwantificeren (Tabel 12). Het grootste effect werd gemeten op locatie 5: de drempels gaven een verminderde afspoeling van 7,2 kg P ha<sup>-1</sup> t.o.v. de referentie. Ook de andere technieken (gitterrollen, grimme) gaven minder fosfaatafspoeling via water en sediment. De gegevens per regenbui zijn gegeven in Bijlage 2. Het meeste effect van de drempels wordt gevonden bij de vroegste buien als het aardappelgewas nog niet volgroeid is of de drempels nog niet zijn weggespoeld.

Het effect van vanggewas en patroon van mais op löss is getest op locatie 9 (Wijnandsrade). Het vanggewas is gezaaid samen met de mais. De mais is op verschillende afstanden van elkaar gezaaid.

**Tabel 13** Effect behandeling bij maisperceel (locatie 9) in zomer 2021 op maaiveldafstroming: water- en P-afspoeling. \*<sup>2</sup>

dag	Neerslag* <sup>3</sup>	Water (mm of L m <sup>-2</sup> )							Totaal P (g P ha <sup>-1</sup> ) * <sup>2</sup>								
		Geen vanggewas			Gelijkzaai				*	Geen vanggewas			Gelijkzaai				*
		37,5 cm	50 cm	75 cm	37,5 cm	50 cm	75 cm	37,5 cm		50 cm	75 cm	37,5 cm	50 cm	75 cm			
28-6-21	0,4	0,1	0,4	0,4	0,0	0,2	0,1	*	0,6	1,2	2,4	0,2	1,9	0,8			
29-6-21	34,6	0,6	1,1	1,2	0,2	0,5	0,2	*	1,3	1,9	3,7	0,4	0,9	0,8			
30-6-21	12,6	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	*	0,5	0,6	0,7	0,3	0,2	0,2			
5-7-21	16	0,0	0,0	0,0		0,0			0,1	0,1	0,2		0,0				
13-7-21	70,2	0,3	0,3	1,8	0,7	0,4	0,4		1,0	0,9	2,6	8,0	0,7	1,4			
5-8-21	13,4	1,3	1,7	3,1	0,7	1,5	1,0		5,4	6,2	10,6	3,4	5,8	4,4			
10-8-21	25,4	1,3	0,7	3,1	0,5	0,8	0,7		5,7	3,6	12,0	1,7	3,9	2,5			

\*1 t- toets: Gelijkzaai vs. Geen vanggewas (p<0,05).

\*2 Geen meting van sediment omdat die vrijwel afwezig was.

\*3 Neerslag in 24 uur voor bemonstering.

De inzaai van een vanggewas, tegelijk met de mais ('gelijkzaai'), heeft een significant effect op drie van de zeven momenten van maaiveldafvoer van water, en twee van de zeven momenten van maaiveldafvoer van fosfaat.

In de winter zijn zes veldjes verschillend de winter in gegaan: wel/geen rijsporen bewerkt, wel/geen zaaibereiding, wel/geen vanggewas (rietzwenk of wintertarwe). De resultaten zijn verschillend, maar door gebrek aan herhalingen is onzeker of het door de behandelingen komt of door toevalligheden. Indicatief is

vast te stellen dat de meeste afspoeling plaatsvond bij het onbehandelde veldje en het minst bij het behandelde veld met vanggewas.

**Tabel 14** Maaiveldafspoeling water en sediment en P-afspoeling via water en sediment bij maisperceel (locatie 9) in winter 2021-2022. De gegeven neerslag betreft de neerslag in de 24 uur voor de monsternamen op de genoemde dag.

dag	Neerslag (mm)	Water (mm of L m <sup>-2</sup> )	Sediment (g ds ha <sup>-1</sup> )	P (g P ha <sup>-1</sup> )	P-sediment (g P ha <sup>-1</sup> )
7-12-2021	2,2	0,3	27	0.8	72.9
14-12-2021	0	0,01		0.1	
7-1-2022	1,0 * <sup>3</sup>	2,0	150	4.7	261
31-1-2022	11,6	0,01		0.2	
10-2-2022	6,4	0,3		0.9	
15-2-2022	4,6	0,8		0.7	
17-2-2022	4,4	0,7		1.2	
21-2-2022	6,8	1,9	191	2.7	289
22-2-2022	1,6	0,9		1.5	
som		6,9	368	12.8	623

\*<sup>2</sup> Geen meting van sediment.

\*<sup>3</sup> Op 12, 13 en 14-12-2022 was de neerslag < 1 mm.

\*<sup>4</sup> Op 5-1-2022 was neerslag 3,2 mm.

### 3.6 Discussie afspoeling aardappelpercelen

De P-concentratie bij afspoeling was met 0,3-2,4 mg P L<sup>-1</sup> duidelijk hoger dan de KRW-doelen voor oppervlaktewater van ≈0,1 mg P L<sup>-1</sup>. Afhankelijk van de P-afstroming kan dit belangrijk zijn voor de resulterende P-concentratie in het oppervlaktewater. In de veldproeven bij aardappelen en mais in de zomer van 2020 en 2021 varieerde de gemiddelde P-afspoeling tussen 0,003 tot 0,12 kg P ha<sup>-1</sup> in de vorm van water. De afspoeling in de vorm van sediment varieerde van 0 tot 7,62 kg P ha<sup>-1</sup> bij maximaal 8,6 ton sediment ha<sup>-1</sup> (droge stof). De maaiveldafstroming via water bleef met 1,3 tot 16,2 mm heel beperkt. Dat betekent dat ook bij hoge neerslag het overgrote deel van de neerslag in de bodem infiltreerde. Een beperkte vergelijking is mogelijk met eerdere metingen op zandgronden in Nederland. Bij gras op zand in Boekelo (Torenbeek 2003) is een fosfaatconcentratie van gemiddeld 3,5 mg P L<sup>-1</sup> (41 metingen) gemeten van surface run-off plus afvoer door de bovenste 10 cm van de bodem, met vangplaten. De bodemvochtconcentraties waren op 10 cm diep 0,55 mg P L<sup>-1</sup>. Fosfaatconcentraties in oppervlakkige afspoeling (0 tot 2 mg P L<sup>-1</sup>) zijn meestal sterk gecorreleerd aan de P-gehalten in de bodem, zo blijkt uit een review van buitenlandse onderzoeken (Vadas et al. 2005). De aardappelpercelen in dit onderzoek hebben normale tot hoge P-AI gehalten (Tabel 2).

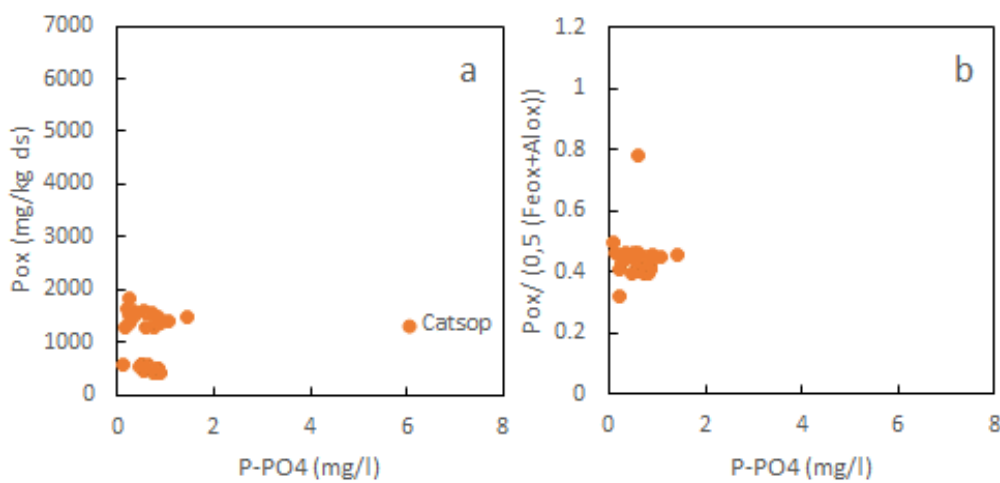
Eerder heeft onderzoek laten zien dat via drempels tussen aardappelruggen en bij ruitzaaien van mais, de infiltratie van water verhoogd wordt en er minder oppervlakkige afspoeling van water is. In het huidige onderzoek in 2020 en 2021 zijn de behandelingen in duplo of triplo uitgevoerd. De behandelingen met drempels tussen de aardappelruggen gaf bij de meeste locaties een lagere afspoeling van water en opgelost fosfaat, en alle locaties minder afspoeling van sediment en totaalfosfaat. Het effect kan echter niet gekwantificeerd worden doordat het aantal herhalingen daarvoor te klein was. Het effect van ruitzaaien bij mais was bij drie van de acht buien significant voor waterafspoeling en twee van de acht keer bij fosfaat opgelost in water.



### 3.7 Resultaten afspoeling stroomgebied Catsop

Het water en het sediment zijn gedurende twee jaar bemonsterd en geanalyseerd op fosfaat: 15 maart 2019 t/m 15 november 2020. Gedurende deze meetperiode van 19 maanden waren er 26 te onderscheiden buien waarbij er water in de beek stroomde.<sup>4</sup> Het stroomgebied betreft 38 hectare. De maaiveldafstroming gaf in totaal 279 m<sup>3</sup> water ha<sup>-1</sup> en 2570 kg sediment ha<sup>-1</sup> gedurende deze 19 maanden (Tabel 16).<sup>2</sup> Bij een neerslag van 940 mm (KNMI-station 380 Maastricht-Aachen) (9420 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) is in die periode 3% van de neerslag oppervlakkig afgestroomd. Het sedimentgehalte in het afgestroomde water varieerde sterk, van 1 tot 110 g L<sup>-1</sup>, met een gewogen gemiddelde van 9,0 g L<sup>-1</sup>.

De fosfaatconcentratie in het afstromende water is met gemiddeld 0,5 mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup> en 0,6 mg P l<sup>-1</sup> (gewogen gemiddelde: Tabel 16) hoog ten opzichte van de KRW-doelen voor oppervlaktewater. De P- gehalten in het sediment zijn: 1367 ±590 mg P kg<sup>-1</sup> sediment (zie ook Tabel 15; en Figuur 8). De gemiddelden per event zijn gegeven in Tabel 16. De totale maaiveldafstroming in 19 maanden via water was per ha: 0,17 kg P ha<sup>-1</sup>, en via sediment 2,2 kg P ha<sup>-1</sup>. Dat laatste is hoger dan de berekende gemiddelde af- en uitspoeling in Zuid-Limburg: 0,35 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup> (Schipper et al. 2021b) (figuur 5.9 daarin).



**Figuur 8** a) Fosfaatgehalte (mg P/kg ds.) en b) fosfaatbezetting (DPS) van sedimentmonsters in relatie tot fosfaatconcentratie (mg P-PO<sub>4</sub>/l).  $DPS = 2 P_{ox} / (Fe_{ox} + Al_{ox})$ .

Bij locatie Catsop is het gehalte aan C, N en organische P bepaald bij het sediment. Terwijl de totaalgehalten sterk variëren, zijn de verhoudingen tussen de meeste stoffen binnen een nauw bereik (zie Figuur 8). Dit suggereert dat de gehalten in sediment variëren, doordat een fijne fractie, met relatief hoge gehalten aan C, N, P, Fe en Al, gemengd is met een grovere fractie met relatief lage gehalten. Dit is relevant omdat één meting, bijvoorbeeld van de bouwvoor, dus geen goed beeld geeft van het variërende fosforgehalte in het sediment.

**Tabel 15** Chemische samenstelling van mengmonster van sedimentmonsters.

Locatie	C	N	P	Porg	C/N	Al/Fe	Pox/P
	g kg <sup>-1</sup> ds.		mg kg <sup>-1</sup> ds.		-	-	-
10 Catsop	29 ±13	3,0 ±1,5	1367 ±590	30%	10,4 ± 1,3	0,35 ± 0,037	0,66 ± 0,14

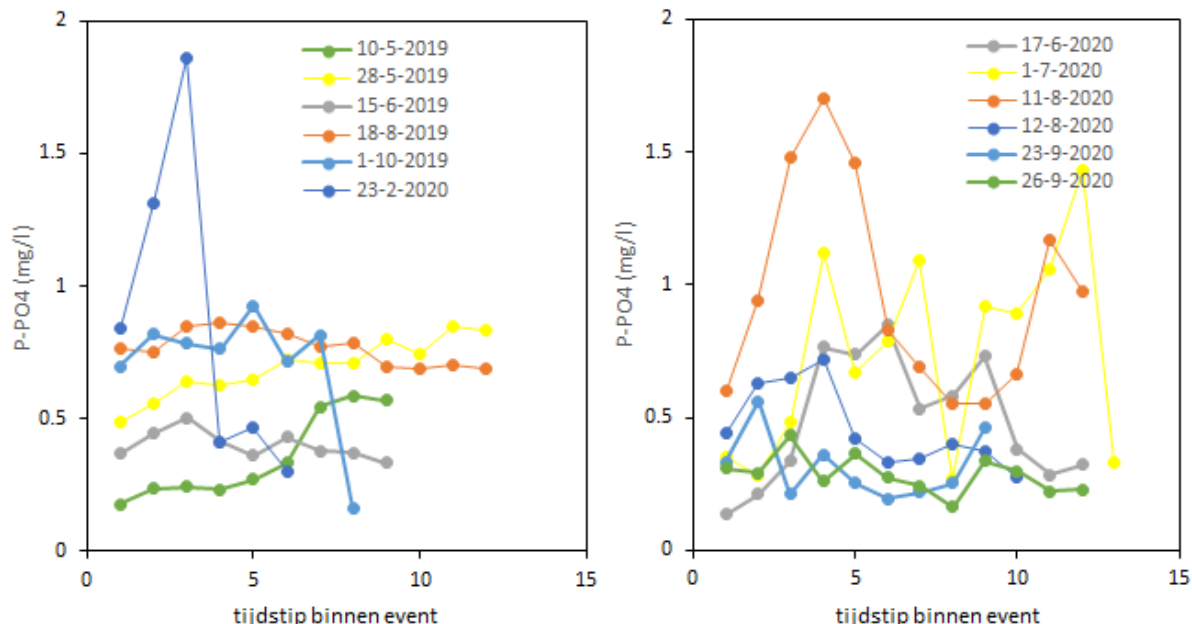
<sup>4</sup> Deze cijfers wijken af van de publicatie van Commelin et al. (2022), omdat daarin slechts 14 van de 26 buien zijn meegenomen over dezelfde meetperiode, omdat het in die publicatie specifiek over pesticiden gaat.

**Tabel 16** Maaiveldafstroming van water en fosfor bij stroomgebied Catsop (data water en sediment: mond. med. Meindert Commelin). Het stroomgebied heeft een oppervlak van 38 ha (Commelin et al. 2022). De neerslagsom bij het KNMI-station (nr 380) was in de meetperiode van 19 maanden 940 mm.

Event	Datum	Neerslag*		Afstromend Water		Afstromend Sediment		P -afstromend water		P ** gehalte sediment	Water	Sediment	% P via sediment
		mm	m <sup>3</sup>	mm	kg	kg ha <sup>-1</sup>	mg P-PO <sub>4</sub> /L	mg P/L	mg P kg <sup>-1</sup>	kg P	kg P		
1	15.03.19	24	870	2,3	24	0,6	0,86	0,92	1197	0,80	0,03	3%	
2	10.05.19	1	123	0,3	177	4,7	0,36	0,40	1930	0,05	0,34	87%	
3	28.05.19	7	335	0,9	14880	391,6	0,69	0,75	887	0,25	13,19	98%	
4	05.06.19	22	525	1,4	36	0,9	0,46	0,50	1531	0,26	0,05	17%	
5	15.06.19	5	348	0,9	2850	75,0	0,40	0,44	1319	0,15	3,76	96%	
6	18.08.19	9	882	2,3	8427	221,8	0,77	0,82	727	0,73	6,12	89%	
7	28.09.19	8	57	0,2	505	13,3	0,32	0,47	1126	0,03	0,57	96%	
8	29.09.19	7	120	0,3	1541	40,6	0,75	0,92	928	0,11	1,43	93%	
9	01.10.19	27	565	1,5	6095	160,4	0,71	0,79	889	0,45	5,42	92%	
10	20.10.19	5	433	1,1	2179	57,3	-	-	-	-	-	-	
11	23.02.20	6	105	0,3	0	0	0,86	0,96	1289	0,10	-	-	
12	17.06.20	19	171	0,4	1109	29,2	0,49	0,52	2002	0,09	2,22	96%	
13	26.06.20	5	48	0,1	42	1,1	0,26	0,33	-	0,02	-	-	
14	01.07.20	11	267	0,7	857	22,6	0,74	0,81	2027	0,22	1,74	89%	
15	11.08.20	3	231	0,6	558	14,7	0,97	1,42	1701	0,33	0,95	74%	
16	12.08.20	11	166	0,4	469	12,3	0,46	0,73	-	0,12	-	-	
18	16.08.20	19	2544	6,7	53717	1413,6	0,50	0,61	765	1,56	41,08	96%	
19	30.08.20	10	201	0,5	1170	30,8	0,29	0,52	-	0,10	-	-	
20	23.09.20	7	61	0,2	19	0,5	0,32	0,90	2288	0,06	0,04	45%	
21	26.09.20	22	1617	4,3	25	0,6	0,29	0,38	-	0,61	-	-	
22	28.09.20	2	0	0,0	1	0	-	-	-	-	-	-	
23	03.10.20	4	203	0,5	3	0,1	0,20	0,27	2390	0,05	0,01	10%	
24	08.10.20	3	467	1,2	1190	31,3	0,21	0,38	2228	0,18	2,65	94%	
25	22.10.20	2	346	0,9	1763	46,4	0,33	0,36	2082	0,12	3,67	97%	
26	15.11.20	4	65	0,2	6	0,2	0,24	0,27	2744	0,02	0,02	49%	
Som		244	10750	28	97642	2570				6,39	83,29		
Gemiddeld							0,54	0,69					
Gewogen gem.							0,50	0,60					
Som ha <sup>-1</sup> 19 mnd			279 m <sup>3</sup>		2570 kg					0,17 kg	2,19 kg		
Som ha <sup>-1</sup> jaar <sup>-1</sup>			176 m <sup>3</sup>		1623 kg					0,11 kg	1,38 kg		

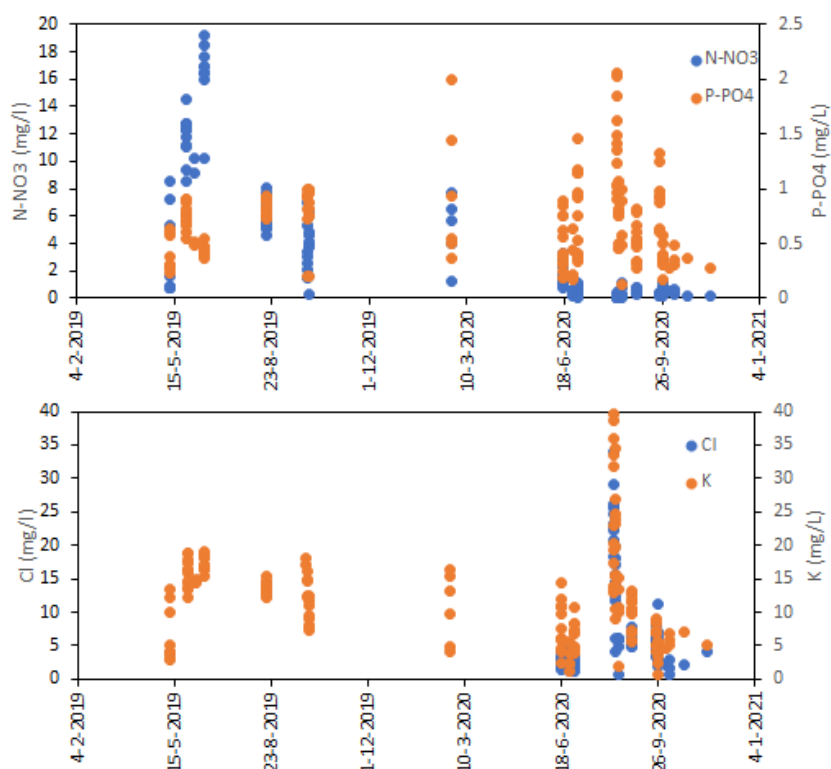
\* Neerslag voor afstroming, duurde 25 tot 300 minuten per event.

\*\* P via H2SO4-H2O2-Se-destructie.



**Figuur 9** Fosfaatconcentratie ( $\text{mg P-PO}_4 \text{ L}^{-1}$ ) in relatie tot bemonsteringstijdstip in stroomgebied Catsop.

De fosfaatconcentratie is in de meeste 'events' relatief constant (Figuur 9). Het daarom mogelijk om gemiddelde fosfaatconcentraties per event te gebruiken voor de berekening van de maaiveldafstroming (Tabel 16). De meeste events waren in de zomer. Het is onduidelijk wat de verschillen in fosfaatconcentratie tussen de events bepaalde. De verhoogde concentraties aan K, Cl en  $\text{NO}_3$  zijn deels bepaald door bepaalde datums met bemesting (Figuur 10). Er is bemest met stikstofhoudende kunstmest op 17 en 18 april 2019 en met kali60 (KCl) op 19 en 20 maart 2020. Dit leidde tot verhoogde afspoeling van  $\text{NO}_3$  in mei 2019 en een verhoogde afspoeling van K en Cl in augustus 2020.



**Figuur 10** a) Nitraat- en fosfaatconcentraties en b) Chloride- en kaliumconcentraties in relatie tot bemonsteringstijdstip in stroomgebied Catsop (geen Cl-analyses in 2019).

---

## 3.8 Discussie afspoeling stroomgebied Catsop

In het stroomgebied van Catsop bleek de P-concentratie bij afspoeling hoog (0,2-0,97 mg L<sup>-1</sup>; gewogen gemiddelde 0,5 mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>) en blijkt het sedimentgehalte bij afspoeling zeer sterk te variëren, waardoor 3 tot 98% van het totaal P via sediment getransporteerd wordt (Tabel 16). Hierdoor was ook de P-afspoeling via sediment (1,38 kg P ha<sup>-1</sup>j<sup>-1</sup>) veel hoger dan de P-afspoeling via water (0,11 kg P ha<sup>-1</sup>j<sup>-1</sup>). De P-afspoeling kan dus, met name als de erosieroute langer is, zoals in dit stroomgebied, toenemen door hogere sedimentgehalten in maaiveldafvoer. De gemeten erosie in hellend gebied ligt in de zelfde ordegrrootte als de erosie die eerder berekend is voor heel Europa: 2,46 t ha<sup>-1</sup> j<sup>-1</sup> (Panagos et al. 2015).

## 4 Effect beekverbreding (bezinkpoelen)

### 4.1 Inleiding

In het rapport 'Landbouw en de opgave voor de KRW' (Groenendijk et al. 2016) is aangegeven dat in een aantal gebieden nog een behoorlijke vermindering van de uit- en afspoeling van fosfaat nodig is en dat brongerichte maatregelen onvoldoende zijn om dit effect te bereiken. Aanvullende maatregelen met een zuiverende werking in het oppervlaktewatersysteem zijn nodig. Ook in diverse beken in agrarische gebieden van Oost-Gelderland worden hoge fosforgehalten aangetroffen. De beken voeren in de vrij hellende gebieden vooral water af in perioden met veel neerslag. In droge perioden vallen de bovenlopen vaak droog. Onderzoek heeft aangetoond dat tijdens piekafvoeren die in de bovenlopen van de beeksystemen plaatsvinden juist hoge gehalten aan fosfor worden gemeten. De hypothese is dat dit vooral aan bodemdeeltjes gebonden fosfaat is, en sterk bepaald wordt door oppervlakkig afstromend water van de landbouwpercelen. Fosfaat gebonden aan fijne deeltjes, kan in water blijven zweven, of bezinken en zo bijdragen aan ophoping van fosfaat in het sediment. Onder anaerobe condities kan fosfaat vrijkomen uit het sediment, omdat de binding van fosfaat aan ijzerhydroxiden vermindert door de reductie van ijzerhydroxiden (oxiden van  $\text{Fe}^{3+}$ ) tot het goed oplosbaar tweewaardig ijzer ( $\text{Fe}^{2+}$ ).

Bronmaatregelen om bovenstaande fosforbelasting te verminderen, zijn op voorhand niet of weinig effectief, omdat de hoogte van fosfaatbemesting niet direct van invloed is op de oppervlakkige afspoeling van grond met daaraan gebonden fosfaat (Groenendijk and van Boekel 2017). Het aanleggen van bezinkpoelen in de haarvaten van de beeksystemen is mogelijk wel effectief. Het Waterschap Rijn en IJssel heeft in het verleden al enkele van die bezinkpoelen aangelegd, maar omdat inzichten in de effecten onbekend zijn, wil het waterschap graag weten hoe effectief die poelen zijn om de fosforbelasting van de benedenlopen te verminderen. Daarom heeft Wageningen Environmental Research in samenwerking met Deltares verkend waar en hoe de effectiviteit van bezinkpoelen kan worden gemonitord. Bij de Roetenbeek is een locatie met een bezinkpoel die zich daar goed voor leent. De locatie hiervan is weergegeven in Figuur 11. In het navolgende worden het ontwerp en werkplan voor de monitoring beschreven.



**Figuur 11** Ligging bezinkpoel 1 en 2 in Roetenbeek bij Meddo.

Een aantal 'beekverbredingen', of bezinkpoelen in beken, ligt verspreid in Nederland en dient bijvoorbeeld als zandvang. Bij een beekverbreding treedt sedimentatie op van gronddeeltjes en daaraan gebonden fosfor,

---

waardoor fosfor uit het oppervlaktewater kan worden weggenomen. Doel is het vaststellen van het effect van de maatregel 'beekverbreding' op het verlagen van de hoeveelheid fosfaat in oppervlaktewater.

In de Roetenbeek bij Meddo (gemeente Winterswijk) liggen twee bezinkpoelen met beide een stuw: Locatie 1 is aan de Meddoseweg, locatie 2 is aan de Goorsteeg (xy-coördinaten locatie 1: 245953;447745 en locatie 2 245136;447593). Locatie 1 ligt stroomopwaarts ten opzichte van locatie 2. Op een afstand van locatie 2, 200 m stroomafwaarts, wordt de waterkwaliteit vaak gemeten: het is een meetpunt in het meetnet Nutriënten Landbouw Specifiek Oppervlaktewater (MNLISO)(NL07\_REB0). Het stroomgebied van de Roetenbeek is bij locatie 1 ongeveer 1 km breed en begint 3 à 4 km stroomopwaarts.

## 4.2 Doelstelling

Verondersteld wordt dat als grondwaterstanden nabij maaiveld komen, er veel fosfaat in de vorm van zeer kleine deeltjes in oplossing komt dat vervolgens via de detailontwatering (sloten, greppels, drains) af- en uitspoelt naar het oppervlaktewater. Als deze deeltjes zich eenmaal in het oppervlaktewater bevinden, kan een deel door bezinking in poelen worden afgevangen. Doel is om bij een bestaande locatie in de Achterhoek te meten hoeveel de fosfaatafvoer verminderd kan worden door bezinking in een beekverbreding (poel) via bezinking.

