

DIE INVLOED VAN VERSKILLENDE GRONDEIENSKAPPE OP DIE BEPALING VAN 'N FOSFAATSORPSIEMAKSIMUM

O.J.van der WALT

**DIE INVLOED VAN VERSKILLENDE GRONDEIENSKAPPE
OP DIE BEPALING VAN 'N FOSFAATSORPSIEMAKSIMUM**

Ockert Johannes van der Walt

B.Sc.Agric., M.Inst.Agrar., M.Sc.

Proefskrif voorgelê vir die graad Philosophiae Doctor in die Departement Plant- en Bodemwetenskappe aan die Potchefstroomse Universiteit vir Christelike Hoër Onderwys.

Promotor: Prof. J. Booysen

Medepromotor: Dr. A.J. van der Merwe

POTCHEFSTROOM

1995

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF DIFFERENT SOIL PROPERTIES ON THE DETERMINATION OF A PHOSPHATE SORPTION MAXIMUM

BY

OCKERT JOHANNES VAN DER WALT

Promoter: Prof. J. Booysen

Joint promoter: Dr. A.J. van der Merwe

Department: Plant and Soil Sciences

Degree: Ph.D(Soil Science)

Phosphate sorption processes in soils are influenced by soil properties that are so closely interrelated that they cannot be studied in isolation or even by eliminating some of them. The graph of the quantity of extractable phosphate in soil versus time, exhibits a characteristic two-phase pattern for the soils of the area studied. This pattern initially indicates a rapidly declining phase over the first seven to ten days, followed by a sharp bend in the curve which, thereafter shows a relatively gradual decline for at least 70 days. The behaviour is best explained by fitting a split line regression function. Three parameters are obtained, B_1 , B_2 and B_0 respectively, which represent the rapid and gradual slopes as well as the intercept of the spline. In this study such a spline function was fitted to the sorption curve of extractable phosphate versus days of contact of a soluble P-source with the soil particles. Soils with very little or no residual phosphate were used to simplify the analysis of quantification techniques. The use of the spline technique was succesful in the quantification of the sorption characteristics of a soil and the B_0 coefficient allowed the prediction of the quantity of extractable phosphate seven days after addition of a known quantity of a soluble phosphate (P) source ($r^2 = 0.82$).

A further attempt was then made to utilize the same methodology in studying the complicating influence of residual P on sorption characteristics. The study was repeated for a set of soil samples from the same sampling area and the same soil forms which contained different levels of residual phosphate from previous fertilization practices. This yielded a simplified formula describing the relationship between the extractable phosphate, the clay content, the KCl-extractable Al and the residual P-content of the soil calculation of B_0 which resulted in an improved $r^2 = 0.93$.

The application of the above results in the optimization of Phosphate fertilization practices was then attempted. The possible number of combinations of clay content, KCl-extractable P and the extractable P-level which could be chosen in a geographical area as optimum for crop production, is unlimited. In order to overcome this problem, it was necessary to stratify the sample area with regards to the above-mentioned soil properties. An approach was evaluated in which the B_0 property of a specific soil was calculated thereby establishing the actual amount of phosphate required in addition to the residual P already in the soil. The actual amount of a specific fertilizer required to satisfy the calculated demand of the soil could then be determined by selecting an appropriate linear equation best suited for the specific characteristics of the soil. The success of this approach was evaluated by performing a validation experiment in which calculated amounts of the applied phosphate and the actual amounts measured in a variety of soils were compared seven days after application. In this study a high degree of correspondence between these two figures was found illustrating the value of the suggested approach. The results of this study are not only supported by the latest relevant subject literature, but supply a more accurate methodology for optimizing P fertilization applications.

INHOUDSOPGAWE

INLEIDING	1
1.1 Die meganismes betrokke by P-sorpsie	3
1.2 Doelstellings	6
LITERATUUROORSIG	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Fosforewewig in die grond	7
2.2.1 Oplosbaarheidsewewig	7
2.2.1.1 Homogene ewewig	8
2.2.1.2 Heterogene ewewig	9
2.2.2 Adsorpsie-ewewig	10
2.3 Die relatiewe rol van adsorpsie en presipitasie in fosfaatvaslegging ...	11
2.4 Fisies-chemiese reaksiemeganismes wat die fosforkonsentrasie in die grondoplossing beheer	12
2.4.1 Fosforvaslegging as 'n sorpsiereaksie	12
2.4.2 Fosforvaslegging as 'n presipitasiereaksie	18
2.4.3 Faktore wat fosforsorpsie beïnvloed	24
2.4.3.1 Klei-inhoud	24
2.4.3.2 Organiese materiaal	25
2.4.3.3 Yster- en aluminiumoksiede en -hidroksiede	26
2.4.3.4 pH as faktor by fosfaatsorpsie	27

2.5	Die meting van fosforsorpsie	29
2.5.1	<i>Die Langmuir-adsorpsievergelyking</i>	30
2.5.2	<i>Die Freundlich-adsorpsievergelyking</i>	32
2.5.3	<i>Die Tempkin-adsorpsievergelyking</i>	34
2.5.4	<i>Meganistiese modelle</i>	35
2.5.5	<i>Fosfaatpotensiale</i>	37
2.5.5.1	Voordele van die potensiaalkonsep	41
2.5.5.2	Nadele van die potensiaalkonsep	41
2.6	Relevante navorsing in Suid-Afrika	42
2.7	Opsommende afleidings	49

KWANTIFISERING VAN FOSFORSORPSIEKURWE 51

3.1	Studiegebied	51
3.2	Dataversameling	52
3.3	Fosforsorpsie-onderzoek	55
3.4	Resultate van die sorpsie-onderzoek	59
3.5	Die karakterisering van fosforsorpsie	60
3.5.1	<i>Die tweefasekarakter van fosforsorpsie</i>	63
3.5.2	<i>Die latfunksiebenadering</i>	67
3.6	Hipotese	70
3.7	Fosforsorpsiekwantifisering	70
3.7.1	<i>Hoofkomponent-analise</i>	71
3.7.2	<i>Beste deelversamelingsregressie</i>	75
3.8	Gevolgtrekking	79

DIE INVLOED VAN RESIDUELE FOSFAAT OP FOSFAATSORPSIE 82

4.1	Residuele fosfor as kompliserende faktor	82
4.2	Die studiegebied	86
4.3	Dataversameling	90
4.3.1	<i>Grondanalises</i>	90
4.3.2	<i>Vergelyking van resultate van monsters met en sonder residuele fosfaat</i>	93
4.4	'n Vergelyking van die latfunksie by gronde met en gronde sonder residuele fosfaat	95
4.5	Aanpassing vir die berekening van B_0	99
4.6	Bespreking van B_0-aanpassingsresultate	103
4.7	Gevolgtrekking	105

DIE AANWENDING VAN B_0 IN DIE OPTIMALISERING VAN

FOSFAATBEMESTING 108

5.1	Benaderingsgrondslag	108
5.2	Materiaal en metodes	111
5.3	Stratifikasie van die toepassingsgebied	116
5.4	Die kwantifisering van die verwantskap tussen <i>ambic</i>-ekstraheerbare P en ekwivalente hoeveelhede van verskillende kunsmisbronne vir verskillende bemestingsmikpunte	118
5.5	Die berekening van die P-vasleggingsbehoefte vir verskillende kombinasies van grondeienskappe	122

5.6	Evaluering van die berekende P-toediening	126
5.6.1	<i>Human en Van Biljon (1994)</i>	126
5.6.2	<i>Johnston, Miles en Thibaud (1991)</i>	131
5.6.3	<i>Farina, Manson en Johnston (1993)</i>	133
5.7	Gevolgtrekking	136
OPSOMMING EN GEVOLGTREKKINGS		139
BIBLIOGRAFIE		148
BYLAES		177

HOOFSTUK 1

INLEIDING

Fosforsorpsie vind plaas wanneer die wortels van groeiende plante opgeloste fosfor (P) uit die grondoplossing onttrek. P-verwydering vind egter ook plaas in 'n gemiddelde grondoplossing as gevolg van die werking van elemente soos kalsium (Ca), yster (Fe) en aluminium (Al) wat met fosfor reageer om relatief onoplosbare verbindings te vorm. Elk van hierdie verbindings het sy eie karakteristieke oplosbaarheidsproduk.

Indien die vaslegging van P in die grond slegs die gevolg was van fosfaatmineraalvorming, sou die konsentrasie van die opgeloste P in die grondoplossing met verloop van tyd bepaal word deur die oplosbaarheidsproduk van die gevormde fosforverbinding wat die minste oplos, op voorwaarde dat 'n oormaat van die betrokke element wat met fosfor verbind in die grond teenwoordig is. Hierdie element moet dus in 'n groter mate in die grond teenwoordig wees as die ander elemente wat ook met fosfor reageer. As daar byvoorbeeld in 'n grondoplossing net Ca^{+2} - en Al^{+3} -ione teenwoordig is, sal die kalsiumfosfate wat gevorm word 'n bepaalde konsentrasie Ca^{+2} - en fosfaat (PO_4^{-3})-ione aan die grondoplossing verskaf in ooreenstemming met die oplosbaarheidsproduk van die kalsiumfosfaat wat gevorm word. Hierdie PO_4^{-3} -ione sal dan deur die Al^{+3} -ione uit die oplossing onttrek word en as aluminiumfosfate presipiteer. Meer van die vastefasekalsiumfosfate sal dan oplos om die ewewig te herstel. Indien daar genoeg Al^{+3} -ione teenwoordig is, sal al die fosfor uit die kalsiumfosfate oplos en in aluminiumfosfate omgesit word. Die hoeveelheid opgeloste fosfor in die grond sal dan uiteindelik bepaal word deur die

oplosbaarheidsproduk van die aluminiumfosfate.

In die voorafgaande bespreking is daar slegs van kalsium en aluminium as voorbeelde gebruik gemaak. Daar is egter 'n groot aantal elemente sowel as kolloïdale komplekse wat met fosfor in die grond reageer, en wat dus die ewewig tussen die fosfor in die opgeloste en die vaste fase beïnvloed. 'n Ewewigstoestand word so stadig bereik dat onewewigstoestande vir aansienlike tye bestaan (Larsen, 1967). Die gepresipiteerde P in die grond is ook nie altyd teenwoordig in eenvormige verbindings wat gelykmatig presipiteer en oplos nie. Die gebruik van ewewigskonsentrasies in die grondoplossings is gevolglik 'n baie swak aanduiding van plantbeskikbare P. Dit is dus ook nie vreemd dat daar dikwels so 'n swak korrelasie tussen P-konsentrasies in die grondoplossing en opbrengsprestasie by plante bestaan nie. Fosforkonsentrasie in grondoplossings word ook beïnvloed deur metaalkompleksering met fosforspesies as ligande (Pretorius, 1991).

Wanneer oplosbare P toegevoeg word aan vogtige grond, verhoog die P-konsentrasie in die oplossingsfase. Die verhoging van die P-konsentrasie gee verder aanleiding tot reaksies tussen die ione in die oplossingsfase en die soliede fase van die grond. Hierdie reaksies is kompleks en sluit in die adsorpsie van opgeloste ione in ruil vir ander ione in die vaste fase. Reaksies soos liganduitruiling, monodentate- en bidentatebindings speel hier ook 'n rol. Hierdie reaksies sluit ook in dat die fosfate as goed gedefinieerde minerale in die grond presipiteer. Die volgende minerale kan byvoorbeeld presipiteer: strengiet, variskiet en hidroksie-apatiet. Die presipitasie van fosfate kan ook manifesteer as die bedekking van verbindings met ongedefinieerde samestelling op die oppervlakte van deeltjies van die soliede fase. Fosfaat-ione kan ook reageer

met soliedefase-oppervlaktes om 'n sogenaamde "vaste oplossing" te vorm.

Hierdie reaksies is bekend onder verskillende beskrywende name, naamlik adsorpsie, chemisorpsie, fiksasie of immobilisasie. Daar word voorkeur gegee aan die term *sorpsie* as 'n algemene beskrywing van die reaksies wat aanleiding gee tot die onttrekking van fosfate uit die grondoplossing (Larsen, 1967; Fox, 1988).

1.1 Die meganismes betrokke by P-sorpsie

Indien die P-konsentrasie in die grondoplossing slegs beheer word deur die oplosbaarheid van die mees onstabiele P-verbinding wat in die grond teenwoordig is, sou die bepaling daarvan min probleme oplewer. Die feit dat daar soveel verskillende reaksies betrokke is by P-sorpsie, veroorsaak dat 'n indeks vir die definiëring van planttoeganklike fosfor in verskillende gronde 'n baie ingewikkelde saak is.

Larsen (1967) omskryf die wyse waarop fosfor in die grond reageer as analoog met water in 'n put. Ten einde die vergelyking tussen die gedragspatroon van water in die put en die gedragspatroon van fosfor in die grond beter te illustreer, moet die twee sisteme met mekaar vergelyk word.

Fosfor/grond-sisteem

1. Wanneer 'n klein hoeveelheid fosfor in die grond teenwoordig is, sal dit sterk geabsorbeer word. Die konsentrasie in oplossing sal te laag wees om die presipitering van enige fosfaatverbindings teweeg te bring en al die anorganiese fosfate sal labiel wees. Die konsentrasie P in die grondoplossing word in hierdie geval slegs beheer deur die hoeveelheid anorganiese fosfaat wat teenwoordig is, sowel as die omvang van die sorpsiesisteem.

2. Wanneer fosfor bygevoeg word, sal die konsentrasie in die oplossing styg totdat 'n ewewigsvlak bereik is. Hierdie ewewigsvlak sal ooreenstem met die oplosbaarheidsprodukt van die fosforverbinding wat gebruik is om die toevoeging te maak. 'n Presipiteringsprodukt sal gevolglik gevorm word. Wanneer meer fosfor bygevoeg word, sal die konsentrasie in oplossing moontlik tydelik tot bokant die ewewigsvlak styg. Hierdie konsentrasie sal egter later weer daal as gevolg van die presipitasieproses totdat die ewewig weer herstel is. 'n Redelike hoeveelheid labiele fosfaat sal gevorm word. Verder sal stabiele fosfaatverbindings ook gevorm word.

3. Wanneer fosfor onttrek word, vind die omgekeerde plaas: die oplosbare sowel as die labiele fosfor sal uitgeput raak en die stabiele fosfor sal stadig gemobiliseer word om die ewewig te herstel.

Water/grond-sisteem

1. Wanneer slegs 'n klein hoeveelheid water teenwoordig is, sal omtrent geen water as vrywater op die bodem van die put versamel nie. 'n Klein hoeveelheid van die vrywater sal die poreuse materiaal benat waarmee dit op die bodem van die put in aanraking kom. Daar sal nie genoeg water oorbly om die minder poreuse materiaal om die wand van die put te benat nie. Hierdie water is dus relatief immobiel.

2. Wanneer water toegevoeg word, sal die watervlak in die put sowel as in die hoogs poreuse materiaal styg tot hoog in die put. Die water sal ook in die minder poreuse materiaal begin invloei en water wat nie opneembaar is nie sal begin ophoop. As die water vinniger bygevoeg word as wat dit wegsyfer, sal 'n tydelike verrykte toestand ontstaan. Die proses van wegsyfering sal voortgaan totdat 'n ewewigstoestand ontstaan tussen die vrywater in die put, die labiele water in die poreuse materiaal en die stabiele water buite om die wand van die put.

3. Indien water aan die sisteem onttrek word, sal die vrywater in die put vinnig daal en gevolglik aangevul word deur die labiele water in die poreuse materiaal. Stabiele water sal stadig deur die poreuse materiaal laag terugvloei om die ewewig geleidelik te herstel.

Hierdie voorstelling van Larsen (1967) is baie vereenvoudig en werp nie lig op die werklike chemiese en fisiese aard van die fosfaatvasleggingsproses nie; tog beklemtoon dit hoedat verskeie chemiese en fisiese prosesse gelyktydig deelneem aan die P-fiksasiereaksie in die grond. Die chemiese en fisiese meganismes van P-vaslegging word in die volgende hoofstuk in detail bespreek.

Hoewel gronde van mekaar verskil ten opsigte van baie kenmerke soos tekstuur, pH, kleimineraalinhoud, KUK, ensovoorts, is daar in almal 'n opvallend ooreenstemmende P-vasleggingspatroon waarneembaar. Hierdie ooreenstemmende patroon kan grafies voorgestel word as die ekstraheerbare (labiele) P-fraksie op die y-as gestel word teenoor die aantal dae nadat die P toegedien is aan die grond op die x-as. Hierdie grafiese voorstelling vertoon 'n opvallende vermindering van die labiele fraksie oor die eerste paar dae met 'n duidelike draaipunt in die kurwe. Na hierdie draaipunt vertoon die grafiek 'n geleidelike fiksasietempo en word selfs 'n min of meer konstante vlak gehandhaaf vir 'n lang tyd. Hierdie kenmerkende P-vasleggingspatroon is al deur baie navorsers bevestig. Slegs enkele navorsers word in hierdie verband ter staving genoem: Kafafi (1963); Van der Walt (1976); Fox (1988); Sanyal *et al.* (1990); Pretorius (1991).

Hierdie kenmerkende P-vasleggingspatroon in gronde word beskou as 'n belangrike verskynsel wat nuttig ondersoek kan word om lig te werp op bemestingskeduleringsvraagstukke. Daar word byvoorbeeld beweer dat plante - veral mielies - 'n beter reaksie toon op fosfaat wat pas toegedien is (met ander woorde *met of net voor* planttyd) as wanneer die fosfaat lank voor die tyd ingeploeg word. 'n Indringende ondersoek na die

aard van die kenmerkende fosforvasleggingspatroon soos hierbo bespreek is, behoort lig te werp op hierdie vraagstuk.

1.2 Doelstellings

Die doelstellings van hierdie studie kan soos volg omskryf word:

- 1.2.1 Daar word gepoog om die kenmerkende verdwyningskurwe van ekstraheerbare fosfor, soos gestel teenoor tydsverloop, te beskryf met behulp van 'n wiskundige vergelyking. Die parameters van hierdie wiskundige vergelyking word dan in verband gebring met alle grondeienskappe wat 'n rol speel in P-sorpsie.
- 1.2.2 Deur middel van hierdie vergelyking sal gepoog word om te bereken hoeveel fosfaatbemestingstof met planttyd toegedien moet word ten einde te verseker dat gewasse groei en ontwikkel sonder dat hul gestrem word as gevolg van 'n fosfaattekort.

HOOFSTUK 2

LITERATUUROORSIG

2.1 Inleiding

Die belangrike rol wat fosfor (P) in plantvoeding speel, is besef voordat 'n duidelike begrip gevorm is van die unieke reaksiemeganismes wat deur gronddeeltjies bewerkstellig word.

In die vroegste plantvoedingstudies is grond hoofsaaklik beskou as 'n onaktiewe medium waarin P-verbindings voorkom. Ook is aanvaar dat die gronddeeltjies nie 'n intrinsieke rol speel in P-onttrekking uit die grondoplossing nie. Die vroegste studies is dus benader uit 'n meer chemiese oogpunt waarin alleenlik anorganiese P-verbindings en hul oplosbaarheidsewewig bestudeer is.

2.2 Fosforewewig in die grond

2.2.1 *Oplosbaarheidsewewig*

Die vorm waarin fosfor in 'n grondoplossing aangetref word, is hoofsaaklik as verbindings van H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} en PO_4^{3-} -ione met Ca, Fe en Al. Die oplosbaarheidsewewig wat 'n rol speel in die P-voorsiening aan die grond kan verder onder twee hoofde bestudeer word, naamlik homogene ewewig en heterogene ewewig.

2.2.1.1 Homogene ewewig

Homogene ewewig is die ewewig wat slegs bestaan in die oplossingsfase. By lae konsentrasies P, soos wat aangetref word in die geval van fosfaat-ione in die grondoplossing, kan die dissosiasiekonstantes van fosforsuur as basis gebruik word vir die berekening van die ewewigsdistribusie van die sout van fosforsuur. Fosforsuur is 'n tribasiese suur en het drie dissosiasiekonstantes, naamlik:



(Vgl. Lindsay, 1976:164.)

Dieselfde ewewigsdistribusie wat vir fosforsuur geld, geld ook vir die sout $(\text{M})_x(\text{PO}_4)_y$ van fosforsuur en die dissosiasiekonstantes word op dieselfde wyse afgelei.

Die ione wat aanwesig is in 'n normale grondoplossing wat kompleksverbindinge met fosfor kan vorm, is ook in staat om verbindinge soos byvoorbeeld hidroksiede, karbonate, sulfate ensovoorts, met ander ione te vorm. Hierdie reaksies kan aanleiding gee tot homogene sowel as heterogene ewewig. Verder kan daar ook 'n kombinasie van homogene en heterogene ewewig wees.

2.2.1.2 Heterogene ewewig

Heterogene ewewig is die ewewig wat bestaan tussen die oplossingsfase en die vaste fase. Deur gebruik te maak van ionenaktiwiteit in plaas van ionkonsentrasie, kan 'n ware konstante verkry word. Hierdie ware konstante kan die oplosbaarheidsproduk van 'n sout wat gedeeltelik in onopgeloste vorm in 'n sisteem teenwoordig is, uitdruk.

Die ewewigskonstante van 'n sout $A_x B_y$ in die volgende ewewigsreaksie $A_x B_y = x A + y B$ kan soos volg gedefinieer word:

$$K = \frac{[A]^x [B]^y}{[A_x B_y]}$$

Indien 'n deel van die sout in onopgeloste vorm teenwoordig is, is $[A_x B_y]$ konstant en die oplosbaarheidsproduk kan dan soos volg aangetoon word:

$$K_{\text{opl}} = (A)^x (B)^y.$$

'n Ware konstante kan verkry word deur gebruik te maak van die konvensionele term $p = -\log_{10}$ en die oplosbaarheidsproduk kan dan soos volg uitgedruk word:

$$pK_{\text{opl}} = x pA + y pB.$$

Toegepas op monokalsiumfosfaat lyk bogenoemde vergelyking soos volg:

$$pK_{\text{opl}} = p \text{Ca}^{2+} + 2 p \text{H}_2 \text{PO}_4^-.$$

Op grond van hierdie vergelyking kan die kalsiumpotensiaal afgelei word.

Hierdie kalsiumpotensiaal word soos volg deur Schofield (1955) voorgestel:



Hierdie potensiaal word bereken nadat die pH en die Ca- en P-konsentrasies in die grond bepaal is. Die vergelyking geld ook alleen indien die sisteem in ewewig verkeer. Die potensiaalkonsep is baie belangrik en is intensief ondersoek deur navorsers soos White en Beckett (1964), White (1964), Beckett en White (1964) Jensen (1971) en Oertli (1973). Hierdie potensiaalkonsep word later in dié hoofstuk breedvoerig bespreek.

2.2.2 *Adsorpsie-ewewig*

Selfs wanneer fosforpresipiterende ione afwesig is, is gevind dat fosfor steeds uit die grondoplossing verdwyn. Hierdie fosforonttrekking kan die gevolg wees van oppervlakte-adsorpsie, of dit kan 'n migrasievorm van fosfor-ione wees wat na sub-oppervlaktelae beweeg en 'n mate van kristalgroei verteenwoordig (Kafafi, 1963; Larsen, 1967; Sanyal & De Datta, 1991). Die fosforkonsentrasie in die grondoplossing kan dus deur adsorpsie beïnvloed word. Wanneer die adsorpsiesisteem versadig is as gevolg van die toevoeging van fosfor, sal die konsentrasie in oplossing styg tot 'n punt waar swak oplosbare komplekse begin neerslaan. Die oplosbaarheid van die verbinding wat op hierdie manier gevorm word, sal dan die boonste limiet van die fosforkonsentrasie in die grondoplossing bepaal. Wanneer die fosforkonsentrasie in oplossing verlaag word, sal die omgekeerde gebeur: swak oplosbare fosforverbindinge sal oplos totdat die adsorpsiesisteem tot so 'n mate versadig is dat dit ooreenstem met die oplosbaarheid van die fosforverbinding in die sisteem wat die minste stabiel is. Daar is dus behalwe die

ewewig tussen fosfor in die grondoplossing en oplosbare vaste fosforverbindings in die grond, ook ewewigsreaksies tussen die adsorpsiesisteem en fosforverbindings in die opgeloste vorm teenwoordig. Vandaar die bewering van Larsen (1967) dat die ewewig so stadig tot stand kom dat onewewigstoestande vir aansienlike tye kan bestaan.

2.3 Die relatiewe rol van adsorpsie en presipitasie in fosfaatvaslegging

Daar is hoofsaaklik twee denkrigtings oor die reaksies wat plaasvind in die proses van P-vaslegging in grond. Eerstens is daar diegene wat redeneer dat P-vaslegging hoofsaaklik 'n presipitasiereaksie van fosfaatverbindings soos strengiet ($\text{Al PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) of variskiet ($\text{Fe PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), asook di- en trikalsiumfosfaatverbindings en Ca-hidroksie-apatiet is (vgl. De Sigmond, 1907; Cole & Jackson, 1950; Haseman *et al.*, 1950; Low & Black, 1950; Clark & Peech, 1955; Kittrick & Jackson, 1955; Hemwall, 1957; Wright & Peech, 1960; Chakravarti & Talibudeen, 1962; Juo & Ellis, 1968; Grobler 1970).

Hierdie navorsers het almal die vasleggingsprobleem van fosfor in grond benader in terme van die oplosbaarheidsprodukbeginsels van yster- en aluminiumfosfate, asook swak oplosbare Ca-fosfate, naamlik di- en trikalsiumfosfate.

Tweedens is daar die navorsers wat die probleem hoofsaaklik sien as die gevolg van oppervlakte-adsorpsie of uitruilingsreaksies. Adsorpsie en presipitasie in P-vaslegging kan ook die gevolg wees van kolloïdale aantrekking deur residuele elementkragte wat in die grondpartikels voorkom en wat nie volledig geneutraliseer is deur geadsorbeerde ione nie (Russell & Prescott, 1916; Dean & Rubins, 1947; Bache, 1963; Hsu, 1964; Hsu, 1965;

Muljadi *et al.*, 1966, Murrman & Peach, 1969).

In die lig van die fundamentele verskille wat bestaan tussen hierdie twee benaderings en die implikasies wat dit inhou ten opsigte van die fosfaatvrystelling uit die grond en die fosfaatbeskikbaarstelling aan plante, word dié twee uitgangspunte nou in meer besonderhede bespreek.

2.4 Fisies-chemiese reaksiemeganismes wat die fosforkonsentrasie in die grondoplossing beheer

2.4.1 Fosforvaslegging as 'n sorpsiereaksie

Die adsorpsieproses verwys na die P-akkumulasie op die oppervlakte van gronddeeltjies (Sanyal & De Datta, 1991). In sommige gevalle kan adsorpsie gepaard gaan met die penetrasie van die geadsorbeerde P deur diffusie na dieper lae van die adsorbent. Hierdie proses gee weer aanleiding tot verdere P-adsorpsie op die oppervlakte. Die algemene term om hierdie hele proses te beskryf, is *sorpsie* - 'n term soos voorgestaan deur onder andere Larsen (1967), asook deur Fox (1988).

In suur grond word P-sorpsie algemeen toegeskryf aan die hidroksiede van yster (Fe) en aluminium (Al). Ook word P-sorpsie toegeskryf aan (1:1) laag-kleimineralen, veral in tropiese gronde met 'n lae pH. Die waarskynlikheid dat sommige fosfaatminerale van Al of Fe (byvoorbeeld variskiet en strengiet) gevorm word in bogenoemde tipe grond, word deur sekere navorsers betwyfel (Ryden & Pratt, 1980). Fosforsorpsie in suur gronde

word ook beskou as 'n spesiale geval van presipitasie (Hsu & Bates, 1964; Hsu, 1965). Met hierdie soort presipitasie bly Al of Fe 'n deel van die oorspronklike fase of verbinding waarin dit voorkom. (Hierdie oorspronklike fase of verbinding kan ook 'n kleideeltjie wees.)

Die Al en/of Fe reageer dan met fosfor deur dit aan te trek deur middel van residuele kragte. Hidroksiel-ione in 'n oplossing neig om aluminium-ione aan mekaar te heg en sodoende 'n aaneengeskakelde positief gelaaide polimeer te vorm wat in staat is om die negatief gelaaide fosfaat-ione aan te trek sonder dat hierdie metaal-ione uit die oorspronklike vaste fase onttrek word (Hsu, 1965; McGee, 1972). Of hierdie proses beskou kan word as presipitering of adsorpsie, hang slegs af van die grootte van die polimeer wat weer verder beïnvloed word deur sowel die pH as die fosforkonsentrasie in die oplossing. In 'n pH (H_2O)-gebied van ongeveer 4, en wanneer 'n hoë fosforkonsentrasie aanwesig is, kan die reaksie as tipiese presipitasie beskou word. In 'n neutrale tot effens suur medium (pH 6 tot 7) van 'n verdunde fosfaatoplossing is die amorfe aluminiumhidroksiede stabiel en word forsor net aangetrek op die oppervlakte van die polimere wat ryk is aan OH-ione.

Verdere eksperimente deur Hsu (1965) het aangetoon dat hoë-orde hidroksie-aluminiumpolimere afgebreek kan word tot eenvoudige sesledige ringverbindinge - selfs by 'n pH van 7. In 'n verdunde fosfaatoplossing kan dit dan gebeur dat die fosfate nie presipiteer nie, maar in die vorm van 'n ioonkompleks in oplossing bly. Die hidrolise, die polimerisasie en die reaksie van ferri-yster met fosfaat stem ooreen met dié van aluminium (Hsu & Bates, 1964). Hsu (1965) het verder ook aangetoon dat ferrihidroksiede en

hidroksie-ferripolimere onstabiel is en met veroudering in oksiede verander. As monsters van matige suur grond vir 'n jaar in 'n verdunde fosfaatoplossing gelaat word, word ferrihidroksiede as 'n aparte fase gevorm. Hierdie fase bevat dan die meeste fosfaat wat uit die oplossing verwyder is. Hierdie proses kan beskou word as presipitasie omdat 'n definitiewe nuwe fase gevorm word. Dieselfde proses kan egter ook as adsorpsie beskou word omdat yster eers deur 'n oppervlakte-reaktiewe fase moet gaan voordat hierdie aparte fase gevorm word. Die oppervlakte-reaktiewe ferri-yster is die fase wat met die fosfor reageer en die fosfor uit die oplossing onttrek sodat dit met veroudering presipiteer.

Op grond van bogenoemde proses maak Hsu (1965) die volgende afleiding: Aangesien die OH/Al-verhouding sowel as die OH/Fe-verhouding verskil in die onderskeie vorms, sal die aluminiumaktiwiteit in die verskillende vorms ook wissel. Alle tipes verbindings met dieselfde aktiwiteit sal dieselfde geleentheid hê om sonder voorkeur met P te reageer.

Presipitering vind dus plaas wanneer yster of aluminium geheel en al uit die kristalstruktuur van kleimineraal onttrek word en met fosfor verbind om 'n aparte neerslag te vorm. Adsorpsie daarenteen vind plaas wanneer fosfaat-ione slegs die Si-O-Al- of die Al-O-OH-bande gedeeltelik neutraliseer en die Al- of Fe-atome nog steeds deel uitmaak van die kristalraamwerk van die kleimineraal.

Vroeëre navorsers soos Kelley en Midgley (1943), Stout (1959) asook Schell en Jordan (1959) het die teorie gehuldig dat Si^{+4} in die tetrahedriese struktuureenhede van grondsilikate deur P-atome vervang word. Isomorfiese vervanging vind dus plaas. Hierdie teorie is weerlê deur die werk van Bauwin en Tyner (1957) wat eksperimentele

bewyse gelewer het dat dit nie moontlik is nie. Die teoretiese verplasing van OH^{-1} deur PO_4^{-3} in die kristalstruktuur van die kleimineraal is ook onwaarskynlik aangesien die PO_4^{-3} -ioon heeltemal te groot is om die posisie te beset wat beklee is deur die hidroksiel-ioon. Kittrick en Jackson (1956), Raupach en Piper (1959), Abdel-Saïem *et al.* (1964) asook Du Plessis en Burger (1966) het egter aangetoon dat ladings wat gesetel is in silikaat-ione wat blootgestel is aan die wande van kleimineraal, wel 'n rol kan speel in die aantrekking van PO_4 -ione. Die aantrekking van fosfaat-ione op die oppervlakte van die kleideeltjies is dus nie net beperk tot yster en aluminium nie, maar silikonatome in die kleimineraal kan wel 'n invloed uitoefen op P-sorpsie. Verbindings tussen fosfate en kalsium, wat algemeen in grond voorkom, en in die dikalsiumfosfaat- en trikalsiumfosfaatvorm relatief onoplosbare verbindings vorm, is algemeen bekend. Laasgenoemde reaksies gee aanleiding tot presipitasie wat verklaar kan word deur die oplosbaarheidsproduktbenadering.

Navorsers wat ook besondere aandag gegee het aan die werking van P-sorpsie is Muljadi *et al.* (1966) asook Kafafi *et al.* (1967). Eersgenoemde navorsers het bevind dat by lae fosforkonsentrasies binding plaasvind op die blootgestelde kante van aluminium-ione in kleimineraal. Die binding vind plaas waar aluminium-ione vasgevang is in die kristalrooster van die kleimineraal. Muljadi *et al.* (1966) stel verder dat by hoër konsentrasies (200 mg l^{-1} P en hoër) fosfaatbinding plaasvind as gevolg van penetrasie in een of ander amorfe gebied van die oppervlakte van die kleideeltjies. Fosfaatbinding vind plaas as die fosfaat-ioon in die teenwoordigheid van relatief onghidreerde katione soos byvoorbeeld kalsium verkeer. Bogenoemde navorsers het die bestaan van ten minste drie energiespesifieke gebiede vir aluminiumoksied en kaolienet aangetoon.

In die eerste gebied het die pH die grootste rol gespeel, terwyl die fosforkonsentrasie feitlik geen rol gespeel het nie. In die tweede en derde gebiede het pH-, sowel as fosforkonsentrasie 'n rol gespeel ten opsigte van die omkeerbaarheid van die adsorpsiereaksie.

Kafkafi *et al.* (1967) het bevind dat al die fosfor wat op kaolinet geadsorbeer word, isotopies uitruilbaar is, maar wanneer die fosfor deur wassing verdun word, raak sommige fosfate onuitruilbaar. Kafkafi *et al.* (1967) stel dat 'n vorm van mededinging vir adsorpsielokalisering voorkom by hoër konsentrasies - 'n toestand wat stewige adsorpsie verhoed. Ook beweer hulle dat by verdunning 'n mate van oppervlaktemobiliteit vir fosfaat-ione moontlik gemaak word. Hierdie oppervlaktemobiliteit veroorsaak dat fosfaat-ione na posisies kan beweeg waar hulle stewiger gebind word. Kafkafi *et al.* (1967) stel dit as 'n moontlikheid dat by laer konsentrasies waar hierdie stewige binding plaasvind, elke fosfaat-ioon selfs aan twee aluminium-ione (in die kristalraamwerk) oor 'n suurstofbrug geheg word.

Die resultate wat deur bogenoemde navorsers verkry is, dui daarop dat fosfaat-*desorpsie* meer ooreenstem met fosforvrylating op grondoppervlaktes as met die oplossing van P-verbindings. 'n Verdere aanduiding ter ondersteuning van die oppervlakte-adsorpsieteorie is dat 'n groot proporsie van die vasgelegde fosfor in grond geredelik uitruilbaar is met ander ione soos silikate en fluoriede (Bray & Kurtz, 1945; Easton, 1969). Ander ione soos arsenaat, sitraat en bikarbonaat ruil ook uit met vasgelegde fosfate in grond- en kleisisteme (Dean & Rubins, 1947; Nagarajah *et al.*, 1968). Fosforvaslegging is ook tot 'n mate omkeerbaar ten opsigte van pH (as gevolg van OH-ioonkonsentrasie) in grond (Murrman & Peech, 1969) asook in kaolinet, gibbsiet en pseudoboehmiet (Muljadi *et al.*,

1966). Hierdie navorsingsresultate asook dié van Mattingly en Talibudeen (1960) en Kafkafi *et al.* (1967) bevestig die siening dat P-vaslegging 'n adsorpsiereaksie is en nie 'n presipitasieproses nie. As dit net presipitasie was, sou geredelike uitruiling nie plaasgevind het nie.

By die bestudering van oppervlakte-adsorpsiereaksies kan onderskei word tussen twee soorte adsorpsie, naamlik nie-spesifieke of fisiese adsorpsie en spesifieke of chemiese adsorpsie (*chemisorption*). Nie-spesifieke of fisiese adsorpsie word gewoonlik geassosieer met lae aantrekkingskragte. Spesifieke adsorpsie (*chemisorption*) word met sterker aantrekking geassosieer (Barrow, 1961). Die bindingskragte waarmee P in seskwioksiedgrond aangetrek word, word algemeen beskou as sterk genoeg om dié proses te klassifiseer as chemiese adsorpsie.

Hierdie stelling word geïllustreer deur P-sorpsie te vergelyk met die adsorpsie van ander ione op grondkolloïde. As daar byvoorbeeld gekyk word na PO_4^{3-} , Cl^- en NO_3^- -ione wat in grond voorkom, sien ons dat Cl^- en NO_3^- -ione afgestoot word deur negatief gelaaide grondkolloïde. Hierdie verskynsel kan dus beskryf word as negatiewe adsorpsie (De Haan, 1965) terwyl fosfaat deur byvoorbeeld goethiet aangetrek word, ongeag die positiwiteit of negatiwiteit van die netto lading (Hingston *et al.*, 1967). Nie-spesifiek aangetrokke ione soos NO_3^- (vgl. Hingston *et al.*, 1967) en Cl^- (vgl. Nagarajah *et al.*, 1968) asook relatief sterk aangetrokke ione soos SO_4^{2-} (vgl. Easton, 1969) is almal oneffektief om fosfaatsorpsie op seskwioksiedminerale te blokkeer. Ione wat onoplosbare verbindings of sterk kompleksverbindings met yster en aluminium vorm, byvoorbeeld sitrate, fluoriede en ferrosianied, is in staat om fosfaatsorpsie effektief te blokkeer op

seskwioksiedminerale (vgl. Dean & Rubins, 1947; Leaver & Russell, 1957; Nagarajah *et al.*, 1968).

Dat fosfaatvaslegging in grond 'n adsorpsieproses is, laat dus geen twyfel nie. Dat dit die enigste proses is wat 'n rol speel by fosforvaslegging, kan egter nie sonder meer aanvaar word nie.

2.4.2 Fosforvaslegging as 'n presipitasieproses

Die uitgangspunt dat P-vaslegging in grond 'n presipitasieproses is, veronderstel die vorming van fosfaatminerale in die grond. Voorbeelde van hierdie fosfaatminerale wat gevorm word, is strengiet ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) of variskiet ($\text{Fe PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), asook hidroksieapatiet ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$) (vgl. De Sigmond, 1907; Cole & Jackson, 1950; Haseman *et al.*, 1950; Low & Black, 1950; Clark & Peech, 1955; Kittrick & Jackson, 1955; Hemwall, 1957; Wright & Peech 1960; Chakravarti & Talibudeen, 1962; Juo & Ellis, 1968; Grobler, 1970). Genoemde navorsers het almal die fosfaattoeganklikheidsprobleem benader vanuit 'n oplosbaarheidsprodukbeskouing. Wild (1950) maak die stelling dat die verskil tussen presipitasie en chemiese adsorpsie baie klein en moeilik onderskeibaar is.

Haseman *et al.* (1950), Low en Black (1950), Kittrick en Jackson (1955) asook Hemwall (1957) lewer direkte bewys dat fosfaatkristalle in grondsisteme neerslaan. Hierdie kristalneerslag impliseer die vorming van yster- en aluminiumfosfate in die grondsisteme. Die toestande waaronder hierdie navorsers hul eksperimente uitgevoer het, was egter nie 'n getroue weergawe van toestande wat heers in gemiddelde grondoplossings nie,

aangesien hulle baie hoë fosfaatkonsentrasies of buffers vir lae pH-toestande gebruik het.

Hsu (1965) kon geen bewys vind vir die vorming van kristalagtige minerale in mengsels van AlCl_3 -, NaH_2PO_4 - en NaOH -oplossings wat hy ses maande lank verouder het nie. In 'n vroeër ondersoek het Hsu (1964) aangetoon dat variskiet sowel as sintetiese yster- en aluminiumfosfate onstabiel is in die teenwoordigheid van matige suur grond. Hy maak dus die afleiding dat dit onwaarskynlik is dat die presipitasie van hierdie verbindings verantwoordelik is vir P-vaslegging in hierdie tipe grond.

Die navorsers wat voorkeur gee aan die gedagte dat presipitasie die proses is waardeur fosfaat in die grond neergeslaan word (byvoorbeeld Wright & Peech, 1960; Chakravarti & Talibudeen, 1962), maak dikwels die bewering dat die oplosbaarheidsprodukte van bekende Fe- en Al- fosfate en ioonprodukte wat in sekere gronde aangetref word, baie ooreenstem. Hierdie ooreenstemming is egter nie 'n genoegsame bewys vir die bestaan van hierdie bekende Fe- en Al-fosfate in die grond nie (Taylor & Gurney, 1965; Bache, 1964). Laasgenoemde navorsers het deur 'n wye reeks ewewigstoestande in grondsisteme te skep aangetoon dat hierdie toestande nie noodwendig aanleiding gee tot die verwagte presipitasie of oplossingsreaksies van ooreenstemmende Fe- of Al- fosfaatverbindings nie. Bache (1963) het die oplosbaarheid van variskiet en strengiet by verskillende pH-waardes bestudeer. Hy het tot die gevolgtrekking gekom dat variskiet slegs in uiters suur gronde in ewewig met die oplossingsfases kan kom. Ook het hy bevind dat die waarskynlikheid dat ewewig met strengiet bereik kan word, feitlik nie bestaan nie.

Waar adsorpsie beskou kan word as 'n proses wat aanleiding gee tot die netto akkumulاسie van stowwe op 'n tussenvlak (*interface*), kan presipitasie beskou word as 'n akkumulاسieproses van stowwe om 'n nuwe bruto soliede fase te vorm (Sanyal & De Datta, 1991). Albei hierdie prosesse veroorsaak 'n verlies van stowwe uit die oplossingsfase. Volgens Sposito (1984) is adsorpsie 'n tweedimensionele proses terwyl presipitasie as 'n driedimensionele proses beskou kan word.

Lin *et al.* (1983) het waargeneem dat die P-adsorpsie in grond dieselfde meganisme op molekulêre vlak insluit as die meganismes wat betrokke is by die vorming van 'n afsonderlike fase van yster-, aluminium- of kalsiumfosfate (vergelyk die siening van Hsu, 1965). Elk van genoemde verbindings is die resultaat van die aantrekkingskrag tussen P en byvoorbeeld Fe of Al. Hierdie navorsers huldig die mening dat adsorpsiemeganismes oorheers by lae P-konsentrasies terwyl presipitاسiemeganismes oorheers by hoër P-konsentrasies in grond.

Ryden en Pratt (1980) beklemtoon die verskil tussen sorpsie en presipitasie. Sorpsie vereis dat die struktuur van die sorbent onveranderd bly namate die sorpsieproses vorder, selfs al verminder die oppervlakte-aktiwiteit. Hierdie toestand gee aanleiding tot die instandhouding van hoër konsentrasies in oplossing by 'n hoër mate van oppervlaktebedekking as wat die geval is by 'n lae mate van oppervlaktebedekking. By die presipitasieproses bly die oppervlakte-aktiwiteit egter konstant.

Waar gemengde presipitasies voorkom as nie-homogene soliede fases, met een komponent beperk tot 'n dun buitelaag as gevolg van swak diffusie (Sposito, 1984), is dit baie moeilik

om te onderskei tussen die twee prosesse. 'n Verdere komplikasie kom voor by grond as gevolg van die homogene presipitasie van nuwe soliede fases op die oppervlaktes van bestaande soliede fases en op die oppervlaktes van verwerende soliede fases. Hierdie bestaande soliedefase-oppervlaktes verskaf hegtingsplek vir die vorming van meer stabiele fases wat chemies gevorm is (Sposito, 1984). Fosfaataktiwiteit in waterige grond-ekstrakte is ook gekorreleer met verskillende oplosbaarheidsisoterme. Hierdie isoterme is gekonstrueer deur gebruik te maak van die verskillende oplosbaarheidsproduk-konstantes van Fe-, Al- en Ca-fosfate (Lindsay *et al.*, 1959; Murrmann & Peech, 1969; Jensen, 1971; Talibudeen, 1974). Hierdie oplosbaarheidsisoterme toon aan dat variskiet en strengiet die mees waarskynlike fosfaatminerale in suur gronde is, terwyl kalsiumfosfate die P-konsentrasies in die grondoplossings van alkaliese gronde oorheers. Terwyl kalsium-P-minerale soos apatiet onstabiel is in suur toestande, is variskiet en strengiet oplosbaar by hoër pH-waardes. By pH hoër as 6.5 begin fosfate neerslaan as Ca-fosfate (Haynes, 1984). As gevolg van die besonder lae oplosbaarheidstempo van Fe-, Al- en Ca-fosfate in gronde (Murrmann & Peech, 1969) is dit onwaarskynlik dat variskiet en Ca-hidroksie-apatiet die P-konsentrasie in grondoplossings oorheers. Hierdie aanname word gemaak al is genoemde minerale die finale reaksieprodukte van die toegediende P in suur en alkaliese gronde respektiewelik.

Verdere beperkings op die oplosbaarheidsisoterm benadering is aangetoon deur Ryden en Pratt (1980). Die pH-waardes en P-konsentrasies van grondekstrakte oor 'n pH-reeks van 4.0 tot 7.5 skyn onafhanklik te wees en stem nie ooreen met enige spesifieke oplosbaarheidsisoterm nie. In 'n studie van die interaksie van natuurlik voorkomende goethiet-oppervlaktes met verdunde KH_2PO_4 -oplossings is aangetoon dat P-retensie deur yster-

oksiede primêr die gevolg is van die presipitasie van die mineraal griphiet en nie as gevolg van adsorpsie nie. P-retensie kan plaasvind hetsy as gevolg van presipitasie alleen of in samehang met 'n penetrasie na dieper lae van oppervlakgeadsorbeerde P (Martin *et al.*, 1988). Nanzyo (1986) het tot die gevolgtrekking gekom dat P-sorpsie plaasgevind het by hoë pH, op ysterhidroksiediel in die vorm van 'n binukleêre oppervlakkompleks wat vergelykbaar is met die P-sorpsie wat op goethiet plaasvind. Die aanvanklike reaksieprodukte van bemestingstof - P in gronde soos hierbo bespreek, is waarskynlik metastabiel en kan moontlik heroplos in grondoplossings met veranderde toestande. 'n Verdere herpresipitasie van meer stabiele reaksieprodukte is ook moontlik. Selfs al sou sulke meer stabiele produkte gevorm word, is dit onwaarskynlik dat hulle P-konsentrasie in die grondoplossing sal oorheers (Ryden & Pratt, 1980).

Wanneer kalk toegedien word aan gronde wat aanvanklik hoog is in uitruilbare aluminium, word vars gepresipiteerde amorfe aluminiumhidroksiepolimere gevorm. Hierdie polimere kan onafhanklik voorkom of dit kan as 'n bedekking op kolloïdale gronddeeltjies 'n nuwe hoogs aktiewe adsorpsie-oppervlakte skep (Haynes, 1983). Gevolglik word P-adsorpsie met bekalking tot 'n pH van 6.5 verhoog (Friesen *et al.*, 1980; Haynes & Ludecke, 1981; Naidu *et al.*, 1990). Le Mare en Leon (1989) stel dat die effek van Al, tesame met organiese materiaal in 'n suur grondsoort wat ryk is aan organiese materiaal, ook in aanmerking geneem moet word by die bepaling van die effek van kalk in sulke grond. Die bekalking van sulke gronde mag die ontbinding van die organiese materiaal aanhelp en sodoende word Al vrygestel wat met P verbind. Die Al verbind ook met hidroksiel-ione om Al-OH- presipitate te vorm wat P adsorbeer. Haynes (1983) en Friesen *et al.* (1980) het egter vasgestel dat wanneer sulke bekalkde gronde aan droë lug blootgestel word, dit

die kapasiteit vir verdere P-sorpsie verlaag. Skynbaar verander droë lug en die gepaardgaande uitdroging die oppervlakteladingseienskappe van die grond (Haynes, 1983). Die vorming van amorf hidrosie-aluminiumfosfate vind plaas as gevolg van die reaksie van aluminiumversadigde montmorilloniet en fosforsuur, wat 'n belangrike grondbemestingstofproduk is. Die vorming van hierdie hidrosie-aluminiumfosfate is ook waargeneem deur Webber (1978) asook deur Kodama en Webber (1975). Bogenoemde produk is dikwels 'n goeie P-bron vir plante. Die bekalking van 'n suur grondsoort wat hoog is in uitruilbare aluminium kan ook die vorming van hidrosie-aluminiumfosfate versnel (White & Taylor, 1977). Sims en Ellis (1983a) het aangetoon dat die Al-OH-fraksie in hoogs verweerde suur grond wyd variërende kapasiteite het om P te laat neerslaan, afhangende van die graad van polimerisasie en/of die kristallasie van die Al-OH-verbindings.

Hoewel presipitasie dus dikwels gebruik word om P-interaksie met grond te beskryf, skyn dit asof die oppervlakte-reaktiewe amorf aluminiumhidrosiede, ysteroksiede, en tot 'n mindere mate hul kristallyne vorm, die proses van P-vaslegging oorheers - en nie die Al^{+3} - en Fe^{+3} -ione in oplossing nie (Ram & Rai, 1987; Syers & Ru-Kun, 1989). In alkaliese gronde is dit meer waarskynlik dat verskillende vorms van kalsuimfosfate die P-konsentrasie in die grond sal oorheers (Sanyal & De Datta, 1991). Selfs al is die presipitasie van verskillende P-verbindings die kontrolefaktor in gronde, is die oplosbaarheidsproduk-isoterme slegs bruikbaar om die tipe P-verbinding te beskryf wat na verwagting die P-konsentrasie in grondoplossing by ewewig oorheers (Olsen & Khasawneh, 1980). Hierdie isoterme kan nie 'n antwoord gee ten opsigte van die hoeveelheid van sulke komponente nie en dus van die reserves van die oplosbare P nie.

Die reserwes van die oplosbare P is van uiterse belang vir plantopname studies (Sanyal & De Datta, 1991).

2.4.3 *Faktore wat fosforsorpsie beïnvloed*

Daar is baie faktore wat P-sorpsie in grond beïnvloed. Die belangrikste faktore waarvan die invloed reeds spesifiek bestudeer is, is klei-inhoud, organiese materiaal, Fe- en Al-oksiede en hidroksiede sowel as pH (Sanyal & De Datta, 1991).

2.4.3.1 Klei-inhoud

'n Betekenisvolle korrelasie van P-sorpsieparameters met klei-inhoud is reeds aangetoon deur verskeie navorsers (Fox & Kamprath, 1970; Ayodele & Agboola, 1981; Dolui & Gangyopadhyay, 1984; Johnston *et al.*, 1987; Longanathan *et al.*, 1987; Solis & Torrent, 1989; Wada *et al.*, 1989; Bennoah & Acquaye, 1989; Johnston *et al.*, 1991). Hierdie korrelasie is moontlik 'n goeie aanduiding van die effek wat die soortlike oppervlakte van kleideeltjies op sorpsie het. Kleisoorte, spesifiek 1:1-laagklei kan P-sorpsie egter sterk beïnvloed, veral in tropiese gronde met 'n lae pH, waar dit verwag kan word dat die aktiwiteit van Fe en Al hoog is. Sanyal *et al.* (1990) toon aan dat daar hoë korrelasies bestaan tussen pH, klei-inhoud, koolstofinhoud, aktiewe Fe (vry FeO), KUK, en uitruilbare Al vir gronde met 'n hoë P-vasleggingskapasiteit (soos in Suidoos-Asië).

