

32/446(374) 2^olx.

**Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de
fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden**

Eindrapport

**O.F. Schoumans
R. Kruijne**

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

Rapport 374

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1995

0 6 DEC. 1995

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0686 6160

307055

REFERAAT

Schoumans, O.F. en R. Kruijne, 1995. *Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden. Eindrapport*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 374 75 blz.; 16 fig.; 9 tab.; 40 ref.; 2 aanh.

Het effect van maatregelen om de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater te verminderen is onderzocht in het laboratorium, in het veld en met modellen. De maatregelen waren fosfaatvrije bemesting (bemestingsmaatregel), vastlegging van de overmaat fosfaat in de bodem door een fosfaatbindend materiaal (bodemchemische maatregel) en wijziging van de waterstroming in de bodem zodat nauwelijks ondiepe grondwaterafvoer plaatsvindt (hydrologische maatregel). De hydrologische maatregel heeft de grootste effectiviteit, de bodemchemische maatregel een wat lagere en de bemestingsmaatregel de laagste. Elke maatregel heeft specifieke voor- en nadelen. De bodemchemische maatregel is (waarschijnlijk) het duurst. De bemestings- en bodemchemische maatregel zijn flexibeler toepasbaar dan de hydrologische maatregel.

Trefwoorden: bemestingsmaatregel, bodemchemische maatregel, fosfaatbelasting, fosfaatverzadiging, grondwater, hydrologische maatregel, oppervlaktewater

ISSN 0927-4499

©1995 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen. Tel.: 0317-474200; telefax: 0317-424812.

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

Project 7163

[RAP374er.EVR/WIO/09/95]

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
1 Inleiding	17
2 Beschrijving onderzoekslocaties	21
2.1 Ligging en bodemgesteldheid	21
2.2 Fosfaattoestand van de bodem	22
2.3 Fosfaatconcentraties in het bodemvocht	24
2.4 Fosfaatafvoer van de perceelssloten	25
3 Bemestingsmaatregelen	27
3.1 Veldproeven	27
3.2 Modelberekeningen	29
4 Bodemchemische maatregelen	33
4.1 Voorselectie	33
4.2 Effectiviteit van gesynthetiseerd ijzerhydroxyde	35
4.2.1 Laboratoriumproeven	35
4.2.2 Veldproeven	37
4.3 Modelberekeningen	40
4.3.1 Reductie van de fosfaatconcentratie op de ijzerplots	40
4.3.2 Reductie fosfaatbelasting naar de perceelssloot	41
4.3.3 Reductie fosfaatbelasting naar het oppervlaktewater in het stroomgebied van de Schuitenbeek	44
5 Hydrologische maatregelen	47
5.1 Voorselectie	47
5.2 Veldproeven	48
5.2.1 Drainafvoer	49
5.2.2 Concentraties in het drainwater	49
5.2.3 Slootafvoer en fosfaatvracht	50
5.3 Reductie fosfaatbelasting naar het oppervlaktewater	50
6 Voor- en nadelen van de onderzochte maatregelen	53
7 Kostenanalyse	57
7.1 Bemestingsmaatregelen	57
7.2 Bodemchemische maatregelen	59
7.3 Hydrologische maatregel	61
8 Conclusies	65
Literatuur	69

Tabellen

1	Cumulatieve afvoer, ortho-fosfaatvracht en gemiddelde fosfaatuitspoelingsconcentratie van de meetsloten voor twee deelperioden ¹⁾	26
2	Relevante kenmerken van de geselecteerde aluminium- en ijzermaterialen	33
3	Gemiddelde fosfaatconcentraties (inclusief standaarddeviatie) gemeten in het bodemvocht van Fe-plot I (0-25 spitmachine, 25-50 injecteur)	39
4	Gemiddelde fosfaatconcentraties (inclusief standaarddeviatie) gemeten in het bodemvocht van Fe-plot II (0-50 cm spitmachine)	39
5	Afvoertermen van de gemiddelde jaarbalans (periode 1976-1981) in de huidige situatie en de situatie met hydrologische maatregel (naar Jeurissen, 1993)	47
6	Gemeten fosfaatafvoer (ortho-fosfaat) van 2 perceelssloten en berekende reductie in de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater bij vervanging van resp. 100, 95 en 90% van de (ondiepe) stroming naar de perceelssloten door diepere stroming (met een gelijke ontwateringsbasis; drainconcentratie van 0,14 mg l ⁻¹ P)	51
7	Prijs (onder voorbehoud) en ijzergehalte van ijzerzouten	60
8	Schatting van de investeringskosten van bodemchemische maatregelen voor het areaal natte gronden in het Schuitenbeekgebied	61
9	Totale kosten voor verschillende varianten voor de hydrologische maatregel (in gulden per hectare)	63

Figuren

1	Gemiddelde fosfaatbezettingsfractie van de bodem op resp. locatie 1 (a) en locatie 2 (b) en van de afzonderlijke percelen van deze locaties.	23
2	Gemiddeld gehalte desorbeerbaar fosfaat van de bodem op resp. locatie 1 (a) en locatie 2 (b) en van de afzonderlijke percelen van deze twee locaties	24
3	Gemiddelde concentratie orthofosfaat in het bodemvocht op resp. locatie 1 (a) en locatie 2 (b) en van de afzonderlijke percelen van deze locaties	25
4	Cumulatieve ortho-fosfaatvracht sloot 2, 3 (locatie 1) en 4 (locatie 2)	26
5	Verband tussen de gemiddelde ortho-P concentratie en de fosfaatbezettingsfractie ($FBF = P_{ox} / (Al + Fe)_{ox}$) van de bovengrond (0-40 cm - mv.) voor en na bemesting	28
6	Verhouding ortho-P en totaal-P voor en na bemesting over de diepte 0-40 cm als functie van de fosfaatbezettingsfractie ($P_{ox} / (Al + Fe)_{ox}$) van de plots	29
7	Gemodelleerde gemiddelde (20 jaar) fosfaatuitspoeling (ortho-P) uit de bouwvoor (25 cm-mv.) voor twee bemestingsniveaus en vier fosfaatverzadigingsgraden van de bovengrond (0-40 cm)	30
8	Gemodelleerde gemiddelde (20 jaar) fosfaatbelasting (ortho-P) van het oppervlaktewater (perceelssloot) voor twee bemestingsniveaus en vier fosfaat-verzadigingsgraden van de bovengrond (0-40 cm)	30
9	Gemodelleerd gemiddelde (20 jaar) reductie van de fosfaatbelasting (ortho-P) van het oppervlaktewater bij nulbemesting (ten opzichte van 110 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ j ⁻¹) voor verschillende fosfaatverzadigingsgraden van de bovengrond (0-40 cm)	31

10 Verloop van de fosfaatevenwichtsconcentratie na toediening van verschillende percentages ijzerhydroxyde aan de opgeladen bouwvoor voor diverse uitgangsmaterialen.	35
11 Verloop van de gemeten (cups en gecentrifugeerd) ortho-fosfaatconcentratie en gemodelleerde concentratie als functie van de diepte (met en zonder ijzertoediening) bij nulbemesting	40
12 Effect van inwerkdiepte en taludbehandeling van ijzerhydroxyde (0,2% Fe) op de reductie van de fosfaatbelasting (ortho-P) van de perceelssloot	42
13 Effect van inwerkdiepte en ijzerdosering op de reductie van de ortho-fosfaat-belasting van de perceelssloot (a:west perceel 1 en oost perceel 2; b:west perceel 2 en oost perceel 2)	42
14 Bijdrage van het areaal natte en droge gronden aan de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater in het Schuitenbeekgebied	44
15 Schatting van de invloed van inwerkdiepte en de ijzerdosering op de reductie van de ortho-fosfaatbelasting van het oppervlaktewater via de greppelafvoer met een ontwateringsbasis van 40 cm - mv.	45
16 Schematische weergave van de uitspoeling van fosfaat in a) de normale ontwateringssituatie en b) de situatie met de geselecteerde hydrologische maatregel	48

Aanhangsels

1 Ligging van de percelen op onderzoekslocatie 1	73
2 Ligging van de percelen op onderzoekslocatie 2	75

Woord vooraf

Dit rapport omvat de eindrapportage van het onderzoek naar de vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden naar het oppervlaktewater (project 7163). Het project is verricht in opdracht van de projectgroep BOVAR (Bestrijding Overmatige Algenbloei Randmeren) en werd gefinancierd door het Ministerie van LNV, de Provincie Gelderland, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Ministerie van VROM (in het kader van ROM-project Gelderse Vallei) en het FOMA (Financieringsoverleg Mest- en Ammoniakonderzoek). Het onderzoek is uitgevoerd in de periode 1989-1994 door DLO-Staring Centrum in samenwerking met IMAG-DLO en is onderverdeeld in twee fasen. Het doel van de eerste fase (1989-1991) was de selectie van effectieve bodemchemische en hydrologische maatregelen. In de tweede fase (1991-1994) zijn de geselecteerde maatregelen op een onderzoekslocatie in de praktijk uitgetest. In beide fasen is zowel laboratorium-, veld- als modelonderzoek verricht. Vanwege zowel vertraging in de financiering (medio 1991 tot en met eind 1992) als problemen met de ontwikkeling van het twee-dimensionale hydrologische model (1994) is het project met twee jaar vertraagd.

Het project werd begeleid door BOVAR-deelprojectgroep 3, die als volgt was samengesteld:

- Drs. E.M. Blaauw, Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied.
- Ir. C. Buddingh, Dienst Landinrichting en Beheer Landbouwgronden, Gelderland.
- Ir. Y. Geelen, provincie Gelderland, Dienst RWG; voorzitter.
- Ing. A. Griffioen, Rijkswaterstaat, RIZA.
- Ir. J. van Kempen, Zuiveringsschap Veluwe.
- Dhr. J. Koornberg, Waterschap Noord-Veluwe.
- Drs. P. Meeuwissen, RIMH Gelderland.
- Ir. D.T. van der Molen, Rijkswaterstaat, RIZA.
- Ing. A. Tjeenk-Willink, Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied, secretaris.

Het onderzoek bestond uit een aantal deelstudies, die in deelrapporten zullen verschijnen, met als subtitel:

- Meting van de fosfaatuitspoeling uit fosfaatverzadigde zandgrond met en zonder een hydrologische maatregel (SC-DLO-rapport 374.1).
- Mogelijkheden van toediening van aluminium- en ijzerverbindingen aan de bodem (SC-DLO-rapport 374.2).
- Toedieningsmethoden voor ijzerhydroxyde op fosfaatverzadigde zandgronden (SC-DLO-rapport 374.3).
- Ontwikkeling en toepassing van een- en twee-dimensionale modellen (SC-DLO-rapport 374.4).

Het onderhavige eindrapport bevat de belangrijkste resultaten van het onderzoek naar de effectiviteit van bemestings-, bodemchemische en hydrologische maatregelen. Daarnaast zijn de kosten en de voor- en nadelen van deze maatregelen weergegeven.

Dank is verschuldigd aan een groot aantal medewerkers. In de eerste plaats aan de Landbouwworkorganisaties landbouwwaatschappij Zuid, Midden, Oost (ZMO) en de Land en Tuinbouw Organisatie (LTO) voor de medewerking en betrokkenheid bij het onderzoek. Daarnaast in het bijzonder aan de heren Van Beek, Van de Langemheen, Lokhorst en Mulderij voor hun gastvrijheid en samenwerking op de percelen die zij ter beschikking stelden.

Tevens is dank verschuldigd aan een aantal collegae van het SC-DLO voor hun bijdrage aan het project. De heer H. van het Loo zorgde voor de beschrijving van de bodemgesteldheid van de onderzoekslocaties. De heren W.A. de Boer, J. Pankow, A. van der Toorn en R. Zwijnen verrichtte de veldwerkzaamheden en de heren R. Koning, R.Ch. Sjardijn en R. Zwijnen de laboratoriumanalyses van de monsters afkomstig van de onderzoeks-locaties. De heer A. Booij beschreef en bemonsterde een aantal ijzerrijke gronden. De laboratoriumproeven zijn grotendeels uitgevoerd door mevrouw A. El Bachrioui-Louwerse en de heren L. Köhlerberg en R. Zwijnen. De heer J.G. Wesseling ontwikkelde het twee dimensionale hydrologische model en paste dit toe op lokale schaal. De modelberekeningen in de eerste fase zijn uitgevoerd door mevrouw L. Jeurissen. De stagiairs die betrokken zijn geweest bij het onderzoek, waren de heren R.F.J. Boersbroek (R.H.S. Ysselland), P. Driessen (I.A.H. Larenstein), W. Murre (L.U.W.), M. Reinen (I.A.H. Larenstein), R. van Riemsdijk (MBO College Arnhem), J.P. Stavenuiter (MBO College Arnhem) en M. Yspeert (I.A.H. Larenstein).

Tot slot is dank verschuldigd aan een aantal chemische bedrijven (Biliton research Arnhem, aluminiumfabriek Delfzijl, Kemwater, Melchemie Holland, Solvay Chemie) voor het ter beschikking stellen van monstermateriaal.

Samenvatting

Als gevolg van de hoge fosfaatbemesting van de landbouwgronden in het Schuitenbeekgebied vanaf de jaren 50, is een groot areaal van deze gronden zodanig fosfaatverzadigd, dat gedurende een groot aantal decennia nog verhoogde fosfaatsuitleving zal optreden naar het grond- en oppervlaktewater. Deze fosfaatbelasting wordt via perceelssloten afgevoerd naar de Schuitenbeek, die uitmondt in de randmeren. Omdat verbetering van de waterkwaliteit van de randmeren noodzakelijk is, heeft DLO-Staring Centrum in samenwerking met IMAG-DLO in opdracht van de projectgroep BOVAR in de periode 1989-1994 een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden van maatregelen ter vermindering van de fosfaatsuitleving uit landbouwgronden. Het onderzoek werd gefinancierd door het Ministerie van LNV, de Provincie Gelderland, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Ministerie van VROM (in het kader van ROM-project Gelderse Vallei) en het FOMA (Financieringsoverleg Mest- en Ammoniakonderzoek) en bestond uit twee fasen. Het doel van de eerste fase was maatregelen te selecteren, die effectief zijn om de fosfaatsuitleving te verminderen. In de tweede fase zijn de geselecteerde maatregelen op een onderzoekslocatie in de praktijk uitgetest.

Bij de maatregelen is onderscheid gemaakt in bemestings-, hydrologische en bodemchemische maatregelen. Bij de bemestingsmaatregel is nagegaan wat de gevolgen zijn voor de fosfaatsuitleving naar het grond- en oppervlaktewater van fosfaatvrije bemesting en bemesting op een niveau van gewasonttrekking. De bodemchemische maatregel bestaat uit het toedienen van materiaal aan de bodem om de overmaat fosfaat te binden, waardoor de fosfaatsuitleving naar het grond- en oppervlaktewater wordt gereduceerd. Bij de hydrologische maatregel wordt de waterstroming in de bodem zodanig gewijzigd, dat de fosfaatbindingscapaciteit van de (niet-fosfaatverzadigde) ondergrond kan worden benut. Voor zowel de bodemchemische als hydrologische maatregel geldt, dat de fosfaatgift niet groter mag zijn dan de fosfaatonttrekking door het gewas.

Om de effecten van deze maatregelen te kunnen evalueren, is op een tweetal onderzoekslocaties de bodemchemische, fysische en hydrologische situatie vastgesteld, en is de fosfaatafvoer van de tussenliggende sloten gemeten ('nulsituatie'). Vervolgens zijn de effecten van aanvullende maatregelen op één van deze onderzoekslocaties nader onderzocht. De tweede onderzoekslocatie bleef als 'nulsituatie' gehandhaafd. Het effect van de hoogte van fosfaatbemesting op het verloop van de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing is op een aantal veldjes ('bemestingsplots') vastgesteld. Hierbij zijn 3 bemestingniveaus (resp. 0, 110 en 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ j⁻¹) in triplo aangelegd. Om de effectiviteit van de bodemchemische maatregel te evalueren, zijn laboratoriumproeven uitgevoerd en zijn, op basis hiervan, ook 'ijzerplots' aangelegd, waaraan ijzerhydroxyde werd toegediend. De hydrologische maatregel is toegepast bij een perceelssloot. De veldmetingen zijn mede gebruikt om de gebruikte modellen te kalibreren en te valideren, teneinde alternatieve scenario's door

Overzicht van het rendement, de kosten en de voor- en nadelen van de bemestings-, bodemchemische en hydrologische maatregelen

maatregel	rendement ¹⁾ %	indicatieve kosten ²⁾		voordelen	nadelen	duurzaamheid
		investering miljoen	jaarlijks miljoen j ⁻¹			
nulbemesting	10 - 35					
(a)		geen	1,3	- technisch relatief eenvoudig - uitvoerbaar	a) geen beweiding mogelijk	- duurzaam (zowel a als b)
(b)		17	geen	- flexibel	b) beperkte beweidingstekte beweiding	
bodemchemisch	60 - 80					
(a)		34 - 36	geen	- waarschijnlijk eenmalig	- tijdelijk te hoge zoutconcentraties (Cl, SO ₄ of NO ₃)	- lange-termijn effect onzeker (zowel c als d)
(b)		18 - 20	geen	- fosfaatgift tot gewasonttrekking mogelijk (beweiding)	- bij gebruik van Cl of SO ₄ 1 jaar opbrengstderiving behandeld gedeelte	
hydrologisch	80 - 85	12 - 20	p.m. ³⁾	- geen effecten op gewas - fosfaatgift tot gewasonttrekking mogelijk (beweiding)	- egalisatie en (beperkte) her- inrichting noodzakelijk - minder flexibel	- duurzaam

¹⁾ fosfaatvrije bemesting gehele perceel (geen beweiding)

²⁾ fosfaatvrije bufferzones (beweiding deel van het perceel en aankoop grond bufferzone)

³⁾ Fe(NO₃)₃ als uitgangsmateriaal voor synthese ijzerhydroxyde (ijzerdosering 0,2% Fe)

⁴⁾ FeSO₄ of FeCl₃ als uitgangsmateriaal voor synthese ijzerhydroxyde (ijzerdosering 0,2% Fe)

¹⁾ op basis van de resultaten van de onderzoekslocatie en rendement ten opzichte van fosfaatgiften gelijk aan de gewasonttrekking zonder maatregel ('nulsituatie')

²⁾ bij een areaal aan natte gronden (III/V en III'/V') van 2000 ha

³⁾ pompkosten en onderhoudskosten bemaling

te kunnen rekenen en lange termijnsvoorspellingen van de effectiviteit van de onderzochte maatregelen te kunnen uitvoeren.

De fosfaattoestand van de onderzochte percelen ('*nulsituatie*') is representatief voor de gronden in het Schuitenbeekgebied die voor een groot deel bijdragen aan de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater. De fosfaatverzadigingsgraad van de percelen varieert van 34 tot 88%.

Het rendement van de verschillende maatregelen om de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater te verminderen (zoals deze op de onderzoekslocatie is vastgesteld), is in een bijgaand overzicht weergegeven. Tevens zijn de voor- en nadelen van de maatregelen, de duurzaamheid en de globale kosten voor het stroomgebied van de Schuitenbeek aangegeven.

De resultaten van de drie maatregelen worden kort toegelicht.

Uit het veldonderzoek naar het effect van *bemestingsmaatregelen* blijkt dat wél of niet bemesten een duidelijk effect heeft op de fosfaatuitspoeling uit de bouwvoor naar diepere lagen. Daarnaast blijkt de hoogte van de mestgift (110 of 200 kg P₂O₅ ha⁻¹) voor de uitspoeling minder belangrijk te zijn dan de mate van fosfaatverzadiging van de bodem. Verder blijkt dat zowel vóór als ná bemesting ca. 80% van de totale fosfaatuitspoeling in de vorm van anorganisch (ortho)fosfaat uitspoelt naar diepere lagen.

Met behulp van het waterkwaliteitsmodel ANIMO is de gemiddelde (20 jaar) jaarlijkse fosfaatuitspoeling (ortho-P) berekend voor een nat grasland perceel. Ten opzichte van fosfaatgiften gelijk aan de gewasonttrekking zal bij fosfaatvrije bemesting de komende 20 jaar de *fosfaatuitspoeling uit de bouwvoor (0-25 cm) naar diepere lagen* gemiddeld dalen van ca. 3 à 30 kg ha⁻¹ P naar ca. 1 à 10 kg ha⁻¹ P bij een fosfaatverzadigingsgraad van resp. 25 en 75%. Afhankelijk van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem varieert de *fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater* bij nulbemesting van ca. 0,5 à 1,2 kg P ha⁻¹ j⁻¹ (bij een fosfaatverzadigingsgraad van resp. 25 en 75%). Boven een fosfaatverzadigingsgraad van 75% kan de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater oplopen tot enkele kg P ha⁻¹ j⁻¹. De reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater die door fosfaatvrije bemesting kan worden bereikt, (ten opzichte van fosfaatgiften gelijk aan de opname door het gewas) bedraagt ca. 10 à 35% afhankelijk van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem (resp. 25 en 75%). De gemiddelde reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater vanuit natte landbouwgronden in het stroomgebied van de Schuitenbeek wordt geschat op 20%, indien de fosfaatbemesting gelijk aan de fosfaatopname door het gewas (110 kg P₂O₅ ha⁻¹ j⁻¹) wordt verlaagd tot nul.

Er zijn geen milieukundige en landbouwkundige nadelen (qua gewasproductie) te verwachten indien de dierlijke mestgiften vervangen worden door fosfaatvrije kunstmestgiften. De effecten op de bedrijfsvoering zijn niet geïnventariseerd.

De kosten van vervanging van dierlijke mestgiften door fosfaatvrije kunstmestgiften voor 2000 ha natte gronden (Gt III/V en III*/V*) in het stroomgebied van de Schuitenbeek (variant a in het overzicht), bedragen ca. 1,3 miljoen gulden per jaar. Indien

beweidingsmogelijkheid moet blijven tot een niveau van fosfaatgiften gelijk van de gewasonttrekking (variant b), dient een strook (10 m) aan weerszijde van de sloot afgezet te worden (omdat deze strook niet beweid mag worden). De kosten voor de aankoop van deze grond bedragen ca. 17 miljoen, maar brengt verder geen jaarlijkse kosten met zich mee.

Uit het laboratoriumonderzoek naar de effectiviteit van materialen die aan de bodem kunnen worden toegediend om de overmaat aan fosfaat te binden (*bodemchemische maatregel*), bleek dat alleen met aluminiumoxyde en vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde een sterke reductie van de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing optreedt. Mede vanwege het feit dat gesynthetiseerd ijzerhydroxyde ongeveer 50 maal zo goedkoop is als aluminiumoxyde, is het onderzoek voortgezet met gesynthetiseerd ijzerhydroxyde. Ijzerhydroxyde kan gesynthetiseerd worden uit verschillende uitgangsmaterialen (FeCl_3 , FeSO_4 , FeCO_3 en $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ in combinatie met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (gebluste kalk)). Hierbij ontstaat een suspensie van ijzerhydroxyde en calciumzout (bijproduct). In het laboratorium is vastgesteld dat alleen FeCO_3 niet bruikbaar is, aangezien dit produkt nagenoeg niet oplost. De effectiviteit van de overige gesynthetiseerde ijzerhydroxyden om fosfaat te binden is gelijk.

Als gevolg van toediening van ijzerhydroxyde aan fosfaatverzadigd bouwvoor-materiaal daalt de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing sterk, maar daalt ook het Pw-getal van de bouwvoor, wat een maat is voor het direct voor het gewas beschikbaar fosfaat. Bij de in de praktijk waaarschijnlijk maximaal benodigde hoeveelheid ijzerhydroxyde (0,2% Fe) treden volgens een potproef echter geen opbrengstverliezen op.

Ijzerhydroxydesuspensie kan op relatief eenvoudige wijze met behulp van een spitmachine of een injecteur door de bodem gemengd worden (ca. 50 cm diep). Bij gebruik van de injecteur is de reductie van de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing op de ijzerplots van de onderzoekslokatie minder groot (60-80%) dan bij gebruik van de spitmachine (80-95%). Dit is een gevolg van inhomogene menging. Een nadeel van het gebruik van de spitmachine is dat het organische-stofgehalte van de bouwvoor (ca. 25 cm) wordt gehalveerd (verschraling).

De daling van de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing na toediening van de ijzerhydroxydesuspensie kan goed gemodelleerd worden met behulp van de modelparameters die in het laboratorium zijn bepaald.

Met behulp van modelsimulaties is nagegaan wat het effect is van ijzerdosering en inwerkdiepte op de reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater. De simulaties zijn uitgevoerd voor een aantal percelen van de onderzoekslokatie die verschillen in fosfaatprofiel. Uit deze berekeningen blijkt dat een reductie van 60 à 80% bereikt kan worden als de bodem behandeld wordt met 0,2% Fe tot de diepte waarop het verhoogde fosfaatgehalte wordt gevonden. Bij een hogere ijzerdosering (0,3% Fe) neemt de reductie met ongeveer 10% toe. Bij een lagere ijzerdosering (0,1%) daalt de reductie met ca. 20%. Het ijzerhydroxyde wordt ingewerkt over een breedte van 10 m aan weerszijde van de sloot, waarbij tevens het sloottalud wordt meebehandeld. Op de onderzoekslokatie is deze inwerkbreedte bepaald aan de hand

van traceronderzoek, waaruit bleek dat het bodemwater dat uit dit deel van het perceel afvoert naar de sloot, ondiep door de bodem tot afvoer komt. De berekende reductie van 60 à 80% kan tijdelijk 10 à 30% lager liggen, indien het sloottalud niet met ijzerhydroxyde wordt behandeld. Dit wordt veroorzaakt door nalevering van fosfaat uit het sloottalud.

