

Jorden som fosforkilde for planterne.

Af K. Dorph-Petersen.

Gennem plantefysiologiske forsøg er det fastslået, at fosfor er et af de nødvendige plantenæringsstoffer, og dets fysiologiske rolle er delvis klarlagt, idet man har påvist, at fosfor indgår i adskillige af planternes vigtigste organiske byggestoffer såsom protein, fytater og fosfatider, ligesom fosfat deltager i flere livsnødvendige enzymatiske processer (McElroy & Glass, 1951 og 52)¹⁾. Det er derfor forståeligt, at mangel på fosfor kan hemme planternes udvikling og dermed begrænse afgrødestørrelsen.

Normalt optager planterne fosfor i form af fosfat fra jordbunden gennem rødderne, og derfor har jordernes indhold af fosfat samt tilførte gødningsfosfaters forhold i jorden stor landøkonomisk interesse. Denne interesse forstærkes af det forhold, at den dyrkede jord fra naturens side har vidt forskelligt fosfatindhold fra sted til sted, og i mange egne af verden er det under primitive landbrugsformer jordens fosfatindhold, der begrænser den naturlige bevoksning og afgrødernes størrelse.

I modsætning til nitrat bliver vandopløseligt gødningsfosfat hurtigt fastlagt i ikke-vandopløselig form, når det indblandes i fugtig jord. Antagelig som følge heraf er en afgrødes relative optagelse af tilført fosfat langt mindre end af nitrat. Denne »binding«, hvis kemiske side har været studeret i over hundrede år (formentlig først påvist af Way i 1850), gør problemerne om fosfatgødskningens rationelle gennemførelse temmelig komplicerede, men også såre interessante, og derfor er der verden over udført et umådeligt antal kemiske undersøgelser, kar- og markforsøg til dette problems løsning.

¹⁾ Se litteraturfortegnelsen s. 658.

Nærværende arbejde har til formål at give en oversigt over undersøgelser og forsøg, der belyser fosforets forhold i jorden ud fra et dyrkningsmæssigt synspunkt, men det være sagt straks, at det er umuligt at nå en i alle henseender tilfredsstillende løsning af denne eller lignende opgaver. Tilsigter man at give læserne et godt overblik, må man, ud fra det foreliggende væld af ganske usystematisk gennemførte undersøgelser, søge at tegne et billede, hvis hovedlinjer står klare. Men herved udskydes mange detailler, og det viste billede bliver præget af forfatterens opfattelse af, hvad der er væsentligt og uvæsentligt.

Hvis man ikke vil foretage en sådan noget hårdhændet systematisering og forenkling af det foreliggende materiale, må man nøjes med at give en række passende placerede referater af de foreliggende undersøgelser og overlade det til læseren at danne sit eget billede eller forestilling ud fra de af forfatteren udvalgte referater. Begge muligheder — og middeveje derimellem — er egentlig utilfredsstillende, fordi de altid farves af forfatterens synspunkter. Da de mennesker (konsulenter, landbrugslærere m. fl.), til hvem et arbejde som nærværende hovedsagelig henvender sig, i reglen ikke kan overkomme at sætte sig ind i omfattende litteratur, kan man lige så godt vælge den for læserne nemmeste udvej — d.v.s. søge at give enkle og klare billeder af problemerne.

Men selv om man arbejder ud fra denne indstilling, og selv om læseren er klar herover, kan man ikke finde en fremstillingsform, der kan tilfredsstille alle. Man vil altid tage for mange detailler med for nogle læsere og for få for andre. Dette er her søgt imødegået dels ved i afsnit V at samle et kortfattet sammentrag af de fire første afsnit og dels ved at indføje henvisninger til litteratur om emnet — hovedsagelig de skandinaviske, tysk- og engelsksprogede landes nyere litteratur.

Under trykningen af nærværende afhandling er der fra amerikansk side udkommet en af 29 forfattere udarbejdet monografi om samme emne, som behandles her. Den er opført i literaturfortegnelsen under redaktørerne Pierre & Norman, men de mange ønskelige henvisninger dertil har ikke kunnet indføres i teksten.

