

Rapport 811.02

*Effecten van bekalking  
van grasland op de  
beschikbaarheid van  
fosfaat*

dr.ir. E.J.W. Wattel-Koekkoek  
dr.ir. D.W. Bussink  
ir. H.C. de Boer (PV)

*niet voor publicatie*

november '02

Nutriënten Management Instituut NMI BV  
Postbus 250  
6700 AG Wageningen  
Haagsteeg 2-b  
6708 PM Wageningen  
tel. 0317 46 77 00  
fax 0317 46 77 01  
e-mail [nmi@nmi-agro.nl](mailto:nmi@nmi-agro.nl)  
internet [www.nmi-agro.nl](http://www.nmi-agro.nl)

Rapporten van NMI dienen ter informatie van de opdrachtgever(s) en worden niet als officiële publicaties beschouwd. Zij bevatten veelal resultaten van niet afgesloten onderzoek en/of dienen als discussiestuk. Rapporten worden slechts na overleg met de opdrachtgever(s) buiten NMI verspreid.

Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van NMI.

## VERSPREIDING

## INHOUD

	pagina
SAMENVATTING EN CONCLUSIES	3
INLEIDING	5
<i>Doel</i>	5
<i>Opzet rapport</i>	5
RISICO VAN OVERSCHRIJDEN FOSFAATNORM OP MELKVEEBEDRIJVEN	7
<i>Uitgangspunten berekening</i>	7
<i>Resultaten berekening P-overschot</i>	7
DE BESCHIKBAARHEID VAN FOSFORVORMEN	13
<i>Fosforvormen in de bodem</i>	13
<i>Hoe komt P in de bodemoplossing terecht?</i>	15
MODELBEREKENINGEN AAN OPLOSSING MET BEHULP VAN PHREEQC	19
FOSFOR-PH-PROEVEN	22
<i>Internationale literatuur</i>	22
<i>De Nederlandse situatie</i>	25
NEVENEFFECTEN VAN BEKALKEN	28
<i>N-mineralisatie</i>	28
<i>Bodemstructuur</i>	30
<i>Spoorelementen</i>	31
DISCUSSIE	34
CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	36
<i>Conclusies</i>	36
<i>Aanbevelingen</i>	36
<i>Dankwoord</i>	36
REFERENTIES	37
BIJLAGEN	
1. Uitgangspunten voor berekeningen in BBPR (weiden)	40
2. Uitgangspunten voor berekeningen in BBPR (summerfeeding)	41
3. pH-waarden van pH-trappenproefvelden	42
4. Pw-getallen van pH-trappenproefvelden	43



## SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Het ministerie van LNV zal na 2003 kunstmestfosfaat vermoedelijk opnemen in Minas. Veel bedrijven zullen dan niet meer voldoen aan de fosfaatverliesnorm. Ze zullen daarom afzien van het gebruik van kunstmestfosfaat. Dit gaat ten koste van de opbrengst en kwaliteit van het gras. Uit analyses van gegevens van Praktijkcijferbedrijven door Den Boer et al. (2001) kwam naar voren dat het P-overschot op perceelsniveau daalde bij een hogere bodem-pH. Uit dit onderzoek bleek dat er een positieve correlatie is tussen de verhoging in P-AL-getal en de pH. Dit kan betekenen dat meer aandacht voor de (onderhouds)bekalking mogelijk een oplossing kan zijn om gras van voldoende fosfaat te voorzien bij lagere bemestingen als gevolg van Minas. Dit rapport is een verkennend onderzoek, waarin is getracht na te gaan wat de perspectieven zijn van een verhoging van de bodem-pH op de P-benutting van grasland en het risico van ongewenste neveneffecten.

Met het bedrijfsbegrotingsprogramma van Praktijkonderzoek Veehouderij (BBPR 8.06) is nagegaan bij welke bedrijfsintensiteiten melkveebedrijven problemen zouden kunnen krijgen om aan de fosfaatnorm te voldoen. Het blijkt in het algemeen dat er vooral bij de fosfaatuitgangssituatie 'voldoende', kunstmestfosfaat nodig is om aan de huidige bemestingsadviezen te voldoen, terwijl daar Minastechnisch geen of weinig ruimte voor is.

Fosfor komt in de bodemoplossing door mineralisatie van organische stof, het oplossen van kristallijne fosfaten en desorptie van fosfaationen die op reactieve oppervlakken zitten. Bekalken kan mineralisatie van organische stof, en daarmee het vrijkomen van fosfaat, vooral bevorderen in zure gronden. Of bekalken leidt tot het oplossen van kristallijne fosfaten hangt vooral af van de typen fosfaathoudende mineralen die voorkomen. IJzer- en aluminiumfosfaten lossen op bij pH-verhoging. Daarentegen slaan calciumfosfaten neer bij pH-verhoging. Adsorptie- en desorptieprocessen zijn ook gevoelig voor de pH van de bodem. Bij pH-verhoging vindt bij ijzer- en aluminiumhydroxiden desorptie van fosfaat plaats en stijgt de hoeveelheid fosfaat in de oplossing. Kleimineralen kunnen middels  $\text{Ca}^{2+}$ -ionen fosfaat adsorberen, waardoor de concentratie fosfaat in oplossing daalt. Het netto effect van bovenstaande processen op de hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar fosfaat is afhankelijk van het bodemtype onder het grasland. Vooral de uitgangspH en de fosfaattoestand van de bodem, het gehalte klei en metaalhydroxiden spelen een rol. Fosfaat-pH-proeven zoals beschreven in de (internationale) literatuur geven dan ook geen eenduidig antwoord op de vraag of bekalken de beschikbaarheid van fosfaat doet toenemen. Opvallend is dat belangrijke eigenschappen, zoals klei- en metaalhydroxidengehalten, van de bij de experimenten gebruikte gronden vaak maar mondjesmaat worden beschreven, terwijl deze factoren essentieel zijn om het aan- of afwezig zijn van een bekalkingseffect te verklaren.

Wanneer globaal de karakteristieken van de Nederlandse gronden in ogenschouw worden genomen, kan afgeleid worden dat het bekalken van grasland waarschijnlijk vooral op zand- en veengronden zal leiden tot toename van de beschikbare hoeveelheid fosfaat. Deze beredeningen worden echter maar ten dele onderschreven door de beperkte pot- en veldproeven die beschikbaar zijn. Nader onderzoek naar de relatie tussen

bodemtype, pH-verhoging en fosfaatbeschikbaarheid is nodig om hier meer duidelijkheid te krijgen.

Neveneffecten van bekalken spelen zich af op het gebied van bodemstructuur, N-mineralisatie, en beschikbaarheid van spoorelementen. De natuurlijke (evenwichts-)pH heeft geen invloed op de hoeveelheid gemineraliseerde N van een bodem. Bekalking (plotselinge verstoring van het evenwicht) leidt meestal tot een tijdelijke (variërend van een half tot drie jaar) toename van de N-mineralisatie. In het algemeen leidt pH-verhoging tot verbetering van de bodemstructuur. Daarnaast leidt bekalking tot een betere wortelontwikkeling van het gewas, wat de samenhang tussen bodemdeeltjes weer bevordert.

Deze factoren kunnen in principe ook bijdragen tot een verbetering van de opname van P door gras. Bekalken heeft een negatief effect op de ijzer-, mangaan-, borium- en zinkbeschikbaarheid.

Om meer inzicht te krijgen in het effect van bekalken op de P-beschikbaarheid dient een aantal vragen beantwoord te worden.

Leidt alleen pH-verhoging tot een hogere P-beschikbaarheid?

Leidt pH-verhoging via bekalken op de korte en lange termijn tot veranderingen in de P-beschikbaarheid?

Voor de beantwoording van deze vragen zijn incubatie- en potproeven met meerdere gronden nodig. Daarbij is het essentieel om goed de pH, het organischestofgehalte, de fosfaattoestand (en verzadigingsgraad) en vooral de klei- en metaalhydroxidengehalten van de te gebruiken gronden te beschrijven. Deze factoren zijn namelijk essentieel om het aan- of afwezig zijn van een bekalkingseffect te verklaren. Een optie daarbij is ook om teststroken op een groot aantal praktijkpercelen aan te leggen en daarbij de gewassamenstelling en het P-AL-getal van de teststrook en het omringende perceel te monitoren gedurende enkele jaren.

### *Conclusies*

- Het opnemen van kunstmestfosfaat en bemesten volgens advies zal op veel melkveebedrijven leiden tot een overschrijding van de Minas-norm voor fosfaat.
- Op basis van deze (literatuur)studie kunnen de bevindingen van Den Boer et al., dat een hogere pH leidt tot een hogere P-beschikbaarheid, niet eenduidig bevestigd worden. Daarbij moet worden opgemerkt dat er maar weinig experimentele gegevens zijn van grasland waarbij de beschikbaarheid gebaseerd wordt op het P-AL-getal.
- Er is aanvullend experimenteel onderzoek nodig voor de Nederlandse situatie op zand- en veengrasland om een eenduidig antwoord te geven op de vraag of een hogere pH leidt tot een hogere P-beschikbaarheid.
- Bekalken leidt tot een tijdelijke verhoging (half jaar tot 3 jaar) van de N-mineralisatie.
- De pH heeft invloed op de beschikbaarheid van fosfaat.
- Het verhogen van de pH om de P-beschikbaarheid te verhogen leidt tot tegenstrijdige resultaten.

## INLEIDING

Nederlandse melkveebedrijven maken gebruik van dierlijke mest en indien nodig van kunstmest om de fosfaat(P-)toestand van hun grasland op peil te houden. Het Ministerie van LNV zal na 2003 kunstmestfosfaat vermoedelijk opnemen als aanvoerpost in Minas. Veel bedrijven kunnen dan niet meer voldoen aan de fosfaatverliesnorm. Ze zullen dan afzien van het gebruik van kunstmestfosfaat om een heffing te vermijden. Dit kan ten koste gaan van de opbrengst en de kwaliteit van het gras. Is deze opbrengstderiving te voorkomen?

Uit analyses van gegevens van Praktijkcijferbedrijven door Den Boer et al. (2001) kwam naar voren dat het P-overschot op perceelsniveau daalde bij een hogere bodem-pH. Uit dit onderzoek bleek dat er een positieve correlatie is tussen de verhoging in P-AL-getal en de pH. Bij een stijging van de bodem-pH met één eenheid zou er op jaarbasis 35-40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha minder nodig zijn om een bepaald fosfaathoudende meststof nodig is voor een optimale fosfaatvoorziening van gewassen. Meer aandacht voor de (onderhouds)bekalking zou mogelijk een oplossing zijn om gras van voldoende fosfaat te voorzien bij lagere bemestingen als gevolg van Minas.

Om de pH van de bodem te handhaven maakt men gebruik van kalk. In de praktijk vindt bekalking overwegend plaats voorafgaand aan graslandvernieuwing. Een groot deel van het grasland heeft een te lage pH (Blgg, 2002). Bekend is dat de pH van belang is voor de bodemstructuur, de mineralisatie van organische stof, de beschikbaarheid van (spoor)elementen en de botanische samenstelling. Een goede pH kan de mineralisatie van organische stof bevorderen en verhoogt daarmee het stikstof(N-)leverend vermogen van de grond. Een hoge pH is gunstig voor de beschikbaarheid van het sporelement Mo en ongunstig voor de sporelementen B, Fe, Mn en Zn.

Tot nu toe zijn er te weinig onderzoeksresultaten beschikbaar over de relatie tussen de bodem-pH en de P-beschikbaarheid om een eventuele aanpassing van de bekalkingsadviesing te rechtvaardigen. Dit rapport is een verkennend onderzoek, waarin we trachten na te gaan wat de perspectieven zijn van een verhoging van de bodem-pH op de P-benutting van grasland en het risico van ongewenste neveneffecten.

### *Doel*

Doel van dit rapport is om op basis van internationale literatuur antwoord te geven op de volgende vragen:

- Heeft de pH van de bodem invloed op de beschikbaarheid van fosfaat?
- Welke invloed heeft bekalking op N-mineralisatie, bodemstructuur, soortenrijkdom en sporelementen?
- Zijn er nog andere neveneffecten van bekalking?

### *Opzet rapport*

Eerst is nagegaan onder welke omstandigheden melkveebedrijven de fosfaatverliesnorm overschrijden indien de huidige bemestingsadviezen worden opgevolgd. Dit onderstreept het potentiële belang van opties

(bijvoorbeeld een goede pH-toestand) die bij kunnen dragen aan hoge nalevering van P door de bodem.

Aansluitend wordt ingegaan op de relatie tussen pH en fosfaatbeschikbaarheid. Daartoe wordt inzicht gegeven in de verschillende vormen waarin fosfor voorkomt in de bodem. Vervolgens worden de processen beschreven waardoor fosfor in de bodemoplossing terecht kan komen. Aansluitend is in dit rapport een overzicht gegeven van fosfor-pH proeven in de internationale wetenschappelijke literatuur, en is getracht te voorspellen hoe verschillende Nederlandse bodemtypen zullen reageren op bekalking. Tot slot komen de mogelijke neveneffecten van bekalken aan bod.

Wanneer in dit rapport de pH wordt genoemd dan heeft dit betrekking op de pH in water. Indien pH-KCl wordt bedoeld is dit expliciet aangegeven. Een vuistregel is dat pH-KCl één eenheid lager is dan pH-water.



## RISICO VAN OVERSCHRIJDEN FOSFAATNORM OP MELKVEEBEDRIJVEN

### *Uitgangspunten berekening*

Het (waarschijnlijk) opnemen van kunstmestfosfaat in Minas bemoeilijkt het voldoen aan de fosfaatverliesnorm van maximaal 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Met het bedrijfsbegrotingsprogramma van het Praktijkonderzoek Veehouderij (BBPR 8.06) is nagegaan bij welke bedrijfsintensiteiten melkveebedrijven problemen krijgen om aan de fosfaatnorm te voldoen. De volgende uitgangspunten zijn daarbij gehanteerd:

- 25 ha;
- 2 melkkoeien per ha;
- 8.225 kg melk per koe;
- vervangingspercentage 28 procent; en
- zandgrond.

Voor de overige kenmerken zie bijlage 1.

De volgende parameters zijn gevarieerd:

- teelt; alleen grasland of 17 ha grasland en 8 ha maïs;
- grondwatertrap; IV (goed vochthoudend) of VI (droogtegevoelig);
- N-bemestingsniveau; 200, 250, 300 of 350 kg N ha<sup>-1</sup>;
- gemiddelde P-toestand bodem; voldoende (V), ruim voldoende (RV) of hoog (H); en
- beweidingssysteem; onbeperkt weiden, beperkt weiden of summerfeeding.

