

NN31396.1840

STICHTING VOOR BODEMKARTERING

WAGENINGEN



Rapport nr. 1840

De fosfaathuishouding van zandgronden
in relatie tot de waterkwaliteit

Rapport nr. 1840

De fosfaathuishouding van zandgronden
in relatie tot de waterkwaliteit

STICHTING VOOR BODEMKARTERING
Postbus 98
6700 AB Wageningen
Tel. 08370-19100

Project nr. 216.45

Rapport nr. 1840

DE FOSFAATHUISHOUDING VAN ZANDGRONDEN
IN RELATIE TOT DE WATERKWALITEIT

A. Breeuwsma

ISBN 90 327 0199 1

Wageningen, oktober 1984

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de Stichting voor Bodemkartering.

INHOUD

VOORWOORD

1. INLEIDING

2. VOORKOMEN EN VASTLEGGING VAN FOSFAAT IN DE BODEM

2.1 Fosfaatverbindingen

2.2 Reactiemechanismen

2.3 Bepaling van het fosfaatbindend vermogen

3. VERBAND TUSSEN HET FOSFAATBINDEND VERMOGEN EN DE BODEMGESTELDHEID

3.1 Aluminium- en ijzergehalten

3.2 Profielopbouw

3.3 Bodemeenheid en grondwatertrap

4. GEVOLGEN VOOR DE WATERKWALITEIT

5. SAMENVATTING

LITERATUUR

VOORWOORD

Dit rapport bevat de inhoud van een voordracht voor de PAO-cursus "Waterkwaliteit landelijk gebied; aspecten van kwaliteitsbeheer" die gehouden is aan de Landbouwhogeschool, Wageningen, oktober 1984. Daarbij is, behalve van reeds gepubliceerde gegevens, ook gebruik gemaakt van nieuwe gegevens. De auteur is daarvoor mede dank verschuldigd aan Oscar Schoumans en Diti Oudendag die deze gegevens tijdens hun stageperiode hebben verzameld en/of verwerkt. De betreffende resultaten zullen nog uitvoeriger in Stibokarapporten worden beschreven. Verder is eveneens dank verschuldigd aan R. Zwijnen, R.A. Koning, R.Ch. Sjardijn voor de verrichte chemische analyses en aan Ir. W. de Vries voor het kritisch doornemen van het manuscript.

Dr.Ir. A. Breeuwsma

1. INLEIDING

Vooraf na het verschijnen van een rapport van de Koninklijke Nederlandse Chemische Vereniging over "Fosfaten in het Nederlandse Oppervlaktewater" (1976) heeft het probleem van de eutrofiëring van het oppervlaktewater door fosfaten in Nederland sterk de aandacht getrokken. De belangrijke bijdrage van de huishoudens (wasmiddelen!) aan de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater heeft hierbij ongetwijfeld een grote rol gespeeld. De bijdrage van de landbouw, geschat op basis van gegevens van Kolenbrander (1974), werd in dit rapport gering geacht. Wel werd opgemerkt dat het niet bekend was hoe lang het zou duren voordat "het bodemfilter doorslaat".

Deze vraag is vooral van belang in de gebieden met intensieve veehouderij waar als gevolg van mestoverschotten aanzienlijk meer fosfaat wordt geproduceerd dan door de gewassen wordt onttrokken (Lexmond et al. 1982). Zo bedraagt de hoeveelheid fosfaat, die beschikbaar is voor de bemesting van bouwland en tuinbouwgrond in de Gelders Vallei, gemiddeld meer dan 960 kg P_2O_5 per ha terwijl de onttrekking door de gewassen niet meer dan 60-80 kg P_2O_5 per ha bedraagt. In 1979 werd naar schatting minder dan 10% van de overschotten naar andere gebieden afgevoerd.

Om de samenhang tussen de fosfaatbelasting van de bodem en die van het grond- en oppervlaktewater aan te kunnen geven voor gebieden met intensieve veehouderij, is de laatste jaren onderzoek verricht naar o.a. de samenstelling van drijfmest, het fosfaatbindend vermogen van de grond (o.a. relatie met bodemkenmerken en bodemkaart) en het transport van fosfaat door de onverzadigde zone.

Met behulp van literatuur- en nieuwe onderzoeksgegevens en een eenvoudig model voor het transport van fosfaat in de bodem wordt hieronder aangegeven op welke termijn fosfaatuitspoeling naar grond- en oppervlaktewater zou kunnen worden verwacht.

2. VOORKOMEN EN VASTLEGGING VAN FOSFAAT IN DE BODEM

2.1 Fosfaatverbindingen

Fosfaat komt in de bodem voor in:

- mineralen (anorganische verbindingen)
- organische stof
- geadsorbeerde vorm

Het fosfaatgehalte van de pleistocene zandgronden bedraagt volgens Pape (1972) van nature ongeveer 1-5 mmol P per kg in de ondergrond (C-horizont) en 5-15 mmol per kg in de bovengrond (Al-horizont) (N.B. 1 mmol P.kg⁻¹ is 7,1 mg P₂O₅ per 100 g). In cultuurgronden (enkeerdgronden) werden twintig jaar geleden waarden van ongeveer 15-30 mmol per kg gevonden. Bij de genoemde gehalten is het erg moeilijk de identiteit van de aanwezige fosfaatverbindingen vast te stellen. De meeste kennis van de samenstelling en oplosbaarheid van fosfaatmineralen berust daarom op onderzoek van gesteenten en mineralen. Tabel 1 geeft een overzicht van enkele belangrijke kristallijne verbindingen die in de bodem zijn aangetoond. Daarbij is ook de oplosbaarheid vermeld op grond van gegevens van Lindsay (1979). Voor de fos-

