

# **Verandering van de beschikbaarheid van fosfaat in grond onder invloed van bemesting**

Observationeel statistisch onderzoek  
naar het voorkomen van  
'onvermijdbare fosfaatverliezen' op  
basis van gegevens van veeljarige  
bemestingsproeven

P.A.I. Ehlert, S.L.G.E. Burgers & J.W. Steenhuizen

Het DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO) is onderdeel van de Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.

Het instituut is opgericht op 1 november 1993 en is ontstaan door de samenvoeging van het Wageningse Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek (CABO-DLO) en het in Haren gevestigde Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (IB-DLO).

DLO heeft tot taak het genereren van kennis en het ontwikkelen van expertise ten behoeve van de beleidsvoorbereiding en -uitvoering van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, het bevorderen van de primaire landbouw en de agrarische industrie, het inrichten en beheren van het landelijk gebied, en het beschermen van natuur en milieu.

AB-DLO heeft tot taak het verrichten van zowel fundamenteel-strategisch als toepassingsgericht onderzoek en is gepositioneerd tussen het fundamentele basisonderzoek van de universiteiten en het praktijkgerichte onderzoek op proefstations. De verkregen onderzoeksresultaten dragen bij aan de bevordering van:

- de bodemkwaliteit;
- duurzame plantaardige produktiesystemen;
- de kwaliteit van landbouwprodukten.

Kernexpertises van het AB-DLO zijn: plantenfysiologie, bodembioïologie, bodemchemie en -fysica, nutriëntenbeheer, gewas- en onkruidedecologie, graslandkunde en agrosysteemkunde.

#### **Adres**

##### *Vestiging Wageningen:*

Postbus 14, 6700 AA Wageningen  
tel. 0317 47 57 00  
fax 0317 42 31 10  
e-mail [postkamer@ab.dlo.nl](mailto:postkamer@ab.dlo.nl)

##### *Vestiging Haren:*

Postbus 129, 9750 AC Haren  
tel. 050 533 77 77  
fax 050 533 72 91  
e-mail [postkamer@ab.dlo.nl](mailto:postkamer@ab.dlo.nl)

# Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1. Inleiding	7
2. Probleemanalyse en werkhypothese	9
2.1. Kwantificering van de fosfaatbalans van de bodem	9
2.2. Voor het gewas beschikbaar fosfaat	10
2.3. Werkhypothese	11
2.3.1. Formulering van de werkhypothese	11
2.3.2. Uitwerking van de werkhypothese	13
3. Methoden van onderzoek	15
3.1. Dataverzameling en -bewerking	15
3.1.1. Dataverzameling	15
3.1.2. Databewerking	16
3.2. Forfaitaire gehalten	17
3.3. Textuur	18
3.4. Schatten van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies	18
4. Resultaten	21
4.1. Overzicht van verzamelde veldproeven	21
4.2. Forfaitaire gehalten	22
4.3. Textuur	23
4.4. Schatting van landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen voor bouwland	23
4.4.1. Pw-getal	24
4.4.2. P-Al-getal	31
4.5. Schatting van landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen voor grasland	35
4.5.1. Grasland op zeeklei, dekzand en rivierklei	36
4.5.2. Veen	37
4.5.3. Mestinjectie op dekzand	39
4.6. Verhoging van de fosfaattoestand tot streefgetal	43
4.7. Simulatie van het verloop van de fosfaattoestand	45
5. Discussie	51
6. Conclusies	59
7. Literatuur	61
Bijlagen	63
Bijlage 1. Samenwerkende instellingen	65
Bijlage 2. Herkomst van de databestanden	67
Bijlage 3. Overzicht van de lokatie, bodemkaartenheid en analyse van algemeen grondonderzoek per veldproef	69



## Samenvatting

Dit rapport geeft de resultaten van observationeel statistisch onderzoek naar het voorkomen van 'onvermijdbare fosfaatverliezen' op basis van gegevens van veeljarige bemestingsproeven. Het onderzoek vormt de eerste fase van het FOMA-project *'Onvermijdbare afname van de beschikbaarheid van fosfaat in grond; een studie naar 'fosfaatverliezen' door fixatie en immobilisatie'*. Het onderzoek in deze fase is volledig gebaseerd op meetgegevens. In de tweede fase zijn 'onvermijdbare landbouwkundige fosfaatverliezen' gekwantificeerd als functie van grondsoort, P-toestand van de grond en bodemgebruik door aanpassing van huidige mechanistische modellen. De resultaten ervan zijn elders gerapporteerd (Van der Salm & Breeuwsma, 1995; Van der Zee & Campillo, 1995a; 1995b).

In het kader van de eerste fase van het FOMA-project is AB-nota 5 verschenen met een rapportage voor de Technische Projectgroep P-desk-studie (Ehlert et al., 1994). Deze rapportage heeft ook tot doel gehad om het FOMA te informeren over de voortgang van het onderzoek. De nota geeft de werkhypothese en achtergronden en tevens een eerste raming van de orde van grootte van onvermijdbare fosfaatverliezen. De resultaten van de nota berusten op een eerste statistische verkenning op basis van beschikbare databestanden en hadden geen definitief karakter. Na de voortgangsrapportage is het databestand aanzienlijk uitgebreid en zijn meer gedetailleerde statistische analyses uitgevoerd waarvan de eindresultaten in dit rapport worden gegeven.

Het doel van dit onderzoek is het kwantificeren van 'landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen' als functie van grondsoort, fosfaattoestand van de grond en grondgebruik. Daarvoor is gebruik gemaakt van beschikbare metingen afkomstig van veeljarige bemestingsveldproeven met fosfaat. De fosfaatverliezen worden toegeschreven aan immobilisatie van fosfaat in organische stof, fixatie of uitspoeling. Er zijn echter geen metingen in het bemestingsonderzoek over deze processen beschikbaar. Een kwantificering van het effect van deze processen op de fosfaatbalans van de bodem is dus onmogelijk. Daarom is voor een andere benadering gekozen. Om de fosfaatverliezen te kwantificeren is aangenomen dat het effect van de drie genoemde processen tot uitdrukking komt in veranderingen in de hoeveelheid fosfaat die voor het gewas beschikbaar is. De verandering van de hoeveelheid voor het gewas beschikbaar fosfaat is vastgesteld door middel van grondonderzoek ten behoeve van bemestingsadvisering, nl. een extractie met water (Pw-getal) en een extractie met ammoniumlactaat-azijnzuur (P-AL-getal). Het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies is gedefinieerd als de extra hoeveelheid fosfaat die boven de gewasonttrekking gegeven moet worden om de fosfaattoestand van de grond te handhaven. Een kwantificering van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies is nu mogelijk door de hoeveelheid fosfaat te bepalen welke nodig is om de toestand te handhaven.

De hoeveelheid voor het gewas beschikbaar fosfaat in de bodem verandert niet alleen door overschotten of tekorten op de fosfaatbalans maar ook door andere factoren. De opzet van het onderzoek was om het effect van deze factoren op veranderingen van het Pw-getal of P-AL-getal te bepalen. De zeven beoogde factoren waren:

1. chemische en fysische vorm van de fosfaatmeststof;
2. bekalking;
3. het soort gewas;
4. de grondsoort;
5. de initiële fosfaattoestand;
6. de dikte van de bouwvoor;
7. de contactduur van meststof met grond (incubatieduur).

Deze factoren zijn als verklarende variabelen opgenomen in een multipel regressiemodel dat de verandering in Pw-getal of P-AL-getal (resp.  $\Delta Pw$ -getal en  $\Delta P-AL$ -getal) per jaar beschrijft. Hierbij is ernaar gestreefd om kwalitatieve factoren om te zetten naar kwantitatieve eenheden. Grondsoorten zijn beschreven door middel van algemeen grondonderzoek op textuur, organische stof, vrij calciumcarbonaat en zuurgraad. Het aantal interacties tussen genoemde verklarende variabelen is tijdens de uitwerking van de werkhypothese sterk beperkt. Twee interacties waren in het model opgenomen. Literatuurgegevens wezen uit dat bij een gelijk fosfaatoverschot de verandering in de fosfaattoestand bij lage initiële fosfaattoestand geringer was dan bij een hoge. Om die reden is de interactie tussen de initiële fosfaattoestand en het fosfaatoverschot in het model opgenomen. Bij een tekort op de fosfaatbalans daalt volgens literatuurgegevens de fosfaattoestand bij hoge initiële fosfaattoestand sneller dan bij lage fosfaattoestanden. Daarom is als tweede interactie die tussen een tekort op de fosfaatbalans op de fosfaattoestand van de grond opgenomen in het model. Het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies is daarop bepaald door de conditie op te leggen dat de verandering van het Pw-getal of het P-AL-getal gelijk moet zijn aan nul.

De resultaten van het statistisch onderzoek zijn gebaseerd op meetgegevens van veeljarige veldproeven van bemestingsonderzoek met fosfaat. Deze veldproeven hadden oorspronkelijk een andere doelstelling, maar ze maakten het mogelijk om de orde van grootte van onvermijdbare fosfaatverliezen te bepalen. Een groot aantal observationele eenheden is door de samenwerkende instellingen PAGV, PR, NMI en AB-DLO verzameld. Ook kon over gegevens van het voormalig Landbouwkundig Bureau van de Superfosfaatindustrie beschikt worden. Desondanks bleek slechts een beperkt deel van deze verzameling data geschikt te zijn voor het onderzoek. Om verantwoorde inter- en extrapolaties en gebalanceerde vergelijkingen te kunnen maken moesten deelverzamelingen geselecteerd worden die voldoende consistent waren voor verantwoorde statistische analyse. De orde van grootte van het landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverlies is met deze deelverzamelingen bepaald.

Het statistisch onderzoek heeft schattingen opgeleverd voor landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen voor bouwland en grasland als functie van de initiële fosfaattoestand. Daarbij zijn Pw-getal en P-AL-getal onderscheiden. Grondsoorten zijn gekarakteriseerd op basis van textuur, organische-stofgehalte, vrije koolzure kalk en zuurgraad (pH). Deze karakterisering bleek in het algemeen geen variatie in veranderingen in Pw-getal of P-AL-getal te verklaren. Ook bekalking bleek verandering in de fosfaattoestand niet te kunnen verklaren. De kwalitatieve verklarende variabelen meststofvorm en gewas bleken te onregelmatig in de diverse deelverzamelingen voor te komen, waardoor een schatting van hun effect op de verandering van de fosfaattoestand niet mogelijk is. Dit betekent dat hun eventuele effect verstrengeld is met andere factoren die de schattingen voor het onvermijdbare fosfaatverlies bepalen. Bij bouwland kwam variatie in de dikte van de teeltlaag voor, maar dit had geen wezenlijk effect op de verandering in de fosfaattoestand. Toch is deze laagdikte opgenomen in het statistisch model om daardoor alle berekeningen van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies te kunnen bepalen voor een standaard laagdikte van 20 cm. Bij grasland was daarentegen de teelt-

laag in alle gevallen 5 cm. Bij twee veeljarige veldproeven met emissiearme toediening van rundermest waren tevens gegevens bekend van de fosfaattoestand van de laag 0-20 cm.

De incubatieduur van meststoffosfaat met grond heeft invloed op het Pw-getal. Naarmate de incubatieduur toeneemt, wordt het Pw-getal lager en stijgt dus de grootte van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies. Bij deelverzamelingen voor het P-AL-getal ontbreekt een effect van de incubatieduur. De orde van grootte van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies op bouwland wordt altijd bepaald door de hoogte van de initiële fosfaattoestand. Bij een lage fosfaattoestand bestaat doorgaans geen onvermijdbaar fosfaatverlies; pas bij de landbouwkundige waardering 'voldoende' treedt een zeker verlies op. Hoe hoger de initiële fosfaattoestand is, hoe hoger het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies.

De veldproeven op grasland op zeelei, dekzand, rivierklei en veen gaven geen aanwijzingen voor een landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies bij breedwerpige oppervlakkige toediening van kunstmestfosfaat. Dat wil zeggen dat er geen extra fosfaat nodig is om de fosfaattoestand te handhaven. Bij emissiearme toediening van rundermest op 15-20 cm diepte treedt daarentegen wel een landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies op. Het verlies neemt toe naarmate de initiële fosfaattoestand stijgt. Het effect van de toedieningstechniek kon hier niet onderscheiden worden van het effect van rundermest. Daardoor is het niet duidelijk of het verlies veroorzaakt wordt door de techniek of door de meststofvorm.

De orde van grootte van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies gebaseerd op het Pw-getal of het P-AL-getal voor bouwland en voor grasland bij de landbouwkundige waardering voldoende tot ruim voldoende staan in het hieronder gegeven overzicht. De getalswaarden voor bouwland en emissiearme toediening van rundermest op grasland gelden voor een teeltlaag van 20 cm; die voor breedwerpig toediening van kunstmestfosfaat op grasland voor een teeltlaag van 5 cm.

De rekenregels voor bouwland zijn ook gebruikt om de normen voor reparatiebemesting, d.w.z. voor het verkrijgen van het gewenste - of initiële - fosfaatniveau, op bouwland te verifiëren. De hoeveelheid P die nodig is om de na te streven fosfaattoestand te verkrijgen, is vergelijkbaar met de hoeveelheid die in het huidige bemestingsadvies wordt genoemd (tabel 14).

Met behulp van het stochastische model, verkregen uit de multipale regressieanalyses, is het verloop van de fosfaattoestand in de tijd berekend. Dit is gedaan voor diverse overschotten en tekorten op de fosfaatbalans en twee initiële fosfaattoestanden. De fosfaattoestand stijgt als het fosfaatoverschot hoger is dan het landbouwkundig onvermijdbaar verlies; de toestand daalt indien het overschot lager is. Naarmate het overschot beter overeenkomt met het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies wordt sneller een evenwicht bereikt tussen overschot en fosfaattoestand van de grond. Een overschot op de fosfaatbalans betekent dus niet zonder meer dat de fosfaattoestand stijgt; een daling is ook mogelijk. Bij een specifieke fosfaattoestand hoort een bepaald overschot dat nodig is om die toestand te handhaven. Van evenwicht zal pas sprake zijn als de fosfaatbalans gelijk is geworden aan het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies dat bij die specifieke fosfaattoestand hoort. Het duurt enkele tot vele tientallen jaren voordat er sprake is van zo'n evenwichtssituatie (tabel 15). De simulatieberekeningen geven aan dat op een grond met een zeer hoge fosfaattoestand bij overschotten van 0-100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar geen evenwicht bereikt wordt binnen een periode van 100 jaar.

Overzicht van landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen voor bouwland en grasland op basis van Pw-getal en/of P-AL-getal

Cultuur	Parameter	Fosfaat-toestand	Landbouwkundig onvermijdbaar verlies		
			Schatting	Betrouwbaarheidsinterval [kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> per ha per jaar]	
Bouwland	Pw-getal <sup>1</sup>	20	14 <sup>3</sup>	-54 - 81	
		30	41 <sup>3</sup>	-3 - 86	
		40	64 <sup>3</sup>	26 - 102	
	P-AL-getal <sup>2</sup>	30	7 <sup>4</sup>	-33 - 47	
		40	30 <sup>4</sup>	-31 - 64	
		50	76 <sup>4</sup>	-29 - 180	
Grasland	- kunstmest	P-AL-getal	30	0 <sup>5</sup>	-64 - 2
			40	0 <sup>5</sup>	-94 - 22
			50	0 <sup>5</sup>	-192 - 99
	- injectie	P-AL-getal	30	20 <sup>6</sup>	-22 - 61
			40	36 <sup>6</sup>	2 - 70
			50	63 <sup>6</sup>	5 - 122

<sup>1</sup> Pw-getal in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter luchtdroge grond.

<sup>2</sup> P-AL-getal in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per 100 g luchtdroge grond.

<sup>3</sup> Geldt voor een incubatieduur van 210 dagen en laagdikte van 20 cm (zie tabel 5, dit rapport).

<sup>4</sup> Laagdikte 20 cm, zie tabel 8, dit rapport.

<sup>5</sup> De resultaten van statistische analyse gaven negatieve waarden voor het landbouwkundig onvermijdbare verlies aan bij een positieve fosfaatbalans en bij oppervlakkige breedwerpige toediening van kunstmestfosfaat op grasland; de laagdikte was 5 cm.

Dat betekent dat er geen verlies kon worden vastgesteld en dus dat er geen extra fosfaat nodig was om de fosfaattoestand van de zodelaag 0-5 cm te handhaven. Daarop is het landbouwkundig onvermijdbaar verlies hier op nul gesteld (zie § 4.5.1).

<sup>6</sup> Geldt voor emissiearme toediening van rundermest op 15-20 cm diepte en een laagdikte van 20 cm (zie tabel 14 van dit rapport).



# 1. Inleiding

De groei en intensivering van de Nederlandse veehouderij hebben tot een onaanvaardbare belasting van de bodem en van grond- en oppervlaktewater met nutriënten geleid (Breeuwsma & Berghs, 1993). Om deze belasting tot aanvaardbare proporties terug te brengen, stelt de Nederlandse wetgeving regels ten aanzien van de hoeveelheden dierlijke mest die mogen worden gebruikt. Deze gebruiksnormen, die betrekking hebben op de nutriënten stikstof (N) en fosfor (P), worden in het kader van de derde fase van het mest- en ammoniakbeleid gefaseerd aangescherpt. Een centrale plaats nemen daarbij de beleidsinstrumenten 'evenwichtbemesting' en 'mineralenboekhouding' in. De overheid heeft zich voorgenomen om voor fosfor zogenoemde eindnormen in te voeren. Met deze fosfaateindnormen wordt een bemestingsniveau aangegeven waarbij de gift gelijk is aan de afvoer met oogstproducten plus 'acceptabele verliezen'. Het begrip 'acceptabele verliezen' is geïntroduceerd om de onvermijdbare daling van het voor het gewas beschikbare fosfaat ( $P_2O_5$ )<sup>1</sup> in de bodem aan te geven, die op kan treden indien louter de met de (oogst)producten afgevoerde hoeveelheid fosfaat wordt gecompenseerd. De definiëring en in het bijzonder de kwantificering van de 'acceptabele verliezen' kunnen alleen worden aangegeven wanneer de fosfaatbalans van de bodem goed gekwantificeerd is.

Dit rapport gaat over het kwantificeren van 'landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen' als functie van grondsoort, fosfaattoestand van de grond en grondgebruik. Het onderzoek vormt een onderdeel van het project 'Onvermijdbare afname van de beschikbaarheid van fosfaat in grond; een studie naar 'fosfaatverliezen' door fixatie en immobilisatie (Oenema, 1993). Het project omvat statistisch onderzoek en modelmatige studies naar de processen immobilisatie en fixatie. De modelstudies zijn gerapporteerd door Van der Salm & Breeuwsma (1995) en Van der Zee & Campello (1995a en 1995b). Dit rapport geeft de resultaten van observationeel statistisch onderzoek naar de kwantificering van 'landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen'.

Het resultaat is tot stand gekomen door intensieve samenwerking tussen medewerkers van de DLO-Groep Landbouwwiskunde (GLW-DLO), Proefstation voor de Akkerbouw en de Groente- teelt in de Vollegrond (PAGV), Proefstation Rundvee-, Schapen- en Paardenhouderij (PR), het Nutriënten Management Instituut (NMI), de voormalige Stichting Voorlichtingsdienst voor Superfosfaat en het DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO). De samenstelling van de werkgroep wordt in bijlage 1 van dit rapport vermeld.

In hoofdstuk 2 wordt de probleemanalyse van 'onvermijdbare fosfaatverliezen' gegeven en de werkhypothese geformuleerd. In hoofdstuk 3 worden de methoden van onderzoek beschreven. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de overzichten van verzamelde data en resultaten van onderzoek gegeven. Een discussie over verkregen resultaten vindt plaats in hoofdstuk 5 en tenslotte staan de conclusies in hoofdstuk 6.

---

<sup>1</sup> De landbouwkundig gebruikelijke benaming voor fosfaat ( $P_2O_5$ , of fosforpentoxide) wordt in dit rapport gehanteerd; de omrekeningsfactor van fosfaat naar fosfor is  $0,437 \cdot P_2O_5 = P$ .



## 2. Probleemanalyse en werkhypothese

### 2.1. Kwantificering van de fosfaatbalans van de bodem

De fosfaatbalans (P-balans) van de bodem kan op twee verschillende manieren worden gekwantificeerd:

1. op basis van de totale hoeveelheid fosfaat;
2. op basis van de voor het gewas beschikbare hoeveelheid fosfaat.

In de gangbare landbouwpraktijk heeft de bepaling van de totale hoeveelheid fosfaat in de grond weinig betekenis omdat er doorgaans geen relatie is met de totale hoeveelheid P die een gewas opneemt. Daarom dient de kwantificering van de P-balans op het produktievermogen van de bodem te worden gericht en dus op de voor het gewas beschikbare hoeveelheid fosfaat. In tabel 1 wordt een kwalitatieve balans gegeven van de hoeveelheid bodemfosfaat die voor het gewas beschikbaar is.

Tabel 1. Balans van de voor het gewas beschikbare hoeveelheid fosfaat in de grond (in kg  $P_2O_5$  per gewichtseenheid teeltlaag c.q. per volume-eenheid teeltlaag)

Aanvoer	Afvoer
Atmosferische depositie (nat en droog)	Plantaardige produkten
Meststoffen	Dierlijke produkten
Plant-, poot- of zaaigoed	
Mineralisatie van organische stof	Immobilisatie in organische stof
Nalevering uit de bodem door desorptie, dissolutie en verwerking	Vastlegging aan de bodem door reversibele vastlegging, irreversibele vastlegging (fixatie) en precipitatie
Capillaire opstijging, inspoeling	Uitspoeling, afspoeling
Afzetting (wind en/of water)	Erosie

De aan- en afvoerposten verschillen in orde van grootte. Een kwantificering van alle balansposten van tabel 1 is nog niet exact te geven, evenmin als de resultaten van de verschillende bodemprocessen.

Een aantal aan- en afvoerposten is echter gering in omvang. Zo is de atmosferische depositie in Nederland doorgaans niet meer dan circa 0,2 - 0,3 kg fosfaat per ha per jaar (Centraal Bureau voor de Statistiek, 1989). Dit is een verwaarloosbare post, gelet op de bijdrage uit meststoffen, mineralisatie en nalevering in de bodem.

De aanvoer van fosfaat met afzettingen door wind of water zijn voor de meeste landbouwgronden eveneens geen relevante balansposten. Uitzonderingen op lokaal niveau komen voor, maar zijn in algemene landbouwkundige zin van ondergeschikt belang.

Ook de aanvoer van fosfaat met plant-, poot- en zaaigoed is doorgaans gering in omvang. De aanvoer met de belangrijkste landbouwgewassen schommelt bij de hakvruchten rond enkele kg fosfaat per ha, terwijl bij de zaadgewassen de aanvoer veelal minder dan 2 kg fosfaat per ha bedraagt.

Indien de aan- en afvoerposten met een geringe omvang worden verwaarloosd, wordt de fosfaatbalans van de bodem vereenvoudigd tot de aanvoerpost meststoffen (bemesting) en de afvoerposten onttrekking, vastlegging, netto-immobilisatie en netto uit- en afspoeling.

Bruto-mineralisatie is niet te scheiden van bruto-immobilisatie. Het netto effect is meetbaar en wordt hier uitgedrukt als een netto-immobilisatie.

Een verandering van de fosfaatbalans van de bodem wordt dan bepaald door:

$$\Delta P = \text{Bemesting} - (\text{Onttrekking} + \text{Vastlegging} + \text{Netto-immobilisatie} + \text{Uitspoeling}) \quad (1)$$

Alles wordt uitgedrukt in kg  $P_2O_5$ , per ton bouwvoor c.q. per  $m^3$  ( $\Delta P$ ).

Een deel van de posten op de balans is direct manipuleerbaar, een ander deel slechts - ten dele - indirect.