Yster- en aluminiumhidroksiede is in hierdie gronde teenwoordig as dun bedekkingslagies op die oppervlaktes van die kleimineraal (Greenland *et al.*, 1968; Haynes, 1983). Hierdie bedekkingslagies (*coatings*) bevat aansienlike hoeveelhede fosfaat.

2.4.3.2 Organiese materiaal

Verskeie navorsers het betekenisvolle positiewe korrelasies tussen grond-organiese materiaal en P-sorpsie aangetoon (Singh & Tabatabai, 1977; Mizota *et al.*, 1982; Bennoah & Acquaye 1989; Sanyal *et al.*, 1990). Die rol wat organiese materiaal in die verhoging van P-sorpsie in grond speel, is dikwels toegeskryf aan die stabilisasie van grondorganiese materiaal deur "vry" seskwioksiedes (Bennoah & Acquaye, 1989). Hulle toon ook aan dat yster en aluminium wat verbind is met organiese materiaal, baie meer P kan adsorbeer as dieselfde hoeveelheid vry Fe_2O_3 en Al_2O_3 . Harter (1969) verskil egter van die bevinding dat organiese materiaal en P in die grond deur dieselfde meganismes geadsorbeer word. Hy suggereer dat P moontlik direk bind met organiese materiaal deurdat die P organiese hidroksielgroepe kan verplaas.

Die verskynsel dat P-sorpsie verlaag word deur organiese materiaal wat in die grond is, is egter ook al waargeneem (Yuan, 1980; Sibanda & Young, 1986; Anderegg & Naylor, 1988). Die verskynsel dat P-sorpsie verlaag word, kan moontlik verklaar word op grond van die kompetisie tussen organiese materiaal en P vir sorpsielokasies op byvoorbeeld yster- en aluminiumoksiede. Earl *et al.* (1979) het waargeneem dat sitrate, tartrate en

asetate (in hierdie orde) P-sorpsie in grond, sowel as in sinteties voorbereide yster- en aluminiumoksiedjel effektief onderdruk het. Ryden *et al.* (1987) het ook aangetoon dat behalwe vir die OH-ioon, anorganiese anione 'n beperkte vermoë het om met P te kompeteer vir sorpsielokaliteite in 'n ferrioksiedjel. Yuan (1980) ondersteun ook die siening dat sommige adsorpsielokaliteite vir P op kleideeltjies en organiese materie in gronde eenders is. Hierdie toestand gee aanleiding tot 'n kompetisie-effek.

In ooreenstemming hiermee het Sibanda en Young (1986) aangetoon dat humiensuur en fulviensuur sterk kompeteer met P vir adsorpsielokaliteite op goethiet by lae pH-waardes. Evans (1985) het aangetoon dat fitiensuur (*phytic acid*), wat in grondoplossings van 'n growwe tekstuur grond teenwoordig is, in staat was om P-sorpsie te verlaag. As fitiensuur in grondoplossings voorkom, is dit selfs moontlik dat hierdie onderdrukking van die P-sorpsie deur die suur, die loging van fosfate uit gronde met 'n growwe tekstuur kan veroorsaak.

2.4.3.3 Yster- en aluminiumoksiede en -hidroksiede

Ekstraheerbare (amorre) yster en aluminium is bewys as sommige van die belangrikste eienskappe waarmee P-adsorpsie in die meeste gronde vereenselwig kan word (Juo, 1981; Borggaard, 1983; Araki *et al.*, 1986; Wada *et al.*, 1989; Buchter *et al.*, 1989).

Die middel wat die mees algemeen aangewend word vir die ekstraksie van amorre yster- en aluminiumoksiede en yster- en aluminiumhidroksiede is ammoniumoksalaat. Dit is

bekend dat die oksalaatekstraksie die amorf en swak gekristalliseerde yster- en aluminiumoksiede oplos terwyl dit baie min of geen effek het op die goed gekristalliseerde fraksie van hierdie elemente in die kleimineraal nie (Sanyal & De Datta, 1991). Kristallyne ysteroksiede is relatief onaktief in P-sorpsie (Ryden & Pratt, 1980). Etileendiamien-tetra-asetaat (EDTA) is ook bekend as 'n ekstraksiemiddel vir amorf ysteroksiede en daar is gevind dat die fosfaatsorpsiekapasiteit van gronde verminder het na ekstraksie met EDTA. Hierdie vermindering word toegeskryf aan die verwydering van amorf ysteroksiede (Borggaard, 1983). Ryden en Pratt (1980) het aangetoon dat amorf yster- en aluminiumoksiede en yster en aluminiumhidroksiede, 10 tot 100 keer meer P adsorbeer as kristallyne yster- en aluminiumoksiede en yster en aluminiumhidroksiede. Hematiet en gibbsiet vertoon selfs tot byna 1000 keer meer P-sorpsie as kristallyne alumino-silikate en kalsiumkarbonate.

2.4.3.4 pH as faktor by fosfaatsorpsie

'n Sterk negatiewe korrelasie tussen die Freundlich-adsorpsiekonstante of die Langmuir-maksimum en pH is vasgestel deur Sanyal *et al.* (1990). Hierdie korrelasie word bevestig deur 'n hele aantal waarnemings deur ander navorsers (Adams & Odom, 1985; Bolan *et al.*, 1988; Mehadi & Taylor 1988).

'n Teenoorgestelde effek van pH is egter ook waargeneem ten opsigte van P-sorpsie in gronde (Sanyal & De Datta, 1991). Daar bestaan dus 'n aansienlike kontroversie ten opsigte van die effek van pH op P-sorpsie (Sanchez & Uehara, 1980; Probert, 1980;

Haynes, 1982; Barrow 1985; Barrow, 1987). 'n Afname in adsorpsie met 'n styging in pH is gerapporteer wanneer verdunde oplossings van NaCl en KCl vir die meting van P-adsorpsie gebruik word (Barrow, 1984). Wanneer CaCl_2 -oplossings gebruik is, is egter gevind dat die P-vaslegging by 'n grondsoort wat met kalk behandel is, toeneem het (Amarasiri & Olsen, 1973; Barrow 1984; Naidu *et al.*, 1990).

Dit is bekend dat vars gepresipiteerde yster- en aluminiumoksiede (by pH 6.5) vir die toename in P-sorpsie verantwoordelik is. Daar is ook gevind dat fosfaatadsorpsie op goethiet minder afhanklik is van pH wanneer CaCl_2 in plaas van NaCl as elektroliet gebruik word (Parfitt, 1978). Naidu *et al.* (1990) weer toon 'n toename in P-sorpsie aan by sterk suur gronde na kalktoediening en 'n styging van pH tot 5.5 of 6.0 en hoër. Hulle skryf die styging in P-sorpsie toe aan die vorming van onoplosbare kalsiumfosfaat-produkte. Smillie *et al.* (1987) veronderstel ook 'n chemiese verband tussen P-vaslegging en Ca in gronde. Volgens Barrow (1984; 1987) kan hierdie waarnemings verklaar word op grond van die effek van pH op die P-ioonspesies wat geadsorbeer word, sowel as die lading en elektrostatiese potensiaal van die wisselende ladingoppervlaktes (*variable charge surfaces*) wat P aantrek uit die grondoplossings.

Met die toename in pH verminder die lading en die elektrostatiese potensiaal van die positief gelaaide lokaliteite op die wisselende ladingsoppervlaktes van die gronddeeltjies. Hierdie proses het 'n vermindering in P-retensie tot gevolg (Sanyal & De Datta, 1991). Wanneer die pH verhoog word (> 5.0), word die konsentrasie van die gedeprotoneerde H_2PO_4^- (d.w.s. HPO_4^{2-})-ioon egter verhoog. Op hierdie stadium word die ioon beskou as die dominante P-adsorbeerder - byvoorbeeld op goethiet (Bowden *et al.*, 1980; Barrow,

1984) by pH wat selfs so hoog as pH 7 styg. Volgens Bowden *et al.* (1980) en Kwong *et al.* (1979) verminder amorf hidrosie-Al-oppervlaktes relatief stadig tot by pH 7, en met 'n verdere verhoging in pH verminder dit vinnig.

Die netto resultate van hierdie opponerende verskynsels word gewoonlik oorheers deur die aard van die elektroliet waarin die effek van die P-adsorpsie gemeet word (Sanyal & De Datta, 1991). Elektrolietkonsentrasie en die valensie van die katione affekteer die elektrostatiese potensiaal op die sorpsie-oppervlakte. 'n Verhoging in die konsentrasie van die elektroliet, veral as die kation polivalent is, veroorsaak dat die potensiaal op die oppervlakte minder negatief is (Bowden *et al.*, 1980; Barrow, 1987). Daarom is die effek van hoër pH op die vermindering van die P-sorpsie minder opvallend.

Met 'n verdunde oplossing van byvoorbeeld NaCl of KCl domineer die effek van die verminderde potensiaal egter by hoër pH en daarom verminder P-sorpsie wanneer die pH verlaag word. Die bekalking van grond kan P-sorpsie beïnvloed deur die verhoging van die Ca^{+2} -konsentrasie en die ioniese sterkte van die grondoplossing (Sanyal & De Datta, 1991).

2.5 Die meting van fosforsorpsie

Die mees algemene manier wat tans gebruik word om P-sorpsie uit te druk, is die gebruik van sorpsievergelykings of isoterme waarna reeds vroeër in hierdie studie verwys is.

Die bekendste isoterme wat tans gebruik word, is die volgende:

$$\text{Langmuir } y = A_1x/(a + B_1x)$$

$$\text{Freundlich } y = A_2x^{B_2}$$

$$\text{Tempkin } y = A_3 + B_3 \ln x$$

(Vgl. Henry *et al.*, 1990; Sanyal & De Datta, 1991.)

y en x is die mg P geadsorbeer kg^{-1} grond, en mg l^{-1} P in oplossing by ewewig, en A_1 , B_1 , A_2 , B_2 , A_3 en B_3 is die regressiekoëffisiënte. By die konstruksie van hierdie isoterme word verskillende konsentrasies P in oplossing met 'n bepaalde hoeveelheid grond in ewewig gebring. Gewoonlik word hierdie ewewig bereik by 'n bepaalde temperatuur, en in 'n oplossing van 0.01 M CaCl_2 . Hierdie ewewigstoestand moet vir ten minste ses dae duur en die oplossing moet periodiek geskud word (Fox, 1988).

2.5.1 Die Langmuir-adsorpsievergelyking

Daar is al baie pogings aangewend om P-sorpsiedata te pas op 'n eenvoudige Langmuir-vergelyking (Bache & Williams, 1971; Sims & Ellis, 1983b; Vig & Dev, 1984; Bennoah & Aquaye, 1989). 'n Goeie passing van die data is oor die algemeen gevind by 'n beperkte reeks en by lae konsentrasies ($< 15 \text{ mg l}^{-1}$). Sodra die data oor 'n wye reeks en hoër konsentrasies strek, wyk die verwantskap tussen mg kg^{-1} geadsorbeer en mg l^{-1} P in oplossing af van 'n reglynige kurwe. Hierdie afwyking impliseer dat die bindingsenergie nie konstant is nie; daar is dus nie 'n goed gedefinieerde sorpsiemaksimum nie. 'n Moontlike rede vir hierdie afwyking is die migrasie van geadsorbeerde P na sub-

oppervlaktelae en die vorming van kristallyne Fe- en Al-oksiede en Fe- en Al-hidroksiede. Dit is ook onwaarskynlik dat adsorpsie, veral by hoër konsentrasies, 'n enkel molekulêre laag sal vorm (Sanyal & De Datta, 1991). Olsen en Khasawneh (1980) beweer dat by hoër konsentrasies een of ander tipe oppervlaktestruktuur moet vorm.

Ten einde hierdie onreglynigheid te akkommodeer, het verskeie navorsers allerhande modifikasies van die eenvoudige Langmuir-vergelyking voorgestel. Gunary (1970) stel byvoorbeeld voor dat 'n addisionele vierkantswortelterm vir konsentrasie ingesluit word. In sommige gevalle kan die data ten beste gepas word op twee reguit lyne wat mekaar sny (*intersecting straight lines*). Hierdie voorgestelde modifikasies word gesien as 'n aanduiding dat daar meer as een soort sorpsielokaliteit op die adsorbent bestaan (Sanyal & De Datta, 1991). Bevredigende ooreenstemming met eksperimentele data is verkry deur navorsers soos Syers *et al.* (1973), Ram *et al.* (1987) en Mehadi en Taylor (1988) deur gebruik te maak van 'n tweefase Langmuir-vergelyking. Hierdie navorsers postuleer dat die twee fases verskillende bindingsenergie- en adsorpsiemaksima voorstel. Ryden *et al.* (1977) stel dat daar drie tipes adsorpsielokaliteite bestaan wat baie van mekaar verskil ten opsigte van reaksie-energie. Vir die eerste twee lokaliteite noem hy chemiese sorpsiemeganismes en as moontlikheid vir die derde lokaliteit noem hy fisiese sorpsiemeganismes. 'n Belangrike argument ten gunste van 'n tweefase- of driefase-Langmuir-vergelyking (Ryden & Pratt, 1980) is dat sorpsie veral by hoër konsentrasies baie ooreenstemmend is. Hierdie ooreenstemming vir 'n wye reeks gronde, sowel as vir Al- en Fe-oksiede en Al- en Fe-hidroksiede voorsien 'n bruikbare basis vir die bestudering van P-sorpsie in grond.

Barrow (1978) daarenteen bevraagteken die noodsaaklikheid om meer as een soort sorpsielokaliteit vir grond-P te postuleer. Hy stel dat die waargenome afwykings by die Langmuir-isoterm die gevolg is van die feit dat die bindingsenergie 'n afnemende funksie is van toenemende oppervlakteversadiging deur geadsorbeerde P.

'n Ernstiger kritiekpunt ten opsigte van die geldigheid van die voorgestelde twee- (of drie-)fase Langmuir-isoterm as 'n model vir P-sorpsie in grond word geopper deur Sposito (1982). Hy toon aan dat as die distribusiekoëffisiënt vir 'n geadsorbeerde ioon in 'n grondsoort 'n begrensde (*finite*) verminderende funksie is van die hoeveelheid ioon wat geadsorbeer is, en dit na nul gëekstrapoleer word, kan die sorpsie-isoterm altyd matematies voorgestel word deur 'n tweefase-Langmuir-vergelyking, wat onafhanklik is van die chemiese meganismes van die sorpsie van die ioon.

2.5.2 Die Freundlich-adsorpsievergelyking

Net soos die Langmuir-vergelyking is ook die Freundlich-vergelyking baie algemeen gebruik om P-sorpsie in grond te beskryf (Mead, 1981; Le Mare, 1982; Polyzopoulos *et al.*, 1985; Torrent, 1987; Shaviv & Sachar, 1989; Buchter *et al.*, 1989). Sommige navorsers heg minder waarde aan die Freundlich-vergelyking omdat dit nie 'n adsorpsiemaksimum aandui nie, terwyl dit juis die waarde is waarin grondkundiges primêr geïnteresseerd is. Verder veronderstel hierdie vergelyking 'n eenvormige bedekking van die sorpsieoppervlakte van die adsorbent en dus 'n eksponentsiële afname van bindingsenergie wat, soos reeds bekend is, nie altyd die geval is nie (Ozanne & Shaw, 1968). Desnieteenstaande kan die Freundlich-koëffisiënt (A) beskou word as 'n

hipotetiese indeks van P wat uit 'n oplossing geadsorbeer is. Sanyal *et al.* (1990) het in 'n onlangse studie 'n hoë korrelasie gevind tussen die Freundlich-koëffisiënt (A) en die Langmuir-adsorpsiemaksimum.

Wat belangrik is om in gedagte te hou is dat die implikasie van hierdie vergelyking, naamlik dat die bindingsenergie eksponensieel afneem met toenemende oppervlaktebedekking, nader aan die realiteit is as wat die aanname is by die eenvoudige Langmuir-vergelyking, naamlik dat die bindingsenergie konstant is - veral in 'n lae konsentrasiegebied (Sanyal & De Datta, 1991).

Een van die belangrikste probleme by die gebruik van die Freundlich-vergelyking is hoe om te onderskei tussen P wat reeds op die adsorbent teenwoordig is (residuele P) en die P wat in die grondoplossing toegevoeg is. Om hierdie probleem te behandel, het Barrow (1978) die residuele P voorgestel as Q en die vergelyking soos volg geskryf:

$$y + Q = A_f x^{B_f}$$

$$\text{of } y = A_f x^{B_f} - Q$$

Nadat die Langmuir-, die Tempkin- en die Freundlich-isoterme vergelyk is vir die beskrywing van 14 verteenwoordigende gronde in Griekeland, het Polyzopoulos *et al.* (1985) gevind dat die Freundlich- en die tweefase-Langmuir-vergelyking beter waardes gee. Omdat die Freundlich-vergelyking eenvoudiger is, word daaraan voorkeur gegee.

2.5.3 Die Tempkin-adsorpsievergelyking

Hierdie vergelyking is gebaseer op die aanname dat die bindingsenergie lineêr afneem namate die oppervlaktebedekking toeneem. Die konsentrasie-afhanklikheid by hierdie vergelyking is kompleks, maar vir matige oppervlaktebedekkings word die vergelyking soos volg geskryf:

$$\frac{x}{b} = \frac{RT}{a} \ln A_c$$

(Bache & Williams, 1971.)

Volgens hierdie vergelyking is A en a regressiekoëffisiënte, R is die universele gaskonstante en b is die Langmuir-adsorpsiemaksimum. Volgens bogenoemde vergelyking behoort 'n grafiese voorstelling van x teenoor $\log c$ 'n reguit lyn te lewer. Vir baie gronde is daar egter matig geboë lyne in plaas van reguit lyne gevind (Fox & Kamprath, 1970; Bache & Williams, 1971; Le Mare, 1982; Rao *et al.*, 1983; Roy & De Datta, 1985; Russell *et al.*, 1988). Oor 'n wyer reeks konsentrasies was die ooreenstemming met eksperimentele data egter oor die algemeen beter as dié wat verkry is met die Langmuir-grafieke. Die Tempkin-grafiek stel 'n mens in staat om die relatiewe P-adsorpsiekapasiteite van verskillende gronde met mekaar te vergelyk (Sanyal & De Datta, 1991).

Daar moet egter 'n mate van versigtigheid aan die dag gelê word met die gebruik van adsorpsievergelykings om P-bemestingstofbenodigdhede te bereken op grond van die hoeveelhede wat benodig word om P in die grondoplossing tot 'n voorafbepaalde vlak te

verhoog (Kamprath & Watson, 1980; Diamond, 1985). Hierdie benadering neem slegs die intensiteitsfaktor vir grondoplossing P in ag, terwyl ander faktore wat P-opname deur wortels affekteer, verontagsaam word (Olsen & Khasawneh, 1980). Een voorbeeld is die bufferkapasiteit van grond en die vloeï van opgeloste P na die wortelsone. Verder is hierdie metodes van minder waarde as die hoeveelheid P - wat reeds in die grond teenwoordig is - relatief groot is in verhouding tot die hoeveelheid wat geadsorbeer is (Sanyal & De Datta, 1991). Om hierdie probleem te oorkom het Barrow (1978) voorgestel dat by die vereiste konsentrasie eerder die helling van die adsorpsiekurwe gemeet moet word as die hoeveelheid wat geadsorbeer is. Die helling sal onafhanklik wees van die hoeveelheid P wat oorspronklik teenwoordig was. Deur die helling te gebruik, word belangrike informasie bekom ten opsigte van die adsorpsiebufferkapasiteit van die grond wat die beskikbaarheid van die plantvoedingstof beheer (Holford, 1979; 1988; Bowman & Olsen, 1985).

2.5.4 *Meganistiese modelle*

Al sou gevind word dat 'n sorpsievergelyking eksperimentele sorpsiedata goed akkommodeer, dui dit nie die werklike meganisme van die sorpsieproses in grond aan nie. 'n Meganistiese model vir die beskrywing van P-sorpsie word dus dikwels verkies bo 'n empiriese vergelyking (Sanyal & De Datta, 1991).

Vordering is reeds gemaak met die gebruik van meganistiese modelle vir die beskrywing van P-sorpsie deur Al- en Fe-oksiede en die P-sorpsie deur gronde. Hierdie tipe modelle is krities bespreek deur Morel *et al.* (1981) en Sposito (1984). Die veranderlike

ladingmodelle (*variable charge models*) soos ontwikkel deur Bowden *et al.* (1977; 1980) en uitgebrei deur Barrow (1983) beskryf die reaksie tussen fosfaat-ione en veranderlike ladingsoppervlaktes soos goethiet (Bowden *et al.*, 1980; Barrow *et al.*, 1980; Posner & Barrow, 1982; Bolan & Barrow, 1984), of ook die reaksie wat P-toediening op grond het. Barrow, (1983) gee 'n duidelike beskrywing van die effek van P-konsentrasie, pH, tyd van kontak en temperatuur. Die model verduidelik die skynbare gebrek aan omkeerbaarheid van die P-sorpsieproses in terme van 'n migrasie van P na suboppervlakgebiede van gronddeeltjies, asook in terme van die volgehoue stadige reaksie oor 'n lang tydperk (Sanyal & De Datta, 1991).

Hierdie meganistiese modelle stem beter ooreen met die eksperimentele data en met die waarnemings wat vroeër gelei het tot die veronderstelling dat twee of drie soorte P-sorpsielokaliteite op die oppervlakte van kleideeltjies bestaan. Ook stem hierdie modelle meer ooreen met die eksperimentele data as wat die enkelvoudige en die veelvoudige oppervlakte Langmuir-vergelykings daarmee ooreenstem. Die vernaamste verskilpunt van hierdie modelle met die eenvoudige adsorpsie-isoterme is dat die verandering in oppervlaktelading wat met P-adsorpsie gepaardgaan, grondige aandag in hierdie modelle kry (Sanyal & De Datta, 1991). Verder word die verspreidingspatroon van die geadsorbeerde spesies wat in die tussenfase gebind is ook in aanmerking geneem (Bowden *et al.*, 1977; 1980). Een nadeel is egter die teenwoordigheid van baie veranderbare parameters in hierdie modelle. Die veranderlike ladingsmodel van Bowden *et al.* (1977; 1980) bevat byvoorbeeld sewe veranderbare parameters.

Die sogenaamde konstante kapasitansmodel van Stumm *et al.* (1980), soos toegepas deur

Goldberg en Sposito (1984a; 1984b) vereis drie toegewysde waardes vir die protonasie en deprotonasie van oppervlaktehidroksielgroepe en kapasitans, asook drie veranderlikes vir die beskrywing van pH-afhanklike P-sorpsie by oksiedminerale. Hierdie model is ook in staat om die pH-afhanklikheid van P-sorpsie en die P-oppervlaktespesies in oksiedminerale en in gronde te voorspel (Goldberg & Sposito, 1984a; 1984b). Sanyal en De Datta (1991) beweer egter dat hierdie modelle dikwels nie geskik is vir die berekening van die P-sorpsiekapasiteite van gronde nie. Die maksimum P-sorpsie moet aangewys of verkry word deur ekstrapolasie (Bowden *et al.*, 1980; Goldberg & Sposito, 1984a; 1984b). Die klassieke Langmuir-, Freundlich- en Tempkin-vergelykings, elk met slegs twee parameters, is egter eenvoudig en word algemeen gebruik om P-sorpsie in gronde te beskryf.

2.5.5 Fosfaatpotensiale

Schofield (1955) stel dat die chemiese potensiaal van fosfaat in grond ($\frac{1}{2} pCa + pH_2PO_4$) 'n bruikbare maatstaf verskaf vir die bepaling van die beskikbaarheid van grondfosfate aan plante. Vir die bepaling van fosfaatpotensiaal word die samestelling van die grondoplossing vereenvoudig deur 'n dominante elektroliet soos $CaCl_2$ te gebruik om die grondoplossing te verdun. Die gebruik van bogenoemde elektroliet verlaag die konsentrasie van ander ione as Ca^{+2} en Cl^{-1} deur die onderdrukking van oplosbaarheid sowel as deur verdunning. 'n Verdere voordeel van hierdie metode is dat min of geen kalsiumchloriedkompleksverbinding gevorm word nie (Sillen & Martell, 1964).

Volgens White en Beckett (1964) is daar drie basiese aannames waarvan die toepassing van die formule afhang.

Eerste aanname: Die grond waarvan die potensiale bepaal word, moet voldoen aan die verhoudingswet soos uiteengesit deur Schofield (1947). Indien dit nie die geval is nie, sal die waarde van die potensiaal wat gemeet is, afhang van ander faktore as die hoeveelheid en vorm van die labiele fosfaat en kalsium in die grond. Ook sal die waarde van die potensiaal onderworpe wees aan onvoorspelbare variasie. Die verhoudingswet sal slegs toepaslik wees as die konsentrasie van die grondoplossing nie te hoog is nie. Die negatiewe ladingsdigtheid op die oppervlakte van die gronddeeltjies moet ook nie te laag wees nie.

"'n Implisiete voorwaarde vir die verhoudingswet is dat die labiele fosfaat- en kalsiumione wat die fosfaatpotensiaal in die grond beheer, op dieselfde oppervlaktes in die grond teenwoordig moet wees. As dit egter op ander oppervlaktes teenwoordig is, moet daar 'n konstante verskil in elektriese potensiaal tussen die twee soorte oppervlaktes wees." (White & Beckett, 1964:2.)

Tweede aanname: Die kalsiumpotensiaal in die soliede fase van die grond moet baie minder varieer as die fosfaatpotensiaal. Indien die potensiaal van tropiese gronde of van onbewerkte gronde of van landbougrond wat lank onder bewerking is, bepaal word, moet seker gemaak word dat die kalsiumstatus van die gronde nie te veel verskil nie.

Derde aanname: Die metingsproses moet nie die fosfaat- en kalsiumpotensiaal in die soliede fase wesenlik verander nie. Dit moet ook nie die potensiale van enige komplimentêre ione soos Fe^{+3} , Al^{+3} of OH^{-1} , wat ook die waarde van die aktiwiteitsproduk beïnvloed, verander nie.

Faktore wat 'n invloed het op die waarde van fosfaatpotensiale as maatstaf vir fosfaattoeganklikheid, sluit die volgende in: mikrobiese aktiwiteit, die droging en skudtyd van die grondmonsters (White, 1964). Hierdie faktore beïnvloed die verandering van die affiniteit van die adsorpsieposisies en die hoeveelheid labiele fosfaat wat teenwoordig is. Die verhoging of verlaging van fosfaatpotensiaal hang daarvan af of die relatiewe verhoging in die hoeveelheid labiele fosfaat groter of kleiner is as die gelyktydige verhoging in die aantal en affiniteit van die uitruillokaliteite op die gronddeeltjies. Die uitruillokaliteite word skynbaar nie beïnvloed wanneer die fosfaat verander van labiele na stabiele vorms nie (Beckett & White, 1964).

Beckett en White (1964) maak 'n onderskeid tussen isotopiese uitruillokaliteite en ander uitruillokaliteite wat hulle netto uitruillokaliteite noem (*net exchange sites*). Hierdie verskillende soorte uitruillokaliteite kom op verskillende tipes gronddeeltjies voor. Netto uitruillokaliteite kom voor in amorfe vorme van basiese fosfaatverbindinge, terwyl isotopiese uitruillokaliteite voorkom op die oppervlakte van kristallyne of mikro-kristallyne fosforverbindinge. Die effek van mikrobiese aktiwiteit op die heterogeniteit van die fosfaatpotensiaal asook die uitdroging van die grond kan aansienlik wees en behoort in aanmerking geneem te word in studies om die labiele fosfaatpoel in die grond te bepaal (Beckett & White, 1964).

Die fosfaatpotensiaalkonsep is deur verskeie navorsers toegepas met 'n variërende mate van sukses. Goeie korrelasies tussen plantopname en fosfaatpotensiale is aangetoon deur Barrow (1987) en Le Mare (1960). Rama Moorthy en Subramanian (1960) het egter gevind dat 'n "ewewigspotensiaal" beter gekorreleer het met plantrespons as Schofield (1955) se potensiaal. Wild (1964) het met voedingskultuuroplossings die fosfaatpotensiaal gevarieer deur die kalsium te verander maar nie die fosfaat nie. Hierdie metode het egter geen effek op die plantopbrengs gehad nie. Hy het egter goeie plantrespons gekry deur die fosfaatvoorsiening by konstante potensiaal te verander. Op grond van bogenoemde resultate maak Wild (1964) die afleiding dat dit eerder die fosfaatkonsentrasie is as die potensiaal wat belangrik is vir plantreaksie.

Oertli (1973) maak die stelling dat die goeie korrelasie wat verkry is tussen plantreaksies en die potensiaal in glashuiseksperimente die gevolg is van die feit dat fosfaatpotensiale bepaal is by redelik konstante kalsiumvlakke. Gevolglik is die enigste veranderlikes wat die potensiale geaffekteer het die fosfaatkonsentrasies.

Met die konstante kalsiumvlak en gevolglik ook die konstante pCa , word slegs 'n korrelasie tussen die plantreaksie en die pH_2PO_4 verkry. Die konstante pCa op die voorafgekoese vlakke het geen effek nie, maar verskuif slegs die zero-potensiaal wat in elk geval arbitrêr gekies word. Dit is dus duidelik dat indien die beperking deur 'n konstante pCa deurslaggewend is, en die pH_2PO_4 volgens die konsentrasie bepaal word, is die potensiaalbegrip niks meer as 'n gesofistikeerde naam vir konsentrasie nie (Oertli, 1973). Die voor- en nadele van die potensiaalkonsep word deur Oertli (1973) kortliks soos volg opgesom.

2.5.5.1 Voordele van die potensiaalkonsep

- * Die potensiaalkonsep is saaklik, ondubbelsinnig en universeel toepaslik.
- * Dit maak 'n duidelike onderskeid tussen intensiteit- en kapasiteitsfaktore in soverre die toeganklikheid van fosfor ter sprake is.
- * Die potensiaalkonsep is 'n maklik bepaalbare grootte, ten spyte van eksperimentele probleme wat nie onoorkombaar is nie.
- * Dit is van toepassing op 'n proses waar elektriese neutraliteit gehandhaaf word en die aktiwiteit van enkel-ione, waarvoor daar nie 'n aanvaarbare metode bestaan nie, nie bepaal hoef te word nie. Ten einde elektriese neutraliteit te handhaaf, moet daar vir elke anioon in die sisteem 'n ooreenstemmende katioon bestaan. Word 'n ioon dus uit 'n sisteem verwyder, moet dit deur 'n ander ioon met dieselfde lading uitgeruil word, of 'n ioon met 'n teenoorgestelde lading moet terselfdertyd verwyder word.

2.5.5.2 Nadele van die potensiaalkonsep

- * In 'n heterogene sisteem soos grond bestaan daar nie konstante verhoudings van katione soos byvoorbeeld Ca:K wat met fosfaat kan verbind nie.

- * Die oplosbaarheidskonstantes van kaliumfosfate verskil baie van byvoorbeeld dié van kalsiumfosfate. Wanneer veranderinge in die konsentrasieverhouding van die een kation ten opsigte van ander voorkom, sal dit ooreenkomstige veranderinge in fosfaatpotensiaal veroorsaak.
- * Die potensiaalkonsep is nie 'n genoegsame uitdrukking van die planttoeganklikheid van fosfor nie omdat dit nie die plantopnameproses behoorlik in ag neem nie.
- * Plantopname gaan gepaard met die uitruiling van katione en ook met die moontlike gelyktydige opname van ander katione en anione as fosfaat; dus kan ionaktiwiteite en gevolglik ook die oplosbaarheidskonstante wissel - 'n wisseling wat sodoende die potensiaal beïnvloed.

Die opnameproses van die plant moet in ag geneem word, aangesien dit eintlik die proses is waaraan die potensiaalkonsep moet beantwoord.

2.6 Relevante navorsing in Suid-Afrika

Dit is belangrik dat die plantbeskikbare fosfaat bepaal word met 'n betroubare ontledingsmetode wat goeie korrelasie toon met plantreaksie. Die motivering vir die gebruik van bepaalde ekstraksiemiddels in die verskillende grondontledingslaboratoria in die RSA is dikwels vaag en nie gegrond op definitiewe wetenskaplike ondersoeke nie. By navraag waarom 'n bepaalde metode by sekere laboratoria gevolg word, is antwoorde

soos die volgende verkry: "Dit is maar die metode wat van die begin af in hierdie laboratorium gebruik is" of "Dit is die metode wat die minste steurings veroorsaak".

In die meeste gevalle het die laboratoriums hulle ontledingsyfers van plantreaksie in veldproewe gekorreleer en is hulle om dié rede traag om te verander ten einde op 'n bepaalde gestandaardiseerde metode te konsentreer. Van der Merwe (1980) noem dat 'n opname wat aan die einde van 1978 gemaak is, getoon het dat 12 ekstraksiemiddels in die RSA ter sprake is. Volgens Pretorius (1991) word minstens 10 verskillende ekstraksie- en ontledingsmetodes vir fosfor in die RSA gebruik.

Van der Merwe (1980) gee 'n redelik volledige literatuuroorsig van korreleringswerk wat plaaslik en oorsee met fosforekstraksiemetodes uitgevoer is. Die Suid-Afrikaanse navorsers se werk wat deur hom aangehaal word, sluit die volgende name in: Du Plessis en Burger (1965); Snyman en Fölcher (1966); McGee *et al.* (1972); Eksteen (1973); Eloff en Laker (1976); Farina en Channon (1978) en Thompson (1978). Van der Merwe (1980) maak die gevolgtrekking dat dit voorkom asof water, verdunde suuroplossings, swak alkaliese oplossings asook uitruilhars oorweeg behoort te word indien daar na 'n standaardekstraheermiddel vir verwysings- en kommunikasiedoeleindes gesoek word.

Die harsmetode wat vir die eerste keer deur Amer *et al.* (1955) gebruik is, is met 'n groot mate van sukses gebruik met gronde in die Vrystaatstreek (Du Plessis & Burger, 1965). Tog word hierdie metode nie algemeen gebruik in die RSA nie. Daar is gevind dat die Bray 1-metode goed korreleer met die oesreaksie op die meeste suur en neutrale gronde. Volgens Van der Merwe (1980) kan die Bray 1-metode ook gebruik word vir gronde wat

klein hoeveelhede dolomitiese of kalsitiese kalk bevat. Hierdie metode behoort egter nie gebruik te word vir gronde wat meer as 2 % kalk bevat nie omdat die kalk die (swak) suur in die ekstraksiemiddel sodanig neutraliseer dat te min P geëkstraheer word. Die Olsen-metode word vir kalkryke gronde verkies. Daar is gevind dat die Olsen-metode goed met die oesreaksie korreleer by sowel kalkryke as nie-kalkryke grond. Die Olsen-metode het in die geval van kalkryke grond beter met die oesreaksie gekorreleer as met die Bray 1-metode. Die Olsen-metode word in die laboratorium van die Vrystaatstreek gebruik. Hierdie laboratorium hanteer baie monsters wat uit lae reënvalgebiede sowel as uit besproeiingsnedersettings langs die Vaal- en Oranjeriviere kom - grondmonsters wat relatief hoë pH-waardes toon. Die ontledingsyfers wat hierdie laboratorium kry, hou goed verband met die oesreaksie wat verkry is deur veldproewe (Snyman, 1994).

- ⇒ Die laboratoria van die Natalstreek gebruik weer die *isfei/ambic*-metodes omdat die meeste van die monsters wat hulle hanteer, hoogsverweerde gronde verteenwoordig - gronde wat baie Fe- en Al-verbindings bevat (Farina & Channon, 1978).

Die laboratorium van die Hoëveldstreek het vir 'n lang tyd Bray 2 as ekstraksiemiddel gebruik. Daar is egter gevind dat hierdie metode ook swak korreleer met plantprestasië in hierdie streek. Die hoofrede vir hierdie swak korrelasies kan waarskynlik toegeskryf word aan die feit dat hierdie ekstraksiemiddel baie fosfaat ekstraheer. Hierdie fosfaat is afkomstig van tri-kalsiumfosfaatresidu's wat ontstaan as gevolg van die bemesting met Langfos, 'n organiese rotsfosfaatkunsmis wat veral gedurende die afgelope twee dekades 'n baie gewilde fosfaatkunsmis in dié streek was.

Die gebruik van relatief suur ekstraksiemiddels soos Bray 1-, Bray 2- en die dubbelsuur North Carolina-metode is toenemend oneffektief gevind en gekritiseer. Dit is naamlik aangetoon dat hierdie ekstraksiemiddels en die North Caroline-metode nie gebruik kan word vir kalkryke of suur gronde wat onlangs met rotsfosfate bemes is nie. Op grond van hierdie probleme is die *ISFEI*-ekstraksiemiddel (Hunter 1974) voorgestel. Hierdie ekstraheermiddel is in die RSA aangepas deur Van der Merwe *et al.* (1984) en word die *ambic*-metode genoem. Die laboratorium van die Instituut vir Graangewasse gebruik bogenoemde metode. Hierdie laboratorium is nuut en gegewens wat met hul veldproewe verkry is, kon van die begin af met hierdie ontledingsyfer in verband gebring word. Goeie korrelasies is dan ook met oesreaksie verkry.

Hahne *et al.* (1988) het bevind dat wanneer Al-, Ca- en Fe-fosfate deur Bray 2- en *ambic*-ekstraksiemiddels geëkstraheer word, die Bray 2-oplossing groot hoeveelhede fosfor onttrek uit AlPO_4 en $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, en relatief kleiner hoeveelhede uit $\text{Fe}(\text{PO}_4)$. Die *ambic*-ekstraksiemiddel aan die ander kant, ekstraheer minder, maar meer konstante hoeveelhede fosfor uit al die fosfaatverbindinge. Wanneer CaCO_3 toegedien word aan grond, affekteer dit albei metodes maar om verskillende redes. In die geval van Bray 1, is die vermindering van ekstraheerbare P die gevolg van hoë pH-vlakke, terwyl met die *ambic*-ekstraksie die CaCO_3 -effek die gevolg is van Ca-kompleksering met EDTA.

Du Plessis (1978) het fosfaatgrondekstraksies geëvalueer en norme voorgestel aangesien die P-status van 'n boord dikwels nie betroubaar met behulp van blaarontledings bepaal kan word nie. Hy het gevind dat hars-ekstraheerbare grond-P hoogs betekenisvol

korreleer met die blaar P-inhoud vir sekere gewasse en swak korreleer met ander. Die korrelasie was ook gedurende sommige seisoene beter as in ander. Hy het gevind dat hars-ekstraheerbare grond-P positief aangewend kan word om die P-status van 'n boord te bepaal as dit aanvullend tot blaarontledings gebruik word. Hy het ook aangetoon dat verskeie faktore, byvoorbeeld grondtekstuur, oorspronklike P-status, tydsverloop na P-toediening en die hoeveelheid P wat toegedien is, 'n effek het op die hoeveelheid fosfor wat geëkstraheer word deur die hars. Hierdie faktore speel 'n rol wanneer besluit moet word hoeveel fosfaat nodig is om die hars-P-status van die grond met 'n sekere waarde te verhoog. Bogenoemde faktore het ook sterk gefigureer in die studie waarop hierdie proefskrif gebaseer is.

Meyer (1978) het die gemete reaksies na hoë P-bemestingstoedieningsvlakke aan sekere grondeienskappe gekoppel. Hy het aangetoon dat die P-adsorpsie-isoterm-benadering die voorspellingsnaukeurigheid van die bemestingsbehoefte van suur grond aansienlik verhoog. Hy maak die gevolgtrekking dat dit op grond van dié benadering moontlik is om gronde in hoë, matige en lae P-bindende kategorieë in te deel en bemestingsaanbevelings dienoreenkomstig aan te pas. Gronde met dieselfde Truog-P-vlak, maar met verskillende P-retensie-eienskappe sal nie noodwendig dieselfde P-aanbeveling nodig hê nie. Hy het ook gevind dat die ekstraheerbare P van geel en rooi gronde verskil - 'n waarneming wat ooreenstem met bevindings van Mohr (1975) en Pretorius (1991).

Pretorius (1991) het drie verskillende metodes vir die ekstraksie en bepaling van fosfor in grond vergelyk, naamlik die Bray 1-, die Bray 2- en die *ambic*-metode en gevind dat daar 'n goeie verwantskap tussen al drie metodes bestaan. Daar is ook gevind dat daar

baie min verskil bestaan tussen die effek wat twee fosfaatraers, naamlik monokal-siumfosfaat (superfosfaat) en mono-ammoniumfosfaat (MAP) op die ekstraheermiddels en die grond het. Om 'n keuse tussen hierdie twee draers te maak, moet die oorweging wat die deurslag gee, gegrond wees op ekonomiese oorwegings. Sy het gevind dat fosforvaslegging nie oorwiegend deur die pH van die gronde bepaal word nie maar dat ander grondeienskappe 'n meer beduidende rol gespeel het. Die grondeienskappe wat die grootste bydrae tot fosforvaslegging maak, is egter nie deur haar ondersoek nie.

Pogings om die hoeveelheid plantbeskikbare fosfaat in die grond deur middel van berekenings te verkry, word bespreek deur Kotze en Marais (1988). In dié geval is die plant self die ekstraksiemiddel. Moller en Mogenson (1953) het gevind dat die byvoeging van chemiese ekstraheermiddels die kolloïdale struktuur van die gronddeeltjies affekteer. Navorsers soos Larsen (1952) beweer daarom dat chemiese ekstraheermiddels die chemie van die grond tot so 'n mate verander dat dit te betwyfel is of die resultate wat so verkry word, verband hou met grond in sy natuurlike staat. Larsen (1952) was ongetwyfeld die eerste navorser wat bevind het dat indien radioaktief-gemerkte fosfaatbemesting aan die grond gegee word, die spesifieke aktiwiteitsanalise van plante wat in sulke grond groei, 'n konstante waarde sal gee as die isotopiese verdunning van die fosfaat wat aan die grond toegedien word, gemeet word. Die hoeveelheid fosfaat wat so gemeet word, word die L-waarde genoem. Die hoeveelheid fosfaat in die grond wat in ewewig is met die fosfaat in die grondoplossing word die E-waarde genoem. Die L-waarde en die E-waarde verskil volgens Kotze en Marais (1988) alleen in soverre die plant die fosfaat in die grondoplossing ekstraheer.

Die prosedure vir die skatting (*estimation*) van L-waardes is krities ondersoek deur Marais (1955) asook deur Marais *et al.* (1969) en Deist *et al.* (1971). Aangesien daar geredeneer kan word dat die bemestingstof wat aan die grond toegedien is 'n aparte entiteit bly en die plant gevolglik vanaf twee bronne gevoed word, naamlik (in die geval van fosfaat) van die residuele sowel as van die bemestingstoffosfaat, is die konsep van die A-waarde gebruik om die verhouding tussen dié twee bronne in terme van hul onderskeie beskikbaarheidsgraad aan te dui.

Ander Suid-Afrikaanse navorsers wat met radioaktief-gemerkte fosfaat gewerk het by die toepassing van die bogenoemde waardes was Deist (1961), Laker (1964), De Villiers en Laker (1966), Laker (1967) en Kotze (1981). Die studies van Laker (1967) was onder andere toegespits op gronde wat ook uit die gebied afkomstig is waar die monsters vir hierdie studie geneem is, naamlik in die Wesselsbrondistrik in die Suidwes-Vrystaat. Hy het gevind dat die L-waarde sowel as die P-sorpsie (S-waarde) van hierdie grond (<6 % klei) baie laag is. Hy kom tot die gevolgtrekking dat die lae S-waardes van hierdie grondsoort die rede is vir goeie oesreaksie, selfs met lae P-toedienings aan die grond. Die invloed van kleipersentasie sowel as die organiese materiaalinhoud op P-sorpsie is reeds bespreek. 'n Verklaring vir Laker (1967) se waarneming kan waarskynlik gevind word in die feit dat die grondmonsters wat hy vir sy studie gebruik het so 'n lae klei-inhoud gehad het. Hoewel hy nie in sy studie inligting verskaf ten opsigte van die organiese materiaalinhoud van die grond nie, meld hy dat sommige monsters van onbewerkte grond geneem is. Van sulke grond kan verwag word om relatief hoë organiese materiaal te hê - 'n toestand wat volgens Sanyal en De Datta (1991) P-sorpsie onderdruk.

Volgens Kotze en Marais (1988) asook Marais *et al.* (1969) hou die bepaling van die potensieel toeganklike voedingselemente groot belofte in vir Suid-Afrikaanse toestande. Sedert dié metode gepubliseer is, het dit egter nie byval gevind in roetine-ontledingslaboratoria nie, hoofsaaklik omdat spesiaal opgeleide personeel en spesiale fasiliteite benodig word.

2.7 Opsommende afleidings

- Adsorpsie sowel as die presipitasie van fosfaat speel 'n gesamentlike rol by fosfaatvaslegging in die grond.
- Hierdie reaksies vind nie plaas op 'n wyse of in 'n volgorde waar die een proses afloop voor die ander begin nie, maar verskeie reaksies vind gelyktydig plaas.
- Verskeie grondeienskappe staan onderling in verband met mekaar in soverre dit die sorpsie van fosfaat betref.
- Dit is onmoontlik om fosfaatsorpsie in definitief verskillende kompartemente te skei van adsorpsie en presipitasie; hierdie twee verskynsels oorvleuel mekaar oor 'n wye gebied.
- Die interafhanklikheid van grondeienskappe en adsorpsiefaktore wat 'n rol speel by fosforonttrekking uit 'n grondoplossing is sodanig dat geeneen van hierdie

faktore in isolasie, of met die uitskakeling van sommige faktore bestudeer kan word nie.

- Tot dusver is diepgaande ondersoeke gedoen waar goeie verklarings gevind is vir sekere verskynsels wat betrokke is by fosfaatsorpsie. Daar bestaan egter leemtes wat die voorspelling van die P-sorpsiegedrag van gronde betref. In besonder word meer kennis benodig ten opsigte van die tempo en hoeveelheid sorpsie van anorganiese P in verskillende gronde.
- Die sorpsievergelykings en -modelle wat tans beskikbaar is vir die meting en karakterisering van P-sorpsie het baie leemtes en vereis ingewikkelde en gekompliseerde ontledings wat nie op 'n roetinebasis uitvoerbaar is nie. Die effek van residuele P in gronde om die plantbeskikbare fraksies van toegediende fosfaat te voorspel moet nog verder bestudeer word.
- Met die ontwikkeling van die moderne rekenaar en rekenaarprogramme, kan studies van meer omvattende aard gedoen word. Met hierdie hulpmiddels kan al die bekende grondeienskappe wat moontlik 'n rol speel by P-sorpsie, gelyktydig in aanmerking geneem word.
- Om die ekstraheerbare (planttoeganklike) fosfaat te bepaal, word die *ambic*-metode aanbeveel vir die doeleindes van hierdie studie.

HOOFSTUK 3

KWANTIFISERING VAN FOSFORSORPSIEKURWE

3.1 Studiegebied

In hierdie studie wat daarop gemik is om die aard en omvang van fosforsorpsie in Suid-Afrikaanse gronde te kwantifiseer, is besluit om gronde te gebruik wat bekend is dat hulle 'n sterk fosforsorpsiekapasiteit het. Die gronde wat dus gebruik is, is volgens die binomiale grondklassifikasiesisteen van Suid-Afrika (MacVicar *et al.*, 1977) geklassifiseer as Hutton-, Avalon-, Clovelly- en Bainsvleivorms uit die Hoëveldstreek. Al hierdie gronde kom voor in die mielieproduserende gebiede van die Oos-Transvaal, Oos-, Noord- en Noordwes-Vrystaat, Wes- en Suidwes-Transvaal. In hierdie gebiede word bogenoemde grondvorme feitlik sonder uitsondering vir die produksie van mielies gebruik. Fosforbemesting op dié gronde is 'n algemene praktyk. Vir die doeleindes van hierdie studie is grondmonsters wat nog nooit voorheen bemesting ontvang het nie, en dus feitlik geen residuele fosfor bevat nie, nodig. Die rede hiervoor was om te verseker dat die monsters wat gebruik is se fosforsorpsiekapasiteit nie gedeeltelik opgehef is nie. Die monsters vir hierdie studie is daarom almal in die B2-horison geneem.

Die studiegebied waaruit die monsters kom, strek vanaf Schweizer-Reneke in die suidweste tot by Ermelo in die noordooste en vanaf Harrismith in die suidooste tot by Lichtenburg in die noordweste. Die jaarlikse reënval in die gebied neem toe van wes na

oos vanaf 550 mm (Schweizer-Reneke) tot 750 mm (Ermeio). Die kleipersentasie van die monsters dek 'n spektrum van so laag as 1.3 % tot so hoog as 37.9 % (Gronde 3.2). Met so 'n wisseling in reënval sowel as in kleipersentasie kan 'n mens ook 'n spektrum gronde verwag wat wissel van distrofiese tot eutrofiese gronde.

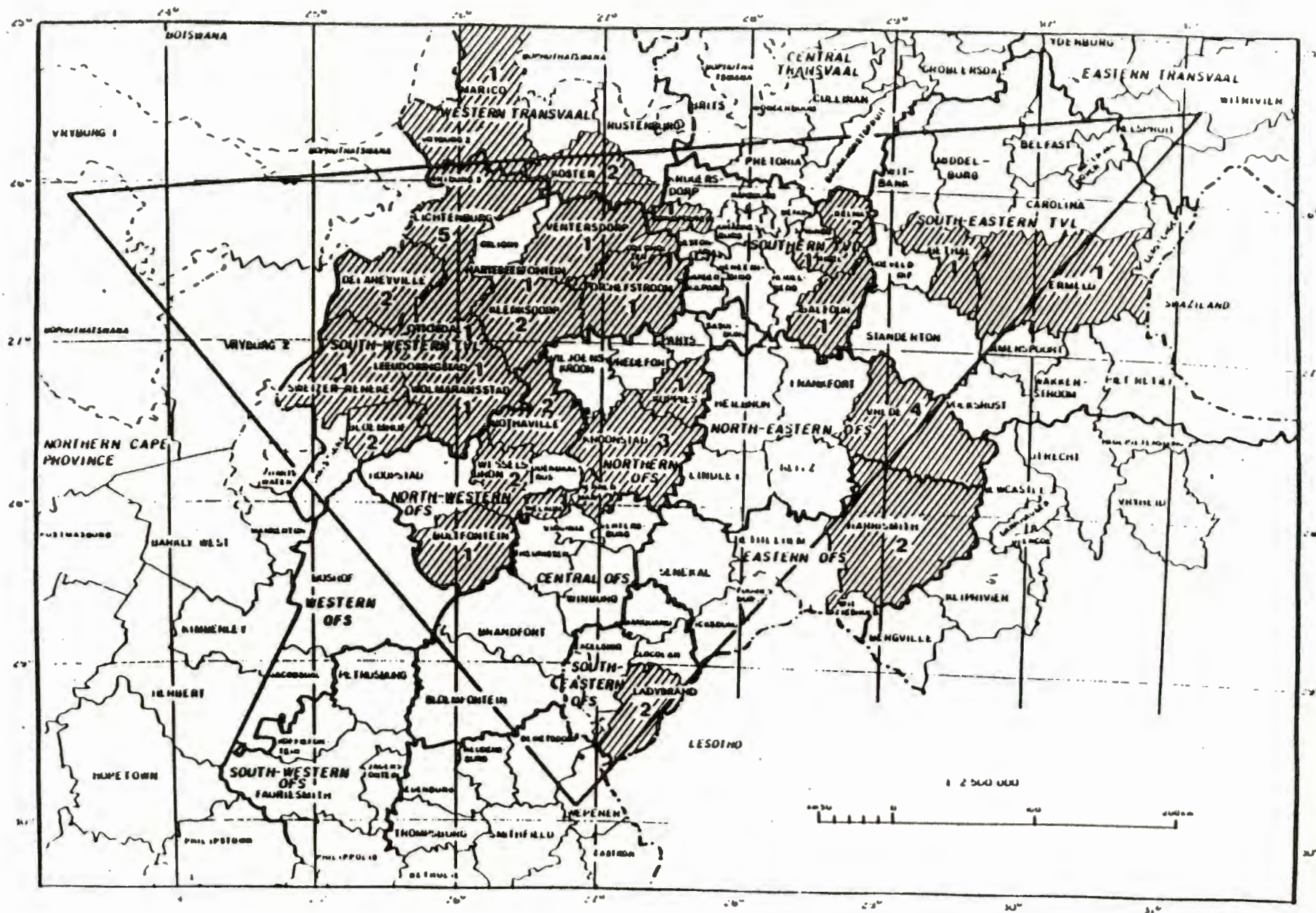
Grondmonsters is op 'n ewekansige wyse geneem sonder om groeperings te maak op grond van bepaalde eienskappe soos tekstuur, pH, KUK, ensovoorts. Ten spyte van bekende verskille in die fosforsorpsiekapasiteit van rooi en geel gronde (Mohr, 1975; Pretorius, 1991) is die kleur van die grond ook nie in aanmerking geneem by die keuse van die monsters nie. Die rede hiervoor is dat 'n sorpsievergelyking gesoek word wat toepasbaar is op dié gronde wat voorkeur kry vir mielieverbouing in die hele gebied, ongeag die verskille in chemiese en fisiese eienskappe.