Tabel 1. Kristallijne fosfaatmineralen in de bodem en hun oplosbaarheid

Indeling naar het kation	naam	chemische formule	Oplosbaarheid bij pH 5')
Al-fosfaten	varisciet	AlPO ₄ .2H ₂ O	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵
	K-taranakiet	H ₆ K ₃ Al ₅ (PO ₄) ₈ .18H ₂ O	10 ⁻² -10 ⁻³
Fe-fosfaten	strengiet	FePO ₄ .2H ₂ O	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵
	vivianiet	Fe ₃ (PO ₄) ₂ .8H ₂ O	
Ca-fosfaten	brushiet	CaHPO ₄ .2H ₂ O	10 ⁻¹ -10 ⁻²
	hydroxy-apatiet	Ca ₅ OH(PO ₄) ₃	10 ⁻² -10 ⁻³

'): Gegevens van Lindsay (1979). Concentratie in mol P per liter.

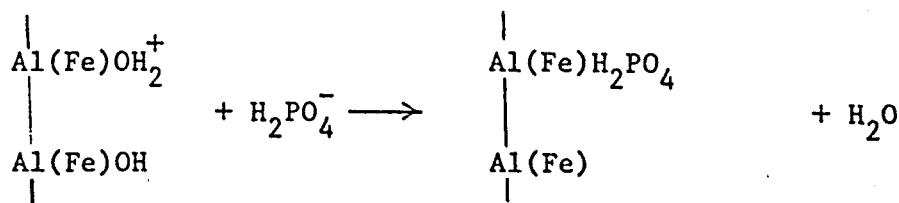
faathuishouding van de bodem is vooral het verschil in oplosbaarheid van de Al- en Fe-fosfaten enerzijds en de Ca-fosfaten anderzijds van belang. De oplosbaarheid van Ca-fosfaten is, zoals ook Tabel 1 laat zien, bij lage pH veel hoger dan die van Al- en Fe-fosfaten. Dat betekent dat Ca-fosfaten in de ontkalkte, en daardoor zure, pleistocene zandgronden in Nederland niet stabiel zijn in aanwezigheid van Al- en Fe-verbindingen.

2.2 Reactiemechanismen

Fosfaat wordt in de bodem hoofdzakelijk in anorganische vorm vastgelegd door:

- adsorptie
 - diffusieprecipitatie
 - precipitatie.
-) sorptie

De adsorptie vindt plaats op het oppervlak van (hydr)oxiden van Al en Fe, allofaan (Al-silicaat) en aan de randen van kleimineralen. Dit chemisorptieproces is schematisch o.a. door de volgende reactie weer te geven:



Adsorptie is bij lage fosfaatconcentraties (kleiner dan ca. 10^{-4} M) het belangrijkste proces (o.a. de Haan, 1965; Breeuwsma, 1973). Bij hogere concentraties kan ook diffusie van fosfaat in de deeltjes optreden zodat het fosfaatbindend vermogen (veel) hoger is dan met het adsorberend oppervlak overeenkomt (o.a. van Riemsdijk, 1979). Deze situatie doet zich bijvoorbeeld voor bij bemesting met drijfmest. Wanneer naast een hoge fosfaatconcentratie (groter dan ca. 10^{-2} M) ook nog een lage pH aanwezig is (lager dan 3) kan precipitatie plaatsvinden.

Dit komt in de bodem bijvoorbeeld voor rond kunstmestkorrels van superfosfaat (o.a. Haseman et al., 1950). Hierbij wordt het monocalciumfosfaat omgezet in Al- en Fe-fosfaat. Het fosforzuur dat, daarbij in eerste instantie wordt gevormd, veroorzaakt een lage pH en daardoor hoge Al- en Fe-concentraties. Normaal zijn deze concentraties in de bodem zo laag dat precipitatie geen rol speelt.

Adsorptie en precipitatie zijn processen die zeer snel verlopen. Bij het diffusieprecipitatieproces verloopt de vastlegging aanvankelijk ook snel en daarna steeds langzamer. Dit betekent dat de sorptie-isotherm, die het verband weergeeft tussen de vastgelegde hoeveelheid fosfaat en de fosfaatconcentratie in de oplossing, ook afhankelijk is van de tijd. Het fosfaatbindend vermogen (FBV), ook sorptiecapaciteit genoemd, is daardoor mede afhankelijk van de contacttijd van fosfaatoplossing en bodem. Verder is ook de pH en de samenstelling van de bodemoplossing van invloed.