## 4.3 Theorie

Het is een maatregel die veel wordt toegepast in de Verenigde Staten en Canada, en met name in stedelijke omgeving (*wet-retention pond*) (Clary et al. 2012), maar ook in agrarische gebieden (*ag-retention-pond*) (Chrétien et al. 2016). De beekverbredingen, of bezinkvijvers, kunnen door opvang zorgen voor een verlaging van de piekbelasting in de beek (*storm water wet pond*), en voor sedimentatie van zand, maar ook van kleine deeltjes waaraan fosfaat gebonden is. Het verschil tussen P-aanvoer en P-uitvoer uit het systeem was 48-59% (Chrétien et al. 2016), 56% (vier vijvers achterelkaar) (Myers et al. 2018) en 59% (Eckert et al. 2018). Een technische optie is eerder getest bij Vallei & Veluwe in de Lunterse Beek. Die werkte toen niet, omdat bladresten in de beek de sedimentatie in de gemaakte opstelling voorkwam (*mudtrap*; pers. med.). De 'beekverbreding' is een permanente vijver, die afwijkt van de optie waarbij periodiek een droog stuk land onder water staat (vloeivelden (Noij et al. 2009), in de Engelstalige literatuur: *reconstructed wetland* (Maynard et al. 2009), maar die ook dient als sedimentopvang. Vloeivelden zijn volgens Noij et al. (2009) een relatief effectieve maatregel (€ 200 per kg P).

## 4.4 Methode

### **Karakterisering sediment bij aanvang**

Op basis van de verandering in de topografisch kaart zijn de beekverbredingen aangelegd in 1975. Volgens het waterschap is, voor zover bekend, de locatie niet uitgebaggerd. De beekverbreding is 12 m breed en 45 m lang, met een wateroppervlak van 410 m<sup>2</sup>. Aan de zijde van de stuw en aan de zijde waar het water instroomt, is een verharde bodem. De waterdiepte, toen de bagger nog in beide poelen lag, was zo'n 60 cm. De hoeveelheid sediment lag niet egaal verspreid en lag voornamelijk in het midden van de plas en was begroeid. De bagger is bemonsterd en geanalyseerd door Aqualysis. Aqualysis is geaccrediteerd voor de bemonstering en analyse van water en waterbodems (RvA registratienummer L230). Daarbij is een boorbeschrijving gemaakt van het bemonsterde sediment. Op 27 januari 2021 is poel 1 aan de Meddoseweg gebaggerd.



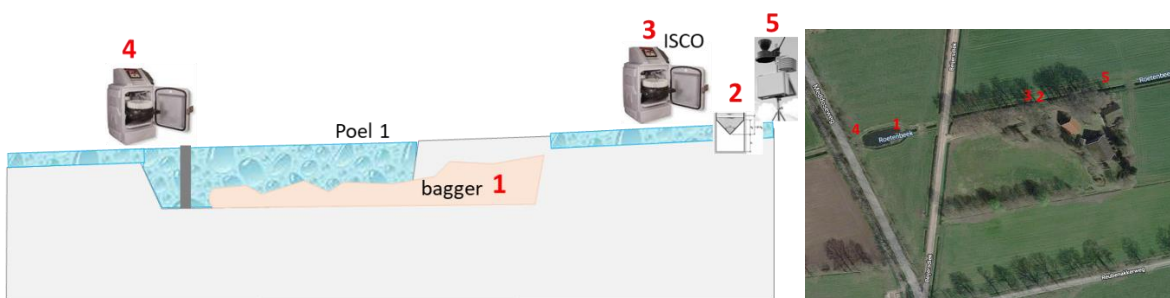
**Figuur 12** a) Zicht op beekverbreding met stuw vanaf Meddoseweg (foto: René Rietra, 30 sept 2019), b) selectie van legger van Waterschap Rijn en IJssel met Roetenbeek.

Op basis van de aanwezige hoeveelheid fosfaat in het sediment kan berekend worden hoeveel fosfaat is gesedimenteerd in de periode 1975-2020. Op basis van nieuwe sedimentmetingen en wateranalyses kan de efficiency van de beekverbreding berekend worden.

Er zijn vele vormen van sedimentsnelheidsmetingen en opvang van sediment onder water voor chemische analyses (Thomas and Ridd 2004). In de eenvoudigste vorm is het een beker die op de bodem van de waterbodem gezet wordt ('sedimenttrap') en die periodiek bemonsterd en geanalyseerd wordt (Fennessy et al. 1994). Op de locatie aan de Goorweg zijn vier reageerbuisrekjes getest met reageerbuizen van 10 cm lang, verzwaard met betontegels. Vier rekjes zijn geplaatst op 8 juni 2022 op 1,40 m diepte ten opzichte van overloopstuw, halverwege het midden en de rand van de poel, en bemonsterd op 20 februari 2023. Hierbij bleken de buizen tot aan de rand gevuld, waardoor geen kwantitatieve meting van de sedimentatiesnelheid mogelijk bleek over deze relatief kort tijd.

### Monitoring oppervlaktewater poel in Roetenbeek

Het uitgangspunt van de monitoring is om de waterstromen en de waterkwaliteit tijdens perioden van beekafvoer hoogfrequent te meten, zowel bovenstrooms als benedenstrooms van de poel. Uit de monitoring moet afgeleid kunnen worden hoeveel en in welke vorm fosfor de poel instroomt en achter de stuw benedenstrooms van de poel weer uitstroomt. De meetopstelling van het onderzoek is schematisch weergegeven in Figuur 13, en een impressie in Figuur 14. De onderdelen worden toegelicht in Tabel 17.

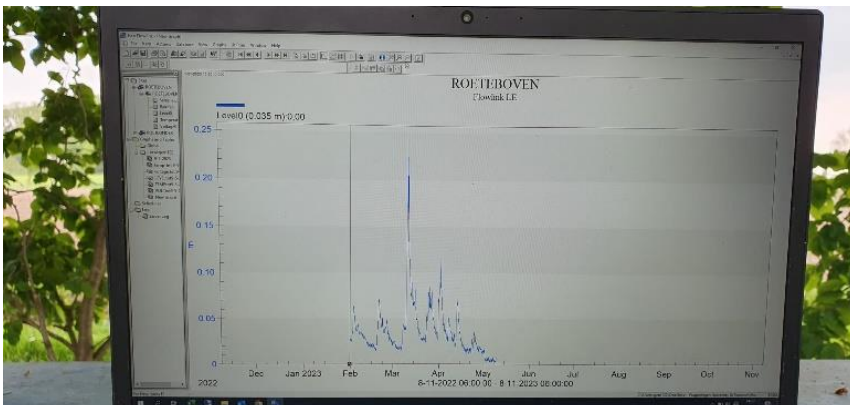


**Figuur 13** Locatie meetopstelling voor bemonstering van maaiveldafvoer en sediment in Meddo ten opzichte van poel 1, aan de Meddoseweg.

**Tabel 17** Omschrijving monitoring oppervlaktewater aan poel in Roetenbeek.

**Nr. Omschrijving veldonderzoek**

- 1 Verwijderen huidige bagger, schatten hoeveelheid (kg) en monstername voor analyse in het lab meten chemische samenstelling.
- 2 Nieuwe V-stuw beekloop (bovenstreams).  
Sensor (elly-track) in V-stuw: continu online waterhoogte (debiet).  
V-schot handmatig ijken op afvoer.
- 3 4 Automatisch debiet-proportioneel bemonstering water met ISCO.  
Afvoer na droge periode wordt gemeten, daags erna veldbezoek: uitlezen ISCO-apparatuur, meenemen monsterflessen, herstart ISCO, handmatige bemonstering beide meetlocaties.  
Bij voorkeur voeding met accu en zonnepaneeltje (afstand bekabeling erg groot en kabel zou ook onder de beijersdijk doorgetrokken moeten worden).  
Beide ISCO's worden geplaatst in vandalisme bestendige kast met slot.  
Aansturing ISCO met sensor Ellytrack en evt. i.c.m. laptop online.
- 5 Neerslag en bodemvocht meter, online meetstation.



**Figuur 14** Impressie van meetopstelling voor bemonstering van maaiveldafvoer en sediment in Meddo.



### Monitoring sediment in poel in Roetenbeek

Bepaald is de samenstelling van het sediment en het oppervlaktewater in de beekverbreding, inclusief stuw, in de Roetenbeek bij Meddo. Twee mengmonsters zijn genomen per locatie van sediment en van het oppervlaktewater. De fosfaatconcentraties op de dag van bemonstering waren met <0,05 mg/L laag te noemen. De nitraatconcentraties waren met 6,4 tot 20 mg N/L relatief hoog (28 tot 88 mg NO<sub>3</sub>/L).

**Tabel 18** Samenstelling van oppervlaktewater) \*\* Locatie 1 is aan de Meddoseweg, locatie 2 is aan de Goorsteeg.

locatie	pH	O <sub>2</sub>		Cl	NH <sub>4</sub> +Norg	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>2</sub>	N-NO <sub>3</sub> *	P-PO <sub>4</sub>	Tot P	N-NO <sub>3</sub>	
		mg l <sup>-1</sup>	%									
1	7,4	12,2	90,2	1	38	2,2	<0,1	<0,02	6,5	0,02	<0,04	6.4
1	7,39	11,6	84,9	<1	38	2,1	<0,1	0,03	20	0,02	<0,04	20
2	7,32	11,7	87,2	<1	42	2,3	0,11	0,04	19	0,03	0,05	19
2	7,26	11,3	83,3	1	41	2,3	<0,1	0,04	20	0,03	0,04	20

\*sum NO<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>, watermonsters genomen op 22 januari 2020 tussen 9.40-11.15.

De eigen metingen kunnen vergeleken worden met de metingen in het MNSLO-meetpunt dat 100 m stroomafwaarts ligt in de Roetenbeek (Meddo, Winterswijk). De eenmalige metingen (22 jan 2020) op de twee locaties (1 en 2) lijken wat lager dan de gemiddelde concentraties in 2014 en 2015 (Tabel 19). De locatie heeft volgens de rapportage MNSLO een kleine overschrijding (kleiner dan < 2x norm) van de P-totaalnorm in de periode 2015-2018 (Buijs et al. 2020).

**Tabel 19** Samenstelling oppervlaktewater in MNSLO-meetnet (meetpunt id.: REB01; naam Roetenbeek) (bron: waterkwaliteitsportaal). Het KRW-doel van het oppervlaktewater is 0,11 mg P l<sup>-1</sup>.

jaar	bemonsteringsperiode	P-PO <sub>4</sub>	Tot P
		mg l <sup>-1</sup>	mg l <sup>-1</sup>
2014	Jan-dec	0,04 ± 0,01	0,19 ± 0,13
2015	April-okt	0,04 ± 0,06	0,15 ± 0,10

De laagdikte van de sedimentlagen bij monster 1 t/m 4 is beschreven via een boorbeschrijving. Het donkerbruine sediment kon goed onderscheiden worden van het matig grove grijze zand aan de onderzijde van het meertje. De hoeveelheid fosfaat in het sediment kan geschat worden op basis van de dikte van de sedimentlaag, het sedimentoppervlak (314 m<sup>2</sup>), de dichtheid en het P-gehalte van het sediment. Als aangenomen kan worden dat de sedimentlaag sinds 1975 aangegroeid is, is dat 45 jaar. Op 21 januari 2021 is bezinkpoel 1 aan de Meddoseweg uitgebaggerd.

**Tabel 20** Samenstelling van sediment (op basis van droge stof). \*\*

locatie	Dikte sediment	Droge stof	Organische stof	CaCO <sub>3</sub>	<2um	Tot P	Tot Fe	mol P/mol Fe
	Laag*							
1	57,98,48	22,3	18,5	<1	15	2,5	21	0,21
1	42,102,58	22,7	17,2	1,2	17	3,7	24	0,28
2	52,92,60	22,6	20,5	<1	17	3,5	23	0,27
2	42,61,49	22,3	18,2	<1	19	3,4	23	0,27

\* Drie boringen per locatie.

\*\* Sedimentmonsters genomen op 22 januari 2020.

In Tabel 21 is het sediment en het hieraan gebonden P weergegeven. Dit kan opgevat worden als de retentie. De hoeveelheid fosfaat die door de Roetenbeek stroomt, kan berekend worden op basis van een schatting van het debiet en de gemeten P-concentratie. Het debiet is niet bekend, maar kan grofweg ingeschat worden op basis van het neerslagoverschot van 300 mm in het bovenstroomse gebied van 2 à 3 km<sup>2</sup>: 600.000 à 900.000 m<sup>3</sup> per jaar. De vastlegging in 45 jaar van 1462 tot 2154 kg P geeft de sedimentatie per jaar: 40 à 45 kg P jaar<sup>-1</sup>. De P-sedimentatie ten opzichte van de indicatief geschatte P-flux in de Roetenbeek is ongeveer 26 à 29%, maar is dus sterk afhankelijk van de aanname over het debiet.

**Tabel 21** Schatting van P-retentie gedurende de afgelopen 45 jaar.

locatie	Dikte sediment Laag*	Oppervlak	Hoeveelheid sediment	Dichtheid ***	P gehalte	P	P per jaar	% van P in beek	Onderdeel
	cm				m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>			
1	68	440	277	1965	2,5	1463	40	26%	Vastlegging in sediment
1	67	440	276	1965	3,7	2154			
2	68	400	279	1965	3,5	1871			
2	51	400	208	1965	3,4	1354			
Meetpunt	Jaar	Debiet beek	P concentratie			kg	kg		
			mg/l	kg	kg				
REB01****	2014	900.000				171	171		Aanvoer
	2015					135	135		

\* Drie boringen.

\*\* Sedimentmonsters genomen op 22 januari 2020.

\*\*\* [https://publications.deltares.nl/1207730\\_002.pdf](https://publications.deltares.nl/1207730_002.pdf)

\*\*\*\* Waterkwaliteitsportaal.

Op de locatie aan de Goorsteeg is sediment opgevangen in reageerbuisjes. De buisjes stonden er van 8 juni 2022 tot 20 februari 2023 en waren helemaal gevuld met sediment. Het P-gehalte van het sediment en de P-concentratie van het water, na centrifugeren, is bepaald met ICP-AES. De concentratie in water was 0,22 mg P L<sup>-1</sup> en het totaal P-gehalte (Aqua Regia) van het sediment was 5,23 g P kg<sup>-1</sup> ds. De P-concentratie van 0,22 mg P L<sup>-1</sup> is goed vergelijkbaar met de concentraties op het MNSLO-meetpunt (Tabel 19). Het nieuwe sediment bevat met 5,23 g P kg<sup>-1</sup> ds, na uitbaggeren van de poel, dus hogere P-gehalten dan het gebaggerde sediment (2.5-3.7 g P kg<sup>-1</sup>) (Tabel 21). Dit wijst erop dat de huidige locatie nu relatief hoge P-concentraties heeft, maar kan ook betekenen dat het minder zand bevat. De hoge sedimentatie (> 10 cm) in een periode van 7 maanden kan erop wijzen dat al binnen enkele jaren gebaggerd kan worden om P te onttrekken aan het systeem.

## 4.5 Discussie

De metingen van het verwijderde sediment uit de bagger die er mogelijk als 45 jaar heeft gelegen, wijzen op een fosfaatverwijdering uit het oppervlaktewater van 26 à 29% per jaar. In die 45 jaar is 51 à 68 cm sediment afgezet. Recentelijk geplaatste buisjes op de bodem wijzen op een hoge sedimentatiesnelheid na het uitbaggeren in een periode van een halfjaar. Monitoring van het water voor en na de poelen zal kunnen uitwijzen hoeveel P door de beekverbreding wordt vastgelegd en of dat leidt tot lagere fosfaatconcentraties. De aanleg en het uitbaggeren van poelen is op basis van buitenlandse literatuur relatief goedkoop, en past in Nederland mogelijk bij beleid om meer water vast te houden in bovenlopen.

Kanttekening is dat de verwijdering van sediment met daaraan gebonden fosfaat mogelijk een minder grote bijdrage heeft aan het verlagen van de fosforconcentratie in het oppervlaktewater dan op basis van de flux zou worden verwacht. Fosfaat in sediment kan bijdragen aan de fosforconcentratie in het water indien het sediment anaeroob wordt en daarbij fosfaat vrijkomt.

De opgezette monitoring is voortgezet in 2023-2024, zodat er dan beter inzicht komt in de debieten en in de in- en uitgaande fosforconcentraties.

---

## 5 Invloed grondwaterstanden

### 5.1 Inleiding

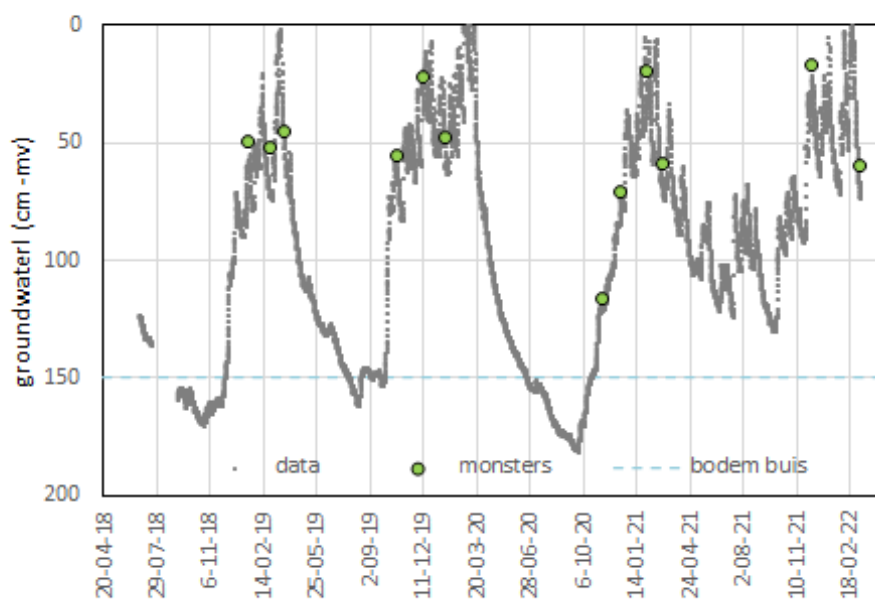
Modelberekeningen wijzen erop dat uitspoeling naar oppervlaktewater vooral plaatsvindt bij hoge grondwaterstanden in de bodem doordat fosfaatconcentraties boven in het bodemprofiel veel hoger zijn dan onder in het profiel (Schoumans et al. 2013; van der Salm et al. 2011). Hierdoor is de fosfaatuitspoeling uit bodems met diepe grondwaterspiegels heel laag (Schoumans et al. 2013). In Nederlandse zandgronden zijn hoge grondwaterstanden met name in de winter regionaal aanwezig, grofweg nabij beken en voornamelijk veengebieden. Dit is zichtbaar op de bodemkaart aan de hand van de GHG (GHG: gemiddeld hoogste grondwaterstand ([www.broloket.nl/](http://www.broloket.nl/))).

Hydrologische maatregelen om de uitspoeling van fosfaat naar oppervlaktewater te verminderen, zijn een aantal keren onderzocht en de resultaten zijn heel divers. Op veldschaal kan het watertransport via aanleg van drainage of peilgestuurde drainage veranderd worden en op iets grotere schaal door ondiepe sloten dicht te maken. Een verlaging van de grondwaterstand in de winter via aanleg van peilgestuurde drainage versus geen drainage, verlaagde de fosfaatafvoer met 62% (Schoumans and Kruijne 1995). In onderzoek in Hupsel werd netto geen verminderde P-afvoer gemeten na sluiten van de drains in de lente (Rozemeijer et al. 2012), terwijl regelbare en verdiept aangelegde drains in Zeeland meer water vasthielden en gedurende drie jaar meer afvoer van fosfaat en ijzer lieten zien (Schipper et al. 2015). In een vier jaar durend onderzoek in het zuiden van Zweden leidde gecontroleerde drainage versus conventionele drainage daarentegen tot een lager verlies van P (Wesström and Messing 2007) en in een drie jaar durend onderzoek met gecontroleerde drainage versus ongecontroleerde drainage in Denemarken verminderde de fosfaatuitspoeling doordat er minder water via de drains werd afgevoerd (Carstensen et al. 2019). In de twee laatste onderzoeken leidde het behoud van water tot minder P-afvoer. Anderzijds kan ook verhoging van het grondwaterpeil, zoals gepland in diverse gebieden als maatregel om natte natuur te herstellen of om water voor landbouw op te slaan op hoge zandgronden (NPLG 2022), mogelijk leiden tot meer fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater.

Of hogere grondwaterstanden daadwerkelijk leiden tot meer fosfaatuitspoeling naar oppervlaktewater is echter nog onduidelijk. Er is relatief weinig veldonderzoek verricht naar de relatie tussen grondwaterstanden en de concentraties aan opgelost fosfaat in grondwater. Daarom is veldonderzoek uitgevoerd in een gebied waar hoge fosforconcentraties in de beek (Lunterse Beek) en daarop afwaterende watergangen worden gemeten. Op twee percelen in de gemeente Bennekom zijn gedurende vier winterseizoen metingen verricht van de fosfaatgehalten van de bodemlagen, de fosfaatconcentraties in het bovenste grondwater en de grondwaterstand. In de percelen werden stikstofmeststoffen getest en werd het bovenste grondwater gemeten. Voor het huidige onderzoek is ook fosfaat in het bovenste grondwater geanalyseerd en zijn fosfaatgehalten van de bodem bepaald.

### 5.2 Methode invloed grondwaterstand

Er zijn in totaal 112 peilbuizen geplaatst in de herfst van 2018, verspreid over twee percelen, en zijn gedurende vier winters bemonsterd, waarbij de grondwaterstand continu is gemeten. De buizen zijn dusdanig geplaatst dat alleen in de winterperiode water in de bemonsteringsbuizen stond: dat wil zeggen hoger dan 150 cm -mv. In elke winter stond het grondwater wel een keer in de bouwvoor (0-20 cm -mv). De peilbuizen zijn twee- tot viermaal per winter bemonsterd als er grondwater in de buis stond: als het grondwaterpeil tussen de 0 en 150 cm -mv stond. De grondwaterstand is weergegeven in Figuur 15.



**Figuur 15** Grondwaterstand (cm -mv) als functie van de tijd, inclusief de bemonsteringstijdstippen op proefveld in Bennekom. De bemonsteringsbuizen hadden een maximale diepte van 150 cm -mv.

Grondwater is bemonsterd volgens de methode van het meetnet Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) van RIVM, behalve dat hier de buizen gedurende drie jaar permanent zijn geplaatst en het filter 1 m lang is in plaats van 0,5 m. In totaal 112 buizen zijn geplaatst in twee aaneengesloten percelen. De buizen zijn afgedekt met een putdeksel om vervuiling te voorkomen. Gedurende de winter zijn de buizen vier keer per jaar bemonsterd. Grondwaterpeil is bepaald bij aanvang van elke bemonstering waarna het volume water in de buis is afgepompt. Nadat het grondwaterpeil weer is hersteld, na minimaal één uur, is het grondwater bemonsterd volgens de methode van het RIVM.<sup>5</sup> Het grondwater wordt gefilterd door een 0,45 µm filter, conform NEN-EN-ISO 5667-3 aangezuurd met HCl ter conservering en aangeboden aan CBLB-WUR voor analyse van nitraat+nitriet, ammonium, totaalstikstof en orthofosfaat met een *segmented flow analysis* (SFA) met spectrofotometrische detectie conform NEN-ISO 15923-1. Eén keer (9 dec 2022) is ook ijzer gemeten met ICP-AES. In het experiment vond een bemestingsproef plaats met diverse dierlijke meststoffen. Het wordt verondersteld dat de meststoffen geen invloed hebben gehad op de fosfaatconcentraties, omdat fosfaat sterk bindt aan de grond.

Van beide aanliggende percelen zijn mengmonsters genomen van de bodemlaag 0-30, 30-60, 60-90 cm en 90-120 cm. Bepaald is het gehalte aan in een ammoniumoxalaat-oxaalzuur oplosbaar fosfor ( $P_{ox}$ ), aluminium ( $Al_{ox}$ ) en ijzer ( $Fe_{ox}$ ) (alleen in mmol/kg) volgens NEN 5776. De fosfaatbezetting van het monster (DPS; Degree of P Saturation) is berekend volgens Van der Zee et al. (1990):  $DPS = 2 P_{ox} (Al_{ox} + Fe_{ox})^{-1}$ . Daarnaast zijn bepaald pH, P-CaCl<sub>2</sub>, P-Al (NEN 5793), organische stof en lutum. Alle analyses zijn uitgevoerd door Eurofins Agro Testing Wageningen en het laboratorium werkt volgens ISO 17025 en is bij de RvA geaccrediteerd met registratienummer L 122.

### 5.3 Resultaten invloed grondwaterstand

De twee aanliggende percelen (Bennekom), met daarin de onderzoekplots (middenpunt onderzoekperceel west: RD 173011, 46647 en middenpunt onderzoekperceel oost RD 173104, 446661), bevatten relatief veel fosfaat in vergelijking met kalkloze zandgronden: de fosfaatverzadiging van laag 0-30 cm -mv is relatief hoog (0,62 en 0,81) t.o.v. gemiddelde kalkloze zandgronden ( $0,46 \pm 0,19$ ) en dat geldt ook voor de laag van 30-90 cm ook (gemiddelde van twee lagen: 0,67 en 0,36 t.o.v. 0,22) bij perceel Oost (zie Tabel 22) (selectie

<sup>5</sup> <https://www.rivm.nl/documenten/procedure-open-boorgatmethode-pdf-70-kb>

uit LSK dataset; data van Finke et al., 2001). In perceel West is de laag van 30-90 (gemiddelde van 0,27 en 0,08 t.o.v. 0,22) niet afwijkend van kalkloze zandgronden. De grondwaterstand in beide percelen is gemeten gedurende drie jaar. In de zomers zakte de grondwaterstand tot 170 cm -mv, en in drie winters kwam het grondwaterpeil tot het maaiveld. Omdat de bemonstering gericht was op het bovenste grondwater en hoogste grondwaterstanden verwacht werden van 1,5 tot 0,5 m -mv, is een geperforeerde buis van 0,5 tot 1,5 m -mv gebruikt en een blinde buis van 0-0,5 m -mv grondwater. De buis was boven het filter niet afgedicht, waardoor bij hoge grondwaterstand al het water uit het boorgat is aangezogen bij de bemonstering, en dus ook het water van 0-0,5 m -mv. De bemonstering is dus niet optimaal, maar geeft wel een indicatie.

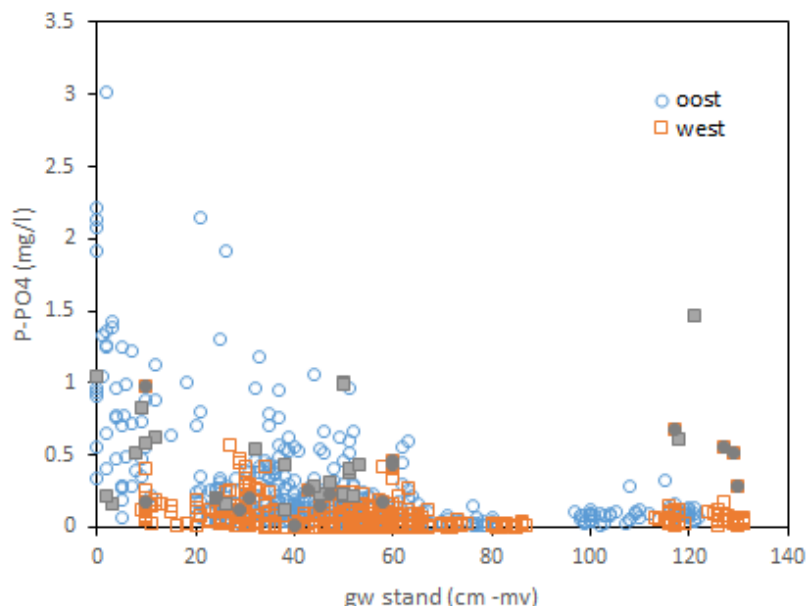
**Tabel 22** Zuurgraad, organische stof (OS, %), P-CaCl<sub>2</sub> (mg P/kg), P-AL (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100gr), P<sub>ox</sub>, Fe<sub>ox</sub>, Al<sub>ox</sub> gehalten (mmol kg<sup>-1</sup>), FBV \* en DPS\*\* van bodemlagen.

locatie	cm -mv	pH	OS%	P-CaCl <sub>2</sub>	P-Al	P <sub>ox</sub>	Fe <sub>ox</sub>	Al <sub>ox</sub>	FBV	DPS
West	0-30	5,5	4,9	3,3	94	20	66	27	43	0,62
	30-60	5,2	2,1	0,5	32	9	62	10	35	0,27
	60-90	5,1	1,2	0,3	6	5	41	2	23	0,08
	90-120	5,4	0,7	0,3	6	5	32	2	18	0,11
Oost	0-30	5,5	3,8	6,1	109	21	56	31	39	0,81
	30-60	5,3	2,7	2,7	104	20	62	27	41	0,67
	60-90	5,3	2	0,9	52	14	60	13	37	0,36
	90-120	5,4	0,9	0,6	23	7	42	5	24	0,21
NL	0-30					17 ± 7	41 ± 31	40 ± 18	41 ± 15	0,46 ± 0,19
	30-90					7 ± 7	30 ± 48	35 ± 20	32 ± 25	0,22 ± 0,12

\* Fosfaatbindingsvermogen FBV= 0,5\*(Al+Fe) in mmol/kg,

\*\* Fosfaatbezetting (Degree of P Saturation): DPS= Pox/FBV.