De uitgangssituatie is voor alle situaties gelijk, met uitzondering van de genoemde variabelen. Bij beperkt weiden is de bijvoeding 4,5 kg dier<sup>-1</sup> dag<sup>-1</sup> in plaats van 2,0 kg dier<sup>-1</sup> dag<sup>-1</sup>. Bij de combinatie gras en snijmaïs is bij grondwatertrap 6 de veebezetting per hectare bij onbeperkt weiden te hoog. Daarom is daar de bijvoeding verhoogd van 2,0 kg dier<sup>-1</sup> dag<sup>-1</sup> tot 3,5 kg dier<sup>-1</sup> dag<sup>-1</sup>.

### *Resultaten berekening P-overschot*

Bij alleen grasland neemt het P-overschot exclusief kunstmest af naarmate de stikstofbemesting stijgt. Dit komt omdat er minder voer aangekocht moet worden (zie tabel 1 en 2). Wel stijgt de behoefte aan kunstmestfosfaat door een hogere grasproductie. Bij GT=4 wordt de norm (exclusief kunstmest) niet overschreden. Bij GT=6 overtreft het P-overschot exclusief kunstmest in enkele gevallen de norm van 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. De N-jaargift dient 250 kg ha<sup>-1</sup> of meer te bedragen om geen P-overschot exclusief kunstmest te hebben. Bij GT=6 is de grasproductie duidelijk lager dan bij GT=4, hetgeen extra voeraankopen betekent. Meer stikstof leidt tot een hoger maaipercantage (vooral bij Gt=4) en daarmee tot een hogere fosfaatbehoefte van het grasland. Vooral bij toestand 'voldoende' en onbeperkt weiden is een aanvulling met kunstmestfosfaat nodig om overeenkomstig het advies te bemesten. Het P-overschot inclusief kunstmest overschrijdt dan duidelijk de norm (zie tabel 1 en 2) van 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.

Indien een gedeelte van het totale areaal uit maïs bestaat, neemt het P-overschot inclusief kunstmest nog verder toe. Dit is gebaseerd op een streefgetal voor Pw van 30. Bij een hoger Pw-getal op maïsland wordt het P-overschot kleiner.

Summerfeeding komt vooral voor op bedrijven die erg intensief zijn. Op deze bedrijven wordt in de regel veel mest geproduceerd, zodat met een beperktere aanvulling met kunstmestfosfaat kan worden volstaan, vooral voor de situatie met alleen grasland (tabel 1 en 2). Indien er maïs aanwezig is, is vaak alleen voor de maïs een rijenbemesting nodig. In de hier weergegeven situaties kunnen de bedrijven met summerfeeding en met alleen gras aan beide P-normen voldoen. De bedrijven met maïs produceren meer voer, waardoor minder voeraankopen nodig zijn. Ook deze bedrijven kunnen goed aan de P-norm exclusief kunstmest voldoen. Met kunstmest voldoen ze veelal niet aan de norm.

Het blijkt in het algemeen dat er vooral bij de situatie 'voldoende' vaak kunstmestfosfaat nodig is om aan de huidige bemestingsadviezen te voldoen, terwijl daar Minastechnisch geen of weinig ruimte voor is (bij de toestand 'laag' en 'vrij laag' is er vanzelfsprekend nog beduidend meer kunstmestfosfaat nodig). Bij de toestand 'ruim voldoende' en 'hoog' is slechts weinig of geen aanvulling met kunstmestfosfaat nodig. Wel zal de toestand 'ruim voldoende' en 'hoog' niet gehandhaafd blijven. Bij een fosfaatoverschot van 20 kg is de verwachting dat de toestand na verloop van tijd zal dalen tot 'voldoende' of nog iets lager. Op termijn zal er dus op basis van de huidige bemestingsadvisering in veel situaties suboptimaal worden bemest, indien de melkveehouder moet voldoen aan de overschotsnorm van 20 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> (zie de situatie bij toestand 'voldoende' in de tabellen 1, 2, 3 en 4). Dit kan op termijn leiden tot lagere opbrengsten en lagere graskwaliteiten.

Het is dus van belang na te gaan of er mogelijkheden zijn om de P in de bodem beter te benutten. Temeer daar op dit moment nu al 52 procent van het grasareaal een toestand 'voldoende' of lager heeft. Meer aandacht voor de bekalking (pH-toestand) zou mogelijk kunnen bijdragen (Den Boer et al., 2001) aan een hogere P-nalevering uit bodemfosfaat. In de navolgende hoofdstukken worden de perspectieven hiervan nagegaan.

TABEL 1. P-overschotten in afhankelijkheid van bedrijfsintensiteit en P-toestand van de bodem; Gt = IV, alleen grasland.

N-regime, kg N ha <sup>-1</sup>	fosfaat- toestand	weidesysteem	aanvoer P- kunstmest, kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (excl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (incl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>
200	V	onbeperkt	18,0	15,1	33,1
200	RV	onbeperkt	0	15,1	15,1
200	H	onbeperkt	0	15,1	15,1
200	V	beperkt	12,0	13,1	25,1
200	RV	beperkt	0	13,1	13,1
200	H	beperkt	0	13,1	13,1
250	V	onbeperkt	21,6	10,6	32,3
250	RV	onbeperkt	2,1	10,6	12,7
250	H	onbeperkt	0	10,6	10,6
250	V	beperkt	15,5	9,0	24,4
250	RV	beperkt	0	9,0	9,0
250	H	beperkt	0	9,0	9,0
300	V	onbeperkt	24,5	7,3	31,8
300	RV	onbeperkt	4,7	7,3	12,0
300	H	onbeperkt	0	7,3	7,3
300	V	beperkt	18,1	6,1	24,2
300	RV	beperkt	0	6,1	6,1
300	H	beperkt	0	6,1	6,1
350	V	onbeperkt	26,5	4,9	31,4
350	RV	onbeperkt	6,6	4,9	11,6
350	H	onbeperkt	0	4,9	4,9
350	V	beperkt	20,7	3,2	24,0
350	RV	beperkt	1,0	3,2	4,2
350	H	beperkt	0	3,2	3,2
200	V	summerfeeding	1,1	14,8	15,8
200	RV	summerfeeding	0	14,8	14,8
200	H	summerfeeding	0	14,8	14,8
250	V	summerfeeding	8,6	7,9	16,5
250	RV	summerfeeding	0	7,9	7,9
250	H	summerfeeding	0	7,9	7,9
300	V	summerfeeding	16,1	2,2	18,3
300	RV	summerfeeding	0	2,2	2,2
300	H	summerfeeding	0	2,2	2,2
350	V	summerfeeding	22,9	-2,5	20,5
350	RV	summerfeeding	2,9	-2,5	0,5
350	H	summerfeeding	0	-2,5	-2,5

TABEL 2. P-overschotten in afhankelijkheid van bedrijfsintensiteit en P-toestand van de bodem; Gt = VI, alleen grasland.

N-regime, kg N ha <sup>-1</sup>	fosfaat- toestand	weidesysteem	aanvoer P- kunstmest, kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (excl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (incl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>
200	V	onbeperkt	13,9	20,9	34,8
200	RV	onbeperkt	0	20,9	20,9
200	H	onbeperkt	0	20,9	20,9
200	V	beperkt	8,5	19,0	27,4
200	RV	beperkt	0	19,0	19,0
200	H	beperkt	0	19,0	19,0
250	V	onbeperkt	16,6	17,5	34,1
250	RV	onbeperkt	0	17,5	17,5
250	H	onbeperkt	0	17,5	17,5
250	V	beperkt	10,8	15,9	26,7
250	RV	beperkt	0	15,9	15,9
250	H	beperkt	0	15,9	15,9
300	V	onbeperkt	17,9	15,5	33,4
300	RV	onbeperkt	0	15,5	15,5
300	H	onbeperkt	0	15,5	15,5
300	V	beperkt	13,7	12,7	26,4
300	RV	beperkt	0	12,7	12,7
300	H	beperkt	0	12,7	12,7
350	V	onbeperkt	19,2	13,7	32,9
350	RV	onbeperkt	0	13,7	13,7
350	H	onbeperkt	0	13,7	13,7
350	V	beperkt	16,2	9,6	25,8
350	RV	beperkt	0	9,6	9,6
350	H	beperkt	0	9,6	9,6
200	V	summerfeeding	0	19,6	19,6
200	RV <sup>1)</sup>	summerfeeding	0	19,6	19,6
250	V	summerfeeding	1,5	16,9	18,4
250	RV	summerfeeding	0	16,9	16,9
300	V	summerfeeding	4,6	14,6	19,2
300	RV	summerfeeding	0	14,6	14,6
350	V	summerfeeding	8,2	12,5	20,7
350	RV	summerfeeding	0	12,5	12,5

<sup>1)</sup> Bij summerfeeding zijn resultaten bij 'hoog' gelijk aan de resultaten bij 'ruim voldoende'

TABEL 3. P-overschotten in afhankelijkheid van bedrijfsintensiteit en P-toestand van de bodem; Gt = IV, 20 ha grasland, 5 ha snijmaïs.

N-regime, kg N ha <sup>-1</sup>	fosfaat- toestand	weidesysteem	aanvoer P- kunstmest, kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (excl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (incl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>
200	V	onbeperkt	14,6	22,0	36,5
200	RV	onbeperkt	5,7	22,0	27,7
200	H	onbeperkt	5,5	22,0	27,4
200	V	beperkt	13,4	13,3	26,8
200	RV	beperkt	5,6	13,3	18,9
200	H	beperkt	5,6	13,3	18,9
250	V	onbeperkt	19,3	16,3	35,6
250	RV	onbeperkt	5,9	16,3	22,3
250	H	onbeperkt	5,7	16,3	22,1
250	V	beperkt	15,9	10,1	26,0
250	RV	beperkt	5,8	10,1	15,9
250	H	beperkt	5,8	10,1	15,9
300	V	onbeperkt	22,4	12,4	34,9
300	RV	onbeperkt	7,1	12,4	19,5
300	H	onbeperkt	5,9	12,4	18,3
300	V	beperkt	17,4	8,1	25,5
300	RV	beperkt	5,9	8,1	14,0
300	H	beperkt	5,9	8,1	14,0
350	V	onbeperkt	24,0	10,2	34,2
350	RV	onbeperkt	8,5	10,2	18,7
350	H	onbeperkt	5,9	10,2	16,1
350	V	beperkt	18,7	6,4	25,1
350	RV	beperkt	5,9	6,4	12,4
350	H	beperkt	5,9	6,4	12,4
200	V	summerfeeding	9,3	14,1	23,3
200	RV	summerfeeding	8,7	14,1	22,8
200	H	summerfeeding	8,7	14,1	22,8
250	V	summerfeeding	11,5	10,9	22,3
250	RV	summerfeeding	9,4	10,9	20,3
250	H	summerfeeding	9,4	10,9	20,3
300	V	summerfeeding	15,1	8,2	23,3
300	RV	summerfeeding	9,6	8,2	17,9
300	H	summerfeeding	9,6	8,2	17,9
350	V	summerfeeding	18,5	6,0	24,5
350	RV	summerfeeding	9,9	6,0	15,9
350	H	summerfeeding	9,6	6,0	15,6

TABEL 4. P-overschotten in afhankelijkheid van bedrijfsintensiteit en P-toestand van de bodem; Gt = VI, 20 ha grasland, 5 ha snijmaïs

N-regime, kg N ha <sup>-1</sup>	fosfaat- toestand	weidesysteem	aanvoer P- kunstmest, kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (excl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	P-overschot (incl. km), kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>
200	V	onbeperkt	12,3	27,2	39,5
200	RV	onbeperkt	5,7	27,2	32,9
200	H	onbeperkt	5,4	27,2	32,6
200	V	beperkt	6,7	21,8	28,5
200	RV	beperkt	5,3	21,8	27,1
200	H	beperkt	5,3	21,8	27,1
250	V	onbeperkt	16,0	23,3	39,2
250	RV	onbeperkt	5,8	23,3	29,1
250	H	onbeperkt	5,7	23,3	28,9
250	V	beperkt	10,3	17,3	27,6
250	RV	beperkt	5,6	17,3	22,9
250	H	beperkt	5,6	17,3	22,9
300	V	onbeperkt	19,0	19,8	38,8
300	RV	onbeperkt	5,9	19,8	25,8
300	H	onbeperkt	5,8	19,8	25,6
300	V	beperkt	13,4	13,5	26,9
300	RV	beperkt	5,8	13,5	19,3
300	H	beperkt	5,8	13,5	19,3
350	V	onbeperkt	21,2	17,0	38,1
350	RV	onbeperkt	6,0	17,0	23,0
350	H	onbeperkt	5,9	17,0	22,9
350	V	beperkt	15,4	11,0	26,4
350	RV	beperkt	5,9	11,0	16,9
350	H	beperkt	5,9	11,0	16,9
200	V	summerfeeding	8,9	19,0	27,9
200	RV	summerfeeding	8,5	19,0	27,5
200	H	summerfeeding	8,5	19,0	27,5
250	V	summerfeeding	9,4	16,3	25,7
250	RV	summerfeeding	9,1	16,3	25,4
250	H	summerfeeding	9,1	16,3	25,4
300	V	summerfeeding	10,1	14,0	24,1
300	RV	summerfeeding	9,4	14,0	23,4
300	H	summerfeeding	9,4	14,0	23,4
350	V	summerfeeding	12,8	12,0	24,8
350	RV	summerfeeding	9,6	12,0	21,6
350	H	summerfeeding	9,6	12,0	21,6

## DE BESCHIKBAARHEID VAN FOSFORVORMEN

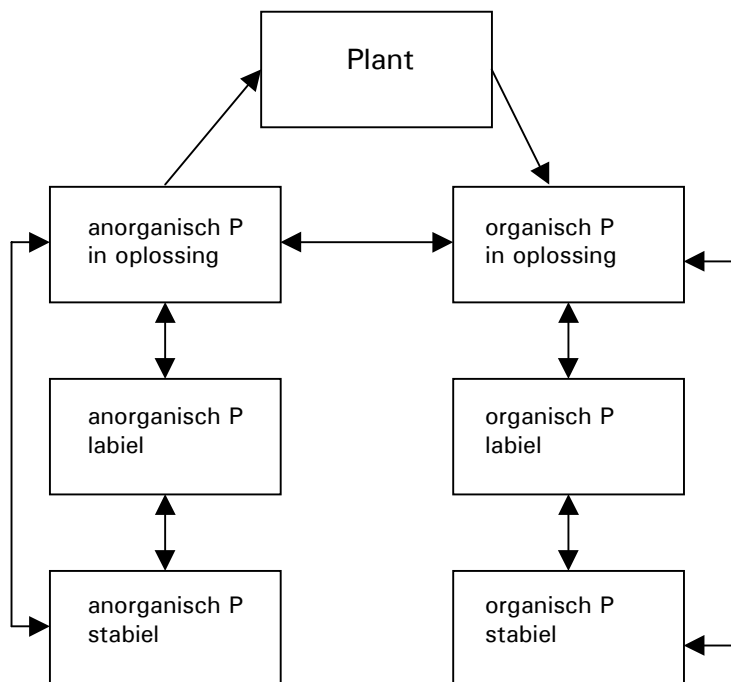
Fosfor is een belangrijk element voor planten. Het is een onderdeel van onder andere eiwitten, enzymen, DNA en RNA. Ook speelt het een essentiële rol bij de overdracht van energie.