2.3 Bepaling van het fosfaatbindend vermogen (FBV)

Omdat het fosfaatbindend vermogen afhankelijk is van een aantal te kiezen variabelen, moet bij de bepalingmethode rekening worden gehouden met de waarden van deze variabelen in de praktijk. De in Nederland ontwikkelde methoden zijn toegespitst op de omstandigheden die voorkomen bij de bemesting met drijfmest. Gerritse (1976) vond dat de fosfaat in drijfmest voor ongeveer 70% uit vaste dicalciumfosfaatdeeltjes bestaat, voor 10% uit opgelost anorganisch fosfaat en voor 20% uit organisch fosfaat. Deze laatste vorm wordt in de bodem vrij snel gemineraliseerd (Gerritse et al., 1982). Een en ander betekent dat voor de bepaling van het potentiële fosfaatbindend vermogen (de maximale sorptiecapaciteit) met een anorganische fosfaatoplossing kan worden gewerkt. Volgens Gerritse en Zugec(1977) bedraagt de anorganische fosfaatconcentratie $1-2,5 \text{ mmol l}^{-1}$ in geaëreerde varkensdrijfmest en $2,5-5$ in niet-geaëreerde mest. Door Lexmond

et al. (1982) zijn in verband hiermee metingen verricht bij 0,5 en 5 mmol.l⁻¹ en door Korzilius en Breeuwsma bij 1,6 mmol.l⁻¹ (50 mg.l⁻¹).

Naderhand werden in een aantal veldsituaties in de winter waarden van 2 à 3 mmol.l⁻¹ in de bodem gemeten (van Riemsdijk et al., 1983). Vermoedelijk komen in de praktijk ook wel hogere of lagere concentraties voor. Daardoor is niet exact aan te geven hoe goed het effectieve fosfaatbindend vermogen bij de genoemde concentraties wordt geschat. Normaal zijn voor de beschrijving van het transport van een stof door de bodem metingen bij meerdere concentraties nodig ter verkrijging van een adsorptie-isotherm. In verband met het bijzondere karakter van het diffusie-precipitatieproces is dit echter niet nodig wanneer men de metingen bij een constante en relatief hoge fosfaatconcentratie verricht. De fosfaatvastlegging is dan een éénduidige functie van concentratie en tijd, zodat in principe slechts bij één concentratie gemeten hoeft te worden. Door de fosfaatconcentratie tijdens de metingen constant te houden zijn bovendien de resultaten voor verschillende monsters beter vergelijkbaar (één variabele minder). Het is in principe wel nodig metingen bij verschillende reactietijden te doen om door extrapolatie het fosfaatbindend vermogen op langere termijn vast te kunnen stellen. In de praktijk blijkt de verhouding tussen het fosfaatbindend vermogen op korte en lange termijn vrij constant te zijn en kan ook wat de tijd betreft met één meting worden volstaan. Korzilius en Breeuwsma (1983) vonden een factor 1,6 voor het verschil in fosfaatbindend vermogen na 1 dag en 1 jaar en van Riemsdijk et al. (1983) een factor 1,7 voor het verschil tussen 40 uur en 1 jaar. Volgens laatstgenoemde auteurs geeft het door extrapolatie verkregen fosfaatbindend vermogen bij één jaar een goede schatting van de werkelijke sorptiecapaciteit. Dit gegeven kan worden gebruikt om uit korte termijnmetingen het potentiële fosfaatbindend vermogen (FBV_{pot}) af te leiden. Daarbij moet het in de bodem aanwezige en met oxalaat-extraheerbare fosfaat (P_{ox}) worden opgeteld bij het nog beschikbare (actuele) fosfaatbindend vermogen (FBV_{act}).

Kort samengevat kan bij een rechtstreekse meting van het fosfaatbindend vermogen van de volgende relaties gebruik worden gemaakt:

$$FBV_{pot} = FBV_{act} + P_0 \quad (1)$$

$$FBV_{pot} = FBV_{1 \text{ jaar}} \quad (2)$$

$$FBV_{act} = 1,6 FBV_{1 \text{ dag}} \quad (3)$$

Voor verdere informatie omtrent de toegepaste methoden wordt naar de bovengenoemde literatuur verwezen.

3. VERBAND TUSSEND HET FOSFAATBINDEND VERMOGEN EN DE BODEMGESTELDHEID

3.1 Aluminium- en ijzergehalten

Uit het onderzoek dat de laatste jaren is verricht blijkt dat in zandgronden het (potentiële) fosfaatbindend vermogen nauw gecorreleerd is met een bepaalde fractie van de Al- en Fe-verbindingen in de bodem. Deze fractie is extraheerbaar met een zure ammoniumoxalaatoplossing en omvat de "vrije" Al-(hydr)oxiden, allofaan en de "amorfe" Fe-oxiden. Van de twee eerstgenoemde verbindingen is bekend dat deze in fosfaten kunnen worden omgezet en het is daarom vrijwel zeker dat de gevonden verbanden causaal zijn.

Het genoemde verband werd voor het eerst waargenomen door Beek (1979). Dit onderzoek werd verricht aan een drietal bodemprofielen van veldpodzolgronden. Deze gronden zijn ijzerarm zodat ook met oxalaatextraheerbaar Al (Al_{ox}) reeds een goed verband wordt gevonden, zoals uit een later onderzoek is gebleken (Breeuwsma, 1984) (zie Fig. 1). In zandgronden die meer ijzer bevatten werd met behulp van een meervoudige regressie-analyse door Korzilius en Breeuwsma (1983) aangetoond dat naast Al_{ox} ook Fe_{ox} een sterk significante bijdrage aan het fosfaatbindend vermogen levert (Tabel 2).