3.2 Dataversameling

Vyftig grondmonsters uit die mielieproduserende streke van die hele Hoëveldstreek is versamel. Die distrikte waaruit die monsters afkomstig is, asook die grondvorme wat die monsters verteenwoordig, word aangetoon in Tabel 3.1. Die monsters is versamel tydens 'n landtipe-opname wat onderneem is deur die personeel van die Instituut vir Grond, Klimaat en Water van die Landbounavorsingsraad (vgl. Instituut vir Grond, Klimaat en Water, 1984).

Tabel 3.1 Die fosforinhoud (P) (*ambic*-ekstraksie), grondvorm en distrik van oorsprong van die grondmonsters waarvan die fosforsorpsiekapasiteit bepaal is

Monster nr	Fosforinhoud mg/kg	Grondvorm	Distrik van oorsprong
2365	2	Hutton	Vrede
2367	1	Clovelly	Vrede
2369	1	Avalon	Vrede
2379	1	Clovelly	Vrede
2536	1	Avalon	Harrismith
3492	1	Hutton	Schweizer-Reneke
3507	1	Avalon	Ladybrand
3511	1	Hutton	Hennenman
3659	1	Hutton	Ladybrand
3661	1	Avalon	Ermelo
3705	2	Avalon	Harrismith
3721	1	Avalon	Kroonstad
3727	1	Hutton	Bultfontein
3730	1	Clovelly	Wesselsbron
3736	1	Hutton	Wesselsbron
4071	1	Hutton	Delmas
4077	1	Hutton	Bethal
4088	1	Avalon	Balfour
4145	1	Hutton	Bloemhof
4151	1	Hutton	Bloemhof
4153	1	Avalon	Leeudoringstad
4159	1	Clovelly	Ottosdal
4162	1	Avalon	Delareyville
4164	1	Hutton	Bothaville
4168	1	Avalon	Wolmaransstad
4173	1	Bainsvlei	Lichtenburg
4176	1	Avalon	Delareyville
4179	1	Hutton	Delmas
4183	1	Avalon	Allanridge
4185	1	Hutton	Kroonstad
4187	1	Avalon	Kroonstad
4194	1	Avalon	Bothaville
4196	1	Hutton	Lichtenburg
4202	1	Avalon	Lichtenburg
4204	1	Hutton	Lichtenburg
4321	1	Bainsvlei	Hennenman
4324	1	Hutton	Koppies
4351	1	Hutton	Oberholzer
4373	1	Hutton	Hartebeesfontein
4376	1	Clovelly	Klerksdorp
4387	1	Hutton	Potchefstroom
4392	1	Hutton	Ventersdorp
4394	1	Hutton	Randfontein
4396	1	Hutton	Oberholzer
4401	1	Clovelly	Klerksdorp
5166	1	Hutton	Koster
5169	1	Hutton	Koster
5173	1	Hutton	Ventersdorp



FIGUUR 3.1: Kaart van studiegebied met distrikte ingekleur waar monsters sonder residuele fosfor geneem is

Figuur 3.1 is 'n kaart waarop die distrikte waarin die monsters geneem is, asook die aantal monsters uit elke distrik aangedui word. Die mielieproduserende distrikte van die gebied word rofweg aangedui in 'n driehoek, wat op die kaart aangebring is.

Die monsters is in die son gedroog en deur 'n 1 mm-sif gesif en ontleed volgens standaardmetodes wat vervat is in die handboek van die Non-affiliated Soil Analysis Work Committee (1990). Die volgende grondeienskappe is in die ontleding betrek: die persentasie growwe sand, medium sand, fyn sand, slik en klei, uitruilbare natrium (Na), kalsium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg), die 0,1N KCl-ekstraheerbare aluminium asook die titreerbare suurheid. Uit bogenoemde waardes is die som van die uitruilbare basisvormende kation die Na^+ , K^+ , Ca^{++} en Mg^{++} (S-waarde) en die kation-adsorpsievermoë (T-waarde) bereken. Verder is die volgende grondeienskappe bepaal: die pH (H_2O), die pH (CaCl_2), die weerstand van die versadigde pasta-ekstrak (R), die koolstof (C), die Na-dithionaatsitraat ekstraheerbare ysteroksiede (Fe_2O_3), en die aluminiumhidroksiede (Al_2O_3) uitgedruk as persentasie, asook die mangaanoksiede (MnO_2) uitgedruk in mg kg^{-1} . Die minimum en maksimum waardes van die ontledingsyfers word aangetoon in Tabel 3.2. In Bylae A en B word die ontledingsyfers van al 50 grondmonsters volledig aangetoon. Al hierdie bepalinge is gedoen omdat dit grondeienskappe is wat fosforsorpsie op 'n direkte en/of indirekte wyse beïnvloed.

3.3 Fosforsorpsie-onderzoek

Die tegniek wat hier beskryf word, is ontwerp vir die doel van hierdie ondersoek en kom

nie uit enige literatuurbron nie. Van elk van die 50 grondmonsters is 7 submonsters van 10 gram elk uitgeweeg en in politeenflessies met skroefdeksels geplaas. By elke submonster is die volgende bygevoeg: 1 mg fosfor in die vorm van KH_2PO_4 wat opgelos is in gedeïoniseerde water. Hierdie byvoeging verteenwoordig 100 mg kg^{-1} fosfor of 100 dpm aan die grond.

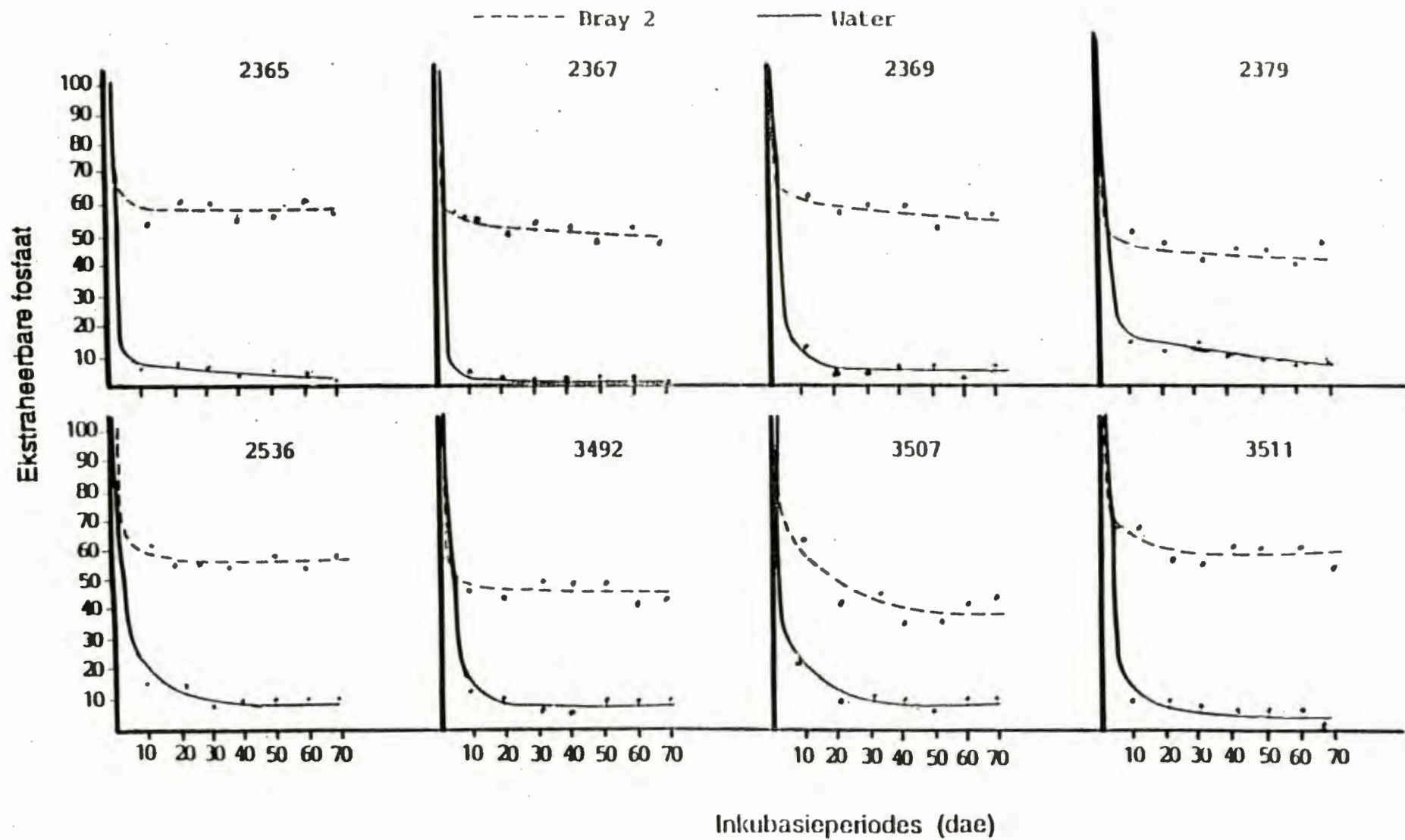
Tabel 3.2 Die variasiereeks van 20 grondeienskappe wat as fosforvasleggingsfaktore in vyftig grondmonsters ondersoek is

	Growwe sand %	Medium sand %	Fyn sand %	Slik %	Klei %	Na cmol, /kg grond	K cmol, /kg grond	Ca cmol, /kg grond	Mg cmol, /kg grond	S-waarde cmol, /kg grond
Min	0	2.4	22	0.3	1.3	0		0	0	0
Maks	43.3	45.5	77.6	8.8	37.9	0.4	0.6	9.3	13.2	14.2

	T-waarde cmol, /kg grond	pH H_2O	pH CaCl_2	R	C %	Kcl-ekst. Al cmol, /kg grond	Titreerh. suurh. cmol, /kg grond	Fe_2O_3 %	MnO_2 mg kg^{-1}	Al_2O_3 %
Min	0.4	5.0	4.2	600	0.1	0	0	0.2	25	0.04
Maks	12.6	7.9	6.7	9000	0.7	0.6	5.8	5.1	4725	1.35

Die rede waarom sewe submonsters van elke grondmonster afgeweeg word, is om die water en Bray 2-ekstraheerbare fosfor in die grond na elke 10 dae te kan bepaal oor 'n totale periode van 70 dae. Figuur 3.2 is 'n grafiese voorstelling van die fosforekstraksie soos gestel teenoor die inkubasietydperk van agt grondmonsters.

Die hoeveelheid oplossing wat by elke grondmonster gevoeg is, is genoeg om dit tot by ten minste veldkapasiteit te benat. Die hoeveelheid fosfor wat bygevoeg is, word beskou as 'n oormaat vir die normale oesproduksie van mielies onder droëlandtoestande in die Hoëveldstreek. Hierdie fosfortoediening verteenwoordig 'n bemestingtoediening van



Figuur 3.2 Verwantskap tussen ekstraheerbare fosfor en inkubatieperiodes in verschillende gronde.

ongeveer 225 kg fosfor per hektaar tot op 'n diepte van 15 cm. Die flessies met die grondmonsters is toegeskroef en toegelaat om by 'n konstante kamertemperatuur van 25°C te inkubeer ten einde toestand wat tydens die ontkieming van mieliesaad in die grond heers so goed as moontlik na te boots.

Met tydsintervalle van 10 dae na die byvoeging van die KH_2PO_4 -oplossing, is een van die sewe submonsters van elk van die 50 grondmonsters geneem en die Bray 2-fosfor sowel as die waterekstraheerbare fosfor in die monster bepaal. Die eksperiment het dus sowat 70 dae aangehou. By die bestudering van die syfers is gemerk dat die grootste hoeveelheid van die oplosbare fosfor wat by die grondmonster gevoeg is binne die eerste 10 dae in die grondmonster vasgelê is, en dat die vorm van die vasleggingskurwe vir albei ekstraksiemiddels dieselfde is. Met water as ekstraheermiddel is daar egter baie minder fosfor by elk van die tydsintervalle herwin. 'n Voorstelling waarin die fosforvaslegging grafies teenoor die tydsintervalle van 8 van die 50 grondmonsters gestel is, word in Figuur 3.2 aangetoon. By die bestudering van hierdie kurwes in Figuur 3.2 word 'n duidelike tweefasekarakter waargeneem, naamlik 'n vinnige daaltempo gedurende dag 0 tot dag 10, gevolg deur 'n meer geleidelike daaltempo vanaf dag 10 tot so lank as dag 70. Hierdie waarneming stem ooreen met gegewens wat reeds aangetoon is in relevante vakliteratuur (Kafkafi, 1963; Van der Walt, 1976; Fox, 1988).

Omdat daar met hierdie eksperiment slegs twee datapunte tussen dag 0 en dag 10 betrokke is, en die grootste deel van die sorpsiereaksie in dié periode plaasvind, is daar besluit om die eksperiment te herhaal met dieselfde grondmonsters, maar om die periode

tussen dag 0 en dag 10 op te deel in korter tydsintervalle ten einde die verloop van die fosforvaslegging meer volledig te beskryf. Die nuwe inkubasietydperke vir die tweede eksperiment is toe soos volg geneem: 1 dag, 2 dae, 4 dae, 7 dae en 11 dae. Vervolgens is intervale van 7 dae tot dag 25 gebruik en daarna is intervale van 14 dae tot dag 67 gebruik.

Aangesien die gronde wat in dié studie gebruik is almal in 'n neutrale tot effens suur pH-gebied lê, en na aanleiding van gegewens wat in relevante vakliteratuur aan die lig gekom het, is besluit om die ekstraksiemiddel vir die tweede eksperiment te verander van Bray 2 na $\text{NH}_4\text{HCO}_3\text{-NH}_4\text{F-(NH}_4)_2$, EDTA (*ambic*). Hahne *et al.* (1988) het bevind dat wanneer Al-, Ca- en Fe-fosfor geëkstraheer word deur Bray 2- en *ambic*-ekstraheermiddels, die Bray 2 groot hoeveelhede fosfor onttrek uit die AlPO_4 en die $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ -fraksie en relatief kleiner hoeveelhede uit die FePO_4 . Die *ambic*-ekstraksiemiddel, aan die ander kant, ekstraheer minder, maar meer konstante hoeveelhede fosfor uit al die fosforverbindinge in die grond. Omdat daar so min fosfor met water as ekstraheermiddel herwin is (Figuur 3.2), is daar nie verder met water gewerk nie. Die resultate word aangetoon in Tabel 3.3 en Bylae C.

3.4 Resultate van die sorpsie-onderzoek

Tabel 3.3 Minimum en maksimum waardes van die *ambic*-ekstraheerbare fosfor wat in grond (mg kg^{-1}) teenwoordig is na verskillende inkubasieperiodes met 'n fosforoplossing

	Monster nr	Dag 1	Dag 2	Dag 4	Dag 7	Dag 11	Dag 18	Dag 25	Dag 39	Dag 53	Dag 67
Min	4101	32.3	27.9	29.4	27.1	21.2	22.55	21.3	16.1	15.0	12.8
Maks	4145	80.7	79.6	80.3	79.1	74.3	69.3	73.7	71.4	74.3	66.6

By die bestudering van die data in Tabel 3.3 en ook in Bylae C word dit duidelik dat die grootste daling in ekstraheerbare fosfor gedurende die eerste dag plaasvind; daarna is die daling baie meer geleidelik. Die afleiding word gemaak dat die reaksie tussen die gronddeeltjies en die fosfor in die grondoplossing aanvanklik 'n sorpsiereaksie is. Nadat die maksimum oppervlaktebedekking as gevolg van die sorpsieproses bereik is, kan dit 'n verdere daling in ekstraheerbare fosfor tot gevolg hê. Hierdie daling kan toegeskryf word aan ander tipe reaksies soos die presipitasie van fosforverbindings of die migrasie van fosfor-ione na suboppervlaktelae wat op sy beurt weer die blootstelling van nuwe sorpsielokaleiteite op die oppervlakte van die gronddeeltjies tot gevolg het (Sanyal & De Datta, 1991). Wat egter nie definitief geïdentifiseer kan word nie, is 'n bepaalbare oorgangspunt van een tipe reaksie na die ander. Die data in Bylae C en Tabel 3.3 toon in die meeste gevalle egter 'n skerper daling vanaf die begin van die reaksie tot dag 7 as vanaf dag 7 tot dag 67.

3.5 Die karakterisering van fosforsorpsie

Verskeie pogings is aangewend om die fosforsorpsiereaksie met behulp van wiskundige formules te beskryf en te kwantifiseer - soos reeds bespreek is in die vorige hoofstuk. Die bekendste metode is die gebruik van die Freundlich- en die Langmuir-vergelykings (Larsen, 1967; Probert & Larsen, 1972). In latere navorsing word die Tempkin-vergelyking ook gebruik (Henry *et al.*, 1990; Sanyal & De Datta, 1991). Al drie bogenoemde vergelykings is gebaseer op basiese aannames. Die Langmuir-vergelyking is gebaseer op die veronderstelling dat die sorpsie-energie nie varieer in ooreenstemming

met die mate van oppervlaktebedekking van die adsorbeermiddel nie. Die Freundlich-vergelyking veronderstel weer dat die adsorpsie-energie eksponensieel afneem met die toename in die versadiging van die sorpsie-oppervlakte. Die Tempkin-vergelyking is gebaseer op die aanname dat die bindingsenergie lineêr afneem met die toename in oppervlaktebedekking.

Al drie hierdie vergelykings het beperkings in soverre dit van toepassing op grondfosforsituasies is. Met die Langmuir-vergelyking is gevind dat 'n goeie passing van eksperimentele data net in beperkte, lae konsentrasies gekry word (Olsen & Watanabe, 1967; Ozanne & Shaw, 1968). By hoër konsentrasies moet aanpassings aan die kurwe gemaak word om veronderstelde veranderde sorpsielokaliseringe te akkommodeer. Die feit dat die sorpsiekurwe van die hoeveelheid ekstraheerbare fosfor 'n tweefasekarakter vertoon wanneer dit grafies gestel word teenoor die tydsverloop, impliseer ook dat die hipotese waarop die Freundlich-vergelyking gebaseer is, nie hier geld nie. Hierdie hipotese impliseer naamlik dat die adsorpsie-energie eksponensieel afneem met die toename in die versadiging van die adsorpsie-oppervlakte.

Die Tempkin-vergelyking is gebaseer op die aanname dat die bindingsenergie lineêr afneem met 'n toename in oppervlaktebedekking. Volgens die Tempkin-vergelyking behoort 'n grafiese voorstelling van die mg kg^{-1} fosfor wat geadsorbeer is per kg grond teenoor $\log c$ (waar c die konsentrasie in mg l^{-1} fosfor in oplossing by ewewig is) 'n reguit lyn te lewer. Vir baie gronde is egter matig geboë lyne in plaas van reguit lyne gevind (Fox & Kamprath, 1970; Bache & Williams, 1971; Le Mare, 1982; Rao *et al.*, 1983;

Roy & De Datta, 1985; Russell *et al.*, 1988).

Volgens Sanyal en De Datta (1991) is hierdie vergelykings van minder waarde indien die hoeveelheid fosfor wat oorspronklik in die grond teenwoordig is, relatief groot is in verhouding tot die hoeveelheid wat geadsorbeer is. Sanyal en De Datta (1991) bespreek behalwe bogenoemde drie isoterme nog ander adsorpsiemodelle wat gebruik word vir die beskrywing van fosforsorpsie; hulle noem dit meganistiese modelle (*mechanistic models*). Volgens hul beskouing word die werklike sorpsiemeganisme van die sorpsieproses nie behoorlik beskryf as die eksperimentele sorpsiedata bloot inpas in hierdie sorpsievergelykings nie. Die meganistiese modelle stem volgens Sanyal en De Datta (1991) beter ooreen met eksperimentele data. Ook stem die modelle beter ooreen met waarnemings wat gelei het tot die postulering van twee of drie soorte fosforsorpsie-lokaliteite op die oppervlakte van gronddeeltjies as wat die enkel- of meervoudige Langmuir-isoterme daarmee ooreenstem. Die vernaamste nadeel van hierdie modelle is volgens bogenoemde navorsers die teenwoordigheid van baie verstelbare parameters. Die veranderlike ladingsmodel (*variable-charge model*) van Bowden *et al.* (1977; 1980) bevat byvoorbeeld sewe verstelbare parameters.

Verskeie ander modelle is oorweeg om die fosforsorpsiereaksie wiskundig te beskryf. 'n Voorbeeld van so 'n model is om die reaksie op te deel in 'n reeks eksponensiële terme (Probert & Larsen, 1972; Kuo & Lotze, 1973).

$$Y = A_0 - A_1 \exp(-A_2 t) - A_3 \exp(-A_4 t) \dots A_n \exp(-A_{n+1} t) \dots \dots \dots (3.1)$$

Y = die hoeveelheid ekstraheerbare fosfor

t = die tydstop waarop ekstraksie na toediening gedoen is

A = die helling van die kurwe op tydstop t

Oor hierdie tegnieke maak Probert en Larsen (1972:80) die volgende opmerking:

"The sum of exponential models become so complex as to make analysis self defeating since it cannot lead to the design of experiments to check the proposed mechanism and indeed there would seem to be no sound reason for expecting to find discrete fractions of exchangeable phosphate in soil."

3.5.1 *Die tweefasekarakter van fosforsorpsie*

Na aanleiding van die tekortkominge van die bekende modelle soos hierbo bespreek, is 'n alternatiewe benadering oorweeg. Met hierdie benadering is soos volg te werk gegaan (Van der Walt, 1976):

Met die grafiese voorstelling waarin die hoeveelheid geadsorbeerde fosfor teenoor die tydsverloop gestel is, is die hoeveelheid ekstraheerbare fosfor op die y-as en die inkubasieperiodes in dae op die x-as gebruik. 'n Reguit lyn is telkens gepas op die data vanaf dag 1 en die daaropvolgende datapunte. Met die eerste twee datapunte is dus 'n koëffisiënt van determinansie (r^2) van 1.0 gekry. Met die toevoeging van die derde datapunt het die r^2 - soos te verwagte - begin daal, maar die r^2 het weer verbeter met die toevoeging van meer datapunte. Die prosedure is met die byvoeging van elke datapunt

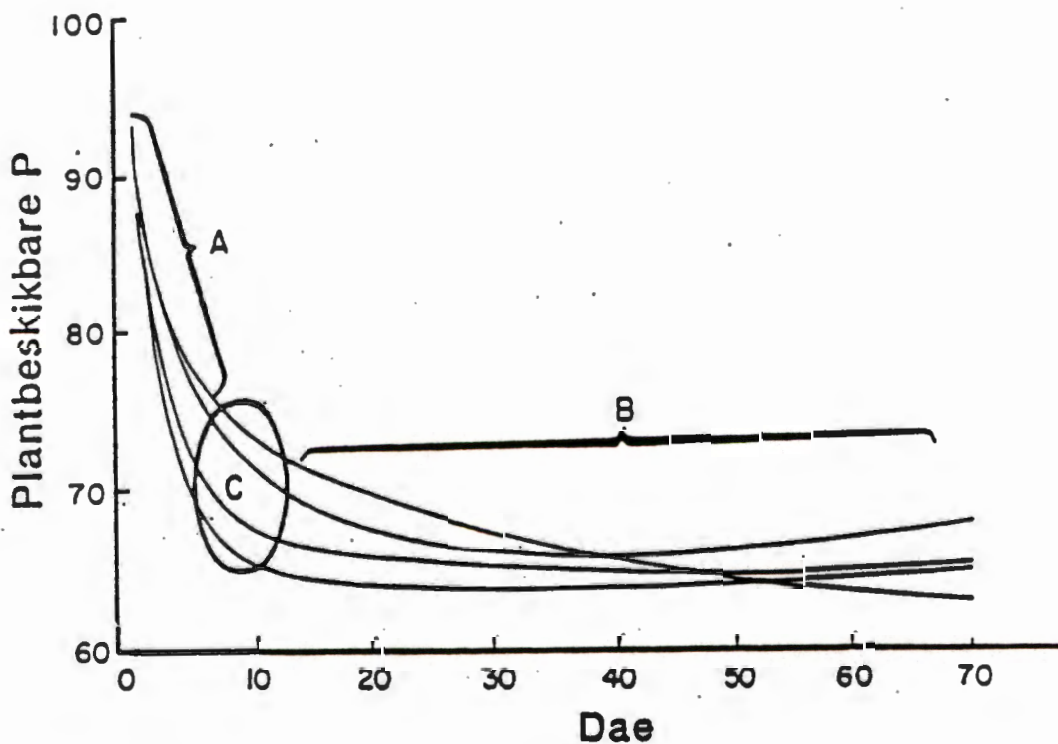
herhaal totdat die draaipunt in die kurwe bereik is. Hierna het die r^2 skerp gedaal. Dieselfde prosedure is herhaal deur die data vanaf die eindpunt van die kurwe te gebruik en 'n passing na die byvoeging van elke punt te doen. Hierdie prosedure is gevolg om punte te identifiseer wat nie by een van die twee fases inpas nie. Daar is by vier ewekansig gekose grondmonsters uit 'n vorige studie (Van der Walt, 1976) gevind dat al die datapunte by een van die twee fases gepas is voordat 'n skerp daling ($r^2 < 0.8$) gevind is. Hierdie skerp daling is dus by die draaipunt in die kurwe gevind (Tabel 3.4). Die vier gekose gronde het baie van mekaar verskil ten opsigte van verskeie chemiese eienskappe soos pH, KUK en basisversadiging, sowel as ten opsigte van fisiese eienskappe soos tekstuur en kleipersentasie.

Tabel 3.4 : Passings van reguit lyne wat op elk van die twee fases van die sorpsiekurwes van vier verskillende grondmonsters toegepas is (Van der Walt, 1976)

Monster-nommer	Fase van adsorpsie-kurwe	Persentasie van totale aantal	r^2
1	A	59	0.844
	B	41	0.925
2	A	40	0.946
	B	60	0.976
3	A	22	0.976
	B	78	0.868
4	A	36	0.972
	B	64	0.909

In Tabel 3.4 kan gesien word dat by al vier grondmonsters 100% van die datapunte by een van die twee fases van die kurwe op 'n reguit lyn gepas kan word, terwyl die r^2 nog meer as 0.8 is. Hierdie sorpsiekurve kan dus in twee reguit lyne verdeel word. Die snypunt van die twee lyne dui die hoeveelheid ekstraheerbare fosfor aan wat aanwesig is na 'n bepaalde tydverloop waarin die gronddeeltjies en die opgeloste fosfor in die grond-oplossing kontak gemaak het.

Met die toepassing van bogenoemde benadering op die data van die 50 grondmonsters wat in hierdie studie gebruik is, word die verhouding van die fosforsorpsie hipoteties teenoor die tydverlooptyd gestel (Figuur 3.3).



Figuur 3.3. Hipotetiese voorstelling van die fosforsorpsiereaksie in 'n aantal gronde soos gestel teenoor die tydverloop

In hierdie Figuur is daar drie parameters wat aandag verdien. Hierdie parameters is die volgende: die helling van die A- sowel as die B-gedeeltes van die sorpsiekurwe, en ook die draaipunt van die kurwe wat lê in die gebied wat deur die sirkel rondom C aangedui word. Die kenmerk van hierdie drie parameters is die netto resultaat van 'n hele aantal grondeienskappe gesamentlik.

As die hele kromme beskou word as 'n reeks van reaksies tussen gronddeeltjies en fosfor in die grondoplossing, kan die volgende aanname gemaak word: die helling van die A-gedeelte word oorheers deur die fosforsorpsie op die oppervlakte van die gronddeeltjies. Hierdie proses word in werking gestel omdat die fosformolekules aangetrek word deur residuele kragte op die oppervlakte van die gronddeeltjies wat nie volledig geneutraliseer is in die soliede raamwerk van die grondpartikels nie (vgl. Russell & Prescott, 1916; Dean & Rubins, 1947; Bache, 1963; Hsu, 1964; Hsu, 1965; Muljadi *et al.*, 1966; Murrman & Peech, 1969; Lin *et al.*, 1983). Hierdie afleiding word gemaak op grond van die feit dat die grootste hoeveelheid fosfor op die eerste dag uit die grondoplossing onttrek word, of selfs gedurende die eerste paar ure van kontak tussen die grondoplossing en die gronddeeltjies.

Sodra die oppervlakte van die gronddeeltjies redelik volledig bedek is deur fosfor-ione as gevolg van die sorpsiekragte, vind ander stadiger reaksies plaas. Hierdie stadiger reaksies impliseer die volgende: die presipitasie van fosforverbindings, byvoorbeeld met kalsium, magnesium, yster en aluminium, asook die migrasie van geadsorbeerde fosforkomponente na suboppervlaktelae wat dan nuwe sorpsielokasies op die oppervlakte blootstel. Die

B-gedeelte van die sorpsiekurwe word oorheers deur laasgenoemde reaksies. Die residuele fosfor in die grond wat afkomstig is van byvoorbeeld vorige bemestingsprogramme moet ook 'n invloed hê op sowel die A- as die B-gedeeltes van die sorpsiekurwe (Barrow, 1978; Yuan & Lavkulich, 1994). Dit verklaar waarom ewewig so stadig bereik word (vgl. Larsen, 1967).

Die hele sorpsiekurwe kan daarom soos volg voorgestel word:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 \dots\dots\dots (3.2)$$

B_0 = die draaipunt in die C-gebied van die kurwe

B_1 = die helling van die A-gedeelte van die kurwe

B_2 = die helling van die B-gedeelte van die kurwe

In 'n poging om die data van hierdie studie, soos weergegee in Tabel 3.3, in verband te bring met die parameters (B_0 , B_1 en B_2) van Vergelyking 3.2 is ook twee reguit lyne op die data gepas soos hierbo bespreek is.

3.5.2 Die latfunksiebenadering

Met die indeling van inkubasieperiodes in 1 dag, 2 dae, 4 dae, 7 dae, ensovoorts (Tabel 3.3) word die indeling op die x-as vir die doeleindes van die latfunksie dus soos volg gedoen:

Dag 7 word 0, dag 4 word -3, dag 2 word -5 en dag 1 word -6, ensovoorts.

In Figuur 3.4 word die latfunksie soos toegepas op die sorpsiedata van 50 grondmonsters voorgestel. In dié Figuur is:

B_0 = die snypunt van A en B

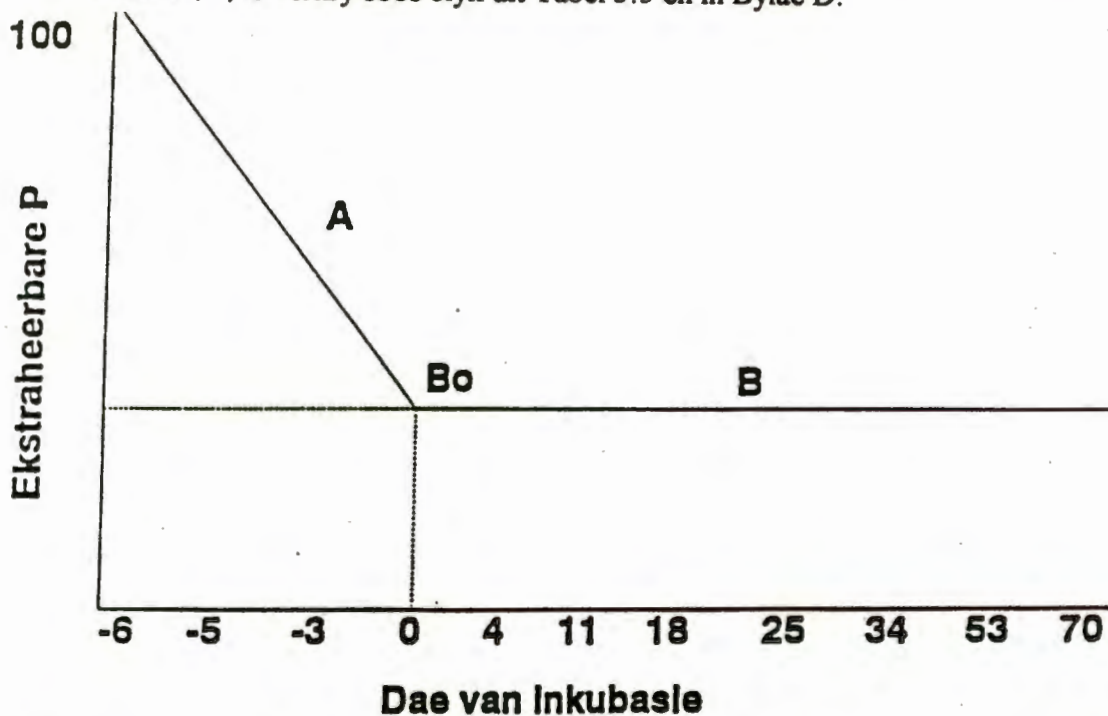
B_1 = die helling van A

B_2 = die helling van B

X_1 dui die eerste fase van die sorpsiekurwe aan voor dag 7 en daarna as 0

X_2 dui die tweede fase aan van die sorpsiekromme na dag 7 en vooraf as 0

Die latfunksie is op elk van die 50 gronde se inkubasiedata (Bylae C) gepas en goeie nassings (r^2) is verkry soos blyk uit Tabel 3.5 en in Bylae D.



Figuur 3.4: Voorstelling van 'n latfunksie toegepas op sorpsiedata waar $x=0$ die ekstraheerbare P op dag 7 van die sorpsieproses voorstel, en $x=-6$ die ekstraheerbare P op dag 1

Tabel 3.5 : Variasie van die koëffisiënt van determinansie (r^2) waarbinne die latfunksiepassings van 50 gronde voorkom met die ooreenstemmende waardes van die koëffisiënt van die latfunksie

	Koëffisiënte				
	B_0	B_1	B_2	r^2	Residue ²
Min	49.79	-1.680	-0.321	0.63	49.2
Maks	47.83	-1.891	-0.132	0.99	2.146

Op grond van hierdie passings kan afgelei word dat die latfunksie 'n goeie instrument is om die variasie, soos waargeneem in die sorpsiekurwes van die verskillende gronde, effektief te omskryf. Om die koëffisiënte af te lei vereis 'n lang inkubasieprosedure van die grond oor 'n aansienlike tyd en dit is nie 'n praktiese oplossing in die praktyk nie. Die hoë r^2 dui daarop dat indien hierdie koëffisiënte op 'n meer eenvoudige manier vir 'n bepaalde grondsoort bereken kan word, die latfunksie besliste voordele inhou vir die skedulering van fosfortoediening aan grond.

In 'n praktiese fosforbemestingsituasie word oplosbare fosfor gewoonlik aan grond toegedien by vog- en temperatuurtoestande waar die sorpsie dadelik 'n aanvang neem. Daarteenoor het die saad van die plant wat die fosfor vir groei en ontwikkeling moet opneem nog geen opnamemeganisme in werking gestel voordat dit ontkiem en wortels gevorm het nie. In die somergraansaaistreke duur hierdie periode ongeveer sewe dae. Indien die draaipunt in die kurwe dus betroubaar gekwantifiseer kan word en dit ooreenstem met die ontkiemingstyd, kan dit nuttig gebruik word om die hoeveelheid

plantbeskikbare fosfor met ontkieming te bereken.

Die probleem wat oorkom moet word, lê daarin dat die grondeienskappe wat by elk van die parameters in die sorpsiekurwe betrokke is, geïdentifiseer en gegroepeer moet word.

3.6 Hipotese

Die kenmerk van die drie parameters betrokke by die fosforsorpsiekromme, soos voorgestel in Figuur 3.4, is die netto resultaat van 'n hele aantal geïntegreerde grondeienskappe. Dit behoort moontlik te wees om te bereken hoeveel fosfor (met planttyd aan die grond toegedien) beskikbaar is vir groei en ontwikkeling op die tydstip van ontkieming, indien hierdie grondeienskappe so gegroepeer kan word dat dié wat elke parameter oorheers, in regressies wat die verskillende fases in die sorpsieproses beskryf, gebruik kan word.

3.7 Fosforsorpsiekwantifisering

Om hierdie hipotese te bewys is gebruik gemaak van Hoofkomponent-analise (HKA) as meganisme om die groepering van die grondeienskappe te ondersoek. Hierdie grondeienskappe word geassosieer met verskillende parameters (Vergelyking 3.2). Met die uitslag van die HKA as basis is daarna gebruik gemaak van beste deelversamelings-regressie om die komponente van bogenoemde vergelyking te kwantifiseer.

3.7.1 *Hoofkomponent-analise*

Hoofkomponent-analise (HKA) is 'n statistiese groeperingstegniek wat toegepas kan word om veranderlikes te groepeer - veranderlikes wat nie as afhanklike of as onafhanklike veranderlikes gespesifiseer is nie. Die interkorrelasie tussen veranderlikes word gebruik om veranderlikes wat samehangende subgroepe vorm te identifiseer. Die onderskeie subgroepe is onafhanklik van mekaar (Muller, 1989).

In 'n studie soos hierdie lê die waarde van HKA daarin dat 'n groot aantal moeilik interpreteerbare (en moeilik visualiseerbare) veranderlikes gereduseer kan word tot 'n kleiner aantal subgroepe veranderlikes. Hierdie subgroepe is makliker interpreteerbaar en toon die minste verlies aan inligting. In statistiese terme word na hierdie subgroepe as hoofkomponente verwys. Elke hoofkomponent is 'n lineêre kombinasie van 'n aantal veranderlikes. So is die eerste hoofkomponent 'n lineêre kombinasie van dié veranderlikes wat die grootste variasie in die data verklaar - met ander woorde, veranderlikes wat verantwoordelik is vir die meeste verskille tussen die datapunte.

Die tweede hoofkomponent word verkry uit die oorblywende variasie nadat die variasie wat met die eerste hoofkomponent geassosieer is, verwyder is. Die tweede hoofkomponent is dus weer 'n lineêre kombinasie van veranderlikes wat nou die maksimum variasie uit die oorblywende variasie verwyder. Hierdie oorblywende variasie korreleer nie met die eerste hoofkomponent nie. Dieselfde redenasie geld vir al die opvolgende komponente wat verwyder word - elke volgende komponent het 'n kleiner variasie.

In hierdie studie is daar aanvanklik met 15 grondeienskappe vir elk van die 50 grondmonsters gewerk. Al 20 grondeienskappe, soos aangetoon in Tabel 3.2 en ook in Bylae A en B, is egter nie gebruik nie. Alle eienskappe is nie betrek nie omdat die growwe en die medium sandfraksies in die eerste plek geïgnoreer is omrede hierdie fraksies 'n relatief klein soortlike oppervlakte en dus 'n lae sorpsiekapasiteit het. Verder is ook die persentasie Fe_2O_3 en Al_2O_3 sowel as die MnO_2 (uitgedruk in mg kg^{-1}) weggelaat uit hierdie voorlopige berekening omdat dit nie in normale roetinegrondontledings gedoen word nie. Hierdie drie grondeienskappe is wel met latere berekenings betrek, naamlik in die beste deelversamelingsregressies. Die grondeienskappe is later betrek omdat daar beseft is dat hierdie elemente, veral in die lae pH-spektrum, wel 'n beduidende rol in fosforbinding kan speel - 'n aspek wat in tersaaklike vakliteratuur aangetoon is (Hsu, 1964; Hsu, 1965; Sanyal & De Datta, 1991).

Daar is gevind dat hierdie 15 grondeienskappe in vyf hoofkomponente ingedeel kan word. Dié resultate word aangetoon in Tabel 3.6 waarin alleen dié eienskappe met die hoogste gewigte aangegee word - eienskappe wat ook tiperend van die hoofkomponent is.

Die gewigte van die hoofkomponente, soos aangedui in Tabel 3.6, word die *eigenvektor* genoem. Die VP stel die *eigenwaarde* voor. Die VP (eigenwaarde) vir elke faktor is die som van vierkante van die eigenvektore van die komponente soos in Tabel 3.6 weergegee, met inagneming van die feit dat net die belangrikste komponente weergegee is (Eisenberg, 1993).

Tabel 3.6: Hoofkomponente van fosforsorpsie gestel teenoor die tydsverloop vir 50 grondmonsters soos beïnvloed deur 15 grondeienskappe van elke monster

HK 1		HK 2		HK 3		HK 4		HK 5	
Element	Eigen-vektor	Element	Eigen-vektor	Element	Eigen-vektor	Element	Eigen-vektor	Element	Eigen-vektor
S-waarde	0.805	Slik	0.759	KCl-uitr. Al	0.865	Na	0.832	Mg	0.790
Ca	0.770	Tit. suur	0.755	pH H ₂ O	0.872	% C	-0.505		
Weerstand (R)	-0.746	Klei	0.733						
pH CaCl ₂	0.721	Fyn sand	-0.619						
K	0.708								
T-waarde	0.654								
VP	3.642		2.665		1.918		1.674		1.229

Die groepering van grondeienskappe onder verskillende hoofkomponente, soos aangedui in Tabel 3.6, hou verband met die chemiese of fisiese kenmerke van die grondeienskappe. So kan al die grondeienskappe wat onder HK1 ressorteer, beskou word as chemiese grondeienskappe en hierdie chemiese grondeienskappe kan in verband gebring word met die graad van loging van die grond. 'n Mens sou egter verwag dat Na en Mg wat onder HK4 en HK5 ressorteer ook by HK1 hoort, omdat hulle - net soos Ca en K - basisvormende katione is. 'n Moontlike verklaring waarom hulle nie by HK1 gegroepeer word nie, lê waarskynlik in die bindingskragte van hierdie elemente aan die kleideeltjies. Omdat Na in sy natuurlike toestand in die grond gehidreerd is, dit wil sê omring is deur 'n aantal watermolekules, is die ioonradius van hierdie element relatief groot en word dit swakker

gebind aan die kleiminerale as Ca en K. In grond in die neutrale tot suur pH-spektrum, soos die gronde wat wel in hierdie studie gebruik is, word Na dus makliker uit die grondprofiel uitgeloog as K en Ca. Die Na is ook baie min in hierdie grondmonsters - soos gesien kan word in Tabel 3.2.

'n Mens sou verwag dat Mg sterker tot die kleideeltjies aangetrokke sou wees as K vanweë die feit dat Mg divalent is en 'n relatief klein ioonstraal het. Daarom is dit vreemd dat Mg nie saam met Ca en K onder dieselfde hoofkomponent gegroepeer word nie. In die meeste gevalle is die orde van voorkeur vir aantrekking $Ca > Mg > K > Na$ (Bear, 1965:194). In gemengde laagklei sowel as in dubbellaagklei kan voorkeuraantrekking van K ten opsigte van Mg wel plaasvind. Daar is nie 'n kleimineraal-analise op hierdie monsters gedoen nie, maar dit is bekend dat die gronde in die gebied waar hierdie monsters geneem is, wel tot 'n hoë mate gemengde laagklei bevat. By baie gronde in die studiegebied is kleitipes ook gemeng (Kirsten, 1994). Die feit dat hierdie monsters wel tot 'n hoë mate mengsels van kleitipes bevat, kan 'n veranderde orde van voorkeur vir aantrekking tot gevolg hê (soos aangetoon deur Bear, 1965:194). Die verklaring vir die aparte groepering van Mg lê waarskynlik hierin.

Die grondeienskappe wat onder HK2 ressorteer, kan behalwe vir titreerbare suurheid, as fisiese grondeienskappe geklassifiseer word. Die titreerbare suurheid kan wel in direkte verband gebring word met hierdie ander fisiese grondeienskappe aangesien die soortlike oppervlakte van die gronddeeltjies groter word namate die fynheid van die grondtekstuur toeneem. Hoe fyner die tekstuur, hoe groter is die blootstelling van aktiewe uitruilings-

posisies (*exchange sites*) per eenheidsvolume grond. Hierdie toestand word weerspieël in die titreerbare suurheid.

Die feit dat KCl-uitruilbare aluminium en $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ onder een hoofkomponent (HK_3) ressorteer, is nie vreemd nie omdat die aluminium-ione, namate die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ van die grond daal, al hoe meer onstabiel raak in hul bindingsposisies in die kristalrooster van die kleimineraal. By baie lae pH-waardes kom die aluminium-ione selfs uit die kristalrooster van grondminerale los en vorm dit die sogenaamde "amorfte komponent".

Die groepering soos dit deur middel van die HKA aangedui is, is gebruik om relevante eienskappe via regressiemetodieke te ondersoek. Die volgende tegniek wat gebruik is om die koëffisiënte van die latfunksie met die grondeienskappe in verband te bring is die sogenaamde beste deelversamelingsregressie (*best subset regression*).

3.7.2 Beste deelversamelingsregressie

Beste deelversamelingsregressie behels die herhalende insluiting van addisionele onafhanklike veranderlikes in 'n lineêre regressiebenadering om die koëffisiënt van determinasie te verbeter totdat die insluiting van die n-de veranderlike nie meer statisties 'n betekenisvolle bydrae lewer nie. Die seleksie van addisionele veranderlikes - anders as in die geval van meervoudige veranderlike regressie - word geselekteer op grond van die gebruiker se wetenskaplike voorkeur. By meervoudige veranderlike regressie word veranderlikes in alle moontlike kombinasies gebruik - sonder inagneming van die biolo-

giese wenslikheid daarvan. In hierdie studie is aanvanklik gebruik gemaak van die groeperings van die HKA. Die komponente is eers in hul geheel in die regressie ingesluit en die resultate word aangedui in Tabel 3.7. Na aanleiding van die onbevredigende resultate wat hiermee behaal is, is in opvolgpogings eerder gebruik gemaak van 'n seleksie van individuele elemente soos vervat is in elke komponent. Die beste resultate vir die onderskeie koëffisiënte van Vergelyking 3.2 word aangedui in Tabel 3.7.

Op grond van die resultate in Tabel 3.7 blyk dit dat die grondeienskappe wat onder hoofkomponente 2 en 4 ressorteer, 62% van die variasie van die B_0 -koëffisiënt van die sorpsielatfunksie verklaar. Hierdie B_0 -koëffisiënte word beskou as 'n baie belangrike parameter vir bemestingskedulering aangesien dit die hoeveelheid plantbeskikbare fosfor sewe dae na toediening verteenwoordig. As fosfor dus aan die grond toegedien word met planttyd, soos die algemene praktyk is, kan met behulp van die B_0 -koëffisiënt bereken word wat die fosforvoedingsbronvoorraad tydens ontkiëming is. Die vergelyking waarmee B_0 bereken kan word, lyk soos volg:

$$B_0 = 62.37 - 1.703 (\text{slik } \%) - 0.791 (\text{klei } \%) \dots\dots\dots 3.3$$

Slegs 32,8% en 36,9% van die variasie van die helling van die A- en B-gedeeltes van die latfunksie onderskeidelik, soos verteenwoordig deur die B_1 - en B_2 -koëffisiënte, kan met behulp van die ander grondeienskappe verklaar word. Hieruit kan afgelei word dat die fosforvasleggingstempo voor en na die draaipunt baie varieer en dus moeilik kwantifiseerbaar is. Die hellings van die A- en B-gedeeltes van die latfunksie kan byvoorbeeld nie toegepas word om te voorspel hoeveel P vir die groei en ontwikkeling tydens die verskillende groei- en ontwikkelingsstadiums van die plante beskikbaar is nie.

Tabel 3.7 : Beste deelversamelingsregressie vir 15 grondeienskappe met koëffisiënte van Vergelyking 3.2

Afhanklike veranderlike	Onafhanklike veranderlike	r^2	a_0	a_1
B_0	5 Hoofkomponente HK 1 HK 2 HK 3 HK 4 HK 5	0.48	46.178	-1.843 -6.817** -1.966 -2.325* 0.107
B_1	5 Hoofkomponente HK 1 HK 2 KH 3 HK 4 HK 5	0.35	-1.615	-0.168* 0.231** 0.145* -0.059 -0.026
B_2	5 Hoofkomponente HK 1 HK 2 HK 3 HK 4 HK 5	0.25	-0.211	0.015 -0.020* -0.014 -0.020* -0.006
B_0	7 Grondeienskappe uit HK2 en 4 Fyn sand Slik Klei Na T-waarde C Titr. suurheid	0.62	62.372	0-057 - 1.703** - 0.791** -13.145 0.501 - 4.141 0.896
B_1	12 Grondeienskappe uit HK 1, 2 en 3. Fyn sand Slik Klei K Ca S-waarde T-waarde pH(H ₂ O) pH(CaCl ₂) C Al Titr. suurheid	0.328	1.096	-0.005 -0.020 -0.012 -0.485 0.293 -0.193* 0.009 -0.177 -0.229 -0.0002 -0.258 0.214**
B_2	9 Grondeienskappe uit HK 1, 2 en 4. Fyn sand Slik Klei Na K Ca pH(CaCl ₂) R Titr. suurheid	0.369	-0.031	0.0005 -0.003 0.002 0.250* 0.096 -0.092 -0.037 -0.0001 -0.020*

**P<0.001; *P<0.05

Die verklaring van 62% van die variasie in die B_0 -koëffisiënt word as redelik maar nie as baie goed beskou nie; daarom is besluit dat meer grondeienskappe wat fosforvaslegging beïnvloed, in aanmerking geneem moet word.

Uit die relevante vakliteratuur het dit geblyk dat die invloed van vry Al_2O_3 , Fe_2O_3 en MnO_2 (Na-dithionaat ekstraheerbaar) op fosforvaslegging nie buite rekening gelaat kan word nie (Hsu, 1965; Reeve & Sumner, 1970; Lin *et al.*, 1983). Daar is toe besluit om dieselfde passing weer te herhaal met 'n oefening waar hierdie grondeienskappe, soos vervat in Bylae B, wel in berekening gebring is. Die resultate word opgesom in Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Beste deelversamelingsregressie vir 15 grondeienskappe plus vry MnO_2 , Fe_2O_3 en Al_2O_3

Afhanklike veranderlike	Grondeienskappe	r^2	a_0	a_1
B_0	Slik Klei Al Titr. suurheid MnO_2	0.82	69.37	-0.741* -0.647** -63.04** 1.175* -0.0022**
B_1	pH(H_2O) pH($CaCl_2$) Titreerbare suurheid	0.33	0.983	-0.238 nb -0.306* 0.141**
B_2	Al Titr. suurheid	0.40	-0.107	0.517** -0.013*

** < 0.01; * < 0.05; nb, nie betekenisvol.

By die bestudering van die resultate soos dit in Tabel 3.8 opgesom is, is die volgende punte van belang.