De opname van een plantenvoedende stof als fosfor hangt in het algemeen af van de hoeveelheid waarin de stof aanwezig is, de mobiliteit van de stof ('beschikbaarheid'), en de grootte, opnamekinetiek en mobilisatiecapaciteit van het wortelsysteem ('acquisitie') (Singh Gahoonia *et al.*, 1992). Deze studie is vooral gericht op de beschikbaarheid.

### *Fosforvormen in de bodem*

In de bodem komt een groot aantal verschillende fosforverbindingen voor, zowel in anorganische als in organische vorm. Deze kunnen schematisch worden weergegeven volgens het model in figuur 1. Planten kunnen fosfor alleen opnemen in anorganische vorm. De meest voorkomende anorganische fosfaationen in de bodemoplossing zijn  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en  $\text{HPO}_4^{2-}$ .

Niet-opgeloste verbindingen zijn te verdelen in labiele en stabiele verbindingen. Het labiele deel is in evenwicht met de fosfaationen in oplossing: wanneer planten fosfaationen opnemen uit de oplossing, wordt de oplossing aangevuld vanuit de labiele fracties. Het labiele deel is relatief snel beschikbaar voor de plant. De stabiele fosforverbindingen zijn niet of nauwelijks beschikbaar voor de plant: de processen waarmee een deel van de stabiele verbindingen in labiele verbindingen worden omgezet zijn tijdrovend.



FIGUUR 1. Schematische weergave van fosforvormen in de bodem.

Nadeel van de schematische weergave in figuur 1 is dat de onderdelen in principe slechts theoretische entiteiten vormen. De onderdelen zijn fysiek niet goed te scheiden, waardoor ze lastig te bestuderen zijn. Onderzoekers hebben reeds diverse pogingen gedaan om de verschillende fracties te scheiden, met matig resultaat.

In de literatuur wordt melding gemaakt van vier manieren om de hoeveelheid P te bepalen die voor planten beschikbaar is (Jarvis & Oenema, 2000):

- chemische extractiemiddelen (tabel 5). Tunney *et al.* (1997) geven een overzicht van de gebruikte middelen en de relatie met bemestingsstrategiën;
- waterextractie (bijvoorbeeld Pw). Deze methode verwijdert slechts een klein deel van het aanwezige fosfaat. Waterextractie blijkt vaak een goede indicator voor de direct voor de hoeveelheid plantbeschikbaar fosfaat en voor mogelijke eutrofiëring van grondwater;
- P-filters. Filters, bijvoorbeeld van ijzerhoudende materialen, kunnen gebruikt worden om desorptie te bepalen; en
- <sup>32</sup>P-isotopen. De isotopische uitwisseling tussen <sup>32</sup>P in de oplossing en aan de vaste fase van de grond wordt gebruikt om de hoeveelheid en de snelheid van desorbeerbaar P te bepalen.

Alle vier de methoden hebben voor- en nadelen. De extractiemiddelen zijn het eenvoudigst in gebruik voor veldsituaties. Nadeel van extractiemiddelen is dat in één extract verschillende soorten fosfaat kunnen zitten. Sommige soorten zijn gemakkelijk en anderen moeilijk opneembaar voor de plant. Extractiemethoden zeggen strict genomen daarom alleen iets over de oplosbaarheid van de fosfaationen (bijvoorbeeld oplosbaar in natriumhydroxide), maar ze zeggen weinig over hoeveel moeite/tijd het een plant gemiddeld kost om het fosfaat op te nemen

TABEL 5. Enkele extractiemiddelen voor de bepaling van de fosfaattoestand.

Middel	veronderstelde werking
P-Bray: NH <sub>4</sub> F en HCl	index om beschikbaar-P aan te geven, door Al-, Fe- en met name Ca-fosfaten op te lossen. Deze methode werkt met name in zure gronden.
P-Olsen: NaHCO <sub>3</sub> pH 8.5	index om beschikbaar P aan te geven
P-AL	idem
NH <sub>4</sub> F	lost aluminium-gebonden fosfaat op
NaOH	lost ijzer-gebonden fosfaat op, en fosfaat geadsorbeerd aan ijzerhydroxiden
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	lost calcium-gebonden fosfaat op (bijvoorbeeld apatiet)

Naast het onderscheid tussen stabiel en labiel fosfaat, gebruikt men ook vaak de verdeling tussen geadsorbeerd en kristallijn fosfor. Met geadsorbeerd fosfor worden de aan metaal(hydr)oxiden geadsorbeerde fosfaationen bedoeld. 'Kristallijn fosfor' betreft de mineralen waarin P onderdeel vormt van de kristalstructuur, zoals apatiet.

De twee indelingen zijn geen synoniemen: de indeling geadsorbeerd/kristallijn heeft alleen betrekking op anorganische stof, de indeling labiel/stabiel betreft organische en anorganische componenten. Ruwweg wordt geadsorbeerd fosfaat gezien als labiel, terwijl kristallijn fosfaat zowel labiel als stabiel kan zijn.



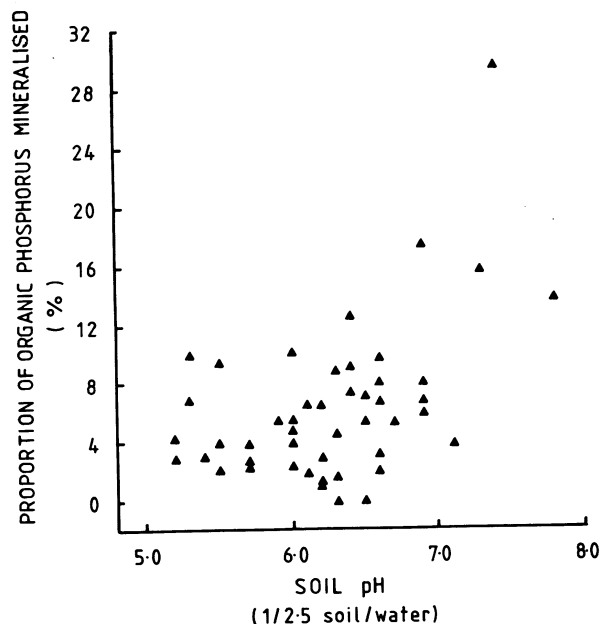
### Hoe komt P in de bodemoplossing terecht?

Er zijn drie processen waardoor fosfor in de bodemoplossing terecht kan komen.

#### Mineralisatie van organische stof

De hoeveelheid organisch fosfor in de bodem varieert sterk, en kan tussen de 20 en 80 procent van de totale hoeveelheid fosfor van een bodem bedragen (Geelhoed, 1998). Het gemak waarmee organische stof door microben afgebroken kan worden, hangt onder andere af van de chemische samenstelling van de organische stof. Zo geldt in het algemeen dat suikers gemakkelijker afbreekbaar zijn dan vetten. Ook het fosforgehalte heeft invloed op de afbreekbaarheid. Voor organische mest geldt ruwweg dat bij een C/P-verhouding van 200, P netto wordt gemineraliseerd: de organische stof wordt afgebroken door micro-organismen, waarbij als 'afvalproducten' anorganische P, CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O ontstaan. Bij een C/P-verhouding van 300 wordt P netto geïmmobiliseerd (Janssen & Van Beusichem, 1993): de organische stof wordt opgegeten door de microben, waarbij ze organisch P gebruiken als bouwstof voor hun eigen lichaam, waardoor het niet beschikbaar is voor de plant. Naast de chemische samenstelling beïnvloedt de temperatuur de afbraak van organische stof in de bodem. Hoe warmer het is, des te sneller wordt de organische stof afgebroken en komt P in anorganische vorm in de oplossing (Loomis & Connor, 1992).

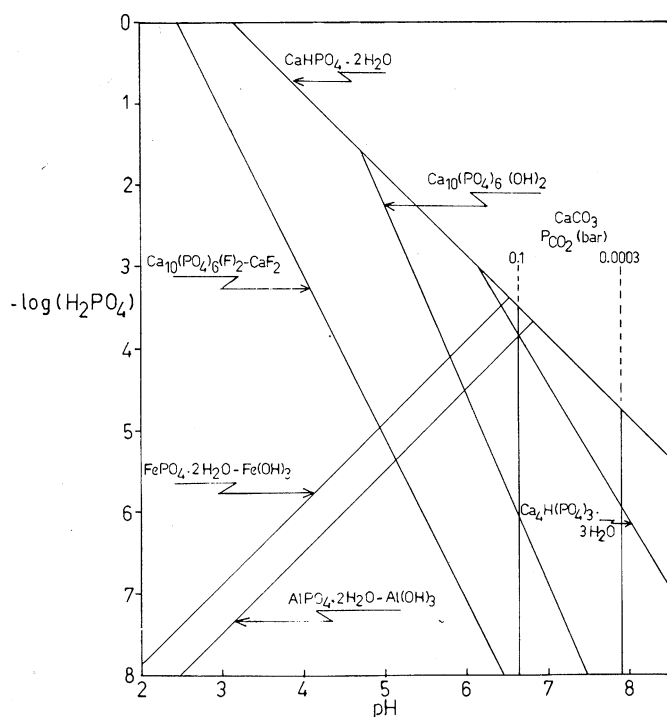
Bij zure gronden (pH 5,0-5,5) is waargenomen dat bekalking de mineralisatie van organisch fosfor stimuleert (Halstead *et al.*, 1963). Bij gronden met pH > 5,5 is echter geen duidelijk verband gevonden tussen de pH van een bodem en de mineralisatie van organisch fosfor (Robson & Abbott, 1989, zie ook figuur 2), hoewel bij pH > 7,0 de mineralisatie lijkt toe te nemen.



FIGUUR 2. De mineralisatie van organisch fosfor in relatie tot de pH van de bodem van 25 paren van gronden (ontgonnen en niet-ontgonnen). Uit: Robson & Abbott, 1989.

## Oplossen van kristallijne fosfaten

In bodem kunnen diverse fosfaathoudende mineralen voorkomen, zoals ijzer-, aluminium- en calciumfosfaten. Veel voorkomende mineralen zijn strengiet ( $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), varisciet ( $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), en apatiet ( $\text{Ca}_{10}\text{X}_2(\text{PO}_4)_6$ , waarbij X staat voor F of OH). Deze fosfaten zijn afgeleid van orthofosforzuur,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Figuur 3 geeft het oplosbaarheidsdiagram van verschillende fosfaten weer. Op de verticale as staat de concentratie fosfaat in de oplossing. De as heeft een negatief logaritmische schaal: dichterbij 0 betekent een hogere concentratie. Op de horizontale as staat de pH van de oplossing. Bij een lage pH ( $< 6,5$ ) vormt P slecht oplosbare verbindingen met  $\text{Fe}^{3+}$  en  $\text{Al}^{3+}$ . De grafiek toont twee parallelle lijnen die dalen van rechts naar links. Dit betekent dat bij dalende pH de mineralen slechter oplosbaar worden. Bij een hoge pH vormt P slecht oplosbare verbindingen met  $\text{Ca}^{2+}$  (de lijnen dalen bij toenemende pH). De fosfaatconcentratie in de bodemoplossing is dan ook meestal het hoogst bij pH 5-7 (0,03-0,1  $\text{mg P l}^{-1}$  oplossing). Hogere concentraties komen voor in de buurt van kunstmestkorrels.



FIGUUR 3. Oplosbaarheidsdiagram voor fosfaten in de bodem. De volgende aannames zijn gemaakt:  $\text{Ca}^{2+}$ -activiteit is  $10^{-2,5} \text{ mol l}^{-1}$ , verder is  $\text{Al}^{3+}$  in evenwicht met  $\text{Al}(\text{OH})_3$  en  $\text{Fe}^{3+}$  in evenwicht met  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Uit: Bolt & Bruggewert, 1975.

### Desorptie van fosfaationen die op reactieve oppervlakken zitten

Zoals eerder vermeld kunnen fosfaationen worden gebonden door ijzer- en aluminium(hydr)oxiden en kleimineralen.

De lading van de metaal(hydr)oxiden kan positief of negatief zijn en hangt af van de pH en de samenstelling van de oplossing (soort en sterkte ionen; Geelhoed, 1998). Als ze een positieve lading hebben (bij  $\text{pH} < 7$ ), kunnen ze negatief geladen fosfaationen aantrekken en adsorberen aan hun oppervlak.

De metaal(hydr)oxiden fungeren daardoor als een soort tijdelijke opslagplaats voor onder andere fosfaat. Het loskomen van fosfaationen kan relatief snel gebeuren (binnen enkele uren/dagen), en daarom zijn desorptieprocessen van groot belang voor het in oplossing komen van fosfaat.

De hoeveelheid fosfaationen die op de reactieve oppervlakken zit, wordt beïnvloed door de totale hoeveelheid P die aanwezig is, de grootte van het reactieve oppervlak, de pH en de samenstelling van de verschillende anionen.

Bij een verhoging van pH ( $> 6$ ) neemt de negatieve lading van de metaal(hydr)oxiden toe, waardoor minder anionen geadsorbeerd worden en de concentratie anionen in oplossing toeneemt.

Er zijn echter diverse uitzonderingen op de regel. Zo neemt de desorptie bijvoorbeeld af wanneer de toegenomen negatieve lading wordt ondervangen door aanwezigheid van  $\text{Ca}^{2+}$ -ionen, zoals het geval is bij bekalken (Hartikainen, 1995).

Een andere uitzondering op de regel is sulfaat. Sulfaat heeft bij lage pH (3) grote affiniteit voor ijzerhydroxide (roest) en deze affiniteit neemt af met stijging van pH (naar 5). Dit heeft tot gevolg dat bij lage pH er relatief weinig fosfaationen geadsorbeerd zijn (is geen plaats meer voor), en er veel in oplossing zitten, en dat bij toename naar pH 5 er meer fosfaationen geadsorbeerd raken en er minder in oplossing komen. Bij  $\text{pH} > 5$  neemt de hoeveelheid fosfaat in oplossing weer toe (Geelhoed, 1998).

Voorts heeft het gehalte organische stof invloed op adsorptie/desorptie processen: deze vormt namelijk buffer tegen pH veranderingen (Hartikainen & Yli-Halla, 1983).