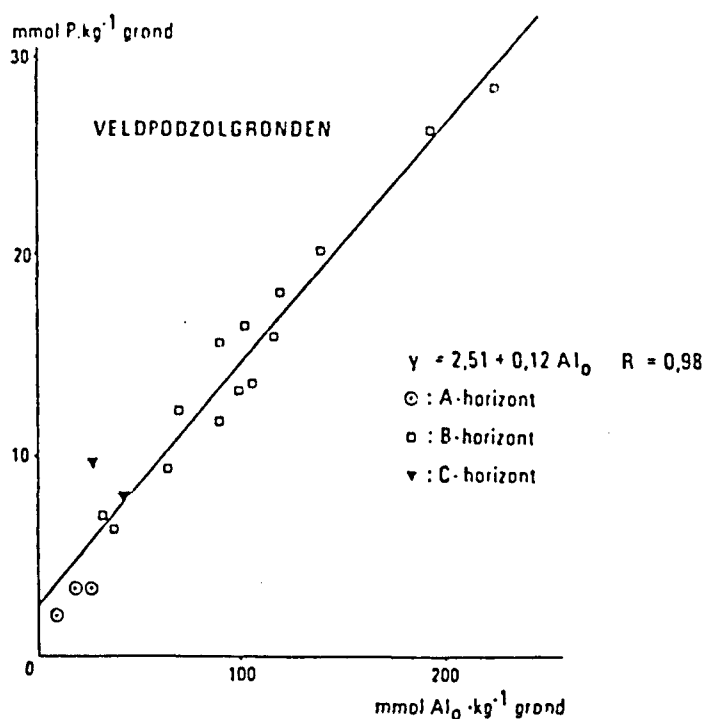


Fig. 1. Het verband tussen het Al-oxalaatgehalte (x) en het fosfaatbindend vermogen (y) van de A-, B- en C-horizont in veldpodzolgronden.

Ook organische stof kan een significante bijdrage leveren. Omdat de variantie die door het model wordt verklaard slechts weinig toeneemt, is het organische-stofgehalte voor de schatting van het fosfaatbindend vermogen niet van wezenlijk belang. Bovendien loopt de betrouwbaarheid van de schattingen van de coëfficiënten voor Al en Fe daardoor soms sterk terug. In tabel 2 is te zien dat de coëfficiënten voor Al en Fe bij eenzelfde bodemeenheid verschillen kunnen vertonen. Het aantal onderzochte profielen is nog te beperkt om vast te kunnen stellen dat deze verschillen representatief zijn voor de onderzochte bodemeenheden. Theoretisch is het denkbaar dat verschillen in deeltjesgrootte en -vorm en kristalstructuur invloed hebben op deze coëfficiënten.

De in tabel 2 vermelde coëfficiënten zijn bij een reactietijd van één dag bepaald. Voor de berekening van het potentiële fosfaatbindend vermogen moeten de gemeten coëfficiënten dus nog vermenigvuldigd worden met een factor 1,6. Voor een meer globale benadering kan men de coëfficiënten voor Al en Fe aan elkaar gelijkstellen en de constante gelijk aan nul.

Tabel 2. Verband tussen het fosfaatbindend vermogen¹⁾ van podzol- en eerdgronden en hun Al_{ox} - en Fe_{ox} -gehalten

Bodemeenheid	aantal monsters	regressiecoëfficiënten ²⁾			Verklaarde variantie (%)
		constante	Al_{ox}	Fe_{ox}	
veldpodzol	20	3,7	0,13	-0,06	95
holtpodzol	14	6,1	0,08	0,22	89
haarpodzol	13	3,6	0,13	0,06	93
zwarte beekeerd	27	2,4	0,31	0,09	91
gooreerd	18	1,0	0,26	0,26	91

1): FBV bepaald na 1 dag reactietijd bij 50 mg P.L⁻¹ en pH 5,5.

2): regressiemodel $FBV = b_0 + b_1 Al + b_2 Fe$ (eenheden in mmol.kg⁻¹).

Het potentiële fosfaatbindend vermogen kan dan op grond van gegevens van Korzilius en Breeuwsma (1983) worden geschat door de Al_{ox} - en Fe_{ox} -gehalten te vermenigvuldigen met een factor 0,34. Van Riemsdijk et al. (1983) vonden bij een fosfaatconcentratie van 5 mmol.l⁻¹ een factor 0,61. Op grond van deze beide resultaten namen zij aan dat voor een betere benadering van de praktijkomstandigheden, met een concentratie van 3 mmol.l⁻¹, een factor 0,4 kan worden gebruikt. Bij de verdere berekeningen is deze factor eveneens toegepast:

$$FBV_{pot} = 0,40 (Al_{ox} + Fe_{ox}) \quad (4)$$

waarbij alle eenheden in mmol.kg⁻¹ zijn aangegeven.

3.2 Profielopbouw

De Al_{ox} - en Fe_{ox} -gehalten worden sterk beïnvloed door de bodemvorming. De gehalten die van nature in het moedermateriaal (C-horizont) aanwezig zijn, zijn in de bovengrond (A- en B-horizont) veranderd door verwerking en uit- en inspoeling. Bij de verwerking van silicaten komen Al^{3+} - en Fe^{3+} -ionen vrij die uit de A-hori-

zont kunnen uitspoelen en in de B-horizont inspoelen (podzole-ring). Voor ijzer wordt dit laatste proces sterk beïnvloed door de grondwaterstand. Met name in de van oorsprong "natte" veldpodzolgronden is het ijzer vaak voor het grootste deel verdwenen. Dit verklaart het in tabel 3 weergegeven profielverloop van de Al_{ox} - en Fe_{ox} -gehalten. Het uit de veldpodzolgronden uitgespoelde ijzer is doorgaans terug te vinden in de bovengrond van de beeekeerdgronden die in de kwelgebieden voorkomen. Deze kunnen daardoor in de A-horizont zeer hoge Fe_{ox} -gehalten hebben. Doordat de ophoping van ijzer zeer plaatselijk is, is de spreiding in de gehalten eveneens hoog (tabel 3). In de gereduceerde ondergrond (G-horizont) zijn de Fe-gehalten ook vaak laag doordat er ijzer is afgevoerd.