Door de afzonderlijke posten te meten kan een verandering in de hoeveelheid fosfaat worden bepaald. Indien posten vastlegging, netto-immobilisatie en uitspoeling niet optreden, kan de hoeveelheid beschikbaar fosfaat worden gehandhaafd door de afvoer met (oogst)produkten te compenseren door een even grote P-bemesting. Treden vastlegging, netto-immobilisatie en/of uitspoeling op, dan zal een bemestingsgift welke gelijk is aan de onttrekking onvoldoende zijn om de voor het gewas beschikbare hoeveelheid fosfaat te handhaven. Er treedt dan onvermijdelijk een daling op van deze voor het gewas beschikbare hoeveelheid P. Er is dan een verlies aan fosfaat. Als dat verlies optreedt bij een zorgvuldig nutriëntenbeheer gecombineerd met een bedrijfseconomische rentabiliteit wordt een dergelijk verlies aangeduid met 'landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies' (Oenema & Van Dijk, 1995).

***Het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies is daarmee gedefinieerd als: De hoeveelheid P die extra nodig is boven de afvoer met oogstprodukten om de (bestaande) fosfaattoestand te handhaven.***

## 2.2. Voor het gewas beschikbaar fosfaat

Alvorens in te gaan op de belangrijkste posten van de P-balans wordt aandacht gegeven aan de voor het gewas beschikbare hoeveelheid fosfaat.

Met beschikbaar fosfaat wordt die fractie van de totale hoeveelheid fosfaat in de grond bedoeld welke door het gewas kan worden benut. Deze fractie wordt in Nederland door middel van

chemisch grondonderzoek vastgesteld. Op akkerbouwland wordt gebruik gemaakt van een 1:60 v/v extractie van grond met water en wordt de beschikbare fractie uitgedrukt in het Pw-getal (Sissingh, 1971). Voor grasland bestaat de methode uit een 1:20 w/w extractie met een bufferoplossing met een pH van 3,75, samengesteld uit 0,10 N ammoniumlactaat en 0,40 N azijnzuur. Voor gras wordt de beschikbare fractie uitgedrukt in het P-Al-getal (Egnér et al., 1960). In het fosfaatbemestingsadvies voor de intensieve vollegrondsgroenteteelten worden beide methoden gebruikt. De methoden van grondonderzoek zijn geselecteerd na - zeer - intensief empirisch landbouwkundig onderzoek; op bouwland naar de P-opname van aardappel; op grasland naar o.a. de drogestofopbrengst van de eerste snede gras.

Het Pw-getal en het P-Al-getal zijn aan verandering onderhevig. Deze verandering wordt niet uitsluitend bepaald door het verschil tussen de fosfaatgift en de afvoer van fosfaat met (oogst)produkten maar ook door teelthandelingen, grondsoort, tijdstip en wijze van toediening en klimaat. Factoren die invloed kunnen uitoefenen op het Pw-getal en/of het P-Al-getal zijn onder meer:

- fosfaatgift;
- chemische en fysische vorm van de fosfaatmeststof;
- bekalking en overige bemesting;
- afvoer van fosfaat met oogstprodukten;
- gewas (fysiologische en biochemische processen);
- grondsoort (bufferend vermogen, adsorptie/desorptie, vastlegging);
- initiële fosfaattoestand (Pw-getal, en/of P-Al-getal);
- dikte bouwvoor (varieert bij bouwland);
- contactduur (incubatieduur) van meststof-P met grond.

In een eerder gegeven rapportage is ingegaan op het effect van deze factoren op het verloop van de P-toestand (Ehler et al., 1994). Korteheidshalve wordt voor meer informatie naar deze rapportage verwezen.

## 2.3. Werkhypothese

### 2.3.1. Formulering van de werkhypothese

Vergelijking (1) geeft een relatie weer tussen de verandering van de hoeveelheid voor het gewas beschikbaar fosfaat in de bodem en een aantal balansposten van de massabalans. De vergelijking geeft aan dat de hoeveelheid voor het gewas beschikbaar fosfaat direct uit de aangegeven posten valt af te leiden indien deze gemeten worden. Nu ontbreken meetgegevens over vastlegging, netto-immobilisatie en/of uitspoeling bij veldproeven voor bemestingsonderzoek. Een directe toetsing gebaseerd op een procesmatige beschrijving van de P-balans, gevalideerd met metingen voor de bepaling van - onvermijdbare - verliezen, is dus niet mogelijk. Wel kunnen schattingen worden uitgevoerd naar de hoeveelheid P die nodig is om een gegeven P-toestand van de grond op een bepaald niveau te handhaven. Er zijn nl. langdurig metingen verricht op veldproeven met een opgelegd bemestingsregime. In deze proeven is naast aanvoer met bemesting en afvoer met de oogst ook de verandering in de fosfaattoestand gemeten. Daardoor is er een schat aan gegevens over effecten van diverse bemestingsgiften op de fosfaattoestand beschikbaar.

De kwantificering van alle factoren die invloed uitoefenen op het Pw-getal en P-AI-getal vergt kennis van hun bijdrage aan de massabalans van P. Voor een aantal factoren is die kennis aanwezig. De fosfaatgift samen met de chemische vorm van de P-meststof en de fosfaatafvoer met oogstprodukten kunnen worden gekwantificeerd. Daarbij moet rekening worden gehouden met de laagdikte en het volumegewicht van de teeltlaag. Een massabalans voor effect van bekalking, initiële P-toestand, grondsoort en contactduur/incubatieduur van meststoffosfaat met grond is niet zonder meer mogelijk. Hier ontbreken essentiële - bodemchemische - gegevens waardoor een validatie met een geïntegreerd mechanistisch concept niet kan worden uitgevoerd. Bovendien kunnen vaak geen variaties in deze factoren (in de statistiek invloedsvariabelen genoemd) worden aangebracht: zij zijn niet van buiten af instelbaar (bv. bufferend vermogen van de grond, organische-stofgehalte, gehalte aan vrije koolzure kalk etc.).

Een indirecte bepaling van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies (OVP) is daarentegen mogelijk door de beschikbare proefveldresultaten op te vatten als een steekproef. Wij spreken dan van observationeel onderzoek. De verandering van de fosfaattoestand, gemeten als Pw-getal of P-AI-getal, kan worden voorspeld uit een aantal factoren dat eenvoudig instelbaar is en een aantal invloedsvariabelen dat niet instelbaar is maar wel eenvoudig te meten.

Deze benaderingswijze geeft dus geen uitsluitsel over causale verbanden. Maar het kan voorspellingen geven van de orde van grootte van onvermijdbare P-verliezen. Het probleem van lastig meetbare variabelen en ontbrekende meetgegevens wordt ermee opgevangen. Belangrijk is dan om storende effecten die samenhangen met wel meetbare variabelen uit te sluiten. Dit kan door deze storende effecten op te nemen in het statistisch model (Oude Voshaar, 1994).

Het statistisch model ziet er dan als volgt uit (zie ook Ehlert et al., 1994).

$$\Delta P = C + \alpha * P_i + \beta * P\text{-gift} + \gamma * P\text{-afvoer} + \delta * \text{Grondsoort} + \varepsilon * \text{Laagdikte} + \zeta * \text{Bekalking} + \eta * \text{Incubatieduur} + \theta * \text{Gewas} + \iota * P\text{-vorm} + \lambda_n * (\text{Interacties}) + \xi$$

waarin

- $\Delta P$  = de verandering van het Pw-getal of het P-AI-getal tussen twee tijdstippen van bemonstering;
- $P_i$  = de fosfaattoestand voor toediening van de P-meststof;
- P-gift = de aanvoer van P met meststoffen;
- P-afvoer = de afvoer van P met oogstprodukten;
- Grondsoort = de grondsoort (zeeklei, dekzand, alluviaal zand, rivierklei, dalgrond, loess, veen);
- Laagdikte = bemonsterde laagdikte van de teeltlaag in cm (bouwvoor op bouwland, zodelaag op grasland);
- Bekalking = de gift aan zuurbindende bestanddelen (neutraliserende waarde) met kalkmeststoffen;
- Incubatieduur = de verstreken tijd tussen het tijdstip van toediening van de P-meststof en de eerst daarop volgende bemonstering van de teeltlaag in dagen;
- Gewas = plantensoort;
- P-vorm = type meststof;
- Interacties = interacties tussen hierboven genoemde variabelen.

C,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\zeta$ ,  $\eta$ ,  $\theta$ ,  $\iota$  en  $\lambda_n$  zijn de te schatten parameters en  $\xi$  is de storingsterm.

Het Pw-getal is uitgedrukt in mg  $P_2O_5$  per liter luchtdroge grond; het P-Al-getal in mg  $P_2O_5$  per 100 g luchtdroge grond. De verandering is per jaar berekend. De P-gift en de P-afvoer zijn uitgedrukt in kg  $P_2O_5$  per ha per jaar.

De gift aan zuurbindende bestanddelen is uitgedrukt in kg ZBW per ha.

**Uit de definitie volgt dat het landbouwkundig onvermijdbaar verlies met vergelijking (2) voor iedere specifieke combinatie van variabelen kan worden geschat door  $\Delta P$  op nul te stellen.**

De centrale vraag in het kader van deze statistische analyse is:

**Treedt er een onvermijdbaar verlies aan P op en zo ja, hoe oefenen grondsoort, P-toestand van de grond en grondgebruik hierop dan invloed uit?**

### 2.3.2. Uitwerking van de werkhypothese

In vergelijking (2) staan variabelen die goed te kwantificeren zijn plus kwalitatieve variabelen die louter een - niet te ordenen - niveau aangeven (nominale variabelen).

#### *Kwantitatieve variabelen*

De initiële P-toestand, P-gift, P-afvoer, laagdikte, gift aan kalkmeststof (bekalking) en incubatieduur zijn variabelen die te kwantificeren zijn.

Omdat de vraagstelling is gericht op de verandering van de P-toestand van de grond bij een verandering in de aan- en afvoer van P is het zinvol om het effect van P-gift en P-afvoer samen te voegen en alleen hun gecombineerd effect in de vorm van de P-balans in de analyse te betrekken. De P-balans is dus het verschil tussen de P-gift en de P-afvoer in kg  $P_2O_5$  per ha per jaar.

#### *Kwalitatieve variabelen*

Grondsoort, gewas en meststofvorm zijn kwalitatieve variabelen en daardoor niet te kwantificeren. Grondsoort kan bij benadering worden gekwantificeerd door de naamsaanduidingen zoals zeeklei, dekzand of loess te vervangen door een fysisch-chemische karakterisering. Deze discrete variabele kan daardoor worden vervangen door een kwantificeerbare variabele. Tot de karakterisering behoren die parameters welke bepaald worden bij algemeen bemestingsonderzoek. Het betreft onder meer de textuur (de gehalten aan lutum, afslibbare delen, silt en zandfracties), de gehalten aan organische stof, vrije koolzure kalk en de pH.

Gewas en meststofvorm zijn discrete variabelen en oefenen effect uit op het niveau van  $\Delta P$ .

### *Interacties*

Interacties tussen twee of meerdere variabelen kunnen optreden. In theorie kunnen in vergelijking (2) tussen twee verklarende variabelen 36 interacties worden geformuleerd; tussen drie variabelen is dat aantal 84. Het is niet zinvol om een dergelijk groot aantal interacties te onderzoeken. In het algemeen zijn namelijk bij observationeel onderzoek de parameters van interacties niet goed te schatten omdat tussen de variabelen onvoldoende onderlinge variatie voorkomt. Zinvol is het om alleen die interacties bij het onderzoek te betrekken, die belangrijk zijn voor de hypothesevorming bij het optreden van onvermijdbare fosfaatverliezen.

Een belangrijke interactie is die tussen de initiële P-toestand en de P-balans. Prummel (1974) leidde nl. uit zijn bewerking van veeljarige fosfaathoeveelheden veldproeven af dat op P-rijkere gronden een sterkere toename in het Pw-getal optrad dan bij P-armere gronden. Bij het achterwege laten van P-bemesting trad op P-rijke gronden echter een scherpere daling van het Pw-getal op dan op P-arme gronden. Het effect van de P-balans op  $\Delta P$  is volgens dit onderzoek afhankelijk van de initiële P-toestand. Tevens is er een apart effect van de netto aanvoer van P en de netto afvoer van P. Het is daarom zinvol om onderscheid aan te brengen tussen positieve en negatieve P-balansen.

Een andere belangrijke interactie is die tussen bekalking en het Pw-getal. Prummel (1974) publiceerde resultaten van onderzoek naar effecten van bekalking op het Pw-getal. Hierbij werd een onderscheid tussen zure diluviale zandgrond en kalkrijke zeeklei aangetoond qua effect van bekalking of pH-KCl op de fosfaattoestand gemeten als Pw-getal. Bekalking verlaagde het Pw-getal in belangrijke mate op zand- en dalgrond (Prummel, 1974). Op kleigronden verhoogde daarentegen een bekalking het Pw-getal.



## 3. Methoden van onderzoek

### 3.1. Dataverzameling en -bewerking

#### 3.1.1. Dataverzameling

De statistische analyses zijn uitgevoerd met behulp van gegevens van veldproeven. Van een groot aantal veldproeven zijn data verzameld en tot één bestand samengevoegd. Deze veldproeven waren oorspronkelijk met een ander doel aangelegd. Deze onderzoeksdoeleinden zijn elders gegeven (Alblas, 1980; Korevaar, 1986; Den Boer et al., 1994a, 1994b; Van der Paauw, 1955; Postma, 1995; Prummel, 1958, 1974; Schröder et al., 1985a, 1985b, 1985c; Stichting Voorlichtingsdienst voor Superfosfaat, 1958).

De meetgegevens van de veldproeven maken het mogelijk om schattingen uit te voeren van het landbouwkundig P-verlies en de (optredende) spreiding daarin. Per veldproef per proefjaar zijn voor dit doel naast algemene gegevens - proefveldcode, locatie, grondsoort, grondwaterstand - de volgende gegevens verzameld en ingevoerd.

- Behandeling;
- Gewas;
- Pw-getal en/of P-Al-getal aanvang;
- Tijdstip van bemonstering teeltlaag bij aanvang;
- Pw-getal en/of P-Al-getal na de oogst;
- P-gift als kunstmest;
- P-gift als dierlijke mest;
- Meststofvorm;
- Tijdstip van bemesting;
- Tijdstip van zaaien, poten of planten;
- Tijdstip van de oogst;
- P-afvoer met oogstprodukten of bij ontbrekend gegeven de opbrengst aan oogstprodukt (vers);
- Kalkgift;
- Vorm van de kalkmeststof;
- Tijdstip van bekalking;
- Dikte van de teeltlaag;
- Algemeen grondonderzoek van de veldproef: textuur (lutum, afslibbare delen, silt, zandfracties), gehalten aan organische stof en vrije koolzure kalk, en pH-KCl en/of pH-H<sub>2</sub>O.

Deze informatie is afhankelijk van de beschikbare gegevens per veldproef per veldje of per object verzameld. Zo'n verzameling gegevens per veldje op per object wordt aangeduid als observationele eenheid.

### 3.1.2. Databewerking

De incubatieduur van de meststof is berekend door het verschil te nemen tussen het tijdstip van bemesting en het tijdstip van bemonstering van de teeltlaag na de oogst. Indien er niet bemest is, kan er ook niet van incubatieduur worden gesproken. Hier is rekening mee gehouden door alleen bij bemesting de incubatieduur in het model op te nemen.

De noodzakelijke gegevens - zie § 3.1.1 - bleken niet bij alle veldproeven bekend te zijn waardoor een schatting noodzakelijk werd om niet teveel van de verzamelde data te moeten offeren. Daarnaast was het noodzakelijk om van enige kwalitatieve verklarende variabelen - meststofvorm en gewas - de omvang te beperken. Vergelijking van alle meststofvormen of gewassen vergt nl. meer vrijheidsgraden dan voor een adequate toetsing beschikbaar waren. Een databewerking werd daardoor noodzakelijk voor de volgende omstandigheden.

#### *Ontbrekende gegevens*

- \* Wanneer gegevens over het tijdstip van zaaien, poten, planten, bemonstering van de teeltlaag of het tijdstip van de oogst ontbraken is aangenomen dat de activiteit op de 15<sup>e</sup> dag van de aangegeven maand werd uitgevoerd.

#### *Vereenvoudigingen*

- \* Op veldproeven waar per seizoen twee of meer bemestingen met fosfaat en/of oogsten hadden plaatsgevonden, is de incubatieduur geschat door aan te nemen dat alle meststof op het eerste tijdstip van bemesting is toegediend. Als oogsttijdstip is de dag genomen waarop de laatste oogst van dat seizoen plaatsvond. Deze vereenvoudiging werd met name bij veldproeven met permanent grasland uitgevoerd te weten: BZ25, PR891, ZV30, PR3537 en PR3540.
- \* Indien drijfmest op verschillende tijdstippen in het seizoen werd toegediend, is één - gewogen - bemestingstijdstip berekend. Daartoe zijn de tijdstippen gemiddeld onder weging van de P-gift. Deze vereenvoudiging is gehanteerd bij de veldproeven AGM621, BEM712, BEM747, IB2205, KL704, PAGV31, PAGV32, PAGV33 (twee bestanden), RH1100, RH1200, WR600 en WS451.
- \* De textuur van de grond bleek als gevolg van de verschillen in perioden van aanleg en uitvoering van de veldproeven ongelijke klassen te omvatten. Bovendien ontbraken relevante klassen. Alle granulaire deeltjes groter dan 16  $\mu\text{m}$  zijn zand genoemd. De siltfractie - 16 tot 50  $\mu\text{m}$  - bleek te schaars gemeten te zijn om hiermee rekening te kunnen houden.
- \* In het bestand waren 59 verschillende soorten fosfaatmeststoffen vertegenwoordigd. Het aantal waarnemingen aan  $\Delta\text{P}$  was te laag om een betrouwbare schatting per soort meststof te verkrijgen. Een vereenvoudiging door hergroeperen werd daarop aangebracht. Onderscheiden zijn:

- in water oplosbare fosfaten (superfosfaten, tripelsuperfosfaten en mengsels van stikstof, fosfaat en kali);
  - dicalciumfosfaten;
  - thomasslakkenmeel en meststoffen op basis van thomasslakkenmeel;
  - natuurfosfaten (ruwe fosfaten);
  - dierlijke meststoffen (runderdrijfmest, stalmest);
  - mengsels van dierlijke meststoffen en kunstmeststoffen (in water oplosbare fosfaten).
- \* Het aantal gewassoorten bedroeg 46. Ook dit aantal was te hoog om per gewassoort een betrouwbare berekening te kunnen uitvoeren. Een vereenvoudiging door hergroepering moest worden aangebracht. Aanvankelijk zijn daarbij drie alternatieven geformuleerd, nl. een indeling volgens de huidige bemestingsadviezen, een indeling gebaseerd op specifieke wortellengte (cm wortel per  $\text{cm}^3$  grond) en een indeling op basis van drie gewasgroepen (hakvruchten, granen en overigen). Vervolgens is onderzocht of voldoende informatie in de opnieuw gegroepeerde data aanwezig was en of de omvang per gewasgroep over het bereik voldoende was. Dat bleek niet het geval te zijn voor de gewasgroepindeling volgens de bemestingsadviezen of op basis van specifieke wortellengte. Sommige groepen waren qua omvang belangrijk groter dan andere groepen. De indeling volgens hakvruchten, granen en overige gewassen was redelijk verdeeld en werd om die reden gehanteerd.

Daarnaast zijn data uit het databestand verwijderd om ongecontroleerde variatiebronnen uit te sluiten:

- \* Gegevens van veldproeven waarbij de fosfaatbemesting vlak voor de eerste bemonstering van de teeltlaag had plaatsgevonden zijn uit het databestand verwijderd om ongewenste (en oncontroleerbare) verstrengeling tussen P-gift en  $\Delta P$  uit te sluiten.
- \* Bij reparatiebemesting met P zal de nawerking van residuair P eveneens bijdragen aan  $\Delta P$ . Ook deze ongewenste en ongecontroleerde verstrengeling tussen P-gift en  $\Delta P$  is uitgesloten door observationele eenheden die betrekking hadden op een nawerking van een P-gift hoger dan 500 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$  kg per ha niet in de analyse te betrekken.
- \* Het verschil tussen het tweede en het eerste bemonsteringstijdstip van de teeltlaag bleek zeer variabel; een aanzienlijke spreiding kwam voor (122-519 dagen). Aangezien niet verondersteld kan worden dat  $\Delta P_w$ -getal of  $\Delta P\text{-Al}$ -getal lineair veranderen in de tijd, is het onmogelijk de data op exact één jaar te standaardiseren. De spreiding werd daarop gereduceerd door alleen veranderingen in de fosfaattoestand in het onderzoek op te nemen mits niet teveel van een bemonsteringstijdvak van 365 dagen werd afgeweken. Een bereik van 315-415 dagen werd geaccepteerd ( $\sim 365 \pm 50$  dagen). Deze keuze berust op de - ten dele pragmatische - overweging om niet teveel data op te offeren ten gunste van een zo nauwkeurig mogelijke standaardisatie van de dimensie van  $\Delta P_w$ -getal of  $\Delta P\text{-Al}$ -getal.

## 3.2. Forfaitaire gehalten

Tijdens de verzameling van de data bleek het aantal gemeten gegevens over de fosfaatafvoer belangrijk lager te zijn dan het aantal opbrengstgegevens. Onderzocht is of gebruik kon

worden gemaakt van berekende P-afvoeren. De berekening berust op de gemeten opbrengst aan vers produkt vermenigvuldigd met het forfaitair P-gehalte (Anonymus, 1993). Om te onderzoeken of er systematische verschillen aanwezig zijn tussen gemeten en berekende P-afvoeren, zijn drie toetsen uitgevoerd. Allereerst is een Student t-toets uitgevoerd om te onderzoeken of het verschil tussen de gemeten en de forfaitaire P-gehalten afwijkt van nul ( $\alpha = 0.05$ ). Vervolgens zijn per gewas de verschillen tussen de gemeten en de op basis van forfaitaire gehalten berekende P-afvoer met oogstproducten op soortgelijke wijze getoetst en tenslotte is deze vergelijking per proefveld uitgevoerd.

### 3.3. Textuur

Eveneens bleken gegevens van de textuur bij een deel van de veldproeven te ontbreken. Het gegeven ontbrak vooral bij zandgronden waardoor kwantitatieve vergelijking van grondsoorten - met name zandgronden t.o.v. kleigronden - niet mogelijk was. Om toch enige informatie over de invloed van de textuur op het  $\Delta P$  te verkrijgen zijn eerst op basis van de plattegronden van de veldproeven en topografische kaarten (1:25.000) de proefvelden gelokaliseerd. Vervolgens zijn de bijbehorende bodemkaarten van de Nederlandse bodemkaarten met schaal 1:50.000 afgelezen. De gehalten aan afslibbare delen zijn verkregen uit de bij de kaarten behorende fysisch chemische analyses (Bakker & Schelling, 1966). Vervolgens is getoetst of de van de kaarten afgeleide gehalten aan afslibbare delen afweken van de gemeten gehalten d.m.v. lineaire regressie met t-toetsen voor de parameterschattingen. De werkhypothese daarbij was of het intercept en de hellingshoek afweken van resp. 0 of 1 ( $\alpha = 0,05$ , tweezijdig).

### 3.4. Schatten van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies

De verzameling veeljarige veldproeven is opgevat als een steekproef, waardoor ~~hier~~ wij hier spreken van observationeel statistisch onderzoek. Elke aangeleverde dataset - hetzij per veldje, hetzij per object - is opgevat als een onafhankelijke observationele eenheid. Elke eenheid bevat in beginsel de in § 3.1 gegeven lijst van gegevens. De grondsoort van iedere veldproef is gekarakteriseerd met gegevens van algemeen grondonderzoek. Binnen een veldproef bepalen met name de P-toestand en P-balans de schatting van het onvermijdbaar verlies, omdat hierover de meeste informatie beschikbaar is; overige variabelen bepalen een niveauverschil in  $\Delta P_w$ -getal of  $\Delta P_{-A}$ -getal.