In Figuur 16 wordt de fosfaatconcentratie (P-PO<sub>4</sub>) in grondwater gegeven in alle 120 buizen als functie van de grondwaterstand op twaalf bemonsteringsdagen. De twaalf bemonsteringsdagen staan in Tabel 12. De grondwaterstand was in de winter iets hoger in het oostelijke perceel dan het westelijke deel, en de fosfaatconcentraties (P-PO<sub>4</sub>) zijn vooral hoog bij het oostelijke perceel bij de hoge grondwaterstanden. Bij diepe grondwaterstanden (> 70 cm -mv) waren de fosfaatconcentraties kleiner dan 0,2 mg P l<sup>-1</sup>, behalve enkele monsters in combinatie met NH<sub>4</sub>. De zeer hoge fosfaatconcentraties zijn dus gekoppeld aan: 1) hoge grondwaterstanden, 2) aan het perceel met de hoogste fosfaatgehalten en 3) soms gekoppeld aan de aanwezigheid van NH<sub>4</sub>.



**Figuur 16** Fosfaat ( $P\text{-}PO_4$ ) concentratie in bovenste grondwater (<150 cm -mv) als functie van grondwaterstand a) perceel West, b) perceel Oost. Grijze symbolen duiden op grondwatermonsters met reductie op basis van  $NH_4$  concentraties >0,25 mg/l. Het grondwater is steeds een 'mengmonster' van water van de onderkant van de buis (150 cm -mv) tot de grondwaterspiegel.

De gemiddelde fosfaatconcentraties uit bovenstaande figuur (Tabel 23) zijn vaak hoger dan  $0,11 \text{ mg l}^{-1}$ , en zijn met name hoog in veld Oost, en hoog als de grondwaterstand heel ondiep is. Er is geen effect gemeten van de verschillende stikstofmeststoffen op fosfaat, zodat de fosfaatconcentraties gezien kunnen worden als een effect van de bodem. Er is een grote variatie in de fosfaatconcentraties per veld. De fosfaatconcentraties gemeten in de verschillende buizen zijn steeds zwak gecorreleerd ( $r^2 < 0,3$ ) tussen aaneenliggende bemonsteringstijden. De fosfaatconcentraties verschillen vaak significant op de verschillende bemonsteringstijdstippen (zie Tabel 23).

**Tabel 23** Gemiddelde fosfaatconcentraties ( $n=56$ ) als functie van de tijd in veld West en Oost ( $P\text{-}PO_4 \text{ mg P l}^{-1}$ ) in samenhang met de grondwaterstanden (cm -mv). Volgens de ANOVA-systematiek is per tijdstap met letters aangegeven of het gemiddelde statistisch verschilt van andere tijdstappen.

Tijd	grondwaterstand west		fosfaat mg P l <sup>-1</sup>	grondwaterstand oost		fosfaat mg P l <sup>-1</sup>	
	cm-mv			cm-mv			
1	15 jan 19	53	0,01 ± 0,04	a	45	0,07 ± 0,06	a
2	28 feb 19	55	0,02 ± 0,04	ab	48	0,12 ± 0,12	ab
3	25 mrt 19	48	0,06 ± 0,07	abc	42	0,22 ± 0,15	ab
4	24 okt 19	68	0,02 ± 0,04	a	62	0,07 ± 0,06	a
5	12 dec 19	29	0,12 ± 0,16	cde	15	0,67 ± 0,72	f
6	21 jan 20	52	0,07 ± 0,07	abcd	43	0,32 ± 0,30	bcd
7	10 nov 20	122	0,09 ± 0,13	bcd	110	0,12 ± 0,20	ab
8	16 dec 20	76	0,01 ± 0,01	a	66	0,03 ± 0,03	a
9	2 feb 21	24	0,12 ± 0,12	cde	16	0,43 ± 0,38	cde
10	3 mrt 21	62	0,10 ± 0,11	cd	57	0,23 ± 0,22	abc
11	9 dec 21	23	0,13 ± 0,15	de	12	0,58 ± 0,55	ef
12	9 mrt 22	62	0,17 ± 0,19	e	59	0,53 ± 0,38	def
			Lsd=0,04			Lsd=0,12	
	gemiddeld		0,08 ± 0,12			0,28 ± 0,40	

---

## 5.4 Discussie invloed grondwaterstand

In dit hoofdstuk is op basis van veldmetingen gekeken of hoge grondwaterstanden op zandgronden leiden tot een hoge fosfaatuitspoeling. Alle fosfaatmetingen zijn gedaan in periodes met hoge grondwaterstanden, als er afvoer is naar oppervlaktewater. Dat betekent dat de gemeten hoge fosfaatconcentraties relevant zijn voor de uitspoeling naar het oppervlaktewater. De fosfaatconcentraties variëren sterk als functie van de grondwaterstand (in Oost: gemiddeld minimaal 0,07 en maximaal 0,67 mg P-PO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup>) én als functie van het fosfaatgehalte van de bodem, zoals te zien is aan het verschil tussen Oost en West (0,08 en 0,28 mg P-PO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> in resp. West en Oost) (Tabel 23). De hoge standaarddeviaties laten zien dat de fosfaatconcentraties ook sterk binnen de percelen variëren. Hoge P-concentraties zijn ook gemeten in bodemvocht (Bennekom; hoofdstuk 7): 1,5 tot 2,5 mg/l P-PO<sub>4</sub> (Figuur 20). Het bodemvocht is echter bemonsterd uit de bouwvoor (0-10 cm) en bemonsterd op de grens, tussen beide percelen. Omdat het grondwater een mengsel is van water uit het hele profiel tot de hoogste grondwaterstand, zijn de gemiddelde fosfaatconcentraties in grondwater niet zo hoog als in het bodemvocht.

Er worden hoge fosfaatconcentraties gemeten in correlatie met hoge ammoniumconcentraties, wat mogelijk duidt op periodiek gereduceerde omstandigheden. Metingen van NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub> en een eenmalige meting van Fe, geeft aan dat reductie enkele keren is opgetreden: op één bemonsteringstijdstip (9 dec. 2021) waren alle buizen in het natste deel gereduceerd, het noordelijke deel van perceel Oost (concentratie van NO<sub>3</sub> < 1 mg/l; 0,1 < Fe < 2 mg/l), nadat het grondwater twee weken vrijwel aan het oppervlak stond. Op alle andere meetmomenten waren de nitraatconcentraties niet opvallend verlaagd. In een aantal buizen was NH<sub>4</sub> > 1 mg N/l, wat niet gepaard ging met minder nitraat, maar wel met veel hogere PO<sub>4</sub>-concentraties. Hoge NH<sub>4</sub>-concentraties (> 1 mg N/L) gaan altijd gepaard met hoge PO<sub>4</sub>-concentraties (zie Figuur 16), en soms DOC, maar niet omgekeerd. Het is niet gerelateerd aan een specifieke buis of bemonsteringsmoment. De oorzaak is onduidelijk. In het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) worden ook hoge ammoniumconcentratie in combinatie met fosfaat gemeld.

Opvallend zijn de verschillen tussen perceel Oost en West voor fosfaatconcentratie in het bovenste grondwater (Figuur 16). In perceel Oost kwam het grondwater iets hoger dan in West en zijn twee fosfaatindices veel hoger: P-CaCl<sub>2</sub> 6,1 vs 3,3 mg/kg, en de fosfaatverzadiging (DPS) 0,81 vs 0,62 (-). De gemiddelde P-concentraties per veld (Tabel 23) zijn soms veel hoger dan de norm voor oppervlaktewater van ongeveer 0,11 mg P L<sup>-1</sup>. Omdat het bovenste grondwater juist in natte situaties in belangrijke mate horizontaal door de bodem afstroomt naar een sloot, is die bijdrage relevant. Maatregelen kunnen gericht zijn op het voorkomen van hoge grondwaterstanden of op het verdiepen van de grondwaterstroming naar de ontwateringsmiddelen (sloten, drains).

---

# 6 Hotspots

## 6.1 Inleiding hotspots

Zoals eerder gesteld, worden in oppervlaktewater soms hoge fosforconcentraties aangetroffen, terwijl er geen duidelijk puntbronnen zoals RWZI's zijn, waardoor aangenomen wordt dat diffuse belasting vanuit aanwezige landbouwbodems de bron vormen. Omdat in bodems fosfaat sterk gebonden en dus gebufferd wordt, doen de soms zeer hoge fosforconcentraties in oppervlaktewater vermoeden dat een specifieke combinatie van omstandigheden hiervoor verantwoordelijk is. Hoge fosfaatconcentraties zijn mogelijk in een beperkt areaal (hotspots), bijvoorbeeld bij een laag fosfaatbindingsvermogen (weinig Fe+Al), bij hoge grondwaterstanden in combinatie met periodiek gereduceerde omstandigheden op (delen van) percelen met een hoge P-oplading van de bodems door historische hoge fosfaatgiften, oppervlakkige afstroming van water en/of meststoffen. Methoden om hotspots en 'hot moments' vast te stellen, zijn meestal gebaseerd op het heel uitgebreid bemonsteren (water of sediment) van alle aanvoerroutes (Mosesso et al. 2021; Shore et al. 2016; Shore et al. 2017; Vero et al. 2019) en intensief meten in de tijd (van der Grift et al. 2014). Zo worden hoge fosfaatconcentraties gerelateerd aan reductie van sediment bij stilstaande zuurstofloos water in de zomer, het vrijkomen van fosfaat (Smolders et al. 2017) en aan verschillende soorten van waterafvoer (Shore et al. 2017).

## 6.2 Doelstelling hotspots

We hebben onderzocht of plassen in de winter een hotspot kunnen zijn voor hoge P af- en P-uitspoeling, en of bodems met een hoge fosfaatverzadiging door een laag fosfaatbindingsvermogen een lokale bron kunnen zijn van hoge fosfaatconcentraties in het bovenste grondwater.

## 6.3 Methode

De Kabroekse beek (Noord-Limburg) is gekozen als gebied vanwege de overschrijding van de doelconcentratie voor fosfor in dit oppervlaktewater en omdat in deze omgeving plaatselijk plassen voorkomen in de winter. De beek is onderdeel van het KRW-waterlichaam AEF-bovenloopjes Noord-Limburg. De beoordeling van N en P in de AEF-bovenloopjes Noord-Limburg is 'slecht' (> 0,11 mg P/l), en met name meetlocatie ODORP500 in de Grenssloot (193331 384328) heeft zeer hoge fosfaatconcentraties in oppervlaktewater, namelijk 0,6 mg P/L (9-9-2015) (bron: <https://www.waterkwaliteitsportaal.nl/oppervlaktewaterkwaliteit>). Voor beide waterlopen wordt verwacht dat af- en uitspoeling uit de landbouwgronden de voornaamste bron is, omdat er geen aanwijzingen zijn voor puntbronnen of andere niet-agrarische bronnen.

### **Fosfaatbindingsvermogen en grondwaterkwaliteit**

Agrariërs in de omgeving van de Kabroekse Beek zijn bereid gevonden voor bemonstering van bodem en grondwater. Het betreft één eigenaar met land direct grenzend aan de Kabroekse Beek, en twee eigenaren aan de Moosdijk, die afwatert op de Grenssloot, een beek parallel aan de Kabroekse Beek, en ook onderdeel van het KRW-waterlichaam AEF-bovenloopjes Noord-Limburg.

De verzamelde gegevens zijn vergeleken met de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK)(Finke et al. 2001) waarin onder andere ook fosfaatkenmerken zijn bepaald van puntlocaties (Finke et al., 2001)<sup>6</sup>. Op basis daarvan is een fosfaatverzadigingskaart van Nederland gemaakt (Schoumans 2004). Om aan te sluiten bij de LSK-bemonstering (Finke et al., 2001) is dezelfde methode in dit onderzoek gehanteerd en zijn

---

<sup>6</sup> <https://edepot.wur.nl/27713>



puntlocaties bemonsterd en dus geen mengmonsters. Na loting van dertig puntlocaties binnen een bepaald gebied zijn bemonsteringen gedaan: per puntlocatie is een boring gedaan, zijn bodemmonsters genomen van drie bodemlagen (van de laag 0-30, 30-60 en 60-90 cm -mv), en is één tijdelijke grondwaterbuis geplaatst en grondwater bemonsterd. De bodembemonstering vond plaats op 19 november 2020 en de grondwaterbemonstering op 3 maart 2021, toen het grondwater hoog stond.

### Plassen

Een periode met veel regen in januari en februari 2020 zorgde voor veel plassen in de omgeving van de Kabroekse Beek. Hierop is de omgeving op 13 februari bezocht en is afstromend water dat zichtbaar was vanaf de weg, gesignaleerd. Op 20 februari zijn de locaties nogmaals bezocht en bemonsterd. Daarbij is het water bemonsterd dat vanuit de plas in de sloot stroomt, door een monsterpotje eenvoudig in de waterstroom te houden.

## 6.4 Resultaten

### Fosfaatbindingsvermogen

Een laag fosfaatbindingsvermogen (FBV) van het gebied zou bij gelijke fosfaatgehalten de hoge fosfaatconcentraties in oppervlakte kunnen helpen verklaren. De fosforgehalten in de bovengrond (14 mmol P/kg) bij de Eickhorsterweg en Moosdijk zijn niet veel lager dan de gemiddelde waarden voor zandgronden in Nederland (17 mmol/kg). Het fosfaatbindingsvermogen ( $FBV = Fe_{ox} + Al_{ox}$ ) in de bovengrond is bij de Moosdijk lager (29) dan bij de Eickhorsterweg (55) en de rest van Nederland (41) door de opvallend lage  $Fe_{ox}$  in de bodem aan de Moosdijk. De  $Fe_{ox}$ -gehalten aan de Moosdijk zijn in de bovengrond en de ondergrond relatief laag. Dit is mogelijk gerelateerd aan de aanwezigheid van venige laagjes. Op de bodemkaart (Stiboka, Blad 52 West-Venlo, 1968) zijn de percelen aan de Eickhorsterweg beekerdgronden met lemig fijn zand (pZg23 III). De percelen aan de Moosdijk zijn deels veldpodzolen met lemig fijn zand (Hn23 V/VI), rauwveengronden met zand ondieper dan 120 cm (zVp V) en moerige eerdgronden met humushouden zanddek en moerige tussenlaag (zWp V). In de toelichting op de bodemkaart wordt over ijzeroerlagen in de bovengrond van de Kabroekse Beek geschreven dat "ijzeroer eertijds wel ontgraven is ten behoeve van ijzersmelterijen". Dit komt overeen met de gemeten hoge  $Fe_{ox}$  in de bovengrond aan de Eickhorsterweg.

Opvallend zijn de grote plassen die in de wintermaanden van 2019-2020 te zien waren in het gebied. Met name bij velden waar in 2019 aardappel had gestaan. Ook bij pas ingezaaid gras zijn plassen te zien. Het lijkt typisch voor deze type landgebruik én deze bodems: lemig fijn zand.

**Tabel 24** Fosfaatverzadigingsparameters met standaarddeviatie. Fosfaatbindend vermogen gedefinieerd als  $FBV = 0,5(Fe + Al)$  in mmol/kg ds. grond, en fosfaatverzadiging FBV als DPS\*\*.

	Diepte	Fe-ox	Al-ox	P-ox	FBV*	DPS**	n
	(cm-mv)	(mmol/kg)				%	
Eickhorsterweg	0-30	86 ± 77	24 ± 14	14 ± 6	55 ± 35	31 ± 12	10
	30-60	64 ± 73	19 ± 19	7 ± 6	41 ± 38	21 ± 11	10
	60-90	16 ± 16	11 ± 8	2 ± 2	13 ± 36	15 ± 11	10
Moosdijk	0-30	11 ± 3	47 ± 8	14 ± 3	29 ± 9	50 ± 19	20
	30-60	6 ± 4	44 ± 16	5 ± 3	25 ± 5	23 ± 12	20
	60-90	3 ± 2	31 ± 20	2 ± 2	17 ± 9	12 ± 12	20
Zandgronden III t/m VII*	0-30	41 ± 31	40 ± 18	17 ± 7	41 ± 15	46 ± 19	148
	30-90	30 ± 48	35 ± 20	7 ± 7	32 ± 25	22 ± 12	140

\* Codes in LSK (CCNL): 1703, 1704, 1801, 1802, 1901, 1902, 1903, 1904, 1906, 1907, 2001, 2002, 2004, 2005, 2101, 2103, 2105, 2106, 2107, 2109, 2110.

\* Fosfaatbindingsvermogen  $FBV = 0,5*(Al + Fe)$  in mmol/kg.

\*\* Degree of P saturation  $DPS = P_{ox}/FBV$ .

Op beide locaties is in de laag 30-60 cm-mv de  $P_{ox}$  sterk gecorreleerd aan  $Fe_{ox}$ , en bij de Eickhorsterweg ook bij de laag van 0-30 cm -mv. Dat doet vermoeden dat fosforgehalten in deze bodems niet alleen bepaald zijn door de bemesting, maar deels natuurlijk of deels door herdistributie: transport van de plek met weinig binding naar de plek met meer binding, bijvoorbeeld via ijzercolloïden.

### Grondwaterkwaliteit

De gemiddelde fosfaatconcentraties in het grondwater aan de Eickhorsterweg is laag met 0,04 mg P/L, en acht van de tien metingen beneden de detectiegrens van P-PO<sub>4</sub>. De gemiddelde fosfaatconcentraties in het grondwater aan de Moosdijk is met 0,11 mg P/L niet laag, maar ook hier heeft een groot aantal monsters beneden de detectiegrens van P-PO<sub>4</sub>. De gemiddelde fosfaatconcentraties worden dus sterk bepaald door enkele monsters met hogere concentraties.

**Tabel 25** Fosfaat in grondwater (bemonsterd bij relatief hoge grondwaterstanden in maart 2021).

	Diepte	P	NO <sub>3</sub>	Tot-N	P-PO <sub>4</sub>	%P-PO <sub>4</sub>	n
	Cm -mv	mg P/L	mg N/L	mg N/L	mg P/L	<0.01*	
Eickhorsterweg	0.70	0.04	8	10.6	0.02	70%	10
Moosdijk	0.80	0.11	19	23.2	0.05	65%	20
LMM zand 2018*		0.13	11	14	0.12	32%	209
detectielimiet		0.1	0.03	0.3	0.02		

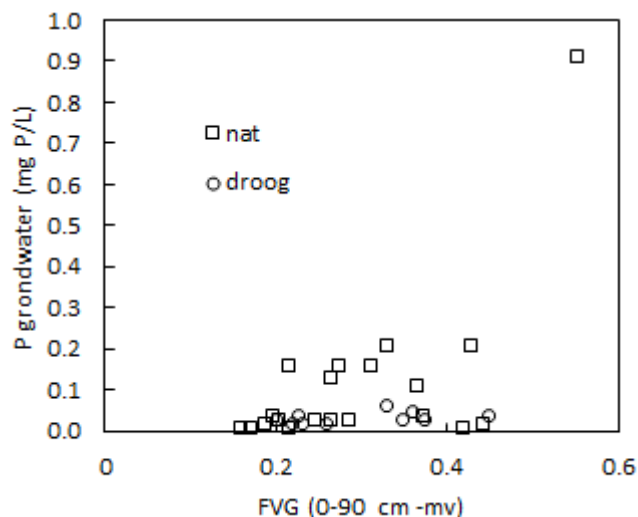
RIVM hanteert detectiegrens van 0.01 mg P-PO<sub>4</sub>/L.

\*Bijlage 3. P en Fe in bovenste grondwater zandregio Nederland.

De gemiddelde concentraties in de winter bij de Eickhorsterweg en bij de Moosdijk liggen lager dan het landelijk gemiddelde, dat bepaald is bij bemonsteringen in de zomer door RIVM (LMM) (van Beelen and van der Wal 2021). Die vergelijking is niet altijd correct, omdat zeer hoge P-concentraties het gemiddelde bepalen en die vaak gemeten worden in gereduceerde omstandigheden waarbij ook Fe wordt gemeten in het grondwater (zie 0). Het fosfaat in dergelijk ijzerrijk grondwater draagt echter niet bij aan de P-flux naar oppervlaktewater doordat het in aerobe omstandigheden neerslaat. Daarom is in dit onderzoek ook opgelost Fe gemeten in grondwater.

In Figuur 17 is te zien dat de hoge fosfaatconcentraties gevonden worden bij de groep bemonsteringen met relatief hoge grondwaterstanden en een hoge FVG. Locaties met grondwater dieper dan 90 cm -mv hebben allemaal fosfaatconcentraties lager dan 0.06 mg P/L en 0.01 mg P-PO<sub>4</sub>/L. De conclusie is dat in percelen met grondwaterstanden binnen de 90 cm er relatief hoge P-concentraties kunnen voorkomen.

In tien jaar durend onderzoek zijn zeer hoge P- en PO<sub>4</sub>-concentraties in een sloot tussen de Moosdijk en de Timmermansweg gemeten: gemiddeld 0,36 mg P l<sup>-1</sup> en 0,27 mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup> (Koeien & Kansen; (Hooijboer and Weijs 2013)). De zomerse grondwaterconcentraties bij de Koeien & Kansen-boer waren gemiddeld 0,12 mg P l<sup>-1</sup> en 0,06 mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup> (Bijlage 7.8 in Hooijboer en Weijs, 2013). De P-concentraties gemeten in het huidige onderzoek, bij hoge grondwaterstanden in de winter aan de Moosdijk, zijn sterk vergelijkbaar met de eerder gevonden zomerse grondwaterconcentraties. Sinds 2019 is er ook een waterkwaliteitsmeetpunt aan de Moosdijk (Ysselsteyn)/Dorperpeelweg (America) (Meetobject ODRPP50;RD 193331;384328 in waterkwaliteitsportaal). De in 2019 en 2020 gemeten P-concentraties zijn hier hoog: gemiddeld 0,60 mg P-PO<sub>4</sub>/l en 0,76 mg P/L. Dat is 2 à 3 km stroomafwaarts van de bemonsterde percelen aan de Moosdijk en 1 km stroomafwaarts van een van de percelen waarvan de afspoeling bemonsterd is in de winter (Moosdijk, en Dorperpeelweg).



**Figuur 17** Fosfaat in grondwater bij Eickhorsterweg en Moosdijk in relatie tot FVG van hele profiel (0-90 cm). Locaties met een grondwaterstand hoger dan 90 cm -mv worden hier nat genoemd.

### Plassen op land

De neerslag in januari en februari 2020 was langdurig. De neerslag in de 17 dagen voor 13 februari 2020 was 4,2 mm per dag (som 71 mm), en de neerslag in de 12 dagen tussen 13 en 24 februari was 5,5 mm/dag (som 66 mm) (gemiddelde van neerslagstations Deurne, Sevenum en Venray). Dit zorgde op relatief veel percelen voor plassen. Het betreft meestal percelen die na de oogst van aardappelen onbewerkt zijn om te voorkomen dat aardappelresten verder versneden worden door een bewerking. De overgebleven knollen sterven af. In de periode dat deze plassen zijn waargenomen, zijn monsters genomen voor chemische analyse. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 25.



**Figuur 18** Afspoeling van water op 13 en 24 februari 2020 op dezelfde locatie aan Dorperpeelweg (monster 3 in Tabel 2) (foto: René Rietra).

**Tabel 26** Fosfaat in plassen op land die afvoeren op sloten.

Monster	Naam weg, gemeente	datum	Type perceel	P*	P-PO <sub>4</sub> **
				mg P/l	
1	Eickhorsterweg, Horst	24-2-20	Aardappelperceel in 2019	0,39	0,10
2	Essenweg, Horst	24-2-20	Pompoen in 2019	0,31	0,08
3	Dorperpeelweg, Horst	24-2-20	Aardappelperceel in 2019	0,43	0,23
4	Moostdijk, Venray (als 5)	24-2-20	Aardappel- of bloembolperceel in 2019	0,24	0,06
5	Moostdijk, Venray (als 4)	24-2-20	Aardappel- of bloembolperceel in 2019	0,27	0,07
6	Steegse Peelweg, Venray	24-2-20	Aardappelperceel in 2019	0,57	0,11
7	Essenweg, Horst	7-2-22	Aardappel in 2021	0,40	0,19
8	Dwarsweg, Ede	21-2-22	Mais in 2021	0,69	0,11
9	Dwarsweg, Ede	21-2-22	Mais in 2021	0,65	0,08
10	Nieuwesteeg, Ede	21-2-22	Mais in 2021	1,84	0,30
gemiddelde				0,39	0,11

\*Totaal P na Aqua Regia destructie van ongefilterd water.

\*\* gefilterd watermonster.

De P-PO<sub>4</sub> (molybdeenreactief P in gefilterd water) is relatief laag in de tien genomen monsters ondanks de lange tijd dat de plassen water op het land hebben gestaan. De totaalgehalten aan P zijn hoger, doordat er soms gronddeeltjes in het afspoelende water zitten. De fosfaatconcentraties zijn relatief laag in vergelijking met bijvoorbeeld de fosfaatconcentraties bij maaiveldafstroming in de zomer (Tabel 7).

Als we aannemen dat de neerslag van de hele periode tussen 13 en 24 februari is afgespoeld (66 mm) bij de zes locaties, dan is de P-belasting van het oppervlaktewater bij een gemiddelde concentratie van 0,11 mg/l P-PO<sub>4</sub> en 0,39 mg/l P, respectievelijk 0,07 kg P-PO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> en 0,24 kg P ha<sup>-1</sup>. De plassen zijn dus geen hotspot, maar geven lokaal wel een relevante bijdrage aan de totale af- en uitspoeling. De totale uit- en afspoeling van totaal P uit landbouwgronden is volgens modelberekeningen gemiddeld 0,55 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup> in Noord-Limburg en 0,80 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup> in Oost-Brabant (Schipper et al. 2021b).

## 6.5 Discussie hotspots

Hotspots van de P-belasting vanuit landbouwgronden kunnen percelen of delen van percelen zijn met een hoge fosfaatverzadiging in combinatie met ondiepe grondwaterstanden en/of in combinatie met plassen op het land die afstromen (eventueel via greppels) naar de aanwezige sloten.