Tabel 3. Gehalten van Al- en Fe-oxalaat (in $mmol.kg^{-1}$) in horizonten van veldpodzol- en beeekeerdgronden

Hori- zont- code	Bodemeenheid									
	veldpodzol					zwarte beekeerd				
	n') gemiddelde			var.coëf.	n	gemiddelde			var.coëf.	
	Al	Fe	Al+Fe	Al+Fe		Al	Fe	Al+Fe	Al+Fe	
A1	18	48	14	62	50	8	49	114	164	83
A2	9	18	2	20	56					
B2	29	111	9	120	50					
B3	25	54	6	60	53					
C	25	38	11	46	26	18	11	26	37	125
G	1	22	3	25	-	4	12	7	19	9

') n is het aantal bemonsterde horizonten.

3.3 Bodemeenheid en grondwatertrap

In verband met het belang van de Al_{ox} - en Fe_{ox} -gehalten voor het fosfaatbindend vermogen worden deze gehalten sinds enkele

jaren bepaald in alle door de Stichting voor Bodemkartering genomen "referentieprofielen" van zandgronden. Dit zijn profielen die representatief geacht worden voor een bepaalde bodemeenheid. Ze worden onderzocht in het kader van de systematische bodemkartering van Nederland, schaal 1 : 50 000. Behalve in deze profielen zijn de Al- en Fe-gehalten ook bepaald in een aantal profielen die voor andere doeleinden zijn bemonsterd. Het aantal profielen dat op deze wijze uit diverse delen van ons land is geanalyseerd, is voor de meeste bodemeenheden toch nog vrij klein. De resultaten die in tabel 4 zijn vermeld, moeten daarom als een voorlopige indicatie van de aan te treffen gehalten worden gezien. Voor deze tabel is het potentiële fosfaatbindend vermogen berekend uit de Al_{ox} - en Fe_{ox} -gehalten met de in 3.1 gegeven factor 0,4. Verder zijn de gehalten met behulp

Tabel 4. Het potentiële fosfaatbindend vermogen (in ton P_2O_5 per ha) in de laag 0-100 cm van bodemeenheden binnen de zandgronden

Bodemeenheid	Aantal profielen	fosfaatbindend vermogen		
		gemiddelde	var.coëf.	klasse
ijzerrijke beekeerd	2	38,4	65	30-40
haarpodzol	6	32,5	36	
holtpodzol	4	27,4	13	20-30
veldpodzol	19	27,4	26	
zwarte enkeerd	13	28,5	21	
zwarte beekeerd	7	23,6	48	
gooreerd	5	20,6	34	
moerige podzol	3	15,0	8	10-20
vlakvaag	2	8,5	71	0-10

van de dichtheid omgerekend op volumebasis en is het fosfaatbindend vermogen uitgedrukt in ton P_2O_5 per ha per meter volgens:

$$FBV_{pot} = 2,84 \text{ d } (Al_{ox} + Fe_{ox}) \quad (5)$$

Ondanks het geringe aantal profielen is uit tabel 4 toch reeds enigszins af te leiden dat van de vermelde bodemeenheden de eenheden, waarin weinig verwerking (vlakvaaggronden) of een sterke ontijzering (moerpodzolgronden) is opgetreden het laagste fosfaatbindend vermogen hebben. Volgens verwachting hebben de ijzerrijke beekeerdgronden juist een vrij hoog fosfaatbindend vermogen. Verder valt het op dat bij de drie bodemeenheden die het meest voorkomen in de gebieden met intensieve veehouderij, namelijk de veldpodzol- en de (zwarte) beekeerd- en enkeerdgronden, de gemiddelde waarden niet veel verschillen.

Tabel 5. Het potentiële fosfaatbindend vermogen van de onverzadigde zone (in ton P_2O_5 per ha) berekend op het moment van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG)¹⁾

Bodemeenheid	Gt ²⁾	GLG cm -mv.	aantal profie- len	fosfaatbindend vermogen klasse									
				10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	70-80	80-90	90-100
zwarte beekeerd	2	70	1	12,3									
	3	100	5		23,9								
	5	150	1				42,6						
veldpodzol	5	165	8			38,3							
	6	190	7				44,4						
	7	200	1				47,4						
zwarte enkeerd	3	105	3		24,0								
	6	185	2					56,2					
	7	330	5										94,0

1) Bij aanwezigheid van meerdere profielen is de gemiddelde waarde vermeld.

2) Zie voor de grondwatertrapindeling Steur et al. (1983).

Ook Lexmond et al. (1982) vonden bij de door hen onderzochte gronden weinig verschil tussen het gemiddelde fosfaatbindend vermogen van de laag 0-100 cm van veldpodzol- en (hoge) enkeerdgronden. De waarden voor de beekkeerdgronden lagen echter duidelijk hoger als gevolg van een hoger Fe_{ox} -gehalte.