Indholdsfortegnelse.

	Side
I. Kemiske undersøgelser vedrørende fosfor i jord	555
1. Jordens fosforforbindelser	556
A. Organiske fosforforbindelser	557
B. Uorganiske fosforforbindelser	560
2. Fosfat i jord-vand-systemet	565
A. Bindingskurver	569
B. Opløsningskurver	574
C. Opløsnings-bindingskurveflader	578
D. Opløsnings-bindingsforholdenes påvirkning af forskellige ioner	582
E. Tilførsel af tungtopløselige fosfater til jord-vædske-systemet	586
3. Fosfatets bevægelser i naturlig jordbund	586
II. Undersøgelser af jordens fosfatindhold og tilført gødningsfosfat ved hjælp af dyrkningsforsøg	589
1. Tilgængeligt fosfat i jorden	593
2. Optagelsen af vandopløseligt gødningsfosfat	596
3. Jordens fosfattilstand	609
4. Forhold, der påvirker planternes fosfatoptagelse og dermed jordens fosfattilstand	610
5. Virkning af andre fosfatgødninger	617
III. Gødskning med fosfat i danske landbrug	619
1. Danske landbrugsjorders fosfattilstand	619
2. Fosfatets kredsløb i danske landbrug	628
3. Økonomien ved gødskning med fosfat	632
IV. Bestemmelse af landbrugsjorders fosfattilstand	634
1. Almindelige iagttagelser og mangelsymptomer	635
2. Markforsøg	636
3. Iagttagelsesstriber	638
4. Jordbundsanalyser	638
5. Planteanalyser	646
V. Oversigt	647
Summary	653
Litteraturfortegnelse	658

I. Kemiske undersøgelser vedrørende fosfor i jord.

Undersøgelser, som tilstræber at belyse afgrødernes udnyttelse af jordfosfatet og gødningsfosfater samt de faktorer, der indvirker herpå, er udført ad to forskellige veje, dels ved dyrkningsforsøg med planter (vand- og sandkulturer og kar- og

markforsøg) og dels som kemiske undersøgelser af jord, gødningsfosfat og blandinger deraf.

Sådanne kemiske undersøgelser har direkte eller indirekte til formål at belyse planternes reaktioner overfor jord- og gødningsfosfater, men det må fremhæves, at et formål eller ønske ofte er langt fra en virkeliggørelse. Selv om mange af de forhold, der er vist gennem kemiske undersøgelser af jord, sandsynligvis er identiske eller nært forbundet med analoge fænomener vist i dyrkningsforsøg, må man ikke bygge på en sådan identitet, før den er bevist eller gjort overmåde sandsynlig ved flere forskelligartede sammenligninger mellem dyrkningsforsøg og kemiske undersøgelser. På indeværende tidspunkt kan man vistnok sige, at en sådan bevisførelse for identitet mellem resultaterne af dyrkningsforsøg og kemiske undersøgelser ikke foreligger for noget forhold vedrørende fosfat. Derfor må man indtil videre betragte kemiske undersøgelser af fosfat i jord og dyrkningsforsøg som to undersøgelsesveje af samme fænomen, men med ikke direkte sammenlignelige resultater. Dette synspunkt må da også gennemføres i sproglig henseende, idet der bør anvendes forskellig terminologi for de to undersøgelsesmåders data. Sidstnævnte fordring er ofte blevet tilsidesat med misforståelser og forvirring som resultat.