De fosfaatconcentraties die relevant zijn voor de hoge uitspoeling naar oppervlaktewater zijn de hoge fosfaatconcentraties die gemeten worden bij hoge grondwaterstanden zoals in hoofdstuk 5, en niet de lage fosfaatconcentraties die gemeten worden bij lage grondwaterstanden. Een belangrijke bron van informatie over het bovenste grondwater in Nederland zijn de data van het meetnet LMM. Voor uitspoeling van fosfaat uit zandgronden zijn die landelijke data echter niet zo relevant, omdat bemonstering voor het LMM in de zomer plaatsvindt en de grondwaterstanden in de zomer relatief laag zijn. Bovendien zijn de gemeten fosfaatconcentraties zeer laag ten opzichte van ijzer, wat mogelijk een artefact is van de bemonsteringsmethode (0). Om de locaties te vinden die verantwoordelijk zijn voor de hoge fosfaatuitspoeling naar oppervlaktewater is dus additioneel bemonstering nodig bij ondiepe grondwaterstanden. In dit onderzoek is daarom het bovenste grondwater onderzocht in een gebied met relatief hoge fosfaatconcentraties in oppervlaktewater en zijn situaties waar plassen op het land afspoelen naar de sloot onderzocht.

De aangetroffen fosfaatconcentraties in plassen en afspoelend water (0,08-0,23 mg P-PO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup>) zijn hoger dan de KRW-doelen voor oppervlaktewater ( $\approx$ 0,11 mg P L<sup>-1</sup>), maar lager dan de fosfaatconcentraties van bodemvocht in evenwicht met de bouwvoor (3 monsters; 0,5 à 3 mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>; Figuur 20) die in de onderzochte aardappelpercelen gemeten zijn, en bij afspoeling hoge P-PO<sub>4</sub>-concentraties laten zien (gemiddelde van tien locaties; 0,3 à 2,4 mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>; Tabel 7). Eerder is bij twintig monsters oppervlakkige afspoeling in maart bij Hupsel een gemiddelde P-concentratie van 0,65 mg P l<sup>-1</sup> gemeten (Rozemeijer and

---

van der Velde 2008). In buitenlands onderzoek is geconstateerd dat de opgeloste fosfaatconcentratie bij maaiveldafspoeling sterk daalt in de tijd nadat erosie is geminimaliseerd (Sharpley 2003). Het is daarom te verwachten dat in de winter het fosfaat in de plassen op land niet in evenwicht is met fosfaat in de bouwvoor. De plassen in de winter, indien ze voorkomen, zijn dus daarom geen heel belangrijke bron. De niet-zichtbare oppervlakkige afspoeling, waarbij het afspoelende water wel in evenwicht is gekomen met de bodemfosfaatconcentratie, speelt vermoedelijk een grotere rol, maar om deze stroom te kunnen kwantificeren, zijn zeer specifieke meetopstellingen op perceelranden nodig waar met intensieve monitoring de oppervlakkig afstromende water en slibhoeveelheden worden gemeten en de bijhorende concentraties.

De aangetroffen fosfaatgehalten in de bodem van dertig steekproeflocaties en de concentraties in het bovenste grondwater van dezelfde dertig locaties, waren relatief hoog op de natste locaties ( $<0,9$  mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>; Figuur 17) en zeer laag ( $<0,01$  mg P-PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>) bij de droge locaties (grondwater dieper dan 90 cm -mv). De bemonsterde locaties hebben ook geen opvallend lage bindingscapaciteit voor fosfaat of hoge fosfaatgehalten. Het belangrijkste is dat bij de bemonsterde bodems het grondwater gemiddeld een lage fosfaatconcentratie heeft (Tabel 25), terwijl er in het gebied wel hoge fosfaatconcentraties zijn aangetroffen in het oppervlaktewater. Dat maakt dat de steekproeflocaties in dit gebied niet de bron zijn van de hoge fosfaatconcentraties in het oppervlaktewater in dit gebied. In dit gebied moeten de hotspots daarom gezocht worden vanuit de locaties waar de hoge concentraties in oppervlaktewater zijn gemeten.

---

# 7 Effect bekalken

## 7.1 Inleiding bekalken

In buitenlands onderzoek is een aantal keren vastgesteld dat bekalken kan leiden tot minder fosfaatuitspoeling naar oppervlaktewater, met name bij kleirijke bodems (Andersson et al. 2016; Bergström et al. 2015; Eslamian et al. 2018; Simonsson et al. 2018). Bekalken leidde niet tot minder sedimentconcentraties bij run-off van zandgrond (Murphy and Sims 2012). Ondanks dat het onder bepaalde omstandigheden effect lijkt te hebben, is het geen erkende of bekende maatregel.

In een aantal onderzoeken is een daling van extraheerbaar fosfaat gemeten na verhogen van de pH tot neutrale pH-waarden (Barrow 2017; Gustafsson et al. 2012; Lizarralde et al. 2021; Weng et al. 2011), in langetermijnonderzoek (Azeez et al. 2020), ook bij relatief sterke bodemextracten (P-Olsen), in landbouwgronden door (Arai et al. 2005) en in natuurterreinen (Geurts et al. 2011; Siepel et al. 2019; Smolders et al. 2008). Er zijn echter ook langetermijnonderzoeken (McDowell et al. 2002; von Tucher et al. 2018; Žurovec et al. 2021) en laboratoriumonderzoeken (Lizarralde et al. 2021) waarin geen effect gevonden wordt van bekalken op extraheerbaar fosfaat, of zelfs meer beschikbaar P na bekalken in langetermijnproeven (Jordan-Meille et al. 2021; Szara et al. 2019).

De uiteenlopende effecten van kalk op fosfaatuitspoeling worden mogelijk veroorzaakt door de grote verschillen in fosfaatkonzentraties. Laboratorium- en modelonderzoek suggereren verschillende effecten van kalk, afhankelijk van het fosfaatkonzentratie (Weng et al. 2011). Het is mogelijk dat de daling van de fosfaatuitspoeling door bekalken (Arai et al. 2005) alleen optreedt bij hoge fosfaatkonzentraties, zoals eerder gesuggereerd (Murphy and Stevens 2010). Daarmee past het bij een strategie om de fosfaatuitspoeling bij de bron aan te pakken: minder uitspoeling van P bij gronden met hoge fosfaatconcentraties. Bovendien past het gebruik van kalk in een normaal landbouwkundige advies, met name ook omdat geschat wordt dat 30% van de Nederlandse zandgronden economisch gezien te weinig bekalft is (Eurofins\_Agro 2021).

Om het effect van bekalken op fosfaatuitspoeling te toetsen, zijn drie grondmonsters bekalft: twee monsters uit het onderzoek na afspoeling bij aardappelpercelen (hoofdstuk 3) en één uit het onderzoek na de invloed van grondwaterstand (hoofdstuk 5). Gedurende elf maanden zijn de monsters geïncubeerd (in vochtige toestand, niet luchtdicht afgedekt, in een onverwarmde schuur), zijn de fosfaatconcentraties in bodemvocht bepaald als maat voor fosfaatuitspoeling en zijn de effecten van bekalken op verschillende fosfaatextractiemethoden gemeten. De incubatieduur was elf maanden, omdat kalk langzaam oplost. Om de effecten van bekalken voor meerdere grondmonsters te testen, is de incubatiemethode daarom vergeleken met pH-afhankelijke extracties.

## 7.2 Methode bekalken

Voor het incubatie-experiment zijn drie gronden gebruikt: het betreft grond uit de bouwvoor (0-10 cm -mv) van locatie 6 (Deurne), 7 (Wijnandsrade), beide akkerbouwpercelen (hoofdstuk 3) en aan één graslandperceel (0-20 cm -mv) uit een weiland in Bennekom (Tabel 27, zie ook hoofdstuk 5). De akkerbouwpercelen zijn bemonsterd in de week van 10 augustus 2021 en het grasland in Bennekom op 6 september 2021. Het vochtgehalte van de verse grond is bepaald en de vloeigrens.

**Tabel 27** Bemonsterde locaties voor incubatie-experiment.

Nr	locatie	Diepte (cm)	pH	Bodem	Lutum %	OS %	coördinaten
7	Deurne	0-10	5,2	Zand	2	3,8	184227, 384136
9	Wijnandsrade	0-10	6,72	Löss	10	2,5	190686, 322909
10	Bennekom	0-20	5,5	Zand	<1	4.2	173053, 446665

Kalk is toegevoegd bij drie hoeveelheden (inclusief de toevoeging van nul kalk) aan de drie gronden. Steeds is aan 8 kg verse grond 0, 10 en 20 gram snel oplosbare kalk toegevoegd (EMKAL) op 9 november 2021, en extra water is toegevoegd om te komen tot 60% van de vloeigrens. Het experiment is in drievoud uitgevoerd. De grond en de kalk zijn met de hand gemengd. EMKAL is een droge kalkmeststof (Sibelco) met een hoge reactiviteit (Worp et al. 1987) (ISO 22146) en neutraliserende waarde van 53 (equivalent aan 53 gram CaO per 100 gram). De gronden zijn elf maanden geïncubeerd in 7,5 liter emmers (SEMA4619), met losliggende deksels, in een onverwarmde ruimte.

Op 7 maart 2022, dus na vier maanden na het bekalken, is via tien gutssteken per emmer een mengmonster grond per behandeling uit de incubatieproef bemonsterd voor standaardanalyses voor fosfaat:  $P_{CaCl_2}$  (Houba et al. 2000), en  $P_{al}$  (NEN 5793 2010),  $P_{Olsen}$  (ISO 11263 1994),  $P_{ox}$  methode van Schwertmann (NEN 5776 2014; Schwertmann 1964) en bodemvocht via uitslingeren (intern protocol E0002).

Op 3 okt 2022, dus elf maanden na het bekalken, is de grond bevochtigd via 400 ml demi in het centrum van elke pot, is één Rhizon per emmer geplaatst (rhizon flex; 19.21.25F; Rhizosphere Research Products) en is twee dagen later een bodemvochtmonster genomen voor  $P-PO_4$  met SFA en P met ICP-AES. Grond is bemonsterd voor een  $CaCl_2$ -extractie (pH en  $PO_4-P$ ) (Houba et al., 1995) (NEN 5704; 1996), en voor bodemvocht via centrifuge (intern protocol E0002) voor  $P-PO_4$  (SFA). Het verschil met de bemonsteringen van 7 maart 2022 is dat elke pot apart bemonsterd is, zodat elke behandeling in viervoud is geanalyseerd.

Naast het bekalken is ook een pH-afhankelijke  $CaCl_2$ -extractie uitgevoerd door bij de standaardextractie van 10 gram grond en 100 ml 0,01 M  $CaCl_2$  (Houba et al., 1995) (NEN 5704; 1996) ook verschillende hoeveelheden 1 M HCl toe te voegen: 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 en 0,5 ml HCl. Bij de sedimentmonsters is ook de pH verhoogd door de extractie uit te voeren met 0,01M  $CaCl_2$  en 0,005 M  $Ca(OH)_2$  in verschillende combinaties van respectievelijk 80 ml + 20 ml, en 90 ml en 10 ml. De uitgevoerde pH-afhankelijke extractie is een aanpassing van de normale  $CaCl_2$ -extractie (NEN 5704; 1996). De NEN 5704 is de standaard voor het vaststellen van de fosfaatgebruiksnorm (§ 29a Uitvoeringsregeling Meststoffenwet). De pH-afhankelijke test is bedoeld om snel het effect te meten van bekalken op de P-uitspoeling, en beoogt dus een relatief kleine pH-verandering: tot pH 7. Er is een protocol voor een pH-afhankelijk extractie voor afvalstoffen (ISO 21268-4 2015) (voorheen EN 14429), maar die gaat uit van een heel groot pH-bereik (pH 2 tot pH 12) en een totale schudtijd van twee of drie dagen. De pH-afhankelijke test is uitgevoerd bij grond uit de incubatieproef, en uit grond en sedimentmonsters uit Tabel 2 (hoofdstuk 3, afspoeling aardappelpercelen).

## 7.3 Resultaten bekalken

De drie gebruikte gronden (Tabel 28) bevatten verschillende hoeveelheden fosfaat. De fosfaatklasse bepaalt de fosfaatgebruiksnorm. Deurne en Bennekom zitten in klasse hoog met een  $P-CaCl_2$  van respectievelijk 5,5 en 11 mg P/kg (>3,4 mg P/kg) en een PAL van respectievelijk 70 en 128 mg  $P_2O_5/100$  gram (>55 mg  $P_2O_5/100$  gram). Wijnandsrade zit in klasse neutraal met een  $P-CaCl_2$  van 4,4 mg P/kg (>3,4 mg P/kg) en een PAL van 44 mg  $P_2O_5/100$  gram (31-45 mg  $P_2O_5/100$  gram) (artikel 30 uit Uitvoeringsregeling Meststoffenwet).

De effecten van bekalken en vier maanden incubatie op extraheerbaar fosfaat en de samenstelling van bodemvocht is dat de pH toeneemt met een 0,5 of 1 pH-eenheid bij de zure zandgronden uit Deurne en Bennekom. De lössgrond uit Wijnandsrade heeft al een relatief hoge pH, waardoor de toevoeging van kalk maar een klein effect op de  $pH_{CaCl_2}$  heeft. De daling van het beschikbaar P, en een daling van het P in bodemvocht onder invloed van bekalken valt op. Het effect van bekalken met 20 gram kalk per 7,5 kg grond

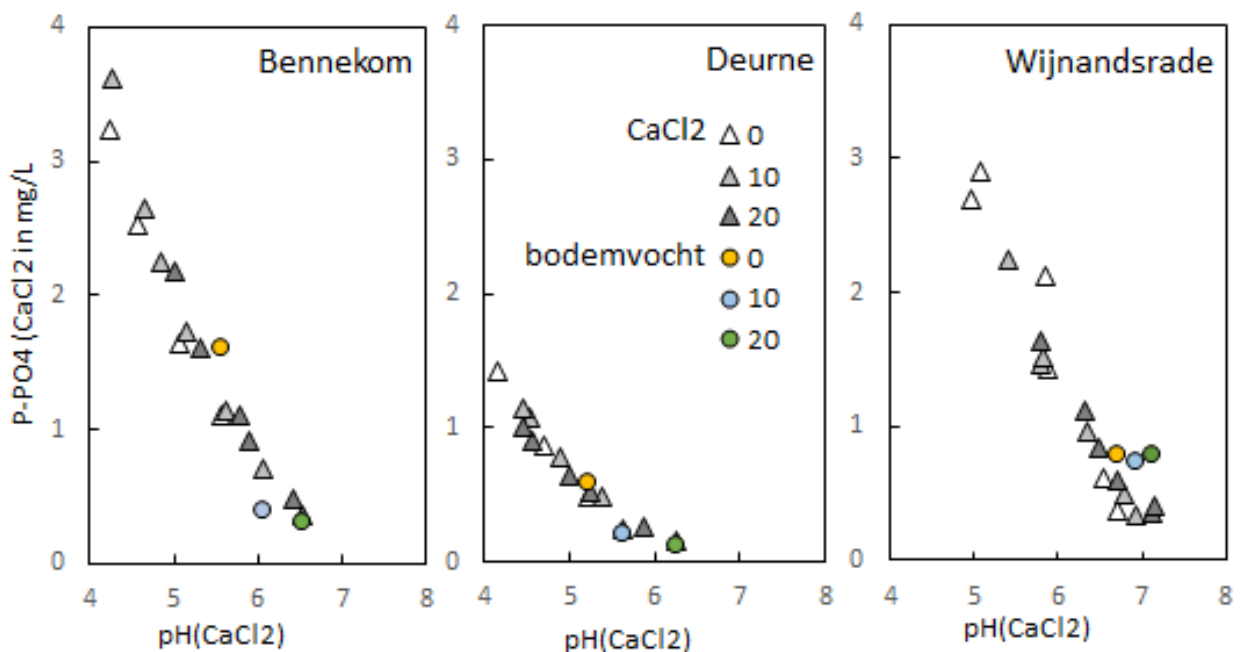
op fosfaat in  $P_{CaCl_2}$  is een factor 3 bij de grond uit Deurne en Bennekom, en afwezig bij Wijnandsrade. Het effect op P in bodemvocht is bij de grond uit Deurne en Bennekom respectievelijk een factor 5,3 en 4,7.

**Tabel 28** Effecten van bekalken (gram kalk per kg grond) op extraheerbaar fosfor en samenstelling bodemvocht ( $n=1$ ) na vier maanden.

Nr.	Kalk (g/kg)	pH $CaCl_2$	P- $PO_4$ $CaCl_2$	mg P/kg				bodemvocht rhizon					
				P $CaCl_2$	P Al**	P Olsen	P ox	P- $PO_4$	DOC	Al	Ca	Mg	pH
								mg/l					
7deurne	0	5,21	4,8	5,5	308	99	803	0,6	33	0.17	340	84	6.00
7	1,3	5,62	2,5	3,2	304	93	824	0,2	36	0.05	384	69	6.56
7	2,7	6,26	1,5	2,2	304	89	811	0,1	45	0.02	406	53	7.39
9Wijnandsrade	0	6,72	3,8	4,4	191	85	475	0,8	21	0.03	335	34	*
9	1,3	6,92	3,5	4,2	192	83	445	0,7	24	0.01	353	36	*
9	2,7	7,13	3,5	4,2	178	81	811	0,8	25	0.18	379	36	*
10Bennekom	0	5,55	11,0	12,6	561	97	1166	1,6	46	0.15	280	100	6.04
10	1,3	6,07	7,1	9,1	589	99	1178	0,4	41	0.03	308	89	6.96
10	2,7	6,54	3,5	4,6	587	100	1171	0,3	42	0.03	310	81	7.18

\* Te weinig vocht voor bepaling.

\*\*PAL wordt hier uitgedrukt in mg P kg<sup>-1</sup>, t.b.v. een vergelijking met de andere extractiemethoden en omdat het laboratorium CBLB-WUR de data zo weergeeft. In de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet (artikel 29a) wordt PAL uitgedrukt in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 gram grond.



**Figuur 19** Effect van pH op fosfaatbeschikbaarheid bij drie grondmonsters (Tabel 7): zonder en met bekalken (0, 10 of 20 gram kalk bij 7,5 kg grond) na vier maanden incubatie.

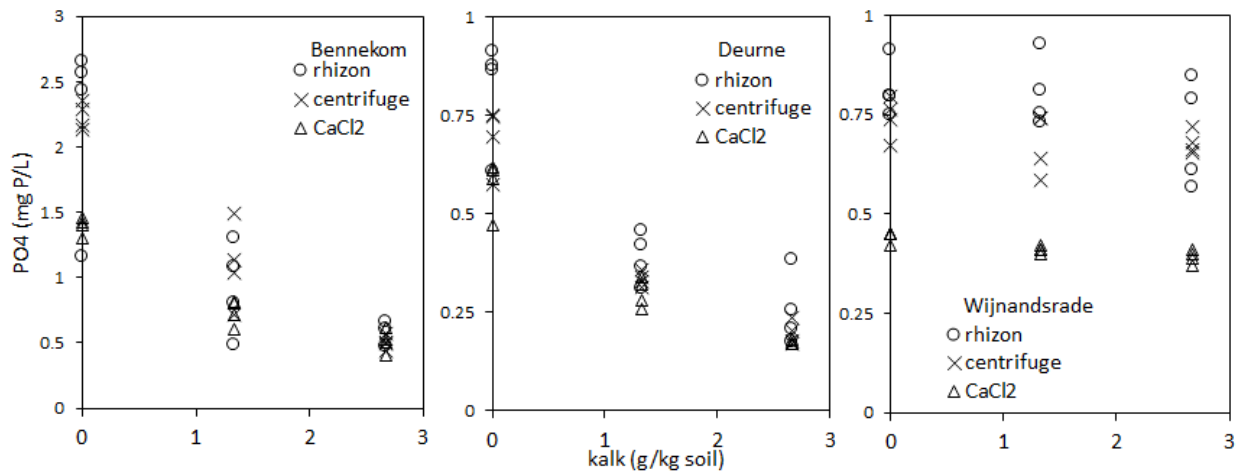
De gevonden pH-effecten op P in bodemvocht zijn heel relevant, omdat het aangeeft dat bekalken een geschikte maatregel kan zijn om fosfaat-uit- en -afspoeling te verlagen in fosfaatrijke kalkloze bodems. Bekalken bij een bodem die al een hoge pH heeft, zoals Wijnandsrade, heeft geen effect op P in bodemvocht. In Figuur 19 is te zien dat de  $P_{CaCl_2}$  redelijk overeenkomt met de P-concentratie in bodemvocht.

Na elf maanden incubatie zijn alle potten afzonderlijk geanalyseerd en kunnen de twee methode voor bodemvocht vergeleken worden met  $CaCl_2$  extractie (Figuur 20). Te zien is dat het bekalken bij de twee zure gronden (Deurne, Bennekom) tot een veel lagere fosfaatconcentratie leidt dat goed herhaalbaar is, en via alle drie methoden extractiemethoden meetbaar is. Opvallend is dat de 0,01 M  $CaCl_2$ -extractie dezelfde

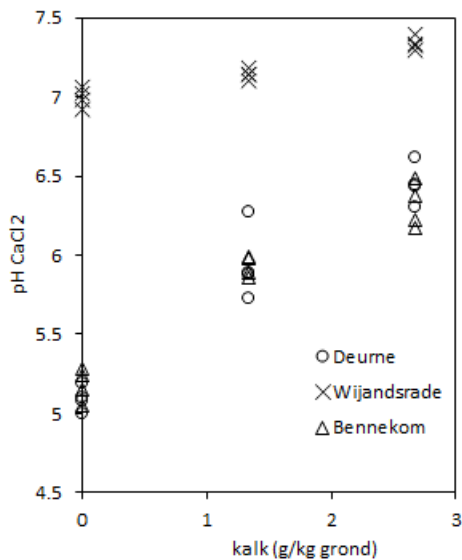


fosfaatconcentratie in oplossing geeft als de twee bodemvochtexttracties bij Deurne en Bennekom, maar niet bij Wijnandsrade (Figuur 19 en Figuur 20). Het effect van de hoge bekalking is dat PO<sub>4</sub> in bodemvocht met een factor 4,4 en 3,5 daalt bij respectievelijk Bennekom en Deurne.

De grond uit Wijnandsrade heeft al een hoge pH bij aanvang en bekalken heeft weinig effect op de pH (pH van 7 na 7,4) (Figuur 21) en ook nauwelijks effect op fosfaat in bodemvocht. Bij de twee zure gronden leidt bekalken tot een sterke verandering van de pH. Het effect van de 1,3 gram kalk per kg grond heeft na elf maanden geleid tot een relatief groter pH-effect dan de 2,7 gram kalk per kg grond. Dat suggereert dan nog niet alle kalk is opgelost na elf maanden.



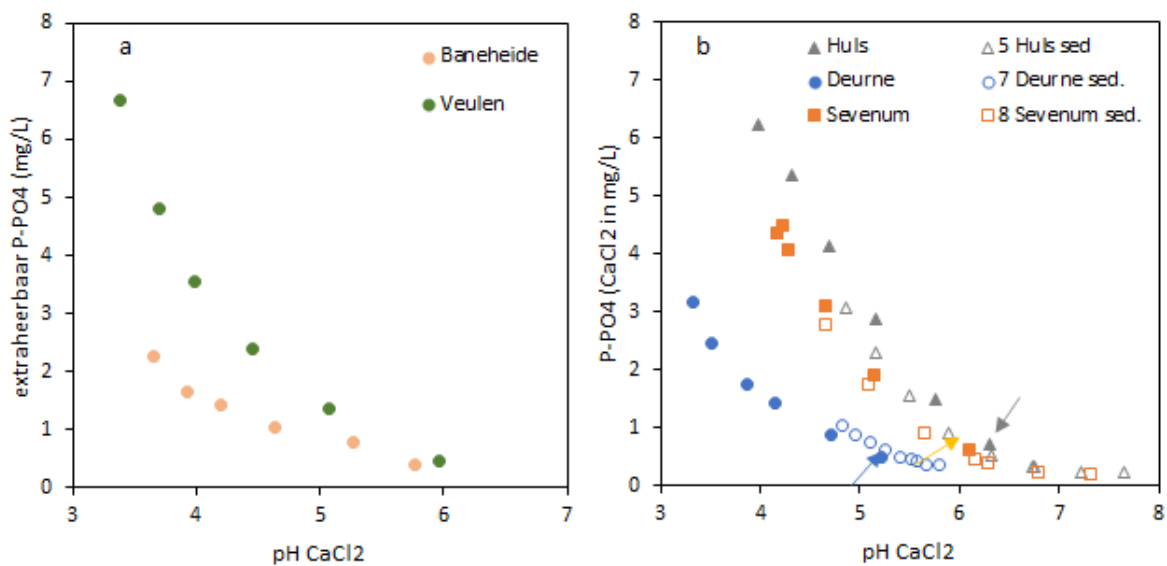
**Figuur 20** Effect van pH op fosfaatbeschikbaarheid bij drie grondmonsters zonder en met bekalken (0, 10 of 20 gram kalk bij 7,5 kg grond) na elf maanden incubatie. Y-as in derde figuur wijkt af van de eerste twee figuren).



**Figuur 21** Effect van bekalken op pH in CaCl<sub>2</sub>-extract (0, 10 of 20 gram kalk bij 7,5 kg grond) na elf maanden incubatie.

In Figuur 19 en Figuur 22 staan de uitgevoerde pH afhankelijke CaCl<sub>2</sub>-extracties van de locaties in Tabel 2. Alle grond- en sedimentmonsters laten een pH-afhankelijkheid zien waarbij de hoogste P-concentraties in het zure bereik zitten en de laagste P-concentraties bij neutrale pH's. De pH-afhankelijk CaCl<sub>2</sub>-extractie is een snelle test die het mogelijk maakt om veel grondmonsters te testen. De overeenkomst tussen de grond- en sedimentmonsters van dezelfde locaties in Figuur 22b suggereert dat de P-evenwichtsconcentratie hetzelfde

is, omdat het van dezelfde locatie komt. Dat is relevant, omdat het totaalfosfaatgehalte van het sediment veel hoger is dan van de grond, waarschijnlijk omdat het minder zand bevat. Analyse van grond is dus behulpzaam om de P-concentratie in afspoelend water in te schatten, maar niet voor het totale gehalte P (water+sediment) dat afspoelt.



**Figuur 22** Effect van pH op fosfaatbeschikbaarheid bij twee grondmonsters (a,b) en grond en sedimentmonsters van drie locaties (b). Het betreft monsters van de locaties in hoofdstuk 3 (Tabel 2). De pijlen in figuur b geven de initiële pH-waarden van de monsters zonder toediening van zuur of base.

## 7.4 Discussie bekalken

Bij de zure grondmonsters wordt een sterk effect gemeten van bekalken op fosfaat in bodemvocht. Dit kan gebruikt worden om de P-uitspoeling uit bodems met een hoge fosfaatuitspoeling naar oppervlaktewater te verlagen: natte bodems nabij oppervlaktewater met hoge fosfaatgehalten. Bekalken is relatief goedkoop en past in een goede landbouwpraktijk. Extra bekalken tot neutrale pH-waarden, zoals in dit onderzoek, is landbouwkundig niet nadelig, behalve dat er bij aardappelen een hogere kans op visueel kwaliteitsverlies bij aardappelen door schurft (Lacey and Wilson 2001). Bekalken leidt tot meer CO<sub>2</sub>-emissies, maar ook tot minder N<sub>2</sub>O-emissies en is daardoor GHG neutraal (Wang et al. 2021b).