De formulering van het statistisch model om een schatting te verkrijgen van het landbouwkundig onvermijdbaar verlies is gewijzigd t.o.v. een eerder gegeven model (Ehlert et al., 1994) De wijziging berust op de splitsing van de fosfaatbalans in een verklarende variabele voor negatieve waarden en een voor positieve waarden (zie § 2.3.2). Het gedrag van de fosfaattoestand bij een verrijking van de teeltlaag is nl. niet gelijk aan die bij een verschraling. Een fosfaattoestand wordt minder snel verrijkt dan verschraald. Bovendien is initiële fosfaattoestand hierop van invloed. Daarnaast is de kwalitatieve verklarende variabele grondsoort vervangen door kwan-

titatieve variabelen gebaseerd op de meting van de gehalten aan afslibbare delen ( $< 16 \mu\text{m}$ ), zand, organische stof, vrije koolzure kalk en van de pH-KCl. De totale verzameling gegevens is opgedeeld in drie deelverzamelingen welke de huidige vormen van landbouwkundig gebruik omvatten te weten: 'Pw-getal en akkerbouwland', 'P-AI-getal en akkerbouwland' en 'P-AI-getal en grasland'.

Per deelverzameling zijn analyses uitgevoerd en heeft een selectie van de verklarende variabelen plaatsgevonden, waarbij dus op voorhand al een aantal variabelen afviel. De criteria voor selectie zijn de volgende geweest.

Om een schatting van landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen (OPV) te kunnen uitvoeren dienen ten minste  $\Delta P$ , de initiële fosfaattoestand en de P-balans bekend te zijn. In de analyse is nl. opgelegd dat de P-balans (zowel positief als negatief), de initiële P-toestand en hun onderlinge interacties in het model moeten voorkomen. Dit is het zogenoemde basismodel. De variabele laagdikte is altijd in het model opgenomen bij de deelverzamelingen 'Pw-getal voor akkerbouwland' en 'P-AI-getal voor akkerbouwland'. Dit is gedaan ter standaardisatie, zodat uitspraken m.b.t. OPV voor deze deelverzamelingen altijd zijn gebaseerd op een laagdikte van 20 cm. Uit oogmerk van eenvoud is de parameter laagdikte zo in het model opgenomen dat de constante C uit vergelijking (2) hoort bij laagdikte van 20 cm. Voor de deelverzameling 'P-AI-getal voor grasland', - dit is exclusief kunstweide - zijn uitspraken gebaseerd op laagdikte van 5 cm. Andere laagdikten kwamen niet voor, zodat laagdikte als variabele ook niet in het model kon worden opgenomen. PR3537 en PR3540 vormen hierop een uitzondering maar worden om andere redenen afzonderlijk behandeld.

De verklarende variabelen van algemeen grondonderzoek vertonen doorgaans nauwelijks spreiding binnen een proefveld. Bij de toepassing van regressie-analyse wordt als vuistregel gehanteerd dat per verklarende variabele tenminste 10 waarnemingen beschikbaar moeten zijn. Daarom is gesteld dat een variabele van algemeen grondonderzoek op tenminste 10 veldproeven bekend moet zijn met een redelijk bereik. Met een redelijk bereik wordt bedoeld dat de desbetreffende waarnemingen behoorlijk verdeeld over het maximaal mogelijke bereik voorkomen. Bij een te gering aantal veldproeven bestaat het reële gevaar dat een niveauverschil in  $\Delta P$  aan een bepaalde variabele wordt toegeschreven terwijl het in feite een verschil in proefvelden betreft. Om soortgelijke redenen zijn de variabelen meststofvorm en gewas alleen bekeken indien combinaties van verschillende meststofvormen of gewassen aanwezig waren binnen één veldproef. Ook hier is anders het risico te groot dat verschillen in meststofvorm of gewas aan variabelen worden toegeschreven terwijl die berusten op verschillen tussen veldproeven.

Voor de verklarende variabelen incubatieduur en kalkgift zijn, zoals ook voor initiële P-toestand en P-balans, de veldjes binnen een proefveld als observationele eenheden te beschouwen. Voor deze variabelen is wel variatie binnen veldproeven zodat ook met minder dan 10 veldproeven nog voldoende informatie beschikbaar is.

Alle verklarende variabelen waarvoor voldoende informatie in de deelverzameling beschikbaar was, zijn onderzocht. In het uiteindelijk model zijn, naast het basismodel - en laagdikte -, alleen die variabelen opgenomen die een significante bijdrage leveren aan het verklaren van de variantie in  $\Delta P$ . Per deelverzameling wordt zo een model verkregen dat is gebaseerd op een voldoende aantal waarnemingen en op voldoende informatie met redelijk bereik en goede verdeling over dat bereik per verklarende variabele. Met behulp van dit model kan het landbouwkundig onvermijdbaar verlies met standaardfout worden geschat.

De verzamelde data waren afkomstig van divers onderzoek zodat de bijdrage per veldproef aan de deelverzameling ongelijk was. Aangezien een veldje van een veldproef als observationele eenheid werd beschouwd, is dit over het algemeen geen probleem. In een enkel geval is een bepaald proefveld echter zwaar oververtegenwoordigd. Om het model en de daarop gebaseerde uitspraken m.b.t. het OPV niet vooral van één proefveld te laten afhangen, is er voor gekozen een dergelijk proefveld te wegen. De waarnemingen van een naar verhouding te omvangrijk proefveld zijn daarbij zo gewogen dat het proefveld als geheel ongeveer even zwaar weegt als de andere grotere veldproeven in de desbetreffende deelverzameling. Uiteraard is gecontroleerd of weging niet teveel invloed had op het model en de parameterschattingen.

De berekening van het landbouwkundig onvermijdbaar verlies wordt gegeven bij de geselecteerde modellen. De standaardfout van deze schatting en het betrouwbaarheidsinterval zijn in principe volgens dezelfde methode berekend als die gegeven door Ehlert et al. (1994).

De parameterschattingen van de regressieanalyses zijn gebruikt om het verloop van de P-toestand in de tijd te simuleren, bij diverse P-balansen en een aantal opgelegde - nader aan te geven - condities. Het verloop van de P-toestand is berekend door per jaar  $\Delta P_w$ -getal of  $\Delta P_{AI}$ -getal vast te stellen en op basis daarvan de nieuwe initiële P-toestand van het volgende jaar vast te stellen. Het verloop van de P-toestand kan zo over een bepaalde periode worden berekend. Daarnaast zouden we graag een indruk krijgen van de spreiding rond dit verloop. Het is mogelijk een betrouwbaarheidsinterval rond het verloop op te stellen door rekening te houden met de spreiding en de afhankelijkheid van de (uit de regressie verkregen) parameterschattingen. Er zijn duizend sets van parameterwaarden getrokken waarbij de parameterschattingen hierbij multivariaat normaal verdeeld verondersteld zijn met bekende variantie en covariantie (Dagpunar, 1988). Per trekking is het P-verloop over een bepaalde periode berekend. De 95%, 90% en 80%-betrouwbaarheidsintervallen zijn verkregen door de resultaten te sorteren en resp. de 25e, 50e en 100e waarde te nemen voor de ondergrens en resp. de 975e, 950e en 900e waarde voor de bovengrens.

## 4. Resultaten

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van statistische analyses. De resultaten van de oriënterende analyses, uit de voortgangsrapportage ten behoeve van de Technische Projectgroep - zie Ehlert et al., 1994 -, hadden geen definitief karakter. Dit rapport bevat de eindresultaten van het observationeel statistisch onderzoek.

In § 4.1 staat het overzicht van de verzamelde data van veldproeven gegeven. Vervolgens worden in § 4.2 en § 4.3 de resultaten gegeven van onderzoek naar mogelijkheden om bij ontbrekende gegevens voor resp. de fosfaatafvoer en het gehalte aan afslibbare delen (deeltjesgrootte < 16 µm) gebruik te kunnen maken van andere gegevensbronnen. Op grond van het verschil in grondgebruik is onderscheid gemaakt tussen bouwland en grasland. In § 4.4 worden de modellen van statistisch onderzoek gegeven met schattingen voor landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen voor akkerbouwland. Het model voor het Pw-getal wordt gegeven in § 4.4.1 terwijl het model voor het P-AI-getal in § 4.4.2 wordt behandeld. De landbouwkundige onvermijdbare fosfaatverliezen voor grasland worden gegeven in § 4.5. Daarbij zijn drie situaties onderscheiden. In § 4.5.1 wordt het model gebaseerd op de veldproeven op zeeklei, dekzand en rivierklei gegeven. Vervolgens behandelt § 4.5.2 de veengraslanden. In § 4.5.3 wordt het resultaat voor de mestinjectieproeven gegeven. Tenslotte worden in § 4.6 de resultaten van berekeningen van het gesimuleerde verloop van de fosfaattoestand op bouwland en op grasland gegeven.

### 4.1. Overzicht van verzamelde veldproeven

Uiteindelijk zijn zevententachtig databestanden door de samenwerkende instellingen bijeengebracht. In één geval werden twee separate bestanden van één veldproef aangeleverd. Door aanleg van veldproeven met een verschillende proefopzet maar gelegen op dezelfde locatie heeft het uiteindelijke bestand betrekking op tachtig in principe onderling verschillende locaties. Een overzicht van de herkomst van de databestanden per partner wordt gegeven in bijlage 2.

Op basis van grondsoort kunnen uitspraken over onvermijdbare fosfaatverliezen (OVP) gedaan worden voor bouwland op zeeklei, dekzand en loess (zie selectiecriteria gegeven in § 3.4.). Voor grasland geldt dat alleen voor dekzand. Door gebruik te maken van gegevens van algemeen grondonderzoek kunnen bestanden van verschillende grondsoorten worden samengevoegd. Er is geen informatie beschikbaar over veenbouwland en grasland op duinzand, loess en dalgrond. Toepassing van resultaten van onderzoek naar deze ontbrekende grondsoorten en cultuurgebruiken is niet verantwoord.

Tabel 2. Aantal veldproeven per grondsoort en cultuur.

Grondsoort	Bouwland <sup>1</sup>	Grasland <sup>2</sup>	Totaal
Zeeklei	22	1	23
Dekzand	23 <sup>3</sup>	11	34
Duinzand	1	0	1
Rivierklei	7	3	10
Loess	10	0	10
Dalgrond	6	0	6
Veen	0	2	2
Totaal	69	17	86

<sup>1</sup> Één veldproef op bouwland op zeeklei had betrekking op intensieve vollegrondsgroenteteelt, de overige op akkerbouwmatige teelten.

<sup>2</sup> Grasland exclusief kunstweide.

<sup>3</sup> De veldproef te Mantinge omvatte 6 verschillende deelonderzoeken welke in de uiteindelijke analyse als aparte veldproeven zijn opgevat.

Het totale bestand bestaat uit 4923 observationele eenheden. Hiervan hebben 4376 betrekking op bouwland en 547 op grasland. Het bestand bevat dus met name informatie over bouwland; de informatie voor grasland is minder omvangrijk. Een voorwaarde om aan de analyse te kunnen bijdragen is dat  $\Delta P$  en de P-balans bekend moeten zijn. Deze informatie blijkt niet altijd beschikbaar te zijn. Eveneens ontbreken gegevens van algemeen grondonderzoek. De consequenties van deze ontbrekende gegevens zullen worden aangegeven bij de afzonderlijke resultaten van analyses welke gegeven worden in § 4.4 - 4.6. Omdat gegevens van chemisch gewasonderzoek en algemeen grondonderzoek ontbraken, zijn nadrukkelijk de mogelijkheden onderzocht om de afvoer van fosfaat met oogstprodukten te baseren op forfaitaire gehalten (Anonymus, 1993). Tevens is onderzocht of de analyses behorend bij de bodemkaartenheden konden worden gebruikt indien metingen ontbraken.

## 4.2. Forfaitaire gehalten

De uitbreiding van het databestand met gegevens van chemisch gewasonderzoek had geen wezenlijke invloed op de gemiddelde waarden en het bereik van de fosforgehalten (!) uitgedrukt in kg P per ton vers produkt. De resultaten voor de hakvruchten waren identiek aan die gegeven door Ehlert et al. (1994). Dit was ook het geval voor de fosforgehalten van de graankorrel. De fosforgehalten in het stro waren gemiddeld wat lager t.o.v. eerder gerapporteerde waarden. Hieraan is echter geen bijzondere betekenis gehecht. Gegevens over de grasopbrengsten ontbreken waardoor een dergelijke vergelijking voor grasland niet kon worden uitgevoerd.

Gemiddeld was er geen verschil aan te tonen tussen de werkelijk gemeten P-afvoer en de P-afvoer gebaseerd op de forfaitaire gehalten. Per proefveld echter waren de verschillen tussen de gemeten en de berekende P-afvoeren aanzienlijk. Nadere analyse per veldproef gaf namelijk



aan dat slechts vijftien van de zevenenveertig veldproeven dezelfde gemeten en berekende P-afvoer hadden. Daarentegen hadden veertien veldproeven systematisch een lagere gemeten P-afvoer t.o.v. de berekende waarden, terwijl achttien veldproeven systematisch een hogere gemeten P-afvoer hadden. Deze systematische verschillen hadden een bereik van -20,0 tot +18,4 kg fosfaat per ha. Een eenduidige oorzaak voor deze systematische verschillen kon niet worden achterhaald. Noch de P-toestand van de bouwvoor, noch de P-gift konden de mate en richting van afwijking t.o.v. de gemiddelde waarde verklaren. Omdat deze systematische afwijkingen de schatting van het landbouwkundig onvermijdbaar P-verlies systematisch verlagen of verhogen, berusten de hierna volgende schattingen op gemeten P-afvoeren.

### 4.3. Textuur

De overgang van de kwalitatieve variabele grondsoort naar een kwantitatieve variabele op basis van meetgegevens van algemeen grondonderzoek werd bemoeilijkt door het ontbreken van essentiële meegegevens van o.a. textuur en vrije koolzure kalk. Om toch oriënterende statistische berekeningen met textuur als verklarende variabele te kunnen uitvoeren, werden bodemkaarten met bijbehorende fysisch-chemische analyses gebruikt. Op basis van de plattegronden van veldproeven met hun locatie werd m.b.v. bodemkaarten afgeleid wat de gehalten aan afslibbare delen en vrije koolzure kalk waren. Het gehalte aan vrije koolzure kalk was nodig om het gehalte aan afslibbare delen te herleiden van percentage minerale delen naar het percentage in grond. De analyse is uitgevoerd op basis van gemiddelde gemeten waarden voor afslibbare delen per veldproef. Er bestond een sterk lineair verband tussen de afgelezen waarde voor afslibbare delen en de gemeten waarde van veldproeven (percentage verklaarde variantie was 89,7). Het intercept ( $Y_0$ ) week significant af van nul en de hellingshoek ( $\alpha$ ) significant van 1 ( $Y_0 = 2,95$  met  $se_{y_0} = 1,43$ ;  $\alpha = 0,9024$  met  $se_{\alpha} = 0,0437$ ). De fout bij het gelijkstellen van afgelezen waarden aan gemeten waarden voor afslibbare delen is echter bij lage gehalten (< 10%) klein in verhouding tot de herhaalbaarheid van de bepaling van de afslibbare delen (ca. 3% absoluut). Ondanks deze afwijking is bij veldproeven op zandgrond gebruik gemaakt van fysisch-chemische analyses afkomstig van kaarteenheden bij het ontbreken van relevante textuurmetingen.

### 4.4. Schatting van landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen voor bouwland

Met water - Pw-getal - wordt beduidend minder fosfaat uit grond geëxtraheerd dan met ammoniumlactaat-azijnzuur (P-Al-getal). Deze extracties onderscheiden verschillende fosfaatfracties uit grond hetgeen consequenties kan hebben bij de schatting van de onvermijdbare fosfaatverliezen. In deze statistische analyse wordt daarom onderscheid aangebracht tussen verliezen gebaseerd op het Pw-getal en die op basis van het P-Al-getal.

#### 4.4.1. Pw-getal

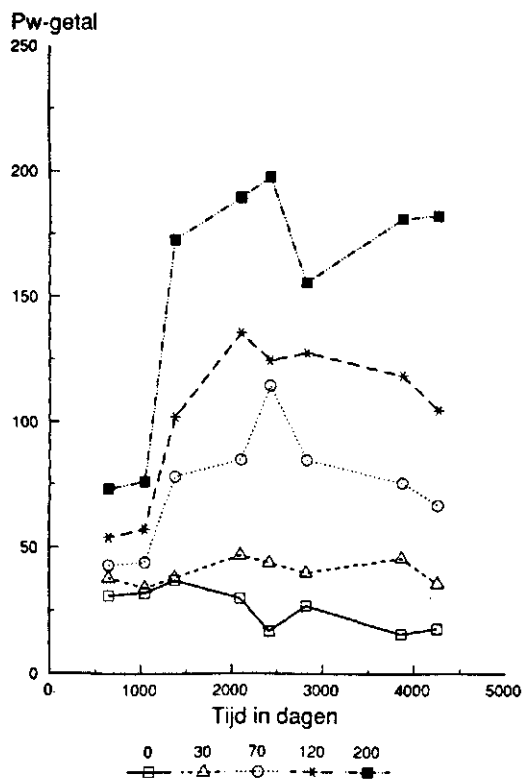
Na restrictie op  $\Delta Pw$ -getal en een bekende P-balans (P-gift – P-afvoer) bleken 525 observationele eenheden beschikbaar te zijn voor de deelverzameling 'Pw-getal en bouwland'. Na uitsluiting van waarnemingen met een te groot verschil tussen tijdstippen van bemonstering en waarnemingen met extreem hoge P-giften in het voorliggende jaar, bleken nog 342 observationele eenheden beschikbaar te zijn. Deze eenheden waren afkomstig van 35 veldproeven. Deze veldproeven zijn: D179, D180, IB1591, IB1747, IB1749, IB1750, L803, L806, L936, L942, L949, L958, L961, MB5, NZH147, NZH518, OB3049, OB3106, OO1088, PAGV1801, PAGV31, PAGV32, PAGV33, PR87, U366, WB1701, WF387, WF388, ZGE384, ZGR592, ZHE1044, ZHE294, ZNH100, ZVL133 en Z980.

Een oriëntatie naar het verloop van het Pw-getal in de tijd per veldproef gaf een aantal verschillen te zien (figuren 1, 2 en 3). Door een P-gift die belangrijk hoger was dan de P-afvoer steeg het Pw-getal. In de meeste gevallen - 20 veldproeven - nam deze stijging af bij voortschrijding van de tijd en P-bemesting (figuur 1). Bij tien veldproeven bleef daarentegen het Pw-getal bij benadering rechtevenredig stijgen met de P-gift (figuur 2). De veldproeven waarbij de stijging van het Pw-getal afnam hadden doorgaans een hogere P-toestand (gemiddeld Pw-getal ca. 30 mg  $P_2O_5$  per liter grond) t.o.v. de tweede groep veldproeven (gemiddeld Pw-getal ca. 16). In drie gevallen - IB1747, IB1749 en OO1088 - blijkt een overschot aan P aanvankelijk onvoldoende te zijn om de initiële P-toestand te handhaven; pas na enige jaren stelt zich een evenwicht in (figuur 3). In twee gevallen was een trend in het verloop van het Pw-getal niet waarneembaar. Zonder P-bemesting daalt doorgaans het Pw-getal en schommelt na enige jaren rond een Pw-niveau van ca. 10-20 mg  $P_2O_5$  per liter grond. Het niveau blijkt afhankelijk te zijn van de uitgangstoestand. Bij zeer lage initiële P-toestand (Pw-getal < 10 mg  $P_2O_5$  per liter grond) blijft het Pw-getal schommelen rond de getalswaarde tien. Bij hogere initiële P-toestanden daalt het Pw-getal tot waarden rond de twintig.

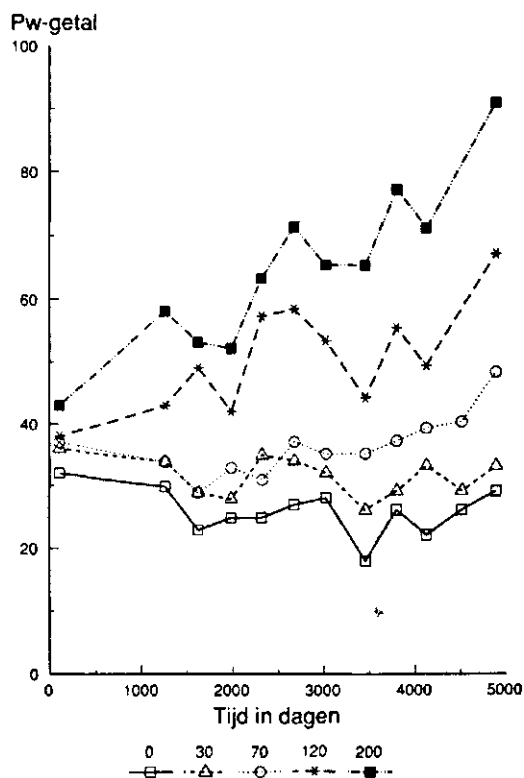
Het resultaat van het onderzoek naar de mogelijkheden om andere verklarende variabelen zoals parameters van algemeen grondonderzoek, incubatieduur, laagdikte, gewas en meststofvorm op te nemen in het statistisch model wordt gegeven in tabel 3. De condities van selectie zijn gegeven in § 3.4.

De initiële P-toestand (Pw) en de P-balans hebben een breed bereik, evenals de incubatieduur. Bovendien hebben deze een redelijke verdeling over het bereik (tabel 3). Daarentegen was er weinig variatie in de laagdikte van de bemonsterde bouwvoor. Met name de laagdikte van 20 cm kwam veelvuldig voor. Toch is de laagdikte als variabele opgenomen in het model teneinde een standaardisatie uit te voeren naar een laagdikte van 20 cm (zie ook § 3.4).

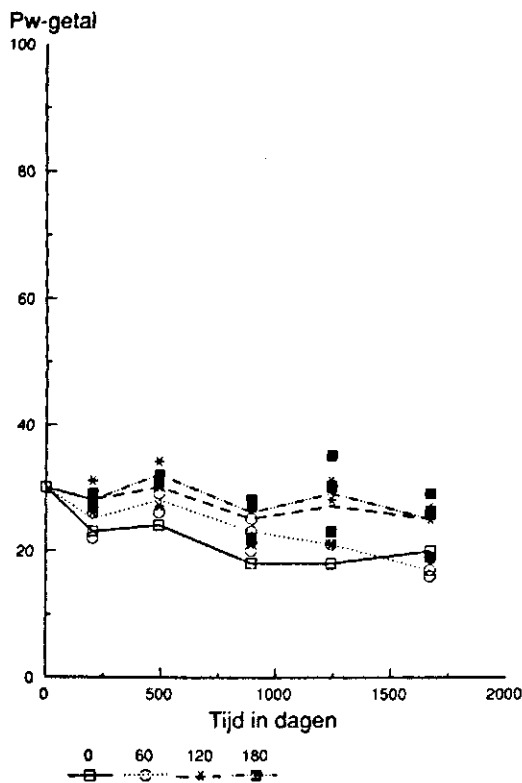
De gegevens van algemeen grondonderzoek waren incompleet en/of hadden een minder gunstige verdeling over het bereik. Het gehalte aan organische stof was gemeten in alle veldproeven, maar gehalten hoger dan 7% waren vrijwel afwezig. Het gehalte aan afslibbare delen was eveneens bekend van alle beschikbare veldproeven - zie ook § 4.3 - met een redelijke verdeling tot 40%. Voor silt en lutum waren geen gegevens voorhanden. De gehalten aan zand - hier gedefinieerd als de deeltjes groter dan 16  $\mu m$  (zie § 3.2.) - waren bekend van tweeëntwintig veldproeven maar slechts drie veldproeven hadden een gehalte lager dan 50%. Vrije koolzure kalk was bekend voor negentien veldproeven maar met een slechte verdeling; niet minder dan dertien veldproeven hadden namelijk een gehalte kleiner dan 1%. De pH- $H_2O$  was



Figuur 1. Het verloop van het Pw-getal voor de veldproef D178 op dalgrond bij verschillende jaarlijkse P-giften (□ = 0, △ = 30, ○ = 70, \* = 120 en ■ = 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar)



Figuur 2. Het verloop van het Pw-getal voor de veldproef D179 op dekzand bij verschillende jaarlijkse P-giften (legenda zie figuur 1)



Figuur 3. Het verloop van het Pw-getal voor de veldproef IB1747 op dekzand bij verschillende jaarlijkse P-giften (□ = 0, ○ = 60, \* = 120, ■ = 180 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar)

bekend voor vierentwintig veldproeven; de pH-KCl voor zestien veldproeven. Voor beide parameters was de verdeling van de veldproeven over het bereik goed.