Het oppervlak van kleideeltjes (bodemdeeltjes  $< 2\mu\text{m}$ ) heeft van nature een negatieve lading, waardoor positief geladen ionen (kationen) uit de oplossing naar het klei-oppervlak worden getrokken. Deze kationen vormen het uitwisselingscomplex aan het klei-oppervlak. Vanwege hun positieve lading kunnen ze op hun beurt weer (negatief geladen) fosfaationen binden. De lading van de kationen in het uitwisselingscomplex is van invloed op de hoeveelheid negatieve ionen die gebonden kunnen worden. Wanneer met name divalente kationen, zoals  $\text{Ca}^{2+}$  afkomstig van kalk, aan het uitwisselingscomplex zitten, kunnen veel meer fosfaationen geadsorbeerd worden dan wanneer het complex door monovalente kationen is bezet. Door aanwezigheid van calciumionen komt minder fosfaat in de oplossing en is er minder fosfaat voor de plant beschikbaar.

Op basis van de hierboven genoemde drie mechanismen (mineralisatie, oplossen en desorptie) valt geen algemene conclusie te trekken over het uiteindelijke effect van bekalking op de hoeveelheid beschikbaar P; omdat de verschillende vormen waarin fosfor voorkomt in de bodem, verschillend gedrag vertonen wat betreft bijvoorbeeld de fosfaatconcentratie in de oplossing en de pH. Dit maakt het inschatten van een behandeling als bekalken op de totale hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar fosfor zeer complex (tabel 6). In dit rapport is gekozen voor twee benaderingswijzen van het vraagstuk: een modelmatige en een experimentele. Hierna zullen eerst de resultaten van een bodemmodel besproken worden. Vervolgens wordt ingegaan op resultaten van fosfor-pH-experimenten, zowel veld- als potproeven, uit de (internationale) literatuur.

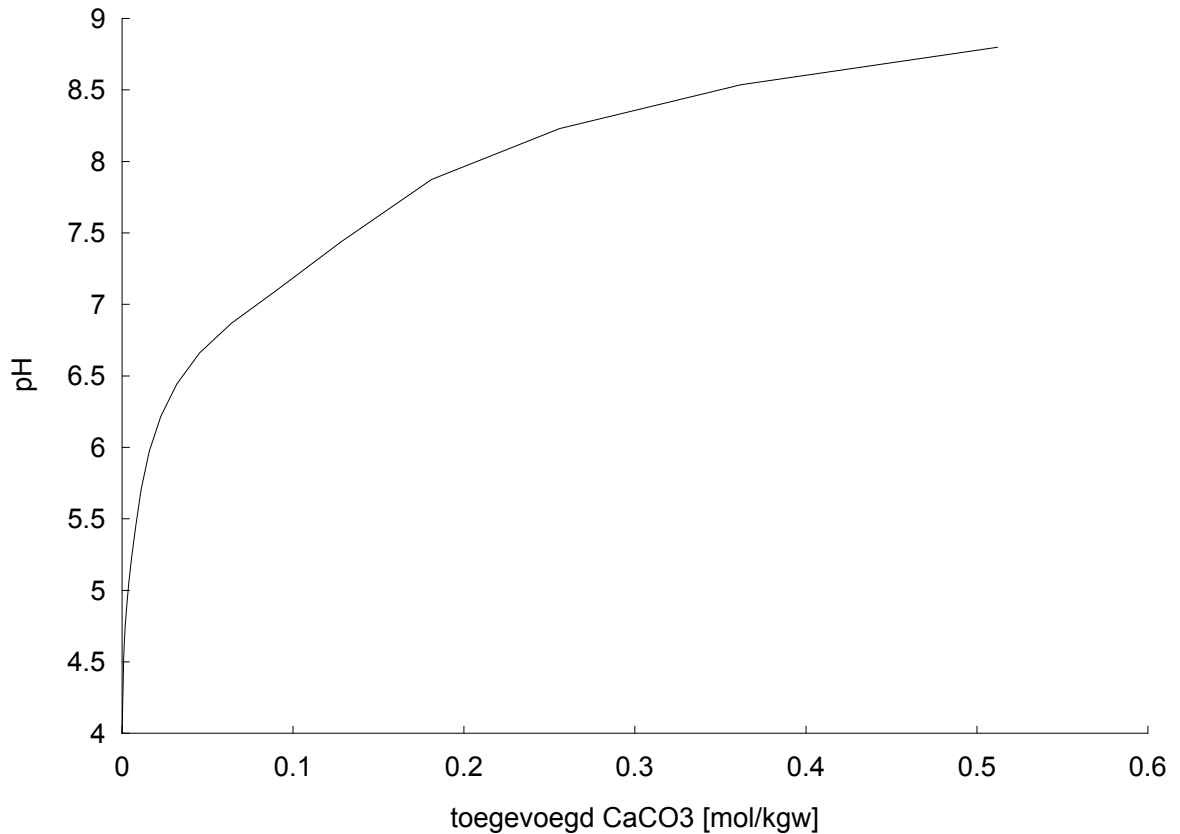
TABEL 6. Mogelijk effect van pH-verandering op de fosfaatconcentratie in de bodemoplossing.

Vaste fase	actie	reactie in oplossing
<i>organische stof</i>		
zure gronden	pH ↑	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ↑
neutrale en basische gronden	pH ↑	variabele reactie
<i>kristallijne mineralen</i>		
Fe/Al-fosfaten	pH ↑	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ↑
Ca-fosfaten	pH ↑	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ↓
<i>reactieve oppervlakken</i>		
Fe/Al-(hydr)oxiden	pH ↑ (> 5)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ↑
ijzer(hydr)oxiden + sulfaat	pH ↑ (3 naar 5)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ↓
ijzer(hydr)oxiden	Ca <sup>2+</sup> ↑ (bij pH > 5)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ↓
klei	Ca <sup>2+</sup> ↑	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ↓

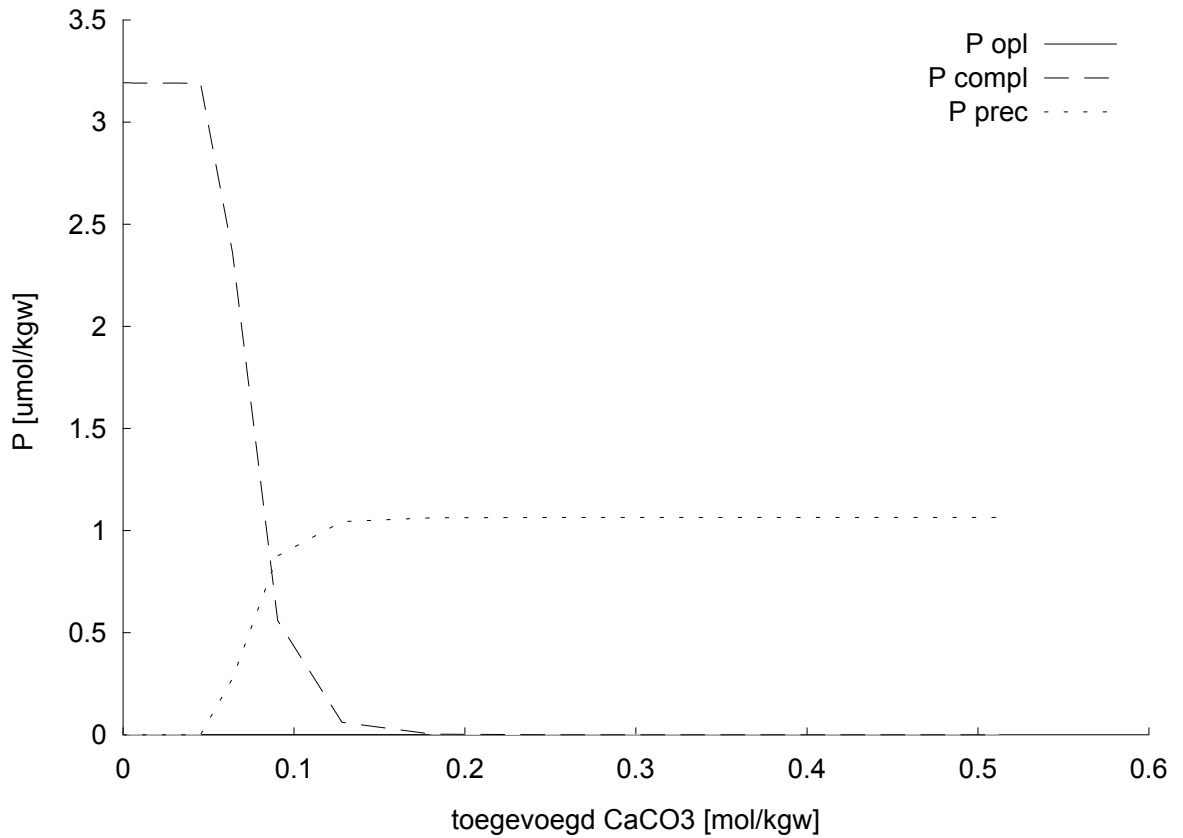
## MODELBEREKENINGEN AAN OPLOSSING MET BEHULP VAN PHREEQC

Via een modelberekening is semi-kwantitatief nagegaan op welke wijze de beschikbare hoeveelheid P wijzigt als functie van de pH. Voor de berekening is gebruik gemaakt van het model PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999). Er is uitgegaan van een systeem waarin P kan neerslaan als hydroxyapatiet-P, gecomplexeerd kan worden aan ijzerhydroxide, en waarin P in de oplossing voor kan komen. Vervolgens is P-meststof toegediend (1,7 mmol monocalciumfosfaat per kg bodemoplossing, dit komt overeen met 120 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>). Tot slot zijn verschillende hoeveelheden calciumcarbonaat toegediend (0,001 tot 0,5 mol aan 1 kg bodemoplossing). Er is hier geen rekening gehouden met de organische stof in de bodem.

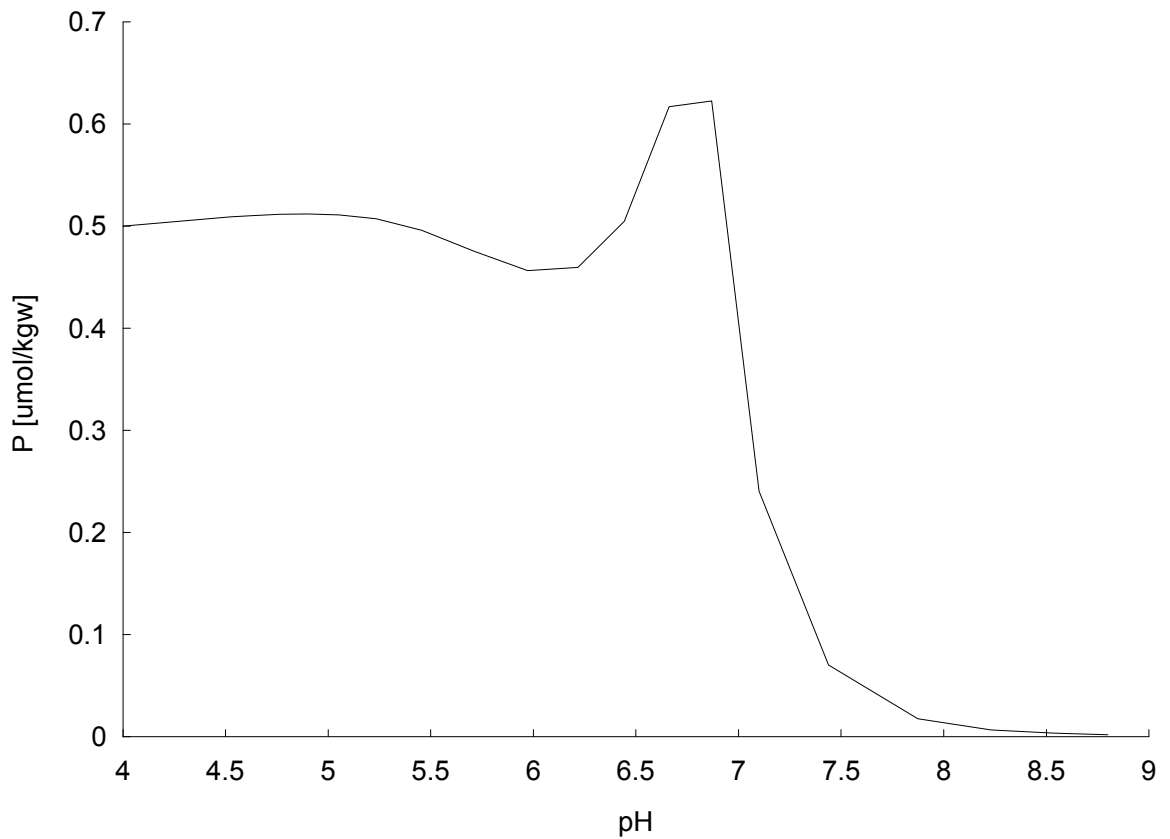
Zoals te verwachten was, stijgt de pH van de bodemoplossing bij toediening van kalk (figuur 4). Verder blijkt dat vanaf het toedienen van 0,05 mol kalk, hydroxyapatiet neerslaat (P prec. in figuur 5). Hierdoor neemt de hoeveelheid fosfaat in de bodemoplossing af. Tegelijkertijd vindt er desorptie plaats van fosfaat van de ijzeroxiden: de hoeveelheid gecomplexeerde P neemt af (P compl in figuur 5).



FIGUUR 4. Verloop van de pH in de bodemoplossing bij toediening van kalk.



FIGUUR 5. Verloop van hoeveelheid fosfaat in de bodem in de vorm van neergeslagen en gecomplexeerd P, bij toediening van kalk.



FIGUUR 6. Relatie tussen de hoeveelheid P in de bodemoplossing bij verhoging van de pH door bekalken.

Het nettoresultaat van de precipitatie en de desorptiereactie is te zien in figuur 6. Hieruit blijkt dat voor de situatie van de modelberekening, in het traject van pH 6,5 tot 7,0, de concentratie fosfaat in de bodemoplossing het hoogst is. Dit komt overeen met het traject pH-KCl 5,5-6,0.

## FOSFOR-PH-PROEVEN

*Internationale literatuur*

## Effect kalk

Uit de (internationale) wetenschappelijke artikelen die geschreven zijn over het effect van bekalking van grasland op de fosfaatbeschikbaarheid, blijkt dat kalk zowel voor toename als afname van extraheerbaar/beschikbaar P kan zorgen (Haynes, 1982). Hieronder staan enkele van de onderzoeken in chronologische volgorde samengevat.

Een voorbeeld van een onderzoek waarbij zowel toe- als afname van water-oplosbaar fosfaat (Pw) wordt geconstateerd, is dat van Hartikainen (1983). Het experiment werd uitgevoerd met twee zure gronden (tabel 7).

TABEL 7. Karakteristieken van de gronden (uit: Hartikainen, 1983).