Het pH-effect op fosfaat in bodemvocht is opvallend, omdat in de wetenschappelijke literatuur het effect van pH op fosfaatconcentratie sterk varieert: soms een daling (Andersson et al. 2016; Simonsson et al. 2018; Svanbäck et al. 2014) en soms een verhoging van de fosfaat (Fischer et al. 2015) of diverse effecten, afhankelijk van de grond (Barrow 1984; Lizarralde et al. 2021). In Nederlandse en Vlaamse literatuur is het effect nauwelijks bekend, slechts één onderzoek liet een lagere P<sub>w</sub> zien o.i.v. bekalken (Prummel 1974), en bekalken wordt nergens genoemd in lijstjes met potentiële maatregelen (Chardon et al. 1996; ILVO 2015; Noij et al. 2013; Schoumans et al. 2014; Verloop et al. 2018). Veel mensen zijn in de veronderstelling dat in kalkloze zandgronden de fosfaatbinding toeneemt bij een lagere pH, omdat in laboratoriumexperimenten met alleen ijzerhydroxiden de binding toeneemt naarmate de pH daalt van 7 naar 4. Daarbij wordt er niet aan gedacht dat in bodems ook andere stoffen, met name humuszuren en calcium, gebonden zijn aan ijzerhydroxiden, waardoor het pH-afhankelijke gedrag van fosfaat anders kan zijn.

In bodems worden, zoals gezegd, verschillende effecten gemeten, soms een daling en soms een toename van de binding (Barrow 1984). Ook in modelsystemen (goethiet, humuszuren, of combinaties etc.) worden verschillende effecten gevonden (Bloom 1981; Haynes and Swift 1989; Hiemstra et al. 2013). Op basis van recente modellen waarin aangenomen wordt dat fosfaat bindt aan ijzerhydroxiden, inclusief competitie met

---

organische stof en in interactie met aluminium, ijzer, en calcium: het zogenaamde LCD-model<sup>7</sup>, kunnen dergelijke verschillen tussen bodems en modelsystemen nagebootst worden (Cui and Weng 2013; Hiemstra et al. 2013; Weng et al. 2012; Weng et al. 2011). Met name bij hoge fosfaatconcentraties, zoals die voorkomen in veel Nederlandse landbouwbodems, zorgt de competitie met opgeloste organische stof en fosfaat voor een toename van de fosfaatbinding en voor een afname van de fosfaatconcentratie als je gaat van pH 4 naar pH 7 (Weng et al. 2011). Dit effect is te verklaren door een zwakkere binding van de organische stof aan ijzer(hydr)oxides naarmate de pH toeneemt, waardoor netto de fosfaatbinding sterker wordt. Omdat we met name geïnteresseerd zijn in het terugdringen van fosfaatuitspoeling bij hoge P-concentraties, kan pH-verhoging via bekalken een effectieve maatregel zijn.

De gevonden pH-effecten zijn ook relevant als waarschuwing voor pH-daling in landbouwgronden die omgezet worden in natuurterreinen en voor bufferstroken langs watergangen (1 of 3 m breedte) die vanaf 2024 verplicht zijn in de mestwetgeving (7<sup>e</sup> Nitraat Actie Programma), omdat de pH meestal daalt als bekalken achterwege blijft (Goulding 2016; Johnston et al. 1986; Xu et al. 2020): zonder bekalken daalt de pH op lange termijn tot waarden die in kalkloze zandgronden nu normaal zijn: pH<sub>KCl</sub> 2,5 à 5 (De Vries and Leeters 2001). De huidige wet (Uitvoeringsregeling Bufferstroken<sup>8</sup>) stelt dat de bufferstroken niet bemest mogen worden en dus ook niet bekalkt mag worden. Om fosfaatuitspoeling te voorkomen, en liefst te verlagen, lijkt bekalken van met name bufferstroken belangrijk.

De gevonden pH-effecten op P<sub>CaCl2</sub> zijn ook relevant voor de interpretatie van de P-status voor de P-gebruiksnormen: door bekalken kan de fosfaatklasse veranderen naar een lagere klasse, waardoor de fosfaatgebruiksnorm toeneemt. Een dergelijk effect is mogelijk ongewenst en vanuit landbouwkundig oogpunt wellicht niet nodig.

---

<sup>7</sup> "ligand charge distribution" (LCD) model: een combinatie van het CD-MUSIC-model en het NICA-model.

<sup>8</sup> <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2023-6071.html>. Artikel 2: "Het is verboden meststoffen op of in de bodem te brengen op een perceel gelegen op landbouwgrond in een bufferstrook van... etc."

## 8 Overige P-maatregelen

### 8.1 Risico P-afspoeling percelen vrije-uitlooppluimvee

Bij uitloop van pluimveehouderijen komen plaatselijk overbemesting en erosie voor op steeds dezelfde locaties (van Niekerk et al. 2016). Dit leidt waarschijnlijk tot maaiveldafvoer van fosfaat. Mogelijkheden om deze ongewenste emissie te verminderen, zijn o.a. het beter verspreiden van de het pluimvee en bijbehorende mest, verzamelen van de mest en het verminderen van de uit- en afspoeling (van Niekerk et al. 2016). Metingen bij boeren die aan onderzoek willen meedoen, wordt voorgesteld.

Geobserveerd is maaiveldafstroming bij een perceel met vrije-uitloopkippen en de afstroming in een beek. In het stroomgebied van de Lunterse beek is het aantal bedrijven en percelen met uitloop van pluimvee geïnventariseerd via luchtfoto's, perceeloppervlakken uit PDOK, en de lengte van sloten in de website <https://boerenbunder.nl/>. De Lunterse Beek is relevant, omdat het relatief hoge fosfaatconcentraties heeft waarbij de bronnen voornamelijk landbouwkundige gebruikte bodems betreft (Schipper et al. 2020). Maatregelen die passen bij deze emissieroute zijn verzameld uit literatuur.



**Figuur 23** Maaiveldafvoer bij twee locaties met uitloop van pluimvee (foto: René Rietra).

In het stroomgebied van de Lunterse beek (3200 ha landbouw; gebied 6 en 7 in Schipper et al., 2000) is het aantal bedrijven en percelen met uitloop van pluimvee geïnventariseerd. Bij de 26 vrije-uitloopbedrijven die te vinden zijn in het stroomgebied hebben veel bedrijven sloten tussen de percelen. Het totaal aantal vrije-uitloopbedrijven was in Nederland 191 in 2013 (Niekerk et al., 2016). Het stroomgebied van de Lunterse beek kan gezien worden als een gebied waar veel vrije-uitloopbedrijven zijn. De meeste bedrijven hebben gaas om ervoor te zorgen dat het pluimvee niet bij het oppervlaktewater kan. Typisch van de pluimveebedrijven met uitloop zijn de kale stukken grond rondom de stal en nabij afrasteringen/gaas, die gevoelig zijn voor erosie. De afstand tussen gaas en sloot is op vrijwel de meeste locaties minder dan 1 m. Bij twee bedrijven is maaiveldafstroming vanaf de vrije-uitlooppervenien duidelijk zichtbaar (zie Figuur 23).

**Tabel 29** Aantal bedrijven met uitloop van pluimvee in stroomgebied Lunterse beek.

Aantal vrij uitloop	Oppervlak (ha)	Lengte A (km)	Lengte B (km)	Lengte C (km)
26	141	2,3	4,3	15

---

Aangezien pluimveemest relatief rijk is aan fosfaat en niet verwijderd wordt (Dekker et al. 2012), is aannemelijk dat maaiveldafstroming van kale plekken, waar veel pluimvee foerageert, leidt tot ophoping van fosfor en afspoeling van fosfaat. Op basis van de te verwachten aantallen dieren en het foeragegedrag, is berekend dat direct (10 à 20 m) rondom de vrije-uitloopstal er zeer hoge aanrijking van fosfaat is: 1676 à 2259 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/jaar (van Niekerk et al. 2016). Op de plekken zonder gras is geen opname en afvoer van fosfaat. In de meeste onderzoeken worden rondom vrije-uitloopstallen dan ook hoge fosfaatgehalten in de bodem gemeten (Aarnink et al. 2006; Dekker et al. 2012; Kratz et al. 2004; Meda et al. 2012; van Niekerk et al. 2016).

Maaiveldafstroming van stikstof en fosfaat bij vrije uitloop van pluimvee is in Nederland en andere landen voor zover we weten nog niet gemeten, maar in het buitenland zijn wel al heel vaak de effecten gemeten van kippenmest, als functie van hoeveelheid mest en over lange tijd, en als functie van diverse maatregelen (Anderson et al. 2018; Bos et al. 2021; Eugene et al. 2015; Huang et al. 2016).

### **Maatregelen om maaiveldafstroming bij vrije-uitlooppluimveehouderij te voorkomen**

Maatregelen om uit- en afspoeling te voorkomen, zijn gesuggereerd bij vrije-uitlooppluimvee. Maatregel 1 t/m 5 uit Nederlands onderzoek (van Niekerk et al. 2016) en maatregel 6 en 7 uit buitenlandse literatuur:

1. Overkappen: voorkomen van contact tussen regenwater
2. Drainage: opvang en zuivering van drainagewater
3. Wisselbouw
4. Bufferstrook langs waterlopen en oogsten en afvoer van gras
5. Gaas op gras om erosie te voorkomen
6. Toevoegingmiddelen of fosfaat te binden, met name aluminiumsulfaat of ijzerzand/slib
7. Grond vervangen of omhooghalen van P-arme grond
8. Bekalken (dit rapport)

In Nederland is geen van deze maatregelen getest (van Niekerk et al. 2016), maar in andere landen is maatregel 4, 5 en 6 uitgebreid onderzocht voor kippenmest uit pluimveehouderijen, maar niet voor vrije uitloop.

4- Bufferstroken om uit- en afspoeling van fosfaat op te vangen en te oogsten via gras, is in Nederland getoetst (Noij et al. 2013), maar niet specifiek voor pluimveemest of vrije-uitlooppluimvee. Dat is relevant omdat pluimveemest, in vergelijking met andere dierlijke meststoffen, relatief veel fosfor bevat ten opzichte van stikstof. In de VS (perceel met helling van 8%) is wel veertien jaar lang onderzocht wat het effect van diverse type graslandbeheer en bufferstroken is op afstroming van pluimveemest in grasland (Anderson et al. 2020). Dat laat zien dat onbemeste, ongemaaide en omheinde bufferstroken (60%), en in rotatie begraasde omheinde bufferstroken (36%), of maaigrasland (49%), de effectiefste maatregelen zijn ten opzichte van continu of in rotatie begraasd grasland. Ook in andere Amerikaanse onderzoeken leidt begrazing met vee t.o.v. grasmaaien tot hogere sedimentconcentraties in maaiveldafstroming (Anderson et al. 2020). Een nadeel van ongemaaide bufferstroken kan zijn dat ze na lange tijd weer een bron kunnen worden van fosfor (Dodd et al. 2018). Bufferstroken verminderen het transport van fosfaat gebonden aan kleine deeltjes door het invangen van die slibdeeltjes, maar het risico op uitspoeling van fosfaat door oppervlakkig transport van water door de bovengrond blijft bestaan.

5- Gaas op gras kan ervoor zorgen dat het gras intact blijft (Elbe et al. 2005), maar is mogelijk erg duur (van Niekerk et al. 2016).

6- In de VS is de toevoeging van aluminiumsulfaat aan mest een *best practice*-maatregel, naast het gebruik van bufferstroken, gebruik van limieten op basis van de P-beschikbaarheid test, en verminderen van P in diervoer (Moore Jr 1998). Toevoeging van aluminiumsulfaat (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 14H<sub>2</sub>O) aan pluimveemest in de periode 1995 tot 2015 leidde tot een verlaging van de maaiveldafvoer van 1,96 kg P/ha tot 0,85 kg P/ha (Huang et al. 2016). Gedurende twintig jaar werd het beschikbaar fosforgehalte van de grond steeds hoger in de met aluminiumsulfaat behandelde locaties. Zelfs bij de hoogste mesttoevoeging werd de fosfaatuitspoeling door de aluminiumtoevoeging met 80% verlaagd in vergelijking tot de behandeling zonder aluin (Anderson et al. 2018). Het gebruik van aluminiumsulfaat in pluimveestallen wordt in de VS

---

voornamelijk gepropageerd om de ammonia emissie in pluimveestallen te verlagen (Eugene et al. 2015). Er worden in de VS ook producten van ijzersulfaat en natuurlijk *kalinite* (aluin: een kaliumaluminiumsulfaat) verkocht om ammoniaemissie te voorkomen in pluimveestallen die een effect op fosfaat zouden kunnen hebben. De aluin is toegelaten in de Amerikaanse biologisch landbouw. De effectiviteit van andere middelen, zoals ijzerzouten, is onderzocht bij andere mestsoorten (Kumaragamage and Akinremi 2018), maar de effectiviteit op lange termijn is onbekend (Habibiandehkordi et al. 2015). In Nederland is wel veel ervaring met het gebruik van ijzerslib, een reststof van de drinkwaterproductie, voor het binden van fosfaat uit uitspoelend drainwater (Chardon et al. 2022) of door toevoeging van ijzerslib aan fosfaatverzadigde grond (Koopmans et al. 2020). Dit laatste zou ook op grond voor uitloopkippen effectief kunnen zijn.

7- Om maaiveldafstroming van fosfaat te verhinderen, is ook gesuggereerd om grond te vervangen of het omhooghalen van een fosfaatarme bodemlaag. Het mengen van een P-rijke grond met een P-arme grond leidde – met nagebootste regenbui onder laboratoriumomstandigheden – tot een verlaagde maaiveldafstroming (Sharpley 2003).

8- Bekalken (zie hoofdstuk 7)

In hoofdstuk 7 is uitgebreid ingegaan op de invloed van het verhogen van de pH door de landbouwgronden te bekalken. In potentie kan dit ook een effectieve maatregel zijn op percelen (plekken) met vrije uitloop van pluimvee. Omdat pluimveemest een andere invloed heeft op de bodemchemische eigenschappen van de bodem dan andere typen dierlijke mest, verdient het wel de aanbeveling om de proeven die gedaan zijn in hoofdstuk 7 te herhalen met bodems van percelen die al een aantal jaren in gebruik zijn voor vrije uitloop van pluimvee.

#### *Conclusies risico's P-afspoeling percelen vrije-uitlooppluimvee*

Geconcludeerd kan worden er op dit soort percelen risico's zijn voor P-afspoeling, maar dat er geen kennis en informatie is om deze afspoeling te kwantificeren. Gezien de lokaal zeer hoge fosfaatlast vanuit kippenmest kan op termijn wel verzadiging van de bodem en uitspoeling verwacht worden. Of dit ook in kwantitatieve zin een belangrijke bijdrage levert aan de hoge concentraties die in de beken van de Gelderse Vallei worden gemeten, kan nu niet afgeleid worden. In nationale en regionale onderzoeken (Schipper et al. 2020; van Boekel et al. 2020) om de N en P af- en uitspoeling van landbouwgronden naar water te kwantificeren, zijn geen schattingen opgenomen voor percelen met vrije-uitlooppluimvee. Daarvoor zouden aparte rekeneenheden in het modelinstrumentarium moeten worden ontwikkeld. Er zijn wel simpele en kosteneffectieve maatregelen voorhanden om de oppervlakkige afspoeling te verhinderen (bijvoorbeeld bufferstroken) of om fosfaat in de bodem te immobiliseren (ijzerslib of kalk).

## 8.2 P vastleggen met ijzerrijk kwelwater

De rol van het oplossen en neerslaan van ijzer op het lot van fosfaat is de laatste jaren onderzocht (Baken 2015; van der Grift 2017), maar nog niet met het oog op een maatregel om P-uitspoeling te verminderen. Anaerobe omstandigheden in het bovenste grondwater van percelen kunnen zorgen voor het oplossen van ijzer en fosfaat. Als het ijzer en fosfaat daarna precipiteren op een meer aerobe plek, zorgt het proces netto voor een lage retardatie van fosfaat. Dit effect is in een perceel in Poppel (België) gemeten (Lookman et al. 1996) en bij Hupsel (Gelderland) (van der Grift et al. 2014). Op schaal van een bodem, grondwater, sloot en beek zorgt het steeds weer oplossen en neerslaan van ijzer en fosfaat plaatselijk voor veel dynamiek in fosfaatconcentraties (Baken et al. 2015).

In principe kunnen in gebieden met ijzerrijk grondwater aanpassingen aan de hydrologie leiden tot meer vastlegging van fosfaat. Maatregelen die ook in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater Hoge Zandgronden<sup>9</sup> overwogen worden, zouden een rol kunnen spelen bij het verhogen van de fosfaatvastlegging: 1) meer infiltratie van water in de bodem waardoor minder oppervlakkige afstroming, 2) peilgestuurde drainage (met een iets diepere ligging van de drainbuizen) om water diepere routes laten kiezen en 3) het extensiveren van detailontwateringsmiddelen, waardoor de snellere, ondiepe stromingsroutes naar oppervlaktewateren geremd worden.

---

<sup>9</sup> <https://www.deltaprogramma.nl/gebieden/hoge-zandgronden>

Een slootbodem in de Gelderse Vallei (omgeving Renswoude) waarin ijzerrijk grondwater terecht is gekomen, is bemonsterd in juli 2021. Twee mengmonsters zijn gemaakt na 30 steken met een guts op basis van steken in een slootbodem van 0-2 cm en een van 2-10 cm. De lengte van de bemonsterde slootbodem is 65 m. De twee mengmonsters zijn geanalyseerd na luchtdrogen en kolloïdmalen op 50 µm, op het gehalte aan in een ammoniumoxalaat-oxaalzuur oplosbaar fosfor ( $P_{ox}$ ), aluminium ( $Al_{ox}$ ) en ijzer ( $Fe_{ox}$ ) (alle in mmol/kg) volgens NEN 5776. De fosfaatbezetting van het monster (DPS; *degree of P saturation*) is berekend volgens Van der Zee et al. (1990):  $FB = 2 P_{ox} (Al_{ox} + Fe_{ox})^{-1}$ .

De oorzaak van het ijzerrijke water is het lokaal lozen van bemalingswater voor de bouw van huizen, op de plaats van een voormalige stal.

De met ijzerrijk slib aangerijkte laag is duidelijk herkenbaar aan het hoge gehalte  $Fe_{ox}$  ten opzichte van de laag daaronder (Tabel 29). Het heeft een  $P_{ox}$  dat hoger is dan het maximum in het landelijke bodemonderzoek als je selecteert op kalkloze zandgronden (LSK, Finke, 1991). Hier blijkt dat vers toegevoegd Fe, in dit geval uit bemalingswater (aannname dat grondwater fosfaatarm was), fosfaat kan binden in de slootbodem.

**Tabel 30** P-PAE (mg P/kg),  $P_{ox}$ ,  $Fe_{ox}$ ,  $Al_{ox}$  gehalten (mmol kg<sup>-1</sup>), FBV \* en DPS\*\* van waterbodem.

locatie	cm -mv	P-PAE	P	Fe	Al	FBV	DPS
Renswoude	0-2	0,5	64	316	120	281	0,29
	2-10	0,2	6	47	76	62	0,09
NL	0-30		17 ± 7	41 ± 31	40 ± 18	41 ± 15	0,46 ± 0,19
NL max	0-30		56	472	123		

\*Fosfaatbindingsvermogen  $FBV = 0,5 * (Al + Fe)$  in mmol/kg.

\*\* Degree of P saturation  $DPS = P_{ox} / FBV$ .

### 8.3 Verminderen afspoeling bij graslandvernieuwing

Graslandvernieuwing leidt tijdelijk tot een kale bodem waardoor maaiveldafstroming kan optreden bij sterke regen. Graslandvernieuwing wordt door de effecten op stikstofuitspoeling (Hoving and Velthof 2006) gereguleerd in de Besluit gebruik Meststoffenwet (artikel 4b) en mag alleen plaatsvinden in specifieke perioden in de zomer, afhankelijk van opvolgende teelt en bodemtype (RvO 2021). In 2005 werd volgens CBS 870 km<sup>2</sup> ingezaaid op een totaal van 9800 km<sup>2</sup> grasland in Nederland (CBS 2013).

Geobserveerd is maaiveldafstroming van een perceel na bodemegalitatie vlak voor het inzaaien van gras. Tijdens de veldwaarnemingen zijn plassen op het perceel waargenomen en oppervlakkige afstroming, waarbij het (slib)deeltjesrijke water terecht kwam in de nabijgelegen beek.



**Figuur 24** Maaiveldafvoer bij bodemegalitatie van voormalig maisperceel en inzaai van gras (foto: René Rietra). a) perceel met plassen, b) op 200 m van het behandelde perceel stroomt via een pijp het deeltjesrijke water in een beek (foto: René Rietra, 7 okt. 2020).

## 8.4 Discussie overige P-maatregelen

Vrije uitloop van pluimvee resulteert vrijwel overal in kale plekken rondom stallen, en vaak ook langs omheiningen. Doordat het pluimvee hier ook mest achterlaat, vormen deze plekken een risico voor afspoeling na oppervlaktewater. Er zijn veel soorten maatregelen en combinaties daarvan mogelijk. Doordat het om kleine oppervlakten gaat, zijn de maatregelen relatief eenvoudig door te voeren.

Ook graslandvernieuwing resulteert in kale grond die bij hevige zomerse regenbuien risico geven op afspoeling na oppervlaktewater. Bij maatregelen valt te denken aan bufferzones van blijvend gras, waarbij de breedte van de bufferzone een functie is van de grootte van het perceel.

Het benutten van ijzerrijke kwel om fosfaat te binden, kan samengaan met beleidsmaatregelen voor het vasthouden van water op de hoge zandgronden, bijvoorbeeld door minder water via detail ontwateringsmiddelen af te voeren, waardoor ondiepe snelle transportroutes van uitspoelend grondwater naar oppervlaktewater veranderen naar langzamere en dieper doorstroomde routes. Of zulke maatregelen dit effect (meer vastlegging fosfaat in de ondergrond) geven, hangt wel sterk af van de lokale (geo)hydrologische omstandigheden.



---

## 9 Conclusies en aanbevelingen

### 9.1 Maaiveldafstroming

#### **Maaiveldafstroming**

De metingen bij de onderzochte aardappelpercelen op zand en löss laten zien dat maaiveldafstroming van P via water ( $0,003\text{--}0,12\text{ kg P ha}^{-1}$ ) en het meegevoerde sediment ( $0,0\text{--}7,62\text{ kg P ha}^{-1}$ ) in de Nederlands zomers plaatsvindt na intense neerslag bij de onderzochte hellende percelen. Maaiveldafstroming bleek ook relevant in een hellend stroomgebied (Catsop, Zuid-Limburg), waar het water lang over land afstroomt, en het sedimentgehalte in afstromend water hoog is. In dit hellende gebied met een maaiveldafvoer via water ( $0,11\text{ kg P ha}^{-1}\text{j}^{-1}$ ) en sediment ( $1,38\text{ kg P ha}^{-1}\text{j}^{-1}$ ), is de P-afspoeling via water lager en is de totale afspoeling hoger dan de gemiddelde P uit- en afspoeling ( $\approx 0,35\text{ kg P ha}^{-1}\text{j}^{-1}$ ) zoals die voor Zuid-Limburg in de bronnenanalyse voor de Maasregio is berekend (Schipper et al. 2021b).<sup>10</sup> Afspoeling van gronddeeltjes is hoog in termen van totale fosfaatvrucht, maar zolang dit fosfaat gebonden is aan sediment (het slib in de watergangen), draagt het niet bij aan de eutrofiëring, behalve als dit aan slib gebonden fosfaat in de zomer, bijvoorbeeld door anaerobe omstandigheden, vrij in oplossing komt. Dit proces van nalevering speelt met name in oppervlaktewaterlichamen waar in zomers stagnante situaties zijn met weinig of geen waterafvoer. Het sediment (waterbodemslib) kan door baggeren weer verwijderd worden. Kwantificering van de nalevering van fosfaat uit waterbodemslib alsmede de hoeveelheden P die met baggeren worden verwijderd, is voor de meeste oppervlaktewateren in de zandgebieden niet goed mogelijk. De bijdrage van oppervlakkige afspoeling van gronddeeltjes aan de fosfaatconcentraties in oppervlaktewater is daarom nog onbekend.

#### **Effecten van maatregelen om oppervlakkige afstroming van P te verminderen**

Drempels bij aardappelen en ruitzaaien bij mais, verminderden in alle experimenten de afspoeling van water, fosfaat en sediment of hadden geen effect. Het effect van de maatregel kon niet goed gekwantificeerd worden als percentage van de P-afspoeling, of in  $\text{kg P ha}^{-1}$ , omdat met het beperkte aantal herhalingen alleen een indicatie van het effect verkregen kan worden en voor statistische onderbouwing veel meer herhalingen nodig zijn. Het grootste effect van de drempels was op een locatie op lössgrond (Huls): een vermindering van  $5,2\text{ kg P ha}^{-1}$ , voornamelijk door het blokkeren van de gronddeeltjes in het afstromend water. De maatregelen passen in het beleid om infiltratie van regenwater op de hoge zandgronden te bevorderen.<sup>11</sup> Indien de maatregel alleen dient om de P-afspoeling te verminderen, zoals op zand, dan is het effect van de maatregel klein ( $<0,02\text{ kg P ha}^{-1}$ ) ten opzichte van de gemiddelde P-uitspoeling in Noord-Limburg en Oost-Brabant van  $0,5\text{ kg P ha}^{-1}\text{j}^{-1}$  (Schipper et al. 2021b).<sup>7</sup>

### 9.2 Uitspoeling

#### **Hotspots**

Metingen van Waterschap Limburg laten soms zeer hoge fosfaatconcentraties zien in het gebied rondom de Kabroekse Beek: 1) AEF-bovenloopjes Noord-Limburg, 2) slootwater in omgeving Moosdijk/Timmermansweg. In het huidige onderzoek worden gemiddeld lage fosfaatconcentraties aangetroffen bij een steekproef van twintig boringen bij percelen aan de Moosdijk ( $0,05\text{ mg P-PO}_4\text{ L}^{-1}$ ) en tien boringen aan de Eickhorsterweg ( $0,02\text{ mg P-PO}_4\text{ L}^{-1}$ ), terwijl deze grondwaterbemonsteringen zijn uitgevoerd bij ondiepe grondwaterstanden. Daarnaast is een relatief lage bijdrage ( $< 0,24\text{ kg P-PO}_4\text{ ha}^{-1}$ ) gevonden van het afspoelende water bij grote plassen op het land in de winter. Al die metingen geven aan dat de onderzochte bodems niet de bron zijn van de hoge fosfaatconcentraties in oppervlaktewater en dat er (een) andere lokale bron of bronnen verantwoordelijk zijn voor de hoge P-concentraties in het slootwater nabij de Grenssloot en de Kabroekse beek. Het onderzoek laat zien dat generieke maatregelen die betrekking hebben op het beperken van de af-

---

<sup>10</sup> Figuur 5.15 in Schipper et al. (2021b).

<sup>11</sup> <https://www.deltaprogramma.nl/gebieden/hoge-zandgronden>

---

en uitspoeling in het stroomgebied hier geen zin hebben, omdat de gemiddelde fosfaatconcentraties in grondwater laag zijn. Het is dus zaak hier de bronnen op te sporen en daar passende maatregelen te treffen.

De precieze herkomst van de soms hoge fosfaatconcentraties in oppervlaktewater is niet goed te duiden zonder specifiek onderzoek op locatie (bijvoorbeeld plaatselijke afspoeling, mest in de sloot, etc.). Diverse studies hebben laten zien dat maar een klein percentage van de agrarisch percelen bovenmatige bijdraagt aan de diffuse verontreiniging van oppervlaktewater (*critical source areas*: CSA) (Sharpley et al. 2011) (*hotspots* (Kovacs et al. 2012)), waarbij vaak wordt gedacht aan de percelen met erosie (Remund et al. 2021). Voor het traceren van agrarische percelen met veel uitspoeling naar oppervlaktewater kan gebruik worden gemaakt van het PLEASE-model, dat een combinatie maakt tussen hoge fosfaatgehalten in de bodem en hoge grondwaterstanden (Schoumans et al. 2013; van der Salm et al. 2011), maar dan moet gebruikgemaakt worden van lokale bodemmetingen. Het vinden van bronnen vergt een intensieve aanpak, bijvoorbeeld het plaatselijk bemonsteren van poriewater, slootwanden, afvoer uit drainagebuizen, waterbodem of oppervlaktewater (Schipper et al. 2022a; Shore et al. 2016; Vero et al. 2019), waarbij de lokaal gevonden hoge P-concentraties een startpunt kunnen zijn.