De deelverzameling voor Pw-getal bleek alleen voor de vergelijking tussen geen bemesting en bemesting met in water oplosbare meststofvormen (tripelsuperfosfaat, superfosfaat en in water oplosbare NPK-meststofvormen) voldoende informatie te bevatten; de overige meststofvormen waren slecht vertegenwoordigd. Dat wil zeggen dat voor individuele veldproeven wel een vergelijking kan worden uitgevoerd voor specifieke meststofvormen, maar een opname in een algemene analyse op basis van de zesendertig geselecteerde veldproeven was niet mogelijk. Het risico dat variatie in  $\Delta Pw$  wordt verklaard door meststofvorm, terwijl dit eigenlijk aan andere effect(en) moet worden toegeschreven, was te groot.

De hakvruchten (gewasgroep één) kwamen vaker voor dan de graangewassen (gewasgroep twee); de overige gewassen (gewasgroep drie) waren t.o.v. de eerste twee gewasgroepen ondervertegenwoordigd. Bovendien werd de omvang van gewasgroep drie met name bepaald door de veldproef PAGV1801. Gewasgroep één was vooral afkomstig van AB-DLO-gegevens; gewasgroep twee vooral van PAGV-gegevens. Ook deze verdeling biedt geen perspectief voor opname in het model.

Tabel 3. Overzicht van de gegevens van de deelverzameling van veldproeven op akkerbouwland en Pw-getal

Verklarende variabelen	Aantal waarnemingen	Aantal veldproeven	Gemiddelde	Bereik	Verdeling bereik	Dominante fractie
<i>Kwantitatieve variabelen</i>						
Pw <sub>i</sub> <sup>1</sup>	342	35	40	4- 132	Goed	Geen
P-balans <sup>2</sup>	342	35	75	-91- 661	Goed	Geen
Laag <sup>3</sup>	314	34	20	10- 30	Matig	20
Organische stof <sup>4</sup>	342	35	4,7	1- 15	Matig	< 7
Afslibbare delen <sup>4</sup>	342	35	17	1- 74	Matig	< 40
Lutum	0	0	-	-	-	-
Silt	0	0	-	-	-	-
Zand <sup>4</sup>	174	22	67	16- 91	Matig	> 50
CaCO <sub>3</sub> <sup>4</sup>	187	19	2,7	0- 11	Matig	< 1
pH-H <sub>2</sub> O	163	24	5,9	5- 8	Goed	Geen
pH-KCl	116	16	5,3	4- 7	Goed	Geen
Incubateduur <sup>5</sup>	338	34	213	105-358	Goed	Geen
Kalkgift <sup>6</sup>	342	35	25	0-600	Slecht	0
<i>Kwalitatieve variabelen</i>						
Meststofvorm <sup>7</sup>	342	35	-	0- 6	Slecht	0 en 1
Gewas <sup>8</sup>	342	35	-	1- 3	Matig	1 en 2

<sup>1</sup> [mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond]

<sup>2</sup> [kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha]

<sup>3</sup> [cm]

<sup>4</sup> [% van grondmonster]

<sup>5</sup> [dagen]

<sup>6</sup> [kg zuurbindende waarde (ZBW) per ha]

<sup>7</sup> Meststofvormen gegroepeerd naar oplosbaarheid:

0 = geen meststof (onbemest met fosfaat);

1 = in water oplosbare fosfaatmeststoffen;

2 = dicalciumfosfaten;

3 = thomasslakkenmeel en meststoffen op basis van thomasslakkenmeel;

4 = natuurfosfaten (ruwe fosfaten);

5 = dierlijke meststoffen;

6 = mengsels van dierlijke meststoffen en in water oplosbare fosfaatmeststoffen.

<sup>8</sup> Gewassen gegroepeerd naar hakvruchten, graangewassen en overige:

1 = hakvruchten;

2 = graangewassen;

3 = overige gewassen.

Uiteindelijk is de overkoepelende analyse uitgevoerd op basis van de verklarende variabelen:

1. initiële fosfaattoestand ( $Pw_i$ );
2. P-balans (opgedeeld in een negatieve en een positieve balanspost);
3. hun onderlinge interactie;
4. laagdikte;
5. de incubatieduur;
6. het gehalte aan afslibbare delen;
7. het gehalte aan organische stof;
8. de pH- $H_2O$ ;
9. de pH-KCl.

Van deze variabelen bleek alleen de incubatieduur significant bij te dragen aan de verklaring van de variatie in  $\Delta Pw$ -getal. Ook de kwadratische componenten van de pH's gaven geen bijdrage aan verklaring van de variatie. Op grond van deze resultaten van analyse werd als eindresultaat het statistisch model met vergelijking (3) verkregen.

$$\Delta Pw = C_0 + \alpha * P\text{-balans}_{\text{positief}} + \epsilon * P\text{-balans}_{\text{negatief}} + \gamma * Pw_i + \delta_1 * (Pw_i * P\text{-balans}_{\text{positief}}) + \delta_2 * (Pw_i * P\text{-balans}_{\text{negatief}}) + \eta * \text{Laagdikte} + \theta * P * \text{Incubatieduur} + \xi \quad (3)$$

Met:

- $\Delta Pw$  = de verandering in  $Pw$ -getal na één teeltseizoen [mg  $P_2O_5$  per liter grond per jaar];
- $P\text{-balans}_{\text{positief}}$  = de fosfaatbalans wanneer de P-gift groter is dan de P-afvoer met oogstprodukten [kg  $P_2O_5$  per ha];
- $P\text{-balans}_{\text{negatief}}$  = de fosfaatbalans wanneer de P-gift kleiner of gelijk is dan de P-afvoer met oogstprodukten [kg  $P_2O_5$  per ha];
- $Pw_i$  = de initiële fosfaattoestand bij het begin van het desbetreffende proefjaar [mg  $P_2O_5$  per liter grond];
- Laagdikte = de laagdikte van de teeltlaag (bouwvoor) min 20, ter standaardisatie [cm];
- Incubatieduur = de duur van contact van meststoffosfaat met de grond, berekend als verschil tussen het tijdstip van de tweede bemonstering van de teeltlaag en het tijdstip van bemesting [dagen];
- P = schijnvariabele die ingevoerd is bij incubatieduur om onderscheid aan te brengen tussen wel of geen bemesting. Bij geen bemesting is P gelijk aan nul omdat in dat geval niet van een incubatieduur gesproken kan worden. Bij bemesting is P gelijk aan één.

In vergelijking (3) zijn  $C_0$ ,  $\alpha$ ,  $\epsilon$ ,  $\gamma$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\eta$  en  $\theta$  de te schatten parameters en is  $\xi$  de storingsterm.

Het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies (OPV) kan nu worden berekend bij  $\Delta Pw$  gelijk aan nul. Er is alleen sprake van een daadwerkelijk verlies als de P-balans positief is. Uit (3) volgt dan:

$$OPV = - (C + c * Pw_i + g * P * \text{Incubatieduur}) / (a + d_1 * Pw_i) \quad (4)$$

Met C, a, c, d1 en g als schatters van de parameters  $C_0$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta_1$  en  $\theta$ .

Mits  $OPV > 0$  geldt:

$$OPV = f(\hat{\beta})$$

met

$$\text{var}(OPV) = f'(\hat{\beta})^T * \text{vcov} * f'(\hat{\beta})$$

$$\text{met } \hat{\beta} = \begin{pmatrix} C \\ a \\ b \\ c \\ d_1 \\ d_2 \\ f \\ g \end{pmatrix} \text{ en } f'(\hat{\beta}) = \begin{pmatrix} -1/(a+d_1 * Pw_i) \\ (C+c * Pw_i + g * P * \text{Incubatie} \text{duur}) / (a+d_1 * Pw_i)^2 \\ 0 \\ -Pw_i / (a+d_1 * Pw_i) \\ (C+c * Pw_i + g * P * \text{Incubatie} \text{duur}) * Pw_i / (a+d_1 * Pw_i)^2 \\ 0 \\ 0 \\ -(P * \text{Incubatie} \text{duur}) / (a+d_1 * Pw_i) \end{pmatrix} \quad (7)$$

De parameterschattingen van vergelijking (3) worden in tabel 4 gegeven. Vergelijking (3) verklaart slechts 14,9% van de variatie in  $\Delta Pw$ ; toch is dit een significant gedeelte van de variatie.

In tabel 5 worden schattingen gegeven voor het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies voor verschillende initiële fosfaattoestanden en voor verschillende incubatieduren.

Naarmate de P-balans positiever is, stijgt het  $\Delta Pw$ -getal. Deze stijging neemt toe bij hogere initiële fosfaattoestand ( $Pw$ ). Naarmate het meststoffosfaat langer met de grond in contact is, daalt het  $\Delta Pw$ -getal. Naarmate de P-balans negatiever is, is het  $\Delta Pw$ -getal sterker negatief. Bij een hogere initiële fosfaattoestand treedt deze daling sterker op dan bij een lagere initiële fosfaattoestand (tabel 5).

Bij een gemiddelde incubatieduur van 210 dagen bedraagt het onvermijdbaar fosfaatverlies bij een voldoende fosfaattoestand ( $Pw$ -getal  $\sim 30$  mg  $P_2O_5$  per liter grond) zo'n 40 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar. Bij lagere toestanden neemt het verlies af; bij hogere fosfaattoestanden toe. Pas bij ruim voldoende fosfaattoestanden en bij incubatieduren groter of gelijk aan 210 dagen blijkt volgens deze analyse het OPV significant van nul af te wijken.

Tabel 4. Parameterschattingen behorend bij vergelijking (3) met standaardfout en de Student t-waarde voor de deelverzameling 'akkerbouwland en  $Pw$ -getal'

Variabele	Parameter-schatting	Schatting	Standaard-fout	t-waarde
Constante	C	3,80	1,87	2,04
P-balans <sub>positief</sub>	a	0,0194	0,0119	1,63
P-balans <sub>negatief</sub>	b	0,0298	0,0672	0,44
$Pw_i$	c	-0,0817	0,0325	-2,51
$Pw_i * P$ -balans <sub>positief</sub>	$d_1$	0,000290	0,000170	1,70
$Pw_i * P$ -balans <sub>negatief</sub>	$d_2$	0,00207	0,00177	1,17
Laagdikte <sup>1</sup>	f	-0,1272	0,0988	-1,29
Incubatieduur	g	-0,01196	0,00556	-2,15

<sup>1</sup> De laagdikte is gestandaardiseerd op 20 cm. In de regressieanalyse is deze standaardisatie opgenomen als Laagdikte = (Opgegeven laagdikte - 20).

Tabel 5. Het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies (OPV) bij verschillende initiële Pw-getalwaarden en incubatieduren met standaardfout (se) en betrouwbaarheidsinterval (B)

Initieel Pw-getal [ <sup>1</sup> ]	Incubatieduur [ <sup>2</sup> ]	OPV [ <sup>3</sup> ]	se [ <sup>3</sup> ]	B	
				ondergrens [ <sup>3</sup> ]	bovengrens [ <sup>3</sup> ]
5	180	- <sup>4</sup>	-	-	-
	210	-	-	-	-
	270	-	-	-	-
	350	38	59	-79	155
10	180	-	-	-	-
	210	-	-	-	-
	270	-	-	-	-
	350	54	49	-44	152
20	180	0	38	-76	75
	210	14	34	-54	81
	270	42	31	-20	104
	350	80	38	5	156
30	180	29	24	-20	77
	210	41	22	-3	86
	270	67	23	21	113
	350	101	33	36	166
40	180	52	20	12	92
	210	64	19	26	102
	270	87	21	45	129
	350	118	30	58	178
50	180	72	20	32	112
	210	82	19	44	121
	270	104	21	61	146
	350	132	29	74	189
60	180	88	22	45	132
	210	98	21	56	140
	270	118	22	73	162
	350	144	28	87	200
70	180	103	23	56	150
	210	112	23	66	157
	270	130	24	82	177
	350	154	29	96	211
80	180	115	25	64	165
	210	123	25	74	173
	270	140	25	89	191
	330	157	28	101	213

<sup>1</sup> [mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond]<sup>2</sup> [dagen]<sup>3</sup> [kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar]<sup>4</sup> OPV en se niet gegeven i.v.m. onverantwoorde extrapolatie



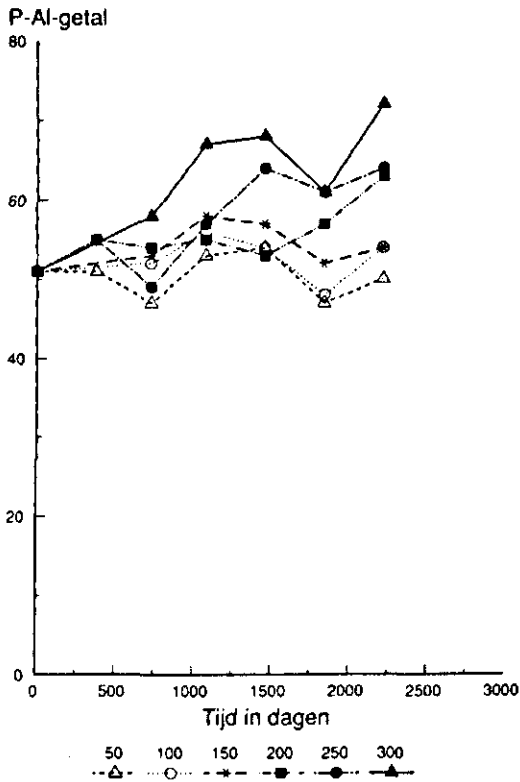
#### 4.4.2. P-Al-getal

De deelverzameling 'P-Al-getal en akkerbouwland' omvatte 361 waarnemingen afkomstig van tien veldproeven. Na uitsluiten van extreme fosfaatgiften en van waarnemingen met een te groot verschil tussen tijdstippen van bemonstering bleven 312 bruikbare waarnemingen over afkomstig van zeven veldproeven. Deze veldproeven waren: D179, Mantinge (zes blokken), PAGV1801, PAGV31, PAGV32, PAGV33 (twee deelverzamelingen) en ZGE384. Van deze veldproeven waren  $\Delta$ PAI en het initiële P-Al-getal (PAI) bekend. Van de proef te Mantinge zijn alleen gegevens van de jaarlijkse behandelingen zonder bemesting of die met superfosfaat gebruikt. De veranderingen van de fosfaattoestand van deze proef waren in een aantal gevallen tevens een gevolg van enkele reparatiebemesting (egalisatiebemesting) met natuurfosfaat.

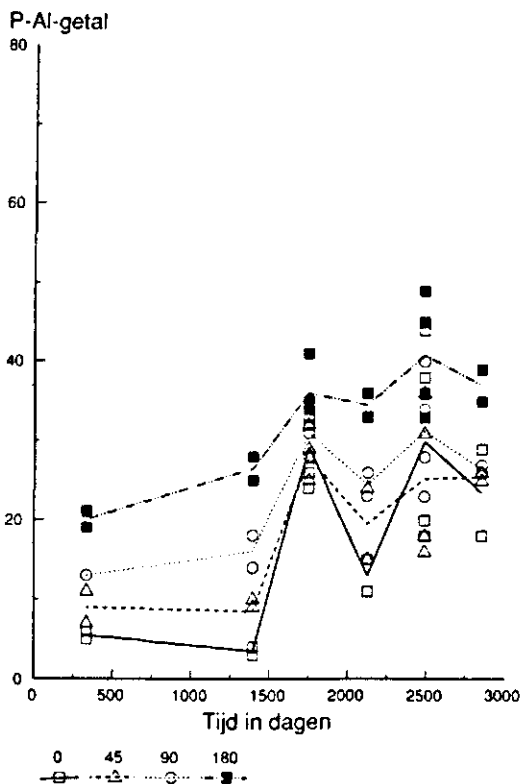
Het verloop van het P-Al-getal als functie van de P-gift was vergelijkbaar met het verloop van het Pw-getal. Ook bij deze veldproeven werd na verloop van tijd een afname van de stijging van het P-Al-getal waargenomen bij P-giften die hoger waren dan de onttrekking (figuur 4). In twee gevallen - D179 en ZGE384 - bleef het P-Al-getal rechtevenredig stijgen bij ruime P-giften. Zonder bemesting daalde het P-Al-getal de eerste jaren, waarna het op een bepaald niveau gehandhaafd bleef. Dat niveau was doorgaans rond het P-Al-getal 10-20 maar werd door de initiële P-toestand bepaald. Bij zeer lage P-toestanden ( $< 10$ ) bleef die zeer laag, bij hogere initiële P-toestanden bleef het P-Al-getal rond de twintig schommelen. Op D179 en op de diverse deelexperimenten te Mantinge steeg het P-Al-getal echter. Bij de experimenten te Mantinge viel dat samen met een reparatiebemesting met natuurfosfaat (figuur 5). Op dit proefveld werd de kalktoestand regelmatig gecontroleerd en, afhankelijk van het te telen gewas, bijgekalkt. De reparatiebemesting met natuurfosfaat viel samen met een onderhoudsbekalking. Bij D179 trad de - lichte - stijging op na bekalking. Het is bij dit proefveld echter niet uit te sluiten dat een stalmestgift van 20 ton per ha in het jaar voorafgaande aan de bekalking hieraan heeft bijgedragen. Door bekalking steeg de pH-KCl van ca. 4-4,5 naar 4,5-5,7. Beide veldproeven hadden dus naar huidige opvattingen een vrij zure bouwvoor.

In tabel 6 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde waarden en het bereik van de verschillende verklarende variabelen voor de zeven veldproeven. Voor alle variabelen geldt dat er in wezen te weinig veldproeven zijn om opname in het statistische model te rechtvaardigen. Door de verzameling van gegevens van de diverse proeven te Mantinge echter op te vatten als zes verschillende veldproeven, voldoet het aantal veldproeven aan de gestelde criteria (zie § 3.4). De verklarende variabelen laagdikte, organische-stofgehalte, incubatieduur en de kalkgift zijn bekend van alle veldproeven. De laagdikte schommelt rond de 20 cm; er is weinig variatie. Voor incubatieduur is er ook variatie binnen de veldproeven; voor organische stof geldt dit in mindere mate. De kalkgift varieert alleen bij de zes veldproeven te Mantinge; binnen die veldproeven is wel variatie aanwezig. De gehalten aan vrije koolzure kalk, silt, afslibbare delen, lutum en zand zijn van te weinig veldproeven bekend en kunnen daardoor niet worden opgenomen in het model. Dat geldt ook voor de pH-H<sub>2</sub>O en de pH-KCl.

De vergelijking van de meststofvormen is niet mogelijk, daartoe komt de combinatie van verschillende soorten binnen één veldproef te weinig voor. Ook gewasgroep 3 komt te weinig voor als combinatie met andere gewasgroepen. Daardoor vervalt ook de mogelijkheid om uitspraken te doen over effecten van gewasgroep 3 op variatie in  $\Delta$ PAI.



Figuur 4. Het verloop van het P-Al-gehalte van PAGV32/PR312/IB0075/ICW155.2 op dekzand bij verschillende jaarlijks toegediende giften aan runderdrijfmest ( $\Delta = 50$ ,  $O = 100$ ,  $*$  = 150,  $\blacksquare = 200$ ,  $\bullet = 250$  en  $\blacktriangle = 300$  ton runderdrijfmest per ha per jaar)



Figuur 5. Het verloop van het P-Al-gehalte van blok A van de veldproef te Mantinge bij verschillende jaarlijks toegediende P-giften ( $\square = 0$ ,  $\Delta = 45$ ,  $O = 90$  en  $\blacksquare = 180$  kg  $P_2O_5$  per ha per jaar). Ongeveer 1550 dagen na aanleg is een reparatiebemesting met natuurfosfaat uitgevoerd, variërend van 0-600 kg  $P_2O_5$  per ha. Gelijktijdig werd een onderhoudsbekalking uitgevoerd; er werd zeer regelmatig bekalkt (vrijwel jaarlijks)

Tabel 6. Overzicht van de gegevens van de deelverzameling van veldproeven op akkerbouwland en P-Al-getal.

Verklarende variabelen	Aantal waarnemingen	Aantal veldproeven	Gemiddelde	Bereik	Verdeling bereik	Dominante fractie
<i>Kwantitatieve variabelen</i>						
PAI <sub>i</sub> <sup>1</sup>	312	7	25	1- 67	Goed	Geen
P-balans <sup>2</sup>	312	7	110	-102- 701	Goed	Geen
Laag <sup>3</sup>	312	7	21	15- 30	Matig	20
Organische stof <sup>4</sup>	312	7	5,8	2- 9	Matig	<7
Afslibbare delen <sup>4</sup>	64	4	22	4- 38	Slecht	<21
Lutum	0	0	-	-	-	-
Silt	0	0	-	-	-	-
Zand <sup>4</sup>	58	3	72	61- 90	Slecht	>70
CaCO <sub>3</sub> <sup>4</sup>	86	3	3,5	0- 6	Slecht	~6
pH-H <sub>2</sub> O	10	2	5,4	5- 6	Matig	Geen
pH-KCl	191	4	4,5	4- 6	Matig	< 5
Incubateduur <sup>5</sup>	312	7	231	157- 393	Goed	Geen
Kalkgift <sup>6</sup>	312	7	223	0-1290	Goed	Geen
<i>Kwalitatieve variabelen</i>						
Meststofvorm <sup>7</sup>	312	7	-	0,1,2,5,6	Matig	0 en 1
Gewas <sup>8</sup>	312	7	-	1,2,3	Matig	1 en 2

<sup>1</sup>, <sup>2</sup>, <sup>3</sup>, <sup>4</sup>, <sup>5</sup>, <sup>6</sup>, <sup>7</sup> en <sup>8</sup>: zie legenda bij tabel 3.

De veldproef te Mantinge, opgedeeld in zes deelverzamelingen, domineerde deze deelverzameling. Na weging van deze zeer omvangrijke veldproef bleken de variabelen laagdikte, kalkgift, incubatieduur en organische stof geen significante bijdrage te geven aan de verklaring van de variantie. De laagdikte is echter in het model opgenomen ten einde de schattingen voor het OPV te baseren op de laagdikte van 20 cm. De overige variabelen zijn niet nader geanalyseerd.

Het resultaat van de statistische analyse wordt door het volgende model (8) samengevat.

$$\Delta\text{PAI} = C_0 + \alpha * \text{P-balans}_{\text{positief}} + \varepsilon * \text{P-balans}_{\text{negatief}} + \gamma * \text{PAI}_i + \delta_1 * (\text{PAI}_i * \text{P-balans}_{\text{positief}}) + \delta_2 * (\text{PAI}_i * \text{P-balans}_{\text{negatief}}) + \eta * \text{Laagdikte} + \xi$$

Hierin is  $\Delta\text{PAI}$  de verandering van het P-Al-getal in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per 100 g grond in het groeiseizoen, berekend als verschil tussen het P-Al-getal na de oogst en dat bij het begin van het seizoen voor de bemesting. PAI<sub>i</sub> is de initiële fosfaattoestand gemeten als P-Al-getal. De overige variabelen zijn identiek aan die van vergelijking (3). Verder zijn C<sub>0</sub>, α, ε, γ, δ<sub>1</sub>, δ<sub>2</sub> en η de te schatten parameters en is ξ de storingsterm.