1. Jordens fosforforbindelser.

De fleste bjergarter indeholder lidt fosfor, mest i eruptiverne, der gennemsnitlig har 1260 p. p. m. P. (p. p. m. = dele pr. million = % : 10.000 = mg pr. kg), og mindre i sedimentære formationer, 170, 340 og 740 p. p. m. P i henholdsvis kalksten, sandsten og skifer (Clark 1916). Ved bjergarternes forvitring udvaskes en del af fosforindholdet, og udyrkede jorder har derfor lavere fosforindhold end deres oprindelsesmateriale. Dyrkning og gødskning forøger pløjelagets fosforindhold og alene indenfor danske jorder, dyrkede og udyrkede, finder man en variation i fosforindholdet (opløselig i stærk syre) fra 10 til omkring 1000 p. p. m. P med 400 p. p. m. P som middelværdi i alm. dyrkningsjord (Christensen 1908, 1912, 1922, 1927, Kristensen 1919, Damsgaard-Sørensen 1946, Dorph-Petersen 1949).

Dette fosfor findes i en række forskellige forbindelser, men endnu savner man analysemetoder til at foretage en nøjagtig opdeling af en given jords fosforindhold efter dets kemiske forbindelser. Den følgende inddeling af jordens fosforforbindelser hviler derfor ikke på et analytisk grundlag, idet kun et fåtal af de omtalte forbindelser er isoleret fra jord. For de flestes vedkommende er deres forekomst i jord sandsynliggjort på anden måde. Dog kan man ved anvendelse af forskellige ekstraktionsmidler dele en jords fosforindhold i en række fraktioner (se bl. a. Fisher & Thomas 1935, Dean 1938, Bray & Dickman 1942, Williams 1950), men en sådan deling viser ikke forholdet mellem forskellige kemiske forbindelser, kun mellem grupper af forbindelser med ens opløselighed.

Det må anses som sandsynligt, at langt den overvejende part af jordens fosforindhold er til stede som ortofosfater — salte eller ioner af ortofosforsyre H_3PO_4 , — medens forbindelser af pyro- og metafosforsyre, $H_4P_2O_7$ og HPO_3 samt af fosforbrinte H_3P , fosforundersyring, H_3PO_2 og fosforsyring H_3PO_3 , normalt kun forekommer i ubetydelige mængder, fordi de i jorden omdannes til ortofosfater. Der anvendes her betegnelsen *fosfat* i de tilfælde, hvor man ved undersøgelser og analyser alene har arbejdet med eller alene bestemt ortofosfater, medens andre forbindelser betegnes som *fosfor*, selv om man har grund til at formode, at det hovedsagelig drejer sig om ortofosfater.

Der opstilles følgende skematiske inddeling af jordens fosforforbindelser:

- A. Organiske fosforforbindelser.
- B. Uorganiske fosforforbindelser.
 - 1. Fosfor i eller på partikler.
 - a. Silikatbundet eller silikatomgivet fosfor.
 - b. Fosfor absorberet i kolloider og andre partikler.
 - c. Fosfat adsorberet på kolloider.
 - 2. Fosfat i tungtopløselige salte.
 - 3. Fosfat opløst i jordvædsken.

A. Organiske fosforforbindelser. Det har længe være kendt, at jordens organiske stoffer — betegnet under et

som humus eller muld — indeholder fosfor, men disse forbindelsers natur har været meget omdiskuteret, fordi undersøgelserne deraf medførte store analytiske vanskeligheder. Problemerne vedrørende de organiske fosforforbindelser i jord er ikke endelig løst endnu, dog synes der at kunne optrækkes nogle hovedlinjer. (Nørgaard Pedersen, 1951, har udarbejdet en omfattende oversigt over organiske fosforforbindelser i jord og korte oversigter er givet af Pierre 1948, og Bremner 1951).

Alene bestemmelsen af mængden af fosfor i organiske forbindelser er vanskelig, og til trods for, at der er udarbejdet to analysemetoder med en række modifikationer (Potter & Benton 1916, Schollenberger 1918 og 1920, Auten 1922 og 1923, Odymsky 1936, Dickman & de Turk 1938, Pearson & Simonson 1940, Salonen 1941, Bray & Kurtz 1945, Damsgaard-Sørensen 1946, Kaila 1948), er ingen af disse helt tilfredsstillende, hvorfor de fundne resultater må tages med noget forbehold. Dog synes det sikkert, at en stor part, ofte omkring halvdelen, af fosforindholdet i dyrkede jorders pløjelag findes i organiske forbindelser. Det relative indhold af organisk fosfor aftager hurtigt med dybden, og i mineraljorder findes der i reglen kun organiske fosforforbindelser ned til omkring en meters dybde (Schollenberger 1920, Odymsky 1936, Dean 1937, Pearson & Simonson 1940, Wiklander & Hallgren 1949, Mattson et al. 1950, Fuller & Mc George 1951, Allaway & Rhoades 1951).