Het nadeel van het gebruik van de ijzerhoudende uitgangsmaterialen is dat ook het bijproduct wordt toegediend. Na het (eenmalig) inwerken van ijzernitrat/ kalkmelk-suspensie is de stikstofaanvoer ca. 25 maal zo hoog als jaarlijks noodzakelijk is (340 kg N/ha). Hierdoor kunnen 1 à 2 jaar sterk verhoogde nitraatconcentraties in de perceelssloot worden aangetroffen. Bij gebruik van ijzernitrat zijn de gevolgen voor de landbouw beperkt tot eenmalige bestrijding van brandnetels. De investeringskosten zijn bij dit uitgangsmateriaal echter het hoogst (ca. 34 à 36 miljoen gulden voor het natte areaal landbouwgronden in het Schuitenbeekgebied). Indien ijzersulfaat dan wel ijzerchloride als uitgangsmateriaal worden gebruikt, zijn de investeringskosten ruwweg 2 maal zo laag (18 à 20 miljoen gulden). Een bijkomend nadeel is dan wel dat de met ijzerhydroxyde behandelde strook aan weerszijde van de sloot (10 m) pas na 1 jaar ingezaaid kan worden in verband met de hoge zoutconcentraties (kosten van opbrengstderving ca. 0,8 miljoen gulden).

Een voordeel van deze maatregel ten opzichte van de bemestingsmaatregel is, dat de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater beduidend sterker daalt, en dat beweiding mogelijk blijft, mits de totale fosfaatgift niet hoger is dan de fosfaatopname door het gewas. Tevens is de bodemchemische maatregel een flexibele maatregel die op perceelsschaal kan worden toegepast. Onzekerheid bestaat op dit moment nog ten aanzien van het teruglopen van het fosfaatbindend vermogen van vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde op lange termijn.

In een oriënterende modelstudie naar een aantal *hydrologische* maatregelen om de fosfaatsuitspoeling uit landbouwgronden te reduceren, is één maatregel als meest perspectiefrijk naar voren gekomen. Bij deze maatregel worden de greppels gedicht en wordt de ontwatering van het perceel vrijwel geheel via diepe drains verzorgd, zonder dat de diepte waarop het perceel ontwatert (ontwateringsbasis), wordt gewijzigd. Bij de uitvoering van de hydrologische maatregel was het, als gevolg van de helling van het gebied en de sterke bolling van het maaiveld, niet mogelijk om de ontwatering van de perceelssloot uit te schakelen. De essentie van de hydrologische maatregel is echter de werking van de diepe drain.

Voor de gehele meetperiode is de gemiddelde ortho-fosfaatconcentratie van de drainafvoer $0,14 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}$ (standaardafwijking $s = 0,09 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}$, $n = 98$) en bedraagt de gemiddelde totaal-P-concentratie ca. $0,17 \text{ mg P l}^{-1}$. Dit is niet veel hoger dan de algemene milieukwaliteitsnorm die voor het oppervlaktewater geldt ($0,15 \text{ mg.l}^{-1}$ totaal-P), maar beduidend lager dan de fosfaatsuitspoelingsconcentratie die in de perceelsslotten wordt gemeten die langs dergelijke fosfaatverzadigde percelen liggen ($1 \text{ à } 1,5 \text{ mg l}^{-1} \text{ P}$). Hiermee is de werking van de maatregel in principe aangetoond. Er is een stijgende trend in de ortho-fosfaatconcentraties van de drainafvoer geconstateerd. In de periode van augustus 1991 tot eind juni 1993 is de gemiddelde concentratie $0,12 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}$ ($s = 0,07 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}$, $n = 75$) en van 1 juli 1993 tot 10

augustus 1994 $0,22 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}$ ($s = 0,11 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}$, $n = 23$). Met modelsimulaties kan deze stijging echter niet verklaard worden. Dit zou er op kunnen wijzen dat bepaalde processen een rol spelen die nog niet in het model zijn ingebouwd, zoals bijvoorbeeld preferente stroombanen.

Als gevolg van de helling van het gebied en de bolling van de percelen in de richting loodrecht op de sloot, is bij hoge grondwaterstanden ondiepe afvoer met hoge fosfaatuitspoelingsconcentraties naar de perceelssloot opgetreden. Deze situatie kan alleen worden voorkomen indien de percelen worden geëgaliseerd en de ontwateringsfunctie van de perceelssloten (nagenoeg) geheel wordt uitgeschakeld. Uitgaande van de gemeten fosfaatvrachten van twee perceelssloten is vastgesteld dat dan een maximale reductie van 88-89% realiseerbaar is.

Voor de uitvoering van de hydrologische maatregel op regionale schaal zijn een aantal varianten onderzocht. Hieruit is naar voren gekomen dat een diep drainagestelsel het beste uitgevoerd kan worden in combinatie met een stelsel van ondiepe, groene sloten. Deze ondiepe, groene sloten zijn een voorziening voor dat deel van de neerslag dat niet kan infiltreren in de bodem en dus niet voor de afvoer van het grondwater. Als verondersteld wordt dat 5 à 10% van het jaargemiddelde netto-neerslagoverschot niet infiltreert, bedraagt de reductie van de fosfaatbelasting van de sloten 80 à 85% (berekend op basis van de resultaten van de onderzoekslokatie). De investeringskosten van deze uitvoering worden voor het natte areaal van het stroomgebied van de Schuitenbeek geschat op 12-20 miljoen gulden. Omdat in deze studie geen ontwerp van het drainagesysteem is gemaakt, zijn onderhoudskosten en mogelijke pompkosten niet bekend. De samenstelling en de grootte van de kosten van de hydrologische maatregel hangen sterk samen met de omstandigheden (kwel-situatie, bodemtextuur, topografie, geconcentreerde dan wel verspreide ligging van het drainagesysteem).

Een voordeel van de hydrologische maatregel ten opzichte van de bemestingsmaatregel is dat de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater beduidend sterker daalt en beweiding tot een niveau van fosfaatopname door het gewas mogelijk blijft. Een nadeel ten opzichte van beide andere maatregelen is, dat een (beperkte) herinrichting van het landbouwgebied noodzakelijk is. Daarbij komt dat deze maatregel in het natte deel van het Schuitenbeekgebied minder goed op perceelsschaal kan worden toegepast (minder flexibel).

Samenvattend worden op grond van de resultaten van deze perceelstudie de volgende conclusies getrokken:

- qua *effectiviteit* om de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden te verminderen heeft de hydrologische maatregel het hoogste rendement (80-85%), de bodemchemische maatregel een beperkt lager rendement (60-80%) en de bemestingsmaatregel het laagste rendement (10-35%);
- de *kosten* van de bodemchemische maatregel zijn (waarschijnlijk) het hoogst;
- de bemestings- en bodemchemische maatregel zijn flexibeler toepasbaar dan de hydrologische maatregel, waarbij opgemerkt wordt dat elke maatregel op zich specifieke *voor- en nadelen* heeft.

1 Inleiding

In de loop van de jaren 80 is duidelijk geworden dat in de gebieden met intensieve veehouderij, zoals het centrale oostelijke en zuidelijke zandgebied, de dierlijke mestgiften zo hoog waren dat een sterke toename van de fosfaatbelasting van het grond- en oppervlaktewater op langere termijn onvermijdelijk leek bij achterwege blijven van mestwetgeving (Lexmond et al., 1982; Breeuwsma en Schoumans, 1986). Na de intrede van de gefaseerde fosfaatsnormering, heeft het onderzoek zich gericht op het vaststellen van de criteria voor de definitie van een fosfaatverzadigde grond (TCB, 1990), die uiteindelijk alleen voor kalkloze zandgronden is geconcretiseerd. Een kalkloze zandgrond is 'fosfaatverzadigd' indien 25 procent van de maximale capaciteit van de bodem om fosfaat te binden, berekend tot aan de gemiddelde hoogste grondwaterstand, is verbruikt. Bij deze mate van fosfaatverzadiging worden op termijn fosfaatconcentraties in dit bovenste grondwater aangetroffen die boven de natuurlijke fosfaatachtergrondconcentraties zullen liggen ($0,10 \text{ mg.l}^{-1}$ ortho-P; TCB, 1990). Uitgaande van deze vastgelegde definitie van een fosfaatverzadigde grond is het definitieve areaal fosfaatverzadigde gronden in de mestoverschotgebieden berekend (Breeuwsma et al., 1990 ; Reijerink en Breeuwsma, 1992). Uit deze berekeningen blijkt dat ongeveer 70% van het areaal cultuurland in de mestoverschotgebieden thans 'fosfaatverzadigd' is. De afgelopen twee jaar heeft het onderzoek zich vooral gericht op de mogelijke invulling van de hoogte van een fosfaat-evenwichtsbemesting, ingaande vanaf het jaar 2000, en de gevolgen daarvan (Breeuwsma en Berghs, 1993; Oenema en Van Dijk, 1994; Van der Salm et al., i.v.; Schoumans, 1995). Kroes et al. (1990) gaven met behulp van modelberekeningen aan dat bij een bemestingsniveau, waarbij giften worden gehanteerd die gelijk zijn aan de jaarlijkse fosfaatonttrekking, geen vermindering van de fosfaatuitspoeling verwacht hoeft te worden in die gebieden waar de fosfaatophoping in de bodem groot is geweest. Van der Zee (1988) heeft berekend dat het nog tientallen jaren, en in sommige gevallen meer dan 100 jaar, zal duren alvorens uit een sterk fosfaatverzadigde grond al het fosfaat zal zijn uitgespoeld tot het niveau dat als norm is gesteld in het protocol fosfaatverzadigde gronden ($0,10 \text{ mg.l}^{-1}$ ortho-P; TCB, 1990). Dit betekent dat in een groot deel van de Nederlandse zandgebieden de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater pas op lange termijn zal verminderen.

Tot een van deze gebieden behoort het Schuitenbeekgebied waar is gebleken dat 80% van het landbouwareaal voldoet aan de definitie van een fosfaatverzadigde grond (Breeuwsma et al., 1989). De Schuitenbeek mondt uit in de randmeren waar thans wordt getracht met diverse maatregelen de waterkwaliteit te verbeteren. Duidelijk is geworden dat dit beheer alleen kans van slagen heeft, indien de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden op korte termijn wordt gereduceerd. Op grond hiervan heeft de projectgroep BOVAR (Bestrijding Overmatige Algenbloei Randmeren) geconcludeerd dat in aanvulling op het nationale beleid extra maatregelen noodzakelijk zijn, om op korte termijn de fosfaatbelasting naar het grond- en oppervlaktewater te verminderen (Dijkstra et al., 1990; Haskoning, 1992).

In opdracht van de projectgroep BOVAR en gefinancierd werd door het Ministerie van LNV, de Provincie Gelderland, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied,

Ministerie van VROM (in het kader van ROM-project Gelderse Vallei) en het FOMA (Financieringsoverleg Mest- en Ammoniakonderzoek) is in de periode 1989-1994 door DLO-Staring Centrum in samenwerking met IMAG-DLO een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden van aanvullende maatregelen ter vermindering van de fosfaatsuitleiding uit landbouwgronden. Het onderzoek is verdeeld over twee fasen. Het doel van de eerste fase (1989-1991) was de tot standkoming van een selectie van maatregelen, die geen nadelige gevolgen mocht hebben voor het landbouwbedrijfsleven. In de tweede (1993-1994) fase zijn de geselecteerde maatregelen op een onderzoekslocatie in de praktijk uitgetest.

Om de effecten van maatregelen te kunnen evalueren, heeft monitoring plaatsgevonden van de fosfaatsuitleiding vanuit de landbouwpercelen naar het grond- en oppervlaktewater ('nulsituatie') op twee onderzoekslocaties. Vervolgens zijn de effecten van aanvullende maatregelen op een van deze twee onderzoekslocaties gemeten.

Een van de eenvoudigste aanvullende bemestingsmaatregel op het nationale beleid, is het reduceren van het bemestingsniveau tot een niveau beneden de fosfaatbehoefte van het gewas. Het effect van nulbemesting, fosfaatgift gelijk aan de gewasonttrekking en overbemesting op de fosfaatsuitleiding naar het grondwater is in drievoud op een aantal proefvelden gemeten. Tevens zijn modelberekeningen uitgevoerd om de lange-termijn effecten van de fosfaatbelasting naar het oppervlaktewater te simuleren.

Een van de mogelijke andere maatregelen om de fosfaatsuitleiding te reduceren, is de potentiële hoeveelheid desorbeerbaar fosfaat die in de bodem aanwezig is zodanig te binden dat de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing en het grondwater sterk daalt. Van nature bezit de bodem verbindingen die fosfaat sterk kunnen binden namelijk de micro kristallijne aluminium- en ijzer(hydr)oxyden. Ten gevolge van de overbemesting van de bodem wordt de capaciteit om fosfaat te binden gereduceerd. In sterk fosfaatverzadigde gronden is deze capaciteit in de bovengrond tot aan de gemiddelde hoogste grondwaterstand grotendeels verbruikt, waardoor dan ook hoge fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater kunnen optreden. Op grond van laboratoriumonderzoek naar de effectiviteit van verschillende aluminium- en ijzermaterialen om fosfaat te binden, is het materiaal met de beste eigenschappen geselecteerd en zijn veldproeven uitgevoerd, ter controle en ter validatie van modelsimulaties. Met behulp van een- en twee-dimensionale modellen is vervolgens de wijze van dosering voor praktijksituaties geoptimaliseerd en zijn de lange-termijn effecten doorgerekend.

Naast deze bodemchemische maatregelen zijn ook hydrologische maatregelen mogelijk, die er op gericht zijn om de ondiepe laterale fosfaatsuitleiding uit fosfaatverzadigde lagen naar het oppervlaktewater te verminderen. Een van deze maatregelen is op de onderzoekslocatie uitgevoerd. Met behulp van transportmodellen zijn de lange-termijn effecten doorgerekend.

Dit rapport bevat de belangrijkste resultaten van de karakterisering van de onderzoekslocatie (chemisch, fysisch en hydrologisch) als 'nulsituatie' (hoofdstuk 2) en de meting en modellering effectiviteit van respectievelijk de bemestings-

(hoofdstuk 3), bodemchemische- (hoofdstuk 4) en hydrologische maatregelen (hoofdstuk 5) op de onderzoekslocatie. Tevens heeft een kostenanalyse (hoofdstuk 6) plaatsgevonden en zijn de voor- en nadelen van de maatregelen geïnventariseerd (hoofdstuk 7). Tot slot staan in hoofdstuk 8 de belangrijkste conclusies vermeld.

2 Beschrijving onderzoekslocaties

2.1 Ligging en bodemgesteldheid

Er zijn twee proeflocaties ingericht in het noordwestelijk deel van het Schuitenbeekgebied. De proeflocaties zijn representatief voor de fosfaatverzadigde gronden in het gebied, en voldoen aan de meeste (meet)technische eisen die bij de selectie van de proeflocaties zijn gehanteerd.

De proeflocaties worden in het vervolg 'locatie 1' en 'locatie 2' genoemd. Op locatie 1 liggen drie percelen (nr. 1, 2 en 3), gescheiden door perceelssloten (aanhangel 1). Beide perceelssloten vinden hun oorsprong op het perceel. De afvoer van deze sloten (nr. 1 en 2) loopt via een verzamelsloot (nr. 3). Op locatie 2 (aanhangel 2) liggen twee percelen (nr. 4 en 5), eveneens gescheiden door een 'beginnende' sloot (nr. 4). De helling van het maaiveld rond de locaties is circa 0,2%. De percelen van locatie 1 zijn natte beekerdgronden (perceel 1: grondwatertrap III en percelen 2 en 3: grondwatertrap III*) met ongeveer een gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) van 30 en een gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) van 100 cm - mv. Plaatselijk komen op de percelen ijzerrijke lagen voor die zijn ontstaan als gevolg van aanrijking met ijzerrijk kwelwater. Het grondgebruik is grasland en de percelen zijn in het verleden gediëpploegd en/of geëgaliseerd.

Bij de selectie van de onderzoekslocaties locatie 1 en locatie 2 is de bodem van de percelen in kaart gebracht met een vijftal profielbeschrijvingen op elk perceel, waaraan chemische analyses zijn uitgevoerd.

Perceel 1 is ca. 50 jaar geleden gediëpploegd tot een diepte van 0,80 m en perceel 2 en 3 zijn ca. 40 jaar geleden geëgaliseerd. Door diepe verwerking worden de oorspronkelijke lagen van het bodemprofiel deels gemengd en deels onder een hoek van ongeveer 45 graden gezet. Door grondbewerking en biologische activiteit ontstaat een nieuwe, sterk gemengde bouwvoor. Op locatie 1 bestaat de verwerkte laag uit zeer fijn zand, sterk lemig en zwak lemig, humeus en humusarm. Ook worden grof zand en grind aangetroffen, evenals zandig veen en venig zand. IJzerconcreties komen veelvuldig voor. Op locatie 2 is de heterogeniteit deels al van nature aanwezig. De heterogeniteit is hier binnen de percelen nog groter dan op locatie 1. De percelen 4 en 5 zijn verwerkt tot een diepte van 0,35 tot 0,55 m.

Op de percelen zijn grondwaterstandsbuizen geplaatst waarin de grondwaterstand vrijwel wekelijks is gemeten. Tevens zijn op grotere afstand van de percelen diepe grondwaterstandsbuizen geplaatst om een indruk te krijgen van de regionale grondwaterstroming. Op de percelen zijn op verschillende plaatsen en diepten cups ingebracht om het bodemvocht te onttrekken, ter bepaling van de fosfaatconcentratie in de verschillende bodemlagen. Op locatie 1 is een analoge regenmeter geplaatst. Van perceelssloten is de waterafvoer bepaald en zijn debietproportioneel watermonsters genomen. De erfafvoer is omgeleid buiten de locatie en is incidenteel bemonsterd, zodat alleen de fosfaatuitspoeling vanuit de landbouwpercelen wordt

gemeten. Voor een volledige beschrijving van de onderzoekslocatie en de inrichting wordt verwezen naar Schoumans en Kruijne (1995b).

2.2 Fosfaattoestand van de bodem

De fosfaattoestand van de percelen laat zich goed beschrijven aan de hand van de mate waarin de capaciteit van de bodem om fosfaat te binden reeds verbruikt is (fosfaatverzadigingsgraad), het deel van het fosfaat dat reversibel gebonden is en nog kan gaan uitspoelen (desorbeerbaar fosfaat) en de fosfaatconcentraties die in de bodemoplossing gemeten worden.

De capaciteit van de bodem om fosfaat te binden hangt in een kalkloze zandgronden af van het gehalte aan amorfe Al- en Fe-(hydr)oxyden. Deze (hydr)oxyden kunnen uit de bodem geëxtraheerd worden met een oxalaatoplossing. Maximaal 50% van het in de bodem beschikbare Al_{ox} en Fe_{ox} kan met fosfaat reageren. Een belangrijke maat in de bodem is dan ook de fosfaatbezettingsfractie (FBF), die als volgt is gedefinieerd

$$FBF = \frac{P_{ox}}{Al_{ox} + Fe_{ox}} \quad (1)$$

waarbij;

FBF	= fosfaatbezettingsfractie	(mol mol ⁻¹)
P_{ox}	= oxalaat extraheerbaar fosfaat	(mmol.kg ⁻¹)
Al_{ox}	= oxalaat extraheerbaar aluminium	(mmol.kg ⁻¹)
Fe_{ox}	= oxalaat extraheerbaar ijzer	(mmol.kg ⁻¹)

Indien de fosfaatbezettingsfractie van een laag gelijk is aan 0,5 kan deze laag dus vrijwel geen fosfaat meer binden.

Bij de definitie van een fosfaatverzadigde grond wordt de fosfaatverzadigingsgraad (FVG) van de bodem gehanteerd. Deze is als volgt gedefinieerd:

$$FVG = \frac{100 P_{act}}{FBV_t} \quad (2)$$

P_{act}	= actueel fosfaatgehalte van de bodem tot aan GHG	(kg.ha ⁻¹ P ₂ O ₅)
FBV_t	= totaal fosfaatbindend vermogen tot aan GHG	(kg.ha ⁻¹ P ₂ O ₅)
FVG	= fosfaatverzadigingsgraad	(%)

Bij een fosfaatverzadigingsgraad van 25% of hoger wordt er vanuit gegaan dat de bodem 'fosfaatverzadigd' is. Dit betekent echter niet dat de bodem geen fosfaat meer kan binden, aangezien slechts 25% van de totale fosfaatbindingscapaciteit verbruikt is. De bodem wordt 'fosfaatverzadigd' genoemd omdat de bodem *gevoelig* is voor fosfaatuitspoeling aangezien op termijn verhoogde fosfaatconcentraties kunnen worden aangetroffen die boven de door de TCB gestelde natuurlijke fosfaatachtergrondconcentratie (0,10 mg.l⁻¹ ortho-P) zullen liggen.

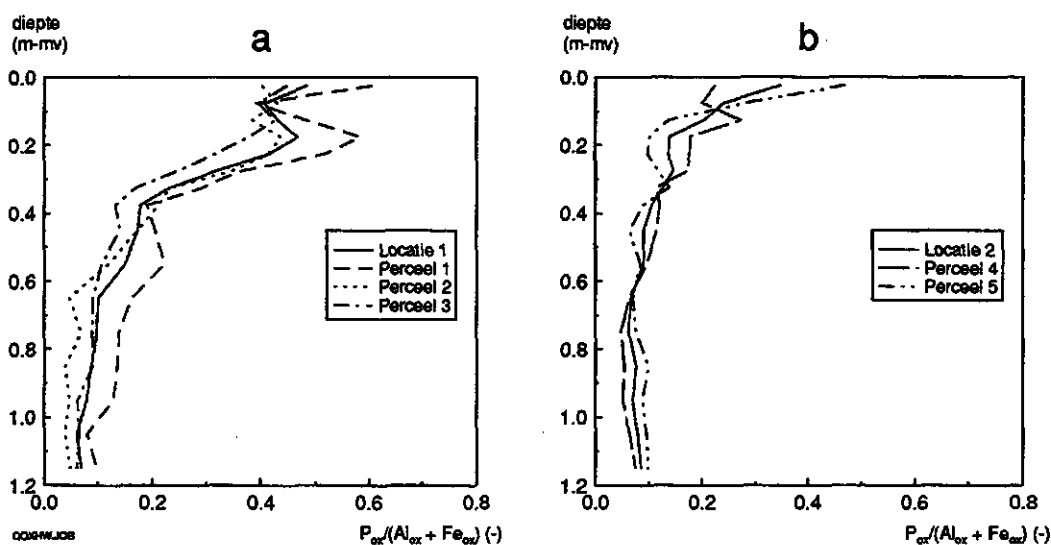


Fig. 1 Gemiddelde fosfaatbezettingsfractie van de bodem op resp. locatie 1 (a) en locatie 2 (b) en van de afzonderlijke percelen van deze locaties.

Bij de aanvang van de veldstudie zijn op 5 locaties per perceel voor 16 lagen de gehalten P_{ox} , Al_{ox} en Fe_{ox} bepaald (laag 0 - 0,40 m per 0,05 m; laag 0,40 - 1,20 m diepte per 0,10 m). In figuur 1 is het gemiddelde verloop met de diepte van de fosfaatbezettingsfractie (van de afzonderlijke percelen van de locaties) uitgezet.

Door kwelsituaties komen plaatselijk ijzerrijke lagen voor in de verwerkte AC-horizont op locatie 1 (perceel 1, 2 en 3) en in de bouwvoor op locatie 2 (perceel 4 en 5). Deze lagen bevatten relatief veel fosfaat dat met de ijzerrijke kwel is aangevoerd en dus van nature aanwezig is. Hoge fosfaatgehalten worden in perceel 1 tot op grotere diepte aangetroffen dan in perceel 2 en 3. Dit komt waarschijnlijk doordat perceel 1 50 jaar geleden is gediëpploegd (0,8 m). Het profiel van fosfaatbezettingsfractie is voor perceel 2 en 3 min of meer gelijk. Deze twee percelen zijn in de jaren '50 geëgaliseerd tot een diepte van 0,5 à 0,6 m. Op deze percelen is ook de bouwvoor dieper en beter ontwikkeld dan op Perceel 1. Het gemiddelde fosfaatgehalte in de bovengrond (0-0,6 m) van locatie 1 en locatie 2 is respectievelijk 12,2 en 9,5 ton P_2O_5 ha^{-1} . De fosfaatverzadigingsgraad van de percelen, berekend tot aan de gemiddelde hoogste grondwaterstand GHG (30 cm - mv.) conform de definitie van een fosfaatverzadigde grond (Van der Zee, 1990 a en b), bedraagt voor perceel 1 tot en met 5 respectievelijk 88, 71, 71, 34 en 39%.

Voor elk perceel is één boring geselecteerd om te bepalen welk deel van het fosfaat in de bovengrond (0 - 0,60 m) desorbeerbaar is. Figuur 2 bevat de gemiddelde hoeveelheid desorbeerbaar fosfaat voor de 3 percelen op locatie 1 en 2 percelen op locatie 2.