De variatie in dit gehalte is ook verantwoordelijk voor de vrij grote spreiding in het fosfaatbindend vermogen van beekkeerdgronden (Tabel 4). Wat hiervoor is opgemerkt over de verschillen tussen veldpodzol-, beekkeerd- en enkeerdgronden geldt voor de laag 0-100 cm. Voor de uitspoeling naar het grondwater moet echter rekening worden gehouden met verschillen in dikte van de onverzadigde zone. Omdat deze in het algemeen toeneemt van beekkeerd- naar veldpodzol-, resp. enkeerdgronden, neemt ook het gemiddelde fosfaatbindend vermogen van de onverzadigde zone in deze richting toe (Tabel 5). Als maat voor de dikte van deze zone is hier de afstand tot de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) genomen. Naast de bodemeenheid is daardoor vooral de grondwatertrap (Gt), die ook op de bodemkaart wordt aangegeven, een belangrijke factor bij de voorspelling van de uitspoeling van fosfaat naar het grondwater.

4 GEVOLGEN VOOR DE WATERKWALITEIT

Het verband tussen de snelheid waarmee het fosfaatfront in de bodem doordringt (V_{fosfaat}) en het fosfaatbindend vermogen kan met behulp van een globale benadering worden weergegeven door middel van een eenvoudige vergelijking.

$$V_{\text{fosfaat}} = \frac{\text{fosfaatbelasting (bijv. in kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jaar}^{-1})}{\text{fosfaatbindend vermogen (bijv. in kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})} \quad (6)$$

De verblijftijd van fosfaat in de onverzadigde zone (T_{fosfaat}), dat wil zeggen de tijd die verloopt voordat het fosfaatfront het grondwater bereikt, kan hieruit worden berekend via:

$$T_{\text{fosfaat}}^{\text{onv. zone}} = \frac{\text{dikte onverzadigde zone}}{V_{\text{fosfaat}}} \quad (7)$$

Deze benadering is gebaseerd op een vereenvoudigd model, in dit geval een "blokfrontmodel", voor het transport van fosfaat in de bodem, waarbij o.a. de volgende aannamen zijn gemaakt:

1. De stroming is één dimensionaal en stationair;
2. De bodemhorizonten zijn homogeen en isotroop;
3. Diffusie en dispersie zijn verwaarloosbaar;
4. Niet-evenwichtsadsorptie is te simuleren door een schijnbare evenwichtsadsorptie na een jaar.

Volgens Lexmond et al. (1982) blijkt uit berekeningen met een meer gedetailleerd model voor het fosfaattransport door de bodem (Berghuijs-van Dijk, 1981) dat het globale model "een grotere toepasbaarheid heeft dan op grond van de vereenvoudigde aannamen te verwachten zou zijn". Tabel 6 geeft enkele voorbeelden van verblijftijden die met het globale model berekend zijn voor situaties die zich in de praktijk voor kunnen doen.

Tabel 6. Verblijftijd van fosfaat in de onverzadigde zone als functie van het fosfaatbindend vermogen en de fosfaatbelasting

Fosfaatbindend vermogen (ton P_2O_5 per ha)	verblijftijd (jaren)		
	fosfaatbelasting*) (kg P_2O_5 per ha)		
	100	500	1000
10	100	20	10
30	300	60	30
50	500	100	50
70	700	140	70
90	900	180	90

*) : netto belasting, na aftrek van de door het gewas opgenomen hoeveelheid. De overdoseringen komen overeen met 34, 120, resp. 225 ton varkensdrijfmest (van Riemsdijk et al. 1983), en de P-conc. met resp. 0,47, 2,35 en 4,7 mmol P.l bij 300 mm neerslagoverschot.

Daarbij zijn dezelfde (netto) fosfaatbelastingen gebruikt als door van Riemsdijk et al. (1983). De fosfaatbelasting van 100 kg P_2O_5 per ha komt ongeveer overeen met 34 ton varkensdrijfmest en is iets te laag om in de stikstofbehoefte van snijmaïs te kunnen voorzien. De gift van 500 kg P_2O_5 komt vrij veel voor

(ca. 120 ton varkensdrijfmest); die van 1000 kg P_2O_5 behoort tot de extreme situaties (225 ton varkensdrijfmest). Indien wordt aangenomen dat 3 mmol P.l^{-1} de maximale bufferconcentratie is, lost de laatstgenoemde hoeveelheid niet volledig op (hooguit ca. 650 kg P_2O_5)! Vergelijking van de in tabel 6 vermelde gegevens met die in tabel 5 laat zien dat de onverzadigde zone in beekerdgronden in een periode van 10-20 jaar volledig met fosfaat verzadigd kan raken. Bij de veldpodzolgronden duurt het gemiddeld iets langer (40-50 jaar) en bij de (hoge) enkeerdgronden nog langer (50-100 jaar). De gemiddelde indringingssnelheid van het fosfaatfront in de onverzadigde zone loopt weinig uiteen en bedraagt bij de hoogste belasting ongeveer 4 cm.jaar^{-1} . Om na te kunnen gaan in hoeverre de verzadiging reeds is voortgeschreden moet uiteraard het fosfaatgehalte in de bodem worden vastgesteld. Daarna kan het actuele (nog beschikbare) fosfaatbindend vermogen worden berekend. Uit een dergelijk onderzoek in de Gelderse Vallei en de Achterhoek is gebleken dat de laag 0-50 cm bij de hoogste netto-fosfaatbelasting (1000 kg P_2O_5) in vrijwel alle onderzochte gronden binnen een tijdsbestek van ongeveer 20 jaar verzadigd raakt (van Riemsdijk et al., 1983). In meer dan 50% van de gevallen gebeurt dit in een periode van 5-10 jaar. Op grond van het feit dat de onverzadigde zone doorgaans een factor 2-4 dikker is, is het echter niet aannemelijk dat er reeds binnen 5 à 10 jaar op grote schaal "volledige doorslag" zal optreden, zoals de auteurs beweren. Wanneer men dit feit in aanmerking neemt en daarin de verspreiding van de in tabel 3 genoemde bodemeenheden binnen de Gelderse Vallei betreft, is het reëler met een periode van enkele tientallen jaren rekening te houden voor de periode waarin de fosfaatbelasting van het grondwater sterk toe zal nemen bij ongewijzigde drijfmestgiften.