- * Die r^2 van die B_0 -koëffisiënt het met die insluiting van Al_2O_3 , Fe_2O_3 en MnO_2 by die grondeienskappe wat in die passingslopië gebruik is, verbeter vanaf 0.62 na 0.82 - 'n verbetering wat statisties as baie goed beskou word.
- * Die regressievergelyking waarmee hierdie passing gekry is, lyk soos volg:

$$B_0 = 69.367 - 0.741 \text{ Slik} - 0.647 \text{ Klei} - 63.04 \text{ Al} \\ + 1.175 \text{ Titr. suurheid} - 0.0022 \text{ MnO}_2 \dots\dots\dots(3.4)$$

Al in dié vergelyking verteenwoordig die KCl-uitruilbare aluminium.
- * Die r^2 van die B_1 - en B_2 -koëffisiënte het nie noemenswaardig gestyg nie.

3.8 Gevolgtrekking

Die sukses van die latfunksie (Vergelyking 3.2) word beperk deur die kompleksiteit om die verskillende koëffisiënte te bepaal. Die latfunksie vaar daarom nie noodwendig beter as sommige van die bestaande modelle wat in relevante vakliteratuur beskryf is en wel met sukses gebruik word nie (hierdie modelle is reeds vroeër in hierdie studie bespreek). Die B_0 -komponent het uiteindelik geblyk die enigste nuttige komponent van die vergelyking te wees. Uit die voorafgaande afdeling is dit duidelik dat slegs die snypunt van die latfunksie (B_0) effektief bepaal kan word deur middel van die volgende grondeienskappe:

slikfraksie, kleifraksie, KCl-uitruilbare aluminium, titreerbare suurheid en MnO_2 . Die latfunksie bepaal verder dat hierdie snypunt min of meer by alle gronde op die sewende dag na fosfortoediening voorkom. Dit impliseer dus dat 'n unieke B_0 -waarde vir elke grondsoort bepaal kan word as bogenoemde eienskappe bekend is. Met hierdie waarde bekend, is dit dan moontlik om weg te beweeg van 'n veralgemeende grondbehoeftebepaling - soos wat tans die geval by fosfortoediening is - na 'n meer akkurate behoeftebepaling vir elke bepaalde grondsoort. Daar kan dus bepaal word hoeveel fosfor deur die grond vasgelê sal word vanaf toediening tot op die stadium dat die plant opname-meganismes ontwikkel het en met die grond kan kompeteer om fosfor. Hierdie punt van toetrede, soos reeds genoem is, vind plaas op ongeveer die sewende dag. Dit is dus 'n konkrete bewys dat fosfortoediening so na as moontlik aan planttyd moet geskied as wat prakties moontlik is. Sonder enige aanpassing van bestaande skeduleringsmetodes behoort 'n verkorting tussen fosfortoediening en planttyd reeds 'n besparing of 'n meer optimale benutting van fosfor tot gevolg te hê. Die werklike hoeveelheid fosfor wat uiteindelik planttoeganklik is, sal steeds teikenopbrengsgerig bly, maar dit is aan die hand van die voorafgaande gegewens moontlik om vir die spesifieke behoefte van 'n bepaalde grondsoort te kan voorsiening maak.

Daar moet in gedagte gehou word dat die resultate wat in hierdie hoofstuk beskryf word, behaal is na baie hoë toedienings van fosfor (100 mg kg^{-1}). Hierdie prosedure is egter gevolg bloot om te verseker dat daar geen tekorte sou ontstaan wanneer die eienskappe van die sorpsiekurwe bepaal sou moes word nie. Hieruit kan dus afgelei word dat die koëffisiënte van Vergelyking 3.3 sal verander vir ander vlakke van fosfortoediening maar

die metodiek vir die berekening van Bo behoort toepaslik te bly vanweë die meganisme van fosforsorpsie soos dit in hierdie hoofstuk bespreek is. Hierdie aspek word weer breedvoerig behandel in hoofstuk 5.

Dat Suid-Afrikaanse gronde 'n natuurlike fosfortekort het, word algemeen aanvaar. Dit is egter ook van belang om die opbou van fosfor in grond in aanmerking te neem by fosfobemestingsprogramme. Die opbou van fosfor moet spesifiek in gedagte gehou word by jaarlikse toedienings wat gegrond is op veralgemeende behoeftes wat nie spesifiek op 'n bepaalde grondsoort gerig word nie. Die vlak van hierdie fosforopbouing (residuele P) kan tot 'n groot mate die vasleggingsbehoefte van die bepaalde grondsoort bevredig. As die vasleggingsbehoefte bevredigend is, kan 'n betekenisvolle vermindering van fosfortoediening (relatief tot die algemene riglyn wat tans oor die algemeen vir gronde gebruik word) gedoen word sonder dat die gewas wat verbou word, benadeel word. Dit volg dan noodwendig dat indien Vergelyking 3.3 hiervoor aangepas kan word, verdere besparings in fosfortoediening bewerkstellig kan word. Dit word ook erken dat sommige van die grondeienskappe wat tans in Vergelyking 3.3 ingesluit is, nie beskou word as standaardroetinebepalings in grondanalises nie omdat dit praktiese implikasies inhou soos duurder en meer tydrawende analises. In die lig van die voorafgaande is dit dus nodig om die toepaslikheid van Vergelyking 3.3 in fosfortoediening te ondersoek vir gronde met residuele P.

HOOFSTUK 4

DIE INVLOED VAN RESIDUELE FOSFAAT OP FOSFAATSORPSIE

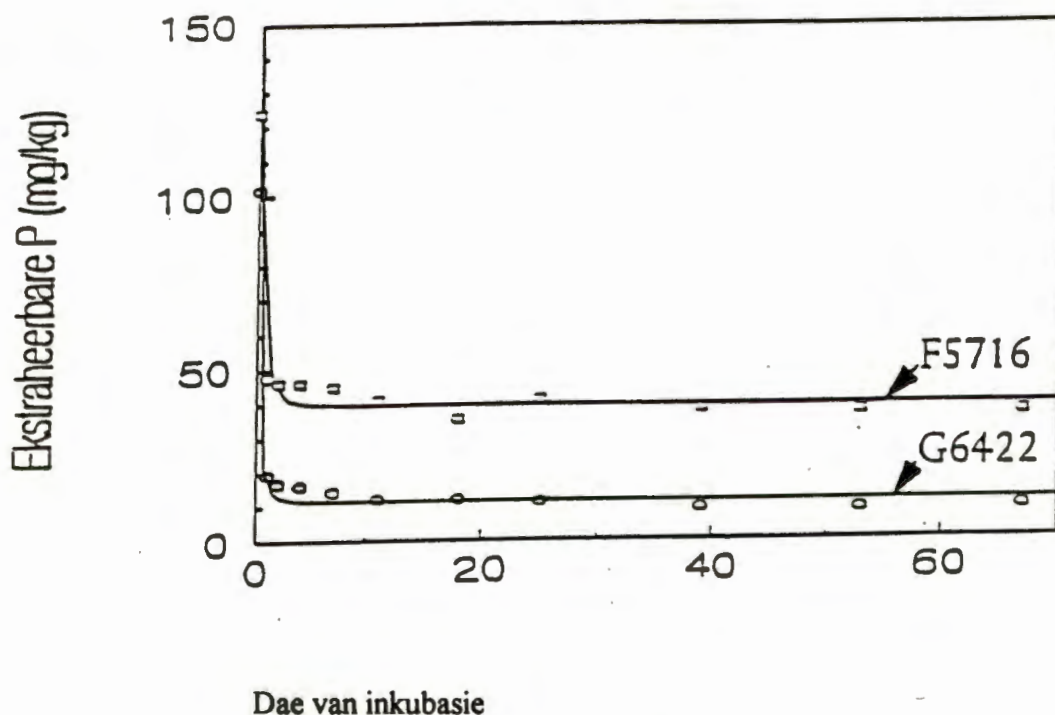
4.1 Residuele fosfor as kompliserende faktor

Die term *residuele fosfor* (P) beskryf die ekstraheerbare fosfor wat in 'n grond teenwoordig is as gevolg van voorafgaande bemestingspraktyke op die gewasse wat daarop verbou is. Die vlak van residuele fosfor kan tot 'n groot mate die P-vasleggingskapasiteit van die grond verminder. 'n Hoë vlak van residuele fosfaat kan tot gevolg hê dat die hoeveelheid fosfaat wat toegedien hoef te word vir die optimale groei en ontwikkeling van gewasse wat verbou word, betekenisvol kan verminder.

Verskeie navorsers het aangetoon dat residuele P op gronde die sorpsie van fosfaat sterk beïnvloed. Fox en Kamprath (1970) het die invloed van vorige fosfaattoedienings op P-sorpsie ondersoek en gevind dat fosfaatbemesting wat tien jaar tevore aan die grond toegedien is die sorpsiekurwe as geheel verskuif het, terwyl die vorm van die kurwe dieselfde gebly het. Hierdie bevinding word ook bevestig deur data wat verkry is op grond van die onderhawige studie (soos geïllustreer in Figuur 4.1).

In Figuur 4.1 word aangetoon hoe die P-sorpsiekromme van twee grondmonsters beïnvloed is deur die impak van residuele P. Albei grondmonsters het ongeveer dieselfde klei-inhoud (Bylae E, Monsters nr. G6422 en F5716), maar een monster (G6422) het slegs 1.86 mg kg^{-1} residuele P bevat terwyl die ander monster (F5716) 24 mg kg^{-1} bevat

het. By albei monsters is 100 mg kg^{-1} fosfaat gevoeg en vir dieselfde periodes geïnkubeer. Dit is duidelik dat die kurwe van monster nr. F5716 as geheel verskuif het terwyl die vorm sterk ooreenstem met dié van monster G6422.



Figuur 4.1 Verskuiwing van die fosfaatsorpsiekromme deur residuele P

Kafkafi *et al.* (1967) het gevind dat by gronde met hoë vlakke van residuele P, nuut toegediende fosfaat nie so stewig gebind word as by gronde met min of geen residuele P nie. Hulle stel dat die rede vir hierdie situasie waarskynlik daarin geleë is dat die fosfaat-ione in oplossing kompeteer met die residuele P vir binding aan die sorpsielokasiteite op die kleideeltjies. Met uitwassing van die monsters het hulle gevind dat 'n deel van die P onuitruilbaar raak. Hulle lei hiervan af dat die fosfaat-ione by laer konsentrasies hegt gebind word omdat een fosfaat-ioon aan twee of meer aluminium-ione in die kristalrooster van die klei oor 'n suurstofbrug gebind kan word. Yuan en Lavkulich (1994) het gevind dat die oorspronklik geadsorbeerde fosfaat die sorpsiekapasiteit in 43 monsters van

17 % tot 66 % verminder het.

Die reaksie tussen P en aluminium in kleimineraal is ook intensief ondersoek deur Hsu (1964 en 1965) en Hsu en Bates (1964). Hulle bevindings beklemtoon die invloed van pH-veranderinge op die reaktiwiteit van aluminium met fosfaat. Hulle het gevind dat wanneer fosfaat aan gronde met lae pH-waardes (< 4) toegedien word, aluminiumfosfate wat baie onoplosbaar is as 'n aparte fase neergeslaan word en sodoende as geheel uit die sisteem verwyder word. Die P-vasleggingskapasiteit word dus verminder deur die toediening van fosfaat.

Dit is algemeen bekend dat die natuurlike gronde in die Republiek van Suid-Afrika baie arm aan fosfor is. Du Toit *et al.* (1940) maak reeds melding van fosfaattekorte in natuurlike weidings van die destydse Unie van Suid-Afrika, soos geïdentifiseer deur sir Arnold Theiler, stigterslid van Onderstepoort Veeartsenykundige Instituut. Fosfaatbemesting van gewasse was reeds voor die Tweede Wêreldoorlog 'n gevestigde praktyk in Suid-Afrika toe rotsfosfate uit Marokko ingevoer is. Dié invoer is gestaak na die ontdekking van twee rotsfosfaatneerslae in Suid-Afrika, naamlik by Langebaan en by Phalaborwa. Die neerslag by Langebaan is organies van aard en dié by Phalaborwa is 'n anorganiese neerslag van fluorapatiet. Hierdie neerslae moet verder verwerk word om dit planttoeganklik te maak. In meer onlangse opnames (Instituut vir Grond, Klimaat en Water, 1984) word aangetoon dat die fosforinhoud van grondmonsters van natuurlike veld oor die algemeen tussen 0 en 3 mg kg^{-1} lê. Aangesien gronde onder akkerbougewasproduksie, as gevolg van gevestigde bemestingspraktyke feitlik sonder uitsondering 'n residuele P-komponent bevat, is 'n ondersoek in dié verband onontbeerlik. Volgens

relevante vakliteratuur het die residuele P 'n drastiese impak op die vasleggingskapasiteit van die grond.

Op die huidige tydstop word die bemestingskedulering vir gewasverbouing gebaseer op 'n grondontleding wat eenmalig per seisoen gedoen word. Grondmonsters wat ontleed word, word geneem op enige tydstop na die insameling van die oes tot net voor planttyd. Daar bestaan meningsverskil oor die toedieningshoeveelhede van fosfaat vir mielies. Hoofsaaklik twee verskillende benaderings, wat gebaseer is op kalibrasieproefresultate in verskillende produksiegebiede word gevolg: die Misstofvereniging van Suid-Afrika het in hul bemestingshandleiding (Misstofvereniging van Suid-Afrika, 1986) 'n spesifieke stel riglyne neergelê. Gedurende 1987 is 'n riglyn deur verskeie instansies saamgestel en gepubliseer (Human & Van Biljon, 1994).

Du Toit (1986) huldig die mening dat 'n geykte stel riglyne nie vir aanbevelings gebruik kan word nie en wel om die volgende rede: nie een van hierdie stelle riglyne neem die hoeveelheid fosfaat wat vasgelê word vandat die P-bemestingstof aan die grond toegedien word, tot die plant begin met P-opname, in ag nie. Dit is algemeen bekend dat 'n sekere hoeveelheid nuuttoegediente fosfaat, ongeag die P-status van die grond soos weerspieël in die grondontleding, 'n voordelige effek op die groei en ontwikkeling van mielies het (Misstofvereniging van Suid-Afrika, 1986; Human & Van Biljon, 1994). Dit sal ook later in hierdie studie aangedui word dat selfs by gronde wat 'n relatief hoë residuele P-status het, 'n deel van die fosfaat wat tot die monster bygevoeg word, steeds vasgelê word. 'n Deel van die nuuttoegediente fosfaat word dus nie weer onttrek nie - selfs binne een dag na toediening.

Om hiervoor voorsiening te maak, word met huidige praktyke aanbeveel dat gronde waarvan die P-inhoud laer is as die optimale vlak soos deur kalibrasie vir die produksiegebied aangetoon is, opgebou word deur 'n sekere hoeveelheid fosfaatbemesting voor planttyd in te ploeg. Met planttyd moet dan nog 'n klein hoeveelheid fosfaatbemesting in die ry toegedien word. Hierdie bemestingsmetode gee aanleiding tot 'n onakkurate, onder- sowel as oorbemesting met nadelige finansiële implikasies.

Dit is dus nodig om 'n meer akkurate benadering te vind waarmee vasgestel kan word hoeveel fosfor na toediening vasgelê word, sonder dat dit planttoeganklik is. Daar moet ook akkuraat vasgestel kan word hoeveel fosfaatbemesting nodig is om die ekstraheerbare fosfor vanaf die vlak waarop dit verkeer te verhoog na die gewenste vlak vir optimale groei en ontwikkeling. In die vorige hoofstuk is vasgestel dat die hoeveelheid ekstraheerbare fosfor in die grond, op min of meer die sewende dag na toediening, met 'n hoë mate van akkuraatheid bereken kan word met behulp van Vergelyking 3.3. Hierdie vergelyking is afgelei van grondmonsters wat geringe hoeveelhede residuele P bevat. Die komplikasies wat residuele P op die sorpsie van P het, is egter uitgewys en moet dus in aanmerking geneem word. In hierdie hoofstuk word 'n ondersoek beskryf wat gedoen is met grondmonsters wat geneem is in mielielande in 'n grondhorison wat wel residuele P bevat.

4.2 Die studiegebied

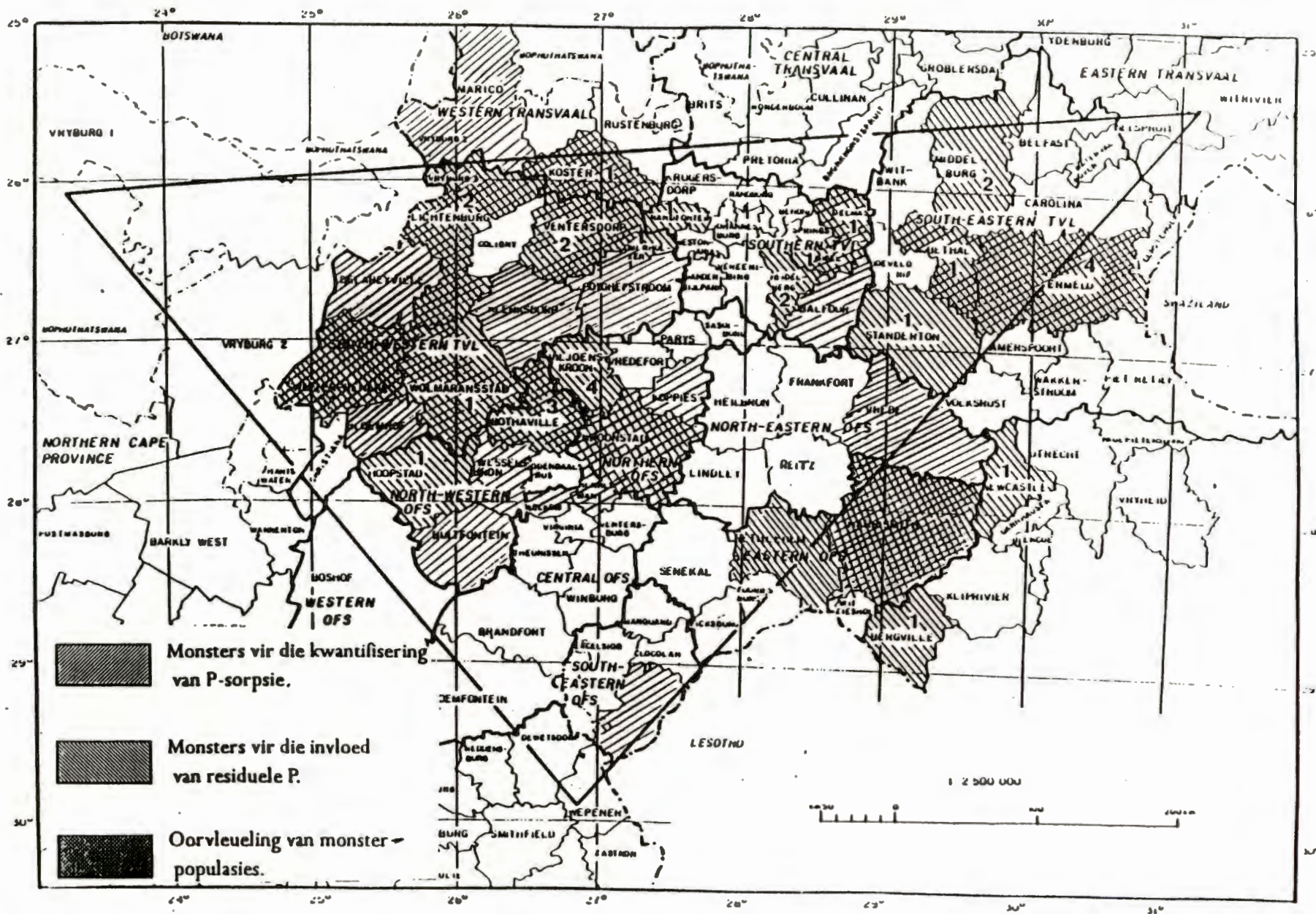
Die gebied waaruit die monsters vir hierdie deel van die studie afkomstig is, dek dieselfde geografiese area as wat in Hoofstuk 3 beskryf is. Hierdie geografiese gebied strek vanaf

Hoopstad in die suidweste tot Ermelo in die noordooste en vanaf Bethlehem in die suidooste tot Lichtenburg in die noordweste. Deur die grondmonsterpopulasie op hierdie wyse saam te stel is gepoog om eutrofiese, mesotrofiese en distrofiese gronde in die monsterpopulasie te verteenwoordig - net soos in die vorige proefneming wat in Hoofstuk 3 beskryf is. Vir hierdie ondersoek is daarop gekonsentreer om 'n reeks monsters te bekom wat 'n wye spektrum van residuele fosfaatinhoude het. Al die akkerbouproduksie-sowel as die klimatologiese streke wat in die vorige proefneming ingesluit is, is wel in hierdie monstergebied verteenwoordig. Drie grondmonsters is afkomstig uit Natal, naamlik uit Greytown, Dundee (New Castle-distrik) en Geluksburg (Bergville-distrik). Hierdie grondmonsters kom uit proefpersele op gronde met bewese, sterk P-sorpsie-eienskappe.

Die grondmonsters verskil van die vorige monsters spesifiek ten opsigte van die hoeveelheid residuele fosfaat wat dit bevat. Al hierdie monsters is geneem in die A-horison in bewerkte lande waar in die verlede fosfaatbemesting toegepas is. Die residuele P (*ambic*)-inhoud, die grondvorm wat die monsters verteenwoordig en die naaste dorpe waarvandaan hulle afkomstig is, word in Tabel 4.1 aangetoon. Figuur 4.2 dui die landdrosdistrikte aan waarin monsters met residuele fosfaat geneem is. Die mielie-produiserende gebied van die Vrystaat en Transvaal word aangedui deur 'n driehoek wat op die kaart aangedui word.

Tabel 4.1 Residuele (*ambic*) fosforinhoud, grondvorm en landdrosdistrikte waarin grondmonsters met residuele P geneem is

Monsternommer	Fosforinhoud mg kg ⁻¹ (<i>ambic</i>)	Grondvorm	Landdrosdistrik
F5702	3.5	Bainsvlei	Randfontein
F5703	6.3	Hutton	Oberholzer
F5704	8.0	Hutton	Ventersdorp
F5705	21.4	Avalon	Ventersdorp
F4706	8.3	Hutton	Lichtenburg
F5707	4.5	Avalon	Viljoenskroon
F5708	11.6	Avalon	Bothaville
F5709	15.2	Avalon	Wolmaransstad
F5710	31.0	Avalon	Schweizer-Reneke
F5711	99.2	Clovelly	Lichtenburg
F5712	3.2	Hutton	Heidelberg
F4713	4.2	Clovelly	Nigel
F5714	5.6	Hutton	Koster
F5715	12.0	Avalon	Bethlehem
F5716	24.0	Bainsvlei	Standerton
G6415	2.68	Avalon	Bothaville
G6416	4.93	Clovelly	Bothaville
G6417	26.77	Avalon	Viljoenskroon
G6418	26.12	Avalon	Hoopstad
G6419	61.40	Avalon	Kroonstad
G6420	56.07	Avalon	Viljoenskroon
G6421	2.17	Hutton	Ermelo
G6422	1.86	Hutton	Ermelo
G6423	9.93	Hutton	Ermelo
G6424	3.57	Bainsvlei	Harrismith
G6425	14.47	Hutton	Middelburg
G6426	13.09	Hutton	Middelburg
G6427	7.82	Hutton	Heidelberg
G6428	10.13	Hutton	Greytown
G6429	20.99	Avalon	Geluksburg
G4630	54.58	Clovelly	Dundee
G6431	4.68	Avalon	Lichtenburg
G6432	3.24	Hutton	Nigel



Figuur 4.2 Kaart van studiegebied met distrikte ingekleur waar monsters met meer residuele fosfor geneem is.

4.3 Dataversameling

4.3.1 Grondanalises

'n Groot aantal monsters is eerstens ontleed vir ekstraheerbare P volgens die metode van Van der Merwe *et al.* (1984). Uit hierdie monsters wat ontleed is, is 33 monsters gekies waarvan die residuele P-inhoud tussen 1.86 mg kg⁻¹ tot 90.2 mg kg⁻¹ lê (Tabel 4.2). Die maksimum en minimum ontledingsyfers vir 18 ander grondeienskappe word in dieselfde Tabel aangetoon.

Tabel 4.2 Minimum en maksimum waardes van grondeienskappe van 33 monsters met residuele P

	Resid. P(mg kg ⁻¹)	Fyn sand %	Slik %	Klei %	Na cmol _e /kg grond	K cmol _e /kg grond	Ca cmol _e /kg grond	Mg cmol _e /kg grond	S-waarde cmol _e /kg grond
Min	1.86	12.2	1.8	3.8	0.0	0.05	0.03	0.08	0.26
Maks	90.2	55.6	19.8	72.9	0.05	0.54	7.67	1.16	9.09

	T- waarde cmol _e /kg grond	pH (H ₂ O)	pH (CaCl ₂)	R Ohm	C (%)	KCl ekst. Al cmol _e /kg grond	Tit. suur cmol _e /kg grond	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO ₂ (mg/kg)	Al ₂ O ₃ (%)
Min	0.85	3.5	3.4	598	0.15	0.00	0.03	0.40	7	0.07
Maks	9.17	6.6	6.59	8993	2.70	2.01	3.84	7.45	735	2.33

As daar na die ontledingsresultate van hierdie monsters gekyk word (Tabel 4.2 en Bylae E), blyk dit dat verskeie fisiese en chemiese eienskappe van hierdie gronde verskil met dié van baie van die monsters wat in die vorige proefneming (Hoofstuk 3) gebruik is. Die

verskil in chemiese en fisiese eienskappe geld veral ten opsigte van klei-inhoud, pH, basisvormende kationinhoud en KCl-uitruilbare Al-inhoud van die monsters.

Verskeie van die monsters wat in hierdie populasie ingesluit is, kan as hoogverweerd geklassifiseer word. Daar is byvoorbeeld sewe monsters wat volgens die binomiese klassifikasiesisteem (MacVicar *et al.*, 1977) as distrofies beskou kan word (Monsters nr. G6421, G6428, G4629, F5712, F5713, F5714 en F5716). Een van hierdie monsters (nr. G6428), het 'n buitengewone hoë klei-inhoud (72.9 %) en is doelbewus vanaf 'n proefperseel in Natal (Greytown-distrik) by hierdie groep monsters ingesluit omdat dit bekend is dat hierdie grond 'n hoë P-vasleggingskapasiteit het. Die res van die monsters kom egter almal uit dieselfde monstergebied as die groep wat vir die proefneming in Hoofstuk 3 gebruik is, en is óf uit dieselfde landdrostdistrikte óf aangrensend daaraan geneem ten einde 'n ooreenstemmende geografiese verspreiding te kry (Figuur 4.2). Die opvallende verskille in grondeienskappe van hierdie groep en die vorige monsterpopulasie was nie doelbewus nagestreef nie maar het toevallig aan die lig gekom met die ontleding van die monsters. Die enigste kriterium vir die insluiting in die monsterpopulasie vir hierdie studie was 'n verskeidenheid van residuele P-inhoude op dieselfde grondvorme as wat in die vorige proefneming gebruik is.

In hierdie groep monsters kom ook besondere lae pH-syfers voor, byvoorbeeld 24 monsters met 'n pH(H₂O) van <5 en 9 met 'n pH(CaCl₂) <4. Omdat die monsters in die groep almal in die A-horison geneem is in bewerkte lande waar stikstofbemesting 'n algemene praktyk is, kon dit aanleiding gegee het tot versuring as gevolg van nitrifikasie. Hierdie versuring het 'n verlies aan basisvormende katione en die verhoging van KCl-

uitruilbare aluminium ten gevolg gehad.

Oënskynlik is hierdie groep monsters meer verweerd as die vorige groep - dit is egter nie met 'n kleimineraalanalise bevestig nie. Vir hierdie proefneming is net gekonsentreer op dieselfde chemiese en fisiese grondeienskappe wat 'n rol speel by fosfaatvaslegging - grondeienskappe wat met dieselfde iterasietegnieke ondersoek kan word ten einde die bydrae van elk op P-sorpsie vas te stel.

Dieselfde inkubasiestudie, soos beskryf in Hoofstuk 3, is op hierdie monsters met residuele P uitgevoer. Vir 'n volledige bespreking van die prosedure word verwys na paragraaf 3.3. Die waardes van die ekstraheerbare P-inhoud by verskillende inkubasiëperiodes van die monsters met minimum en maksimum residuele P word aangetoon in Tabel 4.3.

Tabel 4.3: Die waardes van ekstraheerbare P by verskillende inkubasiëperiodes van die monsters met minimum en maksimum residuele P

	Monster- nommer	Dag 1	Dag 2	Dag 4	Dag 7	Dag 11
Min	G6422	19.5	16.8	16.0	14.2	12.0
Maks	F5711	143.3	145.0	147.5	141.3	146.2

	Monster- nommer	Dag 18	Dag 25	Dag 39	Dag 53	Dag 67
Min	G6422	11.9	11.2	9.2	8.8	9.3
Maks	F5711	140.8	141.2	141.7	133.4	133.3

Die volledige stel resultate word aangetoon in Bylaag F.

By die bestudering van die syfers in Tabel 4.3 sowel as in Bylae F, is dit opvallend dat selfs by die monster wat die hoogste vlak residuele P bevat (nr. 5711), is 'n groot deel van die toegediende 100 mg kg^{-1} fosfaat vasgelê wat nie deur die ekstraksieoplossing herwin kon word nie. Van die $(90.24 + 100) \text{ mg kg}^{-1}$ fosfor wat aan die begin van die reaksie in die sisteem teenwoordig was, kon op die sewende dag slegs 141.3 mg kg^{-1} herwin word - 48.94 mg kg^{-1} is dus vasgelê. By monster nr. G6422 waar die residuele P-inhoud baie laag was, kon net 14.2 mg kg^{-1} P herwin word - 87.66 mg kg^{-1} wat dus aan die begin van die reaksie in die grond teenwoordig was, is nie weer herwin nie.

Die mate waartoe die sorpsiekurwe bokant die vlak van residuele P styg, is 'n unieke funksie van die bepaalde grondeienskappe van die betrokke gronde. Hierdie styging word geïllustreer deur monsters F5708 en F5715 (Bylae F) wat respektiewelik 11.60 en 11.85 mg kg^{-1} residuele P bevat aan die begin van die inkubasieproses. Die hoeveelheid ekstraheerbare P op die sewende dag van inkubasie was 84.2 en 28.2 mg kg^{-1} onderskeidelik - 'n toestand wat daarop dui dat heelwat meer P-vaslegging voorgekom het by die tweede monster. Die verskil in grondeienskappe van die twee monsters word aangetoon in Bylae E. Die grootste verskille is waarneembaar in die klei-inhoude, die S- en die T-waardes.

4.3.2 Vergelyking van resultate van monsters met en sonder residuele fosfaat

Figuur 4.2 illustreer hoedanig die monstergebiede ooreenstem in die ondersoeke van die sorpsiekurwekwantifisering (Hoofstuk 3) en die invloed van residuele P (Hoofstuk 4). Daar word in Tabel 4.4 hierna verwys as die sorpsiekurwekwantifiseringsgroep (groep A)

en die monstergroep van hierdie ondersoek (groep B). In Tabel 4.4 word die gemiddelde waardes van alle grondeienskappe vir die twee stelle monsters weergegee.

Tabel 4.4: Gemiddelde waardes van die grondeienskappe tussen die monsters van sorpsiekurwekwantifisering (50 monsters, groep A) en die invloed van residuele P (33 monsters, groep B)

Grond-eienskap	Fyn sand %	Slik %	Klei %	Na cmol/kg grond	K cmol/kg grond	Ca cmol/kg grond	Mg cmol/kg grond	S-waarde cmol/kg grond	T-waarde cmol/kg grond
Groep A	52.4	4.02	18.4	0.06	0.24	1.99	1.25	3.54	5.2
Groep B	42.1	7	25.4	0.03	0.17	1.6	0.37	2.27	3.14

Grond-eienskap	R Ohm	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	C %	Kcl ekstr. Al cmol/kg grond	Tit. suur cmol/kg grond	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₂ mg/kg	Al ₂ O ₃ %
Groep A	2936	6.12	5.51	0.3	0.04	1.6	1.43	385.5	0.35
Groep B	1238	4.75	4.2	1.08	0.74	0.91	2.81	171.8	0.87

Die mees opvallende verskille tussen die gemiddelde waardes van die grondeienskappe van die twee stelle monsters lê daarin dat groep B fyner van tekstuur is as groep A. Hierdie verskil word weerspieël in die gemiddelde slik- en klei-inhoude (ongeveer 3 % meer slik en 7 % meer klei). Te oordeel aan die S- en pH-waardes is die monsters in groep B ook meer uitgeloog. Hierdie verskille gee aanleiding daartoe dat die persentasieverhouding van S-waarde tot klei ($S\text{-waarde}/\text{klei} \times 100$) vir groep B ook laer is as die vergelykende waardes by groep A. Daar kan dus verwag word dat die monsters van groep B oor die algemeen meer distrofies van aard sal wees. Dit word bevestig

deurdat monstergroep A slegs in een geval gedefinieer kan word as distrofies, in 13 gevalle as mesotrofies en in 36 gevalle as eutrofies. Hierteenoor is die verdeling by monster-groep B onderskeidelik 7, 17 en 9 (Bylae E). Dit moet weereens beklemtoon word dat hierdie verskille nie bewustelik geselekteer is nie: hierdie monsters is tot groep B toegelaat vanweë die spektrum van residuele P wat deur die groep monsters verteenwoordig moes word.

Die aanvangskonsentrasies van fosfor voor inkubasie by groep B het ook verskil van groep A. In laasgenoemde geval is die hoeveelheid residuele P negeerbaar min en het die inkubasiereaksie vir alle praktiese doeleindes by dieselfde P-inhoud vir alle monsters in hierdie groep begin, naamlik die 100 mg kg^{-1} , wat aanvanklik toegedien is. Hierteenoor het die inkubasiereaksie in groep B begin by 'n P-inhoud gelykstaande aan die residuele P-inhoud plus die 100 mg kg^{-1} wat addisioneel toegedien is. Na aanleiding van Kafafi *et al.* (1967) se bevindinge kan verwag word dat die nuuttoegedienende fosfaat swakker geadsorbeer sal word by monsters met hoë vlakke van residuele P as by monsters met lae vlakke van residuele P. Hierdie situasie sal dus aanleiding gee tot groter variasie in die P-vaslegging by monstergroep B. Hierdie waarneming word bevestig deur 'n groter variasie in die wisseling van r^2 by die passing van 'n soortgelyke latfunksie op hierdie monsters as wat die geval in groep A was (par. 3.5.2).

4.4 'n Vergelyking van die latfunksie by gronde met en gronde sonder residuele fosfaat

Die koëffisiënte van die beste en swakste latfunksiepassings vir gronde met residuele P word in Tabel 4.5 aangetoon - vir 'n volledige stel resultate word verwys na Bylae G.

Hieruit is dit duidelik dat die latfunksiepassings by gronde met residuele P oor die algemeen swakker is as by dié daarsonder (Tabel 3.5). Die resultaat bevestig die verwagtinge van par. 4.3.2 ten opsigte van swakker bindings by gronde met hoë residuele P, soos reeds bespreek, asook 'n groter variasie in die wisseling van r^2 (0.63 tot 0.99, Tabel 3.5 teenoor 0.08 tot 0.93, Tabel 4.5). Die hoeveelheid residuele P-inhoud speel egter nie alleen 'n rol in die mate van P-vaslegging wat in 'n grond plaasvind nie, aangesien daar in die geval van monsters G6429 en F5711 (Bylae G) wel hoë vlakke van residuele P voorgekom het. Die latfunksie toon egter hier ook 'n hoë mate van sukses in die beskrywing van die P-vaslegging wat wel voorgekom het ($r^2 > 0.70$) in genoemde grondmonsters.

Hoewel daar nie 'n kleimineralogiese ondersoek gedoen is nie, is dit onwaarskynlik dat die veranderde latfunksieresultaat van hierdie ondersoek toegeskryf kan word aan mineralogiese verskille tussen die groep A- en B-gronde omdat albei uit dieselfde monstergebied afkomstig is. Kleimineralogie kan, volgens tersaaklike vakliteratuur, 'n beduidende invloed hê. Die kompleksiteit van kleimineralogiese analyses, die kwalitatiewe aard van sodanige analyses en die moontlikheid dat dit kan lei tot die gebruik van nie-roetine-analises wanneer oorgegaan word tot P-bemestingskedulering, sal egter die doelwitte van die studie verydel. Die verskil in die variasie van die r^2 -wisseling tussen groep A en B lê eerder in die moontlike biologiese reaksies wat tydens inkubasie kon plaasvind in die gronde wat ryk is aan residuele P (groep B). Hierdie gronde, soos reeds genoem, is afkomstig uit hoofsaaklik die A-horison en het 'n hoër organiese materie-inhoud en mikrobe-aktiwiteit (kyk die persentasieverskil van die C-inhoud tussen groep A en B in Tabel 4.4). As gevolg van hierdie hoër organiese materie-inhoud en mikrobe-aktiwiteit kan die mikro-organismewerking die P-vaslegging in die groep B-gronde

beïnvloed het. Die moontlikheid om die monsters voor inkubasie te steriliseer is nie oorweeg nie omdat daar gepoog is om die inkubasiereaksie so na as moontlik aan natuurlike toestande te hou. Muribu en Karathanasis (1994) suggereer verder dat 'n toename in organiese materiaal P-sorpsie kan verminder en stel dat die organiese anione die potensiele P-sorpsie-aanhegtingspunte blokkeer. Dit behoort dan ook te lei tot 'n verlaging in r^2 - 'n aanname wat deur die resultate ondersteun word.

In die geval van groep B-gronde met 'n hoë KCl-uitruilbare Al-inhoud het die latfunksie oor die algemeen beter resultate gelewer (kyk Bylae E en G). Die uitruilbare Al gee moontlik aanleiding tot die vorming van onekstraheerbare Al-P presipitate wat noodwendig moet lei tot 'n verbetering in r^2 . Die goeie resultate van die latfunksie in die groep A-gronde wat oor die algemeen 'n laer KCl-uitruilbare Al-inhoud het, is toe te skryf aan die feit dat daar in dié geval nie kompetisie vir sorpsielokaliteite met residuele P was nie. In die geval van die swakke r^2 -waardes van die groep B-gronde, was die KCl-uitruilbare Al-inhoud wel laag (Bylae E, monsters G6416 tot G6420).

Tabel 4.5 Beste en swakste latfunksiepassing uit 33 grondmonsters met residuele P

	B_0	B_1	B_2	r^2	Residuele P
Swakste	90.30	-1.59	-0.04	0.08(<.33)	24.9
Beste	12.79	-0.10	-0.76	0.93	3.24

Die latfunksiebenadering toon egter ook nie in die geval van die groep B-gronde 'n groter mate van sukses in die beskrywing van P-vaslegging as enige ander numeriese beskrywing nie. Die biologiese waarde van die verskillende koëffisiënte bly egter steeds van krag. Hierdie biologiese waarde van die verskillende koëffisiënte verhoog die nuttigheidsgraad van die latfunksie in die praktyk en illustreer in sowel die groep A- as die B-gronde dat indien die koëffisiënte van die latfunksie deur middel van bepaalde grondeienskappe bereken word, dit die gebruiker in staat sal stel om meer spesifiek te kan onderskei tussen gronde. Gevolglik sal die gebruiker die P-toediening aansienlik kan optimaliseer - met gepaardgaande finansiële voordele. Die vereistes vir die berekening van hierdie koëffisiënte aan die hand van bepaalde grondeienskappe bly steeds dat die betrokke grondeienskappe uit relatief maklik en prakties bepaalbare en bekostigbare roetine-waarnemings gedoen moet kan word. In die geval van die groep A-gronde was hierdie ideaal tot 'n mindere mate bereik. Die dominante rol van residuele P in die geval van die groep B-gronde mag moontlik daartoe aanleiding gee dat sommige van die moeiliker bepaalbare grondeienskappe, soos aangetoon in par. 3.7, verder vereenvoudig kan word.

B_0 , soos reeds aangetoon in Hoofstuk 3, kan aan die hand van Vergelyking 3.3 redelik akkuraat bepaal word. Daar kan derhalwe verwag word dat indien hierdie vergelyking aangepas word, B_0 ook redelik akkuraat bepaal sal kan word vir gronde met residuele P. Die bepaalde grondeienskappe wat hier 'n rol sal speel, mag egter verskil van die resultate van die proefneming wat in Hoofstuk 3 beskryf is. Op grond van hierdie resultate is dit egter duidelik dat residuele P wel 'n dominante rol sal speel in 'n aanpassing van Vergelyking 3.3. Dit is ook verder duidelik dat die regressies swakker vaar met veral die

hoër residuele P-vlakke ($r^2 = 0.63$, Tabel 3.5, teenoor $r^2 = 0.08$, Tabel 4.4). Dit is egter juis hierdie groep gronde wat aansienlik minder fosfaataanvulling benodig. Vanuit 'n finansiële oogpunt is die verminderde akkuraatheid geassosieer met kleiner hoeveelhede toegediende fosfaat. Hierdie kleiner hoeveelheid toegediende fosfaat behoort dus nie 'n wesenlike invloed op die toepassing van fosfaatbemesting te hê nie. Die vermindering in fosfaattoediening sal egter aanvanklik met groter skeptisisme deur die eindgebruiker bejeën word en die ideaal is om die berekening van veral B_0 te verbeter. Die bepaalde grondeienskappe wat met residuele P in gronde geassosieer word, verdien dus verdere aandag.

4.5 Aanpassing vir die berekening van B_0

Die hoofkomponent-analise soos toegepas in Hoofstuk 3 is in hierdie geval buite rekening gelaat omdat dit reeds in Hoofstuk 3 as onbevredigend aangetoon is. In 'n eerste poging is die beste deelversamelingsprosedure op die vyf grondeienskappe van Vergelyking 3.4 herhaal op die 33 grondmonsters met residuele P. Hierdie metode is gebruik om te bepaal of dit nodig is om die vergelyking aan te pas vir residuele P-ryk gronde; die resultate word aangetoon in Tabel 4.6.

Tabel 4.6 : Deelversamelingsresultate van die vyf grondeienskappe soos geïdentifiseer in Vergelyking 3.4

Iterasie	Afhank. verand.	Onafh. verand.	r^2	a_0	St. afwyking	a_i	St. afwyking
1 i=1	B_0	x1:% slik	0.578	110.99**	8.44	-6.98**	1.04
2 i=2	B_0	x1:% slik x2:% klei	0.684	115.47**	7.60**	-2.98nb -1.263*	1.49 0.375
3 i=3	B_0	x1:% slik x2:% klei x3: Al	0.673	115.34**	7.85	-2.91nb -1.248* -1.0nb	1.68 0.416 11.4
4 i=4	B_0	x1:% slik x2:% klei x3: Al x4: Tit. suur	0.665	114.81**	8.00	-3.21nb -1.32* 1.2nb 3.12nb	1.78 0.44 12.2 5.56
5 i=5	B_0	x1:% slik x2:% klei x3: Al x4: Tit. suur x5: Mn	0.655	116.76**	9.11	-3.34nb -1.229* -0.6nb 2.99nb -0.0115nb	1.82 0.486 13.0 5.64 0.245

Die impak van residuele P op die berekening van B_0 is reeds bespreek in die voorafgaande afdeling. Aangesien onbevredigende resultate behaal is met die verskillende hoofkomponente (soos in Hoofstuk 3 aangetoon is), is besluit om residuele P slegs by te voeg by die bestaande grondeienskappe soos geïdentifiseer in Vergelyking 3.3. Daar is dus direk oorgegaan na die beste deelversamelingsregressietegniek waarin op 'n iteratiewe basis byvoegings gemaak is van die genoemde grondeienskappe soos aangetoon in Tabel 4.7.

Tabel 4.7 : Opsomming van die beste deelversamelings van verskillende grondeienskappe in die berekening van B_0 vir die 33 grondmonsters in die bestudering van die impak van residuele P

Iterasie	Afh. verand.	Onafh. verand.	r^2	a_0	St. afwyking	a_1	St. afwyking
1. $i=1$	B_0	x_1 : % Klei	0.653	110.0**	7.4	- 1.86**	0.23
2. $i=2$	B_0	x_1 : % Klei x_2 : Res P	0.885	78.47**	5.84	- 1.343** 1.05**	0.15 -0.13
3. $i=3$	B_0	x_1 : % Klei x_2 : Res P x_3 : Al	<u>0.936</u>	<u>74.37**</u>	4.43	-0.642** <u>1.181**</u> <u>-23.55**</u>	-0.18 0.10 4.72
4. $i=4$	B_0	x_1 : % Klei x_2 : Res P x_3 : Al x_4 : F. sand	0.945	108.99**	15.3	-0.918** 1.12** -23.0** -0.64*	0.21 0.098 4.40 0.28
5. $i=5$	B_0	x_1 : % Klei x_2 : Res P x_3 : Al x_4 : F. sand x_5 : MnO_2	0.946	108.7**	15.1	-0.791** 1.134** -24.55** - 0.623* - 7.52 nb	0.227 0.097 4.53 0.27 6.00

Funksie: $Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i$

Waar: $Y = B_0$
 X_i = i-de grondeienskap
 a_i = i-de koëffisiënt
 n = aantal grondeienskappe
* = $<P(0.05)$
** = $<P(0.01)$

Met die byvoegings van klei, residuele P en Al is 'n r^2 van 0.653 bereik - 'n r^2 wat 'n uiters bevredigende omvatting van die variasie in B_0 weerspieël. Addisionele byvoegings van grondeienskappe het wel die r^2 verder verhoog maar die relatiewe bydrae hiervan het minder betekenisvol geblyk te wees. Hierdie r^2 -verhoging het ook verder relatief min

bygedra tot die omgrensing van die variasie in B_0 . Hierdie addisionele grondeienskappe kan dus geïgnoreer word. Die impak van residuele P op die berekening van B_0 is dus uiters groot. Ook dui dit op die absolute belangrikheid dat hierdie eienskap ingesluit moet word in die berekening van fosfaattoediening vir enige akkerbougewas wat afhanklik is van P-aanvulling. Die berekening van B_0 word nou deur die volgende regressie weergegee:

$$B_0 = 74.37 - 0.642(\text{klei}) + 1.181(\text{residuele P}) - 23.55(\text{Al}) \dots\dots\dots (4.1)$$

Hierdie regressie is weereens geldig by 'n baie hoë toediening van fosfaat (100 mg kg^{-1}), maar is uitgevoer by hierdie toediening ten einde resultate met Hoofstuk 3 vergelykbaar te hou. Soos in Hoofstuk 3 gemeld is, kan verwag word dat die koëffisiënte van Vergelyking 4.1 sal verander met ander peile van fosfaattoediening. Die eienskappe wat noodsaaklik is om die B_0 te bepaal sal egter dieselfde bly aangesien die meganisme van P-vaslegging dieselfde bly. Net die mate waartoe vaslegging self plaasvind, sal varieer. Die regressie het ook die verdere nadeel dat dit empiries van aard is en nie onbeperk geëkstrapoleer kan word nie. Die regressie sal egter kenmerkend bly van die omvangrykheid van die studiegebied wat deur die data voorgestel word. In Hoofstuk 5 sal meer aandag geskenk word aan die invloed van onder andere die P-kunsmisbron en ander faktore wat Vergelyking 4.1 kan beïnvloed. Die basis van hierdie vergelyking kan egter nie weerlê word nie, naamlik dat die P-vasleggingseienskap van 'n grond meer akkuraat bepaal kan word as met bestaande tegnieke. Hierdie bestaande tegnieke poog om die P-toediening vir 'n spesifieke grond te optimaliseer.

4.6 Bespreking van B_0 -aanpassingsresultate

Die vyf grondeienskappe wat B_0 in Vergelyking 3.3 beskryf, is deur middel van die proefneming met gronde wat residuele P bevat, gereduseer tot drie eienskappe wat relatief standaardtegnieke vereis. Sodoende word die praktiese toepassingswaarde vir die berekening van B_0 dus verhoog. Hierdie proses vereis nie spesiale tegnieke, opleiding en/of gesofistikeerde laboratoriums nie. Dié proses sal ook nie lei tot duurder of meer tydrowende analyses nie. Ook sal die proses aangewend kan word binne die raamwerk van bestaande prosedures wat tans van toepassing is in die meeste roetinelaboratoriums. Die relatiewe eenvoud van Vergelyking 4.1 maak dit moontlik om baie akkuraat te bepaal hoeveel P toegedien moet word vir 'n bepaalde styging in residuele P aan die hand van bestaande data. Hierdie voordeel hou die moontlikheid in om duur en tydrowende kalibrasieproewe in verskillende grondtipes uit te skakel. Die genoemde grondeienskappe is bekend aan bemestingsadviseurs en die oordra van die interaksie, soos beskryf in Vergelyking 4.1, behoort sonder die hulp van hooggeskoolde grondkundiges aan die industrie oorgedra te kan word.

Die drie veranderlikes in Vergelyking 4.1 is die netto resultaat van verskeie benaderings aangaande die verwantskap tussen P-vaslegging in grond en die bepaalde grondeienskappe wat daarmee geassosieer word. Dit is duidelik uit die resultate dat die grondeienskappe sterk interafhanklik is in hul wisselwerking met P. Die klei-inhoud-parameter in Vergelyking 4.1 is dus die beste kwantitatiewe aanduiding van die beskikbare adsorpsielokaliteite. Ook hang die adsorpsielokaliteite saam met die blootgestelde Al in die kleikristalraamwerk. Dit impliseer noodwendig dat Al ook die P-sorpsie sal beïnvloed

en daarom is dit te verwagte dat die twee grondeienskappe in die uiteindelijke vergelyking sou figureer. Bestaande vakliteratuur ondersteun hierdie siening in 'n hoë mate - vergelyk byvoorbeeld die bevinding van Yuan en Lavkulich (1994) asook dié van Muribu en Karathanasis (1994).

Die moeiliker verklaarbare element wat nie in Vergelyking 4.1 realiseer nie is Fe-oksiede Pretorius (1991) was ook nie suksesvol in die kwantifisering van hierdie element se rol in P-sorpsie nie, ten spyte van aansprake in tersaaklike vakliteratuur dat dit 'n belangrike komponent van P-sorpsie is. In die onderhawige studie kon geen statistiese bewyse gevind word wat die interaksie betrek nie. Brennan *et al.* (1994) meld dat 'n toename in P-sorpsie, tesame met 'n toename in Fe-oksiede in verskeie ondersoeke aangetoon word. Vijayachandran en Harter (1975) beweer egter dat Fe-oksiede slegs belangrik word in gronde waar die Al-oksied-inhoud baie laag of konstant is. In gronde waar Al-oksiede dominant is in P-sorpsie is gevind dat Fe-oksiede eers belangrik begin word nadat sommige van die Al-oksiede verwyder is (Bromfield, 1965). Die dominante rol van Al-oksiede in hierdie studie word bevestig deur die oorwegend hoë KCl-ekstraheerbare Al - soos duidelik gesien kan word uit Bylae E.