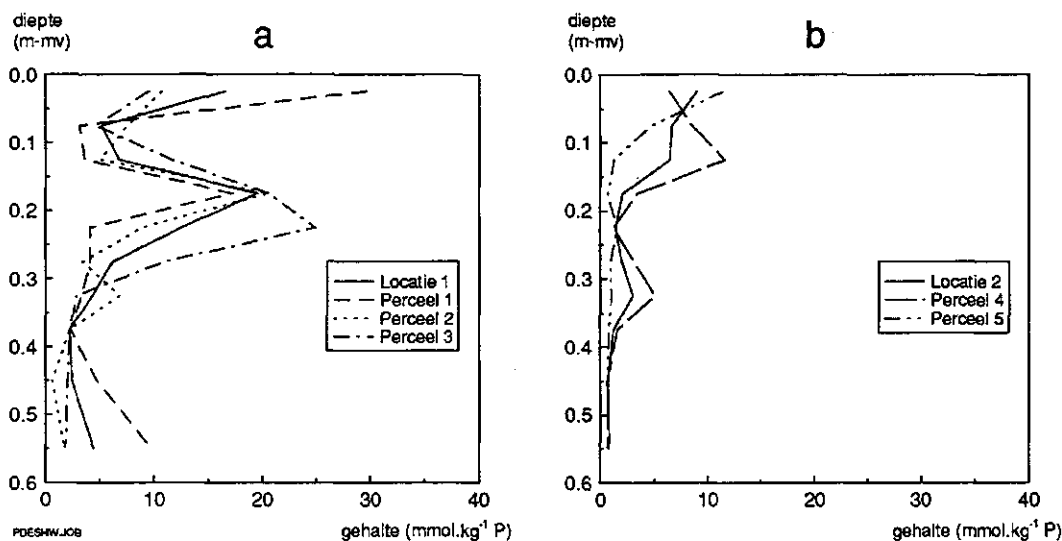


Fig. 2 Gemiddeld gehalte desorbeerbaar fosfaat van de bodem op resp. locatie 1 (a) en locatie 2 (b) en van de afzonderlijke percelen van deze twee locaties

De gemiddelde hoeveelheid desorbeerbaar fosfaat in de bovengrond (0-0,6 m) van locatie 1 en locatie 2 is respectievelijk 4,3 en 1,7 ton P_2O_5 ha^{-1} , waarvan het merendeel gelokaliseerd is in de bouwvoor (0-25 cm). Uitgaande van een gemiddelde fosfaatconcentratie in deze bovengrond van 2 $mg.l^{-1}$ en een netto neerslagoverschot van 250 $mm.j^{-1}$, leidt dit tot een periode met verhoogde fosfaatuitspoeling vanuit de bouwvoor naar diepere lagen van ongeveer 375 jaar op locatie 1 en 150 jaar op locatie 2. Als gevolg van deze uitspoeling zal de fosfaatverzadigingstoestand van de ondergrond in de toekomst toenemen.

2.3 Fosfaatconcentraties in het bodemvocht

De fosfaatconcentraties in het bodemvocht zijn in de regel bepaald door middel van bodemvochtonttrekking. Tijdens de meetperiode is mest toegediend in de vorm van varkensdrijfmest, met giften die gelijk zijn aan de jaarlijkse fosfaatonttrekking door het gewas ca. 110 $kg.ha^{-1}$ P_2O_5 . Om de fosfaatconcentratie in het bodemvocht te kunnen meten, zijn cups in de bodem geplaatst waaraan onder vacuüm het bodemvocht kan worden onttrokken. Deze cups zijn geplaatst op 0,20, 0,30, 0,40, 0,60, 0,70 en 0,90 m diepte in twee raaien op 1, 7 en 15 m afstand en aan weerszijden van Sloot 2 en 4 en in een later stadium (na de aanleg van de hydrologische maatregel) ook bij sloot 1. Ondanks het grote aantal bemonsteringsronden dat is uitgevoerd (20) zijn er geen grote concentratieveranderingen in de tijd geconstateerd. Uit deze bemonsteringsronden blijkt dat op een aantal percelen de concentratie orthofosfaat in de bovengrond op kleine afstand tot de sloot lager is dan op grote afstand (Kruijne et al., 1995). Uit de gegevens blijkt tevens dat het verloop met de diepte van de fosfaatconcentratie (figuur 3) overeenkomt met het verloop van de fosfaatbezettingfracatie en de hoeveelheid desorbeerbaar fosfaat.

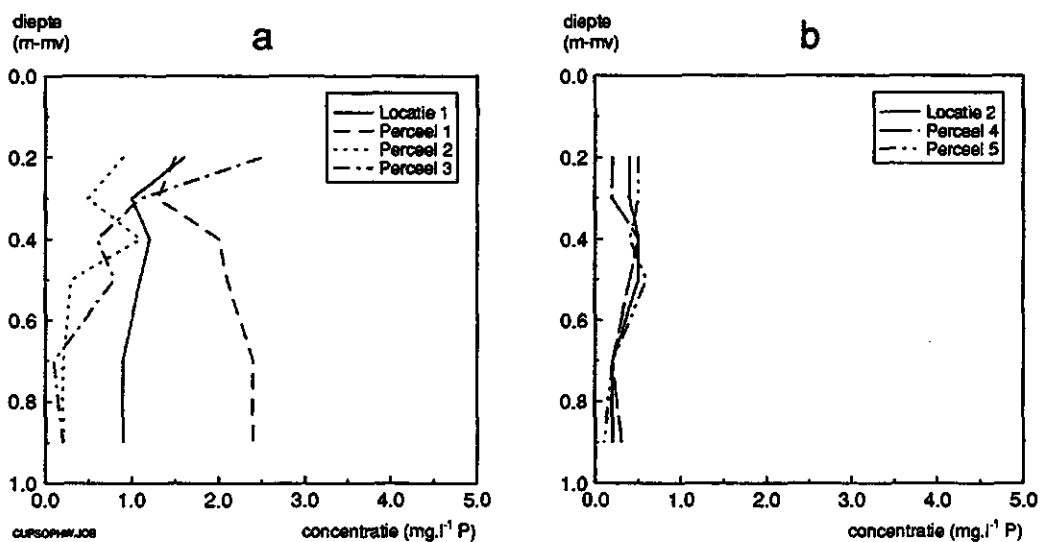


Fig. 3 Gemiddelde concentratie orthofosfaat in het bodemvocht op resp. locatie 1 (a) en locatie 2 (b) en van de afzonderlijke percelen van deze locaties

2.4 Fosfaatafvoer van de perceelssloten

De afvoer van de vier meetsloten is van 22 februari 1991 tot 10 oktober 1994 debietproportioneel bemonsterd en de monsters zijn wekelijks verzameld. Van alle deelmonsters (2376 in totaal) is de concentratie orthofosfaat bepaald. Tot medio 1992 is van een deel van de monsters tevens de concentratie totaal fosfaat bepaald. Voor de deelmonsters waarvan beide concentraties zijn bepaald, is de gemiddelde verhouding tussen de concentratie orthofosfaat en totaal fosfaat berekend. Over de gehele meetperiode bedraagt de gemiddelde verhouding o-P/t-P in de 3 meetsloten resp. 0,89, 0,83 en 0,85 (Schoumans en Kruijne, 1995b). Dit betekent dat van de totale fosfaatuitspoeling de bijdrage van orthofosfaat ongeveer 86% is. Voor de calibratie van de modellen is de fosfaatvrucht van de meetsloten berekend uit het produkt van de weekgemiddelde concentratie orthofosfaat en het wekelijks afvoervolume (figuur 4). Aangezien bij sloot 1 de hydrologische maatregel is aangelegd zullen de resultaten van deze sloot in hoofdstuk 5 behandeld worden.

Uit figuur 4 blijkt dat in de periode juli 1993 tot en met juli 1994 de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater veel hoger is geweest dan gemeten is in de periode daarvoor (febr 1991 tot en met juni 1993). Tabel 1 bevat voor deze twee deelperioden de resultaten van de afvoeren, de fosfaatvruchten, de gemiddelde fosfaatuitspoelingsconcentraties en de gemiddelde grondwaterstand in perceel 2.

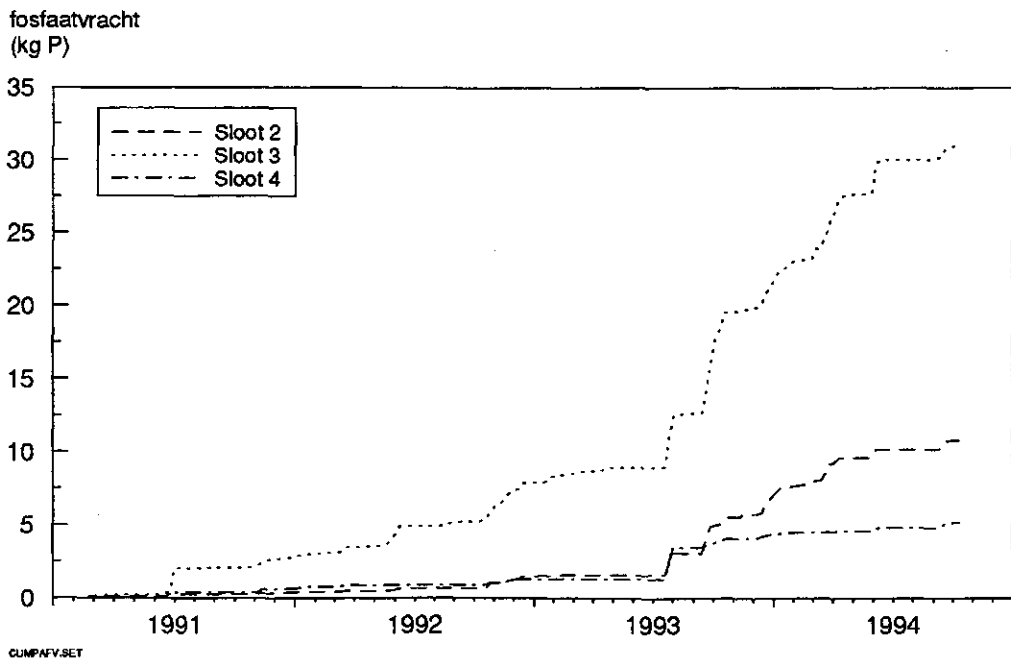


Fig. 4 Cumulatieve ortho-fosfaatvracht sloot 2, 3 (locatie 1) en 4 (locatie 2)

Tabel 1 Cumulatieve afvoer, ortho-fosfaatvracht en gemiddelde fosfaattuitspoelings-concentratie van de meetsloten voor twee deelperioden¹⁾

sloot	periode	afvoer	fosfaatvracht	gemiddelde concentratie	gemiddelde grondwaterstand
		10 ³ m ³	kg P	mg.l ⁻¹ P	m - maaiveld
2	1	2,82	1,43	0,51	0,71
3	1	32,53	8,36	0,26	
4	1	1,36	1,34	0,99	
2	2	4,23	6,96	1,65	0,62
3	2	29,50	20,13	0,68	
4	2	2,31	3,47	1,50	

1) deelperioden;

1: 19 februari 1991 t/m 30 juni 1993

2: 1 juli 1993 t/m 31 juli 1994

Uit tabel 1 blijkt dat de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater met een factor 2 à 3 kan toenemen in een nattere periode (de grondwaterstand in de tweede periode is gemiddeld 0,09 m hoger). De onderlinge verschillen tussen de sloten hangt samen met de fosfaat toestand van de omliggende percelen en de ontwatering (Kruijne et al., 1995).

3 Bemestingsmaatregelen

Om de gevolgen van fosfaatbemesting op de fosfaatbelasting van het grond- en oppervlaktewater zo nauwkeurig mogelijk in kaart te brengen zijn naast gedetailleerde veldmetingen ook modelberekeningen uitgevoerd. Doel van de veld-proef was inzicht te verschaffen in de hoogte van de anorganische en organische fosfaatconcentraties die uit de bouwvoor uitspoelen naar diepere lagen. De gevolgen voor de fosfaatbelasting van het diepere grondwater zijn niet meetbaar als gevolg van de fosfaatbindingscapaciteit van de ondergrond. Daarnaast geldt dat het effect op de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater alleen meetbaar is voor situaties met relatief hoge grondwaterstanden (die na de mestgiften reiken tot in de bouwvoor), omdat de fosfaatgiften veel lager zijn de fosfaatophoping die in de bodem aanwezig is. Aangezien het toekomstig verloop van de grondwaterstand niet op voorhand kan worden ingeschat, is er voor gekozen om de fosfaatuitspoeling uit de bouwvoor in detail te volgen in afhankelijkheid van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem en de grootte van de mestgift. De lange-termijn effecten voor de fosfaatbelasting van het grond- en oppervlaktewater zijn vervolgens met het gecalibreerde model (Kruijne et al., 1995) berekend.

3.1 Veldproeven

Het effect van het bemestingsniveau op het verloop van de fosfaatconcentratie is in detail onderzocht op negen plots op de onderzoekslocatie. Op verschillende diepten zijn zowel voor bemesting als na bemesting de fosfaatconcentraties (ortho-P en totaal P) in het bodemvocht gemeten (Boersbroek, 1993; Reinen, 1994). Van de 9 plots hebben 3 plots geen bemesting gekregen, 3 plots $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (fosfaatonttrekking door gras) en 3 plots $200 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (maximale gift volgens de normering). De mestgiften zijn in verband met de inrichting bovengronds toegediend in de vorm van varkensdrijfmest. Aangezien de mate van fosfaatverzadiging van de plots en de fosfaatconcentraties op gelijke diepten sterk varieerden, is getracht binnen elk bemestingsniveau zoveel mogelijk deze verschillen tot uitdrukking te laten komen.

De proef die in het voorjaar van 1993 is uitgevoerd bestond uit 6 bemonsteringsronden (2 rondes voor de eenmalige bemesting) en 4 rondes na bemesting. Als gevolg van de geringe neerslag in de periode na bemesting was de grondwaterstand relatief laag (50 cm-mv) en werd bij geen van de plots een verhoging van de fosfaatconcentratie aangetroffen (zelfs niet op 20 cm-mv) als gevolg van het uitblijven van verticaal transport in de bovengrond. De gemeten fosfaatconcentraties kunnen beschouwd worden als zijnde de fosfaatconcentraties die in evenwicht zijn met het geadsorbeerde fosfaat aan de bodemdeeltjes. In 1994 is de proef volledig herhaald. De eerste drie bemonsteringsronden voor bemesting in 1994 gaven gemiddeld vergelijkbare concentraties als die in 1993 gevonden waren. Na bemesting was de neerslag voldoende en werden op alle plots waaraan mest was toegediend verhoogde fosfaatconcentraties waargenomen. Figuur 5 geeft het verband tussen de gemiddelde ortho-P concentratie en de fosfaatbezettingsfractie ($\text{FBF} = \text{P}_{\text{ox}} / (\text{Al} + \text{Fe})_{\text{ox}}$) van de

bovengrond (0-40 cm) voor en na bemesting. In deze figuur zijn twee lijnen getrokken (a en b). Lijn a geeft de

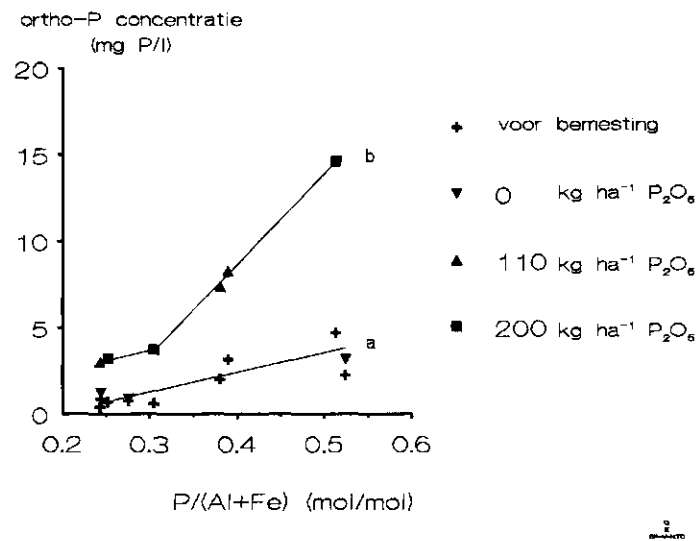


Fig. 5 Verband tussen de gemiddelde ortho-P concentratie en de fosfaatbezettingsfractie ($FBF = P_{ox} / (Al + Fe)_{ox}$) van de bovengrond (0-40 cm - mv.) voor en na bemesting

gemiddelde toestand weer van de plots vóór bemesting (incl. de plots die niet bemest zijn geweest). Lijn b geeft de gemiddelde toestand van de plots (die bemest zijn geweest) ná bemesting (gebaseerd op de gemiddelde concentratie gedurende 5 weken na bemesting).

Uit lijn a (vóór bemesting) kan worden afgeleid dat naarmate de fosfaatbezettingsfractie van de plots hoger is ook de fosfaatconcentratie in het bodemvocht stijgt (nagenoeg positief lineair verband oplopend van ongeveer 1 naar 3 mg l⁻¹ P). Ook blijkt dat bij de plots waaraan geen mest is toegediend de gemiddelde fosfaatconcentratie niet wijzigt. Een verhoging van de fosfaatconcentratie in de bovenste 40 cm van de bodem wordt waargenomen in de plots die bemest zijn geweest, zelfs bij giften gelijk aan de jaarlijkse gewasonttrekking. De toename is sterker naarmate de fosfaatbezettingsfractie van de betreffende plot hoger is. Bij een fosfaatbezettingsfractie van ca. 0,5 is de bodem vrijwel niet meer in staat om fosfaat te binden. Hier worden dan ook de hoogste concentraties aangetroffen. De invloed van de grootte van de mestgift (110 of 200 kg P₂O₅ ha⁻¹) is minder belangrijk dan de mate van fosfaatverzadiging van de bodem. Dit kan worden verklaard uit het feit dat de hoeveelheid fosfaat die reeds in de bodem is opgeslagen velen male groter is dan de hoogte van de mestgift.

Uit de analyses van totaal-P en ortho-P blijkt dat het hoofdzakelijk anorganische fosfaten zijn die uitspoelen, aangezien de ortho-fosfaatconcentraties ca. 80% bedragen van de totale fosfaatconcentraties die gemeten zijn. Dit geldt zowel in de periode voor bemesting als na bemesting (figuur 6).

Op grond van bovengenoemde resultaten kan de fosfaatuitspoeling die uit de bouwvoor heeft plaatsgevonden geschat worden (netto neerslag overschot bedroeg

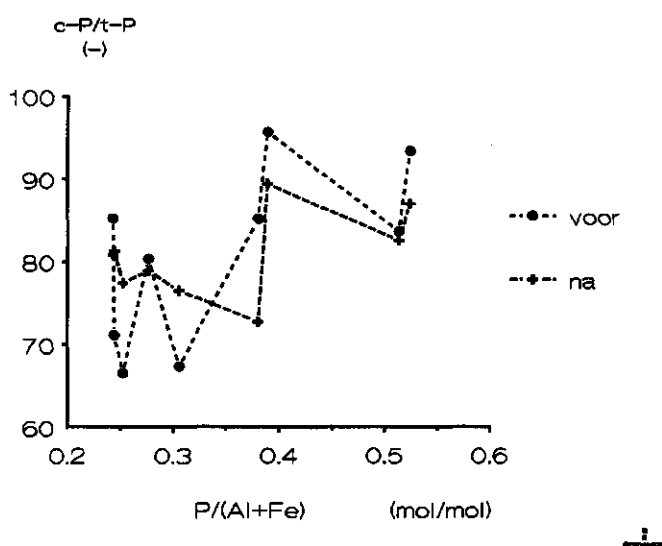


Fig. 6 Verhouding ortho-P en totaal-P voor en na bemesting over de diepte 0-40 cm als functie van de fosfaatbezettingsfractie ($P_{ox}/(Al+Fe)_{ox}$) van de plots

in de meetperiode ca. 56 mm). Afhankelijk van de mate van fosfaatverzadiging van de bodem (0-40 cm) blijkt ca. 2 (bij een fosfaatbezettingsfractie van 0,25) tot 15 kg P_2O_5 ha⁻¹ (bij een fosfaatbezettingsfractie van 0,5) *extra* uit de bouwvoor uitgespoeld te zijn als gevolg van de mestgiften (zelfs bij fosfaatgiften gelijk aan de gewasonttrekking). Dit betekent dat het uitrijden van mest in perioden met een groot neerslag overschot tot grote fosfaatverliezen kan leiden. Met betrekking tot de organische fosfaatsuitleiding kan berekend worden dat in gemeten uitspoelingsperiode ca. 1 à 3% van de totale fosfaatgiften als organisch fosfaat is uitgespoeld naar diepere lagen. Deze resultaten komen overeen met gemeten organische fosfaatsuitleiding bij kolomproeven (Gerritse, 1977).

3.2 Modelberekeningen

Met behulp van het hydrologische model SWATRE (Van der Broek et al., 1994) is de waterafvoer uit de percelen naar het oppervlaktewater gecalibreerd en gevalideerd (Kruijne et al., 1995). Tevens is de procesformulering van de fosfaatmodule is het nutriënten model ANIMO verbeterd en gevalideerd op laboratoriumschaal (Schoumans, 1995a), waarna ook validatie van de fosfaatsuitleiding heeft plaatsgevonden op een aantal van de percelen van de onderzoekslocatie (Kruijne et al., 1995). Met behulp van deze gevalideerde modellen is het mogelijk om de lange-termijn effecten van bemestingsscenario's op de fosfaatbelasting van het grond- en oppervlaktewater te berekenen. Totaal zijn twee bemestingsniveaus doorgerekend (0 en 110 kg P_2O_5 ha⁻¹ j⁻¹). Opgemerkt wordt dat bij nulbemesting ook geen beweiding meer mogelijk is. Aangezien het verloop van de fosfaatsuitleiding sterk afhankelijk is van de mate van fosfaatverzadiging van de bodem zijn vier niveaus doorgerekend, namelijk een fosfaatverzadigingsgraad van 25, 50, 75, en 100% (berekend tot aan 40 cm). Als uitgangspunt voor de bodem en grondwatertrap is gekozen voor een perceel van de onderzoekslocatie (beekerdgrond met grondwatertrap III) aangezien

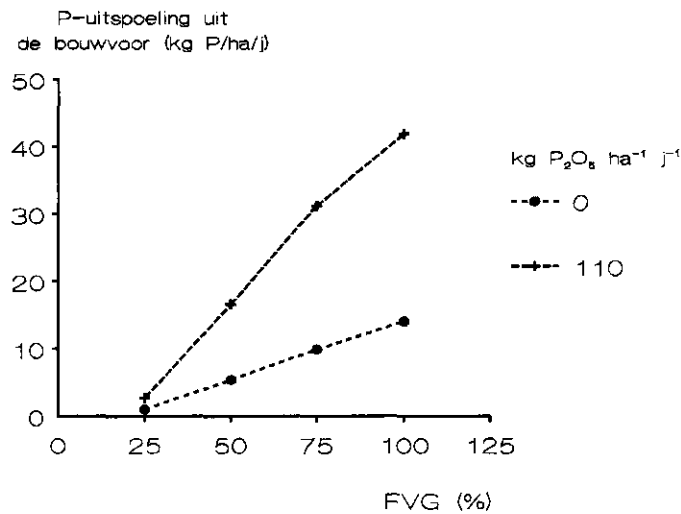


Fig. 7 Gemodelleerde gemiddelde (20 jaar) fosfaatuitspoeling (ortho-P) uit de bouwvoor (25 cm-mv.) voor twee bemestingsniveaus en vier fosfaatverzadigingsgraden van de bovengrond (0-40 cm)

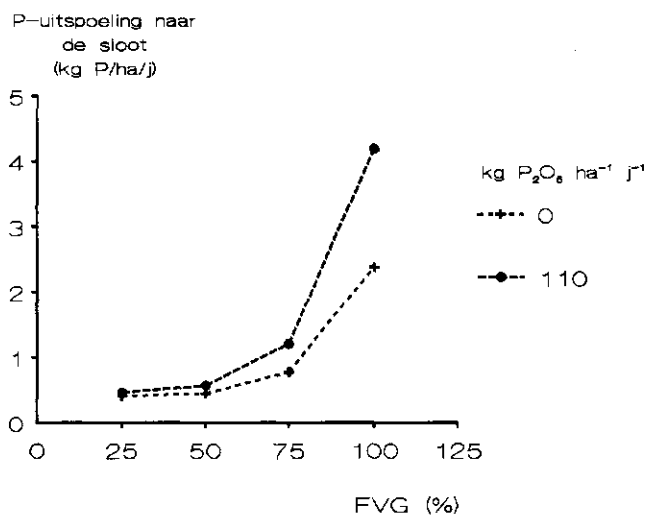


Fig. 8 Gemodelleerde gemiddelde (20 jaar) fosfaatbelasting (ortho-P) van het oppervlaktewater (perceelssloot) voor twee bemestingsniveaus en vier fosfaat-verzadigingsgraden van de bovengrond (0-40 cm)

deze representatief is voor een groot deel van het areaal natte gronden in het Schuitembeekgebied en juist deze relatief natte gronden de grootste bijdrage leveren aan de fosfaatbelasting van de Schuitembeek (Schoumans en Kruijne, 1995a). Voor de simulatie van de fluctuatie van de grondwaterstand vanaf 1995 tot het jaar 2015

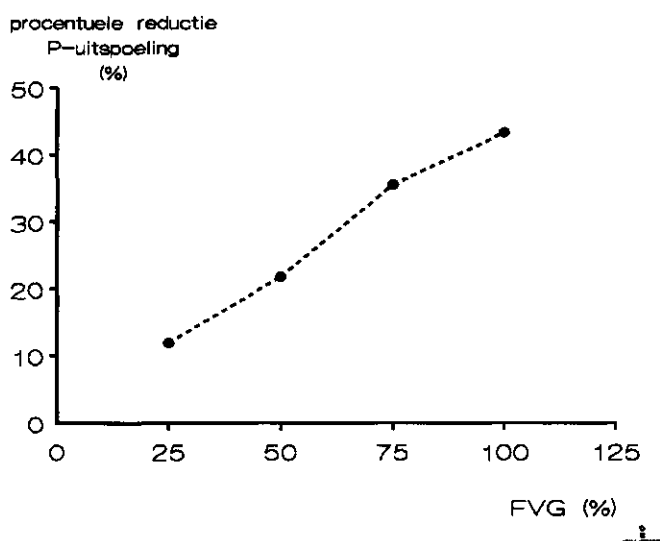


Fig. 9 Gemodelleerd gemiddelde (20 jaar) reductie van de fosfaatbelasting (ortho-P) van het oppervlaktewater bij nulbemesting (ten opzichte van $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$) voor verschillende fosfaatverzadigingsgraden van de bovengrond (0-40 cm)

is uitgegaan van de weerjaren 1970 tot en met 1990. Figuur 7 toont de gemiddelde P-uitspoeling uit de bouwvoor (0-25 cm) naar diepere lagen en figuur 8 de gemiddelde fosfaatbelasting van oppervlaktewater (perceelssloot).