Karakteristiek	fijn zand I	fijn zand II
klei, % (< 2µm)	22,4	22,5
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,8	4,8
organische stof. % d.s._	3,0	6,4
P-fracties. ppm		
NH <sub>4</sub> Cl-P	3,4	10,0
NH <sub>4</sub> F-P	107	321
NaOH-P	286	277
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -P	325	285
oxal. extr. Al. ppm	1081	1533
oxal. extr. Fe. ppm	2729	2870
oxal. extr. Mn. ppm	16,3	12,4

De gronden zijn vanuit het veld in porties van 450 g in plastic potten gedaan, en voorzien van 0, 0,6, 1,2 en 2,4 gram kalk. Daarnaast ontving de helft van de potten 40 mg P in de vorm van K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>. Vervolgens is na 4 en na 16 maanden de pH (tabel 8) en het water-extraheerbaar P bepaald (tabel 9).

TABEL 8. pH in water van de grondmonsters (uit: Hartikainen, 1983).

Kalk, g	pH			
	na 4 maanden		na 16 maanden	
	zonder P gift	met P gift	zonder P-gift	met P-gift
fijn zand I				
0	4,2	4,3	4,3	4,4
0,6	4,9	5,1	4,9	5,0
1,2	5,6	5,7	5,5	5,6
2,4	6,3	6,4	6,4	6,5
fijn zand II				
0	4,4	4,4	4,5	4,5
0,6	4,9	4,9	4,9	4,9
1,2	5,3	5,3	5,3	5,3
2,4	5,9	5,9	5,9	5,9



TABEL 9. Extraheerbaarheid van bodem-P en toegediend P in water (Uit: Hartikainen, 1983).

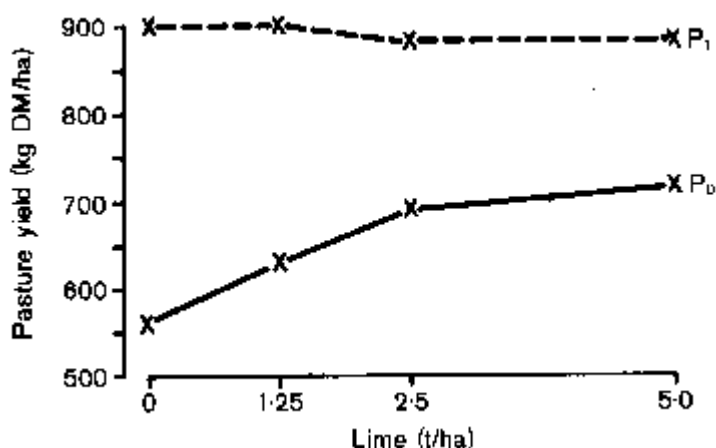
Kalk,g	P in bodem, ppm		% P uit gift	
	na 4 maanden	na 16 maanden	na 4 maanden	na 16 maanden
fijn zand I				
0	5,4	5,7	8,0	5,6
0,6	5,6	5,8	8,5	6,4
1,2	6,3	6,3	7,9	6,0
2,4	7,3	6,1	8,3	6,4
fijn zand II				
0	28,9	29,5	14,9	12,2
0,6	28,2	26,7	13,3	11,0
1,2	25,2	25,0	13,2	10,1
2,4	23,6	20,7	11,9	8,7

Verwacht werd dat pH-verhoging bij gronden rijk aan metaaloxide zou zorgen voor een toename van de Pw. De meetresultaten wijzen echter uit dat pH en de hoeveelheid water-oplosbaar P niet duidelijk gerelateerd zijn. (Bij 'fijn zand I' neemt de hoeveelheid beschikbaar P in de bodem toe, terwijl bij 'fijn zand II' het tegenovergestelde het geval is).

In 'fijn zand I' neemt de water-extraheerbare P-fractie licht toe. Bij toediening van 0,6 en 2,4 g kalk is na 4 maanden respectievelijk 8,5 en 8,3 procent van het toegediende P water-oplosbaar, terwijl dit 8,0 procent is zonder gebruik van kalk. Na 16 maanden is het effect van kalktoediening op de Pw-waarde relatief groter: 6,0 tot 6,4 procent is extraheerbaar, tegenover 5,6 procent bij de onbekalkte grond. Echter, in 'fijn zand II' neemt het Pw-getal af bij bekalken. Bij toediening van 0,6 tot 2,4 g kalk is na 4 maanden 11,9 tot 13,3 procent van het toegediende P water-oplosbaar, terwijl dit 14,9 procent is zonder gebruik van kalk. Na 16 maanden heeft de onbekalkte grond nog steeds de hoogste Pw waarde: 12,2 procent is extraheerbaar, tegenover 8,7 tot 11,0 procent bij de bekalkte gronden. Mogelijke verklaring hiervoor is dat door bekalken van 'fijn zand II' aluminiumpolymeren ontstaan (oxalaat-extraheerbaar Al is 1.533 ppm) die een sterke sorptiecapaciteit hebben, waardoor alles bij elkaar toch een daling van het Pw-getal kan ontstaan bij bekalken.

Adams (1984), neemt een afname (alhoewel niet significant) van de drogestofopbrengst van grasland waar, wanneer 60 kg P ha<sup>-1</sup> gegeven wordt en calciumcarbonaat in toenemende (0, 4, 8 ton ha<sup>-1</sup>) mate toegediend wordt (initiële pH grasland tussen 4,7 en 5,5). Bij alleen een gift van 60 kg P ha<sup>-1</sup> was de opbrengst van het grasland 13,6 ton ha<sup>-1</sup>. Bij een gift van 60 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup> in combinatie met 8 ton ha<sup>-1</sup> kalk, was de opbrengst 13,4 ton ha<sup>-1</sup>. De hoeveelheid extraheerbaar P (ammoniumacetaat, gecorrigeerd voor bulkdichtheid: in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) neemt wel toe met toenemende kalkgift. Adams vindt dan ook geen correlatie tussen extraheerbaar P en de drogestofopbrengst van het grasland.

Mogelijke oorzaak voor het achterwege blijven van een effect van bekalking op de beschikbaarheid van fosfaat en de opbrengst van het grasland, is dat fosfaat niet de beperkende factor was voor de grasgroei. De initiële fosfaattoestand van de gronden zijn echter niet beschreven in het artikel.



FIGUUR 7. Gemiddelde seizoensopbrengst van grasland (pasture yield, in kg droge stof ha<sup>-1</sup>) bij twee verschillende behandelingen met fosfaat. P<sub>0</sub> = 0 kg P ha<sup>-1</sup>, P<sub>1</sub> = 50 kg ha<sup>-1</sup>. Op de horizontale as staat de hoeveelheid kalk die is toegevoegd (lime, in ton ha<sup>-1</sup>) (Uit: Mansell *et al.*, 1984).

Mansell *et al.* (1984) definiëren het P-besparend effect van kalk als volgt: het effect waarbij het verschil in opbrengst (droge stof in ton ha<sup>-1</sup>) tussen grasland voorzien van fosfaatgift en bekalkt grasland kleiner wordt naarmate er meer kalk gebruikt wordt. Dit effect is te zien in figuur 7. Op de y-as staat de gemiddelde opbrengst van één seizoen (een jaar heeft 4 seizoenen). Op de x-as staat de hoeveelheid calciumcarbonaat die is toegevoegd in ton ha<sup>-1</sup>. Om deze figuur verder uit te leggen is wat voorkennis nodig.

Met behulp van statistiek is het mogelijk om te berekenen in hoeverre kalk en fosfaat op elkaar reageren. Dit wordt kalk X P interactie genoemd. Als kalk X P negatief is, dan neemt de invloed van fosfaatgift op de opbrengst af bij toenemende kalkgift. De consequentie van een negatieve interactie tussen kalk en P is dat bekalking een deel van de opbrengstderving, die ontstaat bij het nalaten van de fosfaatgift, teniet doet. Vandaar de naam P-besparend effect. Mansell *et al.* hebben onderzoek gedaan aan dit P-besparend effect voor 25 verschillende grondsoorten (kleigronden, zandgronden, veengronden en vulkanische gronden in het traject pH 5,4 tot 6,0) onder grasland in Nieuw-Zeeland. Uit de resultaten blijkt dat het P-besparend effect van kalk (en daarmee dus de pH) zeldzaam en onvoorspelbaar is.

#### Effect pH

Welp *et al.* (1983) meten in een aantal bodems die sterk variëren in pH, organischestofgehalte en kleigehalte, dat het Pw-getal op z'n laagst is tussen pH 5 en 6, terwijl op basis van de oplosbaarheidsproducten van Ca-, Fe- en Al-fosfaten dan de hoogste fosfaatconcentratie in de bodemoplossing valt te verwachten. Verder onderzoek door Welp *et al.* wees uit dat het fosfaat vooral voorkomt als geadsorbeerd anorganisch en organisch fosfaat, wat vooral beschikbaar komt bij lagere en hogere pH's (toename organische stof in oplossing, en omwisseling fosfaat met OH<sup>-</sup>).

Nätscher & Schwertmann (1987) vinden een afname van het Pw-getal bij toename van pH(H<sub>2</sub>O) van 5 naar 7. Mogelijke verklaring is het hoge kleigehalte van de bodem, waardoor via het aanwezig zijn van Ca-ionen fosfaat wordt gebonden.

Hartikainen & Yli-Halla (1996) tonen aan dat in zure gronden (pH 5 tot 6), waarin fosfaat vooral gebonden zit aan ijzer- en aluminiumoxiden en in organische stof, het verhogen van de pH door het toedienen van ureum, leidt tot een hogere concentratie van koolstof in de bodemoplossing (DOC) en water-oplosbaar fosfor (Pw-getal), dan wanneer CaOH<sub>2</sub> gebruikt wordt. Ook wanneer, na 8 tot 15 dagen, de pH weer daalt door nitrificatie, blijft de concentratie water-extraheerbaar fosfaat hoger dan de uitgangswaarde van de bodem.

### Samenvattend

Samenvattend kan op basis van de internationale literatuur gezegd worden dat het bekalken van grasland een positief effect kan hebben op de beschikbaarheid van fosfaat. Of de toename in P-beschikbaarheid ook werkelijk optreedt na bekalken hangt ook af andere eigenschappen van de grond, zoals gehalte aan ijzer- en aluminiumoxiden. Welke gronden de grootste kans hebben op een positief effect van bekalken op de beschikbaarheid van fosfaat, is op basis van de internationale literatuur niet te zeggen, omdat de karakteristieken van de onderzochte gronden vaak gebrekkig of aan de hand van onbekende lokale classificatiesystemen beschreven zijn.

### *De Nederlandse situatie*

In Nederland komen zeer verschillende bodemtypen voor, met verschillende gehalten aan bijvoorbeeld ijzeroxiden en organische stof. De reactie bij pH-verhoging op de fosfaatbeschikbaarheid van deze bodems kan daarom variëren.

Uit een verkennend veldonderzoek op bouwland naar de veranderingen in het Pw-getal onder invloed van bekalking, blijkt dat op humushoudende zand- en dalgronden in de regel bekalking het gehalte aan met water geëxtraheerd fosfaat verlaagt (Van der Paauw, 1950; Prummel, 1974; Wilting, 1996). Op zandgronden neemt het Pw-getal gemiddeld af van 35 naar 21, op dalgrond van 48 naar 32, bij een pH-KCl-verhoging door bekalking van 4,2 tot 5,2. Een verklaring voor deze daling van het Pw-getal wordt gezocht in de vorming van complexen tussen organische stof en fosfaat. Duidelijke aanwijzingen voor deze verklaring ontbreken echter. Recentelijk heeft het IRS-onderzoek (Wilting, 1996) gedaan naar de invloed van pH op de opbrengst en kwaliteit van akkerbouwgewassen op zand- en dalgrond. In 1984 zijn daartoe op 5 locaties 5 pH-trappen aangelegd tussen 4,5 en 6,5. In de navolgende jaren zijn deze gehandhaafd. In de tweede fase van dit onderzoek, tussen 1991 en 1994, is gekeken naar de relatie tussen de pH en het Pw-getal. In het algemeen daalde het Pw-getal bij het toenemen van de pH-KCl (bijlage 4). In deze jaren is alleen op locatie Eext (bijlage 3) bekalkt. Opgemerkt moet worden dat deze daling sterker lijkt te zijn bij pH-KCl tussen 5,5 en 6,5 dan tussen 4,5 en 5,5. Zowel van de proeven Van der Paauw, Prummel als Wilting is niet bekend of een dalend Pw-getal ook leidt tot een lager P-AL-getal.

De gevonden afname van het Pw-getal is verrassend gezien de eigenschappen van zandgronden. Zandgronden kunnen, afhankelijk van hun geschiedenis, een organischestofgehalte hebben van 0 tot 20 procent. De meeste zandgronden liggen in stuifzand- en dekzandgebieden en bevatten weinig organische stof. Enkeerdgronden hebben een hoog organische-

stofgehalte, omdat hier een paar eeuwen lang stalmest op aan is gebracht (potstalsysteem). Het effect van bekalken op de beschikbaarheid van organische fosfor is naast het organischestofgehalte ook afhankelijk van de uitgangspH. De meeste zandgronden zijn (licht) zuur (met uitzondering van de kalkrijke zandgronden in de kustgebieden, deze laatste groep wordt hier gemakshalve achterwege laten). Men zou daarom verwachten dat verhoging van de pH door bekalken leidt tot toename van de mineralisatie van organische stof (voor zover deze aanwezig is) en ook tot toename van de hoeveelheid beschikbaar P afkomstig uit de organische stof. Bovendien bevatten zandgronden vaak ijzeroxiden, al kunnen de gehalten laag zijn wanneer uitspoeling heeft plaatsgevonden. Deze ijzeroxiden kunnen onder neutrale en zure omstandigheden middels hun positieve randgroepen fosfaationen adsorberen. Wanneer door bekalking de pH van de bodem stijgt, verliezen de ijzeroxiden (een deel van) hun positieve lading, en vindt er desorptie plaats van de fosfaationen. Ook hierdoor zou men verwachten dat de beschikbaarheid van fosfaat toeneemt bij bekalken. De analyses van gegevens van praktijkcijferbedrijven door Den Boer *et al.* (2001) laten (wel) zien dat zandgronden een goede kandidaat zijn voor bekalking ten behoeve van verbeterde fosfaatbeschikbaarheid.