Die relatiewe rol van residuele P in die sorpsieproses word selde in vakliteratuur betrek. Hierdie element speel egter, soos afgelei kan word uit Tabel 4.7, 'n sleutelrol in die P-vaslegging van gronde wat in die studiegebied ondersoek is. Die koëffisiënt van determinasie (r^2) in die P-vasleggingsondersoek het gestyg nadat residuele P bygevoeg is vanaf 0.653 na 0.885 (Tabel 4.7). Die belangrikheid van dié parameter onder Suid-

Afrikaanse toestande word waarskynlik teweeggebring as gevolg van die bemestingspraktyke wat by akkerboutoestande in hierdie gebiede 'n rol speel. Tans is die optimumpeil ekstraheerbare fosfaat wat nodig is vir optimumplantproduksie vir bepaalde grond/klimaat/produksiemikpunte bekend. Die P-behoefte om die ekstraheerbare fosfaat van 'n spesifieke grond tot die gewensde vlak te verhoog is egter moeilik bepaalbaar met bestaande tegnieke. Tans is dit die gebruik om 'n veralgemeende beramingsprosedure te gebruik wat nie grondspesifiek is nie. As gevolg van hierdie fosfaattoedieningspraktyk word die opbou van residuele P bevorder en het die steekproef van die groep B-gronde genoegsaam bewys dat P-opbou reeds plaasgevind het.

Met die resultate van hierdie ondersoek is dit moontlik om deur middel van Vergelyking 4.1 die vereiste hoeveelheid ekstraheerbare P meer akkuraat te bereken vir 'n spesifieke grond ten einde 'n optimum P-inhoud vir plantproduksie daar te stel. (Hierdie gegewens is deur veldproewe bepaal). Die berekening van die hoeveelheid P wat nodig is vir optimumproduksie sal in Hoofstuk 5 behandel word.

4.7 Gevolgtrekking

Die aanvanklike hipotese van paragraaf 3.6 is steeds geldig vir die berekening van B_0 nadat residuele P in aanmerking geneem is. Die berekening van B_0 , soos vervat in Vergelyking 3.3, is in Vergelyking 4.1 verder verbeter vanaf 'n $r^2 = 0.82$ na 0.936 . Ook is die berekening van B_0 gereduseer tot maklik kwantifiseerbare grondeienskappe, soos reeds bespreek in par. 4.6. Die dominante rol van residuele P is geakkommodeer in

Vergelyking 4.1 en toon duidelik die waarde van B_0 aan in die omskrywing van 'n spesifieke grond se P-vasleggingskapasiteit.

Die B_0 -waarde wat bereken is met behulp van Vergelyking 4.1 dui op die hoeveelheid *ambic*-ekstraheerbare P (mg kg^{-1}) wat in die grond aanwesig is - min of meer 7 dae nadat $100 \text{ mg kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ toegedien is en op 'n stadium wanneer die plant meganismes ontwikkel het om met die grond te kan kompeteer vir fosfaat. Die verwantskap tussen *ambic*-ekstraheerbare P (mg kg^{-1}) en 'n bepaalde hoeveelheid van 'n kunsmisbron (mg kg^{-1}) is egter onbekend. Die toepassing van Vergelyking 4.1 in 'n spesifieke grond se P-bemestingsadvies sal dus gekompliseer word deur die tipe kunsmisbron en die ekstraheerbare P-vlak wat as bemestingsmikpunt gestel word. Om in die praktyk 'n bemestingsaanbeveling te kan doen aan die hand van Vergelyking 4.1 sal die volgende vereis: hierdie verwantskap tussen *ambic*-ekstraheerbare P en 'n bepaalde hoeveelheid van 'n kunsmisbron moet omskryf word ten opsigte van 'n bepaalde klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P.

Die aantal moontlike kombinasies van klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al, residuele P, die kunsmisbron en ekstraheerbare P-vlak wat as bemestingsmikpunt gekies word binne die gekose geografiese studiegebied is legio. Ten einde hierdie probleem te oorkom, sal dit aanvanklik nodig wees om die studiegebied te stratifiseer ten opsigte van die grondeienskappe in Vergelyking 4.1. Die sukses waarmee geëkstrapoleer kan word, sal uiteindelik bepaal wat die resolusie van die stratifikasie moet wees.

Die sukses van hierdie benadering kan geëvalueer word deur te bereken hoeveel van 'n bepaalde kunsmisbron toegedien moet word aan 'n spesifieke grond om die ekstraheerbare P aan te vul tot die vlak soos aangedui deur B_0 . Deur hierdie hoeveelheid toe te dien, kan met die fisiese bepaling van die *ambic*-ekstraheerbare P 'n vergelyking getref word tussen die B_0 wat bereken is en die uiteindelijke fisies gemete hoeveelheid. Die mate van ooreenstemming van hierdie twee hoeveelhede sal die sukses in die kwantifisering van die P-vasleggingskapasiteit van die bepaalde grond illustreer.

Hierdie benadering word in die volgende hoofstuk op die proef gestel.

HOOFSTUK 5

DIE AANWENDING VAN B_0 IN DIE OPTIMALISERING VAN FOSFAATBEMESTING

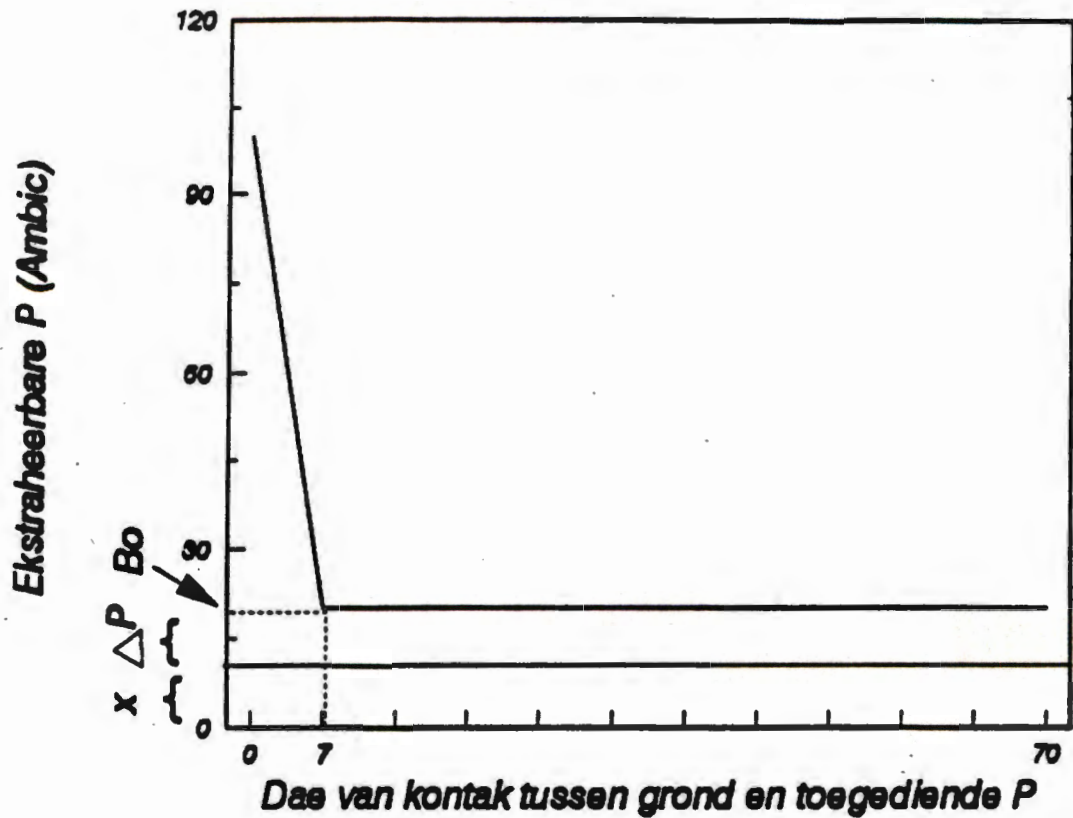
5.1 Benaderingsgrondslag

Wanneer Vergelyking 4.1 in praktiese bemestingskedulerings toegepas word, moet die volgende faktore in aanmerking geneem word:

B_0 dui die hoeveelheid *ambic*-ekstraheerbare P (mg kg^{-1}) aan wat nog nie deur die grond vasgelê is nie, min of meer sewe dae nadat $100 \text{ mg kg KH}_2\text{PO}_4$ (P_r) toegedien is. Die hoeveelheid ekstraheerbare P in die grond (B_0) bestaan op hierdie stadium uit die hoeveelheid residuele P, wat in die grond aanwesig was voordat addisionele bemesting toegedien is, plus die gedeelte van die $100 \text{ mg kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ wat toegedien is en nie deur die grond vasgelê is nie. Hierdie hoeveelheid P is dus planttoeganklik (ΔP). Met die residuele P as een van die vereiste insette in die berekening van B_0 in Vergelyking 4.1, kan bepaal word wat die werklike waarde van ΔP is, naamlik:

$$\Delta P = B_0 - \text{residuele P} \dots\dots\dots (5.1)$$

Vergelyking 5.1 kan ook grafies soos volg voorgestel word.



Figuur 5.1 : Grafiese voorstelling van die fosfaatsorpsie gestel teenoor die aantal dae wat die fosfaat in die grond aanwesig is

Die voorafgaande gegewens toegepas op 'n grond in die volgende behandelingsgroep: hoë klei-inhoud, lae fosfaatbehandeling en lae kalkbehandeling, lyk dan soos volg:

'n Grond met 'n kleipersentasie van 77 %, 'n residuele P-inhoud van 5.76 *ambic*-ekstraheerbare P (mg kg^{-1}) en 'n KCl-ekstraheerbare Al-inhoud van 0,56 ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) sal volgens Vergelyking 4.1 'n B_0 -waarde van 18.55 mg kg^{-1} *ambic*-ekstraheerbare P hê, sewe dae na die toediening van $100 \text{ mg kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$. Nadat die hoeveelheid residuele P in aanmer-

king geneem is (soos in Vergelyking 5.1), sal daar dus 'n toename van 12.79 mg kg^{-1} ambic-ekstraheerbare P bewerkstellig word deur die toediening van $100 \text{ mg kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$. Met die meting van hierdie resultaat in die praktyk is egter 'n B_0 -waarde van 23.2 mg kg^{-1} en 'n ΔP van 17.44 gevind. Hierdie verskil illustreer dat die verwantskap tussen B_0 en die hoeveelheid van 'n bepaalde kunsmisbron wat toegedien is, verdere verfyning nodig het. In die praktyk word ook van ander kunsmisbronne gebruik gemaak - kunsmisbronne soos kalsiumdi-waterstoffosfaat, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, en mono-ammoniumfosfaat, $(\text{NH}_4)\text{-H}_2\text{PO}_4$, elk met 'n eie chemiese reaksie in die grond. Hierdie eiesoortige reaksies gee aanleiding tot verskille in die hoeveelhede van die bepaalde kunsmisbron wat benodig word om die vasleggingsbehoefte van die grond te bevredig.

Hierdie probleem kan oorkom word deur 'n regressie daar te stel vir elke groepering van kleipersentasie, residuele P, KCl-ekstraheerbare Al-inhoud en kunsmisbron. Hierdie regressie sal dan vir verskillende toedieningsvlakke van 'n bepaalde kunsmisbron die nodige aanpassings kan maak ten opsigte van die werklike hoeveelheid van die bepaalde kunsmisbron (P_ω) wat toegedien moet word om te verseker dat die nouste moontlike ooreenkoms bestaan tussen die berekende en die waargenome B_0 .

As voorbeeld die volgende: Deur vir 'n bepaalde kunsmisbron, $\text{K}(\text{H}_2\text{PO}_4)$, en grondeienskappe van die voorafgaande voorbeeld 'n reeks van verskillende bemestingsvlakke toe te dien ($100, 75, 50$ en 25 mg kg^{-1} onderskeidelik), kan die volgende regressie afgelei word:

$$P_\omega = - 5.65 + 6.33 (\Delta P \text{ bereken}) \dots\dots\dots(5.2)$$

Hiervolgens is die waarde van P_{∞} na aanleiding van die grondeienskappe soos in bogenoemde voorbeeld vervat $75.31 \text{ mg kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$. Dié waarde van P_{∞} impliseer dat indien P_{∞} (75.31 mg kg^{-1}) in plaas van P_1 (100 mg kg^{-1}) toegedien word, die berekende B_0 volgens Vergelyking 4.1 en die waargenome B_0 - nadat bogenoemde toediening uitgevoer is - baie nou sal ooreenstem.

Indien daar 'n nou ooreenkoms gevind word, beteken dit dat 'n bemestingskedulering vir bostaande grond soos volg daar sal uitsien:

- * Bereken B_0 met behulp van Vergelyking 4.1.
- * Bepaal ΔP met behulp van Vergelyking 5.1.
- * Indien die bepaalde kunsmisbron KH_2PO_4 is, gebruik die toepaslike afgeleide regressie en bereken P_{∞} . (In die voorbeeld vergelyking 5.2.)

Vervolgens word oorgegaan tot die verifiëring van hierdie prosedure aan die hand van 'n gekose stel grondmonsters.

5.2 Materiaal en metodes

Gronde van drie lokaliteite, naamlik Greytown, Geluksburg (Bergville-distrik) en Dundee (New Castle-distrik), is geselekteer met klei-inhoude van 77%, 42% en 12% respektiewelik, om daardeur te verseker dat dit verteenwoordigend is van die totale spektrum van kleipersentasies binne toepaslike akkerbougronde. Die grondmonsters van hierdie drie lokaliteite is verteenwoordigend van 'n kalk- en fosfaattoedieningsproef wat

Tabel 5.1 : Die verskillende behandelings per lokaliteit van die kalk- en fosfaatproef (Farina & Channon, 1991)

Lokaleiteit 1			Lokaleiteit 2		Lokaleiteit 3	
Kalkbehandeling (Gebluste kalk)						
P - T o e d i e n i n g	20 ton kalk/ha eenmalig	Geen kalk	16 ton kalk/ha eenmalig	Geen kalk	2 ton kalk/ha eenmalig	Geen kalk
	20 kg P/ha/jaar 1979-1984 10 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L1K1P1	20 kg P/ha/jaar 1979-1984 10 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L1K2P1	20 kg P/ha/jaar 1979-1984 10 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L2K1P1	20 kg P/ha/jaar 1979-1984 10 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L2K2P1	Geen P Verw: L3K1P1	20 kg P/ha/jaar 1979-1984 10 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L3K2P1
	20 ton kalk/ha eenmalig 160 kg P/ha/jaar 1979-1984 80 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L1K1P2	Geen kalk 160 kg P/ha/jaar 1979-1984 80 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L1K2P2	16 ton kalk/ha eenmalig 160 kg P/ha/jaar 1979-1984 80 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L2K1P2	Geen kalk 160 kg P/ha/jaar 1979-1984 80 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L2K2P2	2 ton kalk/ha eenmalig 80 kg P/ha/jaar 1979-1984 40 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L3K1P2	Geen kalk 160 kg P/ha/jaar 1979-1984 80 kg P/ha/jaar 1985-1992 Verw: L3K2P2

vanaf 1979 onderneem is met die behandelings soos gestel in Tabel 5.1 (Farina & Channon, 1991). Die analitiese besonderhede van die grondmonsters per lokaliteit word aangetoon in Tabel 5.2.

Vier verteenwoordigende grondmonsters per lokaliteit is geneem en ontleed. Die resultate word aangetoon in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 : Analitiese besonderhede van grondmonsters per lokaliteit (een monster per behandelingskombinasie)

Lokali- teit	Grond- vorm en serie**	Klei (%)	Al cmol _c /kg grond	Resi- duele P (mg kg ⁻¹)	Behandelings- geskiedenis
1	Hutton Balmoral	77	0.56	5.76	L1K1P1
			4.08	5.78	L1K2P1
			0.00	47.00	L1K1P2
			0.82	49.90	L1K2P2
2	Avalon Norman- dien	42	0.04	2.93	L2K1P1
			3.00	4.17	L2K2P1
			0.05	35.04	L2K1P2
			1.51	41.97	L2K2P2
3	Avalon Leksand	12	0.03	2.71	L3K1P1
			0.34	3.56	L3K2P1
			0.01	51.75	L3K1P2
			0.27	57.55	L3K2P2

**MacVicar *et al.* (1977)

'n Inkubasieproef is hierna uitgevoer vir die volgende kombinasie van behandelings (Tabel 5.3). Elke behandelingsgroep, soos aangedui in Tabel 5.3, het vier verskillende vlakke van die bepaalde kunsmisbron ontvang, naamlik 100, 75, 50 en 25 mg kg⁻¹.

Tabel 5.3 : Behandelingsgroepe soos gebruik in 'n inkubasieproef van 144 monsters. Elke behandelingsgroep is geïnkubeer by 4 verskillende vlakke van 'n bepaalde kunsmisbron

		Lokaleiteit 1			Lokaleiteit 2			Lokaleiteit 3		
		Bemestingsbronne			Bemestingsbronne			Bemestingsbronne		
P- b- e- h- a- n- d- e- l- i- n- g 1	K a l k 1	KH ₂ PO ₄ Verw: L1K1P1	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L1K1P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L1K1P1	KH ₂ PO ₄ Verw: L2K1P1	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L2K1P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L2K1P1	KH ₂ PO ₄ Verw: L3K1P1	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L3K1P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L3K1P1
	K a l k 2	KH ₂ PO ₄ Verw: L1K2P1	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L1K2P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L1K2P1	KH ₂ PO ₄ Verw: L2K2P1	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L2K2P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L2K2P1	KH ₂ PO ₄ Verw: L3K2P1	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L3K2P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L3K2P1
P- b- e- h- a- n- d- e- l- i- n- g 2	K a l k 1	KH ₂ PO ₄ Verw: L1K1P2	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L1K1P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L1K1P2	KH ₂ PO ₄ Verw: L2K1P2	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L2K1P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L2K1P2	KH ₂ PO ₄ Verw: L3K1P2	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L3K1P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L3K1P2
	K a l k 2	KH ₂ PO ₄ verw: L1K2P2	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L1K2P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L1K2P2	KH ₂ PO ₄ Verw: L2K2P2	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L2K2P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L2K2P2	KH ₂ PO ₄ Verw: L3K2P2	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ Verw: L3K2P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄ Verw: L3K2P2

Die vlakke van kunsmistoediening is sodanig gekies om te verseker dat dit die hele spektrum van kunsmistoediening dek, vanaf 'n normale kunsmistoediening vir mielie-produksie in die praktyk (25 mg kg^{-1}) tot 'n baie hoë vlak waar gepoog word om die fosfaatvasleggingsbehoefte van die grond ten volle te bevredig (100 mg kg^{-1}). Die volgende stappe is van toepassing op die metodes wat gevolg is:

1. Hierdie uitleg het 'n inkubasieproef van 144 monsters tot gevolg gehad. Vir elke monster is 'n berekende ΔP -waarde bepaal aan die hand van Vergelyking 4.1 en 5.1. Na sewe dae is die waargenome ΔP -waardes vir elke monster bepaal.
2. Hierna is die regressies bereken soos dit in Vergelyking 5.2 afgelei is vir elke behandelingsgroep. Die gemete ΔP is geneem as onafhanklike veranderlike en die vlak van toediening as afhanklike veranderlike.
3. Met die regressies bekend, is die toepaslike regressies gebruik vir elke behandelingsgroep om die presiese hoeveelheid te bepaal van 'n kunsmisbron wat toegedien moet word. Dit is nodig om die presiese hoeveelheid kunsmis te bepaal wat verlang word om die ekstraheerbare fosfaatinhoud te laat styg - soos weergegee word in Vergelyking 5.1
4. Hierna is die proefuitleg weer herhaal en die berekende hoeveelhede van elke bron in 'n bepaalde behandelingsgroep is toegedien. Hierdie toediening het die aantal inkubasies verminder tot 36 aangesien slegs die berekende vlak van P-toediening

gevolg is en nie vier verskillende vlakke soos tydens die eerste inkubasieproef nie.

5. Na sewe dae is hierdie nuwe stel inkubasies weer ontleed en die waargenome ΔP -waardes weereens bepaal.
6. Laastens is die resultate vergelyk met bestaande bevindinge in die praktyk.

5.3 Stratifikasie van die toepassingsgebied

Die aantal moontlike kombinasies van klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P binne die studiegebied, soos aangedui in Figuur 4.1, om die verwantskap te bepaal tussen B_0 (bereken) en die hoeveelheid P wat toegedien moet word as 'n funksie van 'n bepaalde kunsmisbron is legio. Ten einde die voorgestelde proeftegniek (par. 5.1) sinvol te kan evalueer is dit nodig om die mielieproduserende gebied, soos aangedui in Figuur 4.1, te stratifiseer sodat slegs 'n goeie steekproef van relevante kombinasies van die verskillende parameters wat hierbo genoem is, geëvalueer kan word. Daar is vervolgens gepoog om die totale gebied in te deel in drie kleigroepe - elk met 'n hoë en lae P-toediening en daarin 'n hoë en lae kalkbehandeling. Die kalkbehandelings, op hul beurt, het 'n spektrum van verskillende vlakke van KCl-ekstraheerbare Al tot gevolg - vlakke wat hopelik die totale spektrum wat binne die produksiegebied voorkom, insluit. Hierdie P-toedienings en die spektrum KCl-ekstraheerbare Al-vlakke impliseer uiteindelik 36 moontlike kombinasies van klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P. Die proefuitleg van Tabel 5.3 verteenwoordig hierdie stratifikasie.

Soos reeds genoem, is vier verskillende toedieningsvlakke van drie verskillende kunsmisbronne op elke groep toegepas. Hoewel hierdie stratifikasie 'n oorvereenvoudiging van die totale variasie in klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P in die produksiegebied is, is dit nogtans 'n riglyn wat die evaluering van die voorgestelde metodiek moontlik maak. Hierdie metodiek het egter die volgende beperking: nadat ΔP vir 'n bepaalde lokaliteit bereken is (Vergelyking 4.1 en 5.1), moet die toepaslike regressie (Vergelyking 5.2) geselekteer word na aanleiding van die klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al, residuele P van die lokaliteit en die beoogde kunsmisbron wat gebruik gaan word. Vir die toepassing van die voorgestelde metodiek op enige lokaliteit moet die lokaliteit dus gemeet word aan die hand van die 36 moontlike kombinasies in Tabel 5.3 ten einde die geskikte regressie (Vergelyking 5.2) te selekteer.

In die evaluering van die metodiek word die aanname dus gemaak dat hierdie stratifikasie wel moontlik is en is monsters gebruik wat binne elke behandelingsgroep voorkom. Die mate van ooreenstemming tussen berekende en gemete hoeveelhede van ΔP na toediening volgens die toepaslike regressie (Vergelyking 5.2) sal in die geval van hierdie studie slegs die akkuraatheid van die voorgestelde metodiek aandui. Om hierdie metodiek in die praktyk toe te pas sal 'n verdere ondersoek nodig wees om die graad van stratifikasie te bepaal (die uitbreiding of vereenvoudiging van Tabel 5.2) wat sinvol is ten opsigte van die volgende aspekte:

- * Die toepassing in die totale produksiegebied.
- * Die gewenste resolusie vir maklike seleksie van die toepaslike regressie.
- * Die praktiese uitvoerbaarheid daarvan.

5.4 Die kwantifisering van die verwantskap tussen *ambic*-ekstraheerbare P en ekwivalente hoeveelhede van verskillende kunsmisbronne vir verskillende bemestingsmikpunte

In Bylaag H kom negatiewe B_0 -waardes voor, wat geassosieer word met die behandelings L1K2P1 en L2K2P1. Die negatiewe B_0 -waardes kan verklaar word op grond van die lae pH van die gronde en die gepaardgaande besondere hoë KCl-uitruilbare Al. Die pH's (CaCl_2) wat hier ter sprake is, is 4.02 en 3.95 onderskeidelik. Met geen kalkbehandeling lei hierdie lae pH's tot onstabiele Al-verbindings wat aanleiding gee tot hoë uitruilbare Al. In lokaliteit 3 was die pH ook laag in gevalle waar geen kalkbehandeling toegepas is nie. By die lae klei-inhoud van 12 % is die hoeveelheid uitruilbare Al egter beperk en gevolglik was die B_0 -waardes positief. Hierdie abnormaal hoë uitruilbare Al-waardes is seldsaam en maak gronde ongeskik vir akkerbouproduksie. Hierdie toestand kan egter reggestel word deur kalkbehandeling - soos onderskryf deur die bevindinge van Farina en Channon (1991). In die lig hiervan is die betrokke behandelingsgroepe buite rekening gelaat. Die verwantskap tussen B_0 bereken (*ambic*-ekstraheerbaar) en die hoeveelheid van 'n bepaalde P-bron (mg kg^{-1}) benodig om 'n ooreenstemmende B_0 te bewerkstellig, is onbekend. Die verwantskap vir 'n reeks bemestingsvlakke met 'n bepaalde P-bron kan deur middel van 'n regressie gekwantifiseer word - waarvan Vergelyking 5.2 'n tipiese voorbeeld is. Die berekende waardes vir B_0 en ΔP is verkry deur die waardes van klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P - soos aangedui in Tabel 5.2 - in Vergelykings 4.1 en 5.1 respektiewelik in te stel. Die waardes vir al drie klei-inhoude asook vir die vier toedieningsvlakke van drie kunsmisbronne, naamlik KH_2PO_4 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ en $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$,

word weergegee in Bylae H. In Tabel 5.4 word die waardes van een lokaliteit (klei-inhoud 77 %) en een kunsmisbron (KH_2PO_4) aangetoon, asook die werklike waargenome waardes van B_0 en ΔP , sewe dae na inkubasie.

Tabel 5.4 : Die proefuitleg vir die kwantifisering van die verwantskap tussen B_0 en ΔP (bereken) en B_0 en ΔP (gemeet) vir HK_2PO_4 as kunsmisbron en met 'n 77 % klei-inhoud grond

Kalk x P behan- deling	Residuele P (mg/kg)	Al (cmol _e /kg)	Toedie- ningspeil (mg/kg)	B_0 bereken (mg/kg)	ΔP bereken (mg/kg)	B_0 gemeet (mg/kg)	ΔP gemeet (mg/kg)
L1K1P1	5.76	0.56	100	18.55	12.79	23.20	17.44
L1K1P1	5.76	0.56	75	18.55	12.79	16.90	11.14
L1K1P1	5.76	0.56	50	18.55	12.79	14.50	8.74
L1K1P1	5.76	0.56	25	18.55	12.79	11.50	5.74
L1K2P2	49.00	0.82	100	64.56	14.66	74.90	25.00
L1K2P2	49.00	0.82	75	64.56	14.66	16.40	11.50
L1K2P2	49.00	0.82	50	64.56	14.66	61.80	11.90
L1K2P2	49.00	0.82	25	64.56	14.66	53.10	3.20
L1K1P2	47.00	0.00	100	80.44	33.40	69.80	22.80
L1K1P2	47.00	0.00	75	80.44	33.40	55.60	8.60
L1K1P2	47.00	0.00	50	80.44	33.40	56.20	9.20
L1K1P2	47.00	0.00	25	80.44	33.40	50.30	3.30

Die gemete ΔP -waardes het gedien as onafhanklike veranderlike en die verskillende vlakke van fosfaattoediening as afhanklike veranderlikes in die regressie-analise. Die regressie-koëffisiënte is - soos te verwagte - baie hoog aangesien daar slegs vier punte per regressie beskikbaar is. Die groot variasie in die individuele koëffisiënte dui egter op die noodsaaklikheid dat daar 'n unieke regressie vir elke behandelingsgroep moet bestaan.

Alhoewel slegs een onafhanklike veranderlike ter sprake is, moet in gedagte gehou word dat met die seleksie van 'n stel koëffisiënte wel 'n onderskeid getref word tussen die klei-, P-, Al- en kunsmisbronskategorieë waarmee 'n bepaalde grond geassosieer word. Hierdie koëffisiënte wat in Vergelyking 5.2 gebruik moet word, word in Tabel 5.5 weergegee.

Uit die toepassing van die onderskeie regressies, soos aangetoon in die laaste kolom van Tabel 5.5, is die noodsaaklikheid om te kan onderskei tussen al die genoemde kriteria duidelik. Daar bestaan geen tendense of noue verwantskappe tussen byvoorbeeld dieselfde grond vir verskillende kunsmisbronne, dieselfde kalk- en P-geskiedenis vir verskillende gronde en kunsmisbronne ensovoorts nie. Die enigste tendens wat wel waarneembaar is, is die geweldige aanpassings wat in sommige gevalle deur Vergelyking 5.2 bereken word - byvoorbeeld vir die 42 % kleigrond met 'n behandelingskombinasie van hoë kalk en lae fosfaat (K1P1).

In die geval van die 42 % kleigrond word P_{∞} oorskat in die geval van die K1P1- en K1P2-behandelings, ongeag die fosfaatbestedingsbron. In die geval van die K2P2-behandeling weer, word die P_{∞} onderskat. Op dieselfde wyse word die P_{∞} in die 77 % kleigrond

oorskat in die grond met die K1P2-behandeling - ongeag die P-bemestingsbron. So ook word P_{∞} onderskat in die geval van die K2P2-behandeling.

Tabel 5.5 : Regressiekoëffisiënte van lineêre regressievergelykings vir al die behandelingsgroepe binne die stratifikasieriglyne

Klei-inhoud (%)	P-bron	Kalk x P behandeling	r^2	a	b	P_{∞} (verg. 5.2)
77	KH_2PO_4	K1P1	0.950*	-5.65	6.33	75.31
77	KH_2PO_4	K1P2	0.808	24.22	3.49	140.93
77	KH_2PO_4	K2P2	0.868*	19.45	3.34	68.41
42	KH_2PO_4	K1P1	0.415	-1.54	4.18	195.17
42	KH_2PO_4	K1P2	0.999**	-6.24	2.85	143.93
42	KH_2PO_4	K2P2	0.872*	8.12	2.05	48.20
12	KH_2PO_4	K1P1	0.998**	-3.74	1.64	105.43
12	KH_2PO_4	K2P1	0.996**	4.92	1.58	98.66
12	KH_2PO_4	K1P2	0.998**	2.81	1.29	100.75
12	KH_2PO_4	K2P2	0.980*	4.22	1.28	94.95
77	$Ca(H_2PO_4)_2$	K1P1	0.964*	19.40	5.29	87.11
77	$Ca(H_2PO_4)_2$	K1P2	0.929*	25.28	4.64	180.44
77	$Ca(H_2PO_4)_2$	K2P2	0.990**	28.26	3.71	82.65
42	$Ca(H_2PO_4)_2$	K1P1	0.988**	17.22	4.13	211.58
42	$Ca(H_2PO_4)_2$	K1P2	0.996**	12.37	2.26	131.45
42	$Ca(H_2PO_4)_2$	K2P2	0.996**	7.84	2.29	52.63
12	$Ca(H_2PO_4)_2$	K1P1	0.990**	6.57	1.67	117.74
12	$Ca(H_2PO_4)_2$	K2P1	0.999**	7.09	1.59	101.42
12	$Ca(H_2PO_4)_2$	K1P2	0.989**	-1.08	1.56	117.36
12	$Ca(H_2PO_4)_2$	K2P2	0.997**	8.02	1.39	106.33
77	$(NH_4)H_2PO_4$	K1P1	0.999**	-1.94	6.59	82.35
77	$(NH_4)H_2PO_4$	K1P2	0.838*	28.12	4.05	163.55
77	$(NH_4)H_2PO_4$	K2P2	0.996**	25.68	3.35	74.79
42	$(NH_4)H_2PO_4$	K1P1	0.989**	13.38	4.38	219.50
42	$(NH_4)H_2PO_4$	K1P2	0.989**	4.37	2.46	133.99
42	$(NH_4)H_2PO_4$	K2P2	0.998**	4.71	2.30	49.68
12	$(NH_4)H_2PO_4$	K1P1	0.998**	6.91	1.56	110.76
12	$(NH_4)H_2PO_4$	K2P1	0.999**	5.72	1.52	95.90
12	$(NH_4)H_2PO_4$	K1P2	0.995**	5.92	1.28	103.10
12	$(NH_4)H_2PO_4$	K2P2	0.972*	3.26	1.29	94.50

Betekenispeil *P=0.05 **P=0.01

In die geval van die grond met 'n lae kleipersentasie word P_{∞} redelik akkuraat voorspel. Die algemene tendens vir die 42 % en 77 % gronde (gronde met hoër klei-inhoud) is dat by die K2P2- behandelings en tot 'n mindere mate die K1P1-behandelings, ongeag die P-bemestingsbron, P_{∞} onderskat word. 'n Verklaring vir dié verskynsel kan wees dat met die opstel van Vergelyking 4.1 oorwegend gronde met 'n lae klei-inhoud en lae kalkinhoud gebruik is en dat gegewens buite die betroubaarheid van die vergelyking geëkstrapoleer word. Dit is ook 'n feit dat die *ambic*-metode, met toenemende kalsium en/of kalk, minder yster- en aluminiumfosfaat ekstraheer (Hahne *et al.*, 1988). Daar behoort dus met 'n wyer populasie met en sonder kalsium en/of kalk gekalibreer te word deur kalsium- en/of kalkinhoud in die vergelyking in te sluit. Die *ambic*-metode ekstraheer hoofsaaklik yster- en aluminiumfosfate wat min of afwesig is in sandgronde sodat hoofsaaklik wateroplosbare en kalsiumfosfate geëkstraheer word.

5.5 Die berekening van die P-vasleggingsbehoefte vir verskillende kombinasies van grondeienskappe

Die toepaslike regressies is geselekteer om vir elke behandelingsgroep die presiese hoeveelheid van 'n bepaalde fosfaatbron wat toegedien moet word te bepaal ten einde die ekstraheerbare fosfaat - soos weergegee deur Vergelyking 5.1 - te laat styg. Hierdie prosedure verteenwoordig dieselfde prosedure wat in die praktyk gevolg behoort te word. Vervolgens word 'n voorbeeld gegee van die wyse waarop die bepaalde regressie geselekteer word.

Die klei-inhoud van die bepaalde grond onder bespreking word eerstens oorweeg. Vir 'n monster uit die lokaliteit met 77 % klei-inhoud dui die seleksie dus onmiddellik op slegs die koëffisiënte van die 77 % kleigroep, dit wil sê nege moontlike regressies. Hierna word die kalkbehandeling in ag geneem - 'n toediening wat nou korreleer met die Al-inhoud van die grond asook die fosfaatbehandeling wat die orde van die residuele P in die bepaalde monster sal aandui. Die voorbeeld uit die reeds genoemde proefuitleg van Tabel 5.3 - wat aangedui word as L1K1P1 - is dus uit die 77 % kleigroep met 'n hoë kalk- en lae fosfaat-behandeling, dit wil sê lae geassosieerde Al-inhoud en lae residuele fosfaatinhoud. Dit verminder die genoemde nege moontlike regressies na slegs een van drie, afhangende van die kunsmisbron wat aangewend gaan word. Indien die bron dus $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ sou wees (Tabel 5.5), word die regressie:

$$P_w = 19.4 + 5.29 (\Delta P) \dots\dots\dots (5.2)$$

In hierdie bepaalde voorbeeld het ΔP (bereken) volgens Tabel 5.4 'n waarde van 12.79 mg/kg *ambic*-ekstraheerbare P. Wanneer hierdie waarde in bostaande vergelyking ingestel word, lei dit daartoe dat 87.06 mg/kg $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ kunsmis toegedien moet word aan die monster ten einde 'n netto styging van 12.79 mg/kg *ambic*-ekstraheerbare P te bewerkstellig. Sonder verdere verfyning van die voorgestelde stratifikasie is bostaande voorbeeld 'n oorvereenvoudiging van die seleksieprosedure. In die praktyk sou dit egter impliseer dat na aanleiding van 'n grondmonster se bepaalde klei-inhoud besluit moet word om dit in te deel in een van die drie kleigroepe, soos aangetoon in Tabel 5.3. Die gebruiker sal ook die bepaalde Al-inhoud en residuele P van die grond in een van die bestaande behandelings-

groepe moet indeel ten einde 'n keuse te maak vir 'n toepaslike regressie. Laastens bepaal die keuse van die kunsmisbron die finale regressie wat geselekteer moet word. Die aandag word weer daarop gevestig dat die voorgestelde stratifikasie waarskynlik verdere verfyning sal vereis voordat dit in die praktyk toegepas kan word. Dit is egter hier slegs van belang om aan te toon dat die metodiek wel toepasbaar is.

Die proefuitleg is herhaal en die berekende hoeveelhede van elke bron in 'n bepaalde behandelingsgroep is toegedien. Hierdie toediening het daartoe gelei dat die aantal inkubasies verminder is tot 36 aangesien slegs die berekende vlak van P-toediening toegepas is en nie vier verskillende vlakke soos tydens die eerste inkubasieproef nie. Na sewe dae van inkubasie is die *ambic*-ekstraheerbare P in die grondmonsters weer bepaal en die waargenome ΔP -waardes hieruit verkry. Die proefuitleg asook die waardes van B_0 en ΔP , soos bereken en bepaal sewe dae na die byvoeging van 'n kunsmisbron, word in Tabel 5.6 weergegee.

Die nou verwantskap tussen ΔP bereken en ΔP gemeet is reeds duidelik waarneembaar uit die data in Tabel 5.6. Die evaluering aan die hand van 'n onafhanklike datastel sou waarskynlik nie so 'n hoë mate van ooreenstemming opgelewer het as wat in hierdie geval gevind is nie. Die gebruik van so 'n onafhanklike datastel, sonder verdere verfyning van die stratifikasieproses, sal egter ewe kontraproduktief wees op hierdie stadium. Dit word aanbeveel dat so 'n analise wel gedoen moet word indien die voorgestelde metodiek in die praktyk toegepas word.

Tabel 5.6 : Proefuitleg tesame met die waardes van B_0 en ΔP , soos bereken en bepaal sewe dae na die byvoeging van die hoeveelheid fosfaat wat bereken is met behulp van Vergelyking 5.2

Klei %	Kalk x P behan- deling	P-bron	Resid. P mg /kg	KCl ekst. Al cmol _e / kg	B_0 bereken mg /kg	ΔP bereken mg/ kg	P ω mg kg ⁻¹	B_0 bepaal mg /kg	ΔP bepaal mg/kg
77	K1P1	KH ₂ PO ₄	7.76	0.56	18.55	12.79	75.31	16.6	10.8
77	K1P2	KH ₂ PO ₄	47.00	0.00	80.44	33.44	140.93	83.5	36.5
77	K2P2	KH ₂ PO ₄	49.90	0.82	64.56	14.66	68.41	59.8	9.9
42	K1P1	KH ₂ PO ₄	2.93	0.04	49.99	47.06	195.17	56.5	43.6
42	K1P2	KH ₂ PO ₄	35.04	0.05	87.73	52.69	143.93	91.5	56.4
42	K2P2	KH ₂ PO ₄	41.91	1.51	61.46	19.55	48.20	60.2	18.2
12	K1P1	KH ₂ PO ₄	2.71	0.03	69.28	66.57	105.43	70.9	68.3
12	K2P1	KH ₂ PO ₄	3.56	0.34	62.89	59.33	98.66	64.1	60.5
12	K1P2	KH ₂ PO ₄	51.75	0.01	127.67	75.92	100.75	125.4	73.6
12	K2P2	KH ₂ PO ₄	57.55	0.27	128.28	70.73	94.75	131.7	74.2
77	K1P1	CA(H ₂ PO ₄) ₂	5.76	0.56	18.6	12.79	87.11	18.5	12.8
77	K1P2	CA(H ₂ PO ₄) ₂	47.00	0.00	80.4	33.44	180.44	84.2	37.2
77	K2P2	CA(H ₂ PO ₄) ₂	49.90	0.82	64.6	14.66	82.65	63.5	13.6
42	K1P1	CA(H ₂ PO ₄) ₂	2.93	0.04	50.01	47.06	211.58	44.9	41.6
42	K1P2	CA(H ₂ PO ₄) ₂	35.04	0.05	87.7	52.69	131.45	88.8	52.1
42	K2P2	CA(H ₂ PO ₄) ₂	41.97	1.51	61.5	19.55	52.63	55.5	14.7
12	K1P1	CA(H ₂ PO ₄) ₂	2.71	0.03	69.3	66.57	117.74	70.6	67.9
12	K2P1	CA(H ₂ PO ₄) ₂	3.56	0.34	62.9	59.33	101.42	63.9	60.3
12	K1P2	CA(H ₂ PO ₄) ₂	51.75	0.01	127.7	75.92	117.36	130.3	78.5
12	K2P2	CA(H ₂ PO ₄) ₂	57.55	0.27	128.3	70.73	106.33	135.3	77.6
77	K1P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄	5.76	0.56	18.6	12.79	82.35	17.5	11.8
77	K1P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄	47.00	0.00	80.4	33.44	163.55	81.9	34.9
77	K2P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄	49.90	0.82	64.6	14.66	74.79	61.4	11.6
42	K1P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄	2.93	0.04	50.01	47.06	219.50	46.3	43.3
42	K1P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄	35.04	0.05	87.7	52.69	133.99	87.4	52.4
42	K2P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄	41.97	1.51	61.5	19.55	39.68	55.0	13.0
12	K1P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄	2.71	0.03	69.3	66.57	110.76	68.6	65.9
12	K2P1	(NH ₄)H ₂ PO ₄	3.56	0.34	62.9	59.33	95.90	63.9	60.4
12	K1P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄	51.75	0.01	127.7	75.92	103.10	118.8	67.1
12	K2P2	(NH ₄)H ₂ PO ₄	57.55	0.27	128.3	70.73	94.50	123.8	66.3

Vergelyking 4.1 dui op die hoeveelheid *ambic*-ekstraheerbare P wat beskikbaar is in 'n grond by 'n bepaalde klei-inhoud, residuele P-vlak en KCL-ekstraheerbare Al-inhoud, na die toediening van 'n 100 mg/kg oftewel 225 kg ha⁻¹ (vir 'n grondvolume van 1 ha, 15 cm diep

en met 'n brutodigtheid van 1500 kg m^{-3}). Die *ambic*-P in die grond word dus verhoog vanaf die residuele P-inhoud tot die berekende B_0 -waarde met een toediening. Vergelyking 5.1 dui op hierdie styging in *ambic*-ekstraheerbare P in die grond. Na aanpassing deur middel van die toepaslike Vergelyking 5.2 word die berekende B_0 -waarde fisies bereik deur die toediening van $169.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ -kunsmis in die geval van die 77 % kleigrond met 'n residuele P-inhoud van 5.76 mg kg^{-1} en 'n KCl-ekstraheerbare Al-inhoud van $0.56 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. As Tabel 5.6 bestudeer word, mag die vraag ontstaan of die P-toedieningsvlakke nie aansienlik hoër is as die normale kunsmisaanbevelings nie. Hierdie hoër P-toedieningsvlakke - soos reeds verskeie male genoem is - moet egter verseker dat die P-vasleggingsbehoefte in die grond versadig word.

5.6 Evaluering van die berekende P-toediening

Die vraag kan met reg gevra word wat die gebruikswaarde van die berekende P-toediening in die praktyk is; daarom die volgende drie voorbeelde uit tersaaklike vakliteratuur:

5.6.1 Human en Van Biljon (1994)

Na aanleiding van die werk van Human en Van Biljon (1994) kan die mielieproduksiegebied van Suid-Afrika in 'n westelike en oostelike deel verdeel word, elk met sy eie stel riglyne. Die monstergebied tot dusver onder bespreking verteenwoordig dele vanuit die oostelike gebied. Volgens Human en Van Biljon (1994) word die optimum P-vlak van gronde hier gestel op $18\text{-}25 \text{ mg kg}^{-1}$ (*ambic*-ekstraheerbare P). Die hoeveelheid P wat benodig word om die gronde, soos in die voorbeeld hierbo genoem, oor 'n periode van twee

jaar op te bou tot hierdie vlak met 'n opbrengsmikpunt van 8 ton/ha word deur Human en Van Biljon (1994) aangegee as 66 kg ha^{-1} . Om hierdie styging dus in een jaar te bewerkstellig moet 132 kg ha^{-1} toegedien word. Vergelyking 5.2 kan ook aangewend word om die presiese P-toedieningsvlak te bereken - die toedieningsvlak wat nodig is vir enige bepaalde styging in *ambic*-ekstraheerbare P-inhoud deur die substitusie van hierdie styging in die vergelyking. As voorbeeld: indien B_0 nie 24 geneem word nie, maar slegs die helfte om ook die styging in twee jaar te bewerkstellig, naamlik 12, dan is die verwagte styging 6.24 mg kg^{-1} (*ambic*) (Tabel 5.7). Wanneer hierdie waarde in Vergelyking 5.2 ingestel word, impliseer dit 'n toediening van $76,16 \text{ kg ha}^{-1}$, 15 cm diep.

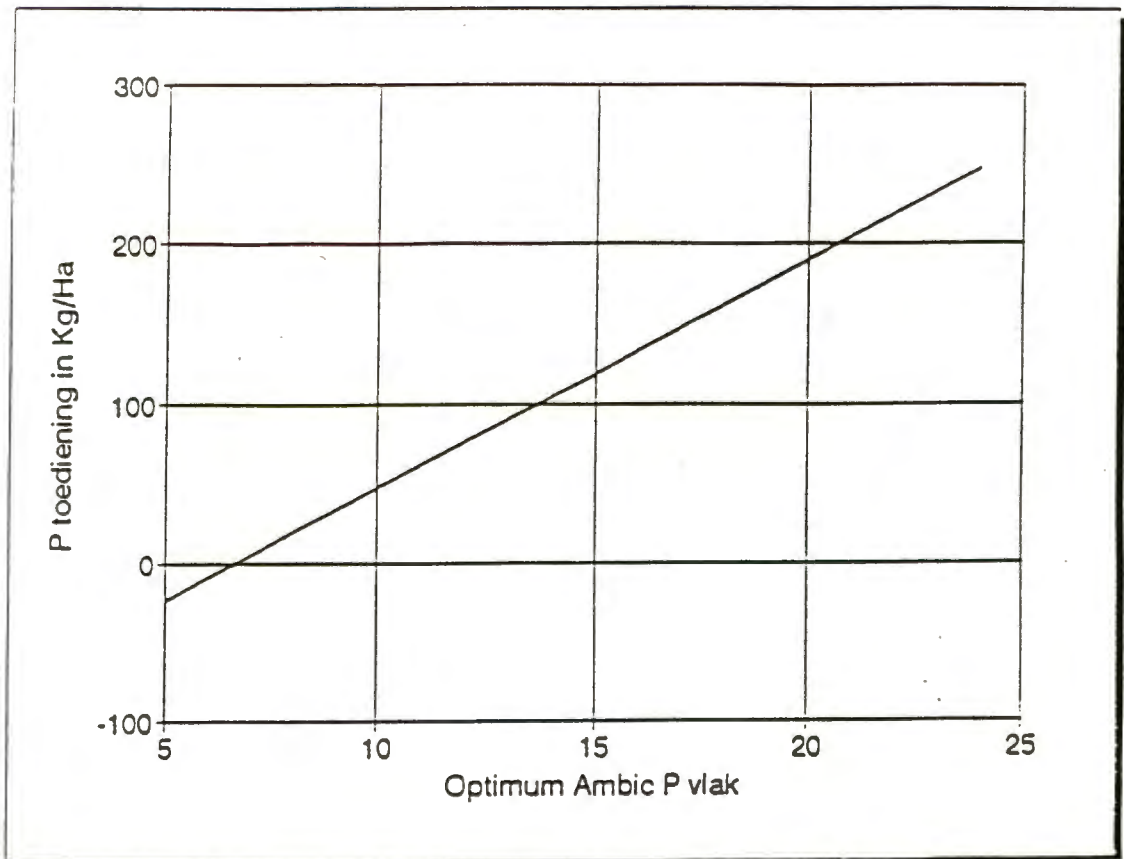
Hierdie beginsel is toegepas vir 'n reeks B_0 -waardes vanaf 5 tot 24 kg ha^{-1} *ambic*-ekstraheerbare P-inhoud. Ten opsigte van elk van die drie verskillende kunsmisbronne (Tabel 5.5) en die gronde met residuele P-inhoude laer as die optimum wat deur Human en Van Biljon voorgestel is, is die volgende gedoen:

- * Die styging in *ambic*-ekstraheerbare P-inhoud is bereken volgens Vergelyking 5.1.
- * Die gepaardgaande toedieningspeil (P_w) is bereken volgens Vergelyking 5.2.
- * Die toedieningspeil per hektaar (vir grondbrutodigtheid van 1.5 en gronddiepte van 15 cm) is bereken.
- * Die fosfaatbehoeftefaktor (PBF) is bereken (Johnston *et al.*, 1991).

Die resultate van hierdie berekenings word weergegee in Bylaag I en die resultaat van die grond hierbo as voorbeeld, vir die KH_2PO_4 -kunsmisbron, word in Tabel 5.7 en Figuur 5.2 weergegee.

Tabel 5.7 : Toedieningsvlakke en fosfaatbehoeftefaktorwaardes (PBF) vir 'n reeks B_0 -waardes (*ambic*-ekstraheerbaar) vir 'n grond met 77 % klei-inhoud, 'n residuele P-inhoud van 5.76 mg/kg en 'n KCl-ekstraheerbare Al-inhoud van 0.56 cmol_c/kg (1 ha grond, 15 cm diep)

B_0 mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	-0.76	-10.46	-23.54	30.97
6	0.24	- 4.13	- 9.29	-38.73
7	1.24	2.20	4.95	3.99
8	2.24	8.53	19.19	8.57
9	3.24	14.86	33.43	10.32
10	4.24	21.19	47.68	11.24
11	5.24	27.52	61.92	11.82
12	6.24	33.85	76.16	12.21
13	7.24	40.18	90.40	12.49
14	8.24	46.51	104.65	12.70
15	9.24	52.84	118.89	12.87
16	10.24	59.17	133.13	13.00
17	11.24	65.50	147.37	13.11
18	12.24	71.83	161.62	13.20
19	13.24	78.16	175.86	13.28
20	14.24	84.49	190.10	13.35
21	15.24	90.82	204.34	13.41
22	16.24	97.15	218.59	13.46
23	17.24	103.48	232.83	13.51
24	18.24	109.81	247.07	13.55



Figuur 5.2 Verwantskap tussen 'n reeks B_0 -waardes (*ambic*-ekstraheerbaar) en die ooreenstemmende toedieningsvlakke van die KH_2PO_4 -kunsmisbron vir 'n grond met 77 % klei-inhoud, 'n residuele P-inhoud van 5.76 mg/kg en 'n KCl-ekstraheerbare Al-inhoud van 0,56 cmol_c/kg.

Tabel 5.8 dui dus aan dat die toedieningswaardes van P kan wissel tussen 25.87 en 123.03 kg ha⁻¹ vir B_0 van 12 mg kg⁻¹, ongeag die kunsmisbron teenoor die 42 tot 83 kg ha⁻¹, en ongeag die oesopbrengspunt wat Human en Van Biljon (1994) voorstel vir gronde met 'n lae residuele P-inhoud. Daar moet ook daarop gelet word dat die toedieningsvlakke van Tabel 5.8 net gemik is op die regstelling van die grond se vasleggingsbehoefte - Human en Van Biljon (1994) sluit egter ook die opbrengsmikpunt in. Hoewel die vergelyking nie 'n

konkrete bewys lewer van teenstrydighede of ooreenstemming nie, kan aanvaar word dat die breër riglyn van Human en Van Biljon en die aanbevelings volgens hierdie studie in ooreenstemming met mekaar is. Die omvang van die aanbevelingsreeks van hierdie studie is geregverdig in die lig van die groter noukeurigheid in spesifieke riglyne van hierdie metode. Hierdie resultaat impliseer sekerlik ook dat die voorgestelde metode die werk van Human en Van Biljon (1994) kan komplementeer aangesien met die minimum grondeienskappe, soos reeds aangedui is, 'n groter P-bemestingsdoeltreffendheid bewerkstellig kan word.