Uit figuur 7 blijkt dat de effecten van bemesting op de *fosfaatuitspoeling vanuit de bouwvoor naar diepere lagen* groter zijn naarmate de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem hoger is. De fosfaatverliezen uit de bouwvoor als gevolg van fosfaatuitspoeling variëren van ca. 1 tot 14 kg P ha^{-1} (= ca. 2 tot $32 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) indien de bodem niet wordt bemest. De *extra* fosfaatverliezen uit de bouwvoor (ten opzichte van nul bemesting) bij giften gelijk aan de gewasonttrekking variëren van 2 à $22 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$ (ca. 4 tot $50 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$) bij resp. een fosfaatverzadigingsgraad van 25 en 75%. De fosfaattoestand van de meeste percelen in het Schuitenbeekgebied liggen in dit traject. (Breeuwsma et al., 1989). Bij volledige fosfaatverzadiging spoelt nagenoeg de gehele fosfaatgift ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} = \text{ca. } 48 \text{ kg P ha}^{-1}$) uit de bouwvoor naar diepere lagen.

De effecten van wel of geen bemesting op de *fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater* (figuur 8) zijn minder groot als die van de fosfaatuitspoeling uit de bouwvoor naar diepere lagen (grondwater). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat slechts een beperkt deel van de waterafvoer van de percelen afkomstig is uit de bovengrond. Pas bij zeer sterke fosfaatverzadiging (>75%) van de bovengrond (0-40 cm) neemt de fosfaatbelasting ten gevolge van fosfaatevenwichtsbemesting toe met enkele $\text{kg P ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$. De procentuele reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater die met aanvullende bemestingsmaatregelen bereikt kan worden (nulbemesting ten opzichte van $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$; zie figuur 8) is weergegeven in figuur 9.

Aangezien 80% van de percelen in het Schuitenbeekgebied een fosfaatverzadigingsgraad bezitten van 75% of lager (Breeuwsma et al., 1989), wordt verwacht dat met deze aanvullende bemestingsmaatregelen ten opzichte van gift is gelijk aan gewas-

onttrekking de maximale reductie ca. 35% zal bedragen. De mediaanwaarde van de fosfaatverzadigingsgraad in het gebied bedraagt 50%, waardoor geschat wordt dat de gemiddelde reductie ongeveer 20% zal zijn. Opgemerkt wordt dat dit percentage lager dan wel hoger ligt als op deze fosfaatverzadigde gronden een eindnorm gehanteerd zal worden die resp. lager of hoger is dan de hier gehanteerde gewasonttrekking ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$).

Uit deze analyse blijkt dat alleen bij zeer sterk fosfaatverzadigde percelen (> 75%) een aanzienlijke reductie van de fosfaatbelasting verwacht mag worden bij volledig achterwege van de fosfaatbemesting. Onduidelijk is welke reductiepercentage dan gemiddeld op regionale schaal bereikt wordt. Opgemerkt wordt dat bij de huidige berekeningen zijn uitgevoerd met een-dimensionale modellen, waarin een laterale component voor de belasting van het oppervlaktewater is aangebracht. Indien de aanvullende bemestingsmaatregel ('fosfaatnulbemesting') gerealiseerd worden in de vorm van volledige bemestingsvrije bufferzones, wordt vooralsnog verondersteld dat vrijwel een gelijke gemiddeld reductiepercentage van 20% gerealiseerd zal worden.

4 Bodemchemische maatregelen

4.1 Voorselectie

Via de chemische industrie, de Landbouwniversiteit Wageningen en een gerichte bemonstering van ijzerrijke lagen, zijn monsters verkregen van een groot aantal materialen die mogelijk goed in staat zijn om fosfaat te binden. Een deel van deze monsters is gedurende 1 uur bij 400°C gegloeid, aangezien het specifiek oppervlak van bepaalde hydroxyden dan kan toenemen waardoor de fosfaatsorptiecapaciteit wordt vergroot (pers. med. Rijkeboer, Bilton research). Tabel 2 geeft een overzicht van relevante chemische parameters van de verkregen monsters.

Tabel 2 Relevante kenmerken van de geselecteerde aluminium- en ijzermaterialen

Materiaal	P _{ox} (mmol/kg)	Al _{ox}	Fe _{ox}	dichtheid (g/cm ³)	pH-KCl (-)
Ijzeroer 1	535	27,5	2914	0,6	3,4
Ijzeroer 2	235	52,0	2355	0,9	4,9
Ijzerslib	508	5	3727	0,7	7,6
„ (400°C)	529	7	3388	-	7,6
FeCl ₃ ·6H ₂ O	-	-	3700 (berekend)	-	-
gesynth. Fe(OH) ₃ ¹⁾	18	6	8206	1,0	4,7
„ (400°C)	1	0	60	0,9	1,4
Red mud	54	1061	56	0,9	8,5
„ „ (400°C)	55	1236	90	-	9,6
Aluin	0,3	290,6	0,2	1,1	8,8
„ (400°C)	0,4	302,6	0,1	-	-
Bauxiet	0,6	14,6	2,0	1,3	-
„ (400°C)	0,4	415,0	11,6	1,0	-
Al ₂ O ₃ super	0,2	250,9	1,0	1,0	7,5

¹⁾ gemaakt uit FeCl₃ en Ca(OH)₂

De gevonden aluminium- of ijzergehalten zijn over het algemeen hoog in vergelijking tot het natuurlijke aluminium- en ijzergehalte die in kalkloze zandgronden worden aangetroffen, en die veelal in de bovengrond variëren van ca. 40 tot 200 mmol kg⁻¹. Uit tabel 2 blijkt dat de ijzerrijke verbindingen een minimaal tien maal zo hoog ijzergehalte bezitten dan de aluminiumhoudende verbindingen aan aluminiumgehalte bezitten. Een deel van de ijzerhoudende monsters bezit ook een hoog fosfaatgehalte (ijzeroer en ijzerslib), zodat verwacht mag worden dat deze minder effectief zijn om fosfaat te binden. Een zeer hoog oxalaat extraheerbaar ijzergehalte wordt gevonden bij gesynthetiseerd ijzerhydroxyde. De aluminiumverbindingen bezitten een duidelijk lager gehalte aan amorf (hydr)oxyden. Opvallend is dat "red mud" het hoogste amorf aluminium(hydr)oxyde gehalte heeft, terwijl dit materiaal bekend staat als ijzerafvalprodukt. Verder blijkt dat door gloeien bij 400°C het oxalaat extraheerbaar aluminiumgehalte hoger wordt (vooral bauxiet) en het ijzergehalte lager wordt (vooral gesynthetiseerd Fe(OH)₃). Dit laatste sluit goed aan bij de resultaten van de röntgendiffractie-analyse (Schoumans en Köhlerberg, 1995), waaruit blijkt dat bij

300°C vorming van het mineraal hematiet plaatsvindt, terwijl juist bij bauxiet het mineraal gibbsiet verdwijnt en omgezet wordt in amorfe verbindingen, die reactiever zijn om fosfaat te binden.

effectiviteit om fosfaat te binden

Om de capaciteit van materialen om fosfaat te kunnen binden ruwweg vast te stellen, zijn met alle materialen oriënterende schudexperimenten uitgevoerd, waaruit de volgorde toename in fosfaatsorptiecapaciteit kon worden afgeleid (Yspeert, 1992; Schoumans en Köhlenberg, 1995): *bauxiet (20 °C) ≈ red mud (20 °C) < red mud (400 °C) ≈ aluinaarde < Fe-oer 2 < Fe-slib ≈ Fe-oer 1 < bauxiet (400 °C) ≈ Al₂O₃-super << gesynthetiseerd ijzerhydroxyde (Fe(OH)₃).*

effect op de pH, het Pw-getal en de fosfaatconcentratie

Om het overall effect van aluminium- en ijzertoediening aan de bodem op belangrijke fosfaatparameters in de bodem vast te stellen is in het laboratorium een proef uitgevoerd waarbij verschillende Al- en Fe-doseringen aan een bouwvoormonster is toegediend. De toediening heeft zo plaatsgevonden dat de fosfaatbezettingsfractie ($FBF = P_{ox} / (Al_{ox} + Fe_{ox})$) van de bouwvoor in trappen daalde van 0,4 naar ca. 0,10.

Uit dit onderzoek blijkt dat er vrijwel geen nadelige effecten zijn te verwachting met betrekking tot de pH bij die aluminium- en ijzertoeseringen waarbij de fosfaatconcentratie in de bouwvoor sterk daalt met 80 à 90%. Ook het Pw-getal (zijnde een bodemvruchtbaarheidsparameter voor het direct beschikbare fosfaat) blijft dan voldoende (Schoumans en Köhlenberg, 1995).

effect van toediening van Al- en Fe-verbindingen aan de bodem op gras

In samenwerking met de Landbouwuniversiteit Wageningen (vakgroep bodemkunde en plantvoeding) kon met behulp van een potproef worden aangetoond dat er geen negatieve effecten met betrekking tot de produktie en kwaliteit van gras worden waargenomen bij die doseringen die noodzakelijk zijn om de fosfaatconcentratie sterk te doen dalen. Bij het gehanteerde ijzerchloride voor de synthese van ijzerhydroxyde ontstaat bij de synthese een bijzout die kieming kan tegengaan. Aanbevolen werd om dit bijzout vooraf te verwijderen, een ander ijzeruitgangsmateriaal te gebruiken waarbij een minder schadelijk bijzout ontstaat, dan wel dit bijzout eerst uit de bodem uit te spoelen alvorens gras in te zaaien. Voor een volledig overzicht van de resultaten wordt verwezen naar Murre (1992) en Schoumans en Köhlenberg (1995).

Op grond van deze resultaten is geconcludeerd dat van de geïnventariseerde beschikbare materialen vooral met vers gesynthetiseerd ijzer(hydr)oxyde de beste resultaten worden verkregen met betrekking tot reductie van de fosfaatconcentratie indien monsters met een hoge fosfaatverzadigingsgraad daarmee worden behandeld. Aangezien daarnaast dit materiaal een factor 50 maal zo goedkoop is als de effectieve aluminiumhoudende materialen (laboratoriumchemicalie), heeft navolgende onderzoek zich geconcentreerd op dit materiaal.

4.2 Effectiviteit van gesynthetiseerd ijzerhydroxyde

4.2.1 Laboratoriumproeven

Om het effect van toediening van gesynthetiseerd ijzerhydroxyde op de reductie van de fosfaatsuitspoeling te kunnen voorspellen, is het van belang dat de sorptiekaracteristieken van fosfaat aan dit materiaal wordt bepaald. Als gevolg van de grootte fosfaatsorptiecapaciteit van ijzerhydroxyde is een nieuwe schudmethodiek ontwikkeld om de sorptieparameters te kunnen bepalen (Schoumans en Köhler, 1995). Als uitgangsmateriaal voor de synthese is gekozen FeCO_3 , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, aangezien mogelijke zoutschade minder groot is als bij FeCl_3 . In figuur 10 wordt het verloop van de gemeten fosfaatevenwichtsconcentraties bij de verschillende opgeladen bouwvoor-ijzermaterialen massaverhoudingen weergegeven.

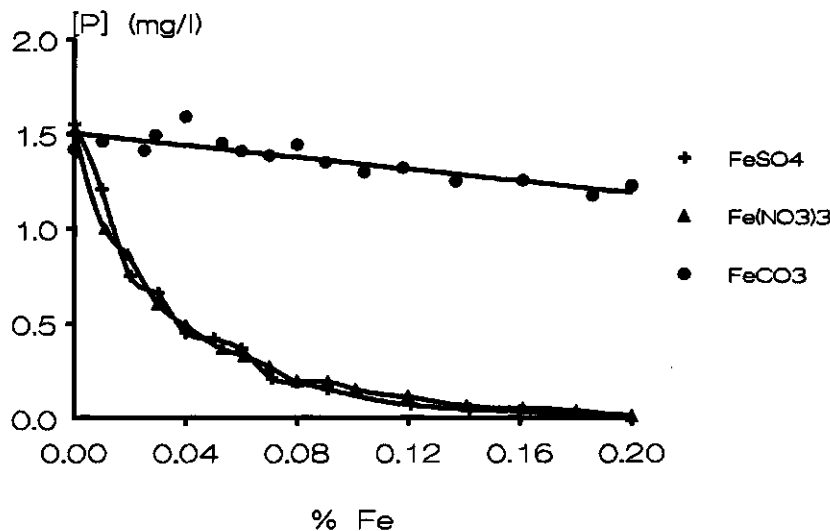


Fig. 10 Verloop van de fosfaatevenwichtsconcentratie na toediening van verschillende percentages ijzerhydroxyde aan de opgeladen bouwvoor voor diverse uitgangsmaterialen.

Uit figuur 10 blijkt duidelijk dat onder gelijke omstandigheden FeCO_3 een lage capaciteit bezit om fosfaat te binden daar de fosfaatconcentratie ondanks de ijzertoediening nauwelijks afneemt. Verder valt op dat $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ nagenoeg dezelfde curve vertonen. Blijkbaar maakt het niet uit of het ijzerhydroxyde-product gevormd uit een twee- dan wel driewaardig ijzermateriaal. Via lineaire regressie konden de adsorptie-parameterwaarden K_m en $Q_{m,m}$ voor $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ met een hoog percentage verklaarde variantie (ca. 98%) worden afgeleid. Fitting voor FeCO_3 leverde een slecht en onbetrouwbaar resultaat. De gefitte maximale fosfaatsorptiecapaciteit was ongeveer 10 maal zo laag als bij $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ en het percentage verklarende variantie was slechts 20%. Op grond hiervan kan geconcludeerd worden dat FeCO_3 geen perspectief biedt bij toepassing op regionale schaal ter vermindering van de fosfaatsuitspoeling. Van de resterende andere twee producten blijkt dat er nagenoeg geen verschil is in sorptiecapaciteit.

De resultaten van dit fosfaatsorptie onderzoek geven aan dat het fosfaatbindend vermogen van vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde zeer groot is als gevolg van het groot specifiek oppervlak van het hydroxyde. Uit de literatuur (Schwertmann and Cornell, 1991) is bekend dat als gevolg van uitstoten van kristalwater en/of OH-groepen, deze ijzerverbinding overgaat in een meer geoxydeerde vorm, waardoor het specifiek oppervlak afneemt. Dit proces wordt verouderen genoemd en treedt op na bloot-stelling aan de lucht en wordt versneld bij hogere temperaturen. Het gevolg is dat verouderd gesynthetiseerd ijzer(hydr)oxyde minder fosfaat kan binden (Lijklema, 1980). Dit zou in de praktijk kunnen betekenen dat het fosfaat in de bodem, na toediening van vers gesynthetiseerd ijzer(hydr)oxyde, eerst goed aan het ijzer-hydroxydemateriaal wordt gebonden, maar in de loop van de tijd, als gevolg van veroudering, toch weer vrij kan komen en als nog naar het oppervlaktewater kan gaan uitspoelen. Om de gevolgen van veroudering voor een dergelijk systeem *op langere termijn* na te bootsen, hetgeen in het laboratorium niet realiseerbaar is, zijn temperatuurexperimenten uitgevoerd om de veroudering van gesynthetiseerd ijzerhydroxyde te versnellen. Enerzijds is onderzocht wat de gevolgen zijn van veroudering van ijzerhydroxyde na toediening aan de bodem en anderzijds de effecten van toediening van ijzerhydroxyde dat reeds verouderd is aan de bodem. Dit laatste is getoetst aan de hand van veranderingen van de fosfaatsorptiecapaciteit van een $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -suspensie die een jaar geleden is aangemaakt, ten opzichte van een vers gesynthetiseerd $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Uit het onderzoek blijkt (Schoumans en Köhlenberg, 1995) dat na toediening van vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde aan een sterk fosfaatverzadigde laag, de fosfaatconcentratie bij een dosering van 0,1% Fe of meer met ca. 80% zal dalen indien het materiaal versneld wordt verouderd door verhoging van de temperatuur tot temperaturen kleiner of gelijk aan 300°C. Op grond hiervan wordt vooralsnog verwacht dat het effect van veroudering, nadat vers gesynthetiseerd ijzer(hydr)oxyden aan de bodem is toegediend, beperkt zal zijn. Continuering van veldmetingen kunnen hieromtrent uiteindelijk meer zekerheid verschaffen.

De resultaten met toediening van verouderd (1 jaar) gesynthetiseerd $\text{Fe}(\text{OH})_3$ geven inzicht op de effectiviteit van het verouderde ijzer(III)hydroxydemateriaal. De fosfaatconcentratie in het bodemvocht die kan gaan uitspoelen wordt onder deze omstandigheden alsnog met ca. 60% gereduceerd (40% minder effectief dan vers gesynthetiseerd $\text{Fe}(\text{OH})_3$). Het beschikbare fosfaat adsorptiemaximum van het verouderde ijzermateriaal neemt met ca. 25% af. Echter door vooral de lagere adsorptieconstante neemt de effectiviteit van het sterk verouderde materiaal af. Geconcludeerd kan dan ook worden dat bij het bewaren van het vers aangemaakte ijzerhydroxyde sprake is van veroudering. Na 1 jaar veroudering is de effectiviteit voor sterk fosfaatverzadigde monsters met ca. 40% gedaald. Aanbevolen wordt dat na de synthese van ijzer(III)hydroxyde-suspensie deze zo spoedig mogelijk door de bodem wordt ingewerkt (enkele weken).

Om het effect van bodemchemische maatregelen op de reductie van de fosfaatconcentratie te controleren zijn naast veldproeven (par. 4.2.2) ook kolomproeven uitgevoerd (Schoumans en Köhlenberg, 1995). Door niet alleen de fosfaatconcentratie maar ook de pH, anion- en ijzerconcentraties te meten kan naast validatie van de

reductie van de fosfaatconcentratie ook mogelijk in de praktijk plaatsvindende nevenreacties worden waargenomen.

Als uitgangsmateriaal voor de kolomproeven is hetzelfde fosfaatverzadigde bouwvoor-materiaal gebruikt als gebruikt is bij de proeven die in paragraaf 4.1 zijn beschreven. Door de doorbraak in zowel kolommen met ijzertoedieningen als kolommen zonder ijzertoediening te volgen, kan het effect op het verlagen van de fosfaatuitspoeling goed worden vergeleken.

Uit de resultaten van dit onderzoek (Schoumans en Köhlenberg, 1995) blijkt dat toediening van zowel 0,1 als 0,2% Fe met als uitgangsmateriaal FeSO_4 en $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, de fosfaatconcentratie van het filtraat sterk reduceert. De fosfaatconcentraties liggen rond de $0,15 \text{ mg.l}^{-1} \text{ P}$ ten opzichte van de onbehandelde kolom van ca. $8 \text{ mg l}^{-1} \text{ P}$. Opmerkelijk is dat voor beide percentages de materialen nagenoeg hetzelfde reageren, waaruit blijkt dat bij dit monster 0,1% ijzertoediening voldoende is. Toediening van Fe in de vorm van FeCO_3 levert een slecht resultaat hetgeen in overeenstemming is met de resultaten van het sorptie onderzoek. Tevens blijkt dat bij beide doseringen (0,1% en 0,2% Fe) de fosfaatconcentratie in de kolommen na ongeveer 30 dagen oploopt. Het oplopen van de fosfaatconcentratie kan het gevolg zijn van permanente waterverzadiging. Hierdoor treedt mogelijk reductie van Fe op (van Fe^{3+} naar Fe^{2+}), waardoor fosfaat beter in oplossing komt. Deze toestand komt onder veldomstandigheden slechts zelden voor. Voordat echter een definitieve uitspraak kan worden gedaan of er sprake is van reductie van Fe, wordt in opdracht van het Ministerie van LNV en RIZA hiernaar aanvullend laboratoriumonderzoek uitgevoerd, waarbij ook de invloed van de hoogte van de zoutconcentratie op de fosfaatconcentratie wordt betrokken.

4.2.2 Veldproeven

Om na te gaan of de effectiviteit van het gesynthetiseerde ijzer(hydr)oxyde in de praktijk net zo goed voldoet als in het laboratorium is een veldproef aangelegd. Als uitgangsmateriaal voor de synthese is gekozen voor $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ aangezien de effectiviteit gelijk is aan het uitgangsmateriaal FeSO_4 en voor het gewas geen nadelige zouten worden gevormd (namelijk $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). De ijzerhydroxyde-suspensie is vooraf bereid door Kemwater, waarbij kalkmelk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) is toegediend aan een $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ -oplossing. Hierdoor bevatte de ijzerhydroxyde-suspensie $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ als bijzout. Voor de wijze van inwerken van een ijzer(hydr)oxyde-suspensie in de bodem zijn door IMAG-DLO twee methoden ontwikkeld (Hendriks en Huijsmans, 1995):

- spitmachine 0-50 cm (kans op verschraling van het organische-stofgehalte van de bouwvoor);
- spitmachine 0-25 cm en injecteur 25-50 cm (geen verschralingseffecten).

Om deze 2 technieken in de praktijk met elkaar te kunnen vergelijken, is op een van de percelen op de onderzoekslocatie middels deze twee doseertechnieken ijzer(hydr)oxyde-materiaal in de bodem gewerkt (twee plots). De parameters waarop de technieken met elkaar zijn vergeleken hebben vooral betrekking op de reductie van de fosfaatconcentratie in het bodemvocht en de homogeniteit van inwerken.

Twee proefvelden zijn uitgevoerd om de effectiviteit na inwerken vast te stellen. Voor de toediening van de ijzer(III)-hydroxyde-suspensie is de bodem bemonsterd en de fosfaattoestand van de bodem voor beide proefvelden gekarakteriseerd ($P_{ox}/(Al+Fe)_{ox}$). Uit veiligheidsoverwegingen is de ijzer(III)hydroxyde-suspensie door de industrie (Kemwater) aangeleverd. De bereiding van de $Fe(OH)_3$ -suspensie heeft plaatsgevonden 8 dagen voordat deze werd ingewerkt. De hoogte van de ijzerdosering werd vooraf ingesteld op 0,2% (1400 gFe/m^2). De twee plots zijn als volgt behandeld:

Plot I : De $Fe(OH)_3$ -suspensie wordt eerst met behulp van een injecteur in de bodemlaag van 25-50 cm gebracht en daarna met behulp van een spitmachine door de bodemlaag van 0-25 cm gemengd.

Plot II: Het $Fe(OH)_3$ -materiaal wordt in één keer met behulp van een spitmachine door de laag van 0-50 cm gemengd.

Op de geplande datum voor inwerken (maart 1994) was, als gevolg van veel neerslag, de bodem zeer nat. Om geen vertraging in het onderzoek op te lopen, en omdat op dat moment nog geen zekerheid bestond omtrent veroudering van het materiaal, is de toediening van de ijzer(hydr)oxydesuspensie niet uitgesteld. Het gevolg was dat tijdens het inwerken de spitmachine enkele malen slipte. Na behandeling van de bodem met het ijzermateriaal zijn in de 2 proefvelden op de diepten 10, 20, 30, 40, 60, 80 en 100 cm cups van poreus materiaal geplaatst, waarmee bodemvocht kan worden onttrokken. Tevens zijn bodemmonsters genomen.

De dosering van de ijzer(III)hydroxyde-suspensie (0,2% Fe) is niet volledig geslaagd geweest, daar op de plot waar uitsluitend de spitmachine is gebruikt 0,17% Fe is toegediend en de plot die is behandeld met injecteur (ondergrond) en spitmachine (bovengrond) resp. 0,26 en 0,13 % Fe is toegediend als gevolg van slippen. De twee te vergelijken methoden zijn dan ook verschillend van aard hetgeen effect heeft op de homogeniteit na toediening. Na behandeling van de plot met alleen de spitmachine (II) wordt een homogener verdeling van het ijzer(III)hydroxyde-materiaal door de bodem verkregen dan op plot I voor de combinatie van injecteur en spitmachine. Een eerder gestelde voorwaarde voor de pH van de toe te dienen ijzer(III)-hydroxyde suspensie was dat deze 7 diende te zijn. Deze bleek echter 2,7 te zijn. De lage pH heeft zoals verwacht een effect op de pH van het bodemvocht en de daarin aanwezige ijzerconcentratie. In het bodemvocht van plot I was de Fe-concentratie laag (ca. $0,5 \text{ mg.l}^{-1} \text{ Fe}$) en de pH 7, maar voor plot II was de pH 4.6 en lag de Fe-concentratie in de orde van $70-100 \text{ mg.l}^{-1} \text{ Fe}$. Het is dus mogelijk dat bij grote regenval in die periode een hoeveelheid Fe naar diepere lagen is uitgespoeld. Na 4 weken is de pH van het bodemvocht door de grond geneutraliseerd en is de uitspoelende ijzerconcentratie afgenomen tot ca. $40 \text{ mg.l}^{-1} \text{ Fe}$. Gedurende de eerste 6 maanden zijn van de toplaag (cups 10, 20, 30) geen monsters verkregen daar het in de periode van toedienen het relatief droog is geworden en de bovengrond door het inwerken niet meer compact was. Hierdoor kon het beperkte bodemwater niet door de cups worden onttrokken (cups konden niet onder vacuüm worden gebracht). Om toch een indruk te krijgen van het effect van ijzertoeediening op de reductie van de fosfaatconcentratie zijn van de bovenste bodemlagen ook enkele bodemmonsters genomen. Vervolgens is het bodemvocht afgecentrifugeerd en de fosfaatconcentratie gemeten. In tabel 3 en 4 worden de resultaten van de gemiddelde fosfaatconcentraties weergegeven die zijn gemeten.