Het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies (OPV) kan nu worden berekend bij  $\Delta P\text{-Al}$ -getal gelijk aan nul. Er is sprake van een daadwerkelijk verlies bij positieve waarden van de fosfaatbalans. Uit (8) volgt:

$$OPV = -(C + c \cdot PAI) / (a + d_1 \cdot PAI) \quad (9)$$

Ontwikkeling van vergelijking (9) overeenkomstig die bij vergelijkingen (3), (5) en (6) geeft:

$$\text{met } \hat{\beta} = \begin{pmatrix} C \\ a \\ b \\ c \\ d_1 \\ d_2 \\ f \end{pmatrix} \text{ en } f'(\hat{\beta}) = \begin{pmatrix} -1/(a+d_1 \cdot PAI) \\ (C+c \cdot PAI)/(a+d_1 \cdot PAI)^2 \\ 0 \\ -PAI/(a+d_1 \cdot PAI) \\ (C+c \cdot PAI) \cdot PAI/(a+d_1 \cdot PAI)^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

met  $C$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  en  $f$  als schatters van de parameters  $C_0$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  en  $\eta$ .

De parameterschattingen van vergelijking (8) worden in tabel 7 gegeven. Vergelijking (8) verklaart een significant deel van de variatie in  $\Delta P\text{-Al}$ -getal. Het percentage verklaarde variantie bedroeg 37,9.

In tabel 8 worden schattingen gegeven voor het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies voor verschillende initiële fosfaattoestanden.

Het onvermijdbaar fosfaatverlies bij een voldoende fosfaattoestand op dekzand ( $P\text{-Al}$ -getal  $\sim 40$  mg  $P_2O_5$  per 100 g grond) bedraagt zo'n 30 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar. Bij lagere toestanden neemt het verlies af; bij hogere fosfaattoestanden toe. Pas bij  $P\text{-Al}$ -getallen hoger dan 55-60 blijkt een landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies daadwerkelijk aantoonbaar te zijn, d.w.z. significant hoger te zijn dan nul. Het bereik waarover een schatting kan worden gegeven, is beperkt (tabel 8).

Tabel 7. Parameterschattingen behorend bij vergelijking (8) met standaardfout en de student t-waarde voor de deelverzameling 'akkerbouwland en  $P\text{-Al}$ -getal'

Variabele	Parameter-schatting	Schatting	Standaard-fout	t-waarde
Constante	$C$	0,942	0,940	1,00
$P\text{-balans}_{\text{positief}}$	$a$	0,04259	0,00424	10,05
$P\text{-balans}_{\text{negatief}}$	$b$	-0,2638	0,0680	-3,88
$PAI_i$	$c$	-0,0370	0,0287	-1,29
$PAI_i \cdot P\text{-balans}_{\text{positief}}$	$d_1$	-0,000612	0,000114	-5,38
$PAI_i \cdot P\text{-balans}_{\text{negatief}}$	$d_2$	0,01315	0,00299	4,40
Laagdikte <sup>1</sup>	$f$	-0,0532	0,0619	-0,86

<sup>1</sup> De laagdikte is gestandaardiseerd op 20 cm. In de regressieanalyse is deze standaardisatie opgenomen als  $\text{Laagdikte} = (\text{Opgegeven laagdikte} - 20)$ !

Tabel 8. Schatting van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies (OPV) bij verschillende waarden voor het initiële P-Al-getal met standaardfout (se) en betrouwbaarheidsinterval (B)

Initieel P-Al-getal	OPV	se	B	
			ondergrens	bovengrens
[ <sup>1</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]
20	- <sup>3</sup>	-	-	-
25	-	-	-	-
30	7	20	-33	47
35	17	24	-31	64
40	30	30	-30	90
45	48	39	-31	127
50	76	52	-29	180
55	123	70	-18	263
60	218	105	8	429

<sup>1</sup> [mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per 100 g grond]

<sup>2</sup> [kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar]

<sup>3</sup> OPV en se niet gegeven i.v.m. onverantwoorde extrapolatie

## 4.5. Schatting van landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen voor grasland

Grasland is onderscheiden van akkerbouwland op grond van cultuur- en gebruiksverschillen. Oriënterend onderzoek gaf aan dat twee veldproeven op veen (PR891 en ZV30) qua gehalten aan organische stof een aparte deelverzameling vormden. Daarom zijn veengronden als separate deelverzameling geanalyseerd. Ook de veldproeven met emissiearme mesttoediening onderscheiden zich van overige veldproeven door hun afwijkende wijze van toediening van nutriënten. Deze laatste twee veldproeven hadden zowel breedwerpige toediening van tripelsuperfosfaat als plaatsing van runderdrijfmest op diepte door injectie. Alle overige veldproeven hadden uitsluitend een breedwerpige toediening van P. De gegevens van grasland zijn daarom in drie kleinere deelverzamelingen opgedeeld:

1. graslanden op zeelei, dekzand en rivierklei (§ 4.5.1);
2. veengraslanden (§ 4.5.2);
3. veldproeven met mestinjectie (in § 4.5.3).

#### 4.5.1. Grasland op zeeklei, dekzand en rivierklei

Deze deelverzameling graslanden beruiste op veldproeven afkomstig van zeeklei-, dekzand- en rivierkleigebieden. Het betrof zeven veldproeven; deze zijn: BZ25, IB2140, IB2372, IB3054, IB3124, IB3140 en IB3249. Het totaal aantal waarnemingen na selectie en restrictie bedroeg 138, waarbij de veldproef BZ25 op zeeklei zeer dominant aanwezig was met 110 waarnemingen. Bij deze deelverzameling is BZ25 gewogen (zie § 3.4). Bij deze deelverzameling is het aantal veldproeven te laag om meetgegevens van algemeen grondonderzoek in het model op te nemen (tabel 9). De laagdikte was bij alle veldproeven 5 cm en is als variabele weggelaten. De incubatieduur had een redelijk breed bereik dat vooral werd gedomineerd door het traject 190-240 dagen. De incubatieduur droeg echter niet bij aan de verklaring van de variatie in  $\Delta P$ -Al-getal en is dus ook verder buiten beschouwing gelaten.

De veldproeven BZ25 en IB3140 zijn veeljarig. Over langere periode nam Het P-Al-getal minder sterk toe bij ruime fosfaatgiften. De overige veldproeven hadden een kortere looptijd. In deze periode nam de P-toestand evenredig toe met de fosfaatgift.

Tabel 9. Overzicht van de gegevens van de deelverzameling van veldproeven op grasland op zeeklei, dekzand en rivierklei en P-Al-getal

Verklarende variabelen	Aantal waarnemingen	Aantal veldproeven	Gemiddelde	Bereik	Verdeling bereik	Dominante fractie
<i>Kwantitatieve variabelen</i>						
P-Al-getal <sup>1</sup>	138	7	28	4- 60	Goed	Geen
P-balans <sup>2</sup>	138	7	0.73	-114-327	Goed	Geen
Laag <sup>3</sup>	138	7	5	-	-	5
Organische stof <sup>4</sup>	138	7	13	5- 23	Matig	>10
Afslibbare delen <sup>4</sup>	138	7	34	1- 62	Matig	~36
Lutum	20	4	2	1- 4	Slecht	<4
Silt	20	4	14	4- 39	Slecht	<4,>20
Zand <sup>4</sup>	130	5	54	35- 90	Slecht	~50
CaCO <sub>3</sub> <sup>4</sup>	29	6	0	-	-	0
pH-H <sub>2</sub> O	0	0	-	-	-	-
pH-KCl	0	0	-	-	-	-
Incubatieduur <sup>5</sup>	135	7	142	191-349	Matig	190-240
Kalkgift <sup>6</sup>	138	7	0	-	-	0
<i>Kwalitatieve variabelen</i>						
Meststofvorm <sup>7</sup>	138	7	-	0, 1	Goed	Geen

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> en <sup>7</sup>: zie legenda bij tabel 3.

Tabel 10. Parameterschattingen behorend bij vergelijking (11) met standaardfout en de student t-waarde voor de deelverzameling 'grasland op zeelei, dekzand en rivierlei en P-Al-getal'

Variabele	Parameterschatting	Schatting	Standaardfout	t-waarde
Constante	C	0,312	0,915	0,33
P-balans <sub>positief</sub>	a	0,1188	0,0152	7,83
P-balans <sub>negatief</sub>	b	-0,0173	0,0181	-0,96
PAI <sub>i</sub>	c	0,0251	0,0334	0,75
PAI <sub>i</sub> *P-balans <sub>positief</sub>	d <sub>1</sub>	-0,002100	0,000675	-3,11
PAI <sub>i</sub> *P-balans <sub>negatief</sub>	d <sub>2</sub>	0,004593	0,000952	4,82

Op grond van het zeer beperkte aantal veldproeven werd alleen het basismodel gehanteerd met de initiële P-toestand, de negatieve en positieve P-balans en de interacties tussen P-toestand en P-balans (vergelijking (11)). De parameterschattingen zijn gegeven in tabel 10.

$$\Delta PAI = C_0 + \alpha * P\text{-balans}_{\text{positief}} + \epsilon * P\text{-balans}_{\text{negatief}} + \gamma * PAI_i + \delta_1 * (PAI_i * P\text{-balans}_{\text{positief}}) + \delta_2 * (PAI_i * P\text{-balans}_{\text{negatief}}) + \xi$$

De verklarende variabelen en hun parameterschattingen zijn gelijk aan die van (8). Het model verklaart 73,0% van de variatie in  $\Delta PAI$  ( $\gamma = 0,999$ ).

Een schatting voor het OPV wordt op analoge wijze verkregen als beschreven in § 4.4.

$$OPV = - (C + c * PAI_i) / (a + d_1 * P\text{balans}_{\text{positief}}) \quad (12)$$

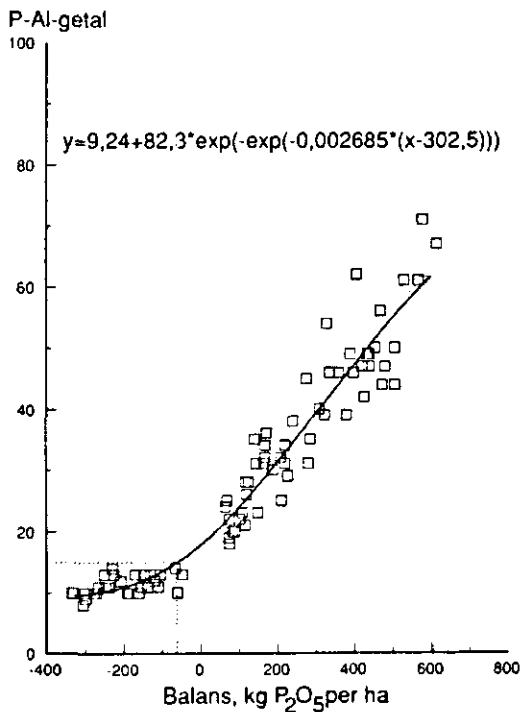
Er is sprake van een landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies indien het OPV positief is. In het bereik van het initiële P-Al-getal - 4-60 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per 100 g grond - werd nergens een positieve waarde voor het OPV berekend. Hieruit volgt dat er geen extra fosfaat toegediend hoeft te worden om de P-toestand van de grond te handhaven. De P-toestand kan zelfs stijgen bij een P-overschot gelijk aan nul. Deze stijging van de P-toestand van de grond bij een overschot van 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha is hier niet berekend.

#### 4.5.2. Veem

De verzameling data was afkomstig van veldproeven PR891 en ZV30 op veengrasland. Beide veldproeven hadden voldoende variatie in initiële P-toestand, P-balans en incubatieduur. De overige variabelen konden niet in de modelvorming worden opgenomen wegens het ontbreken van een voldoende aantal veldproeven (§ 3.4).

Ook bij de veengronden bleek de incubatieduur geen variatie in  $\Delta P$ -Al-getal te verklaren. Daardoor was de modelkeuze gelijk aan die voor de deelverzameling van § 4.5.1. De schatting van  $\Delta P$ Al uit initiële P-toestand en P-balans op veen week sterk af van die van andere grondsoorten. Dit gold o.a. voor de richting van het verloop van  $\Delta P$ -Al-getal met de P-balans. Slechts in een zeer nauw traject van het P-Al-getal - nl. 30-40 mg  $P_2O_5$  per 100 g grond - zijn de resultaten voor grasland op veen en op zeelei, dekzand en rivierlei gelijk (§ 4.5.1). Het verschil tussen veen en overige gronden was reden om voor veen een gedetailleerdere analyse per proefveld uit te voeren. Daaruit bleek dat tussen de twee veldproeven een groot niveauverschil aanwezig was in  $\Delta P$ Al (data niet gegeven). De verandering van de fosfaattoestand kon niet uitsluitend verklaard worden uit de initiële fosfaattoestand, de P-balans en hun interacties. Voor het verschil tussen de veldproeven bestaat geen duidelijke verklaring.

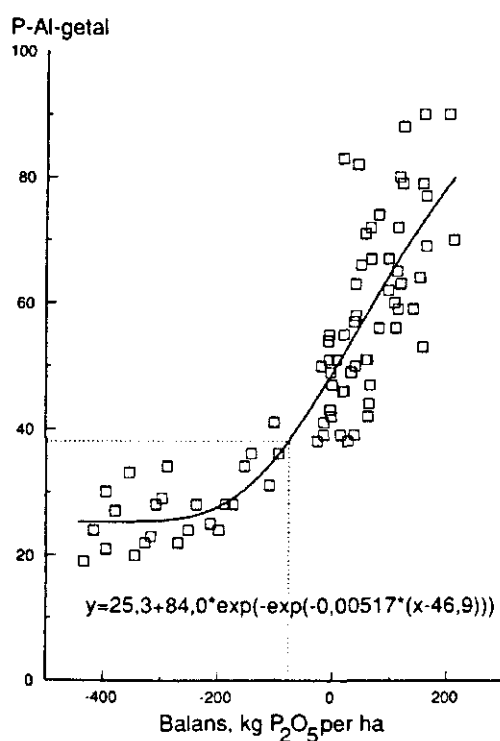
Een indicatie voor het al dan niet optreden van een onvermijdbaar verlies op gras is ook nog op andere wijze verkregen, nl. door het verloop van de P-toestand als functie van de cumulatieve P-balans vast te stellen. Een positieve cumulatieve P-balans geeft de ophoping van P in de zodelaag aan; een negatieve P-balans een uitmijning van de P-voorraad. Een cumulatieve P-balans is verstrengeld met de incubatieduur. In figuur 6 wordt het verloop van de P-toestand op PR891 als functie van de cumulatieve P-balans gegeven; figuur 7 berust op gegevens van ZV30. De horizontale stippellijn in de figuren geeft de P-toestand bij de aanleg van de veldproef aan; de verticale lijn de hoeveelheid fosfaat die boven de afvoer met het gewas nodig is om de P-toestand te handhaven.



Figuur 6. Het verloop van de P-toestand van de veldproef PR891 vastgesteld als P-Al-getal als functie van de cumulatieve P-balans. De horizontale stippellijn geeft de initiële P-toestand aan en de verticale stippellijn de hoeveelheid fosfaat die nodig is om deze P-toestand te handhaven.



De curven zijn de best passende wiskundige verbanden. Uit deze verkenning wordt een aanwijzing verkregen dat noch op PR891 noch op ZV30 er sprake is van een daling van de P-toestand t.o.v. de uitgangstoestand bij een P-gift gelijk aan de P-afvoer met maaisneden. In tegendeel, om de initiële P-toestand te handhaven kan zelfs worden volstaan met een gift die kleiner is (~ 50-100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha) dan de afvoer met gras. Er is dus bij deze veldproeven geen indicatie voor het optreden van een onvermijdbaar P-verlies indien de uitgangstoestand als referentie wordt genomen. Bij hoge P-toestanden daarentegen neemt de mate van stijging van het P-Al-getal af bij toename van een P-overschot op de balans. Kennelijk is onder deze omstandigheden meststof-P minder effectief om de P-toestand te verhogen en treedt er dan een verlies op.



Figuur 7. Het verloop van de P-toestand van de veldproef ZV30 vastgesteld als P-Al-getal als functie van de cumulatieve P-balans. De horizontale stippellijn geeft de initiële P-toestand aan en de verticale stippellijn de hoeveelheid fosfaat die nodig is om deze P-toestand te handhaven.

#### 4.5.3. Mestinjectie op dekzand

De veldproeven PR3537 en PR3540 onderscheiden zich van andere veldproeven door hun methode van bemesting. Bovendien hadden alleen deze veldproeven unieke informatie over de combinatie van dierlijke mest - runderdrijfmest - en kunstmest - tripelsuperfosfaat. Het tripelsuperfosfaat was bij deze veldproeven breedwerpig toegediend; de dierlijke mest was geïnjecteerd op ca. 18 cm diepte (Boer et al., 1994a; 1994b). De toedieningstechniek is in deze situatie dus verstrengeld met de meststofvormen. Deze verstrengeling kwam alleen voor bij deze twee veldproeven. Bij deze verzameling van gegevens was ook het P-Al-getal van de teeltlaag 0-20 cm bekend. Dit gegeven ontbrak bij andere veldproeven op grasland. De toedieningstechniek en de meststofvormen runderdrijfmest en tripelsuperfosfaat waren redenen om deze deelverzameling apart in beschouwing te nemen.

In tabel 11 wordt een overzicht van de beschikbare informatie over de verklarende variabelen gegeven. Zowel het initieel P-Al-getal, de P-balans en de meststofvormengroepen 1 (tripel-superfosfaat) en 6 (rundveedrijfmest) zijn goed vertegenwoordigd. De P-balans had 10 waarnemingen met negatieve waarden met een zeer smal bereik (-14 tot -3 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha). De overige waarnemingen hadden positieve waarden met een redelijk bereik (0 tot 122 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha). Het gering aantal waarnemingen en het smalle bereik zijn onvoldoende basis voor een verantwoorde analyse met negatieve P-balans als verklarende variabele.

De incubatieduur heeft geen ontbrekende waarden, maar het bereik is smal. De overige verklarende variabelen kunnen niets bijdragen aan de verklaring van variatie in ΔP-Al-getal; de beschikbare informatie is daarvoor ontoereikend.

Met de P-balans, de initiële P-toestand, de interactie tussen P-balans en P-toestand en de meststofvorm kon het ΔP-Al-getal van de laag 0-5 cm en dat van 0-20 cm worden beschreven (vergelijking 13). Bij het ΔP-Al-getal van de laag 0-5 cm werd 7,1% van de aanwezige variatie verklaard ( $\gamma = 0,987$ ); voor de laag 0-20 cm was dat slechts 3,7% ( $\gamma = 0,928$ ). Met opname van de meststofvorm in het model werd de variatie in ΔP-Al-getal iets beter verklaard; het percentage verklaarde variantie steeg tot resp. 26,8 en 6,7. Door opname van de meststofvorm als verklarende variabele kregen ook de P-balans en de initiële P-toestand betekenis bij de verklaring van de variatie in ΔP-Al-getal van de laag 0-5 cm. De variatie in ΔP-Al-getal gebaseerd op de laag 0-20 cm werd met name door verschillen in meststofvorm bepaald.

De incubatieduur had eveneens een significant effect. Het effect ervan op ΔP-Al-getal was echter extreem groot (ca. -0,3 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per dag voor de laag 0-5 cm en -0,1 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per dag voor de laag 0-20 cm). De orde van grootte van het effect was onrealistisch hoog hetgeen aanleiding vormde voor nadere analyses o.a. omdat de incubatieduur bij grasland was geschat (zie § 3.2). Onzekerheid rees nl. over de basis van deze schatting. Bovendien was het bereik van de incubatieduur smal waardoor doorgaans mag worden verwacht dat minder snel een significant resultaat zal worden verkregen. Analyse per proef per proefjaar gaf aan dat de geschatte incubatieduur synoniem was met een jaareffect. Daarbij bleek dat noch de P-balans noch de initiële P-toestand aan de verklaring van variatie in ΔP-Al-getal bijdroegen (resultaten van statistische bewerking niet gegeven). Er moet(en) dan één (of meerdere) factor(en) verantwoordelijk zijn voor het gevonden effect dat echter niet met beschikbare meetgegevens was aan te duiden. Op grond van dit resultaat werd besloten om incubatieduur niet als verklarende variabele op te nemen in het model.

De vergelijking voor het model is dan:

$$\Delta P\text{-Al-getal} = C_0 + \alpha * P\text{-balans}_{\text{positief}} + \gamma * PAI_i + \delta_i * (PAI_i * P\text{-balans}_{\text{positief}}) + o * P\text{-vorm} + \xi \quad (13)$$

Hierin hebben de verklarende variabelen, parameterschattingen en storingsterm dezelfde betekenis als die van vergelijking (3). Daarnaast is de variabele P-vorm opgenomen om het effect van runderdrijfmest t.o.v. tripelsuperfosfaat aan te geven. De parameterschatting voor de P-vorm is 0; de schatter ervan is 0.

In tabel 12 worden de schatters gegeven voor vergelijking (13) zowel voor de laag 0-5 cm en als die voor de laag 0-20 cm.

Een schatting voor het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies wordt opnieuw verkregen door  $\Delta P$ -AI-getal gelijk te stellen aan nul bij positieve P-balans.

Uit (13) volgt:

$$OPV = -(C + c*PAI + o*P\text{-vorm})/(a + d,* PAI) \quad (14)$$

Ontwikkeling van (14) overeenkomstig de vergelijkingen (5) en (6) geeft  $f'(b)$  als vergelijking (15):

$$\text{met } \hat{\beta} = \begin{pmatrix} C \\ a \\ c \\ d, \\ o \end{pmatrix} \text{ en } f'(\hat{\beta}) = \begin{pmatrix} -1/(a+d,*PAI) \\ (C+c*PAI+o*P\text{-vorm})/(a+d,*PAI)^2 \\ -PAI/(a+d,*PAI) \\ (C+c*PAI+o*P\text{-vorm})*PAI/(a+d,*PAI)^2 \\ -P\text{-vorm}/(a+d,*PAI) \end{pmatrix} \quad (15)$$

In tabel 13 worden schattingen gegeven voor het onvermijdbaar P-verlies bij toediening van tripelsuperfosfaat en runderdrijfmest zowel voor de laag 0-5 cm als voor de laag 0-20 cm.

Er treedt bij toediening met tripelsuperfosfaat geen onvermijdbaar P-verlies op bij een zodelaag van 0-5 cm, hetgeen overeenkomt met het resultaat van de analyse van de graslanden op zeelei, dekzand en rivierlei (§ 4.5.1). Ook voor de laag 0-20 cm kan voor het bereik P-AI-getal 10-51 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per 100 g grond geen verlies worden vastgesteld bij breedwerpige toediening van tripelsuperfosfaat. Bij injectie van runderdrijfmest wordt daarentegen wel een onvermijdbaar P-verlies vastgesteld. Het verlies neemt toe met de stijging van de P-toestand. Het verlies is groter bij  $\Delta P$ -AI-getal gebaseerd op basis van de laagdikte 0-5 cm dan die op basis van de laag 0-20 cm. Bij injectie wordt P uit de dierlijke mest op zo'n 18 cm diepte geplaatst. Veranderingen in de zodelaag 0-5 cm hebben dan geen directe relatie met de P-balans. Alleen als graswortels P uit dieper gelegen bodemlagen naar de zodelaag transporteren, zal - indirect - invloed op  $\Delta P$ -AI-getal worden uitgeoefend. Een vaststelling van een groter P-verlies bij de laag 0-5 cm is dan niet zo verwonderlijk; de geïnjecteerde mest maakt geen deel uit van het grondmonster. Opvallend is echter dat ook bij een laagdikte van 0-20 cm een P-verlies optreedt. Bij deze laagdikte mag worden verondersteld dat de op diepte geplaatste P van dierlijke mest wel wordt bemonsterd. Kennelijk wordt een deel van het P vastgelegd in niet met ammoniumlactaat-azijnzuur te extraheren P-fractionen in de grond of een deel is door graswortels en/of door uitspoeling naar bodemlagen dieper dan 20 cm gebracht. Of bij het plaatsen van tripelsuperfosfaat op 18 cm eveneens een P-verlies optreedt kan niet worden achterhaald wegens het ontbreken van relevante informatie.