Tabel 5.8 : Die ooreenstemmende toedieningsvlakke van P met KH_2PO_4 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ en $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ onderskeidelik op verskillende gronde. Die B_0 -mikpunt van 18 impliseer 'n eenmalige toediening om die P-inhoud van die grond tot die optimum peil te verhoog en die B_0 van 12 word gebruik indien die styging oor twee jaar teweeggebring moet word (Human & Van Biljon, 1994)

KH_2PO_4

Klei-inhoud %	Residuele P (mg/kg ambic)	B_0 (mg/kg ambic)	ΔP (mg/kg ambic)	P_{∞} (mg/kg ambic)	P_{∞} (kg/ha)
77	5.76	18	12.24	71.83	161.62
77	5.76	12	6.24	33.85	76.16
42	2.93	18	15.07	61.45	138.27
42	2.93	12	9.07	44.73	100.65
12	3.56	18	14.44	27.74	62.4
12	3.56	12	8.44	18.26	41.07
12	2.71	18	11.29	14.78	33.25
12	2.71	12	9.29	11.50	<u>25.87</u>

Tabel 5.8 (vervolg)

 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$

Klei-inhoud %	Residuele P (mg/kg <i>ambic</i>)	B_0 (mg/kg <i>ambic</i>)	ΔP (mg/kg <i>ambic</i>)	P_ω (mg/kg <i>ambic</i>)	P_ω (kg/ha)
77	5.76	18	12.24	84.15	189.34
77	5.76	12	6.24	52.41	117.92
42	2.93	18	15.07	79.46	178.78
42	2.93	12	9.07	54.68	<u>123.03</u>
12	3.56	18	14.44	30.05	67.61
12	3.56	12	8.44	20.51	46.15
12	2.71	18	11.29	25.42	57.20
12	2.71	12	9.20	22.08	49.69

 $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$

Klei-inhoud %	Residuele P (mg/kg <i>ambic</i>)	B_0 (mg/kg <i>ambic</i>)	ΔP (mg/kg <i>ambic</i>)	P_ω (mg/kg <i>ambic</i>)	P_ω (kg/ha)
77	5.76	18	12.24	788.72	177.12
77	5.76	12	6.24	39.18	88.16
42	2.93	18	15.07	79.81	179.56
42	2.93	12	9.07	53.53	120.43
12	3.56	18	14.44	27.67	62.25
12	2.56	12	8.44	18.55	41.73
12	2.71	18	11.29	30.76	69.22
12	2.71	12	9.29	21.40	48.16

5.6.2 Johnston, Miles en Thibaud (1991)

Die fosfaatbehoeftefaktor (PBF) oftewel *P requirement factor* (PRF) soos aangetoon in die

werk van bogenoemde outeurs is ondersoek ten einde die resultate van hierdie studie te verifieer. Bogenoemde outeurs het monsters van 54 lokaliteite in Natal in 'n glashuisstudie ondersoek om vas te stel wat die PBF-waarde vir fosfor moet wees. Die grondeienskappe was divers met klei-inhoude wat onder andere gewissel het van 4 % tot 83 %. Die PBF-waardes wat bepaal is na aanleiding van *ambic*-ontledings het gewissel tussen 2.5 en 37.9 en 'n gemiddelde waarde van 13.4 is bereken. Hierdie waarde is dan soos volg gebruik in die berekening van die P-behoefte van 'n bepaalde grond:

- $P \text{ benodig (kg/ha)} = (\text{optimum van grond P} - \text{residuele P van grond}) \times \text{PBF} \dots\dots\dots (5.3).$
- Hierdie gegewens toegepas op die voorbeeld wat reeds gebruik is in paragrawe 5.5 en 5.6.1 impliseer dat
- $164.02 \text{ (kg/ha)} = (18 \text{ mg/kg } \textit{ambic}) - 5.76 \text{ (mg/kg)} \times 13.4.$

Afgesien van die noue ooreenstemming met hierdie studie se aanbeveling van 169.5 kg/ha is dit interessant om te let op die speling van berekende PBF-waardes volgens Bylaag I of Tabel 5.7 vir die spesifieke grond wat as voorbeeld vir berekenings dien. Die wisseling van PBF-waardes vir grond met 'n klei-inhoud van 77 % volgens Tabel 5.7 is 10.32 tot 13.55. Die PBF-waardes van die ooreenstemmende B_0 -waardes vanaf 5 tot 8 kan met veiligheid buite rekening gelaat word aangesien die residuele P-waarde van die grond (77 % klei, Tabel 5.4) reeds in die reeks verteenwoordig is, naamlik 5.76 mg kg⁻¹ *ambic*. Uit Bylaag I is hierdie wisseling vir gronde met 12 % en 77 % klei-inhoud 3.29 tot 14.59. Die mate

van ooreenstemming in hierdie geval is merkwaardig aangesien die werk van Johnston *et al.* (1991) en die onderhawige studie daarop gemik is om die grondregstelling te kwantifiseer. Hierdie mate van ooreenstemming bevestig verder dat die spesifieke aard van die voorgestelde metode, ook in die geval van Johnston *et al.* (1991), die effektiwiteit van P-toediening kan optimaliseer.

5.6.3 Farina, Manson en Johnston (1993)

Die navorsing van Farina *et al.* (1993) is soortgelyk aan die studie van Johnston *et al.* (1991) maar is van toepassing op veldproewe. In hierdie geval het die klei-inhoude van die gronde gewissel van 10 % tot 40 %, met 'n wisseling in PBF vanaf 3 tot 10. Die volgende riglyne word voorgestel na aanleiding van hierdie werk:

- * Vir 'n klei-inhoud <10 % word 'n PBF van 3 aanbeveel.
- * Vir klei-inhoude tussen 10 % en 40 % word 'n waarde van 9 aanbeveel.
- * Vir klei-inhoude hoër as 40 % word 'n waarde van 11 aanbeveel.

Met hierdie bestudering van die berekende PBF-waardes in Bylaag I is die volgende gevind:

- * Vir 'n klei-inhoud van 12 %, ongeag die kunsmisbron, varieer die PBF-waarde tussen 2.35 en 6.55.
- * Vir 'n klei-inhoud van 42 %, ongeag die kunsmisbron, varieer die PBF-waarde tussen 8.83 en 15.68.

- * Vir 'n klei-inhoud van 77 %, ongeag die kunsmisbron, varieer die PBF-waarde tussen 10.32 en 25.37.

In die voorgestelde metode is slegs gewerk met drie klei-inhoude wat 'n direkte vergelyking met die resultaat van Farina *et al.* (1993) bemoeilik, maar dit laat steeds ruimte vir die afleiding dat die resultate mekaar eerder komplementeer as weerspreek.

Die voorafgaande vergelykings met bevindinge in tersaaklike vakliteratuur illustreer dat daar wel verdere ondersoeke gedoen kan word oor die toepassingswaarde van die voorgestelde metode.

Die korrelasie-onderzoek tussen die waardes vir ΔP (bereken) en ΔP (gemeet) is sodanig uitgevoer dat alle kriteria wat in die stratifikasietabel verskyn (Tabel 5.3), asook die P-bemestingsbronne wat in afdeling 5.5 gebruik is, beskou is as subgroepe (klei-inhoud, kalkbehandeling, fosfaatbehandeling, P-bemestingsbron) wat onderling korreleer. Die betekenisvolheid van die korrelasies is ondersoek aan die hand van 'n eenvoudige *t*-toets (Allan, 1982). Die voorkoms van 'n nie-betekenisvolle korrelasie tussen ΔP (bereken) en ΔP (gemeet) vir enige bepaalde subgroep sal daarop dui dat die stratifikasieprosedure ten opsigte van die bepaalde subgroep vereenvoudig kan word. Indien alle korrelasies egter betekenisvol blyk te wees, impliseer dit dat die stratifikasieprosedure maksimaal vereenvoudig is. Anders gestel, dit beteken dat elke subgroep 'n beduidende implikasie het in die identifikasie van die regressies - soos reeds bespreek in die voorafgaande paragrafe. In so 'n geval moet oorweging geskenk word aan verdere uitbreiding van die stratifikasie-

proses of moet volstaan word by die huidige. Laasgenoemde opsie is egter onwaarskynlik. Daar is reeds met die bespreking van die stratifikasieproses (par. 5.3) gesuggereer dat die huidige prosedure slegs daarop gemik is om 'n praktiese vorm van evaluering moontlik te maak aan die hand van die beskikbare data uit die studiegebied. Die grense waarbinne die grondtekstuur in die studiegebied voorgekom het, is waarskynlik wyd genoeg om verteenwoordigend te wees vir die totale produksiegebied van Suid-Afrika. Die klasintervalle kan egter moontlik kleiner gemaak word en dus kan meer klasse geskep word as slegs die drie soos tydens hierdie ondersoek. Die resultate van die korrelasie-onderzoek word in Tabel 5.9 weergegee.

Tabel 5.9 : Korrelasies bereken vir alle subgroepe tussen ΔP (bereken) en ΔP (gemeet)

Pa- ra- me- ter	Alle sub- groepe	Klei (%)	Klei (%)	Klei (%)	Kalk- behan- deling	Kalk- behan- deling	Fosfaat- behan- deling	Fosfaat- behan- deling	P-bemes- tings- bron	P-bemes- tingsbron	P-bemes- tingsbron
		77	42	12	K 1	K 2	P 1	P 2	KH_2PO_4	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	$(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$
r	0.99	0.99	0.98	0.80	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99
n	30	9	9	12	18	12	18	12	10	10	10
p	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

r = Korrelasiekoëffisiënt

n = aantal waarnemings wat paarsgewys ontleed is (ΔP (bereken) en ΔP (gemeet))

p = betekenispeil ($\alpha = 0.05$ (*) en $\alpha = 0.01$ (**))

Die ΔP (gemeet) is gebaseer op die gemiddelde waarde van drie analyses per inkubasie. Hierdie resultaat ondersteun die standpunt dat die stratifikasieprosedure nie verder vereenvoudig kan word nie. Die hoë korrelasies dui daarop dat die stratifikasieprosedure

al die subgroepe benodig in die identifikasie van 'n geskikte regressie vir Vergelyking 5.2. Die mate van uitbreiding van hierdie stratifikasie sal bes moontlik volgens dieselfde beginsel as die beste deelversamelingsregressie moet geskied. Sodanige uitbreiding impliseer die onderverdeling van subgroepe in meer klasse en/of die insluit van meer subgroepe indien sodanige verdeling/insluiting 'n betekenisvolle bydrae kan lewer al dan nie.

Dieselfde redenasie geld ook vir die relatief hoë korrelasiesyfer wat hier en in die proef, soos beskryf in paragraaf 5.4, behaal is. Die datastel is beperk en 'n meer realistiese toets sal wees om 'n totaal onafhanklike datastel te gebruik - 'n datastel wat anders is as die een waarvan die regressies oorspronklik afgelei is. Daar moet egter daarop gelet word dat die mate van betekenisvolheid aan die hand van 'n toets in alle gevalle hoogs betekenisvol is en daarom behoort die resultaat behoue te bly met 'n onafhanklike datastel.

5.7 Gevolgtrekking

Die klem in hierdie ondersoek moet weereens geplaas word op die meriete van die voorgestelde metode wat meer spesifiek is in die bepaling van die fosfaatbehoefte van 'n bepaalde grond. Die werklike riglyn wat ten opsigte van 'n bepaalde grond in die praktyk gevolg moet word, verdien verdere ondersoek maar is nie die doelwit van hierdie ondersoek nie. Met versigtigheid kan sommige van die resultate wel direk in die praktyk aangewend word by gronde soortgelyk aan dié wat in die studie gebruik is. Indien sommige van hierdie resultate in die praktyk aangewend word, kan dit gepaard gaan met 'n verhoogde P-bemestingsdoeltreffendheid, en dus ook implisiete besparing in bemesting. In die geheel gesien, dui die resultate wat behaal is die volgende aspekte aan:

- * Die fosfaatvasleggingskapasiteit van gronde kan beslis in nouer verband gebring word met bepaalde grondeienskappe waarvan tekstuur, residuele P en uitruilbare Al die belangrikste is.
- * Die hoeveelheid fosfaat wat uiteindelik in die grond vasgelê gaan word, sal verskillende hoeveelhede van 'n bepaalde kunsmisbron impliseer, aangesien elke kunsmisbron 'n eie bepaalde chemiese reaksie in die grond tot gevolg het.
- * Die kwantifisering van die verwantskap tussen *ambic*-ekstraheerbare P en ekwivalente hoeveelhede van verskillende kunsmisbronne vir verskillende bemestingsmikpunte is noodsaaklik om verdere optimalisering in die fosfaatbemesting te bewerkstellig.
- * 'n Stratifikasieprosedure word benodig ten einde die moontlike kombinasies van die genoemde grondeienskappe in die totale produksiegebied van Suid-Afrika te reduseer tot 'n praktiese aantal wat in die praktyk toegepas kan word en steeds sal bydra tot 'n beduidende optimalisering van fosfaatbemestingsprogramme.
- * Die seleksie van die toepaslike regressie in die bepaling van die spesifieke hoeveelheid van 'n kunsmisbron wat aangewend moet word om 'n bepaalde vlak van P in die grond te bereik, is prakties implementeerbaar. Die mate van stratifikasie verdien egter verdere ondersoek.

- * Hierdie regressies lewer verder bevredigende resultate wanneer geëkstrapoleer word na vlakke van B_0 in die grond tussen 5 en 25 mg kg⁻¹ - soos gesien kan word wanneer bestaande resultate wat in tersaaklike vakliteratuur aangedui word, met die resultate van hierdie studie vergelyk word. .
- * Die benaderingsgrondslag van die voorgestelde prosedure is prakties haalbaar, maar kan nie sonder meer in die praktyk toegepas word sonder verdere bekragtiging nie.
- * Aangesien 'n tekort aan geskikte vergelykende data soos dié van Johnston *et al.* (1991) en Farina *et al.* (1993) in die totale produksiegebied van Suid-Afrika bestaan, bemoeilik dit die evaluering van die voorgestelde prosedure by 'n fyner stratifikasie-prosedure.
- * Die resultate van die onderhawige studie vul bestaande vakliteratuur en norme vir fosfaatbemesting aan en kan daarom 'n besliste bydrae lewer tot groter P-bemestings-doeltreffendheid in gewasproduksie.

HOOFSTUK 6

OPSOMMING EN GEVOLGTREKKINGS

Navorsing oor fosfaatsorpsie deur grond word volgens tersaaklike vakliteratuur in die jongste tyd meer en meer toegespits op die reaksiekinetika van grondfosfate. Sodoende word gepoog om die toeganklikheid van fosfaat aan plante onder wisselende grondtoestande deur middel van wiskundige modelle akkuraat te beskryf. Verskeie modelle om fosfaattoeganklikheid te beskryf word in vakliteratuur gevind - elk met bepaalde tekortkominge.

Grondeienskappe wat fosfaatsorpsie beïnvloed, is so interafhanklik dat dit nie in isolasie of met uitskakeling van sommige prosesse bestudeer kan word nie. Tot dusver is, volgens tersaaklike vakliteratuur, slegs enkele geselekteerde grondeienskappe met fosfaatsorpsie in verband gebring. In 'n poging om alle grondeienskappe te bestudeer wat moontlik 'n rol kan speel by fosfaatsorpsie, is 'n nuwe benadering gevolg.

Met die grafiese voorstelling van die hoeveelheid ekstraheerbare fosfaat - gestel teenoor tydsverloop - word 'n karakteristieke tweefasepatroon waargeneem. Hierdie tweefasepatroon vertoon 'n aanvanklike vinnige daalfase oor die eerste sewe tot tien dae met 'n relatiewe skerp draaipunt, gevolg deur 'n meer geleidelike daalfase wat voortduur vir 70 dae of meer. Daar is gevind dat 'n reguit lyn suksesvol gepas kan word op elkeen van die fases voor en na die draaipunt. Hierdie bevinding gee daartoe aanleiding dat drie parameters, naamlik B_1 , B_2 en B_0 in die sorpsiekurwe onderskei kan word. B_1 en B_2 is die hellings van die kurwe voor en na die

draaipunt, terwyl B_0 die snypunt van die twee reguit lyne wat op die B_1 - en B_2 -fases gepas is, voorstel. Die snypunt (B_0) kom voor by 'n wye reeks monsters wat ontleed is op ongeveer die sewende dag van kontak tussen die grond en 'n oplosbare fosfaatbron wat aan die grond toegedien is. 'n Latfunksie wat bogenoemde kriteria wiskundig weergee, is gepas op 50 grondmonsters wat verteenwoordigend is van Hutton-, Avalon-, Clovelly- en Bainsvleivorms uit die Hoëveldstreek. Die koëffisiënte van determinansie vir die passings (r^2) het gewissel tussen 0.63 en 0.99. Die keuse van monsters wat uit die B2-horison geneem is, berus op die vereiste om gronde te gebruik waarvan die fosforsorpsiekapasiteit nie gedeeltelik opgehef is deur residuele P nie. Hierdie vereiste moet in aanmerking geneem word ten einde die sukses van 'n latfunksiebenadering te kan evalueer.

Na die passing is ondersoek ingestel na die verwantskap van verskillende grondeienskappe wat 'n rol speel in fosfaatsorpsie met elk van die geïdentifiseerde parameters. Deur middel van Hoofkomponent-analise (HKA) is 15 grondeienskappe binne die 50 grondmonsters met elkeen van bogenoemde parameters in verband gebring. Daar is gevind dat hierdie 15 grondmonsters in vyf hoofkomponente ingedeel kan word. Die groepering in verskillende hoofkomponente hou ook verband met die chemiese en fisiese aard van die grondeienskappe.

Beste deelversamelingsregressie is hierna gebruik om die verskillende komponente in regressies te gebruik vir die berekening van B_1 , B_2 en B_0 . Uit hierdie analise het geblyk dat slegs die B_0 redelik akkuraat ($r^2 = 0.62$) voorspel kan word wanneer sewe grondeienskappe, soos geïdentifiseer deur middel van die HKA, toegepas word. Hierdie B_0 -koëffisiënt word beskou as 'n baie belangrike parameter vir bemestingskedulering aangesien dit die hoeveelheid

plantbeskikbare fosfaat sewe dae na die toediening van 'n fosfaatkunsmisbron verteenwoordig.

Daar is verder gepoog om die passing, na aanleiding van die HKA, te verbeter deur individuele kombinasies van grondeienskappe wat nie normaalweg in roetine-analises betrek word nie, maar wat volgens vakliteratuur 'n groot invloed op P-sorpsie uitoefen, ook in aanmerking te neem. Gevolglik is Al_2O_3 en Fe_2O_3 (%), asook MnO_2 (mg kg^{-1}) ook in 'n deelversamelingsregressie ingesluit, tesame met die grondeienskappe van die vorige oefening. Hiermee is gevind dat die r^2 van die B_0 -koëffisiënt verbeter het vanaf 0.62 na 0.82. Die r^2 van die B_1 - en B_2 -koëffisiënte het nie beduidend verbeter nie.

Die regressie vir die berekening van B_0 sien soos volg daar uit:

$$B_0 = 69.367 - 0.741 [\text{slik}] - 0.647 [\text{klei}] - 63.04 [\text{Al}] \\ + 1.175 [\text{titreerbare suur}] - 0.0022 [\text{MnO}_2] \quad (r^2 = 0.82) \quad \text{..... (Vgl. 3.4)}$$

Met bogenoemde vergelyking kan die snypunt van die latfunksie B_0 effektief bepaal word as die bepaalde grondeienskappe wat daarin vervat is, bekend is. Daar kan met hierdie vergelyking dus akkuraat bepaal word hoeveel fosfor aan die plant beskikbaar is op die tydstip as plantwortels uit die saad ontwikkel het en met die grond kompeteer vir fosfaatsorpsie. Hierdie inligting is 'n konkrete bewys dat fosfor so na as moontlik aan planttyd toegedien moet word.

Omdat gronde onder gewasverbouing in die RSA feitlik sonder uitsondering reeds lankal fosfaatbemesting in die vorm van kunsmistoedienings ontvang, het 'n vergelyking, soos in die vorige paragraaf aangetoon, nie veel toepassingswaarde as dit nie ook gebruik kan word vir

gronde wat wel residuele P bevat nie. Vervolgens is die kompliserende effek van residuele P ondersoek deur 'n stel van 33 grondmonsters te selekteer uit dieselfde monstergebied. Hierdie grondmonsters was van dieselfde grondvorms as in die vorige proefneming en het met beduidende vlakke van residuele P bevat. Hierdie monsters is almal geneem in die A1-horison in bewerkte lande waarop fosfaatbemesting in die verlede toegepas is.

Die koëffisiënte van determinansie vir die passings (r^2) in hierdie geval het gewissel tussen 0.08 en 0.93. Hierdie swakker resultate van die latfunksie kan toegeskryf word aan 'n verhoogde kompetisie vir sorpsielokalisering met residuele P. Desnieteenstaande behou die B_1 -, B_2 - en B_0 -koëffisiënte hul biologiese waarde en is daar gevolglik direk oorgegaan tot die verifiëring van Vergelyking 3.4. Die koëffisiënt van determinansie het egter afgeneem tot 0.65. Na aanleiding van hierdie resultaat is verder geëksperimenteer met beste deelversamelingsregressie en die kombinasie van klei, residuele P en KCl-ekstraheerbare Al het uiteindelik 'n $r^2 = 0.936$ opgelewer. Verdere byvoegings van grondeienskappe het wel die r^2 verhoog, maar die relatiewe bydrae het minder betekenisvol geblyk te wees vir die begrensing van die variasie in B_0 . Hierdie grondeienskappe kan dus buite rekening gelaat word. Die impak van residuele P op die berekening van B_0 is dus baie groot en dui op die absolute belangrikheid om hierdie grondeienskap in te sluit in die berekening van fosfaattoediening vir akkerbougewasse wat afhanklik is van P-aanvulling. Die berekening van B_0 in grond wat wel residuele P bevat, word in die volgende regressievergelyking weergegee:

$$B_0 = 74.37 - 0.642 [\text{klei}] + 1.181 [\text{residuele P}] - 23.55 [\text{Al}] \quad (r^2 = 0.936) \quad \text{..... (Vgl. 4.1)}$$

Hiermee is die berekening van B_0 gereduseer tot maklik kwantifiseerbare grondeienskappe wat die praktiese toepassingswaarde van B_0 in P-bemestingskedulering verhoog. Hierdie proses vereis nie spesiale tegnieke, opleiding en/of gesofistikeerde laboratoriums nie. Die proses sal ook nie lei tot duurder of meer tydrowende analyses nie. Ook sal die proses aangewend kan word binne die raamwerk van bestaande prosedures wat tans van toepassing is in die meeste roetine-laboratoriums.

Wanneer bogenoemde vergelyking in praktiese bemestingskedulerings toegepas word, moet die volgende faktore in aanmerking geneem word. Die hoeveelheid ekstraheerbare P in die grond (B_0) bestaan uit residuele P wat in die grond aanwesig was voordat 100 mg kg^{-1} fosfaat uit 'n bepaalde kunsmisbron daaraan toegedien is, plus 'n gedeelte van die toegediende 100 mg kg^{-1} fosfaat wat steeds *ambic*-ekstraheerbaar is (ΔP). Met residuele P as een van die vereiste insette in die berekening van B_0 kan bepaal word wat die werklike waarde van ΔP is, naamlik B_0 minus residuele P:

$$\Delta P = B_0 - \text{residuele P} \dots\dots\dots (5.1)$$

In die praktyk is gevind dat ΔP , soos gemeet sewe dae na die toediening van 100 mg kg^{-1} P uit 'n bepaalde kunsmisbron, verskil van die ΔP soos bereken met behulp van Vergelyking 5.1. Hierdie verskil illustreer dat die verwantskap tussen B_0 en die hoeveelheid van 'n bepaalde kunsmisbron wat toegedien is verdere verfyning benodig. Hierdie probleme kon oorkom word deur 'n regressie daar te stel vir elke groepering van kleipersentasie, residuele P, KCl-ekstraheerbare Al-inhoud en kunsmisbron. Hierdie regressie kan dan vir verskillende toedieningsvlakke van 'n bepaalde kunsmisbron aangepas word ten opsigte van die werklike

hoeveelheid van die bepaalde kunsmisbron (P_w) wat toegedien moet word om te verseker dat die nouste moontlike ooreenkoms bestaan tussen die berekende en die waargenome B_0 . Sulke regressies is afgelei vir toedienings van 25, 50, 75 en 100 mg kg⁻¹ van drie kunsmisbronne, naamlik KH_2PO_4 , $Ca(H_2PO_4)_2$ en $(NH_4)H_2PO_4$.

Met hierdie regressies bekend, sal bemestingskedulering vir 'n bepaalde grond soos volg daar uitsien:

- * Bereken B_0 met behulp van Vergelyking 4.1.
- * Bepaal ΔP met behulp van Vergelyking 5.1.
- * Gebruik die toepaslike regressie en bereken P_w nadat die P-kunsmisbron geselekteer is.

Die sukses van hierdie prosedure is geëvalueer deur die voorgestelde prosedure toe te pas op 'n stel grondmonsters afkomstig uit drie lokaliteite, naamlik Greytown, Geluksburg (Bergville-distrik) en Dundee (New Castle-distrik) met klei-inhoude van 77 %, 42 % en 12 % respektiewelik. Die grondmonsters is op hierdie wyse saamgestel om daardeur te verseker dat dit verteenwoordigend is van die totale spektrum van kleipersentasies binne die toepaslike akkerbougronde. Die grondmonsters van hierdie drie lokaliteite is verteenwoordigend van 'n kalk- en fosfaattoedieningsproef soos beskryf in Hoofstuk 5. Die mate van ooreenstemming tussen B_0 (berekend) en B_0 (gemeet) bepaal die sukses van bogenoemde prosedure.

Die aantal kombinasies van klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P in die studiegebied is baie groot. Ten einde die proeftegniek sinvol te kan evalueer, is dit nodig om die monstergebied te stratifiseer sodat slegs 'n goeie steekproef van relevante kombinasies van verskillende

parameters geëvalueer kan word. Daar is vervolgens gepoog om die studiegebied in te deel in drie klei-inhoudsgroepe wat elk 'n hoë en lae residuele fosfaatinhoud het. Hierdie drie klei-inhoudsgroepe is elk ook met 'n hoë en 'n lae kalktoediening behandel. Die kalkbehandelings het verskillende vlakke van KCl-ekstraheerbare Al tot gevolg gehad. Hierdie proefuitleg impliseer 36 moontlike kombinasies van klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P. Op hierdie groepe is vier verskillende toedieningsvlakke van drie verskillende kunsmisbronne toegepas. Hoewel hierdie stratifikasie 'n ooreenvoudiging van die totale variasie in klei-inhoud, KCl-ekstraheerbare Al en residuele P in die studiegebied is, is dit nogtans 'n riglyn wat die evaluering van die tegniek moontlik maak. Vir die toepassing van die tegniek op enige lokaliteit moet die lokaliteit dus gemeet word aan die hand van die 36 moontlike kombinasies ten einde 'n geskikte regressie te selekteer.

In die evaluering van die tegniek word die aanname dus gemaak dat hierdie stratifikasie wel moontlik is en is monsters gebruik wat binne elke behandelingsgroep voorkom. Die mate van ooreenstemming sal in die geval van hierdie studie die akkuraatheid van die voorgestelde tegniek aandui. Om hierdie tegniek in die praktyk toe te pas sal verdere ondersoek nodig wees om die graad van stratifikasie te bepaal wat sinvol is vir die toepassing in die produksiegebiede in hul geheel. Verder moet 'n geldige resoluusie bepaal word om die seleksie van toepaslike regressie te vergemaklik en die praktiese uitvoerbaarheid daarvan te bepaal.

Die proef is herhaal en die berekende hoeveelhede van elke kunsmisbron vir 'n bepaalde behandelingsgroep is aan dieselfde grond toegedien. Na sewe dae is hierdie nuwe stel inkubasies weer ontleed en die waargenome styging van ekstraheerbare fosfaat in die grond is bepaal.

Die resultate is geëvalueer aan die hand van bestaande bevindings uit tersaaklike vakliteratuur. Daar is tot die gevolgtrekking gekom dat hierdie resultate nie net die norme vir fosfaatbemesting - soos tans toegepas - aanvul nie, maar dat dit ook 'n meer akkurate berekening van bemestingsnorme in die praktyk moontlik maak. Op grond van die resultate wat in hierdie studie verkry is, blyk die volgende:

'n Nou verband bestaan tussen die fosfaatvasleggingskapasiteit van gronde en bepaalde grondeienskappe waarvan klei-inhoud, residuele P en KCl-uitruilbare Al die belangrikste is.

Verskillende kunsmisbronne het verskillende chemiese reaksies in die grond tot gevolg. Hierdie verskil in chemiese reaksies gee daartoe aanleiding dat die hoeveelheid fosfaat wat uit elke bron in die grond vasgelê word verskillend is.

Die kwantifisering van die verwantskap tussen *ambic*-ekstraheerbare P en ekwivalente hoeveelhede van verskillende kunsmisbronne vir verskillende bemestingsmikpunte is noodsaaklik om verdere optimalisering in fosfaatbemesting te bewerkstellig.

'n Stratifikasieprosedure word benodig ten einde die moontlike kombinasies van klei-inhoud, residuele P en KCl-uitruilbare Al in die totale produksiegebied van Suid-Afrika te reduceer tot 'n praktiese aantal wat in die praktyk toegepas kan word en steeds sal bydra tot 'n beduidende optimalisering van fosfaatbemestingsprogramme. Die seleksie van die toepaslike regressie om die spesifieke hoeveelheid van 'n bepaalde P-vlak in die grond te bereik, is prakties implementeerbaar. Die mate van stratifikasie moet egter verder ondersoek word.

Die toepaslike regressies lewer bevredigende resultate wanneer geëkstrapoleer word van vlakke van B_0 in die grond tussen 5 en 25 mg kg⁻¹ - soos gesien kan word in 'n vergelyking met resultate wat in die bestaande vakliteratuur aangetoon word.

Die benaderingsgrondslag van die voorgestelde prosedure is prakties haalbaar maar kan nie sonder meer in die praktyk toegepas word sonder verdere bekragtiging nie.

Die resultate wat behaal is, vul nie net die bestaande vakliteratuur ten opsigte van die norme vir fosfaatbemesting aan nie, maar verskaf 'n meer eksakte formule vir die berekening van 'n grondse fosfaatvasleggingsbehoefte en lewer daarom 'n besliste bydrae tot groter P-bemestingsdoeltreffendheid en winsgewendheid in gewasproduksie.

BIBLIOGRAFIE

- ABDEL-SALEM, M.A., SABET, S.A. & HASHISH, S. 1964. Patterns of fixation of P^{32} labelled phosphate by some soil minerals. *Plant and Soil*, 20:241-250.
- ADAMS, J.F. & ODOM, J.W. 1985. Effects of pH and phosphorus rates on soil-solution phosphorus and phosphorus availability. *Soil Sci.*, 140:202-205.
- ALLAN, J.C. 1982. Learning about statistics: a primer in simple statistical methods for students of the Medical, Biological, Paramedical, Social and Behavioral Sciences, Johannesburg: Dept of Anatomy, University of the Witwatersrand.
- AMARASIRI, S.L. & OLSEN, S.R. 1973. Liming as related to solubility of phosphorus and plant growth in an acid tropical soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:716-721.
- AMER, F., BOULDIN, D.R., BLACK, C. & DUKE, F.R. 1955. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption on P^{32} equilibration. *Plant and Soil*, 6:391-408.
- ANDEREGG, J.C. & NAYLOR, D.V. 1988. Phosphorus and pH relationships in an Andic soil with surface and incorporated organic amendment. *Plant and Soil*, 107:273-278.

- ARAKI, S., HIRAI, H. & KYUMA, K. 1986. Phosphate adsorption of red and/or yellow colored soil materials in relation to the characteristics of free oxides. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32:609-616.
- AYODELE, O. & AGBOOLA, A.A. 1981. Evaluation of phosphorus fixation capacity of tropical savannah soils of Western Nigeria. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:462-464.
- BACHE, B.W. 1963. Aluminium and iron phosphate studies relating to soils I. Solution and hydrolysis of variscite and strengite. *J. Soil Sci.*, 14:113-123.
- BACHE, B.W. 1964. Aluminium and iron phosphate studies relating to soils II. Reactions between phosphate and hydrous oxides. *J. Soil Sci.*, 15:110-116.
- BACHE, B.W. & WILLIAMS, E.G. 1971. A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Sci.*, 22:289-301.
- BARROW, G.M. 1961. Physical Chemistry. New York : McGraw-Hill.
- BARROW, N.J. 1978. The description of phosphate adsorption curves. *J. Soil Sci.*, 29: 447-462.
- BARROW, N.J. 1983. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *Soil Sci.*, 34:733-750.

- BARROW, N.J. 1984. Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils. *J. Soil Sci.*, 35:283-297.
- BARROW, N.J. 1985. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. *Adv. Agron.*, 38:183-230.
- BARROW, N.J. 1987. Reactions with variable-charge soils. Dordrecht : Martinus Nijhoff publications.
- BARROW, N.J., BOWDEN, J.W., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. 1980. Describing the effects of electrolyte on adsorption of phosphate by a variable-charge surface. *Aust. J. Soil Res.*, 18:395-404.
- BAUWIN, G.R. & TYNER, E.H. 1957. The distribution of non-extractable phosphorous in some grey-brown podzolic, brunizem and planosol soil profiles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21:241-250.
- BEAR, F.E. 1965. Chemistry of the soil. London : Reinhold.
- BECKETT, P.H.T. & WHITE, R.E. 1964. Studies on the phosphate potential of soils. Part III. The pool of labile inorganic phosphate. *Plant and Soil*: 253-282.

- BENNOAH, E.O. & ACQUAYE, D.K. 1989. Phosphate sorption characteristics of selected major Ghanaian soils. *Soil Sci.*, 148:114-123.
- BOLAN, N.S. & BARROW, N.J. 1984. Modelling the effect of adsorption of phosphate and other anions on the surface charge of variable-charge oxides. *J. Soil Sci.*, 35:273-281.
- BOLAN, N.S., SYERS, J.K. & TILLMAN, R.W. 1988. Effect of pH on adsorption of phosphate and potassium in batch and in column experiments. *Aust. J. Soil Res.*, 26:165-170.
- BORGGAARD, O.K. 1983. The influence of iron oxides on phosphate adsorption by soil. *J. Soil Sci.*, 34:333-341.
- BOWDEN, J.W., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. 1977. Ionic adsorption on variable-charge mineral surfaces. Theoretical charge development and titration curves. *Aust. J. Soil Res.*, 15:121-136.
- BOWDEN, J.W., NAGARAJAH, S., BARROW, N.J., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. 1980. Describing the adsorption of phosphate, citrate and selenite on a variable-charge mineral surface. *Aust. J. Soil Res.*, 18:49-60.
- BOWMAN, R.A. & OLSEN, S.R. 1985. Assessment of phosphate-buffering capacity. 2 Greenhouse methods. *Soil Sci.*, 140:387-392.

- BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. 1945. Determination of total inorganic and available phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59:39-45.
- BRENNAN, R.F. & BOLLAND, M.D.A. 1994. Phosphorus adsorption by a range of western Australian soils related to soil properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25 (15916):2785-2795.
- BROMFIELD, S.M. 1965. Studies on the relative importance of iron and aluminium in the sorption of phosphate by some Australian soils. *Aust. J. Soil Res.*, 3: 31-44.
- BUCHTER, B., DAVIDOFF, B., AMACHER, M.C., HINZ, C., ISKANDAR, I.K. & SELIM, H.M. 1989. Correlation of Freundlich K_d and n retention parameters with soils and elements. *Soil Sci.*, 148:370-379.
- CHAKRAVARTI, S.N. & TALIBUDEEN, A. 1962. Phosphate equilibria in acid soils. *J. Soil Sci.*, 13:231-240.
- CLARK, J.S. & PEECH, M. 1955. Solubility criteria for the existence of calcium and aluminium phosphates in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 19:171-174.
- COLE, V.C. & JACKSON, M.L. 1950. Solubility equilibrium constant of dihydroxy aluminium dihydrogen phosphate relating to a mechanism of phosphate fixation in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 15:84-89.

- DEAN, L.A. & RUBINS, E.J. 1947. Anion exchange in soils I. Exchangeable phosphorus and the anion exchange capacity. *Soil Sci.*, 63:377-387.
- DE HAAN, F.A.M. 1965. The interactions of certain inorganic anions with clays and soils. Agric. Res. Ref. 665. Wageningen : Centre for Agricultural Publications and Documentation.
- DEIST, J. 1961. Die gebruik van fosfor - 32 in studies met betrekking tot seisoenopname van fosfaat deur vrugtebome en die bepaling van plantbeskikbare fosfaat in gronde. Stellenbosch : Universiteit van Stellenbosch (M.Sc.Agric.-verhandeling.)
- DEIST, J., MARAIS, P.G. & HEYNS, C.F.G. 1971. Effect of contact time of labelled fertilizer with soil on the estimation of labile phosphate. *Agrochemophysica*, 3:55-62.
- DE SIGMOND, A. 1907. Chemical method for the determination of the available phosphoric acid in soils. *J. Amer. Chem. Soc.*, 29:929-936.
- DE VILLIERS, J.B.M. & LAKER, M.C. 1966. Die invloed van vooraf toegediende kalk en sink op die opname van fosfor deur suikermielies. *S. Afr. Tydskr. Landb. Wet.*, 9:107-166.
- DIAMOND, R.B. 1985. Availability and management of phosphorus in wetland soils in relation to soil characteristics. (*In Wetland soils: Characterization, classification and utilization. Los Banos, Laguna, Philippines: International Rice Research Institute. pp. 269-283.*)

- DOLUI, A.K. & GANGYOPADHYAY, S.K. 1984. Fixation of phosphorus in relation to properties of some red and lateritic soils of West Bengal. *Indian J. Agric. Chem.*, 17:177-182.
- DU PLESSIS, S.F. & BURGER, R. du T. 1965. A comparison of chemical extraction methods for the evaluation of phosphate availability of top soils. *S. Afr. J. Agric. Sci.*, 8:1113-1122.
- DU PLESSIS, S.F. & BURGER, R. du T. 1966. Silicate-phosphate interrelationships soil. *S. Afr. J. Agric. Sci.* :525-534.
- DU PLESSIS, S.F. 1978. The determination of available soil phosphate for subtropical crops. (In Proceedings of the 8th National Congress of the Soil Science Society of S.A. Pietermaritzburg. 1978. p. 118-123.)
- DU TOIT, G.J. 1986. Die misstoffaktor in die mieliebedryf. Pretoria : Universiteit van Pretoria. (D.Sc.Agric. proefskrif.)
- DU TOIT, P.J., LOUW, J.A., & MALAN, A.I. 1940. A study of the mineral content and feeding value of natural pastures in the Union of South Africa. *Onderstepoort Journal of veterinary science and animal industry*, 14:123-177.
- EARL, K.D., SYERS, J.K. & McLAUGHLIN, J.R. 1979. Origin of the effects of citrate,

tartarate, and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 34:674-678.

EASTON, J.S. 1969. Phosphorus-silicon relationships in sesquioxenic soils and colloidal systems. Pietermaritzburg : University of Natal. (M.Sc. Agric. Dissertation.)

EISENBERG, B.E. 1993. Asst. Dir. Agrimetrie, LNR. Mondelinge mededeling. Pretoria.

EKSTEEN, L.L. 1973. Fosfobemesting van gewasse na aanleiding van navorsingsresultate. *Fertil. Soc. S. Afr. J.*, 1:67-70.

ELOFF, J.F. & LAKER, M.C. 1976. Phosphorus studies on Vaalharts soils. *Agrochemophysica.*, 8:11-16.

EVANS, A.J.R. 1985. The adsorption of inorganic phosphate by a sandy soil as influenced by dissolved organic compounds. *Soil Sci.*, 140:251-255.

FARINA, M.P.W. 1993. Senior Spesialiswetenskaplike, IGG, LNR. Mondelinge mededeling. Januarie 1993.

FARINA, M.P.W. & CHANNON, P. 1978. A comparison of several P availability indexes. *Gewasproduksie/Grop Prod.*, 8:165-169.

FARINA, M.P.W. & CHANNON, P. 1991. A field comparison lime requirement indices for maize. *Plant and Soil*, 134:127-135.

FARINA, M.P.W., MANSON, A.D. & JOHNSTON. 1993. Fertilize guidelines. Co-ordinated extension bulletin on maize in Natal.

FOX, R.L. 1988. External P requirements of plants and their nutrition from fertilisers and soil P. (*In Proc. Phosphorus Symposium. Dept. of Agric. and Water Supply, RSA and Fert. Soc. of S.A. September 1988. p. 112-119.*)

FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:902-907.

FRIESEN, D.K., JUO, A.S.R. & MILLER, M.H. 1980. Liming and lime-phosphorus-zinc interactions in two Nigerian ultisols. 1. Interactions in the soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:1221-1226.

GOLDBERG, S. & SPOSITO, G. 1984a. A chemical model of phosphate adsorption by soils. I. Reference oxide minerals. *Soils Sci. Soc. Am. J.*, 48:772-778.

GOLDBERG, S. & SPOSITO, G. 1984b. A chemical model of phosphate adsorption by soils. II. Noncalcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:779-783.

- GREENLAND, D.J., OADES, J.M. & SHERWIN, T.W. 1968. Electron-microscope observations of iron oxides in some red soils. *J. Soil Sci.*, 19:123-126.
- GROBLER, J.H. 1970. Invloed van superfosfaatbemesting op fosfaatbinding deur 'n lateritiese grond. *Tydsk. vir Nat. Wet.*, 10:250-254.
- GUNARY, D. 1970. A new adsorption isotherm for phosphate in soil. *J. Soil Sci.*, 21:72-77.
- HAHNE, H.C.H., VAN DER MERWE, A.J. & LOOK, A.H. 1988. Review of phosphorus extraction methods and functional components of the Bray 2 and ISFEI/AMBIC extractants. (*In Proc. Phosphorus Symposium. Dept. of Agric. and Water Supply, RSA and the Fert. Soc. of S.A. Symposium. Pretoria. September 1988. p. 93-99.*)
- HARTER, R.D. 1969. Phosphorus adsorption sites in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33: 630-632.
- HASEMAN, J.F., BROWN, E.H. & WHITT, C.D. 1950. Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminium. *Soil Sci.*, 70:251-271.
- HAYNES, R.J. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. A critical review. *Plant and Soil*, 68:289-308.

- HAYNES, R.J. 1983. Effect of lime and phosphate applications on the adsorption of phosphate, sulphate and molybdate by a spodosol. *Soil Sci.*, 135:221-227.
- HAYNES, R.J. 1984. Lime and phosphate in the soil-plant system. *Adv. Agron.*, 37(2):49-315.
- HAYNES, R.J. & LUDECKE, T.E. 1981. Effect of lime and phosphorus applications on concentrations of available nutrients and on P, Al and Mn uptake by two pasture legumes in an acid soil. *Plant and Soil*, 62:117-128.
- HEMWALL, J.B. 1957. The role of soil clay minerals in phosphorus fixation. *Soil Sci.*, 83:101-108.
- HENRY, P.C., JOHNSTON, M.A. & SMITH, M.F. 1990. The sorption characteristics of some Natal soils and the *ambic*, Truog and Bray phosphorus requirement factors. (*In Proc. 16th Congress of Soil Sci. Soc. S. Afr. 9-12 July. Pretoria. p. 106-122.*)
- HINGSTON, F.J., ATKINSON, R.J., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. 1967. Specific adsorption of anions. *Nature*, 215:1459-1461.
- HOLFORD, I.C.R. 1979. Evaluation of soil phosphate-buffering indices. *Aust. J. Soil Res.*, 17:495-504.

- HOLFORD, I.C.R. 1988. Buffering of phosphate in the soil solution during growth of rye grass compared with buffering by sorption. *Plant and Soil*, 111:3-9.
- HSU, P.H. 1964. Adsorption of phosphate by aluminium and iron in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28:474-478.
- HSU, P.H. 1965. Fixation of phosphate by aluminium and iron in acidic soils. *Soil Sci.*, 99:398-402.
- HSU, P.H. & BATES, T.F. 1964. Formation of X-ray amorphous and crystalline aluminium hydroxides. *Mineral Mag.*, 33:749-768.
- HUMAN, J.J. & VAN BILJON, J.J. 1994. Evaluering van mieliebemestingsriglyne gebaseer op bestaande navorsingsdata. Landbounavorsingsraad, Somergraansentrum, Instituut vir Graangewasse. Ongepubliseerde verslag, bylaag 1.2.
- HUNTER, A.H. 1974. A tentative ISFEI soil extraction procedure. International Soil Fertility Evaluation and improvement Project. N.C. State University, Raleigh, N.C.
- INSTITUUT VIR GROND, KLIMAAT EN WATER. 1984. Landbounavorsingsraad. Memoirs oor natuurlike landbouhulpbronne van die Republiek van S.A., 1984.

- JENSEN, H.E. 1971. Phosphate solubility in Danish soils equilibrated with solutions of differing phosphate concentrations. *J. Soil Sci.*, 22:261-266.
- JOHNSTON, M.A., FARINA, M.P.W. & LAWRENCE, J. 1987. Estimation of soil texture from sample density. *Comm. in Soil Sci. and Plant Anal.*, 18:1173-1180.
- JOHNSTON, M.A., MILES, N. & THIBAUD, G.R. 1991. Quantities of phosphorus fertilizer required to raise the soil test value. *S.A. J. Plant and Soil.*, 8 (1): 17-21.
- JUO, A.S.R. 1981. Chemical characteristics. (*In* Greenland, D.J. *ed.* Characterization of soils. Oxford : Clarendon. p. 51-79.)
- JUO, A.S.R. & ELLIS, B.G. 1968. Chemical and physical properties of iron and aluminium phosphates and their relation to phosphorus availability. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32:216-221.
- KAFKAFI, U. 1963. The effect of phosphorus fertiliser placement on the efficiency of phosphorus uptake by plants. Jerusalem : Hebrew University. (D.Phil. thesis.)
- KAFKAFI, U., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. 1967. Desorption of phosphate from kaolinite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31:348-353.
- KAMPRATH, E.J. & WATSON, M.E. 1980. Conventional soil and tissue tests for assessing the

phosphorus status of soils. (*In* Khasawneh, F.E., Sample, E.C. & Kamprath, E.J. *eds.*, The role of phosphorus in agriculture. Madison, Wisconsin : Soil Sci. Soc. Am., pp. 433-469.)

KELLY, F.B. & MIDGLEY, A.R. 1943. Phosphate fixation and exchange of phosphate and hydroxyl ions. *Soil Sci.*, 55:167-175.

KIRSTEN, W. 1994. Eerste Grondkundige, IGKW, LNR. Mondelinge mededeling.

KITTRICK, J.A., & JACKSON, M.L. 1955. Rate of phosphate reaction with soil minerals and electron microscope observations on the reaction mechanism. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 19:292-295.

KITTRICK, J.A. & JACKSON, M.L. 1956. Electro-microscope observations on the reaction of phosphate with minerals leading to a unified theory of P fixation in soils. *J. Soil Sci.*, 7:81-88.

KODAMA, H. & WEBBER, M.D. 1975. Clay-inorganic studies. III. Hydroxy aluminium phosphate-montmorillonite complex. *Can. J. Soil Sci.*, 55:225-233.

KOTZE, W.A.G. 1981. Toepassing van radio-isotope in grondkundige studies. R.A.K. kortkursus oor die gebruik van radioaktiewe isotope in die landbou. Pretoria. 22-24 April 1981. (par. 10.1-10.19.)

- KOTZE, W.A.G. & MARAIS, P.G. 1988. Determination of plant available phosphorus. (In Proc Phosphorus Symposium. Dept. of Agri. and Water Supply RSA and Fert. Soc. of S.A. Pretoria. Jan. 1988. p. 60-62.)
- KUO, S. & LOTSE, E.G. 1973. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite en gibbsite. *Soil Sci.*, 116:400-406.
- KWONG, K.F. Ngkee., & HUANG, P.M. 1979. Surface reactivity of aluminium hydroxides precipitated in the presence of low molecular weight organic acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:1107-1113.
- LAKER, M.C. 1964. Die invloed van kalk- en fosfaattoedienings op die opname van sink en fosfaat deur plante. Stellenbosch : US. (M.Sc.Agric.-verhandeling.)
- LAKER, M.C. 1967. Effect of previous applications of lime and zinc on the subsequent uptake of phosphorous and fertilizer zinc by rye plants in a pot experiment. *S. Afr. J. Agric. Sci.*, 10:11-18.
- LARSEN, S. 1952. The use of phosphorous³² in studies on die uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil*, 4:1-10.
- LARSEN, S. 1967. Soil phosphorus. *Adv. in Agron.*, 19:151-210.

LEAVER, J.P. & RUSSEL, E.W. 1957. The reaction between phosphate and phosphate fixing soils. *J. Soil Sci.*, 8:113-126.

LE MARE, P.H. 1960. Observations on the phosphate potential of some tropical soils. (*In* Trans. 7th. Int. Congr. soil sci. Madison, Wisc. p: 600-603.)

LE MARE, P.H. 1982. Sorption of isotopically exchangeable and nonexchangeable phosphate by some soils of Colombia and Brazil, and comparisons with soils of Southern Nigeria. *J. Soil Sci.*, 33:691-707.

LE MARE, P.H. & LEON, L.A. 1989. The effects of lime on adsorption and desorption of phosphate in five Colombian soils. *J. Soil Sci.*, 40:59-69.

LIN, C., BUSSCHER, W.J. & DOUGLAS, L.A. 1983. Multifactor kinetics of phosphate reactions with minerals in acidic soils. I. Modelling and simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1097-1103.

LINDSAY, W.L., LEHR, J.R. & STEPHENSON, H.F. 1959. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils. III. Studies with metastable triple-point solution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23:342-345.

LINDSAY, W.L. 1976. Chemical equilibria in soils. New York : Wiley & Sons.

- LOGANATHAN, P., ISIRIMAH, N.O. & NWACHUKU, D.A. 1987. Phosphorus sorption by ultisols and inceptisols of the Niger delta in southern Nigeria. *Soil Sci.*, 144:330-338.
- LOW, P.F & BLACK, C.A. 1950. Reactions of phosphate with kaolinite. *Soil Sci.*, 70:273-290.
- MACVICAR, C.N., LOXTON, R.F., LAMBRECHTS, J.J.N., LE ROUX, J., DE VILLIERS, J.M., VERSTER, E., MERRYWEATHER, F.R., VAN ROOYEN, T.H., & HARMSE, H.J. VON M. 1977. Grondklassifikasie, 'n binomiese sisteem vir Suid-Afrika. Pretoria : Dept. Landboutegniese Dienste.
- MARAIS, P.G. 1955. A study of phosphate exchange reactions in soil in relation to plant nutrition. Oxford : University of Oxford . (D.Phil. thesis.).
- MARAIS, P.G., DEIST, J. & HEYNS, C.F.G. 1969. Correction for seedborne phosphate in the determination of labile soil phosphate. *Agrochemophysic*, 1:99-104.
- MARTIN, R.R., SMART, R.St.C. & TAZAKI, Q. 1988. Direct observations of phosphate precipitation in the goethite/phosphate system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1492-1500.
- MATTINGLEY, G.E.G. & TALIBUDEEN, O. 1960. Isotopic exchange of phosphate in soil. *Rep. Rothamstead Exp. Sta.*: 246-265.