Tabel 3 Gemiddelde fosfaatconcentraties (inclusief standaarddeviatie) gemeten in het bodemvocht van Fe-plot I (0-25 spitmachine, 25-50 injecteur)

diepte	methode	n	[P] _{geen Fe} (mg.l ⁻¹)	n	[P] _{Fe} (mg.l ⁻¹)	reductie (%)
0-10	centr	4	1,89 ± 1,46	4	0,70 ± 0,53	63
10	cup	5	1,88 ± 1,00	4	0,36 ± 0,18	81
10-20	centr	4	3,17 ± 2,76	4	0,71 ± 0,68	78
20	cup	6	1,75 ± 1,42	9	0,74 ± 0,37	58
20-30	centr	4	5,28 ± 4,07	3	0,63 ± 0,29	88
30	cup	13	1,05 ± 0,68	16	0,39 ± 0,33	63
30-40	centr	2	1,89 ± 1,06	1	0,33	83
40	cup	15	1,38 ± 1,30	13	0,21 ± 0,17	85
60	cup	20	1,18 ± 1,55	15	1,17 ± 1,39	0
80	cup	21	2,41 ± 1,27	13	1,16 ± 1,49	52

NB: In de laag van 60 en 80 cm is geen Fe(OH)₃ toegediend.

Tabel 4 Gemiddelde fosfaatconcentraties (inclusief standaarddeviatie) gemeten in het bodemvocht van Fe-plot II (0-50 cm spitmachine)

diepte	methode	n	[P] _{geen Fe} (mg.l ⁻¹)	n	[P] _{Fe} (mg.l ⁻¹)	reductie (%)
0-10	centr	4	2,89 ± 2,11	4	0,17 ± 0,08	94
10	cup	2	2,05 ± 0,47	0		--
10-20	centr	4	4,09 ± 3,90	4	0,13 ± 0,04	97
20	cup	4	1,23 ± 0,81	4	0,25 ± 0,23	80
20-30	centr	4	3,33 ± 1,86	4	0,19 ± 0,11	94
30	cup	14	1,15 ± 1,09	7	0,14 ± 0,12	88
30-40	centr	2	1,91 ± 1,48	2	0,10 ± 0,01	95
40	cup	16	0,90 ± 0,93	11	0,16 ± 0,09	82
60	cup	21	1,26 ± 1,84	11	0,42 ± 0,82	67
80	cup	19	1,36 ± 1,52	13	0,29 ± 0,28	79

NB: In de laag van 60 en 80 cm is geen Fe(OH)₃ toegediend.

Uit tabel 3 blijkt dat met de combinatie injecteur en spitmachine geen optimaal resultaat wordt verkregen. Dit wordt enerzijds veroorzaakt doordat met de injecteur in de ondergrond (25-50 cm) meer Fe is toegediend (0,26 %) dan in de bovengrond (0-25 cm) met de spitmachine is ingewerkt (0,13 % Fe). De reductie van de fosfaatconcentratie in de ondergrond (30-40 cm) is ruwweg 77 ± 12 %, terwijl deze in de bovengrond (0-20 cm) met te weinig Fe 70 ± 11 % bedraagt. In de overgangslaag (20-30 cm) is de reductie het sterkst en bedraagt deze ca. 88 %. Ondanks de sterke reductie van de fosfaatconcentratie worden toch nog te hoge concentraties in de bewerkte diepte aangetroffen, die aflopen met de diepte (van ca. 1 tot 0,2 mg.l⁻¹ P). Een éénmalig inwerken met de spitmachine over de gehele diepte lijkt veel beter uitvoerbaar en daardoor ook veel effectiever (tabel 4). Gemiddeld is over de gehele diepte 0-50 cm ca. 0,17 % Fe ingebracht. Afhankelijk van de laag varieert de reductie van de fosfaatconcentratie ca. 65 tot 95 % en wel zodanig dat de gemiddelde fosfaatconcentraties dalen tot ca. 0,12 à 0,25 mg.l⁻¹ P. Opvallend is dat ook op grotere diepte een duidelijke reductie wordt waargenomen. Dit houdt waarschijnlijk verband met de uitspoeling van Fe als gevolg van een te lage pH van de ijzerhydroxyde suspensie.

Op grond van deze veldproef resultaten wordt geconcludeerd dat (zeer) lage fosfaatconcentraties in de bodemoplossing ontstaan indien ca. 0,2% Fe in de vorm van een ijzerhydroxyde suspensie in de bodem wordt gebracht middels een spitmachine. Het gebruik van de injecteur geeft minder betrouwbare reductie van de fosfaatconcentratie in de bouwvoor als gevolg van een minder goede homogene verdeling van het ijzermateriaal.

4.3 Modelberekeningen

4.3.1 Reductie van de fosfaatconcentratie op de ijzerplots

Met behulp van het hydrologische model MOISHE en de fosfaatsorptiemodule van ANIMO, waaraan een eenvoudige fosfaatopname routine is gekoppeld, is de reductie van de fosfaattuitspoeling naar het grondwater gevalideerd op de onderzoekslocatie (Schoumans en Köhlenberg, 1995; Kruijne et al., 1995). Als uitgangspunt voor de modelsimulaties is gekozen de gemeten fosfaatverzadigingstoestand van de bodem van de plot waarin ijzer met de spitmachine is ingewerkt en geen bemesting heeft plaats gevonden (Fe-plot II; tabel 4). Allereerst is de ortho-fosfaatconcentratie zonder de bodemchemische maatregel gecalibreerd en vervolgens is de gemeten gedoseerde ijzergift (0,17%) modelmatig ingewerkt over een diepte van 50 cm. De sorptieparameters zoals deze in het laboratoriumonderzoek zijn afgeleid (verouderd gesynthetiseerd ijzerhydroxyde) zijn vervolgens gebruikt voor de simulatie van de concentratieverandering. Figuur 11 geeft de gemeten en gemodelleerde ortho-fosfaatconcentratie met en zonder bodemchemische maatregel als functie van de diepte van de plot. Er heeft geen bemesting plaatsgevonden. De fosfaatverzadigingsgraad van de

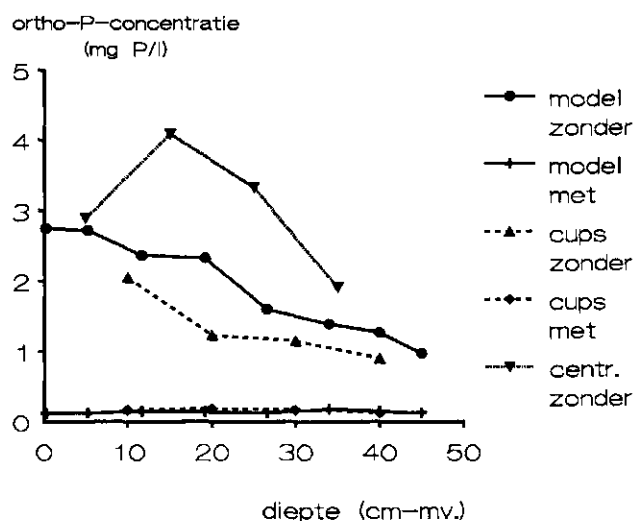


Fig. 11 Verloop van de gemeten (cups en gecentrifugeerd) ortho-fosfaatconcentratie en gemodelleerde concentratie als functie van de diepte (met en zonder ijzertoediening) bij nulbemesting

bovengrond van deze plot bedroeg 95%. Van de plots is het vocht uit de bodem op twee manieren onttrokken, namelijk via centrifuge van het bodemmateriaal en via poreuse cups die in de bodem zijn ingebracht en onder vacuüm zijn afgezogen.

Zonder ijzertoeiening varieert de ortho-fosfaatconcentratie in de bodem van ongeveer 1 à 3 mg l⁻¹ en met ijzertoeiening ca. 0,12 à 0,25 mg l⁻¹ P (figuur 11). Dit is een daling van meer dan 80%. Het effect van ijzertoeiening op de reductie van de fosfaatconcentratie wordt goed gemodelleerd. Daarom kan met de gehanteerde procesformulering en parameters in het model (Schoumans, 1995a) een goede voorspelling worden gedaan van de reductie van de fosfaatbelasting naar het oppervlaktewater, indien het watertransport goed gemodelleerd wordt (Kruijne et al., 1995).

4.3.2 Reductie fosfaatbelasting naar de perceelssloot

Aangezien gebleken is dat gesynthetiseerd ijzerhydroxyde niet alleen op laboratorium schaal effectief is om fosfaat te binden, maar ook onder veldomstandigheden (par. 4.2) en daarnaast het model in staat is om deze reductie van de fosfaatconcentratie goed te simuleren (par. 4.3.1), is het met behulp van het tweedimensionale hydrologische model MOISHE mogelijk om de effecten van een eenmalige ijzerdosering op de reductie van de fosfaatbelasting op lokale schaal (perceelssloot) te simuleren. Hierbij wordt een strook van 10 meter breed aan weerszijde van de sloot met ijzerhydroxyde behandeld, aangezien in een veldstudie met behulp van een bromide proef is aangetoond dat de stroombanen op grotere afstand via dieper stroombanen afwateren (Driessen, 1992). Dit betekent dat het fosfaat, dat vrijkomt in de bovengrond op grotere afstand, een langere transportweg aflegt door de ondergrond, waardoor een groot deel van het fosfaat weer gebonden wordt in de ondergrond. Randvoorwaarde hierbij is dat de fosfaatgiften maximaal gelijk zijn aan de fosfaatonttrekking door het gewas, daar anders op termijn ook de diepere ondergrond volledig met fosfaat wordt opgeladen. Als uitgangspunt voor deze modelberekeningen is gekozen voor de situatie waarop het twee-dimensionale hydrologische model MOISHE is gecalibreerd (sloot 1 op onderzoekslocatie 1; Kruijne et al., 1995). Het westelijke perceel gelegen aan sloot 1 (perceel 1; aanhangsel 1), is relatief diep met fosfaat bewerkt (o.a. veroorzaakt door diepploegen), waardoor de fosfaatbezettingsfractie tot op grote diepte is verhoogd (80 à 100 cm - mv.; figuur 2a) in vergelijking tot perceel 2 (± 60 cm - mv.; figuur 2a).

Allereerst is nagegaan wat het korte-termijn effect is (6 jaar) van het wel of niet inwerken van ijzerhydroxyde (0,2% Fe) in de talud van de sloot, aangezien dit in de praktijk bewerkelijk is. Figuur 12 geeft hiervan de resultaten.

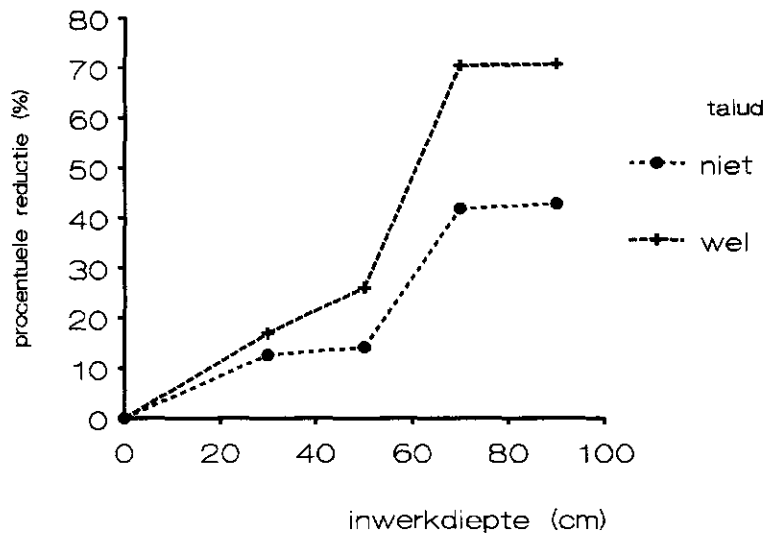


Fig. 12 Effect van inwerkdiepte en taludbehandeling van ijzerhydroxyde (0,2% Fe) op de reductie van de fosfaatbelasting (ortho-P) van de perceelssloot

Indien ook de talud met ijzer wordt behandeld kan, afhankelijk van de inwerkdiepte van het ijzer, de reductie van de fosfaatvrucht op korte termijn met maximaal extra 30% dalen (figuur 12). Dit wordt veroorzaakt door doordat de rand van de talud nog steeds fosfaat kan afgeven als fosfaatarm (gefilterd) ondiep grondwater door de talud uit het perceel treedt. Tevens is nagegaan wat het effect is van de hoogte van ijzerdosering (0,05%, 0,10, 0,20 en 0,30% Fe) en inwerkdiepte (resp. 30, 50, 70 en 90 cm - mv.) op de reductie van de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater indien ook de talud wordt behandeld. Deze berekeningen zijn zowel uitgevoerd voor de verdeling van de fosfaattoestand zoals deze is aangetroffen in de percelen gelegen aan sloot 1 (westelijk perceel 1 en oostelijk perceel 2; figuur 13a), als voor de situatie dat de fosfaattoestand van perceel 2 ook voor perceel 1 zou gelden. Dit laatste is uitgevoerd omdat perceel 1 dieper verwerkt is geweest, dan gebruikelijk is geweest in het Schuitenbeekgebied.

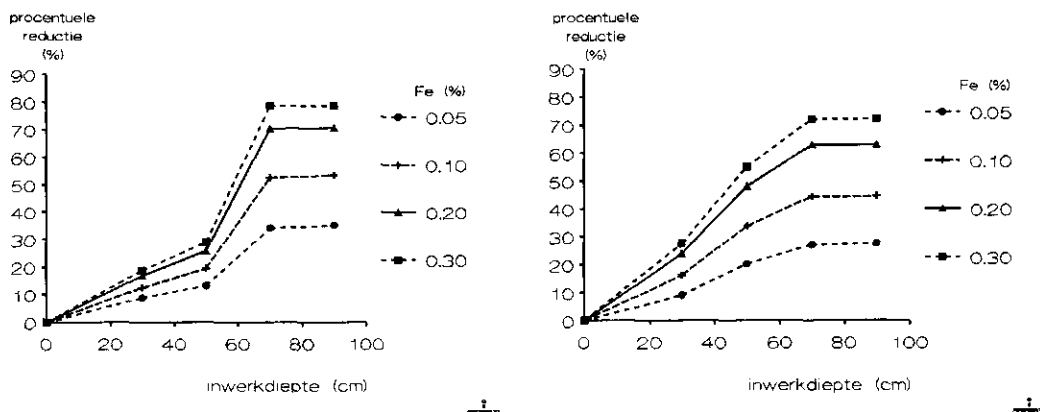


Fig. 13 Effect van inwerkdiepte en ijzerdosering op de reductie van de ortho-fosfaat-belasting van de perceelssloot (a: west perceel 1 en oost perceel 2; b: west perceel 2 en oost perceel 2)

Bij een ijzerdosering van 0,2% over de gehele diepte waar verhoogde fosfaatgehalte wordt gevonden (ca. 70 cm - mv.) kan een reductie bereikt worden van ca. 70% (figuur 13a). Indien ook ijzer wordt gebracht op grotere diepte dan de fosfaatindringings-diepte, daalt de fosfaatbelasting vrijwel niet. Indien de bodem echter 20 cm ondieper wordt behandeld dan deze indringingsdiepte, dan daalt de reductie van de fosfaatbelasting tot ca. 10 à 30%. Deze berekeningen geven aan dat het van groot belang is dat de bodem volledig met het ijzermateriaal wordt behandeld tot de diepte met verhoogde fosfaatgehalte aan het bodemcomplex. Tevens blijkt dat naarmate de ijzerdosering toeneemt ook de reductie van de fosfaatbelasting naar de perceelssloot toeneemt. De procentuele reductie van de fosfaatbelasting is laag indien alleen de bovengrond (0-50 cm) wordt behandeld. Dit wordt veroorzaakt doordat de ondergrond van perceel 1 een grote bijdrage levert aan de fosfaatbelasting van het oppervlakte-water. De fosfaatconcentraties in de ondergrond zijn weliswaar lager dan in de bovengrond, echter de waterafvoer uit het perceel door deze lagen is groter dan die door de bovengrond. Uit figuur 13b blijkt dat een dergelijk effect minder groot is als de fosfaatophoping meer geconcentreerd is in de bovengrond. Echter ook voor dit perceel geldt dat ijzerdosering noodzakelijk is tot en met de laag met een verhoogde fosfaatbezettingsfractie (60 cm - mv.). Aangezien bij behandeling van een strook langs de sloot met ijzermateriaal, het fosfaat uit de bovengrond, op niet al te grote afstand van deze strook, niet direct in de strook terecht komt, kan mogelijke veroudering van vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde een rol spelen. Hiermee is geen rekening gehouden, omdat verwacht wordt dat dit effect gering zal zijn. Het fosfaat uit de bovengrond dat op grotere afstand van de strook uit de bodem uitspoelt, spoelt hoogstwaarschijnlijk niet meer via deze strook uit naar het oppervlaktewater, maar via de diepere ondergrond, waardoor aldaar het overgrote deel van het uitspoelde fosfaat wordt gebonden.

Tot slot is gemodelleerd wat het lange-termijn effect is van het wel of niet bemesten van het met ijzer behandelde oppervlak (met fosfaatgiften gelijk aan onttrekking door het gewas). Hieruit blijkt dat voor een simulatie van 20 jaar nagenoeg geen verschil gevonden wordt in de hoogte van de reductie van de fosfaatuitspoeling. Dit wordt veroorzaakt door de relatief lage fosfaatconcentraties die in de bodemoplossing ontstaan als gevolg ijzerhydroxyde toediening met een hoog fosfaatbindend vermogen. Door dit hoge fosfaatbindend vermogen stijgt de fosfaatconcentratie nagenoeg niet door een beperkte mestgift (het toegediende fosfaat wordt volledig gebonden), waardoor ook vrijwel geen extra uitspoelingsverliezen optreden uit de bouwvoor naar het grond- en oppervlaktewater. Vervolgens wordt het toegediende fosfaat in de loop van het jaar door het gewas opgenomen. Op grond hiervan wordt geconcludeerd dat het vooralsnog niet noodzakelijk lijkt dat bemesting van de met ijzer behandelde grond achterwege dient te blijven. Enige voorzichtigheid hierbij is geboden aangezien de fosfaatopname module van dit tweedimensionale model een vereenvoudiging is van de werkelijk, zodat wellicht meer verliezen uit de bouwvoor kunnen optreden dan wordt gemodelleerd.

4.3.3 Reductie fosfaatbelasting naar het oppervlaktewater in het stroomgebied van de Schuitenbeek

De bijdrage van de verschillende grondwatertrapeenheden op de fosfaatbelasting van de Schuitenbeek is globaal ingeschat voor een aantal varianten betreffende de bijdrage van de ondiepe waterafvoer uit de landbouwgronden bij verschillende grondwatertrappen (Schoumans en Köhlerberg, 1995). Hierbij is gebruik gemaakt van de fosfaattoestand van alle gemeten profielen in het Schuitenbeekgebied (Breeuwsma et al., 1989). Figuur

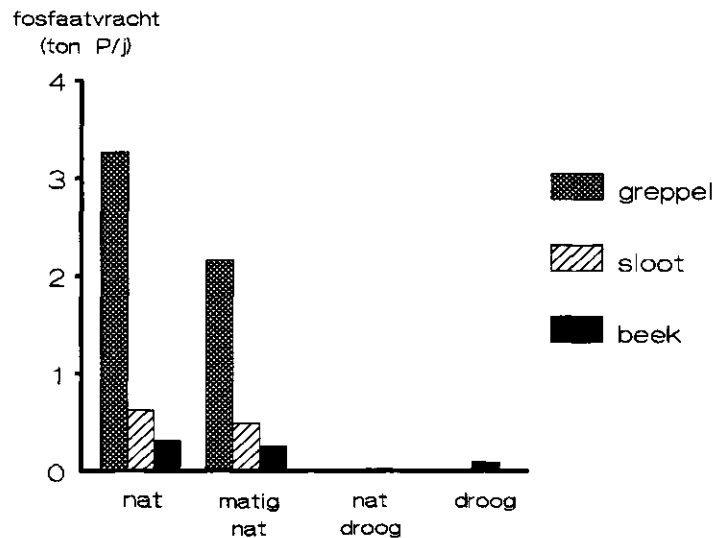


Fig. 14 Bijdrage van het areaal natte en droge gronden aan de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater in het Schuitenbeekgebied

14 geeft een schatting van de bijdrage van de verschillende ontwateringssytemen op de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater.

Uit figuur 14 blijkt dat op grond van de gemeten fosfaatprofielen in het Schuitenbeekgebied, de natte en matig natte gronden hoofdzakelijk (voor 98%) de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater bepalen. Deze resultaten komen goed overeen met een regionale studie naar de voorspelling van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden in het Schuitenbeekgebied (Schoumans en Kruijne, 1995a). Voor deze gronden is de ondiepe fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater die via greppels plaatsvindt, het grootst. Dit betekent dat de bodemchemisch maatregelen zich juist op deze gronden dienen te richten.

Reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater hangt sterk af van de fosfaatgift en de inwerkdiepte van het ijzer. Berekeningen zijn uitgevoerd voor natte percelen met een ontwateringsbasis van 40 cm - mv. waaraan 0,1, 0,2, 0,3 en 0,4% Fe (op massa basis) is toegediend tot een maximale inwerkdiepte van 50 cm. Deze diepte is aangehouden omdat de fosfaatindringingsdiepte van de bemonsterde punten (Breeuwsma et al., 1989) in het Schuitenbeekgebied veelal niet dieper ligt dan 50 cm - mv (Schoumans en Kruijne, 1995a). De effecten van deze variabelen op de reductie van de fosfaatbelasting via greppels zijn in figuur 15 weergegeven.

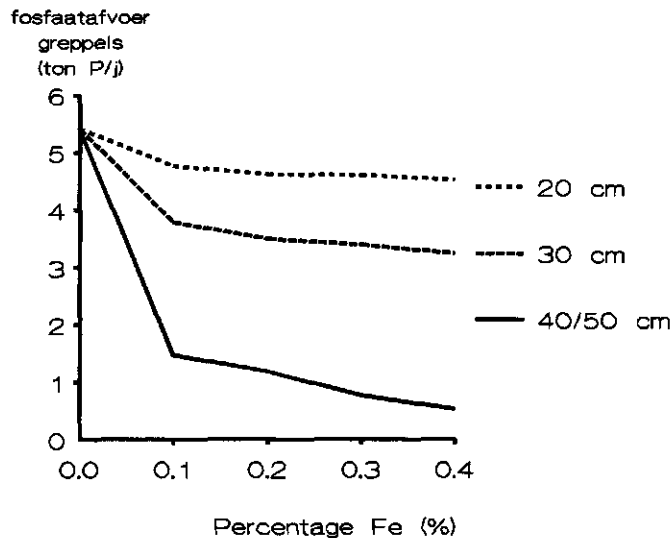


Fig. 15 Schatting van de invloed van inwerkdiepte en de ijzerdosering op de reductie van de ortho-fosfaatbelasting van het oppervlaktewater via de greppelafvoer met een ontwateringsbasis van 40 cm - mv.

Uit figuur 15 blijkt dat bij een ontwateringsbasis van 40 cm de behandelingsdiepte een grote invloed heeft. Een optimale reductie wordt pas verkregen indien over het gehele greppel afvoertraject van de bodem (hier 40 cm) de bodem wordt behandeld. Hieruit blijkt dat de fosfaatverzadigingsgraad van de lagen onder de bouwvoor (20 à 40/50 cm) een duidelijke bijdrage levert aan de fosfaatbelasting van de greppels. Dit is ook aannemelijk aangezien de grondwaterstand van natte en matig natte gronden relatief weinig in de laag 0-20 cm voorkomt en gedurende een veel langere tijd in de laag 20-50 cm. Uit bovenstaande figuur blijkt tevens dat de fosfaatbelasting van greppels bij een ontwateringsbasis van 40 cm niet vermindert, indien de bodem ook nog in de laag van 40 tot 50 cm met ijzer wordt behandeld. Dit wordt veroorzaakt doordat bij deze *schematisering op regionale schaal* aangenomen wordt, dat het grondwater beneden een diepte van 40 cm - mv. grotendeels via de sloten wordt afgevoerd en niet via de greppels. Het effect van behandeling van de bodem dieper dan 40 cm zal dus wel leiden tot een reductie van de fosfaatbelasting van de sloten. De reductie op dit systeem is echter zeer gering aangezien slechts 10 cm van de bodem die op de sloten afvoert (40-200 cm) behandeld is. Dit is hoofdzakelijk een effect van de schematisering die gebruikt is om op regionale schaal toch globaal de effecten van de reductie van de fosfaatbelasting aan te kunnen geven, aangezien op perceelsschaal (par 4.3.2), bij verhoogde fosfaatgehalten dieper dan de ontwaterings-basis van de aanliggende perceelsgreppel/sloot, de reductie van de fosfaatbelasting van de aanliggende sloot wel toeneemt bij een diepere behandeling. Wel blijkt uit deze regionale analyse duidelijk dat een te ondiepe behandeling een (zeer) beperkte reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater teweegbrengt. Dit is in overeenstemming met de resultaten op perceelsschaal (par.4.3.2).