Tabel 11. Overzicht van gegevens van de deelverzameling van veldproeven op grasland met mest-injectie en P-Al-getal (PR3537 en PR3540)

Verklarende variabelen	Aantal waarnemingen	Aantal veldproeven	Gemiddelde	Bereik	Verdeling bereik	Dominante fractie
<i>Kwantitatieve variabelen</i>						
PAI <sub>i</sub> <sup>1</sup>	120	2	37	24- 70	Goed	Geen
P-balans <sup>2</sup>	120	2	30	-14- 122	Goed	Geen
Laag <sup>3</sup>	120	2	5/208	5/20	-	5/20
Organische stof <sup>4</sup>	120	2	5	5- 6	Slecht	5
Afslibbare delen <sup>4</sup>	0	0	-	-	-	-
Lutum	0	0	-	-	-	-
Silt	0	0	-	-	-	-
Zand <sup>4</sup>	0	0	-	-	-	-
CaCO <sub>3</sub> <sup>4</sup>	0	0	-	-	-	-
pH-H <sub>2</sub> O	0	0	-	-	-	-
pH-KCl	120	2	5,0	4,5-5,3	Slecht	4,5-5,3
Incubateduur <sup>5</sup>	120	2	226	215-246	Matig	Geen
Kalkgift <sup>6</sup>	120	2	0	-	-	0
<i>Kwalitatieve variabelen</i>						
Meststofvorm <sup>7</sup>	120	2	-	1, 6	Goed	Geen

<sup>1</sup>, <sup>2</sup>, <sup>3</sup>, <sup>4</sup>, <sup>5</sup>, <sup>6</sup> en <sup>7</sup>: zie legenda bij tabel 3

<sup>8</sup> Bemonsterde laag 0-5 cm of 0-20 cm

Tabel 12. Parameterschattingen behorend bij vergelijking (13) met standaardfout en de Student t-waarde voor de veldproeven PR3537 en PR3540 met emissiearme toediening van runder drijfmest op grasland

Variabele	Parameter-schatter	Schatting	Standaard-fout	t-waarde
<b>Laag 0-5 cm</b>				
Constante	C	9,72	3,06	3,18
P-balans <sub>positief</sub>	a	0,1109	0,0655	1,69
PAI <sub>i</sub>	c	-0,1267	0,0615	-2,06
PAI <sub>i</sub> *P-balans <sub>positief</sub>	d <sub>i</sub>	-0,00206	0,00148	-1,39
Meststofvorm	o	-7,21	1,13	-6,36
<b>Laag 0-20 cm</b>				
Constante	C	1,78	2,03	0,88
P-balans <sub>positief</sub>	a	0,0598	0,0435	1,37
P-AI <sub>i</sub>	c	-0,0297	0,0408	-0,73
P-AI <sub>i</sub> *P-balans <sub>positief</sub>	d <sub>i</sub>	-0,000778	0,000984	-0,79
Meststofvorm	o	-1,650	0,754	-2,19

## 4.6. Verhoging van de fosfaattoestand tot streefgetal

Met behulp van vergelijking (3) kan de hoeveelheid fosfaat die nodig is om een gewenst niveau te bereiken worden geschat. De berekening volgt die van het OVP (§ 3.4). In plaats van een  $\Delta P_w$ -getal van nul wordt de gewenste stijging in  $P_w$ -getal opgelegd. Ook hier dienen condities van de regressieanalyse te worden gerespecteerd (tabel 3). Deze berekeningen hebben uitsluitend een oriënterend karakter.

De hoeveelheid fosfaat die boven de onttrekking en het OVP nodig is om het  $P_w$ -getal te verhogen tot de streefgetallen 25 (zeeklei) en 30 (overige gronden) blijkt met de norm voor reparatiebemesting overeen te komen; ook in gevallen waarbij buiten het meetbereik van de P-balans werd geëxtrapoleerd (tabel 14). De betrouwbaarheidsintervallen bij deze schattingen van P-giften zijn van eenzelfde orde van grootte als die voor de schattingen voor de reparatiebemesting. Daardoor kan niet worden geconcludeerd dat het huidige berekende resultaat significant afwijkt van de norm voor reparatiebemesting. Getalswaarden voor reparatiebemesting hoger dan 661 kg  $P_2O_5$  per ha zijn extrapolaties buiten het meetbereik; toch stemmen de extrapolaties redelijk overeen met vigerende normen.

Tabel 13. Schatting van het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies (OPV) bij verschillende waarden voor het initieel P-Al-getal bij breedwerpige toediening van tripelsuperfosfaat (TSP) en op ca. 18 cm diepte geïnjecteerde rundermest (RDM) met standaardfout (se) en betrouwbaarheidsinterval (B).

Initieel P-Al-getal [ <sup>1</sup> ]	Meststof	OPV [ <sup>2</sup> ]	se [ <sup>2</sup> ]	B	
				ondergrens [ <sup>2</sup> ]	bovengrens [ <sup>2</sup> ]
<i>Laag 0-5 cm</i>					
25	TSP	0 <sup>3</sup>	-	-	-
	RDM	9	26	-43	60
30	TSP	0	-	-	-
	RDM	23	23	-22	68
40	TSP	0	-	-	-
	RDM	85	38	8	162
50	TSP	0	-	-	-
	RDM	* <sup>4</sup>	*	*	*
<i>Laag 0-20 cm</i>					
25	TSP	0	-	-	-
	RDM	13	24	-34	60
30	TSP	0	-	-	-
	RDM	20	21	-22	61
40	TSP	0	-	-	-
	RDM	36	17	2	70
50	TSP	0	-	-	-
	RDM	63	29	5	122

<sup>1</sup> [mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per 100 g grond]

<sup>2</sup> [kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar]

<sup>3</sup> Een positieve waarde voor het onvermijdbaar P-verlies kan met vergelijking (12) niet worden berekend hetgeen betekent dat de waarde voor de OVP gelijk is aan nul.

<sup>4</sup> Schatting niet gegeven i.v.m. onverantwoorde extrapolatie.

Bij het resultaat van deze oriënterende berekening wordt aangetekend dat de normen voor reparatiebemesting berusten op een condensatie van veldproefgegevens over een periode van zeven jaar (Prummel, 1974). In deze periode is de P-toestand geleidelijk op- of afgebouwd. Deze berekeningswijze geeft normen die zijn verstrengeld met een OVP en moeten daardoor altijd leiden tot hogere waarden voor reparatiebemesting.

Tabel 14. Hoeveelheid fosfaat (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha) die boven de onttrekking en landbouwkundig onvermijdbaar verlies nodig is om het Pw-getal te verhogen tot streefgetalswaarden op zeekei en overige gronden

Initieel Pw-getal	Streefgetal				OPV
	Richtlijn <sup>1</sup>		Berekend		
	25	30	25	30	
[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	
5	1130 <sup>5</sup>	1340 <sup>5</sup>	915 <sup>5</sup>	1154 <sup>5</sup>	0
10	780 <sup>5</sup>	990 <sup>5</sup>	649	872 <sup>5</sup>	0
15	490	700 <sup>5</sup>	416	625	0
20	230	440	197	394	14
25	0	210	0	186	28

<sup>1</sup> IKC (1992). Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouwgewassen 1992-1993

<sup>2</sup> mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond

<sup>3</sup> kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha, eenmalige gift

<sup>4</sup> Onvermijdbaar verlies in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha per jaar

<sup>5</sup> Extrapolatie buiten het meetbereik van de fosfaatbalans

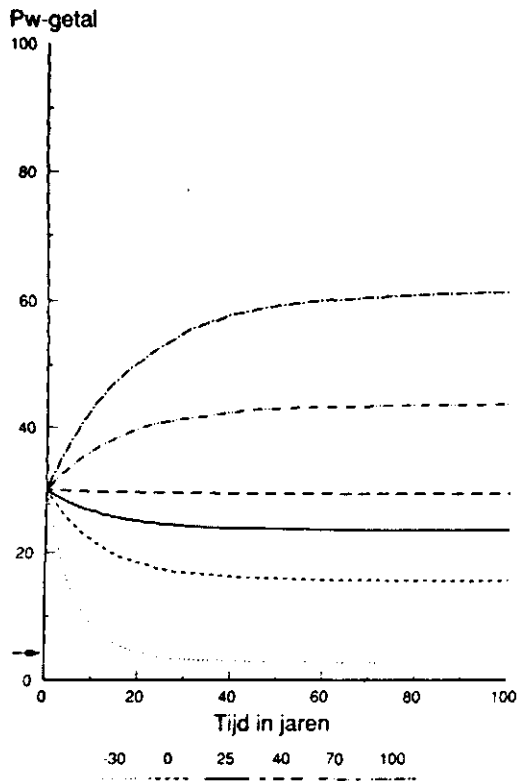
## 4.7. Simulatie van het verloop van de fosfaattoestand

Het verloop van de P-toestand bij een gegeven P-balans kan worden berekend door de optredende veranderingen in P-toestand per jaar uit te rekenen. De methode van berekening is gegeven in § 3.4. Enkele simulaties van het verloop van het Pw-getal bij diverse P-balansen zijn uitgevoerd. Uit het verloop kan een indicatie worden verkregen over de tijdsduur die nodig is om een opgelegde P-balans in evenwicht te doen komen met de P-toestand. Bij elke P-toestand hoort een bepaald landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies (zie voorafgaande paragrafen). Zolang het overschot op de fosfaatbalans niet overeenkomt met het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies dat bij een gegeven P-toestand hoort, zal er geen sprake zijn van evenwicht. De P-toestand zal dalen of stijgen totdat die P-toestand wordt bereikt waarbij het overschot overeenkomt met het onvermijdbaar P-verlies.

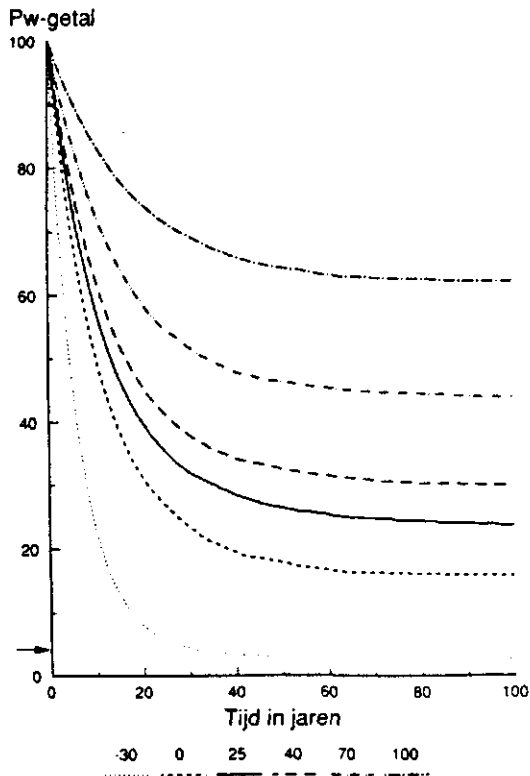
Resultaten van deze berekeningen bij initiële Pw-getallen van 30 en 100 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond bij negatieve en positieve P-balansen worden gegeven in resp. figuren 8 en 9. Het tijdstip waarop evenwicht is bereikt, wordt gegeven in tabel 15. Bij deze simulatieberekeningen is het tijdstip waarop evenwicht bereikt wordt gedefinieerd als het tijdstip waarop ΔPw-getal of ΔP-Al-getal gelijk is aan 0,001.

### *Pw-getal en bouwland*

Bij een tekort op de P-balans daalt bij initiële Pw-getallen van 30 en 100 de P-toestand. Een P-balans lager dan het onvermijdbare verlies geeft eveneens een daling van de P-toestand. Een P-balans gelijk aan het onvermijdbare verlies handhaaft de P-toestand, terwijl een P-balans groter



Figuur 8. Het verloop van het gesimuleerde Pw-getal bij verschillende P-balansen bij een uitgangstoestand van 30 mg  $P_2O_5$  per liter grond, een laagdikte van 20 cm en een incubatieduur van 210 dagen. De horizontale pijl geeft de ondergrens van het meetbereik van het Pw-getal aan; de bovengrens van het Pw-getal was 132 mg  $P_2O_5$  per liter grond



Figuur 9. Het verloop van het gesimuleerde Pw-getal bij verschillende P-balansen bij een uitgangstoestand van 100 mg  $P_2O_5$  per liter grond, een laagdikte van 20 cm en een incubatieduur van 210 dagen. De horizontale pijl geeft de ondergrens van het meetbereik van het Pw-getal aan; de bovengrens van het Pw-getal was 132 mg  $P_2O_5$  per liter grond



dan het verlies een stijging teweeg brengt. Naarmate de waarde van de P-balans beter overeenkomt met het onvermijdbare P-verlies behorend bij het opgelegde initiële Pw-getal, zal sneller evenwicht worden bereikt. Een Pw-getal van 100 heeft een onvermijdbaar P-verlies dat beduidend groter is dan de opgelegde P-balansen. Er vindt dan ook een daling van het Pw-getal plaats; in de meeste gevallen wordt in een periode van 100 jaar geen evenwicht bereikt (figuur 9). Een onvermijdbaar P-verlies is afgeleid bij positieve P-balans (§ 3.4). Het verloop van het Pw-getal in de tijd bij negatieve P-balansen is gebaseerd op een andere wiskundige relatie. De fosfaattoestand waarbij evenwicht wordt bereikt, wordt niet bepaald door het bereiken van een onvermijdbaar verlies. Daardoor is ook het tijdstip waarop dat evenwicht wordt bereikt afwijkend.

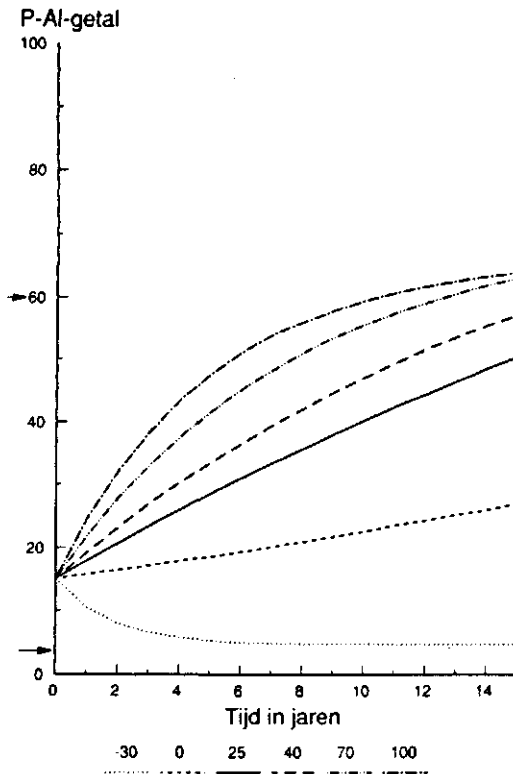
Het onvermijdbaar P-verlies dat bij Pw-getal van 24 hoort, is 25 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar; bij een Pw-getal van 29 is dat 40 kg  $P_2O_5$  per ha jaar.

Deze resultaten kunnen worden geplaatst naast de streefgetallen voor zeeklei en zandgrond, rivierklei en loess. Voor zeeklei blijkt zo'n 25 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar voldoende, voor de overige gronden zo'n 40 kg  $P_2O_5$  per ha. Bij een kortere incubatieduur dan de bij de berekening opgelegde conditie van 210 dagen kan met een lagere hoeveelheid fosfaat worden volstaan; bij een langere incubatieduur zal meer fosfaat moeten worden toegediend.

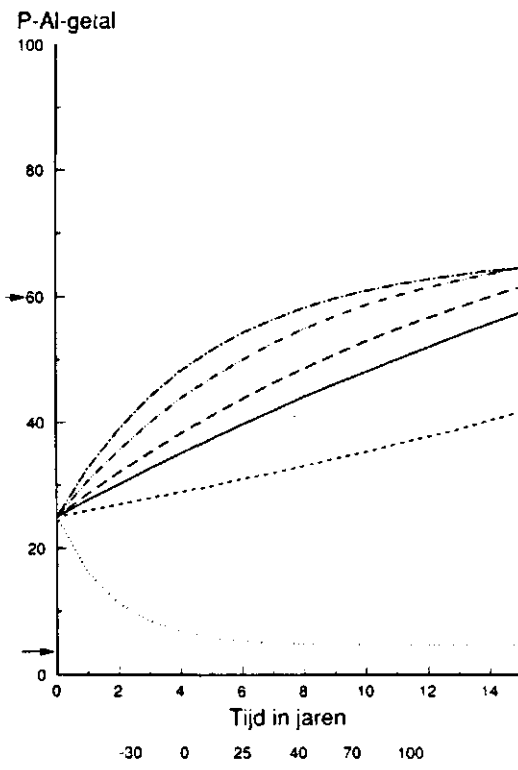
#### *P-Al-getal en grasland*

Het verloop van het P-Al-getal op grasland op zeeklei, dekzand en rivierklei blijkt is anders dan dat van het Pw-getal op bouwland. Bij deze deelverzameling kon geen onvermijdbaar P-verlies worden berekend. Dat betekent dat elke kg  $P_2O_5$  boven de onttrekking bijdraagt aan een stijging van het P-Al-getal. Ook bij een P-balans van nul wordt volgens vergelijking (11) een lichte stijging van het P-Al-getal berekend. Resultaten van berekening worden gegeven in figuren 10 en 11.

Het blijkt dat al na zo'n tien jaar de gesimuleerde P-Al-waarden buiten het meetbereik vallen. Het verloop van het P-Al-getal in de tijd kan bij diverse P-balansen daardoor over een beperkte periode worden geschat. Oorzaken voor een toename van het P-Al-getal bij een P-balans gelijk aan nul zijn eerder in deze discussie gegeven. Op basis van deze oriënterende berekeningen is het doorgaans niet mogelijk om een tijdstip aan te geven waarop evenwicht wordt bereikt tussen een positieve P-balans en het P-Al-getal.



Figuur 10. Het verloop van het gesimuleerde P-Al-gehalte op grasland voor de laag 0-5 cm gebaseerd op de deelverzameling 'Grasland op zeelei, dekzand en rivierklei' bij initieel P-Al-gehalte van 15 mg  $P_2O_5$  per 100 g luchtdroge grond. De horizontale pijlen geven de onder- en de bovengrens van het meetbereik van het P-Al-gehalte aan



Figuur 11. Het verloop van het gesimuleerde P-Al-gehalte op grasland voor de laag 0-5 cm gebaseerd op de deelverzameling 'Grasland op zeelei, dekzand en rivierklei' bij initieel P-Al-gehalte van 25 mg  $P_2O_5$  per 100 g luchtdroge grond. De horizontale pijlen geven de onder- en de bovengrens van het meetbereik van het P-Al-gehalte aan

Tabel 15. Tijdsduur in jaren die nodig is om evenwicht te bereiken tussen opgelegde P-balans op bouwland bij Pw-getal 30 en 100, mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond

Initieel Pw-getal	P-balans	Tijdsduur	Eindtoestand Pw-getal	B <sup>1</sup>	
				Ondergrens	Bovengrens
[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>3</sup> ]	[ <sup>2</sup> ]	[ <sup>3</sup> ]	[ <sup>3</sup> ]
30	-30	58	3	0	18
	0	89	16	0	33
	25	80	24	0	42
	40	52	29	0	49
	70	>100	- <sup>5</sup>	-	-
	100	>100	-	-	-
100	-30	66	3	0	18
	0	>100	-	-	-
	25	>100	-	-	-
	40	>100	-	-	-
	70	>100	-	-	-
	100	>100	-	-	-

<sup>1</sup> B = 5%-betrouwbaarheidsinterval, negatieve waarden voor Pw-getal zijn gelijk aan nul gesteld

<sup>2</sup> Gesimuleerde waarden van het Pw-getal in mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond

<sup>3</sup> Jaarlijkse aanvoer in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha

<sup>4</sup> Aantal jaren na start van de jaarlijkse aanvoer om ΔPw-getal = 0,001 te bereiken

<sup>5</sup> Bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval is > 100 jaar; simulatie is gestopt na 100 jaar



## 5. Discussie

In deze studie zijn statistische analyses uitgevoerd op basis van beschikbare gegevens van veeljarige hoeveelheden veldproeven met P. Deze veldproeven hadden oorspronkelijk een andere doelstelling dan het vaststellen van landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen. Omdat gegevens bekend waren van de P-toestand, van de P-afvoer met de oogstprodukten en van een aantal omgevingsfactoren, was het echter mogelijk om de verandering van de P-toestand door verschillen in de P-balans te onderzoeken. Een groot aantal observationele eenheden (waarnemingen) kwam beschikbaar. Desondanks blijkt slechts een beperkt deel van de waarnemingen bruikbaar te zijn voor dit onderzoek. Indien elke waarneming zou worden begeleid met relevante gegevens van grond- en gewasonderzoek, dan mag worden verwacht dat robuuste uitspraken over het optreden van onvermijdbare P-verliezen mogelijk zijn. In de huidige situatie, waarin - om 'gaten in het databestand te omzeilen' - verschillende deelverzamelingen werden gevormd, geven de resultaten van het onderzoek alleen (richting aan) de orde van grootte van de hoeveelheid P die nodig is om de P-toestand van de grond te handhaven. Ondanks het grote aantal observationele eenheden zijn de mogelijkheden om te komen tot een condensatie van een groot aantal waarnemingen tot enkele algemene reken-regels gering.

Over de resultaten van dit onderzoek is in 1994 een voortgangsrapportage geschreven (Ehlert et al., 1994). Die voortgangsrapportage fungeerde tevens als rapportage aan de Technische Projectgroep P-desk-studie (Oenema & Van Dijk, 1994). De nota geeft de werkhypothese en achtergronden en tevens een raming van de orde van grootte van onvermijdbare fosfaatverliezen. De resultaten van de nota berusten op een eerste statistische verkenning op basis van toen beschikbare databestanden en hadden nog geen definitief karakter. Na deze voortgangsrapportage is het databestand aanzienlijk uitgebreid en zijn gedetailleerde statistische analyses uitgevoerd waarvan de eindresultaten in dit rapport worden gegeven. Dit rapport geeft de definitieve resultaten van het observationeel statistisch onderzoek.

De resultaten van statistische analyse voor met name grasland wijken af van de oriënterende berekeningen gegeven in de eerdere nota. Dit is het gevolg van een aantal wijzigingen die na de voortgangsrapportage zijn aangebracht.

In Nota 5 (Ehlert et al., 1994) werd nog geen onderscheid aangebracht naar cultuurgebruik. Er werd louter onderscheid gemaakt naar de methode van extractie (Pw-getal of P-AL-getal), incubatieduur en naar grondsoort. De schatting van het onvermijdbare fosfaatverlies voor het P-AL-getal was daardoor gebaseerd op zowel resultaten van bemestingsonderzoek op bouwland als op grasland. Deze verstrengeling in cultuurgebruik is nu ontrafeld.

Een dergelijke verstrengeling was ook aanwezig bij de meststofvorm en hun toedieningstechniek. Ook die verstrengeling is nu ontrafeld.

Een andere belangrijke oorzaak voor optredende afwijkingen is de nu aangebrachte standaardisatie in de dimensie van de verandering van de fosfaattoestand. Bij nadere beschouwing bleek namelijk dat de periode tussen twee tijdstippen van bemonstering gemiddeld

één jaar was, maar - onverwacht - met een zeer grote spreiding. Een responsvariabele bij regressie-analyse dient eenzelfde dimensie te hebben. Daarom moest een standaardisatie uitgevoerd door alleen observationele eenheden met een verandering in fosfaattoestand van één jaar (365 +/- 50 dagen) in de analyse op te nemen. Deze standaardisatie leidde tot een daling van het aantal bruikbare observationele eenheden. Deze daling kwam ook voor rekening van veldproeven op bouwland.