McGEE, P.A.E. 1972. Phosphate adsorption in sesquioxenic Transvaal soils. Pietermaritzburg : University of Natal. (M.Sc. dissertation.)

McGEE, P.A.E., DE VILLIERS, J.M. & ORCHARD, E.R. 1972. Phosphate adsorption and crop growth in sesquioxenic soils from the Transvaal. (Paper delivered at 4th Nat. Congr. of S.A. Soil Sci. Soc. of S.A. Pietermaritzburg, June 1972.)

MEAD, J.A. 1981. A comparison of the L, F, and T equations to describe phosphate adsorption properties of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 19:333-342.

MEHADI, A.A. & TAYLOR, R.W. 1988. Phosphate adsorption by two highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:627-632.

MEYER, J.H. 1978. Predicting the phosphorus requirement of sesquioxenic soils in the South African Sugar Industry (*In Proc. 8 th Nat. Cong. Soil Sci. Soc. S.A. Pietermaritzburg. 1978. p. 129-135.*)

MISSTOFVERENIGING VAN SUID-AFRIKA. 1986. Bemestingshandleiding. Tweede hersiene uitgawe. Pretoria : MVSA.

MIZOTA, C., CARRASCO, M.A. & WADA, K. 1982. Clay mineralogy and some chemical properties of Ap horizons of Ando soils used for paddy rice in Japan. *Geoderma*, 27:225-237.

- MOHR, P.J. 1975. Optimum soil P levels for series of the Avalon and Hutton forms. (*In Proc. 6 th Nat. Cong. Soil Sci. Soc. S. A. Blyderivier. 2-4 July 1975. p. 42- 47.*)
- MOLLER, J. & MOGENSON, T. 1953. Use of an ion exchanger for determining the available phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 76:297-306.
- MOREL, F.M.M., YEASTED, J.G. & WESTALL, J.C. 1981. Adsorption models: A mathematical analysis in the framework of general equilibrium calculations. (*In Anderson, M.A. & Rubin, A.J. eds., Adsorption of inorganics at solid-liquid interfaces. Ann Arbor, Michigan : Ann Arbor Sci. Pub. pp. 263-294.*)
- MULJADI, D., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. 1966. I, II, III. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. *J. Soil Sci.*, 17:212-247.
- MULLER, HELEEN. 1989. Hoofkomponent-analise na aanleiding van 'n grondkundige probleem. (Referaat gelewer op statistiese konferensie in September 1989. LNR, Pretoria. Afd. Agrimetrie), (Ongepubliseer.)
- MURIBU, D.N. & KARATHANASIS, A.D. 1994. Phosphorus-sorption characteristics of intensely weathered soils in south-central Kentucky. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25 (15916):2745-2759.

- MURRMAN, R.P. & PEECH, M. 1969. Relative significance of labile and crystalline phosphates in soil. *Soil Sci.*, 107: 249-255.
- NAGARAJAH, S., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. 1968. Desorption of phosphate from kaolinite by citrate and bicarbonate. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32:507-510.
- NAIDU, R., SYERS, J.K., TILLMAN, R.W. & KIRKMAN, J.H. 1990. Effect of liming on phosphate sorption by acid soils. *J. Soil Sci.*, 41:165-175.
- NANZYU, M. 1986. Infrared spectra of phosphate sorbed on iron hydroxide gel and the sorption products. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32:51-58.
- NON-AFFILIATED SOIL ANALYSIS WORK COMMITTEE. 1990. Handbook of standard soil testing methods for advisory purposes. Sunnyside : Soil Sci. Soc. of S.A.
- OERTLI, J.J. 1973. The use of chemical potentials to express nutrient availabilities. *Geoderma*, 9:81-95.
- OLSEN, S.R. & KHASAWNEH, F.E. 1980. Use and limitations of physical-chemical criteria of assessing the status of phosphorus in soils. (*In* Khasawneh, F.E., Sample, E.C. & Kamprath, E.J. eds., The role of phosphorus in agriculture. Madison, Wisconsin : Soil Sci. Soc. Am. pp. 361-410.)

OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. 1967. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils measured by the Langmuir isotherm. *Soil Sci. Soc. Amr. Proc.*, 21:144-149.

OZANNE, P.G. & SHAW, T.C. 1968. Advantages of the recently developed phosphate sorption test over the older extractant methods for soil phosphate. (*In Trans. 9 th Int. Congr. Soil Sci.*, 2. Melbourne 1968. p. 273-280.)

PARFITT, R.L. 1978. Anion adsorption by soils and soil materials. *Adv. Agron.*, 30:1-50.

POLYZOPOULOS, N.A., KERAMIDAS, V.Z. & KIOSSE, H. 1985. Phosphate sorption by some alfisols of Greece as described by commonly used isotherms. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:81-84.

POSNER, A.M. & BARROW, N.J. 1982. Simplification of a model for ion adsorption on oxide surfaces. *J. Soil Sci.*, 33:211-217.

PRETORIUS, MARDEL. 1991. 'n Vergelyking van verskillende metodes vir die ekstraksie en bepaling van fosfor in gronde: Potchefstroom : PU vir CHO. (M.Sc.-verhandeling.)

PROBERT, M.E. & LARSEN, S. 1972. The kinetics of heterogeneous isotopic exchange. *J. of Soil Sci.*, 23 (1):76-81.

- PROBERT, M.E. 1980. Growth responses to various calcium sources in a yellow earth soil with low calcium status. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.*, 20:240-246.
- RAMA MOORTHY, B. & SUBRAMANIAN, T.R. 1960. Phosphate potential and phosphate ion activity in soils with special reference to phosphate availability. (*In Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 7th. Madison Wisc. 3:590-599.)
- RAM, M., PRASAD, R.N. & RAM, P. 1987. Studies on phosphate adsorption and phosphate fixation in alfisols and entisols occurring in different altitudes of Meghalaya. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 35:207-216.
- RAM, P. & RAI, R.N. 1987. Effect of liming on phosphate potential and solubility in acid soils of Sikkim. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 5: 369-374.
- RAO, A.S., HASAN, R. & GHOSH, A.B. 1983. Phosphate adsorption behavior under continuous cropping and fertilizer use in an alluvial soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 31:606-607.
- RAUPACH, M. & PIPER, C.S. 1959. Interactions of silicate and phosphate in a lateritic soil. *Austr. J. Agric. Res.*, 10:818-831.
- REEVE, N.G. & SUMNER, M.E. 1970. Effects of aluminium toxicity and phosphorous fixation on crop growth and oxisols in Natal. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 34:63-267.

- ROY, A.C. & DE DATTA, S.K. 1985. Phosphate sorption isotherms for evaluating phosphorus requirement of wetland rice soils. *Plant and Soil*, 86:185-196.
- RUSSELL, E.J. & PRESCOTT, J.A. 1916. The reaction between dilute acids and the phosphorus compounds of the soil. *J. Agric. Sci.*, 8:65-110.
- RUSSELL, J.S., KAMPRATH, E.J. ANDREW, C.S. 1988. Phosphorus sorption of subtropical acid soils as influenced by the nature of the cation suite. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1407-1410.
- RYDEN, J.C., McLAUGHLIN, J.R. & SYERS, J.K. 1977. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.*, 28:72-92.
- RYDEN, J.C. & PRATT, P.F. 1980. Phosphorus removal from wastewater applied to land. *Hilgardia*, 48:1-36.
- RYDEN, J.C., SYERS, J.K. & TILLMAN, R.W. 1987. Inorganic anion sorption and interactions with phosphate sorption by hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.*, 38:211-217.
- SANCHEZ, P.A. & UEHARA, G. 1980. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. (In Khasawneh, F.E., Sample, E.C. & Kamprath, R.J. eds., The role of phosphorus in agriculture. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison Wisconsin : pp. 471-514.)

- SANYAL, S.K., CHAN, P.Y. & DE DATTA, S.K. 1990. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils in South and Southeast Asia. (Paper presented at the 6th Philippine Chemistry Congress. Cebu City, Philippine. 24-26 May, 1990.)
- SANYAL, S.K. & DE DATTA, S.K. 1991. Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Adv. in Soil Sci.*, 16:1-120.
- SHELL, W.R. & JORDAN, J.V. 1959. Anion exchange studies on pure clays. *Plant and Soil*, 10:303-318.
- SCHOFIELD, R.K. 1947. A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. (*In Proc. 11th. Int. Congr. Pure. Appl. Chem.* 3:257-261.)
- SCHOFIELD, R.K. 1955. Can a precise meaning be given to "available" phosphorus? *Soils en Fert.*, 18:373-375.
- SHAVIV, A. & SACHAR, H. 1989. A kinetic-mechanistic model of phosphorus sorption in calcareous soils. *Soil Sci.*, 148:172-178.
- SIBANDA, H.M. & YOUNG, S.D. 1986. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *J. Soil Sci.*, 37:197-204.
- SILLIN, L.G. & MARTELL, A.E. 1964. *Chem. Soc. London, Spec. Publ.* 17.

SIMS, T.J. & ELLIS, B.G. 1983a. Adsorption and availability of phosphorus following the application of limestone to an acid, aluminous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:888-893.

SIMS, T.J. & ELLIS, B.G. 1983b. Changes in phosphorus adsorption associated with aging of aluminium hydroxide suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:912-916.

SINGH, B.B. & TABATABAI, M.A. 1977. Effects of soil properties on phosphate sorption. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 8:97-107.

SMILLIE, G.W., CURTIN, D. & SYERS, J.K. 1987. Influence of exchangeable calcium on phosphate retention by weakly acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1169-1172.

SNYMAN, H.G. & FöLCHER, W.J. 1966. 'n Evaluering van fosforekstraksiemetodes vir gronde onder tabakverbouing. *S. Afr. Tydskr. Landbouwet.*, 9:391-406.

SNYMAN, P.J. 1994. Grondkundige Vrystaatstreek. Dept. Landbou. RSA. Persoonlike mededeling, Bloemfontein Desember 1994.

SOLIS, P. & TORRENT, J. 1989. Phosphate sorption by calcareous vertisols and inceptisols of Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:456-459.

SPOSITO, G. 1982. On the use of the Langmuir equation in the interpretation of "adsorption" phenomena. II. The "two-surface" Langmuir equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1147-1152.

SPOSITO, G. 1984. The surface chemistry of soils. Oxford : Clarendon Press.

STOUT, P.R. 1959. Alterations in the crystal structure of clay minerals as a result of phosphate fixation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 4:177-182.

STUMM, W., KUMMERT, R. & SIGG, L. 1980. A ligand-exchange model of the adsorption of inorganic and organic ligands at hydrous oxide interfaces. *Croat. Chem. Acta*, 53:291-312.

SYERS, J.K., BROWMAN, M.G., SMILLIE, G.W. & COREY, R.B. 1973. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:358-363.

SYERS, J.K. & RU-KUN, L. 1989. Inorganic reactions influencing phosphorus cycling. (Paper presented at the Symposium on Phosphorus Requirements of Sustainable Agriculture in Asia and Oceania. 6-10 March 1989. International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Philippines.)

TALIBUDEEN, O. 1974. The nutrient potential of soils. *Soils Ferts.*, 37:41-45.

TAYLOR, A.W. & GURNEY, E.L. 1965. The effect of lime on the phosphate potential and resin-extractable phosphate in five acid soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29:482-483.

- THOMPSON, G.R. 1978. A correlation study between soil P-extractions and field data obtained from different crops. (Paper delivered at the 8th. Nat. Congr. Soil Sci. Soc. S. A.) Pietermaritzburg.
- TORRENT, J. 1987. Rapid and slow phosphate sorption by Mediterranean soils: Effect of iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:78-82.
- VAN DER MERWE, A.J. 1980. 'n Evaluering van fosforekstraksiemetodes vir Suid-Afrikaanse gronde met die oog op standaardisering. (*In. Hand. 9de Nas. Kongr. Grondk. Ver. S.A. Pretoria. p. 70-78.*)
- VAN DER MERWE, A.J., JOHNSON, JEANNE, C. & RAS, L.S.K. 1984. An NH_4HCO_3 - NH_4F - (NH_4) , EDTA-method for the determination of extractable P, K, Ca, Mg, Fe, Mn and Zn in soils. *SIRI Information Bulletin*, B2/2.
- VAN DER WALT, O.J. 1976. Reaksiekinetika van P-sorpsie in grond. Potchefstroom : PU vir CHO. (M.Sc.-verhandeling.)
- VIG, A.C. & DEV, G. 1984. Phosphorus adsorption characteristics of some acid and alkaline soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 32:235-239.
- VIJAYACHANDRAN, P.J. & HARTER, R.D. 1975. Evaluation of phosphorus adsorption by a cross section of soil types. *Soil Sci.*, 119 (2):119-126.

WADA, K., XUE-YUAN, L. & MOODY, P.W. 1989. Chemistry of adverse upland soils.

(Paper presented at the Symp. on Phosphorus Requirements for Sustainable Agriculture in Asia and Oceania. 6-10 March 1989., International Rice Research Institute, Los Banos, Laguana, Philippines.)

WEBBER, M.D. 1978. Effects of temperature and time on hydroxy aluminium phosphate. *Soil Sci.*, 125:107-114.

WHITE, R.E. 1964. Studies on the phosphate potentials of soils. Part II - Microbial effects. *Plant and Soil*, 20:184-193.

WHITE, R.E. & BECKETT, P.H.T. 1964. Studies on the phosphate potential of soils. Part I. The measurement of phosphate potential. *Plant and Soil*, 20:1-16.

WHITE, R.E. & TAYLOR, A.W. 1977. Effect of pH on phosphate adsorption and isotopic exchange in acid soils at low and high additions of soluble phosphate. *J. Soil Sci.*, 28:48-61.

WILD, A. 1950. The reaction of phosphate in soil. A review. *J. Soil Sci.*, 1:221-238.

WILD, A. 1964. Soluble phosphate in soil and uptake by plants. *Nature*, 203:326-327.

WRIGHT, B.C. & PEECH, M. 1960. Characterisation of phosphate reaction products in acid soils by the application of solubility criteria. *Soil Sci.*, 90:32-43.

YUAN, T. 1980. Adsorption of phosphate and water-extractable soil organic material by synthetic aluminium silicates and soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:951-955.

YUAN, G. & LAVKULICH, L.M. 1994. Phosphate sorption in relation to extractable iron and aluminium in spodosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:343-346.

BYLAES

VLAE A : Grondeienskappe wat ondersoek is as faktore wat die aard en omvang van fosforvaslegging in grond beïnvloed

Mon-ster nr	Grow-we sand %	Me-dium sand %	Fyn sand %	Slik %	Klei %	Na, cmol _c /kg grond	K, cmol _c /kg grond	Ca, cmol _c /kg grond	Mg, cmol _c /kg grond	S- waar- de cmol _c /kg grond	T- waar- de cmol _c /kg grond	pH H ₂ O	pH Ca- Cl ₂	R Ohm	C %	KCl ekst Al cmol _c /kg	Titre- suur- heid cmol _c /kg grond
2365	4.1	20.2	53.0	3.7	15.5	0.1	0.1	0.8	1.0	2.0	3.6	5.6	4.8	2400	0.7	0.0	1.6
2367	4.5	19.3	53.8	1.8	18.1	0.0	0.1	0.8	0.4	1.3	3.8	5.3	4.5	6600	0.5	0.6	2.5
2369	0.5	13.5	72.9	2.2	8.0	0.1	0.1	0.6	0.5	1.3	2.4	5.5	4.7	4200	0.2	0.1	1.1
2379	6.9	31.7	37.9	5.7	16.6	0.1	0.2	3.0	1.3	4.6	4.7	5.4	5.8	1000	0.7	0.0	0.1
2536	6.9	27.7	47.9	2.8	12.6	0.0	0.3	0.9	0.5	1.7	4.5	5.8	4.8	4200	0.4	0.1	2.8
3492	1.2	8.4	69.8	1.9	18.2	0.1	0.3	2.4	2.1	4.9	5.4	6.2	6.7	1400	0.2	0.0	0.5
3507	1.6	15.9	65.5	3.1	14.4	0.1	0.1	2.4	1.1	3.7	4.3	6.0	5.8	1700	0.2	0.0	0.6
3511	2.8	10.7	55.2	2.4	30.5	0.2	0.3	9.3	2.6	12.4	12.6	6.9	6.5	600	0.5	0.0	0.2
3659	0.1	10.0	77.6	2.5	7.1	0.1	0.1	0.9	0.1	1.2	3.3	5.3	4.6	5600	0.2	0.2	2.1
3661	0.1	3.7	70.5	5.9	17.9	0.1	0.2	2.4	1.2	3.9	6.2	6.2	5.2	2400	0.3	0.0	2.3
3705	0.0	3.2	57.9	3.2	35.2	0.3	0.2	3.1	1.8	5.4	7.8	5.9	4.7	3700	0.5	0.3	2.4
3721	2.8	7.0	52.8	5.1	31.5	0.0	0.3	2.5	2.0	4.8	6.9	5.8	5.1	3600	0.4	0.1	2.1
3727	3.1	22.6	56.5	1.7	15.9	0.0	0.3	1.4	1.7	3.4	5.6	6.3	5.7	3400	0.2	0.0	2.2
3730	1.2	30.5	57.9	0.3	9.8	0.0	0.4	0.8	1.2	2.4	3.6	7.4	6.4	4000	0.1	0.0	1.2
3736	43.3	30.3	22.0	1.7	2.9	0.1	0.4	1.4	1.7	3.6	5.4	6.5	6.1	2100	0.2	0.0	1.8
4071	4.7	14.0	39.3	8.2	34.4	0.0	0.4	0.6	1.0	2.0	6.1	5.5	4.7	3700	0.4	0.0	4.1
4077	5.7	16.8	44.6	3.6	29.5	0.0	0.5	2.7	1.2	4.4	6.6	6.0	5.4	1200	0.7	0.0	2.2
4088	6.1	17.8	37.8	5.2	31.6	0.1	0.2	4.1	1.8	6.2	8.7	6.1	5.0	1900	0.6	0.0	2.5
4101	8.6	18.8	22.8	8.8	37.9	0.1	0.2	2.3	2.0	4.6	8.3	6.1	5.4	1300	0.7	0.0	3.7
4145	2.7	34.2	61.4	1.3	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	6.1	4.9	1200	0.1	0.0	0.4
4151	3.5	8.5	72.4	1.5	13.2	0.1	0.2	1.6	1.0	2.9	3.2	7.4	6.6	2000	0.2	0.0	0.3
4153	8.5	21.9	42.3	7.1	21.8	0.1	0.4	4.6	1.9	7.0	8.3	6.7	6.1	800	0.3	0.0	1.3
4159	11.5	8.8	60.9	5.6	14.6	0.0	0.2	2.1	1.1	3.4	4.0	6.1	5.5	2200	0.1	0.0	0.6
4162	7.6	7.7	64.2	4.6	17.1	0.0	0.1	1.6	1.4	3.1	4.4	6.3	5.5	3200	0.1	0.0	1.3
4164	6.6	9.3	61.8	4.7	17.2	0.0	0.4	1.9	1.4	3.7	5.9	6.4	5.8	1800	0.3	0.0	2.2
4168	11.1	8.1	59.6	4.1	16.3	0.0	0.2	1.5	1.0	2.7	4.5	6.5	5.8	2200	0.2	0.0	1.8
4170	2.9	5.1	68.8	3.0	20.2	0.0	0.4	1.6	1.3	3.3	4.0	6.2	5.4	1000	0.2	0.0	0.7
4173	3.1	6.1	52.4	7.7	31.2	0.0	0.6	6.4	2.6	9.6	10.5	7.9	6.4	800	0.4	0.3	0.6
4176	7.1	10.8	60.4	6.8	16.6	0.1	0.5	3.2	1.3	5.1	5.7	7.3	6.3	1400	0.2	0.0	0.6
4179	15.3	21.7	48.0	4.9	11.0	0.0	0.1	1.0	0.4	1.5	3.3	6.4	5.5	4000	0.1	0.0	1.8
4183	2.5	32.5	46.9	4.2	15.0	0.4	1.6	1.2	1.1	3.3	5.1	6.7	5.8	860	0.2	0.0	1.8
4185	2.8	15.0	61.0	2.7	20.7	0.0	0.5	2.3	1.7	4.5	5.3	6.4	5.6	1400	0.3	0.0	0.8
4187	0.9	18.2	56.0	2.3	24.1	0.1	0.1	4.1	2.3	6.6	7.4	6.3	5.6	1800	0.3	0.0	0.8
4194	30.7	4.8	52.7	1.1	6.2	0.0	0.2	0.8	1.3	2.3	2.3	6.5	5.7	3200	0.1	0.0	0.0
4196	10.7	14.3	55.9	7.7	11.1	0.0	0.1	1.5	0.5	2.1	3.0	6.5	5.8	4500	0.2	0.0	1.8
4202	13.6	10.4	55.9	3.3	16.4	0.0	0.1	1.0	0.5	1.6	3.6	6.0	5.6	4400	0.2	0.0	2.0
4204	3.3	4.6	59.5	5.6	26.6	0.0	0.1	1.2	1.1	2.4	5.0	5.9	5.5	4200	0.2	0.0	2.6
4321	0.9	8.2	68.7	1.4	20.7	0.0	0.6	3.2	2.4	6.2	7.8	6.3	5.4	900	0.3	0.0	1.6
4324	10.1	18.2	63.4	2.1	9.7	0.0	0.5	1.7	0.8	3.0	4.4	6.3	5.0	4000	0.2	0.0	1.4
4351	6.8	21.7	43.3	2.0	20.3	0.0	0.1	1.0	0.8	1.9	3.6	5.3	5.4	2600	0.4	0.0	1.7
4373	18.9	25.3	41.4	3.1	11.2	0.0	0.0	0.2	0.1	0.3	1.7	5.0	4.2	3000	0.1	0.2	1.4
4376	28.9	19.4	28.4	4.1	18.0	0.0	0.0	0.8	0.8	1.6	4.0	5.4	4.6	9000	0.3	0.0	2.4
4387	8.3	22.5	40.5	6.9	20.1	0.1	0.2	0.7	0.3	1.3	3.0	5.3	4.3	1000	0.1	0.1	1.7
4392	16.7	18.3	48.1	1.0	18.0	0.1	0.0	1.1	0.7	1.9	2.7	5.8	5.1	3900	0.3	0.0	0.8
4394	12.6	17.4	48.3	5.1	18.9	0.1	0.2	1.3	0.8	2.4	4.8	5.8	5.1	3700	0.3	0.0	2.4
4396	18.9	21.1	33.6	4.1	21.5	0.0	0.2	0.8	0.6	1.6	5.4	5.3	5.2	1000	0.2	0.0	3.8
4401	12.3	14.7	39.0	5.4	24.9	0.1	0.0	3.7	1.9	5.7	7.3	6.2	5.4	2700	0.4	0.0	1.6
5166	2.2	45.5	40.4	4.4	8.5	0.0	0.0	1.0	0.8	1.8	3.2	6.0	5.2	4100	0.1	0.0	1.4
5169	2.1	23.3	44.9	4.6	25.3	0.1	0.1	3.1	5.2	8.5	9.4	6.6	5.8	1400	0.3	0.0	0.9
5173	15.2	18.8	43.2	7.9	14.4	0.1	0.0	0.8	0.5	1.4	3.0	5.8	5.0	5800	0.2	0.0	1.6

BYLAE B: Yster-, mangaan- en aluminiumoksiede as addisionele faktore wat die aard en omvang van fosfaatvaslegging in grond beïnvloed

Monster nr	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₂ mg kg ⁻¹	Al ₂ O ₃ %	Monster nr	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₂ mg kg ⁻¹	Al ₂ O ₃ %
2365	1.4	143	0.18	4164	1.2	292	9.13
2367	1.3	95	0.27	4168	1.1	222	0.09
2369	0.6	31	0.13	4170	0.9	193	0.10
2379	1.2	109	0.18	4173	1.2	230	0.13
2536	0.7	30	0.14	4176	1.2	223	0.12
3492	1.6	274	0.13	4179	0.8	208	0.05
3507	0.6	48	0.10	4183	1.0	74	0.15
3511	1.0	312	0.19	4185	0.8	150	0.11
3659	0.4	33	0.12	4187	0.8	212	0.12
3661	0.9	72	0.19	4194	0.5	46	0.04
3705	1.2	58	0.13	4196	2.2	4725	0.16
3721	1.1	663	0.17	4202	1.1	264	0.11
3727	1.2	230	0.13	4321	0.8	194	0.11
3730	0.7	115	0.12	4324	0.7	415	0.10
3736	0.8	165	0.13	4351	2.9	850	0.23
4038	2.4	749	0.10	4373	1.3	139	0.08
4071	3.8	414	0.30	4376	1.6	300	0.25
4077	2.4	393	0.20	4387	3.1	1915	0.20
4101	5.1	1134	1.35	4392	1.0	457	0.11
4104	2.0	724	0.12	4394	1.0	423	0.10
4145	0.2	25	0.07	4396	2.6	4555	0.19
4151	0.9	129	0.12	4401	1.8	456	0.19
4153	1.5	143	0.21	5166	1.5	159	0.10
4159	1.04	386	0.45	5169	2.9	630	0.12
4162	1.0	231	0.13	5173	3.3	449	0.43

BYLAE C : Ambic ekstraheerbare P in grond in mg kg⁻¹ teenwoordig
na verskillende inkubasieperiodes met 'n P-oplossing

Monst. nr	Dag 1	Dag 2	Dag 4	Dag 7	Dag 11	Dag 18	Dag 25	Dag 39	Dag 53	Dag 67
2365	57.6	58.3	54.9	49.1	47.9	43.9	45.0	43.1	41.6	40.9
2367	49.6	52.4	48.3	42.0	42.8	36.7	37.0	36.1	37.5	35.8
2369	65.2	60.4	60.5	53.8	54.3	48.0	51.8	49.5	48.4	48.4
2379	57.6	52.9	51.0	46.0	44.2	38.0	38.2	35.6	37.5	33.0
2536	63.0	61.3	63.1	61.0	55.5	53.7	54.4	50.3	47.7	47.6
3492	69.9	51.2	47.7	43.4	40.6	36.0	35.7	33.2	33.6	30.7
3507	64.2	62.3	58.9	52.7	51.9	46.2	43.5	45.9	45.2	42.8
3511	55.5	56.3	51.4	47.7	45.0	38.2	41.9	38.3	36.8	34.9
3659	62.9	63.7	61.8	61.7	55.8	51.8	54.8	51.4	46.3	49.4
3661	53.5	54.7	48.3	45.7	40.5	35.4	35.3	38.1	33.8	31.5
3705	35.2	33.4	28.4	31.7	25.2	22.6	28.2	24.7	22.0	20.7
3721	46.8	44.8	42.4	38.9	35.4	31.2	32.6	31.3	28.6	26.2
3727	63.7	60.0	49.2	53.4	51.2	43.0	47.4	45.1	44.9	38.9
3730	65.2	62.8	56.9	56.2	51.9	45.6	51.2	47.1	34.2	41.1
3736	64.9	64.3	58.8	55.5	51.7	44.1	50.0	48.1	46.9	41.7
4038	48.7	48.5	50.0	45.9	42.0	43.9	39.4	36.1	34.4	28.8
4071	39.8	37.9	38.8	34.5	31.4	31.0	24.9	23.4	27.4	23.3
4077	47.4	45.3	46.5	43.2	39.9	38.2	36.0	31.9	30.8	25.3
4101	32.3	27.9	29.4	27.1	21.2	22.5	21.3	16.1	15.0	12.8
4145	80.7	79.6	80.3	79.1	74.3	69.3	73.7	71.4	74.3	66.6
4151	56.2	60.4	56.9	53.1	51.3	44.9	46.3	43.2	41.0	36.0
4153	47.1	45.5	41.1	38.6	32.0	31.9	33.5	30.9	31.0	26.4
4159	63.5	57.3	60.0	56.0	49.0	46.8	42.1	43.1	42.7	39.0
4162	58.0	52.3	53.7	49.4	44.8	42.6	42.4	38.6	32.2	34.7
4164	57.7	54.2	51.4	48.1	43.4	42.2	41.8	36.1	38.5	32.3
4168	61.9	58.6	57.6	60.3	48.4	44.8	42.1	43.4	41.1	38.4
4170	55.5	51.6	53.6	47.6	47.6	43.1	43.2	37.4	36.3	31.4
4173	40.9	38.4	36.4	34.5	34.2	31.2	30.5	26.4	28.5	21.8
4176	58.0	54.9	54.6	47.1	45.9	42.1	41.1	38.7	37.3	34.3
4179	69.8	67.1	66.4	64.0	61.6	60.0	58.0	46.4	50.7	45.7
4183	63.2	61.4	58.1	55.0	43.7	39.6	48.6	43.1	44.5	39.9
4185	60.9	57.7	54.1	49.5	51.9	43.3	45.5	42.6	43.1	37.3
4187	55.7	54.5	50.1	49.2	42.7	38.2	42.3	39.9	38.4	34.5
4194	79.0	75.6	72.8	69.9	64.4	62.7	60.7	56.8	59.1	53.1
4196	46.1	43.2	42.3	38.4	34.8	33.8	30.5	24.3	26.7	21.4
4202	59.7	56.6	57.8	52.7	49.0	45.8	46.7	23.2	41.5	33.6
4204	45.8	43.4	45.5	41.1	38.4	36.4	34.2	25.8	30.1	24.1
4321	62.3	58.3	55.7	54.3	49.8	44.1	46.3	43.8	42.3	38.7
4324	69.9	65.0	62.4	61.6	55.5	51.1	54.1	51.9	49.9	42.6
4351	49.7	46.1	43.9	43.0	36.0	32.2	34.7	30.5	30.7	26.2
4373	61.4	60.8	57.6	56.8	52.9	52.9	51.1	42.7	42.5	39.1
4376	45.4	44.1	45.2	39.4	36.5	36.1	36.4	28.6	30.1	24.7
4387	43.9	41.9	42.6	38.2	32.5	32.5	30.9	26.4	25.3	19.1
4392	56.9	61.8	63.8	59.2	54.3	53.8	53.1	45.6	45.9	38.8
4394	65.2	61.5	63.5	59.4	53.7	52.5	51.7	43.9	43.4	41.1
4396	43.8	41.9	42.5	39.0	34.2	32.5	30.5	24.2	26.7	20.1
4401	44.9	41.8	42.2	39.4	36.2	32.4	32.6	25.7	26.7	23.0
5166	63.2	59.4	61.4	58.1	52.5	50.2	50.3	41.5	43.3	35.6
5169	56.6	49.9	52.9	47.9	44.9	42.8	39.4	34.2	35.9	29.4
5173	41.2	38.8	37.5	33.2	29.4	29.1	28.1	22.4	21.5	18.3

BYLAE D: Latfunksie-koëffisiënte van die kromme wat P-sorpsie teenoor die inkubasieperiodes van gronde sonder residuele P aandui.

Monster- nommer	Koëffisiënt				
	B ₀	B ₁	B ₂	r ²	Gemiddelde vierkant residue
2365	47.83	-1.891	-0.132	0.99**	2.146
2367	40.92	-1.873	-0.101	0.89	5.593
2369	52.91	-1.908	-0.091	0.91	4.236
2379	32.47	-2.249	-0.177	0.94	5.576
2536	58.04	-0.878	-0.205	0.92	4.092
3492	39.54	-3.783	-0.154	0.88	21.150
3507	50.34	-2.411	-0.138	0.91	5.712
3511	44.92	-1.997	-0.182	0.92	5.137
3659	57.69	-1.055	-0.188	0.81	7.343
3661	41.39	-2.284	-0.170	0.88	8.086
3705	27.66	-1.088	-0.115	0.72	7.118
3721	36.34	-1.761	-0.175	0.95	2.644
3727	49.59	-1.932	-0.153	0.77	13.770
3730	52.68	-1.971	-0.182	0.90	6.432
3736	52.08	-2.258	-0.155	0.87	8.342
4071	32.09	-1.364	-0.163	0.81	7.611
4088	45.37	-0.711	-0.268	0.95	2.673
4101	24.66	-1.094	-0.212	0.92	3.620
4145	75.70	-0.905	-0.119	0.63	8.920
4151	51.63	-1.278	-0.259	0.92	5.228
4153	35.28	-1.987	-0.132	0.92	3.835
4159	51.02	-1.894	-0.218	0.84	11.770
4162	46.85	-1.636	-0.251	0.92	5.824
4164	45.18	-1.980	-0.205	0.96	2.939
4168	51.72	-1.611	-0.253	0.77	18.370
4170	37.74	-1.189	-0.274	0.96	2.514
4173	34.01	-0.999	-0.184	0.93	2.312
4176	46.10	-2.004	-2.207	0.97	2.161
4179	62.71	-1.080	-0.307	0.90	7.540
4183	38.27	-2.640	-0.132	0.76	19.030
4185	49.15	-1.826	-0.184	0.91	5.019
4187	44.77	-1.859	-0.165	0.88	6.626
4194	66.32	-2.026	-0.219	0.93	4.822
4196	36.41	-1.567	-0.261	0.94	3.987
4202	49.79	-1.680	-0.321	0.63	49.200
4204	39.65	-1.050	-0.271	0.89	6.760
4321	50.50	-1.788	-0.202	0.92	5.141
4324	57.77	-1.755	-0.223	0.89	7.122
4351	38.29	-1.781	-0.204	0.90	6.477
4373	55.23	-1.024	-0.287	0.97	2.694
4376	39.03	-1.177	-0.235	0.93	3.637
4387	36.17	-1.349	-0.276	0.95	3.226
4392	57.67	-1.263	-0.305	0.95	4.248
4394	56.62	-1.382	-0.290	0.93	5.511
4396	36.46	-1.272	-0.275	0.93	5.053
4401	37.14	-1.207	-0.255	0.93	3.832
4977	41.83	-0.917	-0.274	0.97	1.755
5166	55.47	-1.193	-0.329	0.93	6.243
5169	46.17	-1.445	-0.282	0.92	6.075
5173	31.78	-1.548	-0.235	0.98	1.423

$\Sigma r^2 = 45.63$, $\bar{r}^2 = 0.9126$, $T(\text{Bereken}) = 23.4378$, $T(\text{Tabel}) = 2.01$

BYLAE E: Grondeienskappe van monsters met verskillende vlakke van residuele fosfaat

Mon- ster nr	Resid P mg kg ⁻¹	Fyn sand %	Slik %	Klei %	Na cmol _e /kg grond	K cmol _e /kg grond	Ca cmol _e /kg grond	Mg cmol _e /kg grond	S-waarde cmol _e /kg grond	T-waarde cmol _e /kg grond	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	R Ohm	C %	KCl ekst. Alcmol _e /kg grond	Tit. suur cmol _e /kg grond	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₂ mg/kg	Al ₂ O ₃ %
F5702	3.5	48.9	4.0	17.6	0.0	0.34	0.57	0.21	1.12	2.04	4.3	3.8	601	0.54	0.22	0.92	2.30	495	0.22
F5703	6.3	51.9	4.3	21.6	0.0	0.37	0.62	0.26	1.25	2.42	4.4	3.8	620	0.71	0.26	1.17	2.55	559	0.26
F5704	8.0	50.2	4.8	22.7	0.0	0.38	0.78	0.24	1.40	2.43	4.4	3.8	671	0.85	0.29	1.04	2.65	619	0.29
F5705	21.4	52.7	3.1	19.3	0.0	0.36	1.03	0.30	1.69	2.23	4.6	3.9	791	0.70	0.21	0.54	2.48	640	0.21
F5706	8.3	45.0	6.2	27.3	0.0	0.49	1.88	0.39	2.76	3.43	4.6	3.9	491	0.98	0.31	0.67	3.45	735	0.31
F5707	4.5	46.0	3.8	3.8	0.0	0.09	0.09	0.08	0.26	0.85	4.1	3.8	2087	0.24	0.07	0.59	0.42	17	0.07
F5708	11.6	50.8	2.4	4.0	0.0	0.15	0.39	0.13	0.67	0.95	4.6	3.9	2097	0.28	0.07	0.58	0.40	57	0.07
F5709	15.2	50.4	2.4	4.9	0.0	0.14	0.22	0.10	0.46	0.94	4.3	3.8	1037	0.48	0.09	0.49	0.48	59	0.09
F5710	31.0	48.6	2.7	5.4	0.0	0.15	0.24	0.08	0.47	1.04	4.3	3.7	1153	0.57	0.10	0.57	0.51	47	0.10
F5711	90.25	53.0	1.8	6.1	0.0	0.16	0.75	0.14	1.05	1.27	4.6	3.9	720	0.22	1.15	0.22	0.62	122	1.12
F5712	3.2	34.3	9.1	44.9	0.0	0.32	0.69	0.19	1.20	3.23	4.3	3.9	703	2.03	1.56	2.03	5.15	99	1.56
F5713	4.2	38.8	9.4	40.7	0.0	0.48	0.73	0.20	1.41	2.76	4.6	4.0	851	1.35	1.62	1.35	5.25	108	1.62
F5714	5.6	36.5	15.2	35.9	0.0	0.34	0.60	0.14	1.08	2.24	4.6	4.0	1035	1.16	1.75	1.16	5.6	87	1.75
F5715	11.85	31.6	9.1	45.0	0.0	0.54	1.56	0.31	2.41	3.26	4.8	4.1	641	0.85	1.62	0.85	5.0	114	1.62
F5716	24.0	33.5	8.9	43.6	0.0	0.47	0.81	0.21	1.49	2.84	4.6	4.0	706	1.35	1.51	1.35	5.05	106	1.51
G6415	2.68	52.0	2.5	4.9	0.04	0.05	0.2	0.08	0.37	1.11	4.5	3.8	8993	0.25	0.00	0.75	0.61	27	1.09
G6416	4.93	54.2	2.6	4.4	0.02	0.07	1.01	0.24	1.34	1.41	5.6	4.9	1689	0.24	0.00	0.07	0.61	78	0.53
G6417	26.77	55.6	3.0	5.8	0.04	0.08	0.48	0.17	0.78	1.3	4.6	3.8	3246	0.27	0.00	0.56	0.62	122	0.71
G6718	26.12	28.3	1.9	4.1	0.0	0.08	2.07	0.30	2.45	2.51	6.3	5.6	3172	0.54	0.00	0.06	0.64	121	0.65
G6419	61.40	44.2	2.5	5.3	0.0	0.07	0.44	0.12	0.63	1.12	4.6	3.8	4098	0.22	0.02	0.48	0.55	33	0.51
G6420	56.07	34.1	2.1	5.9	0.0	0.13	3.34	0.46	3.93	3.95	6.6	6.59	1804	0.45	0.03	0.03	0.74	204	0.78
G6421	2.17	35.1	9.3	46.5	0.0	0.19	1.34	0.28	1.81	3.04	4.8	4.1	2467	2.35	1.4	1.24	4.45	52	1.39
G6422	1.86	35.5	9.6	44.6	0.0	0.15	6.08	0.79	7.02	7.09	5.9	5.1	1882	2.01	1.3	0.08	5.05	147	1.31
G6423	9.93	34.0	13.5	42.2	0.0	0.35	2.54	0.55	3.44	4.15	4.8	4.2	1527	2.44	1.5	0.72	5.1	113	1.48
G6424	3.57	35.5	11.8	42.3	0.0	0.26	7.67	1.16	9.19	9.17	5.8	5.1	1046	2.38	1.3	0.10	4.85	126	1.26
G6425	14.47	34.8	14.0	39.4	0.0	0.39	3.43	0.77	4.59	4.74	5.3	4.5	1506	2.23	1.4	0.16	4.94	96	1.39
G6426	13.09	34.8	10.4	43.6	0.0	0.43	4.76	0.98	6.17	6.23	5.5	4.8	1492	2.70	1.5	0.08	4.8	92	1.45
G6427	7.82	39.1	19.8	36.2	0.0	0.16	1.54	0.32	2.02	5.85	4.1	3.8	598	2.40	1.2	3.84	4.5	119	1.20
G6428	10.13	12.2	10.5	72.9	0.0	0.30	1.9	0.74	2.94	5.90	4.5	3.8	1763	2.07	0.7	2.97	7.45	367	0.68
G6429	20.99	39.2	8.3	36.5	0.0	0.41	0.61	0.33	1.35	4.78	4.4	3.7	3001	1.04	0.6	3.44	2.33	48	0.63
G6430	54.58	45.5	8.3	7.3	0.01	0.20	0.63	0.25	1.09	2.02	3.5	3.4	600	1.04	2.01	0.93	0.48	7	2.33
G6431	4.68	47.3	3.6	13.3	0.05	0.10	0.63	0.23	1.01	2.20	4.1	3.6	988	0.15	0.1	1.24	0.64	10	0.12
G6432	3.24	46.6	11.4	38.5	0.0	0.22	3.19	1.70	5.11	5.28	5.0	4.4	744	0.48	0.4	0.19	2.40	45	0.40

BYLAE F: *Ambic*-ekstraheerbare P teenwoordig in 33 grondmonsters met residuele P na verskillende inkubasieperiodes met 'n P-oplossing (mg kg⁻¹)

Monst. nr	Resid P	Dag 1	Dag 2	Dag 4	Dag 7	Dag 11	Dag 18	Dag 25	Dag 39	Dag 53	Dag 67
F5702	3.53	57.3	56.0	50.2	50.5	48.4	46.9	44.9	43.20	41.0	41.5
F5703	6.26	53.4	55.1	51.6	51.7	47.3	50.5	45.0	43.8	41.0	43.3
F5704	48.00	59.6	51.6	53.9	51.6	49.8	46.4	46.5	45.1	42.6	46.6
F5705	21.41	79.8	71.2	74.0	72.7	67.9	64.0	68.0	62.5	61.2	66.9
F5706	48.34	98.5	89.5	93.8	86.3	91.1	82.5	87.2	83.0	77.7	83.3
F5707	4.53	82.9	79.4	79.2	76.7	77.0	74.0	74.7	72.5	68.5	70.7
F5708	11.6	90.9	86.2	87.2	84.2	84.8	82.5	82.2	81.0	78.8	81.7
F5709	15.15	92.6	90.7	90.1	89.3	88.4	85.4	87.2	83.4	81.0	86.1
F5710	30.96	104.5	105.4	102.1	91.5	103.8	98.2	99.9	93.5	92.2	90.9
F5711	90.24	143.3	145.0	147.5	141.3	146.2	140.8	141.2	141.7	133.4	133.3
F5712	4.26	24.0	22.6	21.7	22.4	19.5	17.5	18.3	14.9	13.2	13.1
F5713	4.15	24.0	23.0	22.4	20.6	18.1	17.5	17.8	15.0	12.2	13.7
F5714	5.64	25.5	23.4	23.5	21.7	18.8	17.0	18.5	15.9	14.5	14.5
F5715	11.85	34.6	33.5	30.9	28.2	26.3	32.2	27.6	20.9	20.1	20.1
F5716	23.77	47.7	46.1	45.9	44.7	40.7	35.2	40.3	38.2	37.3	36.9
G6415	2.68	75.3	75.8	73.0	73.6	68.2	71.2	73.1	68.5	68.3	70.8
G6416	24.9	95.8	106.4	89.5	98.6	89.3	93.5	78.0	78.6	95.8	97.8
G6417	26.7	115.0	108.0	108.3	109.1	106.0	107.0	105.7	101.2	113.3	109.0
G6418	26.1	108.3	105.3	108.6	104.3	95.5	104.0	106.5	94.6	105.9	107.0
G6419	61.4	161.4	159.9	163.7	163.0	152.1	163.7	168.5	154.1	163.3	167.3
G6420	56.7	153.9	154.2	152.5	150.7	149.2	148.6	153.2	141.6	157.6	151.0
G6421	2.17	19.4	18.1	17.5	16.6	13.5	14.4	14.1	11.8	11.9	12.2
G6422	1.86	19.5	16.8	16.0	14.2	12.0	11.9	11.2	9.2	8.8	9.3
G6423	9.93	32.0	30.1	29.0	28.9	24.5	28.6	27.8	21.8	23.5	24.0
G6424	3.57	24.3	23.3	21.5	17.8	16.6	17.6	16.3	12.5	13.3	14.2
G6425	14.47	40.7	31.9	35.7	36.0	31.9	36.2	34.2	29.7	31.6	31.0
G6426	13.09	32.6	33.0	30.4	28.8	26.8	28.9	28.6	25.0	25.8	26.4
G6427	7.82	24.7	25.5	24.2	23.9	22.0	24.2	22.4	21.0	31.8	22.0
G6428	10.13	31.3	30.3	29.0	29.1	25.3	27.7	25.4	28.1	23.8	24.5
G6429	20.99	65.0	62.8	61.3	61.0	58.4	60.1	57.9	55.1	56.5	57.4
G6430	54.6	101.3	126.8	131.8	130.8	126.8	131.5	135.3	121.5	134.0	131.8
G6431	4.68	72.2	71.0	71.3	69.8	67.2	68.6	68.4	66.2	66.7	72.7
G6432	3.24	33.5	30.2	27.8	25.8	23.5	23.8	23.5	20.30	22.5	20.0

BYLAE G: Latfunksie-koëffisiënte van die kromme wat P-sorpsie teenoor inkubasieperiodes van gronde met residuele P aandui

Monst. nr	B0	B1	B2	r ²	Gemiddelde vierkant residue
F5702	48.95	-1.27	-0.15	0.913	3.53
F5703	49.65	-0.80	-0.15	0.805	6.26
F5704	47.31	-1.65	-0.07	0.461	48.00
F5705	64.48	-2.19	-0.05	0.442	21.41
F5706	84.31	-2.00	-0.09	0.386	48.34
F5707	75.92	-0.10	-0.07	0.697	4.53
F5708	83.81	-0.92	-0.07	0.793	11.61
F5709	88.3	-0.61	-0.09	0.569	15.15
F5710	97.8	-1.31	-0.04	0.325	30.06
F5711	88.50	-0.70	-0.06	0.700	90.24
F5712	20.17	-0.57	-0.12	0.841	4.26
F5713	19.12	-0.84	-0.09	0.840	4.15
F5714	19.68	-0.92	-0.09	0.852	5.64
F5715	28.84	-0.92	-0.14	0.712	11.85
F5716	41.27	-0.09	-0.09	0.705	23.77
G6415	71.36	-0.719	-0.04	0.489	2.68
G6416	90.30	-1.59	-0.04	<0.333	24.9
G6417	105.93	-1.02	-0.05	<0.333	26.7
G6418	101.14	-1.23	-0.07	<0.333	26.1
G6419	159.94	-0.28	-0.08	<0.333	61.4
G6420	149.29	-0.88	-0.04	<0.333	56.7
G6421	15.04	-0.696	-0.06	0.871	2.17
G6422	12.79	-0.10	-0.76	0.930	1.86
G6423	27.45	-0.65	-0.08	0.636	9.93
G6424	17.38	-1.197	-0.08	0.913	3.57
G6425	34.53	-0.822	-0.02	0.697	14.47
G6426	28.32	-0.79	-0.05	0.820	13.09
G6427	23.25	-0.33	-0.03	0.626	7.82
G6428	27.23	-0.637	-0.06	0.796	10.13
G6429	59.35	-0.81	-0.06	0.771	20.99
G6430	131.51	-2.94	0.20	<0.333	44.6
G6431	68.45	-0.62	-0.02	0.587	4.68
G6432	24.52	-1.31	-0.07	0.921	3.24

BYLAE H: Die proefuitleg vir die kwantifisering van die verwantskap tussen B_0 en ΔP (bereken), en B_0 en ΔP (gemeet)

Monster nr	P Bron	Kalk x P behand.	P Konsentrasie mg kg ⁻¹	Residuele P mg kg ⁻¹	Uitr. Al cmol _e /kg	Klei %	B_0 bereken mg/kg	ΔP bereken mg/kg	B_0 gemeet mg/kg	ΔP gemeet mg/kg
1	KH ₂ PO ₄	K1P1	100	5.76	0.56	77	18.55	12.79	23.2	17.44
2		K2P1	100	5.78	4.08	77	-64.32	-69.98	22.5	16.72
3		K1P2	100	47.00	0.00	77	80.44	33.40	69.8	22.80
4		K2P2	100	49.9	0.82	77	64.56	14.66	74.9	25.00
5		K1P1	75	5.76	0.56	77	18.55	12.79	16.9	11.14
6		K2P1	75	5.78	4.08	77	-64.32	-69.98	16.9	10.82
7		K1P2	75	47.00	0.00	77	80.44	33.40	55.6	8.60
8		K2P2	75	49.90	0.82	77	64.56	14.66	61.4	11.50
9		K1P1	50	5.76	0.57	77	18.55	12.79	14.5	8.74
10		K2P1	50	5.78	4.08	77	-64.32	-69.98	14.2	8.42
11		K1P2	50	47.00	0.00	77	80.44	33.4	56.2	9.20
12		K2P2	50	49.00	0.82	77	64.56	14.66	61.8	11.90
13		K1P1	25	5.76	0.56	77	18.55	12.79	11.5	5.74
14		K2P1	25	5.78	4.08	77	-64.32	-69.98	10.5	4.72
15		K1P2	25	47.00	0.00	77	80.44	33.40	50.3	3.3
16		K2P2	25	49.90	0.82	77	64.56	14.66	53.1	3.2
17		K1P2	100	2.93	0.04	42	49.99	47.06	24.73	21.8
18		P2P1	100	4.17	3.00	42	-18.39	-22.56	30.45	26.3
19		K1P2	100	35.04	0.05	42	87.73	52.69	72.1	37.10
20		K2P2	100	41.97	1.51	42	61.46	19.49	86.36	44.40
21		K1P1	75	2.93	0.04	42	49.99	47.06	17.15	14.60
22		K2P1	75	4.17	3.00	42	-18.39	-22.56	22.1	17.90
23		K1P2	75	35.04	0.05	42	87.73	52.69	63.6	28.50
24		K2P2	75	41.97	1.51	42	61.46	19.49	74.5	32.60
25		K1P1	50	2.93	0.04	42	49.99	47.06	12.6	9.70
26		K2P1	50	4.17	3.00	42	-18.39	-22.56	15.5	11.33
27		K1P2	50	35.04	0.05	42	87.73	52.69	55.1	20.10
28		K2P2	50	41.97	1.51	42	61.46	19.49	55.7	13.70
29		K1P1	25	2.93	0.04	42	49.99	47.06	8.1	15.17
30		K2P1	25	4.17	3.00	42	-18.39	-22.56	11.1	6.93
31		K1P2	25	35.04	0.05	42	87.73	52.45	45.7	10.70
32		K2P2	25	41.97	1.51	42	61.46	19.49	44.0	15.30
33		K1P1	100	2.71	0.03	12	69.28	66.57	62.07	59.40

BYLAE H (vervolg)