5 Hydrologische maatregelen

5.1 Voorselectie

In een oriënterende modelstudie zijn met een aangepaste versie van SWATRE en met ANIMO (versie 3.3) acht mogelijke waterbeheersmaatregelen op perceelsniveau onderzocht op hun effect op de fosfaatuitspoeling (Jeurissen, 1993). Deze maatregelen zijn gericht op vermindering van de frequentie van hoge grondwaterstanden, en/of de (gedeeltelijke) uitschakeling van de ontwateringsfunctie van perceelssloten. De maatregelen gericht op vermindering van de frequentie van hoge grondwaterstanden zijn; a) intensief draineren door het aanleggen van (extra) drainbuizen of sloten, b) intensief draineren en de ontwateringsbasis verhogen (door de slootbodem te verhogen, of het slootpeil op te voeren), en c) peilbeheer. De maatregelen gericht op de ontwateringsfunctie van de perceelssloten zijn; d) egaliseren ter vergroting van de bergingscapaciteit op het maaiveld, e) perceelssloten dichten of uitschakelen en intensief draineren met drainbuizen, en f) greppels dichten, het slootpeil opvoeren en intensief draineren met drainbuizen op grote diepte.

De maatregelen die zijn doorgerekend voldoen alle aan de gestelde randvoorwaarde dat er geen noemenswaardige beïnvloeding van de regionale hydrologie mag optreden. Deze invloed is getoetst aan de gemiddelde grondwaterstand en de overschrijdingskans van grondwaterstanden in de fosfaatverzadigde laag. Het effect op de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater is berekend bij fosfaatgiften gelijk aan de fosfaatopname door het gewas.

Maatregel f is als de meest perspectiefrijke maatregel uit deze studie naar voren gekomen. Wanneer het slootpeil varieert tussen 0,20 en 0,80 m beneden maaiveld, en de afvoer vrijwel geheel verzorgd wordt door diepe drains met ontwateringsbasis op 0,70 m beneden maaiveld, dan wordt de som van de fosfaatafvoertermen ten opzichte van de huidige situatie met 95% gereduceerd. De afvoertermen van de waterbalans zijn gegeven in tabel 5. De gemiddelde slootafvoer is gereduceerd van 118 mm.j⁻¹ in de huidige situatie tot 4 mm.j⁻¹ met deze maatregel. De greppelafvoer, die in de huidige situatie gemiddeld 104 mm.j⁻¹ bedraagt, valt weg. Via de diepe drain wordt gemiddeld 217 mm.j⁻¹ afgevoerd. De gemiddelde oppervlakkige afvoer blijft vrijwel onveranderd en bedraagt 28 mm.j⁻¹. De gemiddelde infiltratie vanuit de sloot naar het perceel is 4 mm.j⁻¹. De berekende fosfaatafvoer bestaat volledig uit oppervlakkige afvoer. Door de geringe slootafvoer is de fosfaatafvoer via de sloten nihil.

Tabel 5 Afvoertermen van de gemiddelde jaarbalans (periode 1976-1981) in de huidige situatie en de situatie met hydrologische maatregel (naar Jeurissen, 1993)

	huidige situatie	hydrologische maatregel
oppervlakkige afvoer	26	28
greppel	104	-
sloot	118	4
diepedrain	-	217

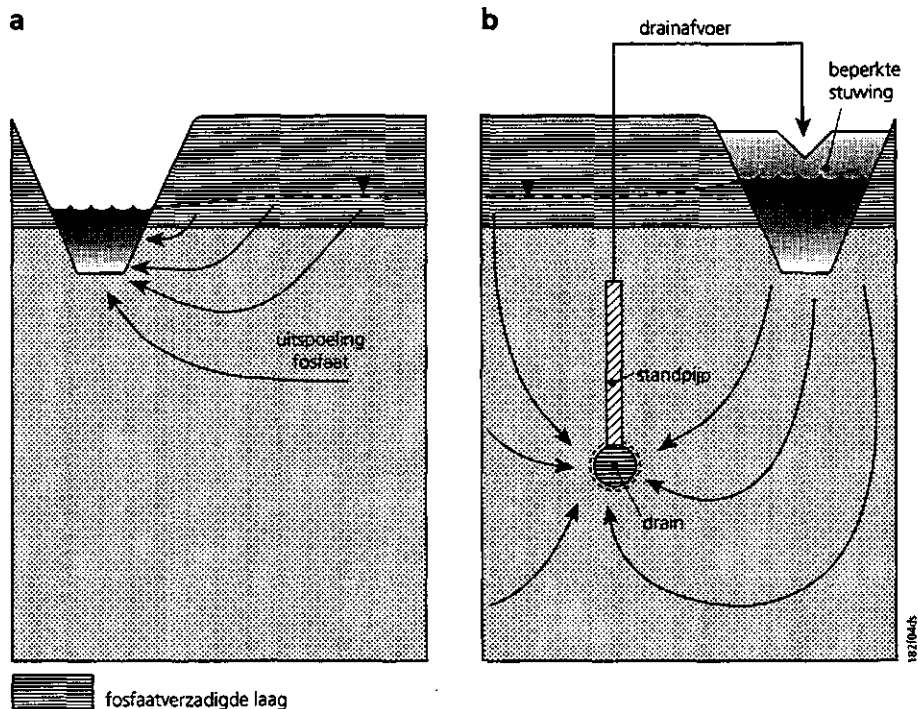


Fig. 16 Schematische weergave van de uitspoeling van fosfaat in a) de normale ontwateringssituatie en b) de situatie met de geselecteerde hydrologische maatregel

De werking van de geselecteerde hydrologische maatregel is in figuur 16 schematisch weergegeven. De maatregel is gericht op het terugdringen van de ondiepe afvoer naar het oppervlaktewater, door de ondiepe grondwaterstroming te verplaatsen van de fosfaatverzadigde bovengrond naar de ondergrond, waar het opgelost fosfaat alsnog wordt gebonden door de fosfaatsorptiecapaciteit van de ondergrond. Indien de drain op grote diepte wordt geplaatst (minstens 2,5 m diepte) benadert de fosfaatconcentratie van de drainafvoer de natuurlijke achtergrondconcentratie van het grondwater. Bij de uitvoering van de hydrologische maatregel op de onderzoekslocatie is er niet voor gekozen om de perceelssloot te dempen en volledig te vervangen door een drain, maar om het slootpeil in beperkte mate te stuwten. Hiermee wordt getracht door infiltratie van slootwater, dat vervolgens in het perceel naar de ondergrond percoleert, het transport van fosfaat naar de ondergrond te bevorderen. Op de proeflocatie die voor dit onderzoek beschikbaar is, zijn de mogelijkheden voor infiltratie uit de sloot beperkt door de helling van het gebied en de bolling van de percelen in de richting loodrecht op de sloten. De essentie van de hydrologische maatregel is echter de werking van de diepe drain.

5.2 Veldproeven

Eind augustus 1991 is een proeflocatie ingericht met een experimentele uitvoering van de hydrologische maatregel (figuur 16). In perceel 1 is een drain geïnstalleerd op 4 meter afstand van sloot 1, op 2,5 m beneden maaiveld. De drainlengte is 100 meter. Via een afsluiter en een verticale standpijp stroomt de drainafvoer in een betonnen reservoir. De bovenkant van deze standpijp is ongeveer gelijk aan de slootbodem. Het reservoir is voorzien van een pomp met vlottermechanisme. De

drainafvoer wordt vóór de damwand in sloot 1 geloosd, met het doel om het slootpeil op te voeren. Het reservoir reikt vanaf het maaiveld tot 2 m diepte, en heeft een diameter van 1,5 m.

5.2.1 Drainafvoer

Drainafvoer treedt op wanneer de drukhoogte in de drain stijgt boven het niveau van de uitstroomopening van de standpijp (2,79 m + NAP; dat is 0,1 m beneden het niveau van de slootbodem ter hoogte van de damwand). Tot eind 1993 is de drainafvoer op dagbasis bemonsterd, en daarna op basis van steekmonsters. De drainafvoer is geloosd in de meetsectie van sloot 1, waar een maximum slootpeil van ca. 3,17 m + NAP is ingesteld. Een deel van de drainafvoer kan via de sloot gaan circuleren binnen het perceel. Hoe dat in zijn werk gaat wordt hieronder besproken.

Uit metingen van de snelheid waarmee de drain het reservoir vult, blijkt dat bij drukhoogten in de drain van 3,0 tot 3,17 m + NAP debieten optreden van 120 tot 150 m³.d⁻¹. Bij nog grotere drukhoogten in de drain kan het debiet van de drain de capaciteit van de pomp overtreffen. De pomp werkt dan continue en het waterpeil in het reservoir (dat is de drukhoogte in de drain) stijgt totdat een evenwicht is bereikt met de grondwaterstand boven de drain.

Wanneer deze waarden voor het gemeten debiet van de drain van 120 tot 150 m³.d⁻¹ worden vergeleken met waarden voor het debiet van de sloot van 28 tot 58 m³.d⁻¹ (berekend uit de slootafvoer die in dezelfde week is geregistreerd), dan is het duidelijk dat een aanzienlijk deel van het water dat in de sloot wordt geloosd via de drain gaat circuleren binnen het perceel. Als vervolgens het maximum slootpeil wordt overschreden, dan zal de rest van dit drainwater, aangevuld met de ontwatering van de percelen, via de meetsloot tot afvoer komen. Van zo'n situatie is sprake bij opbolling van het grondwater, dat wil zeggen als de grondwaterstand in het midden van de percelen stijgt boven het ingesteld slootpeil. Met een gemiddelde helling van het maaiveld in het gebied van 0,25% en een verschil in maaiveldshoogte tussen het midden en de rand van de percelen die varieert van 0,1 tot 0,3 m, kan deze situatie snel optreden (Kruijne et al., 1995). Vooral in de natte periode van medio 1993 tot medio 1994 is dit het geval geweest.

5.2.2 Concentraties in het drainwater

Voor de gehele meetperiode is de (rekenkundig) gemiddelde concentratie orthofosfaat van de drainafvoer 0,14 mg.l⁻¹ P (standaardafwijking $s = 0,09$, $n = 98$). Tot mei 1992 is tevens de concentratie totaal-fosfaat bepaald. In deze periode bedraagt de concentratie orthofosfaat 84% van de concentratie totaal-fosfaat, wat voor de gehele meetperiode neerkomt op een gemiddelde concentratie totaal-fosfaat van de drainafvoer à 0,17 mg.l⁻¹ P. Deze concentratie is wat hoger dan de algemene milieukwaliteits-doelstelling die voor het oppervlaktewater geldt (0,15 mg.l⁻¹ totaal-P), maar beduidend lager dan de gemiddelde fosfaatconcentratie die uit dergelijke fosfaatverzadigde percelen ondiep uitspoelt (1 à 1,5 mg.l⁻¹ P). Er is een stijgende

trend in de fosfaatconcentraties van de drainafvoer geconstateerd; voor de periode van augustus 1991 tot eind juni 1993 is de gemiddelde concentratie $0,12 \text{ mg.l}^{-1}$ ortho-P ($s = 0,07$; $n = 75$), en voor de periode van 1 juli 1993 tot 10 augustus 1994 $0,22 \text{ mg.l}^{-1}$ ortho-P ($s = 0,11$; $n = 23$). Dit zou er op kunnen wijzen dat bepaalde processen een rol spelen die nog niet in het model zijn ingebouwd, zoals bijvoorbeeld preferente stroombanen.

5.2.3 Sloopafvoer en fosfaatvracht

De bodem van sloot 1 daalt in de meetsectie (100 m lengte) van 3,12 naar 2,89 m + NAP. De drooglegging van de percelen (het verschil tussen het niveau van het maaiveld in het midden van het perceel en het slootpeil) daalt in dezelfde richting. Met de instelling van het slootpeil op 3,17 m + NAP is de drooglegging van perceel 1 en 2 respectievelijk 0,69 à 0,28 m, en 0,78 à 0,51 m. Een klein deel van perceel 1 ontwatert tevens naar een lager gelegen perceelssloot ten Westen van de proeflocatie. Perceel 2 ontwatert tevens naar sloot 2; deze meetsloot voert alleen af bij hoge grondwaterstanden en valt bij een dalende grondwaterstand eerder droog dan sloot 1.

De gemiddelde uitspoelingsconcentratie orthofosfaat van sloot 1 bedraagt over de gehele meetperiode $0,48 \text{ mg.l}^{-1}$ P. In de periode vóór invoering van de hydrologische maatregel is de gemiddelde uitspoelingsconcentratie laag geweest; $0,21 \text{ mg.l}^{-1}$ ortho-P bij een gemiddelde grondwaterstand van 0,81 m beneden maaiveld. In de periode met hydrologische maatregel, tot eind juni 1993, is de gemiddelde uitspoelingsconcentratie niet of nauwelijks gedaald, bij een wat hogere gemiddelde grondwaterstand van 0,76 m beneden maaiveld. De waterhoeveelheid in de periode vóór invoering van de hydrologische maatregel is echter veel lager dan in de periode tot eind juni 1993, zodat de uitspoelingsconcentraties niet goed vergeleken kunnen worden. In de periode van juli 1993 tot en met juli 1994 is de uitspoelingsconcentratie $0,90 \text{ mg.l}^{-1}$ ortho-P. Dit is ruim hoger dan de concentratie in de drain. Deze periode is met een gemiddelde grondwaterstand van 0,62 m beneden maaiveld relatief nat geweest. Op grond hiervan wordt geconcludeerd dat stuwings van het slootpeil onder deze omstandigheden (sterke helling van het gebied en de bolling van de percelen) niet goed functioneert en er toch oppervlakte-afvoer en ondiepe uitspoeling heeft plaatsgevonden. In paragraaf 7.3 wordt nader ingegaan op een aantal varianten voor de inrichting van het gebied bij invoering van deze hydrologische maatregel.

5.3 Reductie fosfaatbelasting naar het oppervlaktewater

De afvoer van de sloten 2 en 4 op de onderzoekslocaties is niet beïnvloed door de aanleg van de hydrologische maatregel bij sloot 1. Indien wordt verondersteld dat deze beide sloten aan het begin van de meetperiode zouden zijn uitgeschakeld en dat de ontwatering van de percelen via diepe drainage zou hebben plaatsgevonden (met gelijke ontwateringsbasis), kan de reductie van de fosfaatuitspoeling berekend worden (tabel 6).

Uit tabel 6 blijkt dat bij sterk fosfaatverzadigde percelen een reductie mogelijk is van circa 79 à 89%, afhankelijk van het deel van de ontwatering van de percelen dat via ondiepe stroming tot stand komt. De gemiddelde uitspoelingsconcentraties totaal fosfaat bedragen voor sloot 2 en 4 respectievelijk 1,43 en 1,54 mg.l⁻¹ P (Schoumans en Kruijne, 1995b). Voor de concentraties totaal-fosfaat worden vrijwel dezelfde reducties berekend.

Tabel 6 Gemeten fosfaatafvoer (ortho-fosfaat) van 2 perceelssloten en berekende reductie in de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater bij vervanging van resp. 100, 95 en 90% van de (ondiepe) stroming naar de perceelssloten door diepere stroming (met een gelijke ontwateringsbasis; drainconcentratie van 0,14 mg l⁻¹ P)

meet-sloot	water-afvoer 10 ³ m ³	fosfaat-vracht kg P	gemiddelde sloot-concentratie mg.l ⁻¹ P	berekende fosfaat-belasting sloot bij ¹			reductie fosfaatvracht sloot bij ¹		
				100%	95%	90%	100%	95%	90%
2	7,05	8,39	1,19	0,14	0,19	0,25	88	84	79
4	3,67	4,81	1,31	0,14	0,20	0,26	89	85	80

1) respectievelijk 100, 95 en 90% via diepe drainage met een en 0, 5 en 10% afvoer via ondiepe drainage met een gemiddelde concentratie zoals gemeten in de sloot

Op basis van de resultaten van een studie naar de oppervlaktewaterbelasting met fosfaat van de Schuitenbeek (Schoumans en Kruijne, 1995a) kan tevens een schatting van de reductie voor het Schuitenbeekgebied gemaakt worden. Voor het areaal gras- en maïsland op natte gronden in het Schuitenbeekgebied (106 ha met grondwaterklasse B (grondwatertrap II) en 1967 ha met grondwaterklasse C (grondwatertrap III, V) is voor de periode 1988 tot en met 1993 met ANIMO een gemiddelde fosfaatafvoer gemodelleerd van 4,4 t.j⁻¹ (totaal-P). Het afvoervolume afkomstig van dit areaal bedraagt gemiddeld 7,9 x 10³ m³.j⁻¹. De totale fosfaatafvoer van het gehele gebied bedraagt 4,8 t.j⁻¹ (totaal-P), waaruit blijkt dat vooral deze natte landbouwgronden de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater veroorzaken.

Invoering van een hydrologische maatregel voor het natte areaal landbouwgronden (2000 ha), waarbij 100% van de totale afvoer via diepe drainage tot stand komt, levert een gemiddelde reductie van de fosfaatafvoer van 69%. Wanneer 95% of 90% van de totale afvoer via diepe drainage tot stand zou komen, bedraagt de gemiddelde reductie resp. 65% en 62%. Dit percentage is lager dan de percentages genoemd in tabel 6 omdat bij de schematisatie van het Schuitenbeekgebied, die voor deze modelberekeningen is gebruikt, gronden binnen dezelfde combinatie van grondwatertrap en landgebruik vallen die verschillen qua fosfaatverzadigingsgraad en gemiddelde grondwaterstand.

6 Voor- en nadelen van de onderzochte maatregelen

bemesting

Het effect van verlaging van jaarlijkse fosfaatevenwichtsbemesting (110 kg P₂O₅ ha⁻¹) tot het niveau van nulbemesting, leidt tot een gemiddelde reductie van de fosfaatuitspoeling uit natte landbouwgronden, zoals deze in het Schuitenbeekgebied voorkomen, met ca. 20%. Nulbemesting houdt in dat in het geheel geen fosfaatbemesting meer wordt toegepast.

Een voordeel van een dergelijke maatregel is, dat deze via wetgeving relatief eenvoudig kan worden ingevoerd. Controle op perceelsschaal is daarentegen vrijwel niet mogelijk.

Een nadeel van achterwege blijven van dierlijke mestgiften is, dat het organische-stofgehalte van de bouwvoor uiteindelijk zal dalen als gevolg van mineralisatie. De belangrijkste landbouwkundige gevolgen hiervan kunnen zijn: structuurbederf, verandering in vochtleverantie en mineraaltekorten. De mineraaltekorten kunnen relatief eenvoudig gecompenseerd worden door kunstmestgiften, dan wel aanpassing van het veevoer voor die elementen die niet noodzakelijk voor gewasgroei maar wel voor het dier (b.v. Mg, Na, Cu, Co niet noodzakelijk voor grasgroei). De lange-termijn effecten van structuurbederf en verandering in vochtleverend vermogen op de produktie en de kwaliteit van het gewas zijn vooral voor bouwlandpercelen onduidelijk. Voor graslandpercelen daarentegen blijkt dat zonder dierlijke mestgiften en bij gebruik van alleen kunstmestgiften optimale produktie mogelijk is (Jenkinson and Rayner, 1977). Aangezien het natte areaal landbouwgronden in het Schuitenbeekgebied hoofdzakelijk uit graslandpercelen bestaat, wordt verwacht dat bij vervanging van dierlijke mestgiften door fosfaatvrije kunstmestgiften, landbouwkundig (qua produktie) vrijwel geen negatieve gevolgen zullen optreden. De gevolgen voor de landbouw-bedrijfsvoering zijn niet geïnventariseerd.

bodemchemisch

Bij uitvoering van de bodemchemische maatregel wordt een pH-neutraal mengsel van een ijzerhydroxyde-suspensie en een kalkzout ingebracht, in een strook van 10 m breedte aan weerszijde van de perceelssloot over de gehele diepte van het fosfaatfront. Voor de onderzoekslocatie (graslandperceel met grondwatertrap III) geldt dan dat afhankelijk van de ijzerdosering, de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater daalt met 70% (gemiddeld voor de weerjaren 1991 tot en met 1993 en bij een dosering van 0,2% Fe en fosfaatgiften lager dan de fosfaatopname door het gewas).

Aangetoond is dat gegeven de ijzerdoseringen en het zware metalen gehalte van deze materialen, geen noemenswaardige verhoging van het zware metalengehalte van de bodem zal optreden (Schoumans en Köhler, 1995).

Een voordeel van deze maatregel ten opzichte van de bemestingsmaatregel is, dat de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater beduidend sterker daalt, en dat beweiding mogelijk blijft tot een niveau van maximaal de fosfaatopname door gras. Een voordeel

ten opzichte van een hydrologische maatregel is, dat de inrichting van het gebied intact blijft.

Een nadeel van de bodemchemische maatregel is dat de huidige industriële aanmaak van de gebruikte ijzerhydroxyde-suspensie een zout bevat. Afhankelijk van de keuze van het ijzerhoudende uitgangsmateriaal (ijzersulfaat, ijzerchloride of ijzernitraat) ontstaat bij de synthese calciumsulfaat, calciumchloride of calciumnitraat. De kosten van ijzersulfaat en ijzerchloride zijn het laagst maar hebben zowel milieukundig als landbouwkundig neveneffecten. Het belangrijkste milieukundige effect is, dat tijdelijk bodemwater met verhoogde sulfaat-, chloride-, of nitraatconcentraties uitspoelen. Bij gebruik van ijzernitraat is de stikstofaanvoer ca. 25 maal zo hoog als de jaarlijkse stikstofbemesting voor grasland (ca. 340 kg N/ha). Hierdoor zullen gedurende 1 à 2 jaar sterk verhoogde concentraties in het oppervlaktewater zullen worden waargenomen. Het landbouwkundige gevolg, ten aanzien van het gebruik van sulfaat en chloride, is, dat kieming pas goed mogelijk is nadat deze zouten uit de bouwvoor zijn uitgespoeld. Verwacht wordt dat het gedeelte van het perceel dat met de ijzerhydroxyde-suspensie is behandeld, na 1 jaar opnieuw ingezaaid kan worden. Aangezien nitraat niet schadelijk is voor het gewas zijn de mogelijke landbouwkundige gevolgen van het gebruik van ijzernitraat beperkt tot tijdelijke onkruid bestrijding (op de onderzoekslocatie is een toename in de groei van brandnetels waargenomen). De kosten van ijzernitraat zijn echter 2 maal zo hoog als die van ijzersulfaat.

Technisch blijkt het goed mogelijk te zijn om met een beperkt aangepaste spitmachine de ijzerhydroxyde-suspensie in te werken tot een diepte van ca. 0,5 m (Hendriks en Huijsmans, 1995). Een voorwaarde is echter dat ook het gehele sloottalud behandeld dient te worden om de berekende effectiviteit te halen. Een nadeel van het gebruik van de spitmachine is dat verschraving van de bouwvoor optreedt met betrekking tot het organische-stofgehalte, doordat de gehele bovengrond tot een diepte van 0,5 m wordt gemengd. Vanuit technisch oogpunt kan dit vermeden worden door als alternatief gebruik te maken van de aangepaste spitmachine voor de bovengrond en een injecteur voor de ondergrond. Dit alternatief wordt echter niet aanbevolen omdat de effectiviteit van de maatregel duidelijk minder wordt als gevolg van een inhomogene verdeling van het toegediende materiaal.

Tot slot wordt opgemerkt dat er op dit moment nog onzekerheid bestaat ten aanzien van de effectiviteit van vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde om ook op lange termijn (oplopend tot enkele decennia) het fosfaat nog vast te houden dat is gebonden na toediening van vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde. Vooralsnog wordt verondersteld dat volstaan kan worden met een eenmalige ingreep.

hydrologisch

Uit de fosfaatconcentraties in het drainwater gedurende de meetperiode, blijkt dat op de perceelssloten van de onderzoekslocatie een reductie van de fosfaatbelasting mogelijk is van 79 à 89%. Voor het gehele Schuitenbeekgebied wordt geschat dat met de hydrologische maatregel de fosfaatbelasting vanuit natte landbouwgronden naar het oppervlaktewater gereduceerd kan worden met ongeveer 62 à 69% (gebaseerd op modelberekeningen voor periode 1988-1993; Schoumans en Kruijne 1995a). De reductie van 62% wordt gerealiseerd als, naast de aanleg van het diepe drainage-

stelsel, de bestaande greppels worden gedempt en de functie van de bestaande perceelsslotsen wordt gewijzigd (paragraaf 5.3). Het lage reductiepercentage (62%) worden berekend wanneer 90% van de ontwatering via diepe drains tot stand komt en de overige 10% via de perceelsslotsen. Een reductie van 69% wordt bereikt als de ontwatering voor volledig via diepe drains tot stand komt.

In het algemeen is verstopping van drainbuizen door fysische, chemische en biologische processen de belangrijkste factor die de levensduur van drainbuizen bepaalt. De levensduur van conventionele systemen met drainbuizen wordt vaak gesteld op 25-30 jaar. Verstopping door oxydatie en/of bacteriëngroei zal niet optreden in drains die in de permanent verzadigde zone zijn gelegd. Ter voorkoming van dichtslibben met bodemdeeltjes is toepassing van een omhullingsmateriaal met de juiste specificaties essentieel, omdat onderhoud niet meer mogelijk is.