### **Invloed grondwaterstand**

Bij twee percelen is het effect van de grondwaterstand op fosfaat gedurende drie jaar gemeten met 56 buizen per perceel. De grondwaterstand had een heel grote invloed op de fosfaatconcentraties in het bovenste grondwater. Het varieerde van gemiddeld 0,03 tot 0,58 mg P-PO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup>, bij een grondwaterstand van 66 en 12 cm -mv respectievelijk, bij het perceel met het meeste fosfaat. De percelen liggen langs een sloot die bij ondiepe grondwaterstanden water afvoert van het perceel. Er zijn verschillende mogelijkheden om het horizontale transport vanuit de bovenste bodemlagen naar de sloot te verkleinen en de infiltratie in het perceel te verhogen, variërend van peilgestuurde drainage, ondiepe sloten en greppels dempen of verhogen van infiltratiecapaciteit door bodemverbetering. De kosten van dergelijke maatregelen zijn relatief hoog, maar passen bij beleid om meer water vast te houden. Op dit perceel zou bekalken als maatregel om de fosfaatconcentratie in het bodemvocht in de bodemgrond te verlagen ook effectief kunnen zijn.

### **Bekalken**

Bij de twee onderzochte kalkloze zandgronden leidde bekalken, in een proefopstelling in bakken, tot 3 à 4 keer lagere fosfaatconcentraties in het bodemvocht en bodemextract. Het effect van kalk wordt bepaald door de pH. Het effect kan nagebootst worden via pH-afhankelijke schudexperimenten. De schudexperimenten zijn snel in een laboratorium uit te voeren. Omdat het soms meerdere maanden duurt voordat kalk helemaal oplost, duren experimenten met kalk lang. Er zijn daarom pH-afhankelijke schudexperimenten uitgevoerd bij meerdere grondmonsters en die laten steeds hetzelfde patroon zien: een lagere P-concentratie bij een verhoging van de pH en een hogere P-concentratie bij verlaging van de pH. Deze bevindingen leidden tot de conclusies dat bekalken een eenvoudige optie is om de fosfaatuitspoeling uit de bouwvoor te verlagen. Bekalken is een maatregel met veel potentie, omdat uitspoeling van fosfaat naar oppervlaktewater voor een belangrijk deel bepaald wordt door bodems met hoge P-gehalten en ondiepe grondwaterstanden, en bekalken een eenvoudige en goedkope maatregel is die past binnen de landbouwpraktijk. Onderzoek is nodig om te bepalen hoe generiek het pH-effect is en of het effect blijvend is.

## **9.3 Aanbevelingen**

Het gedane onderzoek heeft door de veld- en laboratoriumexperimenten nieuwe inzichten opgeleverd in maatregelen die mogelijk effectief voor het verminderen van de af- en uitspoeling van fosfaat kunnen zijn. Aanbevolen wordt om nadere experimenten uit te voeren voor de effecten van het bekalken van landbouwbodems. Ook wordt aanbevolen om met de opgezette monitoring de metingen in de Roetenbeek voort te zetten, omdat de in het onderhavige onderzoek uitgevoerde metingen slechts een korte periode bestrijken.

De experimenten met bekalken wijzen erop dat fosfor in verhoogde mate kan uitspoelen als de zuurgraad van de bodem daalt. Omdat anno 2024 het aanhouden van bufferstroken langs watergangen verplicht is geworden en hier geen meststoffen uitgereden mogen worden, wordt aanbevolen om de effecten hiervan te

---

onderzoeken P-uitspoeling want mogelijk daalt de zuurgraad, en neemt de P-concentratie in bodemvocht toe. Het ligt voor de hand om op deze stroken te sturen op een goede grasbedekking met diepe beworteling.

In diverse oppervlaktewaterlichamen in het zuidelijk en oostelijk zandgebied worden soms zeer hoge P-concentraties gemeten. Aanbevolen wordt om in zulke situaties in het veld op zoek te gaan naar mogelijke oorzaken, te beginnen door metingen in de toestromende haarvaten uit te voeren en op die wijze hotspots op te zoeken. Voor zover bekend, is er geen handleiding of methodiek ontwikkeld om voor zulke situaties doelgericht en effectief hotspots te vinden.

In het onderhavige onderzoek zijn diverse metingen uitgevoerd om de P-concentraties van oppervlakkig afstromend water en daarbij meegevoerde gronddeeltjes te bepalen. De meetopstelling op de aardappelpercelen was erop gericht om de effecten van drempels te kunnen bepalen. Om de daadwerkelijke belasting van water door oppervlakkige afstroming van percelen met veldexperimenten te bepalen, zijn andere meetopstellingen nodig, waarbij water (en de meegevoerde gronddeeltjes) met bijvoorbeeld een ingegraven meetgoot afgevangen wordt bij de slootrand, zoals dit bijvoorbeeld momenteel op kleigronden wordt uitgevoerd in Flevoland.<sup>12</sup> Weliswaar is de samenstelling van dat afstromende water van landbouwpercelen ook in andere projecten onderzocht, maar een overzicht van die onderzoeken ontbreekt. Het verdient aanbeveling om resultaten van zulke onderzoeken (en met name die nu of in de toekomst worden uitgevoerd) te bundelen in een centrale database.

---

<sup>12</sup> [Praktijkproeven perceelafspoeling Flevoland gaan door in 2023 en 2024 | Actieplan Bodem & Water \(bodemenwaterflevoland.nl\)](#)

---

# Literatuur

- Aarnink AJ, Hol J, Beurskens AG (2006) Ammonia emission and nutrient load in outdoor runs of laying hens Njas-Wageningen Journal of Life Sciences 54:223-234
- Anderson KR et al. (2020) Long-term effects of grazing management and buffer strips on phosphorus runoff from pastures fertilized with poultry litter. Wiley Online Library,
- Anderson KR, Moore PA, Miller DM, DeLaune PB, Edwards DR, Kleinman PJA, Cade-Menun BJ (2018) Phosphorus leaching from soil cores from a twenty-year study evaluating alum treatment of poultry litter Journal of Environmental Quality 47:530-537 doi:10.2134/jeq2017.11.0447
- Andersson H, Bergström L, Djodjic F, Ulén B, Kirchmann H (2016) Lime placement on subsoil as a strategy to reduce phosphorus leaching from agricultural soils Soil Use and Management 32:381-389
- Arai Y, Livi K, Sparks D (2005) Phosphate reactivity in long-term poultry litter-amended southern Delaware sandy soils Soil Science Society of America Journal 69:616-629
- Askar MH, Youssef MA, Vadas PA, Hesterberg DL, Amoozegar A, Chescheir GM, Skaggs RW (2021) DRAINMOD-P: A Model for Simulating Phosphorus Dynamics and Transport in Drained Agricultural Lands: I. Model Development Transactions of the ASABE 64:1835-1848 doi:<https://doi.org/10.13031/trans.14509>
- Azeez MO, Christensen JT, Ravnskov S, Heckrath GJ, Labouriau R, Christensen BT, Rubæk GH (2020) Phosphorus in an arable coarse sandy soil profile after 74 years with different lime and P fertilizer applications Geoderma 376:114555
- Baken C (2015) The effect of iron-rich particles on the fate and bioavailability of phosphorus in streams. Leuven,
- Baken S, Moens C, van der Grift B, Smolders E (2016) Phosphate binding by natural iron-rich colloids in streams Water research 98:326-333
- Baken S, Verbeeck M, Verheyen D, Diels J, Smolders E (2015) Phosphorus losses from agricultural land to natural waters are reduced by immobilization in iron-rich sediments of drainage ditches Water research 71:160-170
- Barrow N (1984) Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils Journal of Soil Science 35:283-297
- Barrow N (2017) The effects of pH on phosphate uptake from the soil Plant and soil 410:401-410
- Bergström L et al. (2015) Turnover and losses of phosphorus in Swedish agricultural soils: Long-term changes, leaching trends, and mitigation measures Journal of environmental quality 44:512-523
- Bloom P (1981) Phosphorus adsorption by an aluminum-peat complex Soil Science Society of America Journal 45:267-272
- Bos J, Williams M, Smith D, Armstrong S, Harmel D (2021) Long-term effect of poultry litter application on phosphorus balances and runoff losses. Wiley Online Library,
- Buijs S, Ouwerkerk K, Rozemeijer JC (2020) Meetnet Nutriënten Landbouw Specifiek Oppervlaktewater. Toestand en trends tot en met 2018. Deltares,
- Carstensen MV, Børgesen CD, Ovesen NB, Poulsen JR, Hvid SK, Kronvang B (2019) Controlled drainage as a targeted mitigation measure for nitrogen and phosphorus Journal of environmental quality 48:677-685
- CBS (2013) Graslandvernieuwing op bedrijven met rundvee, 1990 - 2005. <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/70735NED?q=Graslandvernieuwing>.
- Chardon W, Oenema O, Schoumans O, Boers P, Fraters B, Geelen Y (1996) Verkenning van de mogelijkheden voor beheer en herstel van fosfaatlekkende landbouwgronden: programmeringsstudie Rapporten programma geïntegreerd bodemonderzoek, deel 8
- Chardon WJ, Groenenberg JE, Vink JP, Voegelin A, Koopmans GF (2022) Use of iron-coated sand for removing soluble phosphorus from drainage water Science of the Total Environment 815:152738
- Chrétien F, Gagnon P, Thériault G, Guillou M (2016) Performance analysis of a wet-retention pond in a small agricultural catchment Journal of Environmental Engineering 142:04016005
- Clary J, Wildfire L, Lord B (2012) Agricultural best management practices (BMP) database, Phase 1 Literature Review Wright Water Engineers and Geosyntec Consultants, Denver

- 
- CLO (2020) CBS, PBL, RIVM, WUR. Fysisch-chemische waterkwaliteit KRW, 2019 (indicator 0252, versie 16, 30 juli 2020). [www.clo.nl](http://www.clo.nl). Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University & Research, Wageningen.
- Commelin MC, Baartman JE, Zomer P, Riksen M, Geissen V (2022) Pesticides are Substantially Transported in Particulate Phase, Driven by Land use, Rainfall Event and Pesticide Characteristics—A Runoff and Erosion Study in a Small Agricultural Catchment. *Frontiers in Environmental Science* 10:830589
- Cui Y, Weng L (2013) Arsenate and phosphate adsorption in relation to oxides composition in soils: LCD modeling *Environmental Science & Technology* 47:7269-7276
- De Roo A, Wesseling C, Ritsema C (1996) LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output *Hydrological processes* 10:1107-1117
- De Vries W, Leeters E (2001) Chemical composition of the humus layer, mineral soil and soil solution of 150 forest stands in the Netherlands in 1990. Alterra,
- Dekker SEM, Aarnink AJA, De Boer IJM, Koerkamp PWGG (2012) Total loss and distribution of nitrogen and phosphorus in the outdoor run of organic laying hens *British Poultry Science* 53:731-740  
doi:10.1080/00071668.2012.749342
- Departement Landbouw & Visserij (2021) Erosiebestrijdingsmaatregelen onder de randvoorwaarden. <https://lv.vlaanderen.be/nl/nieuws/erosiebestrijdingsmaatregelen-onder-de-randvoorwaarden>.
- Dodd RJ, Sharpley AN, Berry LG (2018) Organic phosphorus can make an important contribution to phosphorus loss from riparian buffers *Agricultural & Environmental Letters* 3:180002
- Eckert K, Brown CJ, McGrath G, Wood S (2018) Nutrient removal in a wet detention pond with baffle dike—a case study of the cedar river project *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)* 17
- Elbe U, Ross A, Steffens G (2005) b: Freilandhaltung von Legehennen: Empfehlungen zum Nährstoff-Management im Grünauslauf Gut-Frohberg, Sachsen 4
- Eslamian F, Qi Z, Tate MJ, Zhang T, Prasher SO (2018) Phosphorus loss mitigation in leachate and surface runoff from clay loam soil using four lime-based materials *Water, Air, & Soil Pollution* 229:1-13
- Euben R, Eeckhout I, De Blauwer Vd, van der Ven G, Peumans M, Depoorter J (2018) Erosie in de akkerbouw: knelpunten en oplossingen. Brochure nr E2018\_1, LCVVZW. Geel
- Eugene B, Moore Jr PA, Li H, Miles D, Trabue S, Burns R, Buser M (2015) Effect of alum additions to poultry litter on in-house ammonia and greenhouse gas concentrations and emissions *Journal of environmental quality* 44:1530-1540
- Eurofins\_Agro (2021) pH in veel gevallen aan de lage kant. <https://www.eurofins-agro.com/nl-nl/ph-laag>.
- Fennessy MS, Brueske CC, Mitsch WJ (1994) Sediment deposition patterns in restored freshwater wetlands using sediment traps *Ecological engineering* 3:409-428
- Finke P, De Gruijter J, Visschers R (2001) Status 2001 landelijke steekproef kaartenheden en toepassingen. Alterra,
- Fischer S, Koch H-J, Bürcky K (2015) Effect of liming central European loess soils on soil extractable phosphorus and potassium as determined by electro-ultrafiltration *Archives of Agronomy and Soil Science* 61:725-736
- Gaalen Fv, L. Osté, E. van Boekel (2020) Nationale analyse waterkwaliteit. Onderdeel van de Delta-aanpak Waterkwaliteit vol No. 4002. Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag
- Geelen P, Crombach C, Bus C (2004) Beperking van watererosie in aardappelen op lössgrond. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving BV,
- Geurts JJ, van de Wouw PA, Smolders AJ, Roelofs JG, Lamers LP (2011) Ecological restoration on former agricultural soils: Feasibility of in situ phosphate fixation as an alternative to top soil removal *Ecological Engineering* 37:1620-1629
- Goulding K (2016) Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom *Soil use and management* 32:390-399
- Groenendijk P, van Boekel E, Renaud L, Greijdanus A, Michels R, de Koeijer T (2016) Landbouw en de KRW-opgave voor nutriënten in regionale wateren: het aandeel van landbouw in de KRW-opgave, de kosten van enkele maatregelen en de effecten ervan op de uit- en afspoeling uit landbouwgronden. Wageningen Environmental Research,
- Groenendijk P, Van Boekel E, Rozemeijer JC, Jansen S, Griffioen J (2021) Aanvullende maatregelen op het pakket van het zevende Actieprogramma Nitraatrichtlijn met een gebiedsgerichte oriëntatie.
- Groenendijk P, van Boekel EMPM (2017) Landbouw en de KRW-opgave voor nutriënten in de regionale wateren *Water Matters: Kenniskatern voor Waterprofessionals - Dutch edition* (2017) december

- Groenendijk P, Velthof GL, Schröder JJ, Koeijer TJD, Luesink HH (2017) Milieueffectrapportage van maatregelen zesde Actieprogramma Nitraatrichtlijn: op planniveau. Wageningen Environmental Research rapport, 1566-7197; 2842. Wageningen Environmental Research, Wageningen
- Gustafsson JP, Mwamila LB, Kergoat K (2012) The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils *Geoderma* 189:304-311
- Habibiandehkordi R, Quinton JN, Surridge BW (2015) Long-term effects of drinking-water treatment residuals on dissolved phosphorus export from vegetated buffer strips *Environmental Science and Pollution Research* 22:6068-6076
- Haynes R, Swift R (1989) The effects of pH and drying on adsorption of phosphate by aluminium-organic matter associations *Journal of Soil Science* 40:773-781
- Hiemstra T, Mia S, Duhaut P-B, Molleman B (2013) Natural and pyrogenic humic acids at goethite and natural oxide surfaces interacting with phosphate *Environmental science & technology* 47:9182-9189
- Hooijboer A, Weijs F (2013) Waterkwaliteit op Koeien & Kansenbedrijven: Resultaten van tien jaar bemonstering. RIVM,
- Houba V, Chardon W, Roelse K (1993) Influence of grinding of soil on apparent chemical composition *Communications in soil science and plant analysis* 24:1591-1602
- Houba V, Temminghoff E, Gaikhorst G, Van Vark W (2000) Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent *Communications in soil science and plant analysis* 31:1299-1396
- Hoving I, Velthof G (2006) Landbouw- en milieukundige effecten van graslandvernieuwing op zand- en kleigrond. Animal Sciences Group,
- Huang L, Moore Jr PA, Kleinman PJ, Elkin KR, Savin MC, Pote DH, Edwards DR (2016) Reducing phosphorus runoff and leaching from poultry litter with alum: Twenty-year small plot and paired-watershed studies *Journal of environmental quality* 45:1413-1420
- ILVO (2015) Wat weten we over fosfor en landbouw. Deel 3 Mogelijke maatregelen om fosforconcentraties in water te verlagen vol mededeling 197. ILVO,
- ISO 11263 (1994) Soil quality — Determination of phosphorus — Spectrometric determination of phosphorus soluble in sodium hydrogen carbonate solution. International Organization for Standardization, Geneva
- ISO 21268-4 (2015) Soil quality — Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil-like materials — Part 4: Influence of pH on leaching with initial acid/base addition. International Organization for Standardization, Geneva
- Jansen P, Massop H, Groenendijk P, Renaud L, Hendriks R (2013) Oppervlakkige afstroming en diepte van modelprofielen: invloed op N-en P-vrachten in STONE2. 3. Alterra, Wageningen-UR,
- Jansen S, Stuurman R, Chardon W, Ball S, Rozemeijer J, Gerritse J (2019) Passive dosing of organic substrates for nitrate-removing bioreactors applied in field margins *Journal of environmental quality* 48:394-402
- Johnston A, Goulding K, Poulton P (1986) Soil acidification during more than 100 years under permanent grassland and woodland at Rothamsted *Soil use and management* 2:3-10
- Jordan-Meille L, Holland J, McGrath S, Glendining M, Thomas C, Haefele S (2021) The grain mineral composition of barley, oat and wheat on soils with pH and soil phosphorus gradients *European Journal of Agronomy* 126:126281
- Knoben R, Verhagen F, Schoffelen N, Rost J (2021) Ex ante Analyse Waterkwaliteit. 2021 Definitief. BH7109WMP2109281159. RoyalHaskoningDHV, Nijmegen
- Koopmans G, Hiemstra T, Vaseur C, Chardon W, Voegelin A, Groenenberg J (2020) Use of iron oxide nanoparticles for immobilizing phosphorus in-situ: Increase in soil reactive surface area and effect on soluble phosphorus *Science of the Total Environment* 711:135220
- Kovacs A, Honti M, Zessner M, Eder A, Clement A, Blöschl G (2012) Identification of phosphorus emission hotspots in agricultural catchments *Science of the Total Environment* 433:74-88
- Kratz S, Rogasik J, Schnug E (2004) Changes in soil nitrogen and phosphorus under different broiler production systems *Journal of Environmental Quality* 33:1662-1674
- Kroonen-Backbier B, van Haperen A (2023) Effect maisteeltsystemen op waterafstroming 2022: Verdiepend onderzoek Propositie Heuvelland. Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Open Teelten; No. WPR-OT 1010). Wageningen Plant Research.
- Kumaragamage D, Akinremi OO (2018) Manure Phosphorus: Mobility in Soils and Management Strategies to Minimize Losses *Current Pollution Reports* 4:162-174 doi:10.1007/s40726-018-0084-x
- Kuo S (1996) Phosphorus. p 869-919. In: D.L. Sparks,(ed) *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods*. SSSA, Madison, WI.

- 
- Lacey M, Wilson C (2001) Relationship of common scab incidence of potatoes grown in Tasmanian ferrosol soils with pH, exchangeable cations and other chemical properties of those soils *Journal of Phytopathology* 149:679-683
- Lizarralde CA, McDowell RW, Condron LM, Brown J (2021) Amending soils of different pH to decrease phosphorus losses *Soil Research* doi:10.1071/SR21012
- Lookman R, Jansen K, Merckx R, Vlassak K (1996) Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters a transect study in northern Belgium *Geoderma* 69:265-274
- Markus D, Oliver H, Georg K, Markus P (2000) Gleichstandsamt bei Silomais – Ergebnisse aus zwei Versuchsjahren *Landtechnik* 55 doi:10.1515/lt.2000.1881
- Massop H, Noij I, Appels W, van den Toorn A (2012) Oppervlakkige afspoeling op landbouwgronden: metingen op zandgrond in Limburg. Alterra, Wageningen-UR,
- Massop HTL, Clement J, Schuiling C (2014) Plassen op het land: een landsdekkende kaart van potentiële risicolocaties voor oppervlakkige afspoeling. Alterra, Wageningen-UR,
- Maynard JJ, O'Geen AT, Dahlgren RA (2009) Spatial relationships of phosphorus sorption in a seasonally saturated constructed wetland soil *Soil Science Society of America Journal* 73:1741-1753
- McDowell R, Brookes P, Mahieu N, Poulton P, Johnston A, Sharpley A (2002) The effect of soil acidity on potentially mobile phosphorus in a grassland soil *The Journal of Agricultural Science* 139:27-36
- Meda B, Flechard C, Germain K, Robin P, Walter C, Hassouna M (2012) Greenhouse gas emissions from the grassy outdoor run of organic broilers *Biogeosciences* 9:1493-1508
- Mekonnen M, Keesstra SD, Stroosnijder L, Baartman JE, Maroulis J (2015) Soil conservation through sediment trapping: a review *Land Degradation & Development* 26:544-556
- Moore Jr P (1998) Best management practices for poultry manure utilization that enhance agricultural productivity and reduce pollution *Animal waste utilization: Effective use of manure as a soil resource*: 89-123
- Morente AB, Elorza PB, Díaz-Ambrona CGH, Da Costa GD, Griepentrog HW (2013) Even-sowing pattern strategies for a low-input organic system in forage maize *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15:171-179
- Mosso LR, Buda A, Collick A, Kennedy C, Folmar G, Shober A (2021) Examining sources and pathways of phosphorus transfer in a ditch-drained field. *Wiley Online Library*,
- Murphy PN, Sims J (2012) Effects of lime and phosphorus application on phosphorus runoff risk *Water, Air, & Soil Pollution* 223:5459-5471
- Murphy PN, Stevens R (2010) Lime and gypsum as source measures to decrease phosphorus loss from soils to water *Water, Air, & Soil Pollution* 212:101-111
- Myers R, Yan Q, Davis AP (2018) Treatment of agriculture stormwater runoff by cascading system of stormwater containment basins *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 144:04018033
- NEN 5776 (2014) Soil determination of iron, aluminium and phosphorus in an ammonium oxalate-oxalic acid extracts for estimation of the saturation with phosphate. Delft
- NEN 5793 (2010) Soil Determination of phosphate in soil extractable with ammoniumlactate-acetic acid buffer (P-AL). Delft
- Noij G-J et al. (2008) Kosteneffectiviteit van alternatieve maatregelen voor bufferstroken in Nederland. Alterra,
- Noij I, Heinen M, Heesmans H, Thissen J, Groenendijk P (2013) Effectiveness of buffer strips without added fertilizer to reduce phosphorus loads from flat fields to surface waters *Soil Use and Management* 29:162-174
- Noij I et al. (2009) Beleidskader fosfaat voor Noord- en Midden-Limburg: wetenschappelijke onderbouwing. Alterra,
- NPLG (2022) Ontwikkeldocument Nationaal Programma Landelijk Gebied. Publicatie-nr. 22407009. Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.
- Osmond D, Shober A, Sharpley A, Duncan E, Hoag D (2019) Increasing the effectiveness and adoption of agricultural phosphorus management strategies to minimize water quality impairment *Journal of environmental quality* 48:1204-1217
- Panagos P et al. (2015) The new assessment of soil loss by water erosion in Europe *Environmental Science & Policy* 54:438-447 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Prummel J (1974) Veranderingen in het Pw-getal in de loop van de tijd en onder invloed van de bemesting.