Oude rivierklei heeft een relatief hoog percentage klei in de bodem. Kleideeltjes hebben een negatieve lading die wordt gecompenseerd door positieve ionen die zich uit de oplossing naar het kleioppervlak begeven (zie ook bladzijde 17). Wanneer calciumcarbonaat aan de bodem wordt toegevoegd, dan zal een deel van het calcium aan het uitwisselingscomplex gaan zitten. De positief geladen calciumionen kunnen op hun beurt als brug fungeren tussen de negatief geladen kleideeltjes en de fosfaationen. Hierdoor zou men verwachten dat bekalking van kleirijke gronden leidt tot toename van fosfaatadsorptie en verlaging van de hoeveelheid beschikbaar fosfaat. Hetzelfde geldt voor gebieden met jonge rivierklei en oude zeeklei. Uit het eerder genoemde onderzoek van Prummel (1974) blijkt echter dat op zure zeekleigronden in de regel bekalking het gehalte aan met water geëxtraheerd fosfaat verhoogt (van 16 tot 26 bij een pH-KCl-stijging van 4,6 tot 6,5). De stijging van het P<sub>w</sub>-getal door bekalking ging op de zeekleigronden veelal samen met een geringere fosfaatbehoefte van de verbouwde gewassen (proeven op bouwland).

Jonge zeeklei is van nature klei- en kalkrijk. Toevoeging van extra kalk zal waarschijnlijk leiden tot enerzijds bevordering van adsorptie van fosfaat aan klei, en anderzijds bevordering van de vorming van calciumfosfaten. Beide processen beperken de hoeveelheid beschikbaar fosfaat. Kenmerkend voor veengronden is het hoge organischestofgehalte en de vrij lage pH. Bekalking zal waarschijnlijk leiden tot bevordering van de mineralisatie van organische stof en het in oplossing komen van mogelijk aanwezige aluminiumfosfaten. Beide processen kunnen bijdragen tot een stijging van de beschikbare hoeveelheid fosfaat in de bodemoplossing.

Op basis van de theorie zoals beschreven op pagina 15 en verder valt te verwachten dat pH-verhoging vooral op zand- en veengronden kan bijdragen aan toename van beschikbaar fosfaat (tabel 10). Deze redeneringen worden echter maar ten dele onderschreven door de beperkte pot- en veldproeven die beschikbaar zijn. Nader onderzoek naar de relatie tussen bodemtype, pH-verhoging en fosfaatbeschikbaarheid is nodig om hierin meer duidelijkheid te krijgen.

TABEL 10. Karakteristieken en te verwachten reactie van verschillende bodemtypen in Nederland bij verhoging van de pH.  
 + + = in grote mate aanwezig, + = aanwezig, - = niet of nauwelijks aanwezig in de bodem.

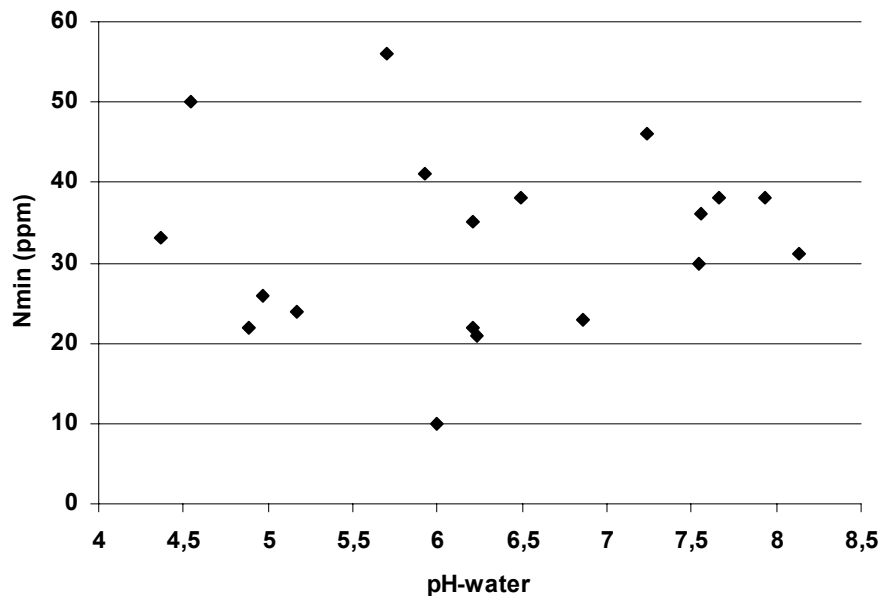
Bodemtype/ landschap	klei	organische stof	Fe/Al- oxiden	CaCO <sub>3</sub>	effect pH-verhoging op beschikbaar fosfaat		toelichting theoretische beredenering
					uit theorie beredeneerd	praktijk	
oude rivierklei	+ / + + textuur varieert sterk	- vrij laag (2-3%)	- door verwerking	- ontkalkt	↓	↑ na een jaar Pw 30% hoger dan in onbekalkte grond (Prummel, 1974)	meer adsorptie en precipitatie van fosfaat
jonge rivierklei	+ / + + textuur varieert sterk	- vrij laag	- / +	- / + kalkarm	↓		meer adsorptie en precipitatie van fosfaat
zand	-	- tot + (0-20%) varieert door pot- stal systeem	+ / -	- kalkarm of kalkloos	↑ (↓)	↓ (Van der Pauw, 1950) ↓ (Prummel, 1974) ↑ (Den Boer, 2001)	toename negatieve lading ijzeroxiden, meer desorptie van fosfaat, meer in oplossing; tegelijk toename Ca, minder desorptie
oude zeeklei	+	-	?	-	↓	↑ (Prummel, 1974)	meer adsorptie en precipitatie van fosfaat
jonge zeeklei	+	+	?	+ +	↓		meer adsorptie en precipitatie van fosfaat
veen	+ klei op veen - veen op zand	+ +	?	-	↑		mineralisatie wordt bevorderd

## NEVENEFFECTEN VAN BEKALKEN

*N-mineralisatie*

## Relatie pH (pH-water) en N-mineralisatie

Algemeen wordt aangenomen dat de pH van de bodem invloed heeft op de mate van N-mineralisatie. Bij lage pH zou de activiteit van bacteriën geremd worden, waardoor de afbraak van organische stof en het vrijkomen van minerale stikstof afneemt. Uit divers onderzoek blijkt echter dat er geen aantoonbaar verband is tussen de pH van een bodem en de hoeveelheid gemineraliseerde N. Cornfield (1952) onderzocht in een incubatie-experiment de relatie tussen de pH en de hoeveelheid gemineraliseerde N van 19 verschillende bodems in de pH-range 4,4 tot 8,1. Na 21 dagen incubatie was er geen aantoonbaar verband (figuur 8).



FIGUUR 8. Relatie tussen de pH en de hoeveelheid gemineraliseerde N (ppm) na incubatieproef van 21 dagen (Cornfield, 1952).

Dancer et al.(1973) realiseerden door verschillende kalkgiften op hetzelfde perceel een pH-range van 4,7 tot 6,6. In een incubatiestudie een jaar later was er na 35 dagen geen verschil in hoeveelheid gemineraliseerde N tussen de verschillende pH's (tabel 11).

TABEL 11. Relatie tussen pH-water en hoeveelheid gemineraliseerde N (ppm) na incubatieperiode van 35 dagen (Dancer, 1973).

pH (water)	Nmin, ppm
4,7	41
5,3	38
6,0	40
6,3	49
6,6	42

Nyborg & Hoyt (1978) onderzochten van 40 bodems met een pH-range van 4,0 - 5,6 de relatie tussen de pH (pH-water) en de gemineraliseerde hoeveelheid N van 40 bodems. Na 120 dagen was er geen duidelijk waarneembaar verband. Kanttekening bij dit onderzoek is dat de N-opname van een gewas haver als maatstaf werd genomen voor de hoeveelheid gemineraliseerde N. Effecten van de pH op de beschikbaarheid van andere nutriënten en op de wortelgroei kunnen van invloed zijn op de hoogte van deze opname. Ook in onderzoek van Curtin et al. (1998) was er geen aantoonbaar verband tussen de pH (pH-water) van een bodem en de hoeveelheid gemineraliseerde N. Curtin et al. (1998) bestudeerden in totaal 61 bodems in de pH-range van 5,1-7,9.

Er is geen onderzoek beschikbaar waarin een duidelijk verband tussen de (onverstoorde) pH en de hoeveelheid gemineraliseerde N aangetoond wordt. Het ontbreken van een relatie tussen de (evenwichts) pH en de hoeveelheid gemineraliseerde N wordt door Alexander (1980) toegeschreven aan de brede range aan schimmels, actinomyceten en bacteriën welke actief zijn in de bodem. Hierdoor worden bij een daling van de pH de niet-tolerante soorten makkelijk vervangen door tolerante soorten.

Een geforceerde verhoging van de pH door bekalking leidt in het algemeen wel tot een toename van de hoeveelheid gemineraliseerde N. In het eerder genoemde onderzoek van Cornfield (1952) had bekalking van de onderzochte bodems met 1 procent  $\text{CaCO}_3$  (op basis van drooggewicht) een duidelijke toename van de hoeveelheid gemineraliseerde N tot gevolg (tabel 12). Bij iedere individuele bodem was er sprake van een toename van de hoeveelheid gemineraliseerde N; gemiddeld over alle bodems werd er 45 procent meer N gemineraliseerd.

TABEL 12. Effect van bekalking op gemineraliseerde hoeveelheid N na een incubatieperiode van 21 dagen (Cornfield, 1952).

Bodem	pH	Nmin, ppm	
		geen bekalking	bekalking 1% $\text{CaCO}_3$
1	5,93	41	56
2	7,66	38	48
3	4,54	50	73
4	6,49	38	50
5	4,37	33	65
6	7,54	30	33
7	6,86	23	29
8	4,88	22	69
9	7,93	38	53
10	8,13	31	39
11	6	10	23
12	6,21	22	43
13	4,97	26	50
14	5,17	24	40
15	7,24	46	48
16	5,7	56	75
17	6,23	21	31
18	6,21	35	45
19	7,56	36	43
gemiddeld	6,30	33	48

Ook in het onderzoek van Nyborg & Hoyt (1978) had bekalking effect op de hoeveelheid gemineraliseerde N. Gemiddeld verdubbelde deze na een incubatieperiode van 120 dagen. Een kanttekening bij dit onderzoek is dat de hoeveelheid gemineraliseerde N gemeten werd aan de totale N-opname door een gewas haver. Het effect van bekalken was het hoogst in het 1<sup>e</sup> jaar en nam ieder volgend jaar af. Na 3 jaar was er nog steeds sprake van een positief effect van 7-10 kg N ha<sup>-1</sup>. In het onderzoek van Dancer et al. (1973) was er echter na 1 jaar geen effect (meer) van bekalking. Curtin et al. (1998) vonden een positief effect van bekalking op de hoeveelheid gemineraliseerde N na 100 dagen. Gemiddeld over twee bodems was bij de hoogste kalkgift de hoeveelheid gemineraliseerde N 122 procent hoger.

Afwijkende resultaten werden gevonden door Weier & Gilliam (1986).

Bekalking van 6 bodems met een pH-range van 3,4-4,5 tot een pH van 7-8 had bij 5 van de 6 bodems geen duidelijke toename van de hoeveelheid gemineraliseerde N tot gevolg. De gevolgde methode en de rapportage van dit onderzoek zijn echter onduidelijk.

De toename van N-mineralisatie na bekalking wordt in het algemeen toegeschreven aan een grotere activiteit van de microbiële biomassa en veranderingen in de compositie van die biomassa. Curtin et al. (1998) suggereerden echter dat in hun onderzoek het effect van bekalking eerder te wijten was aan een verhoogde beschikbaarheid van substraat dan aan een gunstig effect op de microbiële biomassa. Zij concludeerden dat de omstandigheden voor de bekalking niet persé ongunstig waren voor microbiële activiteit. Daarnaast concludeerden ze dat verhoging van de pH door bekalking leidde tot een verdubbeling van de concentratie opgeloste organische stof in de bodemoplossing. Deze opgeloste organische stof is makkelijk afbreekbaar voor micro-organismen en mobiel in de bodem. Er was een goede relatie tussen deze concentratie en de hoeveelheid gemineraliseerde N ( $r = 0,95$ ). Een positief effect van bekalking op de concentratie opgeloste organische stof in de bodemoplossing was eerder al geconstateerd door Curtin & Smillie (1983). Zij stellen dat de N-mineralisatie terugkeert naar het oude niveau, als de extra vrijgekomen oplosbare organische stof weer afgebroken is. Dit zou volgens hen dan verklaren waarom het effect van bekalking vaak tijdelijk is.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de (evenwichts-)pH geen invloed heeft op de hoeveelheid gemineraliseerde N van een bodem, en dat bekalking (verstoring van het evenwicht) over het algemeen leidt tot een (tijdelijke) toename van de N-mineralisatie.

### *Bodemstructuur*

In het algemeen leidt pH-verhoging tot verbetering van de bodemstructuur (Janssen & Van Beusichem, 1993). Een van de redenen is dat door bekalking de activiteit van micro-organismen toeneemt. Deze produceren kitstoffen die aggregaatvorming stimuleren. Ook kunnen opgeloste calciumionen, bij aanwezigheid van kleideeltjes, bruggen vormen tussen klei- en humusmoleculen en daardoor aggregaten vormen. Voorts leidt de verhoging van de electrolytconcentratie in de bodemoplossing tot toename in zogenaamde plaat-rand-verbindingen tussen kleideeltjes, welke ook een goede structuur bevorderen. Daarnaast leidt bekalking tot een betere wortelontwikkeling van het gewas, wat de samenhang tussen bodemdeeltjes weer bevordert.

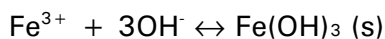


Deze factoren kunnen in principe bijdragen tot een verbetering van de opname van P door gras.

### *Spoorelementen*

#### IJzer

Het gehalte aan oplosbaar ijzer (Fe) in een bodem is bijzonder laag in vergelijking met de totale hoeveelheid ijzer die aanwezig is in een bodem. Oplosbare vormen van ijzer zijn  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{FeOH}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{2+}$ . De oplosbaarheid van ijzer wordt voornamelijk bepaald door de oplosbaarheid van Fe(III)oxiden.



Het evenwicht van deze reactievergelijking ligt naar rechts (vast ijzerhydroxide) en is sterk pH-afhankelijk. De activiteit van  $\text{Fe}^{3+}$  daalt bij stijging van de pH. Het bekalken van grond zal dan ook kunnen leiden tot een tekort aan ijzer. Bovendien bemoeilijkt een hoge concentratie van het  $\text{HCO}_3^-$  -ion de opname van  $\text{Fe}^{3+}$  door de plantenwortel (Mengel & Kirkby, 1987).

#### Mangaan

De belangrijkste vormen waarin mangaan (Mn) voorkomt in de bodem, zijn  $\text{Mn}^{2+}$  - en Mn-oxiden waarin Mn voorkomt als drie- of vierwaardig ion. De hoeveelheid Mn die in een bodem aanwezig is kan sterk variëren: tussen de 200 en 3.000 ppm. Het divalente ion kan gemakkelijk geadsorbeerd worden door kleimineralen en organische stof, en is de belangrijkste vorm waarin Mn voorkomt in de bodemoplossing. De cyclus van Mn wordt gestuurd door oxidatie-reductie-reacties. Op hun beurt worden de oxidatie- en reductie-reacties beïnvloed door factoren als de bodem-pH, het gehalte aan organische stof, de (micro)biologische activiteit en het vochtgehalte.