De gemiddelde waarde voor incubatieduur bedroeg 210 dagen, maar ook hier was een aanzienlijke spreiding aanwezig. Omdat deze verklarende variabele nu in alle gevallen is onderzocht wordt weging gegeven aan deze spreiding. Bij vergelijking van huidige resultaten met die van de eerdere nota dient echter rekening gehouden te worden met dit gemiddelde; het vormt een conditie waaronder de in de nota vermelde schattingen voor onvermijdbare verliezen zijn afgeleid.

Ten slotte wijkt het huidige concept van het statistisch model af van die van de nota door het aangebrachte onderscheid tussen overschot en tekorten op de fosfaatbalans.

Het optreden van het landbouwkundig onvermijdbaar P-verlies wordt toegeschreven aan bodemscheikundige, -fysische en -biologische processen die niet direct manipuleerbaar zijn. Een deel van het toegediende fosfaat precipiteert of wordt zodanig door anorganische bodembestanddelen gebonden, dat het onbeschikbaar wordt voor planten. Daarnaast wordt een deel als gevolg van biologische activiteit vastgelegd (P-immobilisatie). Ook kan P door uit- en/of afspoeling verloren gaan. Metingen van parameters die deze processen kwantificeren zijn niet bij deze verzameling veldproeven uitgevoerd. Een mogelijkheid om deze posten van de P-balans te kwantificeren ontbrak daardoor. Het is dus niet mogelijk om uitsluitsel te geven welk proces (of processen) substantieel bijdraagt (bijdragen) aan een onvermijdbaar P-verlies. Onder de aanname dat de onderlinge wisselwerking tussen genoemde bodemprocessen resulteert in wijziging van de voor het gewas beschikbare fosfaat in de bodem, is een kwantificering mogelijk. De hoeveelheid fosfaat, die voor het gewas beschikbaar is, kan nl. met een aantal empirische methoden van chemisch grondonderzoek worden bepaald. Deze aanname kan echter niet met deze studie worden geverifieerd.

Het voor het gewas beschikbare fosfaat is in deze studie gedefinieerd als die hoeveelheid die met huidige methoden van bodemvruchtbaarheidsonderzoek is te bepalen (P<sub>w</sub>-getal en P<sub>AI</sub>-getal). Beide methoden zijn in principe niet ontwikkeld om een massabalans voor fosfaat op te stellen; zij geven à priori een indicatie over de fosfaatbehoefte van een gewas. Deze indicatie berust op een correlatie tussen een bepaalde fractie extraheerbaar fosfaat en een gewasparameter (opbrengstreactie, P-gehalte in een gewasonderdeel of P-opname oogstprodukt). Daarnaast kan het verloop van de P-toestand voor een gegeven bemestingsregime worden vervolgd. Veranderingen in P-toestand kunnen dan wel worden vastgesteld. Het onvermijdbaar P-verlies is berekend door de conditie op te leggen dat de P-toestand niet wijzigt, d.w.z. dat  $\Delta P_w$ -getal of  $\Delta P_{AI}$ -getal gelijkgesteld wordt aan nul bij positieve P-balans. De berekening berust verder op de grondslag dat de P-balans en de uitgangstoestand van P van de bodem bepalend zijn voor het verloop van de fosfaattoestand en dus voor de orde van grootte van het P-verlies. Deze grondslag is gebaseerd op het onderzoek van Prummel (1974). Daarnaast kunnen andere factoren zoals bekalking, grondsoort, meststofvorm en gewas van invloed zijn op de verandering van de P-toestand (Ehlert et al., 1994). In het kader van deze studie zijn daarvoor gangbare parameters van fysisch-chemisch grondonderzoek - algemeen grondonderzoek - en een aantal gangbare teelthandelingen (bekalking, keuze meststofvorm, dikte teeltlaag) gebruikt. Ondanks het omvangrijke bestand blijkt te weinig consistentie in de opbouw van de data te bestaan om

differentiatie aan te brengen op basis van meststofvorm, gewas (bouwlandsituatie), het effect van bekalking op bouwland, de dikte van de teeltlaag en diverse parameters van algemeen grondonderzoek. Dat wil niet zeggen dat er geen invloed uitgaat van deze variabelen op het verloop van de fosfaattoestand. Hun invloed kan in het algemeen als gevolg van het ontbreken van relevante gegevens en/of voldoende variatie niet met dit bestand worden onderzocht.

Ook de gekozen dimensie voor de verandering van de fosfaattoestand - kg  $P_2O_5$  per ha per jaar - heeft geleid tot een verlaging van het aantal bruikbare waarnemingen. Deze selectie van deelverzamelingen en standaardisatie is noodzakelijk om verantwoord het OVP te kunnen schatten.

Ondanks al deze beperkingen kunnen desalniettemin voor de belangrijkste grondsoorten en vormen van grondgebruik schattingen voor het landbouwkundig onvermijdbaar P-verlies worden gegeven. Daarbij valt op dat de resultaten van analyses van de verschillende deelverzamelingen niet gelijklopend zijn.

Bij breedwerpige toediening van fosfaat treedt op bouwland een onvermijdbaar P-verlies op (§ 4.4). Voor grasland op zeelei, dekzand, rivierlei en op veen bij breedwerpige toediening van kunstmestfosfaat is geen extra fosfaat nodig om de toestand van de grond te handhaven (§ 4.5). Bij een injectie van rundermest op 15-20 cm diepte wordt daarentegen wel een onvermijdbaar P-verlies vastgesteld. Bij extractie met water wordt wel effect gevonden van de contactduur van meststoffosfaat met grond (incubatieduur) op de verandering van de P-toestand van de grond, bij extractie met ammoniumlactaat-azijnzuur niet. Bovendien blijken de schattingen van het OVP vergezeld te gaan van relatief grote standaardfouten (varianties).

#### *Pw-getal op bouwland*

Om de P-toestand op bouwland te handhaven blijkt naarmate de toestand hoger is meer P te moeten worden gegeven. Het Pw-getal stijgt naarmate de P-gift toeneemt. Bij een gelijke P-gift die groter is dan het onvermijdbaar verlies, is deze stijging groter bij hogere P-toestanden dan bij lagere toestanden. Bij een P-balans gelijk aan nul is het niveau van de verandering van de P-toestand bij een hogere P-toestand lager dan die van lagere P-toestanden. Deze bevindingen bevestigen de resultaten van onderzoek van Prummel (1974), Ris & Van Luit (1982) en Van Noordwijk et al. (1990).

De schatting van de hoeveelheid fosfaat die nodig is om de toestand te handhaven is volgens deze studie hoger dan de in de literatuur geciteerde waarden (40 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar t.o.v. 20 kg  $P_2O_5$  kg per ha per jaar bij een Pw-getal van 30 mg  $P_2O_5$  per liter grond (Ris & Van Luit, 1982). Dit verschil wordt toegeschreven aan de methode van onderzoek (multipel regressie-analyse met weging van variatie in  $\Delta Pw$ -getal t.o.v. de grafische bewerking op basis van gemiddelden van groepen veldproeven ingedeeld naar initiële P-toestand). Daarnaast berust de schatting in deze studie op een gemeten P-afvoer met het gewas en niet op een aangenomen norm voor de P-afvoer, hetgeen wel het geval is bij eerdergenoemd onderzoek. Verder bleek een deel van de verzameling veldproeven die door Prummel (1974) is gebruikt niet te voldoen aan selectiecriteria van dit statistisch onderzoek. Hoewel het aantal veldproeven niet belangrijk uiteenloopt - in dit onderzoek 35 veldproeven, in het onderzoek van Prummel 39 veldproeven - verschillen de databestanden daardoor wel belangrijk qua aard van de onderzoeksgegevens. Zo zijn nu ook veldproeven met dierlijke mest opgenomen. Een onderscheid naar meststofvorm kan in dit onderzoek niet worden aangebracht vanwege het ontbreken van voldoende gegevens. Uitsluiten van de dierlijke meststoffen daarentegen leidt tot een drastische daling van het aantal

waarnemingen, waardoor de schatting van onvermijdbare fosfaatverliezen aanzienlijk wordt verzwakt.

#### *P-Al-getal op bouwland en grasland*

De deelverzameling van de veldproeven 'P-Al-getal en bouwland' werd gedomineerd door de verschillende deelexperimenten van de veldproef te Mantinge. Bij de statistische analyses is daarmee rekening gehouden door weging (zie § 3.4). Bij deze veldproef is een reparatiebemesting met natuurfosfaat (egalisatiebemesting) uitgevoerd. Naast deze reparatiebemesting zijn alleen gegevens afkomstig van behandelingen met superfosfaat gebruikt (zie § 4.2.2). Daarnaast is met grote regelmaat een onderhoudsbekalking uitgevoerd. De combinatie van reparatiebemesting en bekalking heeft klaarblijkelijk een effect uitgeoefend op de omzetting van superfosfaat tot niet met ammoniumlactaat-azijnzuur extraheerbaar fosfaat. Daarnaast is kennelijk een vertragend effect uitgeoefend op het ter beschikking komen van natuurfosfaat voor het gewas; een deel van het natuurfosfaat heeft niet effectief bijgedragen aan de verhoging van het P-Al-getal. De deelverzameling van de veldproeven 'P-Al-getal en grasland' werd gedomineerd door BZ25, een veldproef op kleigrasland. Deze laatste deelverzameling gaf geen aanwijzingen voor een sterke fosfaatvastlegging of ineffektieve werking van fosfaatmeststoffen. Het geconstateerde verschil tussen bouwland en grasland qua orde van grootte van het onvermijdbaar P-verlies kan dus een gevolg zijn van een verschil in effectiviteit van de meststofvorm. Daarnaast zijn andere oorzaken voor het verschil te geven.

Er is verschil in de dikte van de bemonsterde teeltlaag; op bouwland is deze 20 cm en op grasland 5 cm. De deelverzameling 'P-Al-getal op bouwland' heeft geen informatie over een bouwvoordikte van 5 cm; de laagste waarde is 15 cm (tabel 6). Het is dan ook onverantwoord om voor bouwland op basis van vergelijking (8) een onvermijdbaar P-verlies voor de laagdikte van 5 cm te berekenen. Bij de ondergrens van een bouwvoordikte van 15 cm kan met vergelijking (8) een onvermijdbaar P-verlies van 15 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar worden berekend (betrouwbaarheidsinterval -68 tot 98 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar). Deze berekening geeft wel aan dat het verschil tussen de resultaten van analyse aan de deelverzamelingen 'bouwland en P-Al-getal' en 'grasland en P-Al-getal' naast gecombineerd effect van reparatiebemesting met natuurfosfaat en bekalking ook toe te schrijven is aan het verschil in dikte van de teeltlaag. Bij interpretatie van de getalswaarden van de schattingen voor het onvermijdbare P-verlies van § 4.4.2 en van § 4.4.3 dienen de condities van de afleiding duidelijk in acht te worden genomen.

De verschillen tussen bouwland en grasland bij breedwerpige toediening van kunstmestfosfaat worden ook toegeschreven aan grondbewerking. Bij veeljarige veldproeven op grasland ontbreekt grondbewerking. Toegediend fosfaat wordt daardoor geconcentreerd in de zodelaag. In een bouwlandsituatie zal het meststoffosfaat jaarlijks over een bepaald volume van de bouwvoor worden verdeeld. Door het verschil in cultuurgebruik zijn of ontstaan er verschillen in gehalten aan organische stof. In deze analyse had deelverzameling grasland gemiddeld 13,1%; de deelverzameling bouwland gemiddeld 5,8%. Het is bekend dat organische stof P kan beschermen tegen sterke vastlegging ('fixatie') aan bodembestanddelen (Holford & Mattingly, 1975). Daarnaast kan meer fosfaat worden vastgelegd in organische stof (fosfaatimmobilisatie) dat door mineralisatie op termijn weer vrijkomt. Verder hadden alle veldproeven op grasland vermeld in § 4.5.1 een lage fosfaattoestand bij aanvang van het veeljarige onderzoek (P-Al-getal < 20 mg  $P_2O_5$  per 100 g luchtdroge grond). Onder deze conditie zullen bodemlagen onder de zodelaag bijdragen aan de P-voorziening van gras (Ehlert, 1985). Transport van P door wortels naar de graszode treedt dan op. Afstervende wortels, die bij grasland met name in de bovenste 5



cm zijn geconcentreerd, plus afgestorven bovengrondse biomassa kunnen dan bijdragen aan een relatieve verrijking van de zodelaag met P. Deze verrijking van de zodelaag is kennelijk voldoende om irreversibele vastlegging, immobilisatie en uitspoeling van P - meer dan - te compenseren. De analyse van de mestinjectieproeven (§ 4.5.3) geeft aan dat deze compensatie ook bij ruim voldoende fosfaattoestanden op dekzand nog plaats vindt. Het opmerkelijk verschil tussen de resultaten van berekening van het onvermijdbaar P-verlies van bouw- en grasland op basis van het P-Al-getal wordt verder ook toegeschreven aan verschillen tussen grondsoorten.

Bij injectie van rundermest op grasland is een onvermijdbaar P-verlies zeker. Het verlies wordt groter naarmate het P-Al-getal toeneemt (§ 4.5.3). De berekende P-verliezen op basis van de bemonstering van de laag 0-20 cm hebben voor bouw- en grasland bij emissiearme mesttoediening een vergelijkbaar niveau; bij de landbouwkundige waardering van de bodemvruchtbaarheidstoestand 'voldoende' zo'n 20-30 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar. De condities waaronder deze getalswaarden zijn berekend, staan vermeld in § 4.4 en § 4.5.3. Bij ondiepere emissiearme toediening door zodebemesting of sleepslangen mag verwacht worden dat het verlies lager zal uitvallen. Immers, bij deze technieken wordt dierlijke mest grotendeels op of in de zode geplaatst. Bij grondonderzoek zal dan het fosfaat uit dierlijke mest kunnen worden bepaald. Bij een injectiediepte van 15-20 cm dient de bemonsteringsdiepte minimaal 0-20 cm te bedragen om het op diepte geplaatste fosfaat d.m.v. chemisch grondonderzoek te kunnen bepalen.

#### *Incubatieduur*

Een langere incubatieduur van meststoffosfaat met de bodem geeft bij een overschot op de P-balans een geringere verandering van het Pw-getal (§ 4.4.1). De incubatieduur blijkt geen variatie in  $\Delta P$ -Al-getal (met name bouwland) te verklaren. Een aantal oorzaken voor het verschil is te geven. Een voor de hand liggende oorzaak is de door kinetiek bepaalde omzetting van meststoffosfaat tot bodemfosfaat. Toch is dit bodemchemisch proces niet de enige oorzaak. De incubatieduur is nl. berekend uit het tijdstip van de bemonstering van de teeltaag na de oogst en het tijdstip van bemesting. De incubatieduur valt daardoor samen met de periode waarin het gewas actief P uit de bodem onttrok. Gewassen met een langere groeiduur nemen doorgaans meer P op. Bij deze regressieanalyse is de verklarende variabele 'incubatieduur' dan ook verstrengeld met gewasopname en daardoor gewasopname ook met het bodemchemisch proces.

Een andere oorzaak berust op het verschil in extractiemiddelen van het Pw-getal en het P-Al-getal. Het Pw-getal berust op een extractie met water en hiermee worden de meest labiele fosfaatvormen bepaald. Ammoniumlactaat-azijnzuur is een sterker extractiemiddel voor fosfaat dan water. Er wordt, bij herleiding tot eenzelfde dimensie, dus een grotere hoeveelheid fosfaat met ammoniumlactaat-azijnzuur geëxtraheerd. Niet alleen labiele fosfaatvormen worden ermee geëxtraheerd maar ook stabielere vormen die sterker aan grond zijn geadsorbeerd of slechter oplosbaar zijn. De omzetting van labiele fosfaatvormen naar deze meer stabiele vormen kan daardoor niet met ammoniumlactaat-azijnzuur worden vastgesteld. Pas als een omzetting van meststoffosfaat in bodemfosfaat plaatsvindt welke niet of slechts gedeeltelijk met ammoniumlactaat-azijnzuur - vergelijk de resultaten van de reparatiebemesting met natuurfosfaat - is te extraheren kan een invloed van de incubatieduur worden verwacht. Dat moet dan wel een grote invloed zijn om te kunnen worden waargenomen. Immers, de dimensie van het P-Al-getal is mg  $P_2O_5$  per 100 g luchtdroge grond terwijl die van het Pw-getal mg  $P_2O_5$  per liter grond is. Daardoor zal - gelet op de herhaalbaarheid van de analyse - bij een gelijk overschot aan P op de massabalans de verandering van het Pw-getal sneller leiden tot significante verschillen in  $\Delta P$ -Al-getal dan op zal treden bij  $\Delta P$ -Al-getal.

Op grond van de hier gegeven oorzaken is het dus niet zo wonderlijk dat de incubatieduur geen variatie in  $\Delta P\text{-Al}$ -getal verklaart.

#### *Betrouwbaarheid van de schatting van het OVP*

De standaardfouten van de schattingen van het OVP voor bouwland op basis van  $\Delta P\text{w}$ -getal en  $\Delta P\text{-Al}$ -getal zijn relatief groot hetgeen leidt tot een groot betrouwbaarheidsinterval (tabellen 5 en 8). De standaardfouten voor de schatting op basis van  $\Delta P\text{w}$ -getal zijn over het algemeen lager dan die op basis van  $\Delta P\text{-Al}$ -getal. Toch kent de bepaling van het  $P\text{w}$ -getal een minder gunstige herhaalbaarheid dan die van het  $P\text{-Al}$ -getal. Deze 'analysefout' speelt dan - kennelijk - een ondergeschikte rol om verschillen in standaardfout te kunnen verklaren. Ook het vergroten van de omvang van het databestand heeft niet geleid tot een hogere precisie van de schatting van het OVP (vergelijk de resultaten van Ehlert et al. (1994) met de resultaten van dit rapport). De verschillen in standaardfouten moeten dan in hoofdzaak zijn gebaseerd op verschillen in herkomst van de data van de observationele eenheden en variatie tussen veldproeven. Deze verschillen worden bepaald door een grote diversiteit in gewassen, bodemkenmerken en meststofvormen. Verhoging van de betrouwbaarheid van de schatting van de OVP is dan te verkrijgen door bijdragen van onder meer gewassen, bodemkenmerken en meststoffen aan de standaardfout van het OVP vast te stellen. Deze vaststelling houdt een grotere differentiatie in maar tevens een mogelijkheid tot verfijning van de schatting van het OVP.

#### *Mogelijkheden om het landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverlies te verlagen*

Om huidige normen van de kwaliteit van het ondiepe grondwater niet te overschrijden zou ruwweg niet meer dan 1 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar mogen uitspoelen (Oenema & Van Dijk, 1994). De berekende landbouwkundige onvermijdbare fosfaatverliezen uit deze studie zijn aanzienlijk groter dan milieukundig gewenst is. Deze studie reikt handvatten aan om het gat tussen milieukundig toelaatbare fosfaatverliezen en landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverliezen te verkleinen en zo mogelijk te dichten.

In alle onderzochte gevallen blijkt de fosfaattoestand bepalend te zijn voor de orde van grootte van het landbouwkundig fosfaatverlies. Dit verlies is belangrijk lager bij fosfaattoestanden met waarderingen 'laag' of 'voldoende' in vergelijking met die bij de toestanden 'vrij hoog' en hoger. Uitmijning van de fosfaattoestand van de teeltlaag is dan een optie om een ecologisch verantwoorde landbouw te bedrijven. Een verlaging van de fosfaattoestand is ook bij een overschot op de fosfaatbalans mogelijk. Een overschot dat bij een bepaalde fosfaattoestand lager is dan het onvermijdbare fosfaatverlies zal namelijk leiden tot een daling van het voor het gewas beschikbare fosfaat in de bodem (deze studie). Een drastische verlaging van hoge fosfaattoestanden van de akker- en graslandbodems is op korte termijn niet realiseerbaar omdat de evenwichtsinstelling door een wijziging in de fosfaatbalans vele tientallen jaren in beslag neemt.

Op kortere termijn kan op bouwland het onvermijdbare fosfaatverlies ook worden verlaagd door de meststof kort voor het zaaien, poten of planten uit te rijden. Hoe korter de tijdsduur van contact van meststof met de teeltlaag, hoe lager het onvermijdbare fosfaatverlies blijkt te zijn.

Op grasland kan het onvermijdbare fosfaatverlies verkleind worden door ondieper mest te injecteren. Naarmate de fosfaatmeststof ondieper wordt ingebracht, des te lager zal het onvermijdbare fosfaatverlies zijn.

Het vergroten van de kennis over de bijdragen van diverse gewassen, bodemkarakteristieken en fosfaatvormen zal meer mogelijkheden tot verlaging van het landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverlies opleveren.



## 6. Conclusies

Met de verzameling metingen afkomstig van veeljarige fosfaathoeveelheden-veldproeven kan een schatting gemaakt worden van het 'landbouwkundig onvermijdbaar verlies'. Onderscheid moet worden gemaakt naar het extractiemiddel (water of ammoniumlactaat-azijnzuur) en cultuurgebruik. Een causale bewijsvoering voor het optreden van onvermijdbare P-verliezen wordt met dit observationeel onderzoek niet verkregen.

De verzamelde gegevens zijn talrijk maar de onderlinge samenhang van de observationele eenheden is inconsistent waardoor deelverzamelingen moesten worden geselecteerd. Analyse van deze deelverzamelingen leidt tot de volgende conclusies.

Uit het verloop van de fosfaattoestand op bouwland zijn duidelijke aanwijzingen verkregen voor het optreden van onvermijdbare fosfaatverliezen (tabellen 5, 8 en 13 en figuren 8, 9, 10 en 11).

De verandering van het labiele fosfaat, dat met water uit grond wordt geëxtraheerd (Pw-getal, schudverhouding 1:60 V/V), blijkt afhankelijk te zijn van de orde van grootte van de P-balans, de initiële P-toestand en de incubatieduur van meststoffosfaat met de grond. Met toename van de incubatieduur is meer fosfaat nodig om het Pw-getal op een bepaald niveau te handhaven.

De verandering van het meer stabiele fosfaat met ammoniumlactaat-azijnzuur - P-Al-getal - op bouwland blijkt alleen bepaald te worden door de P-balans en de initiële P-toestand.

Om de landbouwkundige waardering van de fosfaattoestand 'voldoende' te handhaven blijkt zo'n 30-40 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar nodig te zijn boven de onttrekking. Bij hogere fosfaattoestand blijkt meer fosfaat gegeven te moeten worden om die hogere toestanden te handhaven.

De textuur van de grond blijkt variatie in de verandering van de fosfaattoestand niet te verklaren.

Op grasland zijn op basis van het P-Al-getal geen aanwijzingen verkregen voor het optreden van onvermijdbare fosfaatverliezen bij breedwerpige toediening van kunstmestfosfaat voor de grondsoorten zeeklei, dekzand, rivierklei en veen.

Dit geldt niet voor emissie-arme toediening van dierlijke mest op 15-20 cm diepte; daar treden onvermijdbare fosfaatverliezen op en wel hoger naarmate de P-toestand stijgt. Op basis van de bemonstering van de laag 0-20 cm bedraagt de schatting voor het OVP ca. 20-30 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar bij een voldoende fosfaattoestand.

Vanwege het ontbreken van relevante informatie over gewassen, bodemkenmerken en meststofvormen kan in het algemeen onvoldoende differentiatie worden aangebracht in de schattingen van onvermijdbare P-verliezen. Daardoor zijn de standaardfouten bij deze schattingen relatief groot. De analysefout in de bepaling van het Pw-getal of het P-Al-getal speelt hierbij een ondergeschikte rol.

De resultaten van dit observationeel statistisch onderzoek ondersteunen de normen voor reparatiebemesting op bouwland.