I pløjelaget af 445 danske jorder udgjorde de organiske fosforforbindelser 20—80 pct. af fosforindholdet, i middel omkring halvdelen (Damsgaard-Sørensen 1946). Der var i disse jorder ikke tydelig sammenhæng mellem jordtype og det relative indhold af organiske fosforforbindelser, ud over at humusjorder indeholdt mere organisk fosfor end mineraljorder. Der fandtes kun et ringe sammenhæng mellem jordernes indhold af organisk og uorganisk fosfor, således at jord kan være rig på den ene fraktion uafhængig af, om den er rig eller fattig på den anden. Ej heller fandtes nogen stor korrelation mellem jordernes procentiske indhold af humus (pct. C) og deres indhold af or-

ganisk fosfor, hvorfor humus kan have ret varierende fosforindhold. Andre undersøgelser har dog vist mindre variation i forholdet mellem kulstof og fosfor i humus (Kaila 1948).

Da jordens indhold af organiske fosforforbindelser stammer fra højere planter og jordbundens mikroflora og -fauna, måtte det forventes, at man i jorden kunne genfinde nogenlunde samme organiske fosforforbindelser, som er kendt fra planterne. Dette er også lykkedes i flere tilfælde. Således er proteinstoffer og nedbrydningsprodukter deraf — nucleinsyre — ret tidligt påvist kvalitativt i jord (Aso 1905, Schreiner & Shorey 1911, Shorey 1913), medens isolering og kvantitativ måling af disse stoffer hidtil har været utilfredsstillende eller usikker — hvad flere af forskerne selv erkender (Schollenberger 1918, Bottomly 1919, Dyer & Wrenshall 1941, Bower 1949). Ud fra disse undersøgelser kan man dog skønne, at fosfor i proteinstoffer sandsynligvis udgør en væsentlig part, ca. halvdelen, af det organiske fosfor i jord. Det må dog tilføjes, at de fra jord isolerede nucleinsyrer ikke har været helt identiske med tilsvarende fra planter. Dette kan skyldes mangelfuld isolation, men det kan også skyldes, at der ved mikrobiel omsætning i jorden dannes specielle forbindelser, eventuelt komplekse forbindelser af lignin og protein (Kaila 1948). Endvidere må det antages, at der kan dannes tungtomsættelige forbindelser af protein og lerminerale (Bower 1949).

Der er også påvist fytin i jord, men da dette mineraliseres hurtigt i vand- og sandkulturer, og da fytase er påvist i mange mikroorganismer, sluttede man tidligere (bl. a. Auten 1923), at fytin kun fandtes i små mængder i jord. Ikke desto mindre viser nyere undersøgelser, at fosfor i fytin kan udgøre en ret stor part, op mod halvdelen, af de organiske fosforforbindelser i jord (Yoshida 1940, Wrenshall & Dyer 1941, Bower 1945 og 1949, Nørgaard Pedersen 1951 og 1953). Da den årlige tilførsel af fytin til jord er meget lille — antagelig under et kg P pr. ha — vil en accumulering af nævnte fytinmængder — op til 300 kg P pr. ha — kun kunne ske, hvis mineraliseringen er overordentlig langsom eller helt standset. Denne mulighed er også til stede, fordi fytin danner meget

tungtopløselige salte med jern, aluminium og calcium, hvoraf de tø førstnævnte er så godt som upåvirkelige af fytase (Wrens-hall & Dyer 1941, Kaila 1948, Jackman & Black 1951 og 1952).