Monster nr	P Bron	Kalk x P behand.	P Konsen- trasie mg kg ⁻¹	Residuele P mg kg ⁻¹	Uitr. Al cmol _e /kg	Klei %	B ₀ bereken mg/kg	ΔP bereken mg/kg	B ₀ gemeet mg/kg	ΔP gemeet mg/kg
34	KH ₂ PO ₄	K2P1	100	3.56	0.34	12	62.89	59.33	64.96	61.40
35		K1P2	100	51.75	0.01	12	127.67	75.92	127.90	76.20
36		K2P2	100	57.55	0.27	12	128.27	70.72	134.70	77.15
37		K1P1	75	2.71	0.03	12	69.57	66.57	45.40	42.70
38		K2P1	75	3.56	0.34	12	62.89	59.33	46.60	43.00
39		K1P2	75	51.75	0.01	12	127.67	75.92	106.40	54.70
40		K2P2	75	57.55	0.27	12	128.27	70.72	108.00	50.50
41		K1P1	50	2.71	0.03	12	69.28	66.57	30.10	27.40
42		K2P1	50	3.56	0.34	12	62.89	59.33	31.30	27.70
43		K1P2	50	51.75	0.01	12	127.67	75.92	87.20	35.50
44		K2P2	50	57.55	0.27	12	128.27	70.72	92.80	34.50
45		K1P1	25	2.71	0.03	12	69.28	66.57	16.50	13.80
46		K2P1	25	3.56	0.34	12	62.89	59.33	17.80	13.90
47		K1P2	25	57.75	0.01	12	127.67	75.92	70.00	18.30
48		K2P2	25	57.55	0.27	12	128.27	70.72	76.50	19.00
49	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	K1P1	100	5.76	0.56	77	18.55	12.79	19.7	13.90
50		K2P1	100	5.78	4.08	77	-64.32	69.98	20.4	14.6
51		K1P2	100	47.00	0.00	77	80.44	33.44	61.0	14.0
52		K2P2	100	49.90	0.82	77	64.56	14.66	69.55	19.6
53		K1P1	75	5.76	0.56	77	18.55	12.79	17.6	11.8
54		K2P1	75	5.78	4.08	77	-64.32	-69.98	15.5	9.7
55		K1P2	75	47.00	0.00	77	80.44	33.44	60.1	13.1
56		K2P2	75	49.90	0.82	77	64.56	14.66	62.5	12.6
57		K1P1	50	5.76	0.56	77	18.55	12.79	12.1	6.34
58		K2P1	50	5.28	4.08	77	-64.32	-69.98	11.8	6.02
59		K1P2	50	47.00	0.00	77	80.44	33.44	52.0	5.0
60		K2P2	50	49.90	0.82	77	64.56	14.66	54.6	4.7
61		K1P1	25	5.76	0.56	77	18.55	12.79	6.3	0.54
62		K2P1	25	5.78	4.08	77	-64.32	-69.98	6.6	0.82
63		K1P2	25	47.00	0.00	77	80.44	33.44	44.3	-2.7
64		K2P2	25	49.00	0.82	77	64.56	14.66	45.8	-4.1
65		K1P1	100	2.93	0.04	42	49.99	47.06	23.5	20.57
66		K2P1	100	4.17	3.00	42	-18.32	-22.56	29.20	25.2
67		K1P2	100	35.04	0.05	42	87.73	52.69	73.2	38.2
68		K2P2	100	41.97	1.51	42	61.46	19.46	81.4	39.4
69		K1P1	75	2.93	0.04	42	49.99	47.06	16.4	13.5

BYLAE H (vervolg)

Monster nr	P Bron	Kalk x P behand.	P Konsentrasie mg kg ⁻¹	Residuele P mg kg ⁻¹	Uitr. Al cmol/kg	Klei %	B _p bereken mg/kg	ΔP bereken mg/kg	B _p gemeet mg/kg	ΔP gemeet mg/kg
70	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	K2P1	75	4.17	3.00	42	-18.32	-22.56	21.7	17.5
71		K1P2	75	35.04	0.05	42	87.73	52.73	62.7	27.7
72		K2P2	75	41.97	1.51	42	61.46	19.46	71.9	29.9
73		K1P1	50	2.93	0.04	42	49.99	47.06	9.9	7.00
74		K2P1	50	4.17	3.00	42	-18.32	-22.56	14.2	10.03
75		K1P2	50	35.04	0.05	42	87.73	52.69	52.9	17.9
76		K2P2	50	41.97	1.51	42	61.46	19.46	61.4	19.4
77		K1P1	25	2.93	0.04	42	49.99	47.06	5.7	2.8
78		K2P1	25	4.17	3.00	42	-18.32	-22.56	8.5	4.3
79		K1P2	25	35.04	0.05	42	87.73	52.69	39.8	4.8
80		K2P2	25	41.97	1.51	42	61.46	19.46	48.7	6.7
81		K1P1	100	2.71	0.03	12	69.28	66.47	58.3	55.6
82		K2P1	100	3.56	0.34	12	62.89	59.33	62.0	58.4
83		K1P2	100	51.75	0.01	12	127.67	75.92	119.9	62.8
84		K2P2	100	57.55	0.27	12	128.27	70.72	125.0	67.5
85		K1P1	75	2.71	0.03	12	69.28	66.57	44.7	42.0
86		K2P1	75	3.56	0.34	12	62.89	59.33	46.4	42.8
87		K1P2	75	51.75	0.01	12	127.67	75.92	102.0	50.3
88		K2P2	75	57.55	0.27	12	128.27	70.72	101.8	44.3
89		K1P1	50	2.71	0.03	12	69.28	66.57	28.3	25.6
90		K2P1	50	3.56	0.34	12	62.89	59.33	30.3	26.7
91		K1P2	50	51.75	0.01	12	127.67	75.92	86.5	34.8
92		K2P2	50	57.55	0.27	12	128.27	70.72	89.4	31.9
93		K1P1	25	2.71	0.03	12	69.28	66.57	13.8	11.1
94		K2P1	25	3.56	0.34	12	62.89	59.33	15.0	11.4
95		K1P2	25	51.75	0.01	12	127.67	75.92	66.7	15.1
96		K2P2	25	57.55	0.27	12	128.72	70.72	70.1	12.6
97	(NH ₄)-H ₂ PO ₄	K1P1	100	5.76	0.56	77	18.55	12.79	21.3	15.5
98		K2P1	100	5.78	4.08	77	-46.32	-70.1	21.8	16.0
99		K1P2	100	47.00	0.00	77	80.44	33.5	61.7	14.7
100		K2P2	100	49.90	0.82	77	64.56	14.66	72.5	22.6
101		K1P1	75	5.76	0.56	77	18.55	12.79	17.5	11.7
102		K2P1	75	5.78	4.08	77	-64.32	-70.10	16.9	11.1
103		K1P2	75	47.00	0.00	77	80.44	33.40	61.9	14.9
104		K2P2	75	49.90	0.82	77	64.66	14.66	64.3	14.4

BYLAE H (vervolg)

Monster nr	P Bron	Kalk x P behand.	P Konsentrasie mg kg ⁻¹	Residuele P mg kg ⁻¹	Uitr. Al cmol/kg	Klei %	B _e bereken mg/kg	ΔP bereken mg/kg	B _e gemeet mg/kg	ΔP gemeet mg/kg
105	(NH ₄)-H ₂ PO ₄	K1P1	50	5.76	0.56	77	18.55	12.79	13.5	7.7
106		K2P1	50	5.78	4.08	77	-64.32	-70.10	12.9	7.1
107		K1P2	50	47.00	0.00	77	80.44	33.40	50.0	3.0
108		K2P2	50	49.90	0.82	77	64.56	14.66	56.5	6.6
109		K1P1	25	5.76	0.56	77	18.55	12.79	10.0	4.2
110		K2P1	25	5.78	4.08	77	-64.32	-7.10	8.7	2.9
111		K1P2	25	47.00	0.00	77	80.44	33.40	45.6	1.4
112		K2P2	25	49.90	0.82	77	64.56	14.66	49.5	0.4
113		K1P1	100	2.93	0.04	42	49.99	47.06	23.2	20.39
114		K2P1	100	4.17	3.00	42	-18.39	-22.56	30.0	25.8
115		K1P2	100	35.04	0.05	42	87.73	52.69	72.8	37.8
116		K2P2	100	41.97	1.51	42	61.46	19.49	83.8	41.8
117		K1P1	75	2.93	9.04	42	49.99	47.06	16.0	13.1
118		K2P1	75	4.17	3.00	42	-18.39	-22.56	21.6	17.2
119		K1P2	75	35.04	0.05	42	87.73	52.69	63.3	30.3
120		K2P2	75	41.97	1.51	42	61.46	19.49	72.0	30.0
121		K1P1	50	2.93	0.04	42	49.99	47.06	11.0	8.17
122		K2P1	50	4.17	3.00	42	-18.4	-22.56	15.2	11.03
123		K1P2	50	35.04	0.05	42	87.73	52.69	52.3	17.3
124		K2P2	50	41.97	1.51	42	61.46	19.49	61.1	19.3
125		K1P1	25	2.93	0.04	42	49.99	47.06	6.1	3.2
126		K2P1	25	4.17	3.00	42	-18.39	-22.56	9.3	5.13
127		K1P2	25	35.04	0.05	42	87.73	52.69	43.7	8.74
128		K2P2	25	41.97	1.51	42	61.46	19.49	51.2	9.24
129		K1P1	100	2.71	0.03	12	69.28	66.57	63.0	60.3
130		K2P1	100	3.56	0.34	12	62.89	59.33	65.4	61.8
131		K1P2	100	51.75	0.01	12	127.67	75.92	125.3	83.6
132		K2P2	100	57.55	0.27	12	128.27	70.72	135.1	77.6
133		K1P1	75	2.71	0.03	12	69.28	66.57	46.2	43.5
134		K2P1	75	3.56	0.34	12	62.39	59.33	49.0	45.6
135		K1P2	75	51.75	0.01	12	127.67	75.92	106.1	54.4
136		K2P2	75	57.55	0.27	12	128.27	70.72	109.6	52.5
137		K1P1	50	2.71	0.03	12	69.28	66.57	29.6	26.9
138		K2P1	50	3.56	0.34	12	62.89	59.33	33.1	29.5
139		K1P2	50	51.75	0.01	12	127.67	75.92	83.7	32.0

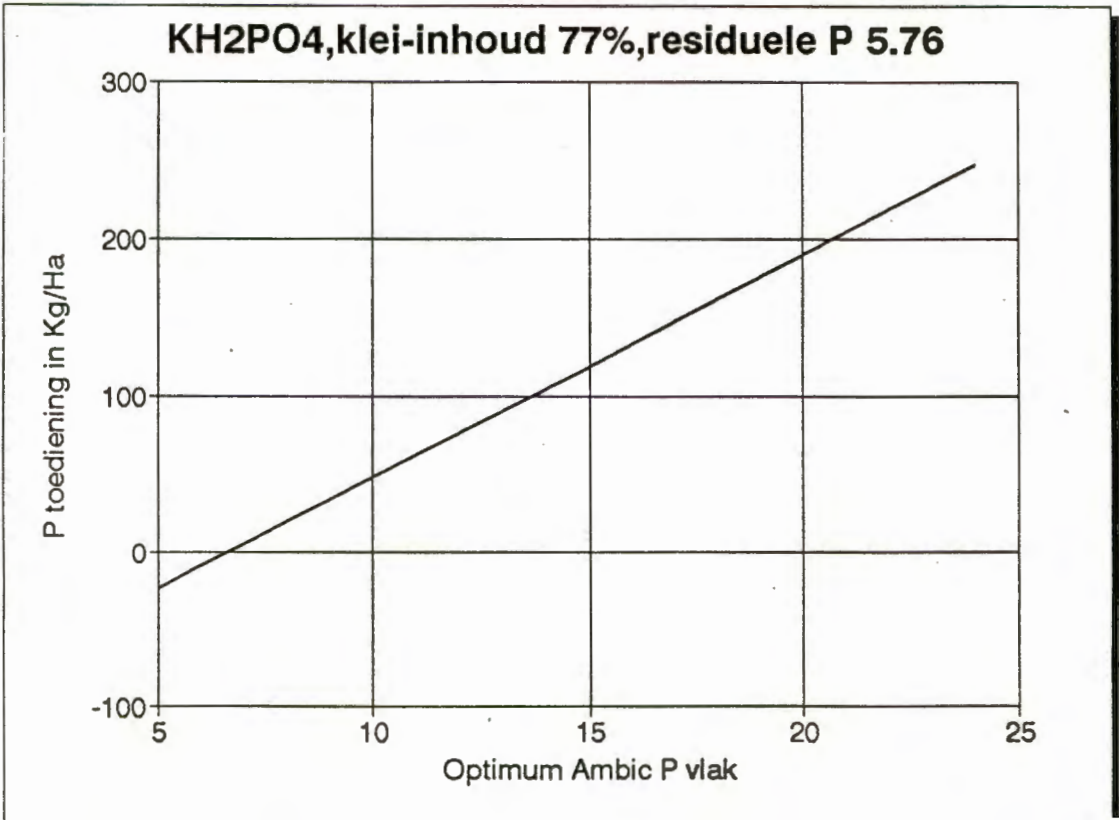
BYLAE H (vervolg)

Monster nr	P Bron	Kalk x P behand.	P Konsentrasie mg kg ⁻¹	Residuele P mg kg ⁻¹	Uitr. Al cmol _e /kg	Klei %	B _p bereken mg/kg	ΔP bereken mg/kg	B _p gemeet mg/kg	ΔP gemeet mg/kg
140	(NH ₄)-H ₂ PO ₄	K2P2	50	57.55	0.27	12	128.27	70.72	92.8	32.3
141		K1P1	25	2.71	0.03	12	69.28	66.57	15.0	12.3
142		K2P1	25	3.56	0.34	12	62.89	59.33	15.7	12.4
143		K1P2	25	51.75	0.01	12	127.7	75.92	68.1	16.4
144		K2P2	25	57.55	9.27	12	128.3	69.72	79.0	21.5

BYLAE I : Toedieningspeile van verskillende kunsmisbronne en fosfaatbehoeftefaktorwaardes vir 'n reeks van B₀-waardes (ambic-ekstraheerbaar) van gronde met verskillende klei- en residuele P-inhoude

KH₂PO₄, Klei-inhoud 77 %, Residuele P, 5.76 mg/kg

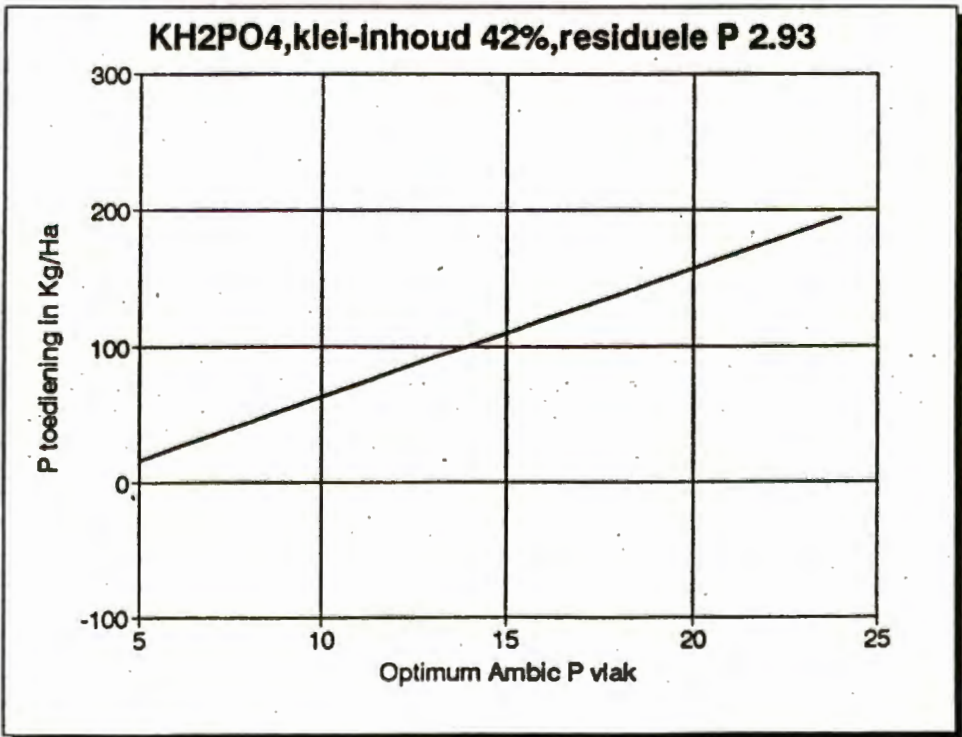
B ₀ mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	-0.76	-10.46	-23.54	30.97
6	0.24	- 4.13	- 9.29	-38.73
7	1.24	2.20	4.95	3.99
8	2.24	8.53	19.19	8.57
9	3.24	14.86	33.43	10.32
10	4.24	21.19	47.68	11.24
11	5.24	27,52	61.92	11.82
12	6.24	33.85	76.16	12.21
13	7.24	40.18	90.40	12.49
14	8.24	46.15	104.65	12.70
15	9.24	52.84	118.89	12.87
16	10.24	59.17	133.13	13.00
17	11.24	65.50	147.37	13.11
18	12.24	71.83	161.62	13.20
19	13.24	78.16	175.86	13.28
20	14.24	84.49	190.10	13.35
21	15.24	90.82	204.34	13.41
22	16.24	97.15	218.59	13.46
23	17.24	103.48	232.83	13.51
24	18.24	109.81	247.07	13.55



BYLAE I : (Vervolg)

KH_2PO_4 , Klei-inhoud 42 %, Residuele P, 2.93 mg/kg

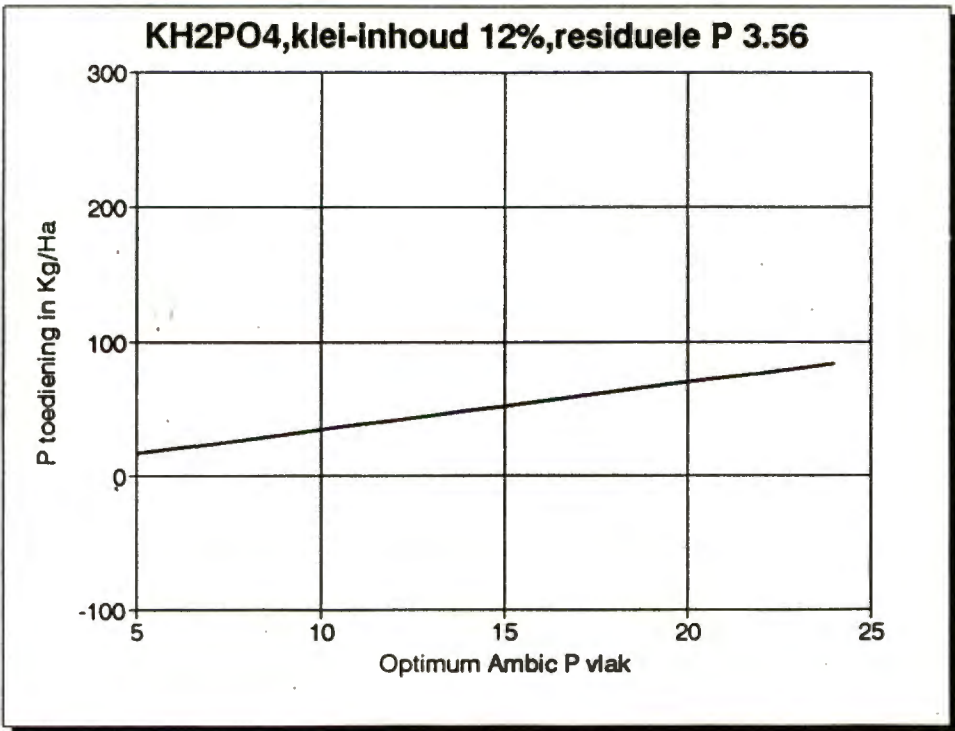
B_0 mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	2.07	7.11	16.00	7.73
6	3.07	11.29	25.41	8.28
7	4.07	15.47	34.81	8.55
8	5.07	19.65	44.22	8.72
9	6.07	23.83	53.62	8.83
10	7.07	28.01	63.03	8.91
11	8.07	32.19	72.43	8.98
12	9.07	36.37	81.84	9.02
13	10.07	40.55	91.24	9.06
14	11.07	44.73	100.65	9.09
15	12.07	48.91	110.05	9.12
16	13.07	53.09	119.46	9.14
17	14.07	57.27	128.86	9.16
18	15.07	61.45	138.27	9.18
19	16.07	65.63	147.67	9.19
20	17.07	69.81	157.08	9.20
21	18.07	73.99	166.48	9.21
22	19.07	78.17	175.89	9.22
23	20.07	82.35	185.29	9.23
24	21.07	86.53	194.70	9.24



BYLAE I : (Vervolg)

KH_2PO_4 , Klei-inhoud 12 %, Residuele P, 3.56 mg/kg

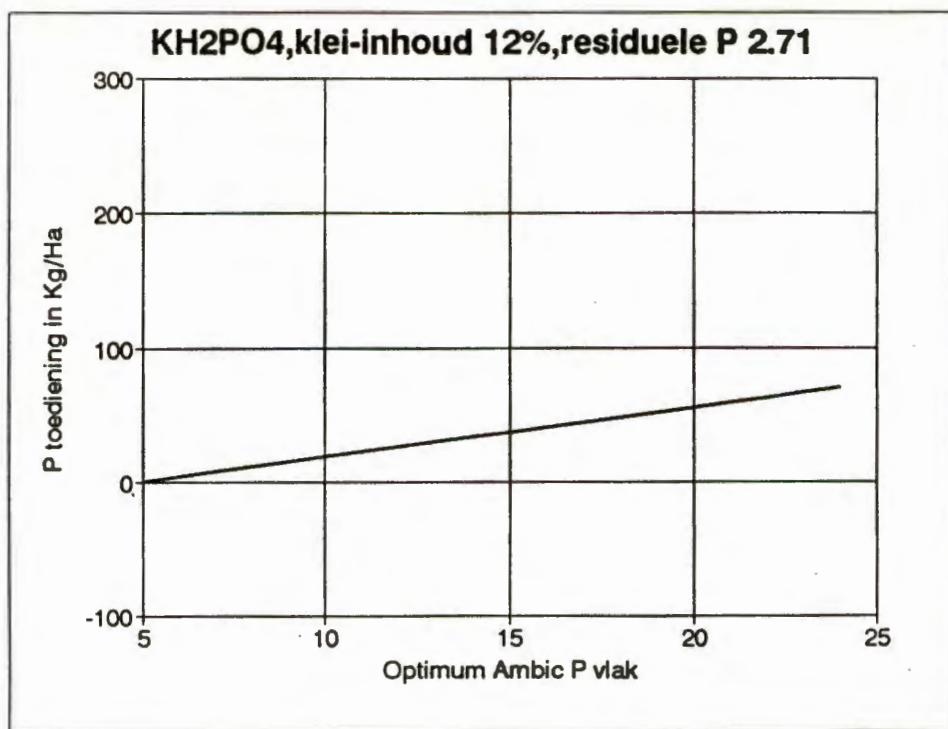
B_0 mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	1.44	7.20	16.19	11.24
6	2.44	8.78	19.74	8.09
7	3.44	10.36	23.30	6.77
8	4.44	11.94	26.85	6.05
9	5.44	13.52	30.41	5.59
10	6.44	15.10	33.96	5.27
11	7.44	16.68	37.52	5.04
12	8.44	18.26	41.07	4.87
13	9.44	19.84	44.63	4.73
14	10.44	21.42	48.18	4.62
15	11.44	23.00	51.74	4.52
16	12.44	24.58	55.29	4.44
17	13.44	26.16	48.85	4.38
18	14.44	27.74	62.40	4.32
19	15.44	29.32	65.96	4.27
20	16.44	30.90	69.51	4.23
21	17.44	32.48	73.07	4.19
22	18.44	34.06	76.62	4.16
23	19.44	35.64	80.18	4.12
24	20.44	37.22	83.73	4.10



BYLAE I : (Vervolg)

KH_2PO_4 , Klei-inhoud 12 %, Residuele P, 2.71 mg/kg

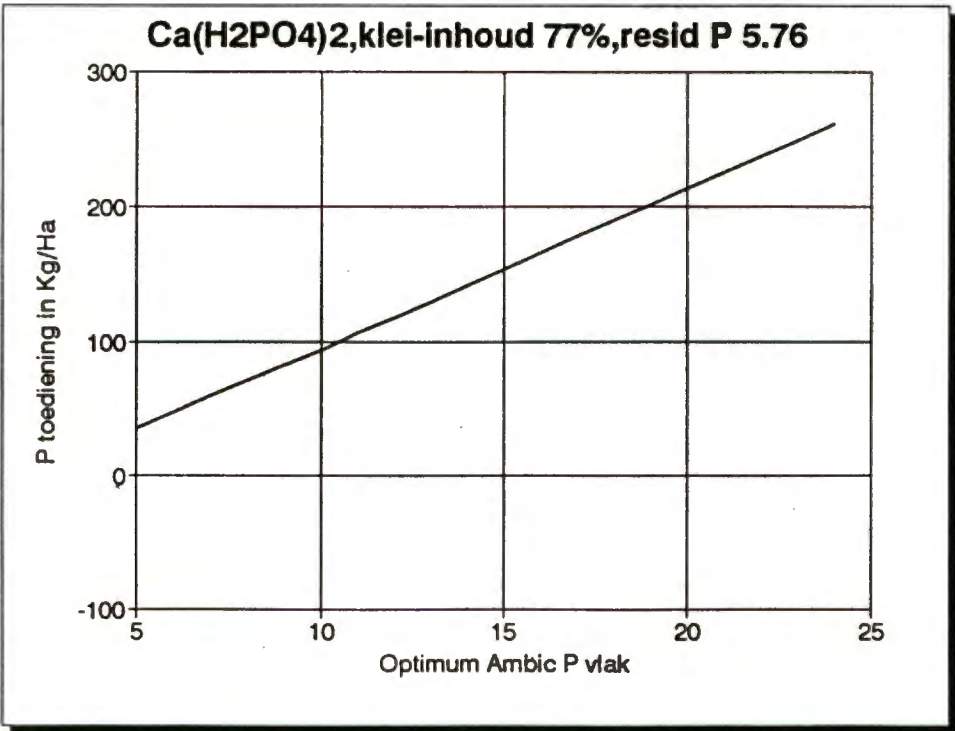
B_0 mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	2.29	0.02	0.04	0.02
6	3.29	1.66	3.73	1.13
7	4.29	3.30	7.42	1.73
8	5.29	4.94	11.11	2.10
9	6.29	6.58	14.80	2.35
10	7.29	8.22	18.49	2.54
11	8.29	9.86	22.8	2.67
12	9.29	11.50	25.87	2.78
13	10.29	13.14	29.56	2.87
14	11.29	14.78	33.25	2.94
15	12.29	16.24	36.94	3.01
16	13.29	18.06	40.63	3.06
17	14.29	19.70	44.32	3.10
18	15.29	21.34	48.01	3.14
19	16.29	22.98	51.70	3.17
20	17.29	24.62	55.39	3.20
21	18.29	26.26	59.08	3.23
22	19.29	27.90	52.77	3.25
23	20.29	29.54	66.46	3.28
24	21.29	31.18	70.15	3.29



BYLAE I : (Vervolg)

Ca(H₂PO₄)₂, Klei-inhoud 77 %, Residuele P, 5.76 mg/kg

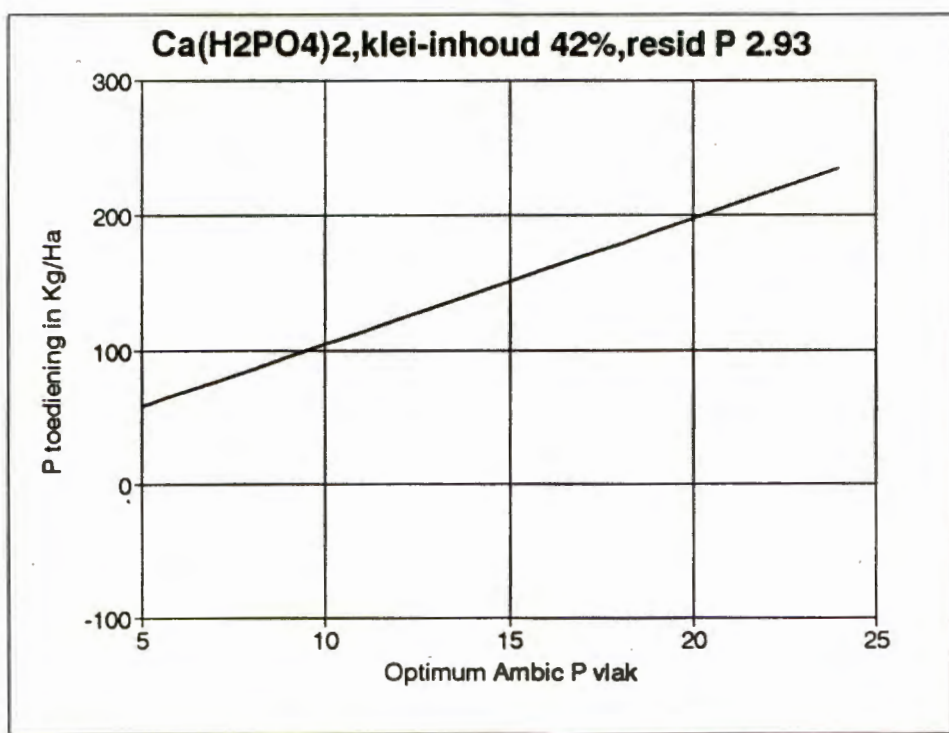
B ₀ mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	-0.76	15.38	34.60	-45.53
6	0.24	20.67	46.51	193.78
7	1.24	25.96	58.41	47.10
8	2.24	31.25	70.31	31.39
9	3.24	36.54	82.21	25.37
10	4.24	41.83	94.12	22.20
11	5.24	47.12	106.02	20.23
12	5.24	52.41	117.92	18.90
13	7.24	57.70	129.82	17.93
14	8.24	62.99	141.73	17.20
15	9.24	68.28	153.63	16.63
16	10.24	73.57	165.53	16.17
17	11.24	78.86	177.43	15.79
18	12.24	84.15	189.34	15.47
19	13.24	89.44	201.24	15.20
20	14.24	94.73	213.14	14.97
21	15.24	100.02	225.04	14.77
22	16.24	105.31	236.95	14.59
23	17.24	110.60	248.85	14.43
24	18.24	115.89	260.75	14.30



BYLAE I : (Vervolg)

Ca(H₂PO₄)₂, Klei-inhoud 42 %, Residuele P, 2.93 mg/kg

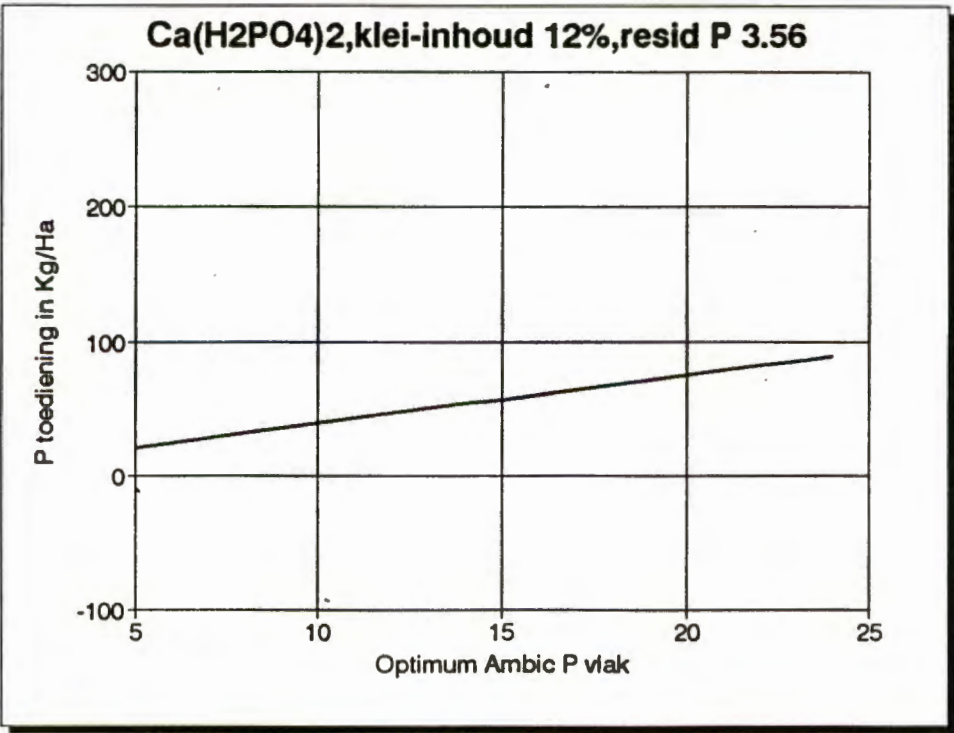
B ₀ mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	2.07	25.77	57.98	28.01
6	3.07	29.90	67.27	21.91
7	4.07	34.03	76.57	18.81
8	5.07	38.16	85.86	16.93
9	6.07	42.29	95.15	15.68
10	7.07	46.42	104.44	14.77
11	8.07	50.55	113.74	14.09
12	9.07	54.68	123.03	13.56
13	10.07	58.81	132.32	13.14
14	11.07	62.94	141.61	12.79
15	12.07	67.07	150.91	12.50
16	13.07	71.20	160.20	12.26
17	14.07	75.33	169.49	12.05
18	15.07	79.46	178.78	11.86
19	16.07	83.59	188.08	11.70
20	17.07	87.72	197.37	11.56
21	18.07	91.85	206.66	11.44
22	19.07	95.99	215.95	11.32
23	20.07	100.11	225.25	11.22
24	21.07	104.24	234.54	11.13



BYLAE I : (Vervolg)

Ca(H₂PO₄)₂, Klei-inhoud 12 %, Residuele P, 3.56 mg/kg

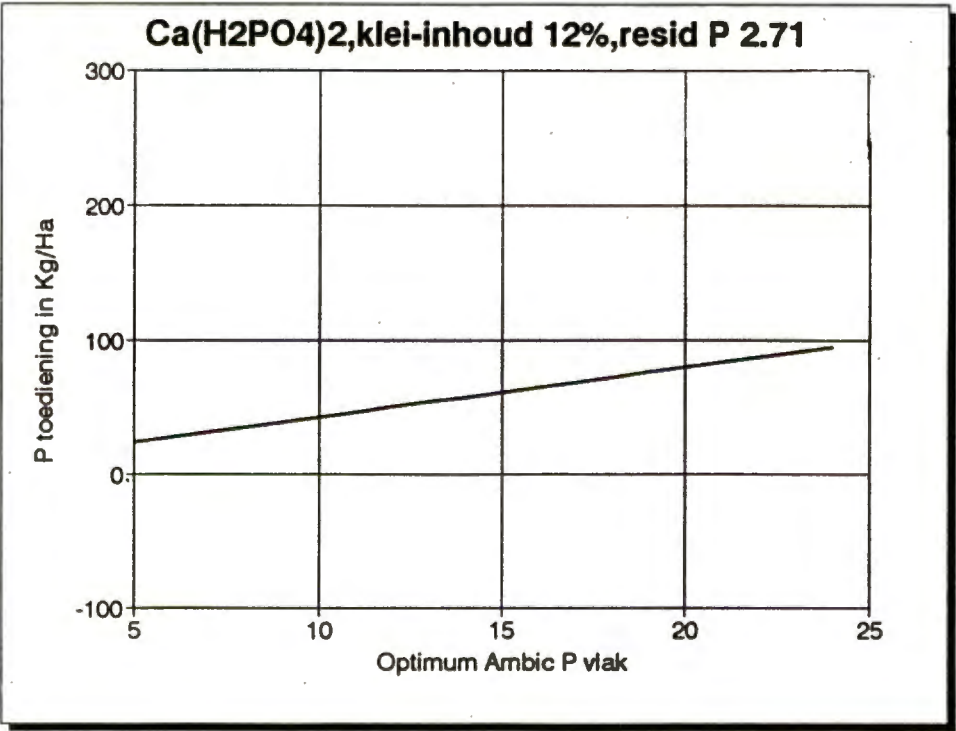
B ₀ mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	1.44	9.38	21.10	14.66
6	2.44	10.97	24.68	10.12
7	3.44	12.56	28.26	8.21
8	4.44	14.15	31.84	7.17
9	5.44	15.74	35.41	6.51
10	6.44	17.33	38.99	6.05
11	7.44	18.92	42.57	5.72
12	8.44	20.51	46.15	5.47
13	9.44	22.10	49.72	5.27
14	10.44	23.69	53.30	5.11
15	11.44	25.28	56.88	4.97
16	12.44	26.87	60.46	4.86
17	13.44	28.46	64.03	4.76
18	14.44	30.05	67.61	4.68
19	15.44	31.64	71.19	4.61
20	16.44	33.23	74.77	4.55
21	17.44	34.82	78.34	4.49
22	18.44	36.41	81.92	4.44
23	19.44	38.00	85.50	4.40
24	20.44	39.59	89.08	4.36



BYLAE I : (Vervolg)

Ca(H₂PO₄)₂, Klei-inhoud 12 %, Residuele P, 2.71 mg/kg

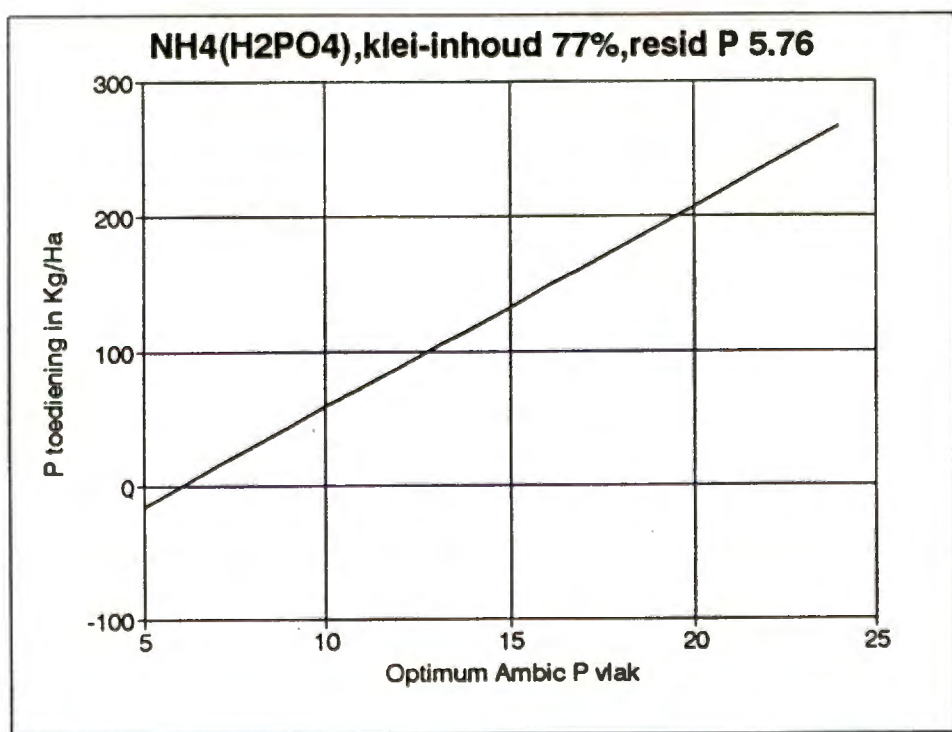
B ₀ mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	2.29	10.39	23.39	10.21
6	3.29	12.06	27.14	8.25
7	4.29	13.73	30.90	7.20
8	5.29	15.40	34.66	6.55
9	6.29	17.07	38.42	6.11
10	7.29	18.74	42.17	5.79
11	8.29	20.41	45.93	5.54
12	9.29	22.08	49.69	5.35
13	10.29	23.75	53.45	5.19
14	11.29	25.42	57.20	5.07
15	12.29	27.09	60.96	4.96
16	13.29	28.76	64.72	4.87
17	14.29	30.43	68.48	4.79
18	15.29	32.10	72.23	4.72
19	16.29	33.77	75.99	4.66
20	17.29	35.44	79.75	4.61
21	18.29	37.11	83.51	4.57
22	19.29	38.78	87.26	4.52
23	20.29	40.45	91.02	4.49
24	21.29	42.12	94.78	4.45



BYLAE I : (Vervolg)

$\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ Klei-inhoud 77 %, Residuele P, 5.56 mg/kg

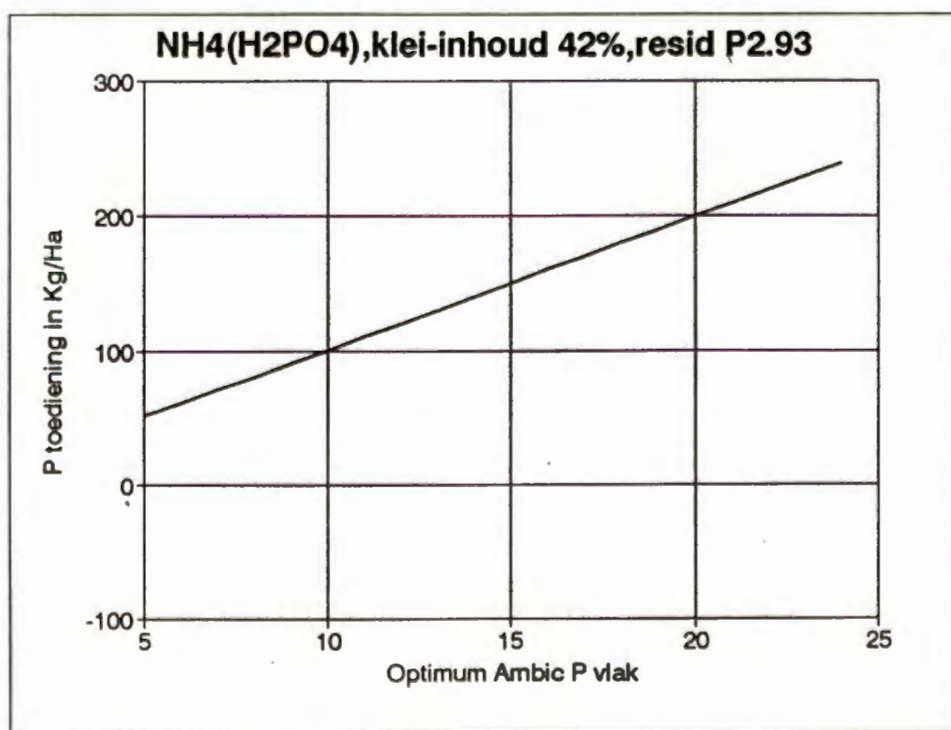
B_0 mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	-0.76	-6.95	-15.63	20.57
6	0.24	-0.36	-0.81	-3.36
7	1.24	6.23	14.02	11.31
8	2.24	12.82	28.85	12.88
9	3.24	19.41	43.68	13.48
10	4.24	26.00	58.50	13.80
11	5.24	32.59	73.33	13.99
12	6.24	39.18	88.16	14.13
13	7.24	45.77	102.99	14.22
14	8.24	52.36	117.81	14.30
15	9.24	58.95	132.64	14.36
16	10.24	65.54	147.47	14.40
17	11.24	72.13	162.30	14.44
18	12.24	78.72	177.12	14.47
19	13.24	85.31	191.95	14.50
20	14.24	91.90	206.78	14.52
21	15.24	98.49	221.61	14.54
22	16.24	105.08	236.43	14.56
23	17.24	111.67	251.26	14.57
24	18.24	118.26	266.09	14.59



BYLAE I : (Vervolg)

$\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$, Klei-inhoud 42 %, Residuele P, 2.93 mg/kg

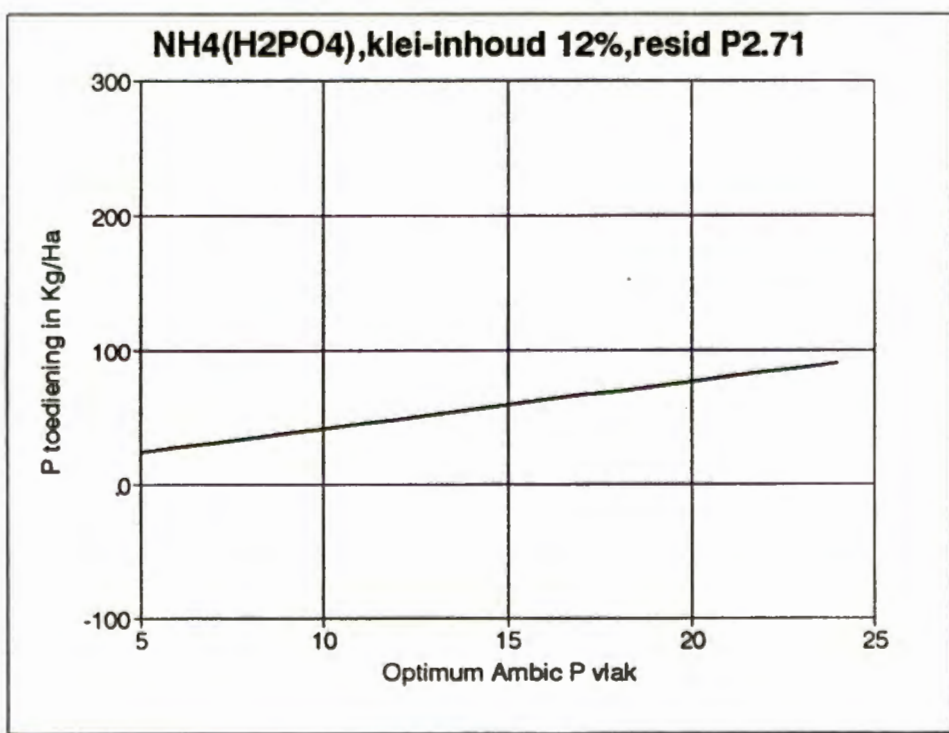
B_0 mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	2.07	22.87	51.45	24.86
6	3.07	27.25	61.30	19.97
7	4.07	31.63	71.16	17.48
8	5.07	36.01	81.01	15.98
9	6.07	40.39	90.87	14.97
10	7.07	44.77	100.72	14.25
11	8.07	49.15	110.58	13.70
12	9.07	53.53	120.43	13.28
13	10.07	57.91	130.29	12.94
14	11.07	62.29	140.14	12.66
15	12.07	66.67	150.00	12.43
16	13.07	71.05	159.85	12.23
17	14.07	75.43	169.71	12.06
18	15.07	79.81	179.56	11.92
19	16.07	84.19	189.42	11.79
20	17.07	88.57	199.27	11.67
21	18.07	92.95	209.13	11.57
22	19.07	97.33	218.98	11.48
23	20.07	101.71	228.84	11.40
24	21.07	106.09	238.69	11.33



BYLAE I : (Vervolg)

$\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$, Klei-inhoud 12 %, Residuele P, 2.71 mg/kg

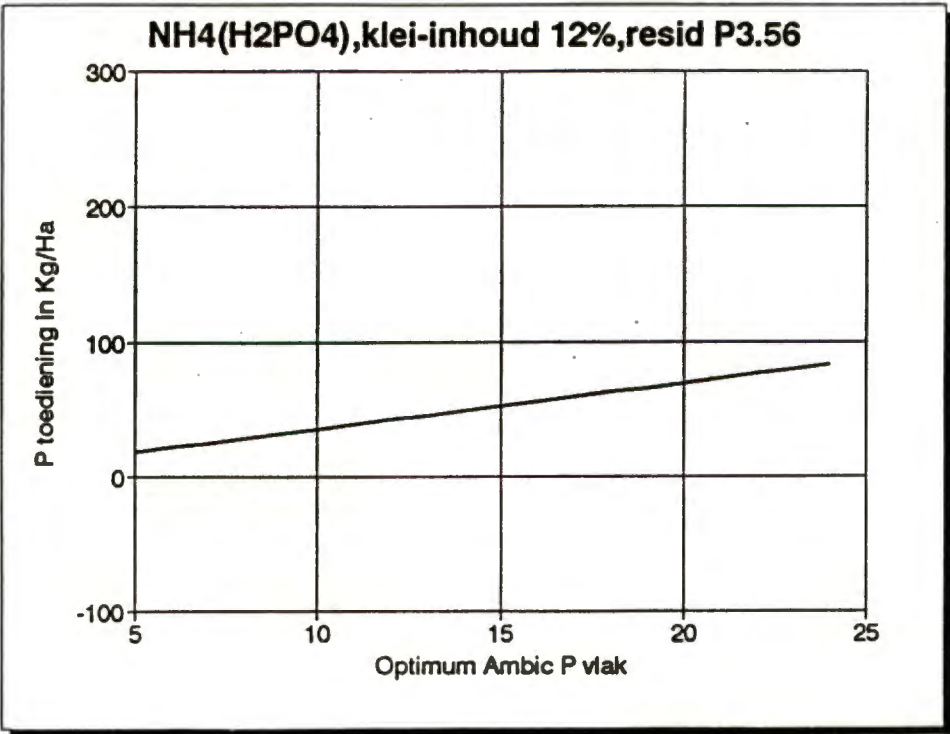
B_0 mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	2.29	10.48	12.59	10.30
6	3.29	12.04	17.0	8.24
7	4.29	13.60	30.61	7.13
8	5.29	15.16	34.12	6.45
9	6.29	16.72	37.63	5.98
10	7.29	18.28	41.14	5.64
11	8.29	19.84	33.65	5.39
12	9.29	21.40	48.16	5.18
13	10.29	22.96	51.67	5.02
14	11.29	24.52	55.18	4.89
15	12.29	26.08	58.69	4.78
16	13.29	27.64	62.20	4.68
17	14.29	29.20	65.71	4.60
18	15.29	30.76	69.22	4.53
19	16.29	32.32	72.73	4.46
20	17.29	33.88	76.24	4.41
21	18.29	35.44	79.75	4.36
22	19.29	37.00	83.26	4.32
23	20.29	38.56	86.77	4.28
24	21.29	40.12	90.28	4.24



BYLAE I : (Vervolg)

NH₄(H₂PO₄), Klei-inhoud 12 %, Residuele P, 3.56 mg/kg

B ₀ mg/kg	ΔP mg/kg	P toegedien mg/kg	P toegedien kg/ha	PBF mg/kg
5	1.44	7.91	17.79	12.36
6	2.44	9.43	21.21	8.69
7	3.44	10.95	24.63	7.16
8	4.44	12.47	28.05	6.32
9	5.44	13.99	31.47	5.79
10	6.44	15.51	34.89	5.42
11	7.44	17.03	38.31	5.15
12	8.44	18.55	41.73	4.94
13	9.44	20.07	45.15	4.78
14	10.44	21.59	48.57	4.65
15	11.44	23.11	51.99	4.55
16	12.44	24.63	55.41	4.45
17	13.44	26.15	58.83	4.38
18	14.44	27.67	62.25	4.31
19	15.44	29.19	65.67	4.25
20	16.44	30.71	69.09	4.20
21	17.44	32.23	72.51	4.16
22	18.44	33.75	75.93	4.12
23	19.44	35.27	79.35	4.08
24	20.44	36.79	82.77	4.05



DANKBETUIGING

Graag wil ek my opregte dank en waardering betuig aan die volgende persone en instansies wat meegehelp het om die skrywe van hierdie proefskrif moontlik te maak.

- * Prof. J. Booysen en Dr. A.J. van der Merwe as studieleiers.
- * Dr. B.E. Eisenberg vir belangstelling, insig, wenke en opleiding in statistiese metodes.
- * Mev. Helené Müller vir insette ten opsigte van die verwerking van die resultate op die rekenaar.
- * Mevv. G. van der Mey en H. van Zyl vir laboratorium-analise van grondmonsters.
- * Mev. M. Pienaar vir die tik van die proefskrif.
- * Die Bestuur van die LNR vir fasiliteite om die studie te doen.
- * Mev Mariana Venter vir die redaksionele afronding van die proefskrif.

'n Besondere woord van dank aan my eggenote Isabel en my kinders vir volgehoue ondersteuning, aanmoediging en geloof dat dit moontlik is om dié studie te doen.

Opgedra aan my ouers met dank aan ons Skepper vir gespaarde lewens om die verwerwing van hierdie graad met my te kan beleef.