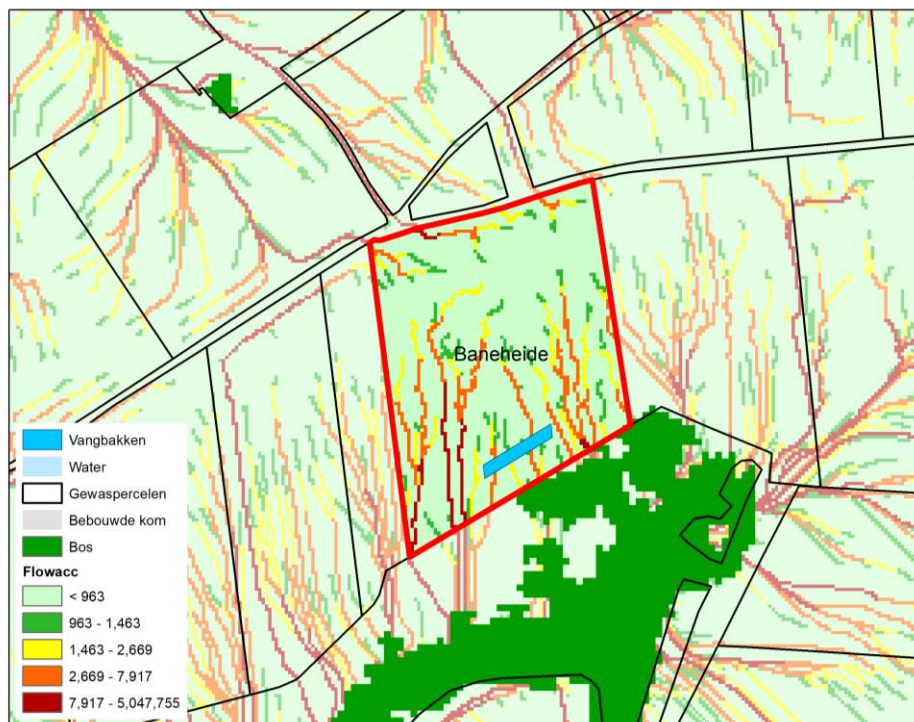
- 
- Reckleben Y, Brandenburg B (2019) Standraumverteilung bei Mais und deren Einfluss auf die Durchwurzelung und Nährstoffausnutzung Landtechnik 74
- Regelink I, Rietra R (2021) Fosfaatvormen in compost en andere organische meststoffen
- Regelink IC, Egene CE, Tack FM, Meers E (2021) Speciation of P in solid organic fertilisers from digestate and biowaste Agronomy 11:2233
- Remund D, Liebisch F, Liniger H, Heinemann A, Prasuhn V (2021) The origin of sediment and particulate phosphorus inputs into water bodies in the Swiss Midlands—A twenty-year field study of soil erosion Catena 203:105290
- Reubens B, Ruyschaert G, D'Hose T, D'Haene K (2012) Eindrapport BodemBreed Interreg: overzicht van resultaten, inzichten en aanbevelingen. Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek. Merelbeke, België.
- Rozemeijer JC, H.P. Broers, A. Visser, W. Borren, L. Gerner, IJzendoorn Bv, Kramer-Hoenderboom A (2012) Veldonderzoek naar de effecten van peilgestuurde drainage op grondwaterstanden, drainafvoeren en waterkwaliteit op het Oost-Nederlands Plateau. Deltares rapport 1201979-000-BGS-0001, Utrecht
- Rozemeijer JC, van der Velde Y (2008) Oppervlakkige afstroming ook van belang in het vlakke Nederland H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling 44 (2011) 20 18:19-20
- RvO (2021) Grasland vernieuwen [www.rvo.nl](http://www.rvo.nl) <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-onderwerpen/mest/grasland-scheuren/grasland-vernieuwen>.
- Schipper P, Groenendijk P, van Gerven L, Lukacs S, Rozemeijer J (2022a) Monitoring en modellering in twee pilotgebieden voor gebiedsgerichte aanpak: onderdeel KIWK-project Nutriënten: welke landbouwmaatregelen snijden hout? Stowa,
- Schipper P, Heinen M, Jansen P, Stuyt LCPM, Dik P (2015) Praktijkproef Regelbare Drainage proefbedrijf Rusthoeve 2010-2014: eindverslag praktijkproef naar de effecten van regelbare en verdiept aangelegde drains op klei in Zeeland. Alterra, Wageningen-UR,
- Schipper P, Smit R, Rietra R, van Gerven L, Renaud L, Jeurissen L, Ros GH (2021a) Regionale pilot Kennisimpuls RBO-Noord, synthese uit-en afspoeling stikstof en fosfor naar water. Wageningen Environmental Research,
- Schipper P et al. (2021b) Landbouw en de KRW-opgave voor nutriënten in stroomgebied Maas: opgave voor landbouw en de potentie van maatregelen voor het behalen van doelen. Wageningen Environmental Research,
- Schipper P, van Boekel E, van Gerven L, Renaud L (2020) Gebiedsanalyse nutriënten in oppervlaktewateren Gelderse Vallei en oostzijde Utrechtse Heuvelrug: studie naar herkomst, bronnen en routes van stikstof en fosfaat en maatregelen om de KRW-opgave daarvan voor doelbereik van de KRW in te kunnen vullen.
- Schipper P, van Loon A, Rozemeijer JC, Groenendijk P, Lukacs S (2022b) STOWA Deltafact effectiviteit nutriëntenmaatregelen om uit- en afspoeling vanuit landbouwgronden te verminderen. STOWA. <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterkwaliteit/kennisimpuls-waterkwaliteit/effectiviteit-nutriëntenmaatregelen-om-uit-en>.
- Schoumans O et al. (2014) Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: a review Science of the Total Environment 468:1255-1266
- Schoumans O, Van der Salm C, Groenendijk P (2013) PLEASE: a simple model to determine P losses by leaching Soil Use and Management 29:138-146
- Schoumans OF (2004) Inventarisatie van de fosfaatverzadiging van landbouwgronden in Nederland. Alterra,
- Schoumans OF, Kruijne R (1995) Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden Dl. 1, Meting van de fosfaatuitspoeling uit fosfaatverzadigde zandgrond met en zonder een hydrologische maatregel. Rapport / DLO-Staring Centrum, 0927-4499; 374.1. DLO-Staring Centrum, Wageningen
- Schwertmann U (1964) Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraktion mit ammoniumoxalat-Lösung Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde 105:194-202
- Sharpley AN (2003) Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils Journal of Environmental Quality 32:1375-1384
- Sharpley AN, Kleinman PJ, Flaten DN, Buda AR (2011) Critical source area management of agricultural phosphorus: experiences, challenges and opportunities Water Science and Technology 64:945-952
- Shore M et al. (2016) Characterisation of agricultural drainage ditch sediments along the phosphorus transfer continuum in two contrasting headwater catchments Journal of soils and sediments 16:1643-1654
- Shore M et al. (2017) Influence of stormflow and baseflow phosphorus pressures on stream ecology in agricultural catchments Science of the Total Environment 590:469-483



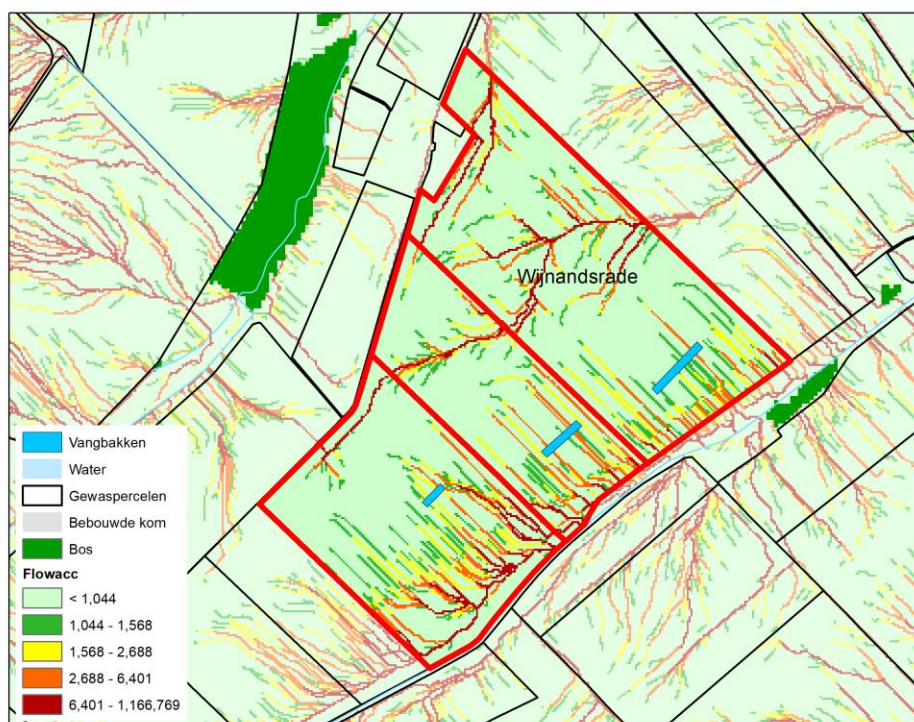
- 
- Siepel H, Bobbink R, van de Riet BP, van den Burg AB, Jongejans E (2019) Long-term effects of liming on soil physico-chemical properties and micro-arthropod communities in Scotch pine forest *Biology and Fertility of Soils* 55:675-683
- Simonsson M, Östlund A, Renfjäll L, Sigtryggsson C, Börjesson G, Kätterer T (2018) Pools and solubility of soil phosphorus as affected by liming in long-term agricultural field experiments *Geoderma* 315:208-219
- Sinaj S, Mächler F, Frossard E, Faisse C, Oberson A, Morel C (1998) Interference of colloidal particles in the determination of orthophosphate concentrations in soil water extracts *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29:1091-1105
- Sinha S, Rode M, Borchardt D (2016) Examining runoff generation processes in the Selke catchment in central Germany: Insights from data and semi-distributed numerical model *Journal of Hydrology: Regional Studies* 7:38-54
- Smolders AJ, Lucassen EC, Van Der Aalst M, Lamers LP, Roelofs JG (2008) Decreasing the abundance of *Juncus effusus* on former agricultural lands with noncalcareous sandy soils: possible effects of liming and soil removal *Restoration Ecology* 16:240-248
- Smolders E et al. (2017) Internal loading and redox cycling of sediment iron explain reactive phosphorus concentrations in lowland rivers *Environmental science & technology* 51:2584-2592
- Svanbäck A, Ulén B, Etana A (2014) Mitigation of phosphorus leaching losses via subsurface drains from a cracking marine clay soil *Agriculture, Ecosystems & Environment* 184:124-134
- Szara E, Sosulski T, Szymańska M (2019) Impact of long-term liming on sandy soil phosphorus sorption properties *Soil Science Annual* 70
- Thomas S, Ridd PV (2004) Review of methods to measure short time scale sediment accumulation *Marine Geology* 207:95-114
- Timmermans BG, van Eekeren N (2016) Phytoextraction of Soil Phosphorus by Potassium-Fertilized Grass-Clover Swards *Journal of environmental quality* 45:701-708
- Torenbeek R (2003) Diffuse belasting van oppervlaktewater met nutriënten in de veehouderij. STOWA-Rapport 2003-16. STOWA,
- Vadas P, Kleinman P, Sharples A, Turner B (2005) Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: A single extraction coefficient for water quality modeling *Journal of environmental quality* 34:572-580
- van Bakel P, de Louw P, Massop H, Worm B (2018) Maaiveldafvoer in beeld *Stromingen: vakblad voor hydrologen* 32:23-35
- van Beelen P, van der Wal A (2021) Fosfaat in grondwater onder landbouwgrond meestal onder streefwaarde *Water Matters december*:28-31
- van Boekel E, Schipper P, Renaud L (2020) Herkomst nutriënten Waterschap Drents Overijsselse Delta: Analyse van de herkomst van nutriënten in het oppervlaktewater, KRW-reductie opgave en maatregelen om de belasting te verminderen. Wageningen Environmental Research,
- van der Grift B (2017) Geochemical and hydrodynamic phosphorus retention mechanisms in lowland catchments. Utrecht University
- Van der Grift B, Osté L, Schot P, Kratz A, van Popta E, Wassen M, Griffioen J (2018) Forms of phosphorus in suspended particulate matter in agriculture-dominated lowland catchments: Iron as phosphorus carrier *Science of the Total Environment* 631:115-129
- van der Grift B, Rozemeijer J, Griffioen J, van der Velde Y (2014) Iron oxidation kinetics and phosphate immobilization along the flow-path from groundwater into surface water *Hydrology and Earth System Sciences* 18:4687-4702
- van der Salm C et al. (2011) Predicting phosphorus losses with the PLEASE model on a local scale in Denmark and the Netherlands *Journal of environmental quality* 40:1617-1626
- van Duijnhoven N, van der Linden A, Ouwekerk K (2019) KRW - Toestand- en trendanalyse voor nutriënten 11203728-006. Deltares,
- van Niekerk T, Leenstra F, Reuvekamp B, de Buissonjé F, Aarnink A, Ellen H, Koerkamp PG (2016) Inventarisatie van de effecten van uitloop pluimveehouderij op bodem-, water- en Luchtkwaliteit. Wageningen UR Livestock Research,
- van Schooten H, Philipsen B, Groten J (2019) Handboek snijmaïs. Wageningen Livestock Research,
- Verdonschot PF, Verdonschot RC (2021) Ecologische systeembenadering en ecologische systeemanalyse. vol 2021-29. Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research,
- Verloop K et al. (2018) Achtergronden bij informatie in de BOOT-lijst factsheets. Wageningen Plant Research,

- 
- Vero SE, Daly K, McDonald NT, Leach S, Sherriff SC, Mellander P-E (2019) Sources and mechanisms of low-flow river phosphorus elevations: a repeated synoptic survey approach *Water* 11:1497
- Vinten A et al. (2014) Assessment of the use of sediment fences for control of erosion and sediment phosphorus loss after potato harvesting on sloping land *Science of the total environment* 468:93-103
- von Tucher S, Hörndl D, Schmidhalter U (2018) Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet *Ambio* 47:41-49
- Walinga I, Kithome M, Novozamsky I, Houba V, Van der Lee J (1992) Spectrophotometric determination of organic carbon in soil *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23:1935-1944
- Wang S-S, Li Z-B, Zhang L-T, Ma B (2021a) Influences of conservation measures on runoff and sediment yield in different intra-event-based flood regimes in the Chabagou watershed *Scientific Reports* 11:1-11
- Wang Y et al. (2021b) Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security *Global Change Biology* 27:2807-2821
- Warrinnier R, Goossens T, Amery F, Nest TV, Verbeeck M, Smolders E (2019) Investigation on the control of phosphate leaching by sorption and colloidal transport: Column studies and multi-surface complexation modelling *Applied geochemistry* 100:371-379
- Weng L, Van Riemsdijk WH, Hiemstra T (2012) Factors controlling phosphate interaction with iron oxides *Journal of environmental quality* 41:628-635
- Weng L, Vega FA, Van Riemsdijk WH (2011) Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils: LCD modeling *Environmental science & technology* 45:8420-8428
- Wesström I, Messing I (2007) Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops *Agricultural water management* 87:229-240
- Worp HHMvd, Koning Ad, Herstel H (1987) De reactiviteit van koolzure kalkmeststoffen. RIKILT, Wageningen
- Xu D, Carswell A, Zhu Q, Zhang F, de Vries W (2020) Modelling long-term impacts of fertilization and liming on soil acidification at Rothamsted experimental station *Science of the Total Environment* 713:136249
- Zak D et al. (2018) Nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff in integrated buffer zones *Environmental science & technology* 52:6508-6517
- Zhang X, Liu X, Zhang M, Dahlgren RA, Eitzel M (2010) A review of vegetated buffers and a meta-analysis of their mitigation efficacy in reducing nonpoint source pollution *Journal of environmental quality* 39:76-84
- Zheng M, Li R, He J (2015) Sediment concentrations in run-off varying with spatial scale in an agricultural subwatershed of the Chinese Loess Plateau *Hydrological Processes* 29:5414-5423
- Žurovec O, Wall DP, Brennan FP, Krol DJ, Forrester PJ, Richards KG (2021) Increasing soil pH reduces fertiliser derived N<sub>2</sub>O emissions in intensively managed temperate grassland *Agriculture, ecosystems & environment* 311:107319

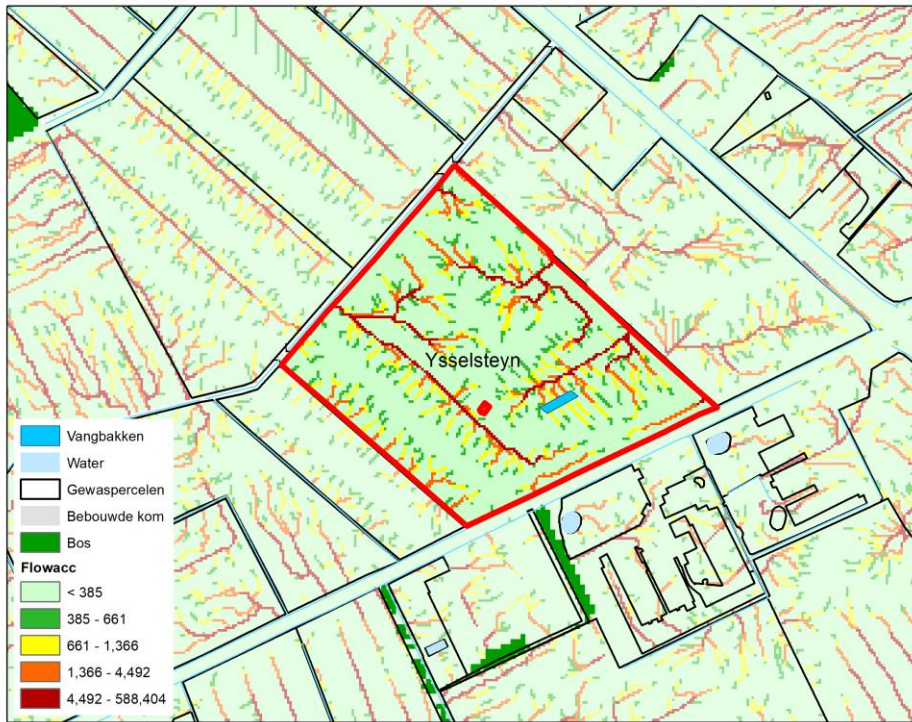
# Bijlage 1 Proefpercelen maaiveldafvoer



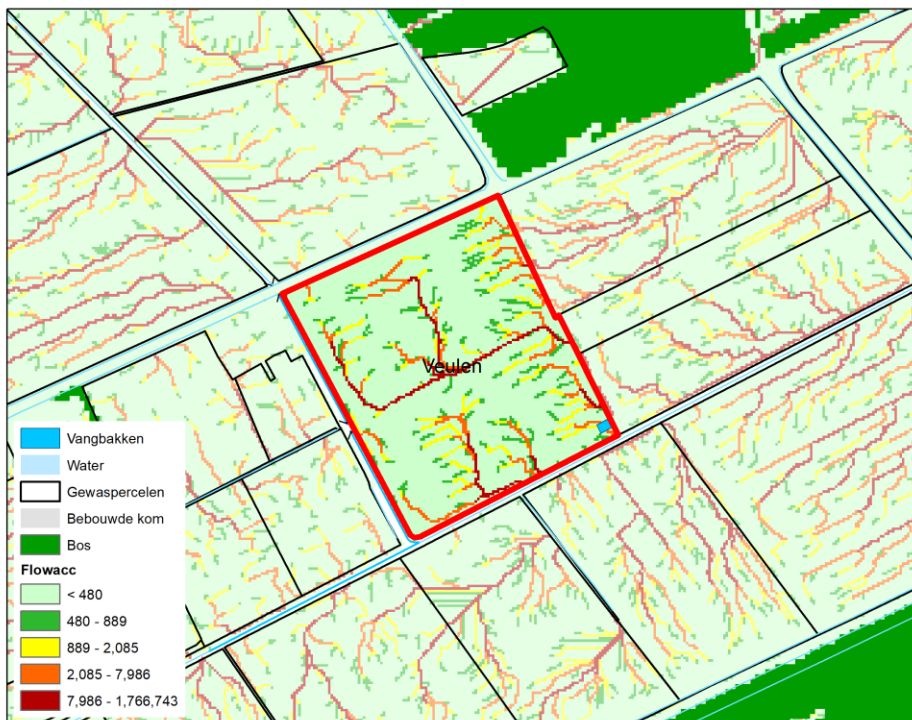
*Figuur a Locatie 1 Baneheide*



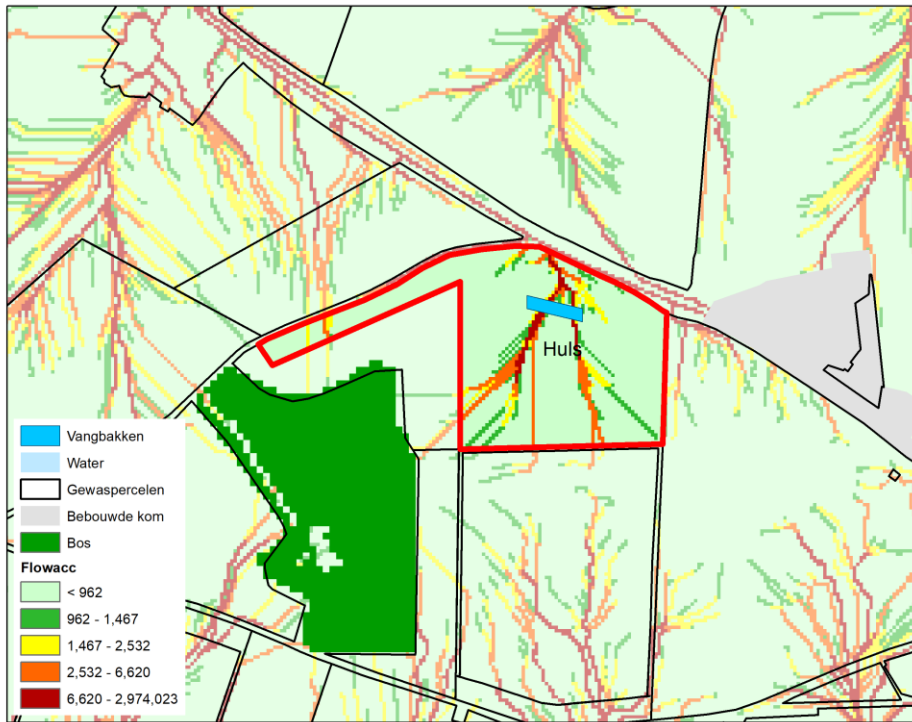
*Figuur b Locatie 2, 6, en 9 Wijnandsrade*



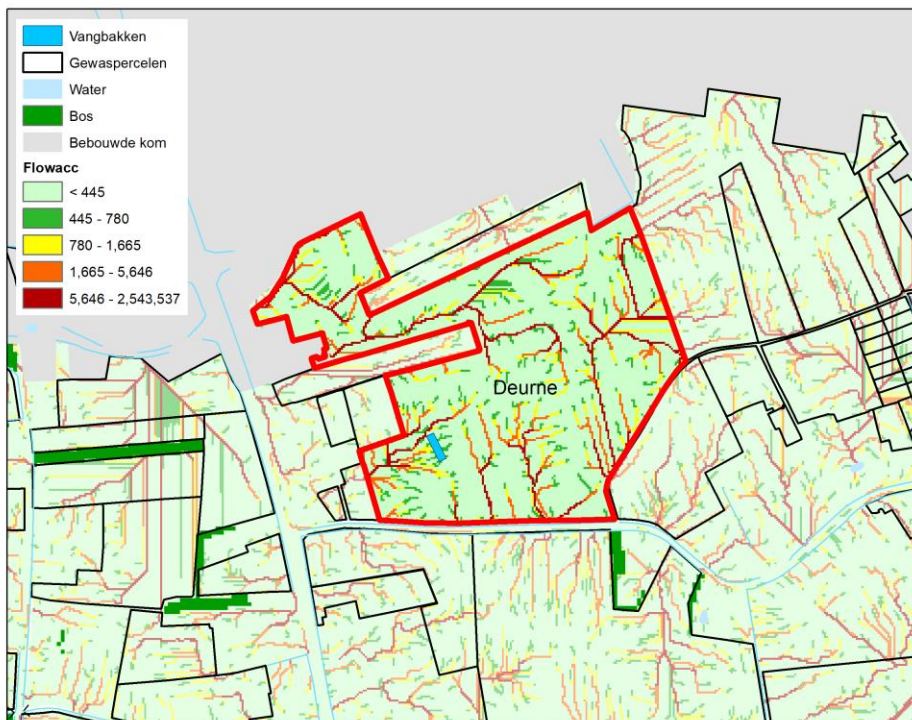
*Figuur c Locatie 3 Ysselsteyn*



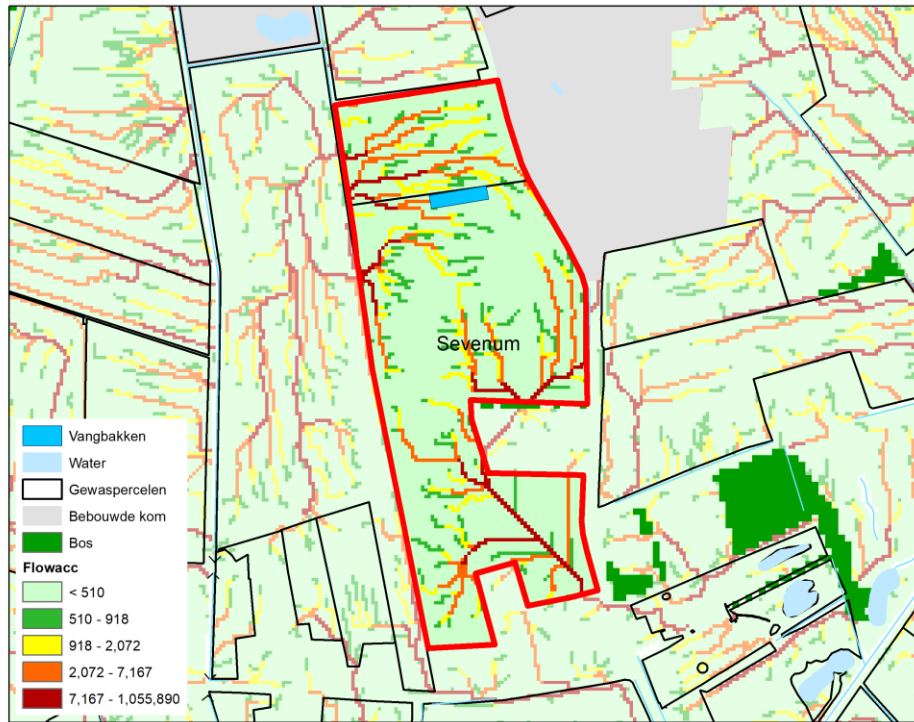
*Figuur d Locatie 4 Veulen*



*Figuur e Locatie 5 Huls*



*Figuur g Locatie 7 Deurne*



*Figuur h: Locatie 8 Sevenum*

**Figuur 25** Locatie van bakken in proefpercelen met gemodelleerde preferentiële stromingspatronen uit (Massop et al. 2014). De legenda van de kleuren duidt op de mate van waterafvoer.

## Bijlage 2 Effect drempels op water en P-afspoeling

**Tabel 31** Water: maaiveldafstroming bij aardappel in zomer. Neerslag in de laatste 24 uur voorafgaand aan meting, gemeten op locatie. Locatie 1 t/m 4 in 2020, 5 t/m 8 in 2021.

mm			Waterafstroming (mm of L m-2)				Daling (%) t.o.v. referentie		
locatie	tijd	Neerslag	ref	drempel	Gitterrollen	Grimme +	drempel	Gitterrollen	Grimme +
1	13-6	45	3.4	1.9	1.1		43	68	
	18-6	40	3.4	2.1	0.9		37	73	
	14-8	40	2.2	1.1	2.3		48	-6	
	19-8	40	2.0	1.3	1.8		34	9	
	31-8		1.7	0.1	1.4		95	16	
	28-9		1.6	1.5	0.6		6	62	
2	9-6	30	0.2	0					
	12-6	45	2.8	1.1			61		
	17-6		3.5	3.5			2		
	18-8		3.2	3.3			-3		
	31-8		0.8	1.3			-60		
3	9-6	40	0.4	0.0			90		
	18-6	30	0.7	0.5			30		
	21-8		0.1	0.2			-115		
4	18-6	25	1.3	1.0			23		
	29-6	40	1.2	0.7			47		
	21-8		0.0	0.2					
5	14-5	4.8* <sup>3</sup>	1.6	0.8	0.2		50	85	
	19-5	8.6	0.9	0.0	0.0		97	97	
	25-5	13.4	3.4	1.1	3.0	2.6	67	11	22
	19-6	10.6	1.3	0.6	0.8	0.6	55	42	56
	27-6	17.4	3.3	2.3	2.4	1.6	29	27	51
	28-6	17.6	3.2	2.6	2.5	3.1	18	22	3
	30-6	48.8	0.2	0.1	0.04	0.02	32	81	90
	3-7	0	2.3	2.8	2.4	1.0	-18	-4	59
6	30-6	45	0.1	0.0			100		
	31-7	70	0.0	0.0			44		
	15-7	78.6	4.2	4.2			0		
	5-8	13.4	0.02	0.01			22		
	10-8	16.8	0.01	0.02			-110		
7	15-5	12.7	3.3	3.7			-12		
	18-5	30.6	0.5	0.6			-35		
	4-6	21.4	4.2	4.2			0		
	21-6	4.6	3.7	3.8			-3		
	5-7	14.8	1.0	1.0			-8		
	15-7	37.2							
8	31-8	7							
	26-5	9.2	0.8	0.3			56		
	4-6	16.4	0.8	0.3			62		
	21-6	23	1.6	1.2			22		
	29-6	5	1.9	0.7			61		

\*<sup>1</sup> referentie vs. drempels.

\*<sup>2</sup> referentie vs. gitterrollen.

\*<sup>3</sup> wolkly tolky Wijnandsrade.

**Tabel 32** Fosfor via water: maaiveldafstroming van fosfaat via water bij aardappel in zomer. Neerslag in de laatste 24 uur voorafgaand aan meting gemeten op locatie.

Locatie	Tijd	mm	Totaal P (g P ha-1)				% daling t.o.v. referentie		
			ref	drempel	Gitte rollen	Grimme+ drempel	drempel	ref	Grimme+   drempel
1	13-6	45	16	11	7		31	55	
	18-6	40	12	8	5		37	62	
	14-8	40	29	38	17		-32	40	
	19-8	40	3	5	43		-62	-1347	
	31-8		2	3	1		-14	68	
	28-9		0	1	6		-129	-2256	
2	9-6	30	1						
	12-6	45	23	10			57		
	17-6		25	21			14		
	18-8		14	16			-20		
	31-8		5	0			92		
3	9-6	40	1	1			7		
	18-6	30	3	6			-69		
	21-8		3	5			-48		
4	18-6	25	12	9			26		
	29-6	40	0	1			-1779		
	21-8			7					
5	14-5	4.8* <sup>3</sup>	25	13	4		48	86	
	19-5	8.6	9	1			94		
	25-5	13.4	35	11	27	23	70	22	114
	19-6	10.6	15	14	11	9	4	24	42
	27-6	17.4	33	28	27	15	15	19	63
	28-6	17.6	27	29	29	25	-8	-6	8
	30-6	48.8	2	4	1	0	-83	73	44
	3-7	0	19	28	20	8	-47	-4	39
6	30-6	45	2						
	31-7	70	1	2			-46		
	15-7	78.6							
	5-8	13.4	0	0			51		
	10-8	16.8							
7	15-5	12.7	20	22			-10		
	18-5	30.6	3	4			-24		
	4-6	21.4							
	21-6	4.6	2	4			-92		
	5-7	14.8	3	3			12		
	15-7	37.2							
	31-8	7							
8	26-5	9.2	10	2			83		
	4-6	16.4	5	6			-5		
	21-6	23	10	9			10		
	29-6	5	6	2			61		

\*<sup>1</sup> referentie vs. drempels.