Onder anaërobe omstandigheden domineren reductieprocessen en is de concentratie  $\text{Mn}^{2+}$  in de bodem hoog. Ook is de concentratie Mn hoog onder zure omstandigheden: de hoeveelheid Mn in de bodem neemt in 100-voud af bij iedere toename in pH-eenheid. De beschikbaarheid van mangaan kan dan ook ontoereikend zijn voor planten wanneer de bodem een hoge pH heeft. Bekalken heeft een negatief effect op de Mn-beschikbaarheid (Curtin & Smillie, 1983). Ook bevordert een hoge bodem-pH de vorming van complexen tussen organische stof en mangaanionen. Het zijn dan ook vooral organischestofrijke gronden met hoge pH die een hoge kans hebben op mangaangebrek (Mengel & Kirkby, 1987).

Tabel 13 toont een voorbeeld uit de praktijk waarbij het effect van bekalken op de opname van Mn is bepaald voor wintertarwe. Toevoeging van kalk leidt tot toename in opbrengst van 2,78 naar 5,78 ton  $\text{ha}^{-1}$ . Tegelijkertijd neemt de opname van Mn af van 0,62 naar 0,38  $\text{kg ha}^{-1}$ .

TABEL 13. Effect van het verhogen van de bodem-pH op de mangaan-opname van wintertarwe. Bodemtype: lemige klei in St Albans, Engeland (Uit: Wild, 1988).

Kalk toegevoegd, ton ha <sup>-1</sup>	pH grond	opbrengst, ton ha <sup>-1</sup>	opname Mn, kg ha <sup>-1</sup>
0	4,3	2,78	0,62
4,8	4,7	4,12	0,61
9,4	5,3	5,25	0,57
14,1	5,8	5,65	0,48
18,8	6,5	5,78	0,38

### Zink

In de bodem komt zink (Zn) vooral in minerale vorm voor, in hoeveelheden van 10 tot 300 ppm, afhankelijk van de samenstelling van het moedermateriaal. De hoeveelheid Zn<sup>2+</sup> in de bodemoplossing is verhoudingsgewijs laag: tussen de  $3 \times 10^{-8}$  en  $3 \times 10^{-6}$  M. De oplosbaarheid van zink is laag in gronden met hoge pH, vooral wanneer CaCO<sub>3</sub> aanwezig is (Mengel & Kirkby, 1987). Zn<sup>2+</sup>-ionen kunnen geadsorbeerd worden door kleimineralen en organische stof. Gemiddeld bevindt 60 procent van de oplosbare Zn zich in zink-organischestofcomplexen. De adsorptieprocessen vinden vooral plaats bij hoge pH. Bekalken kan dan ook leiden tot een tekort aan zink bij het gewas (bijvoorbeeld gras). Voorts blijkt uit de literatuur dat hoge niveaus van fosfaat kunnen leiden tot Zn-gebrek. Een fosfaatoverschot leidt in veel planten tot een afwijkend metabolisme, waardoor Zn minder goed kan worden opgenomen en verwerkt (Olsen, 1972; Curtin & Smillie, 1983).

### Borium

Borium speelt een belangrijke rol bij de stofwisseling van gewassen, zoals bij de synthese van suikers. Het totale gehalte aan borium in de bodem ligt gemiddeld tussen de 20 en 200 ppm. Hiervan is het grootste deel niet beschikbaar voor het gewas: slechts 0,4 tot 5 ppm is opneembaar. Borium in oplossing komt met name voor als B(OH)<sub>3</sub>. Dit molecuul gedraagt zich als een Lewis-zuur: het accepteert OH<sup>-</sup> volgens de volgende reactie:



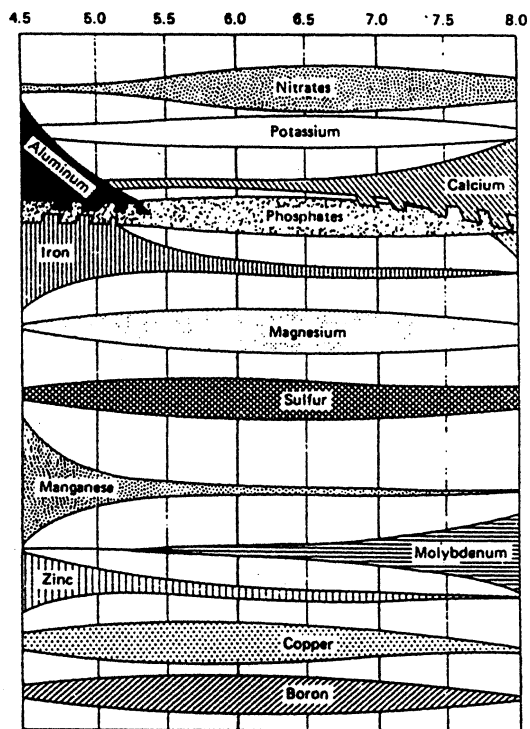
De hoge pK geeft aan dat het anion alleen voorkomt bij hoge pH-waarden. B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> wordt geadsorbeerd door sesquioxiden en kleimineralen. De adsorptie neemt toe bij stijgende pH. Ook kan B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> gebonden worden door organische stof (Mengel & Kirkby, 1987).

Zure, uitgeloopte gronden (pH < 5) bevatten weinig borium. Ook gronden met een hoge pH, zoals kalkrijke of recent bekalkte gronden (pH > 7) hebben lage boriumgehalten. In het algemeen is de beschikbaarheid optimaal tussen pH 5 en 7.

Gewassen verschillen sterk in hun behoefte aan borium. Zo zijn klavers veel gevoeliger voor boriumdeficientie dan raagrass (Sherrell, 1983a en 1983b).

Het bovenstaande wordt ook geïllustreerd door figuur 9: bij pH > 5 wordt de opname en verwerking door de plant van vooral de elementen ijzer, mangaan,

en zink sterk beperkt. Vertaald naar pH-KCl betekent dit dat waarden boven de 6 onaantrekkelijk zijn vanwege risico's met betrekking tot de sporelementenvoorziening.



FIGUUR 9. Beschikbaarheid van nutriënten in afhankelijkheid van de pH-H<sub>2</sub>O.

## DISCUSSIE

De aanleiding tot deze studie was het recent verschenen onderzoek van Den Boer et al. (2001) naar het mogelijke effect van de pH van de bodem op de beschikbaarheid van fosfaat. Uit het onderzoek bleek dat om een bepaald P-AL-getal te handhaven, zandgrond het hoogste P-overschot nodig had. Het benodigd P-overschot op oude zeeklei, rivierklei en löss was vergelijkbaar. Veen en jonge zeeklei konden met een lager overschot volstaan. Volgens Den Boer et al. zijn de verschillen tussen zand, oude zeeklei, rivierklei en löss terug te voeren op een verschil in pH-niveau van de grond. Uit statistische analyse van de gegevens bleek dat het benodigde overschot om een bepaald P-AL-getal te handhaven negatief gecorreleerd is met de pH. Bij een stijging van de bodem-pH met één eenheid zou er op jaarbasis 35-40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> minder nodig zijn om een bepaald fosfaatiniveau (P-AL-getal) te handhaven. In principe betekent dit dat er minder fosfaathoudende meststof nodig is voor een optimale fosfaatvoorziening van gewassen. De zandgronden uit het onderzoek hebben een gemiddelde pH van 5,3, rivierklei en oude zeeklei van 5,9.

Naar aanleiding van bovenstaand onderzoek is in dit rapport aan de hand van een literatuurstudie in brede zin bekeken in hoeverre de fosfaatbeschikbaarheid afhankelijk is van de pH, en in engere zin of de resultaten van Den Boer et al. bevestigd konden worden door bestaande literatuur.

Fosfor komt in de bodemoplossing door mineralisatie van organische stof, door het oplossen van kristallijne fosfaten en door desorptie van fosfaationen die op reactieve oppervlakken zitten. Bekalken kan de mineralisatie van organische stof, en daarmee het vrijkomen van fosfaat, vooral bevorderen in zure gronden. Of bekalken leidt tot het oplossen van kristallijne fosfaten hangt vooral af van de typen fosfaathoudende mineralen die voorkomen. IJzer- en aluminiumfosfaten lossen op bij pH-verhoging. Daarentegen slaan calciumfosfaten neer bij pH-verhoging. Adsorptie- en desorptieprocessen zijn ook gevoelig voor de pH van de bodem. Bij pH-verhoging vindt bij ijzer- en aluminiumhydroxiden desorptie van fosfaat plaats en stijgt de hoeveelheid fosfaat in de oplossing. De mate van stijging hangt af van de hoeveelheid sulfaat en calcium in de bodemoplossing, beide kunnen de desorptieprocessen beperken. Kleimineralen kunnen middels Ca<sup>2+</sup>-ionen fosfaat adsorberen, waardoor de concentratie fosfaat in oplossing daalt. Het netto effect van bovenstaande processen op de hoeveelheid gemakkelijk beschikbaar fosfaat is afhankelijk van het bodemtype waarop het grasland zich bevindt. Met name de uitgangspH van de bodem, de gehalten klei en metaalhydroxiden spelen een rol. Wanneer globaal de karakteristieken van de Nederlandse gronden in ogenschouw worden genomen, kan afgeleid worden dat het bekalken van grasland waarschijnlijk vooral op zand- en veengronden kan leiden tot een toename van de beschikbare hoeveelheid fosfaat. Fosfaat-pH-proeven, zoals beschreven in de (internationale) literatuur, gaven echter geen eenduidig antwoord op de vraag of bekalken de beschikbaarheid van fosfaat doet toenemen. In een aantal gevallen wordt zelfs gevonden dat de beschikbaarheid van fosfaat afneemt.

Er lijkt dus een tegenstelling te zijn tussen de bevindingen in dit rapport en de resultaten van Den Boer et al. (2000). Mogelijk is een verklaring hiervoor dat bij bekalken niet alleen de pH verandert, maar dat door de aanwezigheid van Ca er (tijdelijk) ook Ca-P-precipitatieproducten ontstaan, waardoor de

beschikbaarheid van P afneemt. Aanvankelijk is de Ca-concentratie in de bodem erg hoog, maar door gewasopname en verplaatsing (uitloging) van Ca daalt deze. Hierdoor worden op zandgronden ijzer- en aluminiumfosfaten weer de dominante verbindingen die de P-beschikbaarheid bepalen. Indien de pH door bekalking na enkele jaren nog steeds op een hoger peil ligt kan de P-beschikbaarheid dus toenemen ten opzichte van de uitgangssituatie. Een aanwijzing hiervoor zijn ook de bevindingen van Hartikainen en Yli-Halla (1996). Op zure grond hebben zij een pH-verhoging teweeggebracht door te bemesten met ureum. Dit leidde tot een hoger P<sub>w</sub>-getal. Den Boer et al. hebben de pH gemeten in grasland dat in het algemeen niet vrij recent was bekalkt. Een direct negatief effect van Ca op de P-beschikbaarheid is naar verwachting dan veel minder aanwezig.

In de literatuur zijn vrij weinig situaties aangetroffen die representatief zijn voor de Nederlandse situatie. Bovendien zijn belangrijke eigenschappen, zoals klei- en metaalhydroxidengehalten, van de bij de experimenten gebruikte gronden maar mondjesmaat beschreven, terwijl deze factoren essentieel zijn om het aan- of afwezig zijn een bekalkingseffect te verklaren. In veel proeven is het P<sub>w</sub>-getal bepaald, echter voor grasland wordt in Nederland het P-AL-getal gebruikt (deze is veelal een ordegrootte verschillend). Op basis van de literatuur moet dan ook geconstateerd worden dat er te weinig experimentele gegevens zijn die de bevindingen van Den Boer et al. kunnen staven.

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### *Conclusies*

- Het opnemen van kunstmestfosfaat en bemesten volgens advies zal op veel melkveebedrijven leiden tot een overschrijding van de Minas-norm voor fosfaat.
- Op basis van deze (literatuur)studie kunnen de bevindingen van Den Boer et al., dat een hogere pH leidt tot een hogere P-beschikbaarheid, niet eenduidig bevestigd worden. Daarbij moet worden opgemerkt dat er maar weinig experimentele gegevens zijn van grasland waarbij de beschikbaarheid gebaseerd wordt op het P-AL-getal.
- Er is aanvullend experimenteel onderzoek nodig voor de Nederlandse situatie op zand- en veengrasland om een eenduidig antwoord te geven op de vraag of een hogere pH leidt tot een hogere P-beschikbaarheid.
- Bekalken leidt tot een tijdelijke verhoging (half jaar tot 3 jaar) van de N-mineralisatie.
- De pH heeft invloed op de beschikbaarheid van fosfaat.
- Het verhogen van de pH om de P-beschikbaarheid te verhogen leidt tot tegenstrijdige resultaten.

### *Aanbevelingen*

De uitgevoerde studie geeft aan dat er mogelijk perspectief is voor het bekalken van grasland om de P-beschikbaarheid te verhogen. Aanvullende experimenten zijn nodig om na te gaan onder welke (bodem)omstandigheden dit te verwachten is. Van belang is daarbij om een groot aantal gronden tegelijk te bestuderen en daarbij P-beschikbaarheid bepalende eigenschappen als pH en klei- en metaalhydroxiden en de daarmee samenhangende adsorptiecapaciteit te bepalen om eventuele verschillen in effecten te herleiden. Dit kan met behulp van incubatiestudies en potproeven. Een optie daarbij is ook om teststroken op een groot aantal praktijkpercelen aan te leggen en daarbij de gewassamenstelling en het P-AL-getal van de teststrook en het omringende perceel te monitoren gedurende enkele jaren.

### *Dankwoord*

De auteurs bedanken Chris van Uffelen voor het modelleren in PHREEQC.