Een voordeel van deze maatregel is, dat dierlijke mestgiften tot een maximum niveau van fosfaatevenwichtsbemesting mogelijk blijven, zodat geen verschraling van de bouwvoor optreedt en geen vervangende kunstmestgiften noodzakelijk zijn.

Een belangrijk aspect van de aanleg van de hydrologische maatregel zijn de uit te voeren egalisatie- en/of herinrichtingswerkzaamheden. Het dempen van ondiepe greppels vormt een noodzakelijk onderdeel van deze maatregel. Om een maximale reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater te bereiken, dienen de ondiepe ontwatering en oppervlakte-afvoer van de percelen geheel te worden uitgeschakeld. In hellende gebieden, waar de perceelsslotsen vaak samenvallen met laagten in het terrein, is het dempen van deze open ontwateringsmiddelen alleen mogelijk in combinatie met een volledige egalisatie van de percelen. Het voordeel van deze variant is dat de reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater van sterk fosfaatverzadigde gronden gelijk is aan de reductie die op de onderzoekslocatie is vastgesteld (tabel 6). Echter, alleen als de infiltratiecapaciteit aan het maaiveld voldoende is, kan stagnatie van water en vorming van natte plekken tijdens zeer natte perioden worden voorkomen. Indien de doorlatendheid van de bovengrond verslechtert (bijvoorbeeld door beweiding en/of berijding onder natte omstandigheden), zijn nadelige gevolgen voor de bedrijfsvoering ten gevolge van langdurige stagnatie van water aan het maaiveld niet uit te sluiten. Een ander nadeel van deze variant is de ernstige aantasting aan het landschap door (zware) egalisaties, door verwijdering van kavelbeplanting en door het dempen van perceelsslotsen.

In verband met deze nadelen is een tweede variant uitgewerkt (Kruijne et al., 1995) voor de egalisatie- en herinrichtingswerkzaamheden. In die gebieden waar de infiltratiecapaciteit aan het maaiveld onvoldoende is, zal plasvorming optreden, ongeacht de werking van het diepe drainagestelsel. In hellend gebied of op bollende percelen worden processen als plasvorming en oppervlakte-afvoer bepaald door de neerslag, de infiltratiekarakteristiek van de bodem, de karakteristiek van het maaiveld, de kritieke helling en de hellingslengte. Om bij grote neerslaghoeveelheden het deel van de neerslag af te voeren dat niet in de bodem kan infiltreren, wordt een stelsel van ondiepe, begroeide sloten aangelegd. Het ligt voor de hand om voor deze ondiepe, groene sloten het reeds bestaande stelsel van perceelsslotsen aan te passen. Deze ondiepe, groene sloten kunnen zodanig gedimensioneerd worden, dat zij relatieve laagten in het landschap vormen. In graslandgebieden kunnen deze begroeide

sloten gedurende grote delen van het seizoen normaal bewerkt en beweid worden. Kortom dit stelsel van begroeide, ondiepe sloten heeft alleen een functie voor de verwerking van oppervlakte-afvoer en dus niet voor de afvoer van het grondwater.

Een voordeel van deze uitvoering is dat een aantal waardevolle kenmerken van het landschap (bepantingen, reliëf) gespaard kunnen blijven en dat met een lichte egalisatie van de percelen kan worden volstaan. Bovendien zal de bedrijfsvoering niet beperkt worden door natte omstandigheden. Een nadeel is echter dat de reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater lager zal zijn. In paragraaf 5.3 zijn volgens deze variant reductiepercentages voor de natte gronden in het Schuitenbeekgebied berekend, door onderscheid te maken tussen twee afvoercomponenten met bijbehorende fosfaatconcentraties (tabel 6).

7 Kostenanalyse

Voor de kostenanalyse van de bemestings, bodemchemische en hydrologische maatregelen voor het stroomgebied van de Schuitenbeek, wordt verondersteld dat deze aanvullende maatregelen alleen zullen gelden voor het natte areaal landbouwgronden in dit stroomgebied, omdat deze gronden de grootste bijdrage leveren aan de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater. Het betreft hier ca. 2000 ha cultuurland (Breeuwsma et al., 1989; Schoumans en Kruijne, 1995a).

Voor de bemestingsmaatregel worden alleen de kosten die samenhangen met fosfaatnulbemesting doorgerekend. Ook bij de bodemchemische maatregel is één variant doorgerekend namelijk een dosering van 0,2% Fe, omdat hogere dosering op de onderzoekslocatie relatief inefficiënt zijn (figuur 13). Lagere ijzerdoseringen zijn wel mogelijk indien een lagere reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater wordt geaccepteerd. De inwerkbreedte die op de onderzoekslocatie noodzakelijk bleek (10 m aan weerszijde van de sloot) kan op regionale schaal variëren, en is onder andere afhankelijk van de hydrologie. Met betrekking tot de hydrologische maatregel is de kostenanalyse op regionale schaal slechts met een beperkte mate van nauwkeurigheid mogelijk, omdat deze sterk afhangt van de regionale hydrologie en de inrichting van de ontwatering van het stroomgebied. Om deze reden worden voor deze maatregel een aantal varianten doorgerekend.

Hieruit blijkt dat deze kostenanalyse globaal is, omdat slechts uitgegaan kan worden van de resultaten van onderhavige studie op perceelsschaal. Daarbij komt dat de uiteindelijke kosten sterk af zullen hangen van de geëiste reductie van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden.

7.1 Bemestingsmaatregelen

Voor de berekening van de kosten van aanvullende bemestingsmaatregelen tot een niveau van 'fosfaatnulbemesting' wordt uitgegaan van extra kosten die noodzakelijk zijn om te komen van fosfaatevenwichtsbemesting, toegediend in de vorm van dierlijke mest, tot fosfaatvrije kunstmest. Omdat de hoogte van fosfaatevenwichtsbemesting nog niet is vastgesteld, is vooralsnog uitgegaan van een fosfaatgift die gelijk is aan de gewasonttrekking, zijnde voor grasland ca. $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$.

Bij de kostenanalyse is alleen rekening gehouden met kosten voor mestafvoer, vervanging door fosfaatvrije kunstmestgiften en achterwege blijven van inwerkkosten van dierlijke mest. De mestafvoerkosten en inwerkkosten (mestinjectie/zodebewerking) bedragen resp. f 15,- en f 7,50 per m^3 dierlijke mest. Op grond hiervan wordt voor de kosten van mestafvoer een netto kostprijs aangehouden van f 7,50 per m^3 dierlijke mest. Indien de mestafvoer volledig plaatsvindt in de vorm van varkensdrijfmest (vleesvarkens en zeugen), met een gemiddeld fosfaatgehalte van $4,2 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ per m^3 mest, bedragen de jaarlijkse kosten voor mestafvoer ca. f 200,- per ha per jaar. Indien deze uitsluitend plaatsvindt in de vorm van kippemest, met een fosfaatgehalte van ca. $7,9 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ per m^3 mest, zijn de kosten gehalveerd tot f 100,- per

ha per jaar. Aangezien runderdrijfmest een laag fosfaatgehalte ($1,8 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) bezit, zal deze mestvorm vrijwel niet worden afgevoerd en op de drogere gronden worden aangewend (indien beschikbaar). Uitgaande van een 50:50%-verdeling van de verhouding waarin varkensdrijfmest en kippemest wordt afgevoerd (varkens- en kippedrijfmest), bedragen de netto kosten voor mestafvoer ca. f 150,- per ha per jaar.

Als gevolg van uitblijven van dierlijke mestgiften blijven ook de giften van een aantal belangrijke elementen achterwege (o.a. N, K, Mg en Na). Deze tekorten dienen gecompenseerd te worden door kunstmestgiften. In de kostenanalyse zijn alleen de kosten van deze hoofdelementen betrokken en niet die van sporenelementen, aangezien het gewas met betrekking tot deze elementen veel langer van de bodemvoorraad kan proviteren. De dierlijke mest die jaarlijks extra wordt afgevoerd (ter hoogte van $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5$) bevat gemiddeld ongeveer 102 kg werkzame N (bij dierlijke mesttoediening voor de eerste snede; IKC, 1995). Uitgaande van de 5 jaars gemiddelde prijs (KWIN-V, 1992) van f 1,12 per kg N bedragen de jaarlijkse N-kunstmestkosten ca. f 115,- per ha. Voor het uitrijden van deze extra hoeveelheid stikstofkunstmest zijn geen extra kosten berekend, omdat bij normaal landbouwkundig praktijk elk jaar N-kunstmest wordt uitgereden, zodat bij achterwege blijven van dierlijke mestgiften alleen de dosering verhoogd dient te worden. Voor de vervanging van K, Mg en Na kan niet uitgegaan worden van de vervangende waarde die via varkensdrijfmest of kippemest wordt afgevoerd, aangezien bij normaal landbouwkundig praktijk via beweiding aan de kalibehoeftte wordt voldaan én aan de voorraadbemesting van de bodem met Mg en Na (IKC, 1995). Uitgaande van een gemiddelde van 5 sneden gras is de kalibehoeftte $380 \text{ kg K}_2\text{O}$ per ha (IKC, 1995). De goedkoopste manier om aan de kali-, magnesium- en natriumbhoeftte te voldoen, is om gebruik te maken van Kali40-kunstmest (f 0,75 per kg K_2O) omdat deze naast K_2O (40%), ook MgO (6%) en Na_2O (4%) bevat (Westhoek, IKC-Veehouderij; pers. med.). Dit betekent dat door het achterwege blijven van beweiding de kunstmestkosten voor K, Mg en Na f 285,- per ha per jaar bedragen. Aangezien kalium maximaal voor 2 sneden tegelijk kan worden toegediend, dient de totale dosering minimaal over twee giften verdeeld te worden (à f 46,- per ha per dosering; KWIN-V, 1992). De totale kunstmestkosten worden geraamd op f 492,- per ha (f 115,- + f 285,- + f 92,-).

De kosten die mogelijk samenhangen met de aanpassing van de bedrijfsvoering zijn niet geïnventariseerd.

De totale jaarlijkse netto kosten voor fosfaatvrije bemesting bedragen ca. f 640,- per ha (afvoer dierlijke mest en aanwendig extra kunstmestgift). De totale kosten voor fosfaatvrije bemesting voor het natte areaal landbouwgronden in het stroomgebied van de Schuitenbeek bedragen dan 1,3 miljoen gulden per jaar meer dan die gemaakt worden voor fosfaatgiften gelijk aan de gewasonttrekking (ca. $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$).

Indien beweiding mogelijk moet blijven tot een niveau van fosfaatgiften gelijk van de gewasonttrekking, dient een strook van minimaal 10 m aan weerszijde van de sloot afgezet te worden (100 procent bemestingvrije bufferzones), aangezien de grondwaterstromingsbanen op grotere afstand van de sloot op de onderzoekslokatie eerst diep de bodem gaan alvorens deze ten dele op de perceelssloot ontwateren (par. 4.3.2; Driessen, 1992). Op grond hiervan wordt verwacht dat de effectiviteit beperkt lager zal zijn. De kosten voor het verplaatsen van de afrastering bedragen ca. f 600,-

per ha (LD-1995). Door deze afzetting daalt het areaal natte landbouwgrond met ca. 450 ha (350 m slootlengte per 3 ha en aankoop 10 m grond aan weerszijde van de sloot = 0,23 ha aankoop per ha landbouwgrond). De prijs van landbouwgrond in het Schuitenbeekgebied wordt geraamd op f 37.600,- per ha (KWIN-V, 1992), zodat deze kosten de belangrijkste investeringskosten zijn, namelijk ca. 17 miljoen.

7.2 Bodemchemische maatregelen

Zoals in paragraaf 4.3 is aangegeven, blijkt de procentuele reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater via de ondiepe afvoer (greppels) sterk af van de inwerkdiepte en de hoogte van de ijzerdosering (indien de bodemlagen behandeld worden die een verhoogd fosfaatgehalte bezitten). De kosten van deze bodemchemische maatregel hangen dan ook sterk af van de gemiddelde fosfaatindringingsdiepte in het Schuitenbeekgebied en de hoogte van de ijzerdosering. De gemiddelde kosten van de bodemchemische maatregel per ha te behandelen oppervlak, kan als volgt worden berekend:

$$fl_{chem} = \frac{\%Fe}{100} * \rho * BB * \frac{SL * FID}{OPP} * \frac{1}{\%Fe_{mat} / 100} * P_{mat} * 10^{-3}$$

met

fl_{chem}	= kostprijs	(gulden ha ⁻¹)
$\%Fe$	= ijzerdosering aan de bodem (percentage op massa basis)	(%)
ρ	= bulkdichtheid bodem	(kg m ⁻³)
BB	= behandelingsbreedte	(m)
SL	= totale greppel en/of slootlengte	(m)
FID	= gemiddelde fosfaatindringingsdiepte	(m)
OPP	= totale oppervlak van de gronden die op deze greppels ontwateren	(ha)
$\%Fe_{mat}$	= ijzergehalte van het materiaal dat wordt gebruikt (massa basis)	(%)
P_{mat}	= prijs ijzermateriaal per ton	(gld ton ⁻¹)
10^{-3}	= omrekeningsfactor gebruikte materiaal	(ton kg ⁻¹)

Ten aanzien van de ijzerdosering ($\%Fe$) wordt er voor het gehele Schuitenbeekgebied veiligheidshalve vanuit gegaan dat een gemiddelde dosering van 0,2% voldoende is (par. 4.2). De bulkdichtheid (ρ) van de bovengrond van zandgronden (tot ca. 40 cm) bedraagt ongeveer 1400 kg.m⁻³. De behandelingsbreedte (BB) wordt bepaald door breedte van het perceel waaruit water uit de laag vanaf maaiveld tot aan de ontwateringsdiepte van de greppel naar de greppel stroomt. In de veldstudie is op basis van bromide uitspoeling op de onderzoekslocatie vastgesteld dat het hier gaat over een breedte van ongeveer 10 meter (links en rechts van de sloot) (Driessen, 1992). Met behulp van de tweedimensionale modellering is aangetoond dat deze breedte voldoende is. Het totale areaal is 2000 ha. Gegevens over totale greppel en/of slootlengte (SL) ontbreken op dit moment voor het Schuitenbeekgebied. Ruwweg wordt thans ingeschat dat elke 3 ha natte gronden een ontwateringslengte heeft van 350 m. Dit betekent een totale greppel/slootlengte voor het Schuitenbeekgebied van ongeveer 233 km. Er wordt verder verondersteld dat de gemiddelde fosfaatindringingsdiepte in het natte deel van het stroomgebied ca. 40 cm bedraagt

(Schoumans en Kruijne, 1995), hetgeen ondieper is dan die in de sterk fosfaatverzadigde percelen van de onderzoekslokatie is aangetroffen (waarvoor de modelberekeningen zijn uitgevoerd; par. 4.3.2). Gegevens over ijzermateriaalkosten staan vermeld in tabel 7.

Tabel 7 Prijs (onder voorbehoud) en ijzergehalte van ijzerzouten

Materiaal	Fe-gehalte (%)	prijs (gld/ton)
Fe(NO ₃) ₃ -opl.	8	400
Fe ₂ (SO ₄) ₃ -opl.	12	180
gesynth. Fe(OH) ₃ uit Fe(NO ₃) ₃	2,65	160
idem uit Fe ₂ (SO ₄) ₃	4	125
FeSO ₄ .7H ₂ O gran. en Ca(OH) ₂ -susp. apart	18-20	230

Uit tabel 7 blijkt dat ijzersulfaat ruwweg 40% goedkoper is als ijzernitrat. Naast de gemiddelde materiaalkosten per ha (formule 3) zijn er ook inwerkkosten. Hendriks en Huijsmans (1995) hebben berekend dat voor een slootlengte van 100 meter en inwerkbreedte van 5 meter de totale kosten voor het gebruik van de spitmachine en de injecteur (inclusief inwerken) f 275,- bedragen. Omrekening naar de situatie zoals deze hier is uitgewerkt (350 m slootlengte per 3 ha en een behandelingsbreedte van 10 m aan weerszijde van de sloot) leidt tot een totale inwerkprijs van ca. f 1280,- per ha natte landbouwgrond (f 275,- * (20 m/5 m) * (350 m/100 m) / 3 ha = f 1280,- per ha). De kosten voor zaaiklaar maken en zaaïen bedragen ca. f 200,- per ha (LD, 1995; KWIV-V, 1992). Indien ook de talud met ijzer behandeld dient te worden, bedragen de extra kosten voor afrastering verwijderen, ploegen, egaliseren en sloottrekken ca. f 800,- per ha (LD 1995; KWIV-V, 1992).

Bij het gebruik van ijzersulfaat en ijzerchloride als uitgangsmateriaal ontstaan hoge zoutconcentraties in de bouwvoor. Doordat deze hoge zoutconcentraties eerst uit moeten uitspoelen, zal (op het deel van het perceel dat behandeld is) het eerste jaar geen gewasgroei mogelijk zijn. Het oppervlak in het Schuitenbeekgebied dat behandeld dient te worden, wordt geschat op 233 ha. De totale opbergstervingskosten bedragen eenmalig ca. 0,8 miljoen gulden (gebaseerd op 233 ha à f 3600,- per ha; bij 9 KVEM per 10 ton droge stofproductie en een prijs van f 0,40 per VEM; KWIV-V, 1992). Indien ijzernitrat als uitgangsmateriaal wordt gekozen treedt deze opbrengstderiving niet op aangezien hoge nitraatconcentraties landbouwkundig niet schadelijk zijn. Als gevolg van hoge nitraatgiften kunnen echter tijdelijk brandnetels opkomen, die bestreden dienen te worden. Hiervan worden de eenmalige kosten geraamd op 0,1 miljoen gulden (gebaseerd op 233 ha à f 400,- per ha).

Bij de bodemchemische maatregel blijft beweiding tot een niveau van fosfaatonttrekking door het gewas wel mogelijk (hoofdstuk 4), zodat geen kosten verbonden zijn aan mestafvoer en vervanging door kunstmestgiften.

Tabel 8 geeft een totaal overzicht van de kosten van bodemchemische maatregelen als het totale areaal natte gronden in het Schuitenbeekgebied met ijzermateriaal wordt behandeld.

Tabel 8 Schatting van de investeringskosten van bodemchemische maatregelen voor het areaal natte gronden in het Schuivenbeekgebied

Produkt	kosten		
	materiaal	inwerken ¹⁾	totaal
	----- (gld ha ⁻¹) -----		(miljoen gld)
gesynth. Fe(OH) ₃ uit Fe(NO ₃) ₃	15500	1480 - 2280	34 - 36
idem uit Fe ₂ (SO ₄) ₃	7600	1480 - 2280	18 - 20
FeSO ₄ ·7H ₂ O gran. en Ca(OH) ₂ -susp.	3160	1480 - 2280 ²⁾	9 - 11

1) range niet of wel meenemen van talud

2) werkelijke inwerkosten niet geïnventariseerd

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de totale investeringskosten variëren van ca. 4.500 tot 18.000 gulden per ha. Het nadeel van het gebruik van alle ijzeruitgangsmaterialen is dat tijdelijk (1 à 2 jaar) verhoogde zoutconcentraties ontstaan. Bij het gebruik van ijzernitrat als uitgangsmateriaal zijn er nagenoeg geen landbouwkundige effecten te verwachten en bedragen de kosten ca. 34 à 36 miljoen gulden. Indien ijzersulfaat als uitgangsmateriaal worden gebruikt, zijn de investeringskosten ruwweg 2 maal zo laag (18 à 20 miljoen gulden). Hierbij dient echter nog wel rekening gehouden te worden met eenmalige opbrengstdervingsverliezen (kosten ca. 0,9 miljoen gulden). De kosten van sequentiële toediening van FeSO₄-granulair en Ca(OH)₂-suspensie zijn het laagst. Omtrent de mate van homogeniteit na inwerken, die bepalend is voor de effectiviteit, zijn geen gegevens beschikbaar.

Als uit een regionale analyse blijkt dat volstaan kan worden met een lagere reductie van de fosfaatuitspoeling door toediening van 0,1% Fe, dalen de totale kosten (excl. talud) tot resp. 18,5, 10,6 en 6 miljoen gulden (resp. ongeveer 9.230, 5.280 en 3.060 gulden per ha). Indien de sloottalud wordt meebehandeld liggen de totale kosten ca. 1,3 miljoen gulden hoger (ca. f 800,- per ha).

7.3 Hydrologische maatregel

Voor de analyse van de kosten van de hydrologische maatregel wordt uitgegaan van een gebied waarin het drainagestelsel geheel bestaat uit open watergangen. Voor de ontwatering is een nieuw stelsel van diepe drains nodig, dat bestaat uit drainbuizen op grote diepte (2,5 m), die via een put op een transportbuis zijn aangesloten. Kruijne et al. (1995) hebben drie varianten voor dit diepe drainagestelsel uitgewerkt. De ontwatering via bestaande open waterlopen dient (vrijwel) geheel te worden uitgeschakeld, aangezien stuwung in dit gebied onvoldoende functioneert. Dit brengt egalisatie- en herinrichtingswerkzaamheden met zich mee, waarvoor twee varianten zijn geformuleerd (Kruijne et al., 1995). De ene variant betreft het volledig uitschakelen van ondiepe ontwatering en oppervlakte-afvoer; de andere voorziet in een stelsel van begroeide, ondiepe sloten, dat alleen een functie heeft voor de verwerking van oppervlakte-afvoer en dus niet voor de afvoer van het grondwater.

Aangezien de bindingscapaciteit van de ondergrond voldoende is om het overgrote deel van het fosfaat dat uit de bovengrond spoelt vast te leggen, kan volstaan worden met fosfaatgiften gelijk aan de fosfaatopname door het gewas. Daarom zijn aan deze

maatregel geen jaarlijkse extra kosten verbonden voor de afvoer van dierlijke mest en vervanging door kunstmestgiften. Belangrijke operationele kosten zouden de pompkosten kunnen zijn. Om twee redenen zijn de pompkosten, die bij de hydrologische maatregel op de onderzoekslocatie zijn gemaakt, niet representatief voor invoering van de hydrologische maatregel op regionale schaal. Ten eerste wordt de drainafvoer niet in een perceelssloot geloosd. Ten tweede kan in bepaalde delen van het gebied gebruik worden gemaakt van de natuurlijke helling. Dit brengt echter extra kosten voor transportbuizen met zich mee. In de overige delen kunnen één of meerdere pompstations noodzakelijk zijn. Pompkosten worden in deze studie niet geschat.

Ten aanzien van de drie uitgewerkte drainagesystemen worden een aantal andere eisen gesteld dan aan de conventionele drainagesystemen in Nederland. Ook ten aanzien van de uitvoering op grotere schaal gelden een aantal belangrijke eisen (Kruijne et al., 1995). Het verdient daarom aanbeveling om eerst een proefgebied van enige tientallen hectare in te richten. Bij deze hydrologische maatregel is het stromingspatroon naar de diepe drain wezenlijk anders dan bij conventionele drainagesystemen (met een conventioneel drainagesysteem wordt hier bedoeld een stelsel van evenwijdige drainbuizen, waarin een atmosferische druk heerst en die vrij ontwateren op een open watergang). Op grond van een analyse van het stromingspatroon (Kruijne et al., 1995) is de voorlopige conclusie, dat, gegeven de afvoerintensiteit, de opbolling (gradiënt) van het grondwater en de ontwateringsdiepte, met een grotere drainafstand kan worden volstaan dan bij conventionele drainagesystemen. Berekening van de benodigde gradiënt voor stroming naar dit type diepe drains met een formule die is bedoeld voor conventionele drainagesystemen kan leiden tot sterke overdimensionering en is derhalve onjuist.

De verschillende dimensies van de drie drainagesystemen zijn zodanig dat in de kostenberekening duidelijk naar voren komt welke componenten een belangrijk aandeel hebben in de begroting. De benodigde gradiënt voor stroming naar de drains is niet berekend maar geschat. Bij de begroting van de kosten van deze drie varianten voor het diepe drainagesysteem is ervan uitgegaan, dat er geen grote voorzieningen nodig zijn aan de benedenstroomse kant van de transportleiding(en). De kosten per hectare van het stelsel van diepe drains zijn door drie factoren bepaald:

- het aantal meters drainbuis per hectare
- het aantal meters transportleiding per hectare
- het aantal putten per hectare

Uit de berekeningen (Kruijne et al., 1995) is gebleken dat de drainagebuizen de belangrijkste kostenpost vormen.

Uit de twee varianten die zijn doorgerekend met betrekking tot egalisatie- en herinrichtingswerkzaamheden blijkt dat de kosten worden bepaald door de de egalisatiewerkzaamheden (Kruijne et al., 1995).

In tabel 9 zijn de totale kosten samengevat voor zes combinaties van een diep drainagesysteem en een uitvoering van de egalisaties en herinrichting. Bij de berekening is verondersteld dat er geen voorzieningen nodig zijn aan de benedenstroomse kant van de transportleidingen. De bedragen in deze tabel zijn

verhoogd met 15% voor de overhead van de aannemer en 17,5% BTW en zijn dus exclusief directiekosten.