De analyse biedt een handvat om het verloop van de fosfaattoestand in de tijd bij opgelegde condities te schatten. Bij een tekort op de fosfaatbalans daalt de fosfaattoestand. Op bouwland zal een gift lager dan het onvermijdbaar fosfaatverlies bij een Pw-getal van 30 mg  $P_2O_5$  per liter grond eveneens leiden tot een daling van die toestand. Een gift gelijk aan het onvermijdbaar verlies handhaaft die fosfaattoestand terwijl een gift groter dan dat verlies een stijging teweeg brengt. Naarmate het overschot op de fosfaatbalans meer overeenkomt met het bij de desbetreffende fosfaattoestand behorende onvermijdbaar verlies, zal sneller een evenwicht in fosfaattoestand worden bereikt. Bij een zeer hoge fosfaattoestand - Pw-getal 100 mg  $P_2O_5$  per liter grond - kon in een periode van 100 jaar geen evenwicht worden vastgesteld bij fosfaatoverschotten variërend van 0-70 kg  $P_2O_5$  per ha per jaar.

Een overschot op de fosfaatbalans bij breedwerpige toediening van kunstmestfosfaat op grasland leidt tot een verhoging van de fosfaattoestand. De statistische analyse biedt geen mogelijkheden om een schatting uit te voeren naar de orde van grootte van de hoeveelheid fosfaat die nodig is om hoge tot zeer hoge fosfaattoestanden te handhaven.

Het landbouwkundig onvermijdbaar fosfaatverlies is te verlagen door fosfaatrijke gronden uit termijnen naar de fosfaattoestanden met een waardering 'laag' tot 'voldoende'. Door de fosfaatmeststof op bouwland zo kort mogelijk voor het zaaien, planten of poten toe te dienen, wordt eveneens het landbouwkundig onvermijdbare fosfaatverlies verlaagd. Tenslotte kan eveneens dit verlies verlaagd worden door op grasland mest zo ondiep mogelijk te injecteren.

## 7. Literatuur

- Alblas, J., 1980. Fosfaatbemesting op estuariumgronden (Ervaringen met proefveld ZWZH1355). *Bedrijfsontwikkeling* 11: 607-610.
- Anonymus, 1993. Kiezen uit gehalten. Forfaitaire gehalten voor de Mineralenboekhouding 1994. Project Mineralenboekhouding.
- Bakker, H., de & Schelling, J., 1966. Systeem van bodemclassificatie voor Nederland. De hogere niveaus. Centrum voor Landbouwdocumentatie, Wageningen, 217 pp.
- Boer, D.J. den, Middelkoop, J.C. van, Wouters, A.P. & Everts, H., 1994a. Effect van jaarlijks injecteren op fosfaatopbrengst en P-Al-getal. *Praktijkonderzoek* 7(1994)6: 47-50.
- Boer, D.J. den, Middelkoop, J.C. van, Wouters, A.P. & Everts, H., 1994b. Effect kunstmestfosfaat op drogestofopbrengst en P-gehalte in weidegras bij jaarlijks injecteren. *Praktijkonderzoek* 7(1994)6: 51-54.
- Breeuwsma, A. & Berghs, M.E.G., 1993. Fosfaatevenwichtsbemesting. Analyse van de fosfaatproblematiek en de kennisbehoefte voor de invulling van de eindnormen. Onderzoek inzake de mest- en ammoniakproblematiek in de veehouderij 17, Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Wageningen, 48 pp.
- Centraal Bureau voor de Statistiek, 1989. Algemene milieustatistiek 1989. SDU-Uitgeverij, CBS-publikaties 1989.
- Dagpunar, J., 1988. Principles of random variate generation. Clarendon Press, Oxford, 228 pp.
- Egnër, H., Riehm, H. & Domingo, W.R., 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Boden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. *Kunliga Landbrukshögskolans Annaler* 26, pp. 199-215.
- Ehlert, P.A.I., 1985. Betekenis van de fosfaat- en kalitoestand van de onder de zode gelegen bodemlagen voor de fosfaat- en kalivoorziening op grasland. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren, Rapport 11-85, 32 pp.
- Ehlert, P.A.I., Burgers, S.L.G.E. & Steenhuizen, J.W., 1994. Onvermijdbare afname van de beschikbaarheid van fosfaat in grond. Voortgangsrapportage ten behoeve van de Technische Projectgroep P-deskstudie, werkgroep "Cluster Proefveld". DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek, Nota 5, 76 pp.
- Holford, I.C.R. & Mattingly, G.E.G., 1975. The high and low-energy phosphate absorbing surfaces in calcareous soils. *Journal of Soil Science* 26: 407-417.
- IKC, 1992. Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouwgewassen 1992-1993. Informatie en Kennis Centrum Akker- en Tuinbouw, Afdeling Akkerbouw en Vollegrondsgroenteteelt. Samenstelling: Commissie voor de bemesting van akkerbouwgewassen (bouwland). E.R.M. Sieling (productie), 28 pp.
- Korevaar, H., 1986. Productie en voederwaarde van gras bij gebruiks- en bemestingsbeperkingen voor natuurbeheer. Dissertatie LU-1111, Landbouwuniversiteit Wageningen/Rapportno. 101, Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij.
- Noordwijk, M. van, Willigen, P. de, Ehlert, P.A.I. & Chardon, W.J., 1990. A simple model of P uptake by crops as a possible basis for P fertilizer recommendations. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38: 317-332.

- Oenema, O., 1993. Onvermijdbare afname van de beschikbaarheid van fosfaat in grond; een studie naar 'fosfaatverliezen' door fixatie en immobilisatie. FOMA-Project 3.48.
- Oenema, O. & Dijk, T.A. van, 1994. Fosfaatverliezen en fosfaatoverschotten in de Nederlandse landbouw. Rapport van de technische projectgroep 'P-deskstudie'. Ministeries van LNV, VROM, V&W, Landbouwschap en Centrale Landbouworganisaties, 102 pp.
- Oude Voshaar, J.H., 1994. Statistiek voor onderzoekers. Wageningen Pers, Wageningen, 253 pp.
- Paauw, F. van der, 1955. Voorlopige mededeling over meerjarige fosfaatproeven (serie 1) t/m 1953. Centraal Instituut voor Landbouwkundig Onderzoek, Wageningen, Gestencilde verslagen van Interprovinciale Proeven nr. 51, 50 pp + bijlagen.
- Postma, S., 1995. Toediening van dierlijke mest op löss-, dal- en lichte zavelgrond. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad, Verslag nr. 197, 111 pp.
- Prummel, J., 1958. Voorlopige mededeling over meerjarige fosfaattoestanden - hoeveelheden - proefvelden (serie 2) t/m 1956. Proefstation voor de Akker- en Weidebouw, Wageningen, Gestencilde verslagen van interprovinciale proeven nr. 63, 14 pp + bijlagen.
- Prummel, J., 1974. Veranderingen in het Pw-getal in de loop van de tijd en onder invloed van de bemesting. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren, Rapport 9-74, 23 pp.
- Ris, J., & Luit, B. van, 1982. The establishment of fertilizer recommendations on the basis of soil tests. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, 52 pp.
- Salm, C., van der & Breeuwsma, A., 1995. Fosfaatverliezen in kalkloze zandgrond. Vergelijking van modelberekeningen en meetgegevens voor gras- en maisland. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Rapport 904.
- Schröder, J., 1985a. De invloed van grote giften runderdrijfmest op de groei, opbrengst en kwaliteit van snijmais en op de bodemvruchtbaarheid; Heino (zandgrond) 1972 - 1982. PR139, IB0076, PAGV31; Verslag nr. 30. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad, 151 pp.
- Schröder, J., 1985b. De invloed van grote giften runderdrijfmest op de groei, opbrengst en kwaliteit van snijmais en op de bodemvruchtbaarheid en waterverontreiniging; Maarheeze (zandgrond) 1974 - 1982. PR312, IB0075, PAGV32, ICW 155.2; Verslag nr. 31. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad, 101 pp.
- Schröder, J., 1985c. De invloed van grote giften runderdrijfmest op de groei, opbrengst en kwaliteit van snijmais en op de bodemvruchtbaarheid; Lelystad (kleigrond) 1976 - 1980. PR511, IB0074, PAGV33; Verslag nr. 32. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad, 101 pp.
- Sissingh, H.A., 1971. Analytical technique of the Pw method, used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. Plant and Soil 34: 483-446.
- Stichting Voorlichtingsdienst voor Superfosfaat, 1958. Gids voor de Centrale proefvelden in de Sevenumse Peel (L.) en te Mantinge (Dr.), Wageningen.
- Zee, S.E.A.T.M. van der & Campillo, M.C. del, 1995a. Duurzaamheid van de eindnormen voor fosfaatbemesting. Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding.
- Zee, S.E.A.T.M. van der & Campillo, M.C., del, 1995b. Uitspoeling en fixatie van fosfaat - overwegingen voor de balans van de bouwvoor. Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding.



## **Bijlagen**



## **Bijlage 1. Samenwerkende instellingen**

DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO)  
Postbus 129, 9750 AC Haren (Gr.)  
dr.ir. W.J. Chardon, ir. P.A.I. Ehlert, prof.dr.ir. O. Oenema (vanaf 1-5-1995) en ing. J.W. Steenhuizen

DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)  
Postbus 125, 6700 AC Wageningen  
dr.ir. A. Breeuwsma, ir. J.G.A. Reijerink en drs. C. van der Salm

Landbouw Universiteit Wageningen,  
Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding (LUW-BoPla)  
Postbus 8005, 6700 EC Wageningen  
prof.dr. W.H. van Riemsdijk

Nutriënten Management Instituut (NMI)  
Agro Business Park 20, 6708 PW Wageningen  
ing. T.A. van Dijk en prof.dr.ir. O. Oenema (tot 1-5-1995)

Nutriënten Management Instituut (NMI-PR)  
Runderweg 6, 8219 PK Lelystad  
ir. D.J. den Boer

Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond (PAGV)  
Postbus 430, 8200 AK Lelystad  
ing. J. Alblas, ing. S. Postma en ir. H.H.H. Titulaer

Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij (PR)  
Runderweg 6, 8219 PK Lelystad  
ir. A.P. Wouters

Op persoonlijke titel:

H. Neutel, gebruik makend van gegevens van de voormalige Stichting Voorlichtingsdienst voor Superfosfaat te Wageningen



## **Bijlage 2. Herkomst van de databestanden**

### **DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO):**

D178, D179, D180, IB201, IB1591, IB1747, IB1749, IB1750, L803, L806, L881, L936, L942, L943, L944, L945, L949, L955, L958, L961, MB5, NGR1591, NZH147, NZH518, NZH521, OB3049, OB3106, OGE1117, OO1088, PR87, U366, WB1435, WB1701, WF387, WF388, WR16 (= ZL256, = IB0077), Z980, ZGE384, ZGE836 en ZVL133.

### **Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond (PAGV):**

AGM621, BEM712, BEM747, KL675, KL704, PAGV31 (= IB0076, = PR139), PAGV32 (= IB0075, = ICW155.2, = PR312), PAGV33 (= IB0074, = PR511, opgesplitst in twee files: PAGV33 en PAGV33B), PAGV1801, RH759, RH1100, RH1200, VM601, WG175, WR600, WS451 en ZWZH1355 (= IB0077).

### **Nutriënten Management Instituut (NMI):**

IB2049 (= G105), IB2140, IB2205 (= een voortzetting van IB2140), IB2372, IB2450, IB2612, IB2928, IB3054, IB3124, IB3140, IB3249, IB3270, PR3537 en PR3540.

### **De voormalige Stichting Voorlichtingsdienst voor Superfosfaat:**

Proefveld te Mantinge, opgesplitst in zes files: MANTAA (= veld A, blok I en II), MANTAC (= veld C), MANTEK3 (= veld A, blok III), MANTEK4 (= veld A, blok IV), MANTEK5 (= veld A, blok V) en MANTEK6 (= veld A, blok VI).

### **Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij (PR):**

BZ25, PR891, PR3537, PR3540, en ZV30.



## **Bijlage 3.**





## Overzicht van de lokatie, bodemkaartenheid' en analyse van algemeen grondonderzoek per veldproef.

Code	Lokatie proefveld	Kaart- eenheid bodem- kaart	pH- KCl'	Ca- CO <sub>3</sub>	Org. stof	Lutum	Slib	Silt	>210 µm	Zand tot.	Grof zand	Fijn zand
als percentage van de totale grond												
AGM621	Emmercompascuum	iVz	5.00	0	16.0	15.7	3.5'	*	*	*	*	*
BEM712	Wieringerwerf	2	7.60	10.3	1.8	15.7	20.1	*	*	67.8	*	*
BEM747	Wieringerwerf	3	7.60	10.0	2.2	19.3	24.9	*	*	*	*	*
BZ25	Burum	bMn25C	5.00	0.5	13.2	21.2	36.7	43.7	*	50.6	*	*
D178	2e Exloërmond	iWp	4.61	0	12.7	*	4.0	*	*	84.0	59.0	25.0
D179	Oldendiever	Hn23x	4.41	0	5.7	*	4.0	*	*	90.0	70.0	20.0
D180	Wezup, Zweelo	Hn21x	4.63	0	5.1	*	4.0	*	*	91.0	74.0	17.0
IB201	Zeijen	Hn23x	3.95	0	10.9	*	5.7'	*	*	*	*	*
IB1591	Wijster	Hn23x	5.44	0	5.4	*	5.6'	*	*	*	*	*
IB1747	Assen	Hn21x	4.32	0	5.6	*	5.6'	*	*	*	*	*
IB1749	Wijster	Hn23x	4.84	0	6.9	*	5.6'	*	*	*	*	*
IB1750	Hoogersmilde	Hn23x/kx	4.64	0	6.2	*	3.7'	*	*	*	*	*
IB2049	Gortel	gHn30	5.27	0	5.7	*	3.7'	*	*	*	*	*
IB2140	Hedel	Rn44C	5.00	0	21.0	*	62.0	*	*	*	*	*
IB2205	Hedel	Rn44C	5.00	0	21.0	*	62.0	*	*	*	*	*
IB2372	Hedel	Rn44C	5.20	0	17.5	*	62.0	*	*	*	*	*
IB2450	Ydermade	Hn21	4.60	0	5.7	*	7.0	*	*	87.0	*	*
IB2612	Ydermade	Hn21	4.50	0	10.1	5.0	8.0	*	*	68.0	*	*
IB2928	Ureterp	zWzx	4.70	0	7.2	*	4.9	*	*	88.0	*	*
IB3054	Jubbega	Hn21	4.50	0	4.9	1.4	1.6	4.1	30.3	59.4	*	*
IB3124	Jubbega	Hn21	4.78	0	5.8	1.1	1.4	3.7	31.7	57.7	*	*
IB3140	Ydermade	Hn21	4.99	0	23.1	3.8	6.3	38.5	18.7	15.9	*	*

Code proef- veld	Lokatie proefveld	Kaart- eenheid bodem- kaart	pH KCl <sup>s</sup>	Ca- CO <sub>3</sub>	Org. stof	Lutum	Slib	Silt	>210 µm	Zand tot.	Grof zand	Fijn zand
als percentage van de totale grond												
1:50.000												
IB3249	Donderen	zWz	5.45	0	13.5	3.9	7.6	20.0	17.6	45.0	*	*
IB3270	Donderen	Hn23	4.82	0	8.7	3.2	8.3	20.3	18.6	49.2	*	*
KL675	Biddinghuizen	Mn45Ap	7.30	8.9	3.7	36.8	59.9	*	*	*	*	*
KL704	Biddinghuizen	Mn45Ap	7.40	8.8	2.1	36.8	62.7	*	*	*	*	*
L803	Wijnandsrade	BLb6C	5.12	0	2.3	*	28.7	*	*	69.1	2.2	67.1
L806	Berg en Terblijt	BLd6A	5.58	0	2.2	*	25.7	*	*	72.0	3.7	68.0
L881	Maasbree	zEZ23	4.16	0	4.9	*	4.0	*	*	91.0	58.0	33.0
L936	Nijswiller-Wittem	BLd6A	5.08	0	1.8	*	30.5	*	*	67.7	2.0	65.2
L942	St. Geertruid	BLd6A	6.62 <sup>s</sup>	0.1	2.2	*	26.2	*	*	71.4	2.0	67.5
L943	Eijsden	Ldh6mA	7.27 <sup>s</sup>	0.1	2.4	*	32.6	*	*	65.0	11.3	52.3
L944	Heer	Ldd6	5.79 <sup>s</sup>	0.1	2.6	*	28.8	*	*	68.8	4.3	63.7
L945	Houthem	BLb6/Ld6	*	0.2	2.6	*	21.7	*	*	76.0	*	*
L949	Geleen	Blb6	4.33 <sup>s</sup>	0	2.0	*	21.0	*	*	77.4	3.7	74.0
L955	Neer	Bkd25	5.11 <sup>s</sup>	0	1.9	*	20.8	*	*	77.4	45.0	33.0
L958	Baarlo	Bzd24	5.09 <sup>s</sup>	0	1.4	*	15.2	*	*	83.6	69.0	14.5
L961	Swolgen	Krd19	5.10 <sup>s</sup>	0	2.2	*	17.2	*	*	80.6	45.7	34.3
MANTAA	Mantinge	Hn21x	4.65	0	6.6	*	2.7 <sup>i</sup>	*	*	*	*	*
MANTAC	Mantinge	Hn21x	5.05	0	6.9	*	2.7 <sup>i</sup>	*	*	*	*	*
MANTEK3	Mantinge	Hn21x	4.50	0	7.4	*	2.7 <sup>i</sup>	*	*	*	*	*
MANTEK4	Mantinge	Hn21x	4.49	0	7.5	*	2.7 <sup>i</sup>	*	*	*	*	*
MANTEK5	Mantinge	Hn21x	4.50	0	7.8	*	2.7 <sup>i</sup>	*	*	*	*	*
MANTEK6	Mantinge	Hn21x	4.80	0	6.5	*	2.7 <sup>i</sup>	*	*	*	*	*
MB5	St. Joachimsmoer	zEZ21	4.25	0	4.9	*	7.7 <sup>i</sup>	*	*	*	*	*
NGR1591	Westpolder, Ulrum	Mn25A	7.31	7.2	2.0	*	25.6	*	*	65.6	28.6	37.2

Code proef- veld	Lokatie proefveld	Kaart- eenheid bodem- kaart 1:50.000	pH- KCl*	Ca- CO <sub>3</sub>	Org. stof	Lutum	Slib	Silt	>210 µm	Zand tot.	Grof zand	Fijn zand
als percentage van de totale grond												
NZH147	Zevenhuizen	pMn85A	7.09	4.7	5.3	*	40.0	*	*	50.0	12.0	38.5
NZH518	Waddinxveen	pMn86C	5.43	0.2	14.4	*	51.8	*	*	36.4	1.8	35.0
NZH521	Zoetermeer	pMn85A	5.88	0	3.1	*	31.0	*	*	66.4	29.4	37.6
OB3049	Aarle-Rixtel	Hn21	4.59	0	3.1	*	8.0	*	*	89.0	*	*
OB3106	Oirschot	zEZ23	4.23	0	4.2	*	6.8	*	*	91.0	*	*
OGE1117	Zevenaar	Rn66A	5.23	0	4.6	*	68.0	*	*	27.0	3.0	24.0
OO1088	Bergentheim	iVz	4.22	0	9.4	*	3.6'	*	*	*	*	*
PAGV31	Heino	zEZ21	4.60	0	4.2	*	6.6'	*	*	*	*	*
PAGV32	Maarheeze	zEZ21	5.20	0	2.9	*	5.8'	*	*	*	*	*
PAGV33	Lelystad	Mn35A	*	*	3.9	*	38.0	*	*	*	*	*
PAGV33B	Lelystad	Mn35A	*	*	3.9	*	38.0	*	*	*	*	*
PAGV1801	Lelystad	Mn35A	7.50	6.3	2.2	*	21.3	*	70.8	*	*	*
PR87	Emmercompasuum	iWp	3.99	0	6.6	*	4.6'	*	*	*	*	*
PR891	Nijbeets	hVc	4.70	*	62.4	16.7	24.9	*	*	13.0	*	*
PR3537	Moergestel	Hn21	5.22	0	4.8	*	4.8'	*	*	*	*	*
PR3540	Moergestel	Hn21	4.74	0	4.9	*	4.8'	*	*	*	*	*
RH759	Kamperland	Mn25A	*	10.5	2.1	*	27.9	*	*	59.7	*	*
RH1100	Kortgene	Mn25A	7.40	9.7	1.5	24.7	31.7	*	*	*	*	*
RH1200	Kamperland	Mn35A	7.50	15.4	2.3	34.0	42.9	*	*	*	*	*
U366	Benschop	Rv01C	5.18'	0	10.8	*	73.4	*	*	16.8	7.4	9.4
VM601	Valthermond	iVz	4.60	0.2	18.3	*	3.2'	*	*	*	*	*
WB1435	Hulten	zEZ21g	4.41	0	5.2	*	6.0	*	*	88.0	76.0	12.0
WB1701	Etten	zEZ21	4.77	0.1	3.6	*	6.8'	*	*	*	*	*
WF387	Slappeterp	gMn25C	6.42	0.2	2.7	*	35.0	*	*	63.0	2.0	61.0

Code proef- veld	Lokatie proefveld	Kaart- eenheid bodem- kaart 1:50.000	pH- KCl <sup>1</sup>	Ca- CO <sub>3</sub>	Org. stof	Lutum	Slib	Silt	>210 µm	Zand tot.	Grof zand	Fijn zand
als percentage van de totale grond												
WF388	Nes	Mn15C	6.92	1.6	2.0	*	22.0	*	*	74.0	3.0	71.0
WG175	Creil	Sn13AV	7.70	3.9	2.1	3.4	9.0	*	*	85.5	11.0	74.5
WR16	Wijnandsrade	BLb68	6.20	0.1	2.0	13.3	26.5	*	*	71.5	2.0	*
WR600	Heerlen	Blb6	7.20	0.2	2.0	13.1	25.1	*	*	*	*	*
WS451	Numansdorp	Mn35A	*	9.6	3.8	*	43.1	*	*	43.8	*	*
Z980	Wissenkerke	Mn15A	7.17	7.6	3.2	*	15.6	*	*	74.0	29.2	45.2
ZGE384	Horsen	Rn95C	4.01	0	3.0	*	35.9	*	*	61.7	24.2	38.0
ZGE836	Horsen	Rn95C	5.76	0.1	3.3	*	33.0	*	*	64.0	24.0	40.0
ZGR592	Mussekanaal	iWz	4.80	0	10.9	*	6.7 <sup>1</sup>	*	*	*	*	*
ZGR600	Wollinghuizen	Hn21	5.02	0	4.0	*	1.0	*	*	95.0	79.0	16.0
ZHE294	Dirksland	Mn15A	7.17	2.0	1.8	*	18.8	*	*	77.4	15.5	61.8
ZHE1044	Ouddorp	Zn21	6.10	0	2.5	*	1.0 <sup>1</sup>	*	*	*	*	*
ZNH100	Beemster	pMn85C	5.25	0.2	8.5	*	62.0	*	*	30.0	2.0	28.0
ZV30	Purmerland	pVsc	4.10	*	50.3	22.7	35.9	*	*	13.9	*	*
ZVL133	Oostburg	Mn35A	7.20	11.1	2.4	*	37.0	*	*	50.0	*	*
ZWZH1355	Numansdorp	Mn25A	7.28	9.9	3.1	27.0	43.2	*	*	43.9	2.7	*

<sup>1</sup> gehalte afkomstig van profielbeschrijving bodemkaart 1:50.000

<sup>2</sup> poldervaaggrond, volgens bodemkaart 1:200.000 code kaarteenheden no. 55

<sup>3</sup> poldervaaggrond, volgens bodemkaart 1:200.000 code kaarteenheden no. 54

<sup>4</sup> gemiddelde waarde gedurende de proefduur

<sup>5</sup> gemiddelde waarde na de beëindiging van de proef

<sup>6</sup> ontbrekend gegeven

<sup>7</sup> Indeling volgens: Bakker, H. de & J. Schelling, 1966. Systeem van bodemclassificatie voor Nederland. De hogere niveaus. Centrum voor Landbouwdocumentatie, Wageningen, 217 pp.