\*<sup>2</sup> referentie vs. gitterrollen.

\*<sup>3</sup> wolky tolky Wijnandsrade.

Bij mais waren er zeven momenten van maaiveldafvoer die varieerden van 0,1 tot 3,1 L m<sup>2</sup> (of mm) bij regenbuien van 0,4 tot 70,2 mm.



**Tabel 33** Fosfor via sediment (gemeten als P<sub>ox</sub>): maaiveldafstroming van fosfor via gronddeeltjes bij aardappel in zomer. Neerslag in de laatste 24 uur voorafgaand aan meting gemeten op locatie.

Locatie	Tijd	mm Neerslag	Totaal P (kg P ha-1)				% daling t.o.v. referentie		
			ref	drempel	Gitte rollen	Grimme+ drempel	drempel	Gitte rollen	Grimme+ drempel
1	13-6	45	0.63	0.07	0.10		88	85	
	18-6	40	0.22	0.10	0.06		53	75	
	14-8	40	0.003	0.005	0.004		-63	-18	
	19-8	40							
	31-8								
	28-9								
2	9-6	30	0.10						
	12-6	45	0.23	0.08			63		
	17-6		0.18	0.56			-217		
	18-8		1.72	1.37			20		
	31-8								
3	9-6	40							
	18-6	30							
	21-8			0.10					
4	18-6	25	0.11	0.10			13		
	29-6	40	0.05	0.02			61		
	21-8								
5	14-5	4.8* <sup>3</sup>	0.76	0.26	0.18		66	76	
	19-5	8.6	0.36						
	25-5	13.4	4.25	0.60	1.03	3.11	86	76	-418
	19-6	10.6	0.38		0.15			60	
	27-6	17,4	1.11	0.17	1.14	0.46	85	-3	-178
	28-6	17.6	0.98	1.90	2.68	1.10	-94	-174	42
	30-6	48.8							
	3-7	0	0.79	0.52	0.34		35	57	
6	30-6	45							
	31-7	70							
	15-7	78.6							
	5-8	13.4							
	10-8	16.8							
7	15-5	12.7	1.19	0.61			48		
	18-5	30.6	0.27	0.16			41		
	4-6	21.4							
	21-6	4.6	1.64	2.16			-31		
	5-7	14.8	0.10	0.11			-17		
	15-7	37.2							
	31-8	7							
8	26-5	9.2	0.17	0.19			-14		
	4-6	16.4	0.10	0.19			-85		
	21-6	23	0.08	0.08			7		
	29-6	5	0.99	0.31			68		

\*<sup>1</sup> referentie vs. drempels.

\*<sup>2</sup> referentie vs. gitterrollen.

\*<sup>3</sup> wolky tolky Wijnandsrade

# Bijlage 3 P en Fe in bovenste grondwater zandregio Nederland

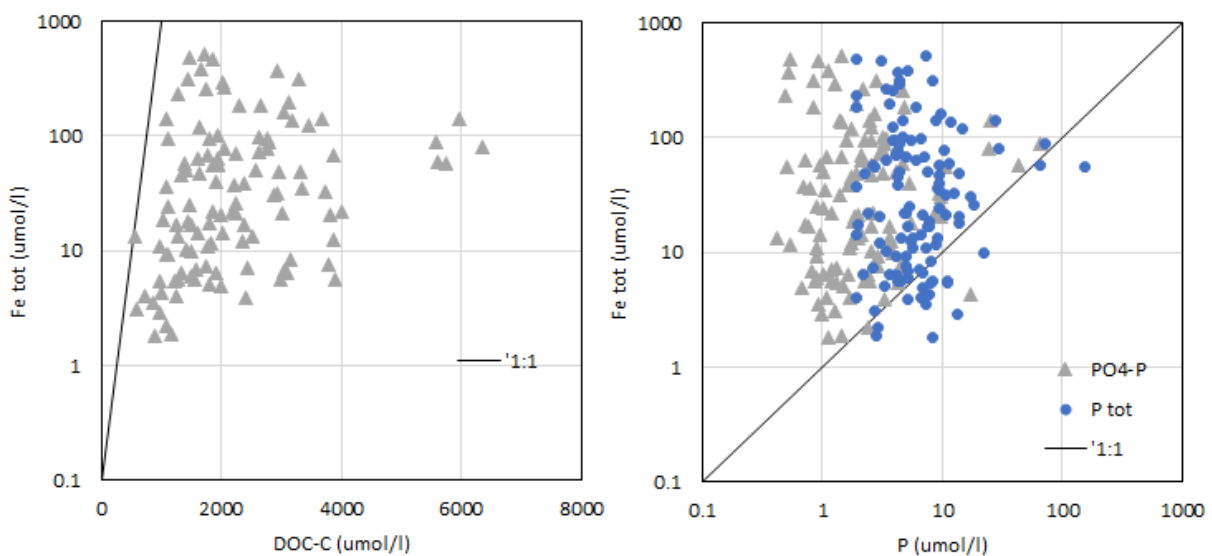
Een belangrijke bron van gegevens over de samenstelling van het bovenste grondwater in Nederland biedt het LMM. Data van het Landelijke Meetnet effecten Mestbeleid (RIVM) zijn openbaar te vinden op website van RIVM ([lmm.rivm.nl/selectietool](http://lmm.rivm.nl/selectietool) LMM). In onderstaande tabel staat een selectie uit de LMM-data uit 2020 voor alleen de zandgronden. De fosfaatconcentraties liggen meestal lager dan de streefwaarde van 0,4 mg P L<sup>-1</sup> en liggen om en nabij de norm voor oppervlaktewater in de Kaderrichtlijn Water, die varieert afhankelijk van oppervlaktewatertype tussen 0,09 of 0,15 mg P L<sup>-1</sup> (van Beelen and van der Wal 2021).

**Tabel 34** Al, Fe, P, PO<sub>4</sub>, DOC in bovenste grondwater in zand ([www.lmm.rivm.nl](http://www.lmm.rivm.nl)).

jaartal	Component	Bedrijfs-type	Aantal bedrijven	Gemiddeld		Standaard Deviatie	Detectie-grens	% < detectie-grens
				µmol/l	mg/l	mg/l	mg/l	
2020	Al	alle	215	27	0,73	0,65	0,01	10
2020	Fe	alle	215	84	4,7	4,9	0,05	11
2020	Opgelost P	Alle	215	3,9	0,12	0,36	0,05	55
2020	Orthofosfaat; PO <sub>4</sub>	Alle	215	3,5	0,11	0,33	0,01	25
2020	Opgelost organisch C; DOC	Alle	215	2417	29	18	0,29	2

Opvallend aan de gegevens is dat de hoeveelheid Fe zeer hoog is ten opzichte van P. Dat is te begrijpen als:

- het 'opgelost P' deels gebonden is aan Fe-houdende colloïden, omdat bepaalde colloïden door 0,45 µm filter heengaan (Warrinnier et al. 2019), of
- het grondwater opgelost Fe bevat, omdat het gereduceerd is, wat na oxidatie wederom P kan binden (Baken et al. 2016; Van der Grift et al. 2018). In dat geval, is niet goed zichtbaar wat de fosfaatconcentraties zullen zijn na oxidatie, en zijn de gemeten hoge fosfaatconcentraties niet relevant voor het uitspoelen na het oppervlaktewater.



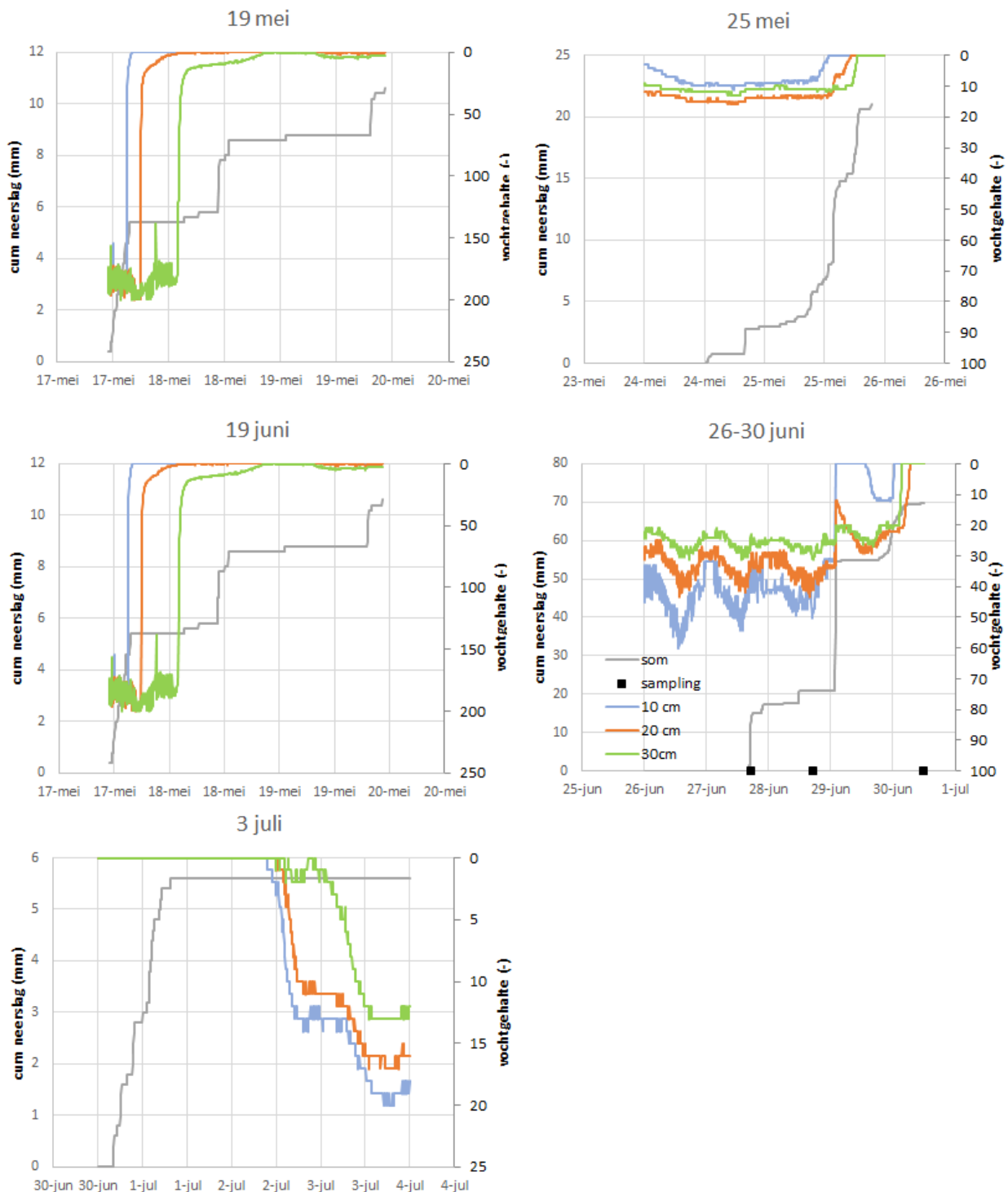
**Figuur 26** a) Fe en C in bovenste grondwater, en b) Fe en P in bovenste grondwater.

---

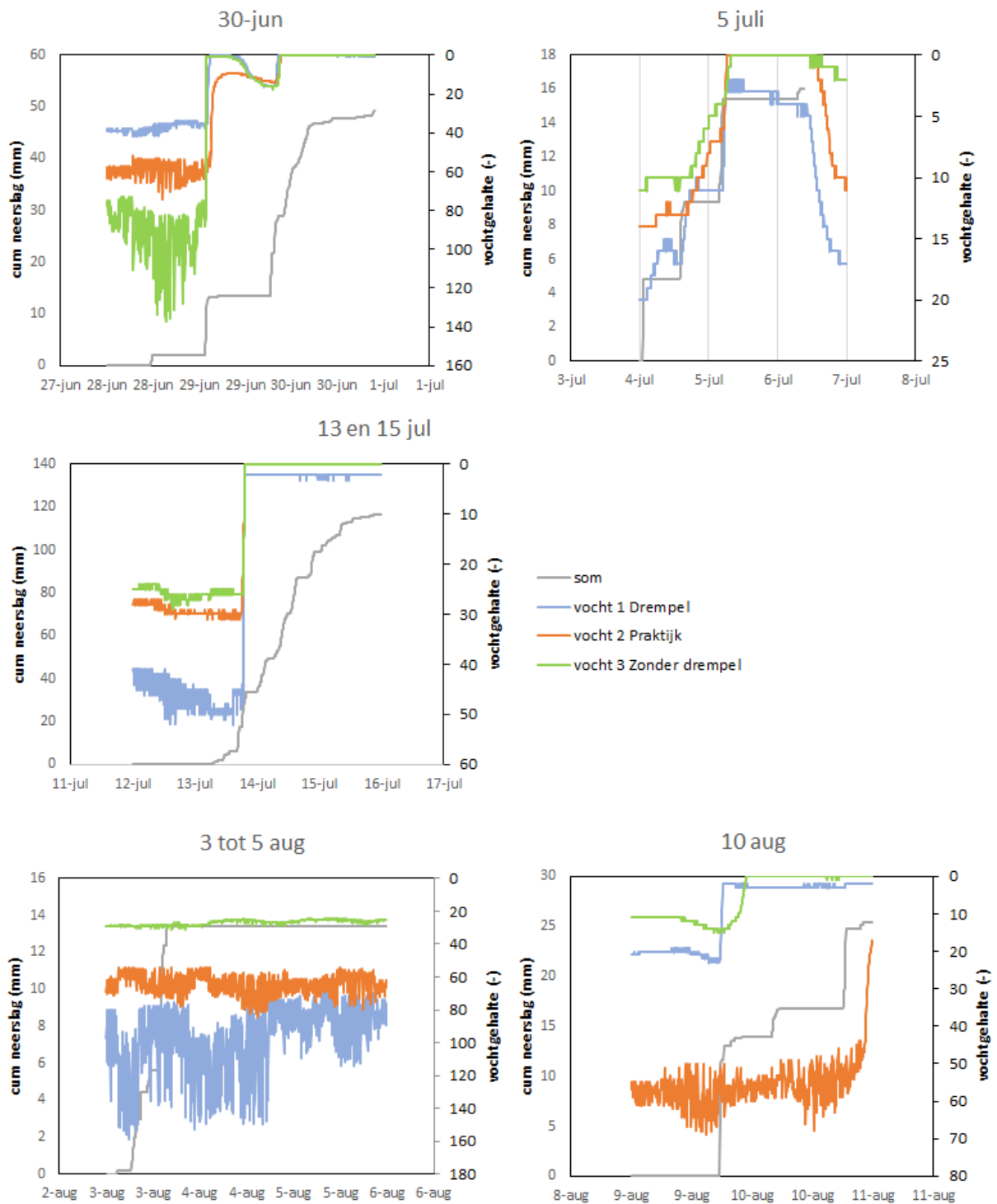
Om te zien of er een relatie is tussen P en Fe, zijn de data opgevraagd bij RIVM. Data van 2001-2010, van PO<sub>4</sub>, P, Fe, DOC samen met grondwaterstand en grondtype is gegeven. Het betreft 487 P- en PO<sub>4</sub>-metingen, 463 DOC-metingen en 108 Fe-metingen. Het betreft bemonsteringen die uitgevoerd zijn in de zomermaanden wanneer de grondwaterstanden over het algemeen lager zijn dan in de winter. De bemonsteringen zijn gedaan met de openboorgatmethode.

Dat de hoge Fe-concentraties duiden op gereduceerd grondwater (verklaring b) is mogelijk maar onwaarschijnlijk voor alle locaties, omdat er ook nitraat wordt gemeten. Verklaring a ligt daarom voor de meeste locaties meer voor de hand. Uit eigen onderzoek door de auteurs, is bekend dat er relatief veel verstoring is bij de openboorgatmethode (colloïden of gronddeeltjes), wat ertoe leidt dat het gemeten Fe in het grondwater moeilijk te interpreteren is: naast gereduceerd en opgelost Fe (Fe<sup>2+</sup>) kan er ook Fe zijn van colloïden. Er is dan ook geen goede relatie tussen Fe en NO<sub>3</sub> (bij chemische evenwicht kunnen Fe<sup>3+</sup> en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> niet samen voorkomen), in tegenstelling tot onderzoek met vaste buizen. Onduidelijk is of het gaat om colloïden of gronddeeltjes (door de verstoring via de openboormethode). De hoge concentratie DOC (Figuur 26a) maakt het mogelijk dat het, tenminste deels, gaat om stabiele colloïden met Fe en P. De aan deeltjes gebonden P maakt dat de P-metingen in LMM waarschijnlijk voor veel locaties mogelijk een overschatting zijn van de opgeloste P-concentratie in grondwater. Bovendien wordt het gebonden P deels gemeten als 'orthofosfaat' of molybdeenreactief fosfaat, omdat het extract waarin de kleuring plaatsvindt heel zuur is (Sinaj et al. 1998). Dit alles maakt dat de gemeten PO<sub>4</sub>- en P-concentraties in LMM mogelijk voor veel monitoringslocaties geen goede maat zijn voor de vrije PO<sub>4</sub> en P (LMM is met name op nitraat gericht).

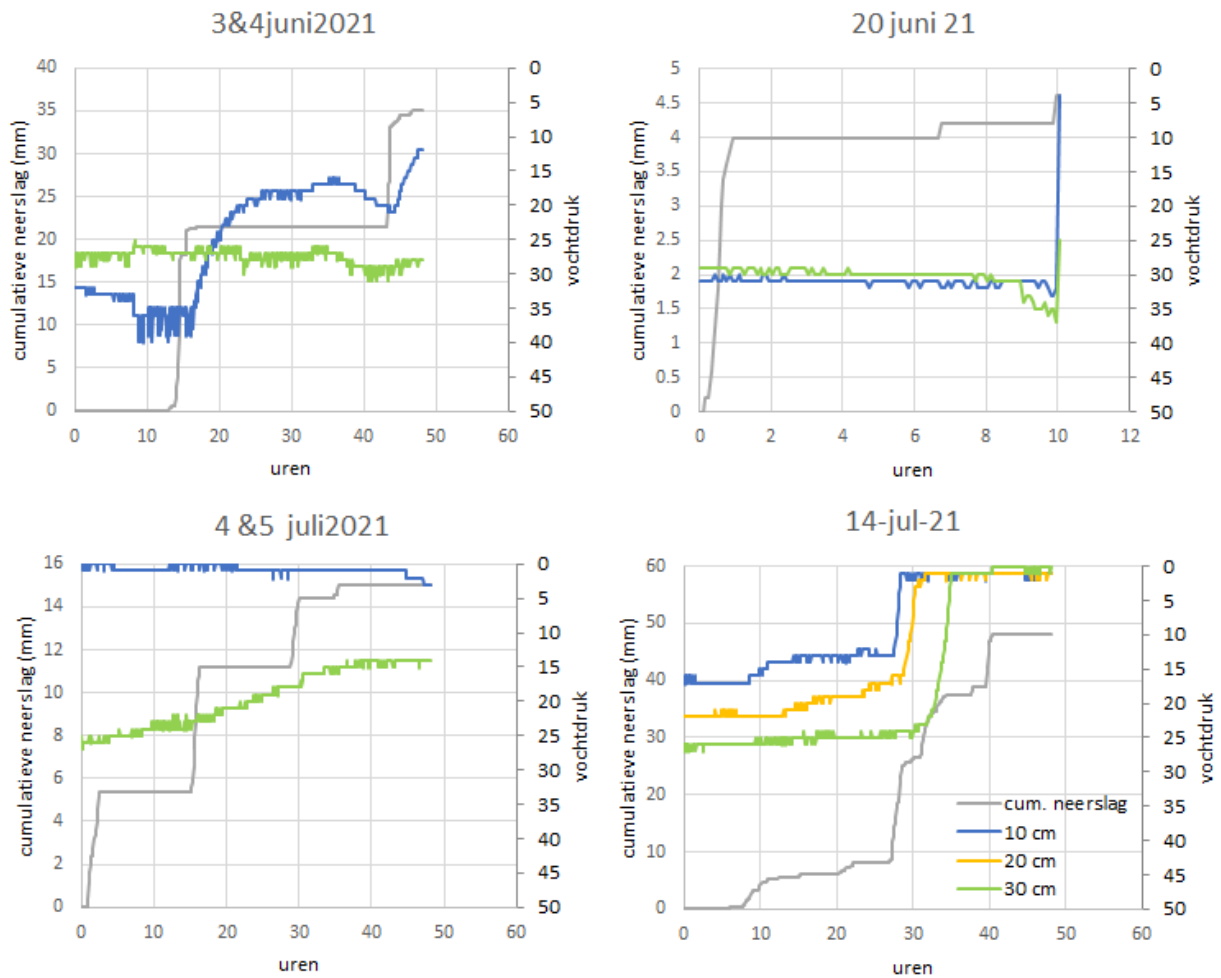
## Bijlage 4 Neerslag en vochtgehalte tijdens maaiveldafstroming aardappel



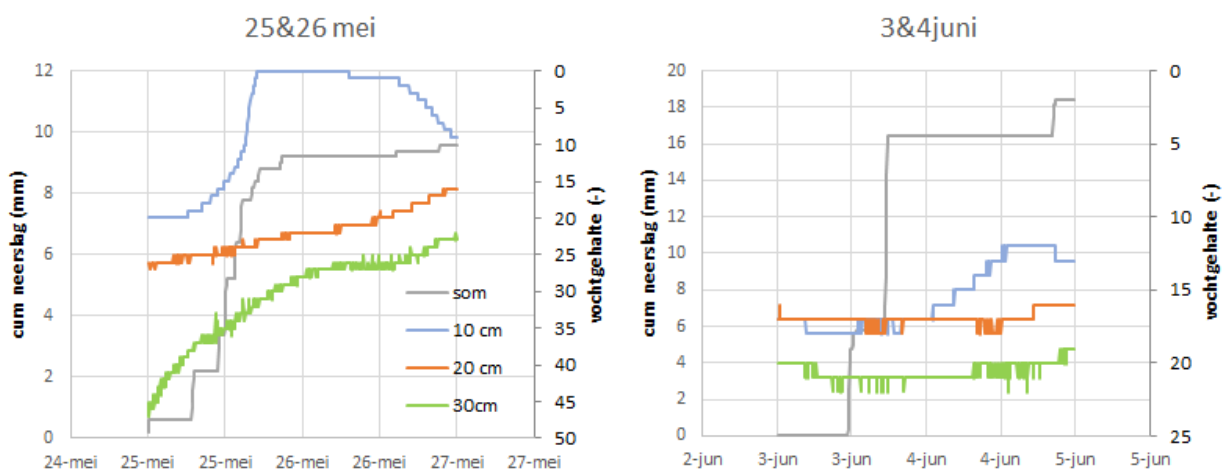
**Figuur 27** Effect neerslag op bodemvochtgehalte in locatie 5 Huls Sempelveld tijdens zeven 'events'. Er is op locatie 5 afgespoeld water en sediment bemonsterd op 19 mei, 25 mei, 19 juni, 27, 28 en 30 juni en op 3 juli 2021. Bodemvochtgehalte is niet gemeten tijdens de events op 14 mei 2021. De hoogste cumulatieve neerslag gedurende 1 uur was 2, 6, 10, 13, 33, 4 en 1 mm op 17 mei, 25 mei, 19 juni, 27 juni, 29 juni (1:13), 29 juni (22:44) en 1 juli, respectievelijk.



**Figuur 28** Effect neerslag op bodemvochtgehalte in locatie 6 Wijnandsrade tijdens vijf 'events'. Er is op locatie 6 afgespoeld water en sediment bemonsterd op 30 juni, 31 juli, 15 juli, 5 aug en 10 augustus 2021. De hoogste cumulatieve neerslag gedurende 1 uur was 11, 5, 12, 6 en 13 mm op 29 juni, 5 juli, 13 juli, 3 augustus en op 9 augustus respectievelijk.



**Figuur 29** Effect neerslag op bodemvochtgehalte in locatie 7 Deurne tijdens vier 'events'. Er is op locatie 7 afgespoeld water en sediment bemonsterd op 4 juni, 21 juni, 5 juli en op 15 juli 2021. Bodemvochtgehalte is niet gemeten tijdens de events op 15 mei 2021 en 31 augustus 2021 zijn. De hoogste cumulatieve neerslag gedurende 1 uur was 17, 4, 5 en 12 mm op 3 juni, 20 juni, 4 juli en op 15 juli 2021, respectievelijk.



**Figuur 30** Effect neerslag op bodemvochtgehalte in locatie 8 Sevenum tijdens twee 'events'. Er is op locatie 8 afgespoeld water en sediment bemonsterd op 26 mei 2021 en 4 juni 2021. Bodemvochtgehalte is niet gemeten tijdens de events op 21 en 29 juni 2021. De hoogste cumulatieve neerslag gedurende 1 uur was 5 en 6 mm op 25 mei en 3 juni, respectievelijk.

In 2021 zijn regenmeters (wolkly tolky) en bodemvochtsensors (watermark) geplaatst op de onderzoekslocaties (zie paragraaf 3.3 en Figuur 3) waar ook afspoeling is gemeten. De regenval zorgde op de geselecteerde dagen dat er ook afspoeling was, voor een hoger vochtgehalte: luchtgevulde porositeit gaat naar nul.

**Tabel 35** Hoogste neerslagsom binnen één uur tijd, gemeten op weerstation bij meetlocaties.

Locatie	Tijd	Neerslag in 24 uur voorafgaand aan bemonstering	Tijdstip hoogste neerslag binnen één uur	Maximale cumulatieve neerslag binnen één uur
		mm		mm
5	14-5	4.8		
	19-5	8.6	17-5-2021 11:25	1.6
	25-5	13.4	25-5-2021 13:38	6.1
	19-6	10.6	19-6-2021 22:57	9.7
	27-6	17,4	27-6-2021 16:50	13.4
	28-6	17.6	29-6-2021 1:13	33.1
	30-6	48.8	29-6-2021 22:44	4.1
	3-7	0*	1-7-2021 1:55	1.2
6	30-6	45	29-6-2021 1:27	10.8
	31-7	70	5-7-2021 4:02	4.7
	15-7	78.6	13-7-2021 18:12	12.0
	5-8	13.4	3-8-2021 13:32	5.9
	10-8	16.8	9-8-2021 17:33	12.8
	7	15-5	12.7	
18-5		30.6		
4-6		21.4	3-6-2021 13:42	17.4
21-6		4.6	20-6-2021 0:18	3.7
5-7		14.8	4-7-2021 15:07	5.3
15-7		37.2	15-7-2021 3:18	12
31-8		7		
8		26-5	9.2	25-5-2021 13:28
	4-6	16.4	3-6-2021 16:46	10.5
	21-6	23		
	29-6	5		

\*is een dag na neerslag bemonsterd.

---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[wur.nl/environmental-research](http://wur.nl/environmental-research)

Wageningen Environmental Research  
Rapport 3325  
ISSN 1566-7197



---

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research 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



---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AB Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[wur.nl/environmental-research](http://wur.nl/environmental-research)

Rapport 3325  
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research 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.