Wel dient er nog op gewezen te worden dat de fosfaatconcentratie in het grondwater reeds oploopt voordat het fosfaatfront doorbreekt, omdat het front niet echt als een blokfront naar beneden beweegt. Dit effect is echter volgens genoemde auteurs van de orde van grootte van enkele tientallen centimeters. Dat op 2 à 3 meter diepte in het grondwater van sterk bemeste

percelen verhoogde fosfaatconcentraties, tot 0,01 mmol per liter, zijn waargenomen, wordt toegeschreven aan de uitspoeling van relatief kleine hoeveelheden organisch fosfaat die gedeeltelijk weer zijn omgezet in anorganisch fosfaat.

Tussen de verontreiniging van het grondwater en die van het oppervlaktewater ligt nog de schakel van het transport door de verzadigde zone. Dat is ook in dit verband een zeer belangrijke schakel omdat de afgelegde weg door de verzadigde zone meestal veel langer is dan die door de onverzadigde zone, terwijl het fosfaatbindend vermogen volgens voorlopige schattingen gemiddeld slechts een factor 2-5 lager is dan in de onverzadigde zone (Tabel 3). De verblijftijd van fosfaat in de verzadigde zone is daardoor aanzienlijk langer dan in de onverzadigde zone. Het is daarom waarschijnlijk dat het meer dan enkele tientallen jaren zal duren voordat, bij een ongewijzigde fosfaatgift, uitspoeling van fosfaat uit landbouwgronden op grote schaal tot een sterk verhoogde fosfaatbelasting van het oppervlaktewater aanleiding zal geven. De verhoogde belasting die nu indirect (via een fosfaatbalans) in sommige gevallen is waargenomen, is dan ook terecht aan afspoeling toegeschreven (Steenvoorden en De Heus, 1984).

Bij bovengenoemde conclusies moet wel worden bedacht dat:

1. Lokaal eerder een verhoogde belasting van het oppervlaktewater kan ontstaan door de volgende ongunstige combinatie van factoren: een zeer hoge fosfaatbelasting, een laag fosfaatbindend vermogen van de onverzadigde zone, en een korte verblijftijd in de verzadigde zone (bijv. door drainage of afstroming over ondoorlatende lagen).
2. De conclusies gebaseerd zijn op veronderstellingen t.a.v. het effectieve fosfaatbindend vermogen en het transport van fosfaat in de bodem die nadere toetsing via veldstudies behoeven.

SAMENVATTING

De fosfaatbelasting van de bodem is de laatste 10-20 jaar in de zandgebieden met intensieve veehouderij sterk toegenomen.

In verband met de mogelijke gevolgen hiervan voor de waterkwaliteit is in Nederland onderzoek verricht naar o.a.

- het voorkomen van fosfaat in drijfmest;
- de wijze waarop fosfaat in de bodem wordt vastgelegd;
- het fosfaatbindend vermogen van de bodem in relatie met bodemkenmerken, bodemeenheden en grondwaterhuishouding;
- het transport van fosfaat door de bodem.

Fosfaat komt in drijfmest hoofdzakelijk in anorganische vorm voor. Het eveneens aanwezige organische fosfaat wordt bovendien in de bodem vrij snel in anorganische vorm omgezet (geminaliseerd). Uit onderzoek met aluminiumhydroxidedeeltjes is gebleken dat anorganisch (ortho)fosfaat kan worden vastgelegd door adsorptie aan het oppervlak van deze deeltjes en een diffusie in de deeltjes. Op grond van dit reactiemechanisme zijn methoden ontwikkeld waarmee het fosfaatbindend vermogen als functie van de fosfaatconcentratie en de reactietijd kan worden bepaald. De omstandigheden zijn daarbij zoveel mogelijk aangepast aan de situatie die zich voordoet in gronden waaraan drijfmest is toegediend. Toepassing van deze methoden op Nederlandse zandgronden heeft aangetoond dat het fosfaatbindend vermogen van de bodem goed gecorreleerd is met de aluminium- en ijzergehalten die met een oxalaatextractie zijn bepaald. Bij gebrek aan voldoende gegevens is het potentiële fosfaatbindend vermogen voorlopig voor alle gronden op dezelfde wijze uit de aluminium- en ijzergehalten afgeleid. De genoemde aluminium- en ijzergehalten zijn bodemkenmerken die sterk door de ontstaanswijze van de bodem beïnvloed zijn. Daardoor zijn er duidelijke verschillen in fosfaatbindend vermogen aanwezig tussen bodemhorizonten en bodemeenheden (-types). Gronden met weinig verweering (o.a. vlakvaaggronden) lijken het laagste fosfaatbindend vermogen te hebben en ijzerrijke (beekeerd) gronden het hoogste. Daarnaast is vooral de grondwaterstand, en daarmee de op de bodemkaart aangegeven grondwatertrap, van belang voor de uitspoeling van fosfaat naar het grondwater. Het fosfaatbindend vermogen van de onverzadigde zone is namelijk sterk afhankelijk van de dikte van deze zone. Daardoor neemt in de belangrijkste groep van gronden in de gebieden met intensieve veehouderij de verblijftijd van fosfaat in de onverzadigde zone toe in de richting