Endvidere er der påvist små mængder fosfatid i jord (Aso 1905), medens planternes indhold af alifatiske fosfatestere, hexosefosfater o. l. formentlig bliver omsat hurtigt i jord.

Der sker hvert år en mineralisering af jordens humusstoffer, hvorved bl. a. fosfor overføres i uorganisk form, men i de fleste jorder modsvares dette tab af organisk stof ved tilførsel i plantesterer m. v. Da den årlige tilførsel af organiske fosforforbindelser er meget lille — 1—5 kg P pr. ha — (hvoraf antagelig kun en del indgår i humus), og da mængden af fosfor i organiske forbindelser normalt er omkring 500 kg P pr. ha, må disse forbindelser være overordentlig stabile. Det må dog tilføjes, at flere kulturforanstaltninger, således kalkning, kan forøge mineraliseringshastigheden og dermed nedsætte jordens indhold af organiske fosforforbindelser (Damsgaard-Sørensen 1946, Salonen 1946, Dorph-Petersen 1953).

Forøget tilførsel af staldgødning eller superfosfat øger jordens indhold af uorganiske fosforforbindelser, men i reglen ikke indholdet af organiske (Damsgaard-Sørensen 1946). Kun under ekstreme forhold — fosfatfattige tørvejorder — kan tilført uorganisk fosfat gennem jordens mikroflora overføres i organiske forbindelser (Kaila 1948).

B. Uorganiske fosforforbindelser. I jordens grovere bestanddele (sten, grus m. v.) findes en del fosfor i overordentlig tungtopløselige forbindelser — apatiter og lignende — eller opløselige forbindelser omgivet af uopløselige silikater. Tilstedeværelsen af sådanne forbindelser ses ud af det forhold, at der kan opløses mere uorganisk fosfat efter at jorden er smeltet med soda (der lukker silikaterne op) end i varm koncentreret syre alene (Salonen 1941). Indtil silikaterne forvitrer, må nævnte fosforforbindelser anses for at være fuldstændig utilgængelige for de opløsnings- og ombytningsprocesser, der sker i jorden og dermed uden interesse for planteavlen.

Fosfat absorberet i kolloider og andre partikler. Det er sandsynligt, at fosfat eller fosfor indgår i en del

af jordens fine partikler og kolloider, ligesom nogle fosfater af bl. a. jern, aluminium og calcium er kolloidale (Pugh 1934, Mattson & Karlsson 1938, Mattson et al. 1950 og 1951). Når dette fosfat deltager i opløsnings- og ombytningsprocesser, må det anses for at være absorberet. Da disse processers omfang er afhængig af de anvendte reagensers styrke og behandlingstiden, må der være absorberede fosfater af forskellig art eller placering, og der er antagelig ikke nogen skarp grænse mellem de absorberede fosfater og de foran nævnte permanente fosfater.

Fosfat adsorberet på kolloider. Jordens kolloider er ampholyter, d. v. s., de er kæmpemolekyler med såvel positive som negative ladninger på overfladen og kan fastholde — adsorbere — såvel kationer som anioner i en ionsværm omkring kolloidet. Dog er kationadsorptionen mest fremtrædende ved pH højere end kolloidets isoelektriske punkt og anionadsorptionen ved lavere pH. Da jordkolloiderne har isoelektrisk punkt ved pH 4—6, vil anionadsorptionen, herunder adsorption af fosfat, kun være omfattende i sur jord.

Ad analytisk vej er det umuligt at påvise tilstedeværelsen af adsorberet og absorberet fosfat, men det tidsmæssige forløb af opløsnings-, bindings- og ombytningsprocesser (se senere omtale af disse) tyder på tilstedeværelsen af eller dannelsen af en række vidt forskellige fosfater i jorden. Her kan især henvises til isotopombytningsforsøg, hvor processens tidsmæssige forløb viser, at der er tale om både en hurtig forløbende proces (ombytning af adsorberede ioner) og en langsomt forløbende proces (ombytning af absorberede ioner) (Hendricks & Dean 1948, Wiklander 1950).