Tabel 9 Totale kosten voor verschillende varianten voor de hydrologische maatregel (in gulden per hectare)

diep drainagesysteem		egalisatie en herinrichting	
	drainafstand	volledige egalisatie en demping van perceelssloten en greppels	lichte egalistatie en aanleg van ondiepe, begroeide sloten
	(m)		
1	25	14.800	10.100
2	150	10.800	6.100
3	100	11.300	6.600

Bij de beschrijving van de varianten is gesteld dat de maximale reductie van de fosfaatbelasting alleen gerealiseerd kan worden met zware egalisaties en volledige afstopping van de open ontwateringsmiddelen in het gebied. Dit zou een ernstige aantasting van landschappelijke waarden betekenen en het kan bovendien tot nadelige gevolgen voor de landbouw leiden, als gevolg van stagnatie van water op het maaiveld. Om deze reden gaat de voorkeur uit naar de variant met lichte egalisatie en de aanleg van een stelsel van ondiepe, begroeide sloten. Bovendien blijkt uit de kostenbegroting dat de variant met een stelsel van ondiepe, groene sloten aanzienlijk goedkoper is. Met betrekking tot de layout van het diepe drainagesysteem luidt de conclusie, dat het aantal meters drainlengte, ofwel de toelaatbare drainafstand, van doorslaggevende betekenis is voor de kosten. De kosten van de hydrologische maatregel worden op grond van deze bevindingen geschat op f 6 100,- tot f 10 100,- per hectare, afhankelijk van de layout van het diepe drainagesysteem. De kosten voor het areaal aan natte gronden in het Schuitenbeekgebied worden geschat op 12 à 20 miljoen gulden.

8 Conclusies

De fosfaatuitspoeling naar het grondwater uit sterk fosfaatverzadigde gronden is hoog. Voor de onderzochte twee onderzoekslocaties is berekend dat bij fosfaatgiften gelijk aan de gewasonttrekking, de fosfaatuitspoeling uit de bouwvoor naar het bovenste grondwater zeker meer dan 150 jaar boven de norm zal blijven, die gehanteerd is in het protocol fosfaatverzadigde gronden (0,10 mg ortho-P l⁻¹). Verder blijkt dat gemiddeld 86% van de fosfaatuitspoeling naar het grondwater veroorzaakt wordt door ortho-fosfaat (anorganische fosfaten).

Ten aanzien van de effecten van bemestings-, bodemchemische en hydrologische maatregelen op de fosfaatuitspoeling naar het grond- en oppervlaktewater zijn de volgende conclusies te trekken.

bemestingsmaatregel

Uit modelberekeningen die met het gevalideerde model zijn uitgevoerd blijkt dat de *fosfaatuitspoeling uit de bouwvoor naar diepere lagen* op korte termijn daalt van ca. 3 à 30 kg ha⁻¹ P naar een niveau van ca. 1 à 10 kg ha⁻¹ P, indien de mestgiften op een fosfaatverzadigde grond met een fosfaatverzadigingsgraad van 25% en een sterk fosfaatverzadigde grond met een fosfaatverzadigingsgraad van 75% worden gereduceerd tot een niveau van fosfaatvrije bemesting. Afhankelijk van deze fosfaatverzadigingsgraden van de bodem varieert de *fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater* dan van ca. 0,5 à 1,2 kg P ha⁻¹ j⁻¹. Deze waarden gelden voor grasland op natte gronden (grondwatertrap III). Boven een fosfaatverzadigingsgraad van 75% kan de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater oplopen tot enkele kg P ha⁻¹ j⁻¹. De reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater die na invoering van de bemestingsmaatregel bereikt kan worden bedraagt ca. 10 à 35% afhankelijk van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem (25% en 75%).

Op grond van de mediaanwaarde van de fosfaatverzadigingsgraad van de bodem in het stroomgebied van de Schuitenbeek wordt bij natte gronden een gemiddelde reductie van de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater verwacht van ongeveer 20% ten opzichte van de fosfaatuitspoeling die optreedt bij fosfaatgiften die gelijk zijn aan de gewasonttrekking.

Er zijn geen milieukundige en landbouwkundige nadelen (qua gewasproductie) te verwachten indien de dierlijke mestgiften worden vervangen door fosfaatvrije kunstmestgiften.

De kosten van vervanging van dierlijke mestgiften door fosfaatvrije kunstmestgiften voor 2000 ha natte gronden (Gt III/V en III*/V*) in het stroomgebied van de Schuitenbeek, bedragen ca. 1,3 miljoen gulden per jaar. Indien de aanvullende bemestingsmaatregel gerealiseerd wordt in de vorm van volledig bemestingsvrije bufferzones (ook geen beweiding) worden de investeringskosten geraamd op 17 miljoen gulden.

bodemchemische maatregel

Uit laboratoriumonderzoek blijkt dat er materialen beschikbaar zijn die aan de bodem kunnen worden toegediend waardoor de potentiële hoeveelheid fosfaat, die de komende decennia zal gaan uitspoelen, alsnog kan worden gebonden. Van de onderzochte materialen neemt de capaciteit om fosfaat te binden toe in de volgorde: *bauxiet* (20 °C) \approx *red mud* (20 °C) < *red mud* (400 °C) \approx *aluinaarde* < *Fe-oer 2* < *Fe-slib* \approx *Fe-oer 1* < *bauxiet* (400 °C) \approx *Al₂O₃-super* \ll *gesynthetiseerd ijzerhydroxyde (ferrihydrite)*. Als gevolg van deze toedieningen daalt het Pw-getal, maar worden geen opbrengstverliezen geleden. De prijs-effectiviteit verhouding is voor gesynthetiseerd ijzerhydroxyde zeer gunstig. Veldproeven tonen aan dat door toediening van gesynthetiseerd ijzerhydroxyde aan de bodem met behulp van een spitmachine, de fosfaatconcentratie in het bodemvocht met ca. 90% daalt. Deze daling van de fosfaatconcentratie in het bodemvocht ten gevolge van toediening van ijzerhydroxyde wordt goed gemodelleerd. Om een optimale reductie van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater (70%) op korte termijn te kunnen bewerkstelligen, is het noodzakelijk dat een strook van 10 meter breedte aan weerszijde van de sloot behandeld wordt met 0,2% Fe. De behandeling dient over de gehele dikte van de laag met verhoogde fosfaatgehalten plaats te vinden. Uit de modelberekeningen volgt dat het van belang is dat ook de talud van de sloot wordt behandeld, om te voorkomen dat de reductie tijdelijk 10 à 30% lager ligt.

Het nadeel van het gebruik van de ijzerhoudende uitgangsmaterialen is dat ook het bijproduct wordt toegediend, waardoor 1 à 2 jaar verhoogde zoutuitspoeling optreedt en in het eerste jaar ook zoutschade voor het gewas op kan treden. Bij gebruik van ijzernitrat zijn de gevolgen voor de landbouw beperkt tot eenmalige bestrijding van brandnetels als gevolg van de hoge stikstofgift (ca. 25 maal zo hoog als jaarlijks noodzakelijk is). De investeringskosten zijn bij dit uitgangsmateriaal echter het hoogst; ca. 34 à 36 miljoen gulden (geraamd voor het natte areaal landbouwgronden in het Schuitenbeekgebied). Indien ijzersulfaat dan wel ijzerchloride als uitgangsmateriaal wordt gebruikt, zijn de investeringskosten ruwweg 2 maal zo laag (18 à 20 miljoen gulden). Een bijkomend nadeel is dan wel dat de strook direct naast de sloot (10 m) pas na 1 jaar ingezaaid kan worden in verband met de hoge zoutconcentraties (de kosten van opbrengstverliezen bedragen ca. 0,8 miljoen gulden).

Een voordeel van de bodemchemische maatregel ten opzichte van de bemestingsmaatregel is, dat de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater beduidend meer daalt, en dat beweiding mogelijk blijft. Een voordeel ten opzichte van de hydrologische maatregel is, dat de inrichting van het gebied intact blijft. Onzekerheid bestaat op dit moment nog ten aanzien van de effectiviteit op de lange termijn van vers gesynthetiseerd ijzerhydroxyde. Vooralsnog wordt verondersteld dat volstaan kan worden met een eenmalige ingreep.

hydrologische maatregel

In een oriënterende modelstudie naar een aantal hydrologische maatregelen om de fosfaatspoeling uit landbouwgronden te reduceren, is een maatregel als meest perspectiefrijk naar voren gekomen. Bij deze maatregel wordt de ontwatering van het perceel vrijwel geheel via diepe drains verzorgd, zonder dat de ontwateringsbasis is gewijzigd. De bestaande greppels worden gedicht.

Deze hydrologische maatregel is op een proeflocatie geïnstalleerd bij een perceels-sloot. De fosfaatconcentratie van de afvoer via de diepe drain heeft een gemiddelde van 0,14 mg.l⁻¹ ortho-P, waarmee de werking van deze maatregel in essentie is aangetoond. Als gevolg van de helling van het gebied en de bolling van de percelen in de richting loodrecht op de sloot, is bij hoge grondwaterstanden ondiepe afvoer met hoge fosfaatuitspoelingsconcentraties opgetreden. Deze situatie kan alleen worden voorkomen, indien de percelen worden geëgaliseerd en de ontwateringsfunctie van de perceelssloten (nagenoeg) geheel wordt uitgeschakeld. Uitgaande van de gemeten fosfaatvrachten van twee perceelssloten is vastgesteld dat voor deze periode een reductie van 79-89% realiseerbaar is.

Voor de uitvoering van de hydrologische maatregel op regionale schaal zijn een aantal varianten onderzocht. Hieruit is naar voren gekomen dat een diep drainagestelsel het beste uitgevoerd kan worden in combinatie met een stelsel van ondiepe, groene sloten. Deze ondiepe, groene sloten zijn een voorziening voor dat deel van de neerslag dat niet kan infiltreren in de bodem en dus niet voor de afvoer van het grondwater. Als verondersteld wordt dat 5 à 10% van het jaargemiddelde netto-neerslagoverschot niet infiltreert, bedraagt de reductie van de fosfaatbelasting van de sloten 80 à 85% (berekend op basis van de resultaten van de onderzoekslokatie).

Een voordeel van de hydrologische maatregel is dat fosfaatevenwichtsbemesting mogelijk blijft en de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater sterk daalt. Een nadeel is dat in ieder geval een beperkte herinrichting van het gebied noodzakelijk is.

De investeringskosten van deze uitvoering worden voor het natte areaal van het stroomgebied van de Schuitenbeek geschat op 12-20 miljoen gulden.

Samenvattend worden op grond van de resultaten van deze perceelsstudie de volgende conclusies getrokken:

- qua *effectiviteit* om de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden te verminderen heeft de hydrologische maatregel het hoogste rendement (80-85%), de bodemchemische maatregel een beperkt lager rendement (60-80%) en de bemestingsmaatregel het laagste rendement (10-35%);
- de *kosten* van de bodemchemische maatregel zijn (waarschijnlijk) het hoogst;
- de bemestings- en bodemchemische maatregel zijn flexibeler toepasbaar dan de hydrologische maatregel, waarbij opgemerkt wordt dat elke maatregel op zich specifieke *voor- en nadelen* heeft.

Literatuur

Breeuwsma, A. en M.E.G. Berghs, 1993. *Fosfaatevenwichtsbemesting. Analyse van de fosfaatproblematiek en de kennisbehoefte voor de invulling van eindnormen*. Wageningen, DLO, Onderzoek inzake de mest- en ammoniakproblematiek in de veehouderij, nr 17.

Breeuwsma, A., J.G.A. Reijerink, O.F. Schoumans, D.J. Brus, en H. van het Loo, 1989. *Fosfaatbelasting van het oppervlaktewater in het stroomgebied van de Schuitenbeek*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 10.

Breeuwsma, A. en O.F. Schoumans, 1986. *Fosfaatophoping en -uitspoeling in de bodem van mestoverschotgebieden*. Wageningen, STIBOKA, rapport 1866.

Breeuwsma, A., J.G.A. Reijerink en O.F. Schoumans, 1990. *Fosfaatverzadigde gronden in het Oostelijk, Centraal en Zuiderlijk Zandgebied*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 68.

Dijkstra, H., Y. Geelen en J. Paas, 1990. *Deel B. Mogelijke maatregelen teer bestrijding van overmatige algenbloei in de randmeren*. Provincie Gelderland, Dienst Ruimte Wonen Groen.

Haskoning, 1992. *Inventarisatie van effectgerichte saneringsmaatregelen waterkwaliteit Schuitenbeek*. Nijmegen, Haskoning Koninklijk Ingenieurs- en Architectenbureau.

Hendriks, J.G.L. en J.F.M. Huijsmans, 1995, *Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden. Deel 3: Toedieningsmethoden voor ijzerhydroxyden op fosfaatverzadigde gronden*. Wageningen, IMAG-DLO rapport 374.3

IKC, 1995. *Adviesbasis voor de bemesting van grasland en voedergewassen*. Lelystad, Informatie en Kennis Centrum Veehouderij. Publikatie nr. 44.

Jenkinson, D.S. and J.H. Rayner, 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classifacel experiments. *Soil Science* 123: 298-305.

Jeurissen, L.J.J., 1990. *Bepaling van de grondwaterstand-afvoer-relatie op basis van grondwaterstandsgegevens*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 285.

Jeurissen, L.J.J., 1993. *Verkenning van mogelijke waterbeheersmaatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden met modelberekeningen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 285.

KWIN-V, 1992. *KWantitatieve INformatie veehouderij 1992-1993*. Ede, Informatie en Kennis Centrum Veehouderij. Publikatie nr. 6-92.

Kroes, J.G., C.W.J. Roest, P.E. Rijtema, L.J. Locht, 1990. *De invloed van enige bemestingsscenario's op de afvoer van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater van Nederland*. Staring Centrum rapport 55, Wageningen.

Kruijne, R., J. Wesseling en O.F. Schoumans, 1995. *Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de fosfaatsuitleiding uit landbouwgronden. Deel 4: Modelcalibratie en -validatie van het effect van een hydrologische maatregel*. Wageningen, DLO-Staring Centrum rapport 374.4

Lexmond, Th. M., W.H. van Riemsdijk en F.A.M. de Haan, 1982. *Fosfaat en koper in de bodem in gebieden met intensieve veehouderij*. VROM Bodembeschermingsreeks nr. 9, Staatsuitgeverij.

Lijklema, L., 1980. Interaction of orthophosphate with iron (III) and aluminum hydroxides. *Environmental Science and Technology, Vol. 14: 537-541*.

Oenema, O. en T.A. van Dijk (red.), 1994. *Fosfaatverliezen en fosfaatoverschotten in de Nederlandse landbouw*. Rapport van de technische projectgroep 'P-deskstudie'. Ministerie van LNV, Ministerie van VROM, Ministerie van V en W, Landbouwschap, Centrale Landbouworganisaties.

Reijerink, J.G.A. en Breeuwsma, 1992. *Ruimtelijk beeld van de fosfaatverzadiging van de bodem*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 222.

Rijtema, P.E., C.W.J. Roest and J.G. Kroes, in prep. *Formulation of the nitrogen and phosphate behaviour in agricultural soils, the ANIMO model*. Wageningen, Staring Centrum, report 30.

Schoumans, O.F., 1995a. *Beschrijving en validatie van de procesformulering van de abiotische fosfaatreacties in kalkloze zandgronden*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 381.

Schoumans, O.F., 1995b. *Analyse van de invloed van evenwichtsbemesting op de fosfaattoestand van de bodem bij het proefbedrijf De Marke*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 380.

Schoumans, O.F., A. Breeuwsma, A. El-Bachrioui-Louwerse en R. Zwijnen, 1991. *De relatie tussen de bodemvruchtbaarheidsparameters P_w- en P-AL-getal en fosfaatverzadiging bij zandgronden*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 112.

Schoumans, O.F. en L. Köhlerberg, 1995. *Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de fosfaatsuitleiding uit landbouwgronden. Deel 2: Mogelijkheden van toediening van aluminium- en ijzerverbindingen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 374.2.

Schoumans, O.F. en R. Kruijne, 1995a. *Voorspelling van de fosfaatsuitleiding naar het grond- en oppervlaktewater in het stroomgebied van de Schuitenbeek*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 386.

Schoumans, O.F. en R. Kruijne, 1995b. *Onderzoek naar maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden. Deel 1: Meting van de fosfaatuitspoeling uit een aantal landbouwpercelen met en zonder een hydrologische maatregel*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 374.1.

Schoumans, O.F., W. de Vries en A. Breeuwsma, 1986. *Een fosfaattransportmodel voor toepassing op regionale schaal*. Stiboka rapport 1951, Wageningen.

Schwertmann, U. and R.M. Cornell, 1991. *Iron Oxydes in the Laboratory. Preparation and Characterisation*. Weinheim, VCH.

TCB, 1990. *Advies van de Technische Commissie Bodembescherming ten behoeve van de hantering van het protocol fosfaatverzadigde gronden*. Advies aan de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijk Ordening en Milieubeheer.

Zee, S.E.A.T.M. van der, 1988. *Transport of reactive contaminants in heterogeneous soil systems*. Dissertatie Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Zee, S.E.A.T.M. van der, W.H. van Riemsdijk en F.A.M. de Haan, 1990a. *Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel I : Toelichting*. Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding, Landbouwuniversiteit Wageningen.

Zee, S.E.A.T.M. van der, W.H. van Riemsdijk en F.A.M. de Haan, 1990b. *Het protocol fosfaatverzadigde gronden. Deel II : Technische uitwerking*. Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding, Landbouwuniversiteit Wageningen.

Niet gepubliceerde bronnen

Boersbroek, R.F.J., 1993. *Effect van fosfaatbemesting op de fosfaatuitspoeling uit een fosfaatverzadigde grond*. Stageverslag IAH-Larenstein

Broek, van der B.J., J.A. Elbers., J. Huygen, P. Kabat, J.G. Wesseling, J.C. van Dam and R.A. Feddes, 1994. *SWAP 1993 Input instructions manual*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Interne Mededeling 291.

Driessen, P., 1992. *Effect van een hydrologische maatregel op de ondiepe grondwaterafvoer naar de sloot*. Stageverslag IAH-Larenstein.

Drost, J.J.P., 1990. *RETC 2.0 - Een gebruikershandleiding bij een niet-lineair optimalisatieprogramma van bodemfysische parameters*. Wageningen, Staring Centrum, Interne mededeling 99.

Jeurissen, L.J.J. en O.F. Schoumans, 1990. *Selectie onderzoekslocaties t.b.v. het project "Vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden"*. Notitie aan Begeleidingscommissie BOVAR DPG-3.

LD, 1995. *Overzicht standaardeenheidsprijzen Prijspeil januari 1995 Nederland (Excl. West Nederland)*. Landinrichtingsdienst, Utrecht.

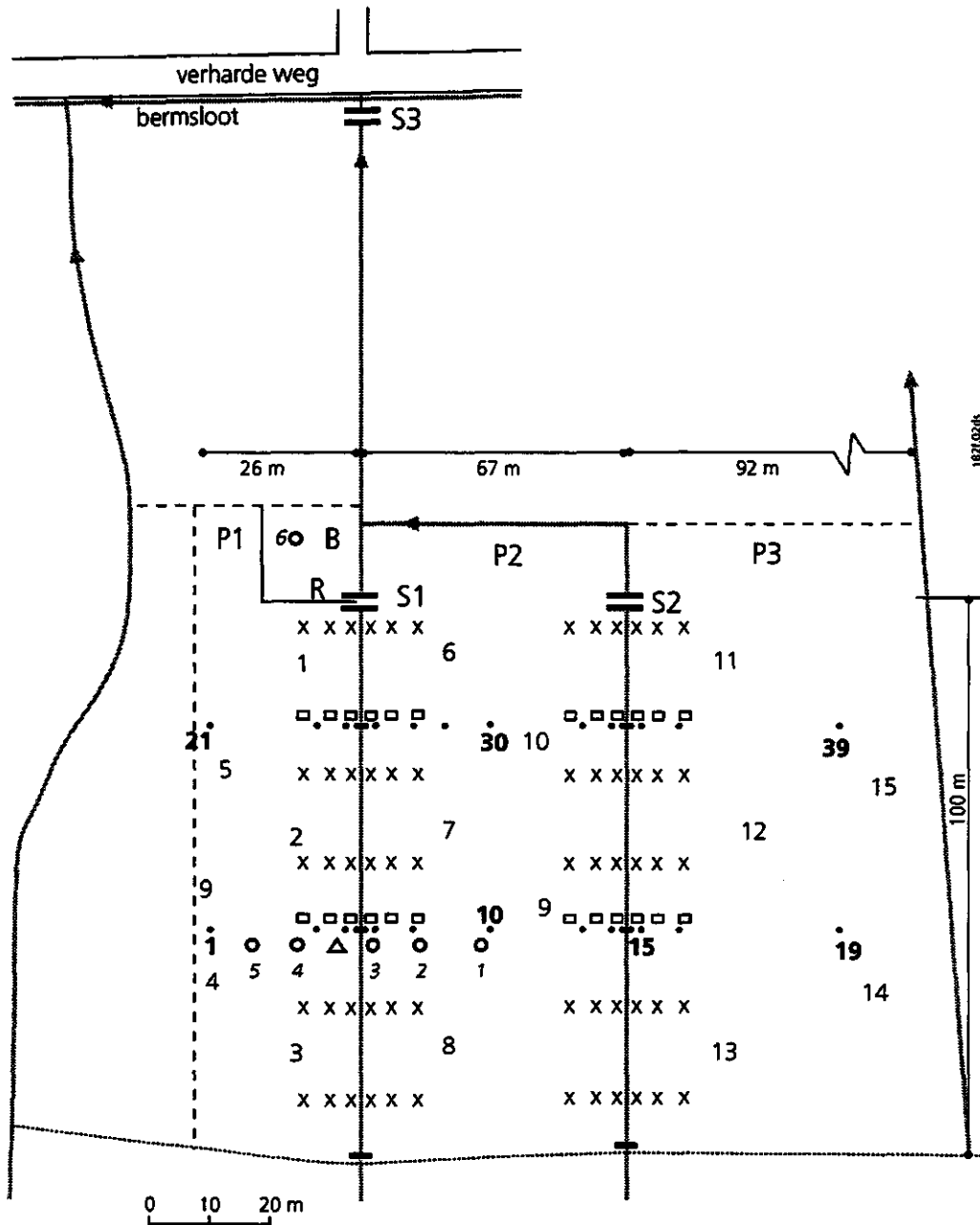
Murre, W., 1992. *Effecten van de toediening van ijzer- en aluminiummaterialen aan een fosfaatverzadigde grond op de gewasopbrengst en op de fosfaatbeschikbaarheid*. Doctoraal verslag Landbouwniversiteit Wageningen.

Peeters, J., 1994. *Berekeningen van de regionale grondwaterstroming rondom "De Hoef" met behulp van het model SIMGRO*. Wageningen, Staring Centrum, Interne mededeling 283.

Reinen, M., 1994. *Vaststellen van het effect van de hoogte van fosfaatbemesting op de mate van fosfaatuitspoeling uit een sterk fosfaatverzadigde grond*. Stageverslag IAH-Larenstein.

Yspeert, M., 1992. *De effectiviteit van aluminium- en ijzerverbindingen om fosfaat te binden*. Stageverslag IAH-Larenstein

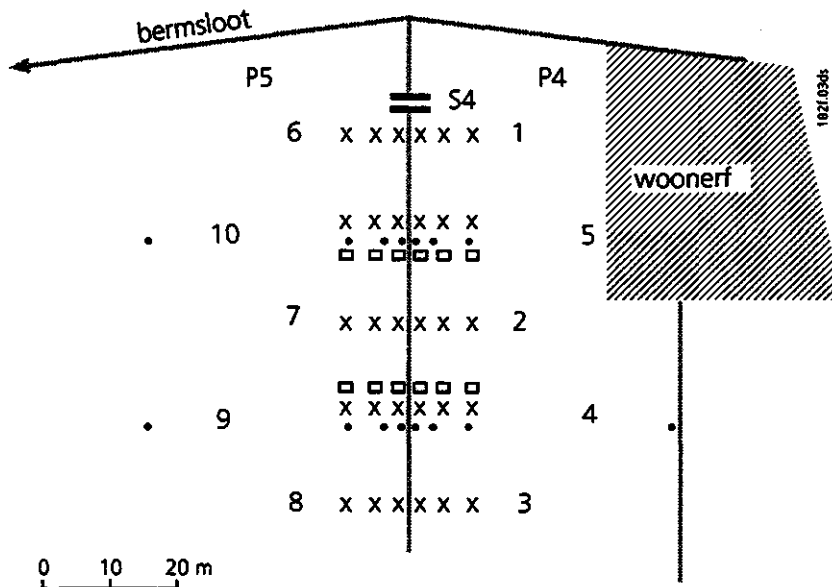
Aanhangsel 1 Ligging van de percelen op onderzoekslocatie 1



Legenda

- | | | | |
|-----|---|-------|--|
| B | veldje met 9 bemestingsplots | ----- | omleiding erfafvoer |
| P2 | perceelnummer | R | regenmeter |
| S2 | slootnummer | Δ | diepe boring |
| — | sloot | • | grondwaterstandsbuis |
| ≡ | damwand met meetschot, afvoermeter en bemonsteringsapparatuur | ○ | monsterlocatie bodemfysische bepalingen |
| — | damwand ter omleiding erfafvoer | 7 | monsterlocatie bodemkarteringen, gehalten P_{ox} , Al_{ox} en F_{ox} |
| - - | perceelsgrens | x | monsterlocatie bodemvochtontrekking (tot 0,4 m diepte) |
| | | ◻ | cups voor bodemvochtontrekking (tot 0,9 m diepte) |

Aanhangsel 2 Ligging van de percelen op onderzoekslocatie 2



P2 perceelnummer

S2 slootnummer

— sloot

== damwand met meetschot, afvoermeter en bemonsteringsapparatuur

• grondwaterstandsbuis

7 monsterlocatie bodemkarteringen, gehalten P_{ox} , Al_{ox} en F_{ox}

x monsterlocatie bodemvochtontrekking (tot 0,4 m diepte)

□ cups voor bodemvochtontrekking (tot 0,9 m diepte)