## REFERENTIES

- Adams SN (1984) Some effects of lime, nitrogen and soluble and insoluble phosphate on the yield and mineral composition of established grassland. *Journal of Agricultural Sciences* 102, 219-226.
- Adams F & Martin JB (1984) Liming effects on nitrogen use and efficiency. In: Hauck RD (ed.) *Nitrogen in Crop Production*. American Society of Agronomy, Madison, 417-426.
- Alexander M (1980) Effects of acidity on micro-organisms and microbial processes in soil. In: Hutchinson TC & Havas M (eds.) "Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems", Plenum, New York, 363-380.
- Barber AS (1995) *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. 2nd edition. Wiley Interscience, New York.
- Blgg (2002) Bekalken grasland voor herinzaai. Persbericht 9 augustus 2002. Bedrijfslaboratorium voor grond- en gewasonderzoek, Oosterbeek.
- Bolt GH & Bruggenwert MGM (1978) *Soil Chemistry A. Basic Elements*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 281 pp.
- Cornfield AH (1952) The mineralization of the nitrogen of soil during incubation: Influence of pH, total nitrogen and organic carbon contents. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 3, 343-349.
- Curtin D & Smillie GW (1983) Soil solution composition as affected by liming and incubation. *Soil Science Society of America Journal* 47, 701-707.
- Curtin D, Campbell CA & Jalil A (1998) Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils. *Soil Biology & Biochemistry* 30, 57-64.
- Dancer W, Peterson LA, Chesters G, (1973) Ammonification and nitrification of N as influenced by soil pH and previous N-treatments. *Soil Science of America Proceedings* 37, 67-69.
- Den Boer DJ, Van Middelkoop JC & Chardon WJ (2001) Fosfaattoestand en- uitspoeling in afhankelijkheid van gebruik en bodemvruchtbaarheid. Rapport 364.97, Nutriënten Management Instituut, Wageningen.
- Geelhoed J (1998) Phosphate availability in the soil-root system: integration of oxide surface chemistry, transport and uptake. PhD Thesis. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Halstead RL, Lapense JM & Iverson KC (1963) Mineralisation of soil organic phosphorous with particular reference to the effect of lime. *Canadian Journal of Soil Science* 43, 97-106.
- Hartikainen H (1983) Effect of liming on phosphorous in two soils of different organic matter content. I Changes of native and applied phosphorous in incubation experiment. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 55, 345-354.

- Hartikainen H, Yli-Halla M, (1995) Solubility of soil phosphorous as influenced by urea. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 159, 327-332.
- Haynes RJ (1982) Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant and Soil* 68, 289-308.
- Janssen BH & Van Beusichem ML (1993) Nutriënten in bodem-plant relaties. Landbouwwuniversiteit Wageningen.
- Jarvis SC & Oenema O (2000) Measuring and monitoring nitrogen and phosphorus flows and losses in grassland systems. In: Mannetje L 't & Jones RM (eds) *Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research*. CAB International.
- Loomis RS & Connor DJ (1992) *Crop Ecology. Productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press, New York.
- Mansell GP, Pringle RM, Edmeades DC & Shannon PW (1984) Effects of lime on pasture production on soils in the North Island of New Zealand. 3. Interaction of lime with phosphorus. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 27, 363-369.
- Mengel K & Kirkby EA (1987) *Principles of plant nutrition*. International Potash Institute, Switzerland.
- Nätscher L & Schwertmann U (1987) Die Veränderung der Phosphatintensität der Bodenlösung eines Pelosol-Pseudogleys nach Grünlandumbruch. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 150, 42-46.
- Novozamsky I & Beek J (1981) Common Solubility Equilibria in Soils. In: Bolt GH & Bruggewert MGM (eds.) *Soil Chemistry. A. Basic Elements. Developments in Soil Science 5A*. Elsevier Scientific, Amsterdam.
- Nyborg M & Hoyt PB (1978) Effects of soil acidity and liming on mineralization of soil nitrogen. *Canadian Journal of Soil Science* 58, 331-338.
- Olsen SR (1972) Micronutrient interactions. In: *Micronutrients in Agriculture*. Ed. Soil Sci. Soc. Amer. Inc., Madison, WI, 243-264.
- Parkhurst DL & Appelo CAJ (1999) *User's guide to PHREEQC. A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Water Resources Investigation Report 99-4259. U.S. Department of the interior. Denver, CO.
- Prummel J (1974) *Veranderingen in het Pw-getal in de loop van de tijd en onder invloed van de bemesting*. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren, Rapport 9-74, 23 pp.



- Robson AD & Abbott LK (1989) The effect of soil acidity on microbial activity in soils. In: Robson AD (ed.) *Soil Acidity and Plant Growth*. Academic Press, New York.
- Sherrell CG (1983a) Boron deficiency and response in white and red clovers and lucerne. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 26, 197-203.
- Sherrell CG (1983b) Boron nutrition of perennial ryegrass, cocksfoot, and timothy. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 26, 205-208.
- Singh Gahoonia T, Claassen N & Jungk A (1992) Mobilization of residual phosphate of different phosphate fertilizers in relation to pH in the rhizosphere of ryegrass. *Fertilizer Research* 33, 229-237.
- Tunney H, Breeuwsma A, Withers PJA & Ehlert PAI (1997) Phosphorus fertilizer strategies: present and future. In: Tunney H, Carton OT, Brookes PC & Johnston AE (eds.) *Phosphorus Loss from Soil to Water*. CAB International, Wallingford, UK.
- Van der Paauw F (1950) Invloed van de kalktoestand op de beschikbaarheid van fosfaat op zandgrond. Ministerie van landbouw- visserij en voedselvoorziening. Directie van de Landbouw. Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen 56.8, 19 pp.
- Weier KL & Gilliam JW (1986) Effect of acidity on nitrogen mineralization and nitrification in Atlantic Coastal Plain soils. *Soil Science Society of America Journal* 50, 1210-1214.
- Welp G, Herms U & Brümmer G (1983) Einfluss von Bodenreaktion, Redoxbedingungen un organischer Substanz auf die Phosphatgehalte der Bodenlösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 146, 38-52.
- Wild A (1988) Plant nutrients in soil: phosphate. In: Wild A (ed.) *Russell's Soil Conditions & Plant Growth* 11th Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Wilting P (1996) De invloed van de pH op de opbrengst en kwaliteit van akkerbouwgewassen geteeld op zand- en dalgrond. Instituut voor Rationele Suikerproductie, 46 pp.

## BIJLAGE 1. Uitgangspunten voor berekeningen in BBPR 8.06 (weiden).

ALG	2.3	JA	Verkorte invoer van module BBPR-Minas gebruiken ?
ALG	4.1	EUR	Invoer en uitvoer weergeven in Gulden of Euro ?
ALG	12	2002	Jaartal waarop mestwetgeving is gebaseerd ?
ALGVVZ	3.0	WEID	Voedervoorziening melkkoeien in zomerperiode ?
ALGVVZ	3.2.1	WEIDPI	Voedervoorziening pinken, groep 1, in zomerperiode ?
ALGVVZ	3.3.1	WEIDKA	Voedervoorziening kalveren, groep 1, in zomerperiode ?
OMZTEC	2.1	50	Aantal melkkoeien ?
OMZTEC	2.2	28	Vervangingspercentage melkvee ?
GROND	1.3	ZANDDIK	Grondsoort grasland (excl. beheer) ?
GROND	1.5	VI	Grondwatertrap grasland (excl. beheer) ?
GROND	1.6.1	140	N-leverend vermogen grasland (excl. beheer) (kg/ha) ?
GROND	1.8	10	Graslandvernieuwing grasland per jaar (%) ?
GROND	1.11	350	N-jaargift grasland (excl. beheer) (kg N/ha)?
GROND	2.1	20	Opp. grasland voor beweiden en zomerstalvoeren (ha) ?
GROND	7	NEE	Is er grasland alleen maaien ?
GROND	8	NEE	Is er beheersgrasland ?
GROND	10	JA	Is er snijmaïs eigen teelt ?
GROND	10.1	5	Oppervlakte snijmaïs eigen teelt (ha) ?
GROND	10.6.1	140	N-leverend vermogen snijmaïs eigen teelt (kg/ha) ?
MELK	2.1	4.3	Vetpercentage van de melk (%) ?
MELK	2.2	3.43	Eiwitpercentage van de melk (%) ?
MELK	3	8225	werk - melkproductie (kg/koe/jaar) ?
NVVZOM	7	0	Graslandgebruikssysteem voor melkkoeien ?
NVVZOM	8	JA	Wordt er in de zomerperiode bijgevoerd ?
NVVZOM	9.1	2	Bijvoeding ruwvoer systeem 1: o (kg ds/dag) ?
NVVZOM	10.1	EIGEN	Ruwvoer melkg. koeien in zomer ( bijv ) ?
NVVWIN	2.1	25	Min. % graskuil in ds winterrantsoen melkg. koeien ?
NVVWIN	3.1	0	Min. % snijmaïs in ds winterrantsoen melkg.koeien ?
AVOM	2	0	Hoeveel soorten organische mest worden er aangevoerd ?
NPKBEM	5	PAL	Hoe wordt P2O5-behoefte op grasland bepaald ?
NPKBEM	5.1	VOLD	Fosfaattoestand van grasland ?
NPKBEM	7	GEEN	Maximum voor organische mestgift ?
NPKBEM	8.2.1	30	Pw-getal snijmaïsland ?
NPKBEM	22.2	ZOBEM	Methode mesttoediening uitrijtjdstip 1 op grasland ?
NPKBEM	25.1	ONDERPL	Methode van mesttoediening op snijmaïsland ?
NPKBEM	35.1	COMBI	Wijze van P2O5-bemesting snijmaïsland ?
ETRVM	2.5	13500	Opbrengst snijmaïs eigen teelt bij oogst (kg ds/ha) ?
AVKVM	1.1	NORM	Methode invoer P-gehalten en prijzen van krachtvoer ?
AFOM	9	0	Vrijwillige afvoer melkveemest (ton) ?
MINAS	1	NORM	Methode van invoer pagina MINAS ?

## BIJLAGE 2. Uitgangspunten voor berekeningen in BBPR 8.06 (summerfeeding).

ALG	1	SUMF	Naam invoerset ?
ALG	2		
ALG	2.3	JA	Verkorte invoer van module BBPR-Minas gebruiken ?
ALG	4.1	EUR	Invoer en uitvoer weergeven in Gulden of Euro ?
ALG	12	2002	Jaartal waarop mestwetgeving is gebaseerd ?
ALGVVZ	3.0	SUMF	Voedervoorziening melkkoeien in zomerperiode ?
ALGVVZ	3.1.3	WINTER	Berekeningswijze summerfeeding melkkoeien ?
ALGVVZ	3.2.1	SUMF	Voedervoorziening pinken, groep 1, in zomerperiode ?
ALGVVZ	3.2.3	WINTER	Berekeningswijze summerfeeding pinken ?
ALGVVZ	3.3.1	SUMF	Voedervoorziening kalveren, groep 1, in zomerperiode ?
ALGVVZ	3.3.3	WINTER	Berekeningswijze summerfeeding kalveren ?
OMZTEC	2.1	50	Aantal melkkoeien ?
OMZTEC	2.2	28	Vervangingspercentage melkvee ?
GROND	1.3	ZANDDIK	Grondsoort grasland (excl. beheer) ?
GROND	1.5	VI	Grondwatertrap grasland (excl. beheer) ?
GROND	1.6.1	140	N-leverend vermogen grasland (excl. beheer) (kg/ha) ?
GROND	1.8	10	Graslandvernieuwing grasland per jaar (%) ?
GROND	1.11	350	N-jaargift grasland (excl. beheer) (kg N/ha) ?
GROND	7.1	17	Oppervlakte grasland alleen maaien (ha) ?
GROND	8	NEE	Is er beheersgrasland ?
GROND	10	JA	Is er snijmaïs eigen teelt ?
GROND	10.1	8	Oppervlakte snijmaïs eigen teelt (ha) ?
GROND	10.6.1	140	N-leverend vermogen snijmaïs eigen teelt (kg/ha) ?
MELK	2.1	4.3	Vetpercentage van de melk (%) ?
MELK	2.2	3.43	Eiwitpercentage van de melk (%) ?
MELK	3	8225	werk - melkproductie (kg/koe/jaar) ?
NVVWIN	2.1	25	Min. % graskuil in ds winterrantsoen melkg. koeien ?
NVVWIN	3.1	0	Min. % snijmaïs in ds winterrantsoen melkg. koeien ?
AVOM	2	0	Hoeveel soorten organische mest worden er aangevoerd ?
NPKBEM	5	PAL	Hoe wordt P2O5-behoefte op grasland bepaald ?
NPKBEM	5.1	HOOG	Fosfaattoestand van grasland ?
NPKBEM	7	GEEN	Maximum voor organische mestgift ?
NPKBEM	8.2.1	30	Pw-getal snijmaïsland ?
NPKBEM	22.2	ZOBEM	Methode mesttoediening uitrijtjdstip 1 op grasland ?
NPKBEM	25.1	ONDERPL	Methode van mesttoediening op snijmaïsland ?
NPKBEM	35.1	COMBI	Wijze van P2O5-bemesting snijmaïsland ?
ETRVM	2.5	13500	Opbrengst snijmaïs eigen teelt bij oogst (kg ds/ha) ?
AVKVM	1.1	NORM	Methode invoer P-gehalten en prijzen van krachtvoer ?
AFOM	9	0	Vrijwillige afvoer melkveemest (ton) ?
MINAS	1	NORM	Methode van invoer pagina MINAS ?

BIJLAGE 3. pH-waarden van vijf objecten (bouwvoor) van de pH-trappenproefvelden: gemiddelde waarden van zes herhalingen (Wilting, 1996).

Plaats	datum	pH-KCl				
		object 1	object 2	object 3	object 4	object 5
Eext	22-10-91	4,5	4,8	5,2	5,8	6,4
	30-10-92	4,4	4,8	5,1	5,7	6,3
	11-03-94	4,5	4,6	5,0	5,5	6,1
Vlagtwedde	19-08-91	4,8	5,2	5,6	6,0	6,6
	07-09-92	4,8	5,2	5,6	6,0	6,5
Tweede Exloërmond	04-11-91	4,4	4,9	5,4	5,8	6,5
	04-11-92	4,5	4,9	5,4	5,8	6,4
	11-03-94	4,3	4,8	5,1	5,4	5,8
Borgercompagnie	20-11-91	4,7	5,1	5,5	5,8	6,3
	11-11-92	5,3	5,5	5,9	6,1	6,5
Well	15-10-91	5,2	5,6	6,0	6,2	6,5
	26-10-92	5,2	5,5	5,9	6,1	6,6

BIJLAGE 4. Pw-getallen bij de verschillende objecten van de pH-trappenproefvelden in het najaar van 1991, 1992 en 1993 (Wiltling, 1996).

Plaats	object	Pw-getal mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> l <sup>-1</sup> grond		
		1991	1992	1993
Eext	1	39	54	42
	2	40	49	45
	3	30	42	36
	4	30	41	38
	5	23	35	30
Vlagtwedde	1	52	56	*
	2	46	50	*
	3	45	50	*
	4	41	46	*
	5	38	42	*
Tweede Exloërmond	1	46	56	*
	2	49	55	*
	3	47	59	*
	4	40	50	*
	5	33	47	*
Borgercompagnie	1	87	109	*
	2	79	93	*
	3	67	80	*
	4	56	60	*
	5	53	59	*
Well	1	*	44	*
	2	*	43	*
	3	*	39	*
	4	*	33	*
	5	*	33	*

\* Niet bepaald