zwarte beekeerdgronden → veldpodzolgronden → (hoge) enkeerdgronden. Met behulp van een eenvoudig model voor het transport van fosfaat door de bodem is te berekenen dat de gemiddelde fosfaatbelasting van het grondwater voor een gebied als de Gelderse Vallei binnen ruwweg enkele tientallen jaren sterk toe zal nemen bij handhaving van de huidige mestgiften. Dit komt doordat de onverzadigde zone dan volledig verzadigd raakt (N.B. Voor een meer gedetailleerde schatting zijn gegevens nodig van de werkelijke verdeling van de fosfaatbelasting over de verschillende gronden). In sommige gevallen is bij zeer kwetsbare gronden in dit gebied nu reeds een sterke uitspoeling naar het grondwater geconstateerd. Het lijkt niet waarschijnlijk dat op korte termijn, dat wil zeggen binnen enkele tientallen jaren, over grotere gebieden een sterke uitspoeling naar het oppervlaktewater zal optreden. Dit hangt samen met het feit dat de verzadigde zone ook een zeker fosfaatbindend vermogen heeft en de afgelegde weg door deze zone vaak aanzienlijk groter zal zijn dan die door de onverzadigde zone. Meer nauwkeurige schattingen van de fosfaatuitspoeling naar grond- en oppervlaktewater vereisen een toetsing van de schatting van het effectieve fosfaatbindend vermogen en het globale transportmodel in veldsituaties.

LITERATUUR

- Beek, J., 1979. Phosphate retention by soil in relation to waste disposal. Dissertatie Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Berghuijs-van Dijk, J.T., 1981. FOS.FOR. een model ter beschrijving van het gedrag van fosfaat uit varkensdrijfmest in de bodem. Doctoraalverslag bodemhygiëne, Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Breeuwsma, A., 1973. Adsorption of ions on hematite ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$). Dissertatie Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Breeuwsma, A., 1984. Bodemverontreiniging en bodemkartering: nieuwe wijn in oude zakken? In: Bodem en Landschap kwalitatief en kwantitatief bekeken. Pudoc, Wageningen (1984), 56-66.

- Gerritse, R.G., 1976. Phosphate compounds in pig slurry and their retention in the soil. Seminar landspreeding manures, Modena, Italy, 13-21.
- Gerritse, R.G. en I. Zugec, 1977. The phosphorus cycle in pig slurry measured from $^{32}\text{PO}_4$ distribution rates. J. Agric. Sci. 88, 101-109.
- Gerritse, R.G., P. de Willigen en P.A.L. Raats, 1982. Transport and fixation of phosphate in acid, homogeneous soils. Agric. and Environ. 7, 175-185.
- Haan, F.A.M. de, 1965. The interaction of certain inorganic anions with clays and soils. Dissertatie Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Haseman, J.F., E.H. Brown en C.D. Whitt, 1950. Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminum. Soil Sci. 70, 257-271.
- KNCV, 1976. Fosfaten in het Nederlandse oppervlaktewater, rapport van de Stuurgroep Fosfaten, red. H.L. Golterman, Uitg. Sigma Chemie.
- Kolenbrander, G.J., 1974. Evaluation of contribution of agriculture to eutrophication of shallow surface waters. Semaine d'étude agriculture et environnement, Gembloux, 113-126.
- Korzilius, E. en A. Breeuwsma, 1983. Het fosfaatbindend vermogen van zandgronden. Stichting voor Bodemkartering, Rapport nr. 1745, 57 p.
- 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. Bodembeschermingsreeks nr. 9, vroegere Min. Volksgezondheid en Milieuhygiëne, Staatsuitgeverij, 159 p.
- Lindsay, W.L., 1979. Chemical Equilibria in Soils. Wiley and Sons, New York, 449 p.
- Pape, J.C., 1972. Oude bouwlandgronden in Nederland. Boor en Spade 18, Meded. Stichting voor Bodemkartering, Uitg. Veenman en Zonen, Wageningen. 85-115.
- Riemsdijk, W.H., 1979. Reaction mechanisms of phosphate with $\text{Al}(\text{OH})_3$ and a sandy soil. Dissertatie Landbouwhogeschool, Wageningen.

Riemsdijk, W.H., Th.M. Lexmond en F.A.M. de Haan, 1983. Fosfaat- en kopertoestand van de cultuurgrond in de provincie Gelderland. Rapport Sectie Bodemhygiëne en Bodemverontreiniging, Vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding, Landbouwhogeschool, Wageningen, 75 p.

Steenvoorden, J.H.A.M. en M.J. de Heus, 1984. Fosfaatbalans- studies en de bijdrage van diffuse bronnen. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, rapport nr. 8, 23 p.

Steur, G.G.L. en W. Heijink, 1983. Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000. Algemene begrippen en indelingen, 2e uitgebreide uitgave, Stichting voor Bodemkartering, 63 p.