Talrige undersøgelser har vist, at mange af de mineraler, som findes i jord, kan binde fosfat, d. v. s. at de i kontakt med en fosfatopløsning fjerner fosfat fra opløsningen. Denne evne til fosfatbinding forklares af nogle forskere som adsorption eller absorption, medens andre taler om fældning i tungtopløselige forbindelser. Af nævnte undersøgelser over stoffernes fosfatbindingsevne skal kort refereres følgende og iøvrigt henvises til oversigter udarbejdet af Wild 1950 og Schoen 1953.

De fleste — men ikke alle — jern- og aluminiumoxyder og

-hydroxyder kan binde fosfat (Ford 1933, Weiser 1933, Metzger 1940 og 1941, Kelly & Midgley 1943, Perkins & King 1944, Sieling 1947).

Lerminerale (der indeholder aluminiumsilikat), herunder kaolin, montmorillonit, illite og glimmer, har i findelt tilstand stor fosfatbindingsevne (Scarseth & Tidmore 1934, Scarseth 1935, Hibbard 1935, Murphy 1939, Stout 1940, Laatsch 1941, Black 1942 og 1943, Coleman 1943 og 1945, Perkins & King 1944 og 1945, Perkins 1945, Sieling 1947, Chatterjee & Datta 1951, Cooke 1951). For nævne stoffer er bindingsevnen dog stærkt afhængig af stoffets findeling og systemets pH.

I overensstemmelse hermed finder man, at fosfatbindingsevnen i forskellige fraktioner af jord, delt efter kornstørrelse, aftager med tiltagende kornstørrelse (Hibbard 1935, Perkins et al. 1942).

Ren kvarts, SiO_2 , har ingen eller ringe evne til at binde fosfat (Perkins & King 1944, Perkins 1945).

Med hensyn til humus — tørv — synes forholdet at være, at selve det organiske stof ikke binder fosfat, men da humus i reglen indeholder calcium, aluminium og jern, kan disse kationer frigøres og fælde fosfat (Doughty 1930 og 1935, Ravikovich 1934). I god overensstemmelse hermed kan man træffe humusrige, sure sandjorder med ingen eller ringe fosfatbindingsevne (Dorph-Petersen 1950).

Fosfat i tungtopløselige salte. Ved de pH-værdier, som kan forekomme i jord, er der mulighed for dannelsen af tungtopløselige fosfater af jern, aluminium, calcium, magnesium, titan og mangan. Førstnævnte fire fosfaters opløselighed ved forskelligt pH ses af fig. 1 (Gaarder 1930). Det fremgår heraf, at med ækvivalente mængder af kat- og anioner begynder udfældningen af ferrifosfat ved pH ca. 1,2, og ved pH 2,2 er fældningen af fosfat maksimal (opløseligheden minimal). Ved højere pH udfældes ferriionerne som hydroxyd, medens opløseligheden af fosfat tiltager. (Ved disse undersøgelser er pH reguleret med HCl eller NaOH). Aluminiumfosfat giver et tilsvarende billede, her begynder udfældningen ved pH ca. 2,7 og er størst ved pH 3,7. Calciumfosfat udfældes ved pH over ca.

5,3, og opløseligheden er mindst ved pH ca. 6,6, men mængden af opløst fosfat stiger kun lidt ved højere pH. Magnesiumfosfat udfældes først ved pH over 7,4 og har minimal opløselighed ved pH 10,3. Disse pH-værdier gælder ved ækvivalente mængder af kat- og anioner. Med overskud af kationer bliver opløselighedsminimaet for ferri- og aluminiumsfosfat forskudt mod højere pH og for calciumfosfat mod lavere. Samtidig bliver minimumsområdet »bredere«, og den der opløste mængde fosfat mindre — praktisk taget nul ved stort kationoverskud. Andre under-

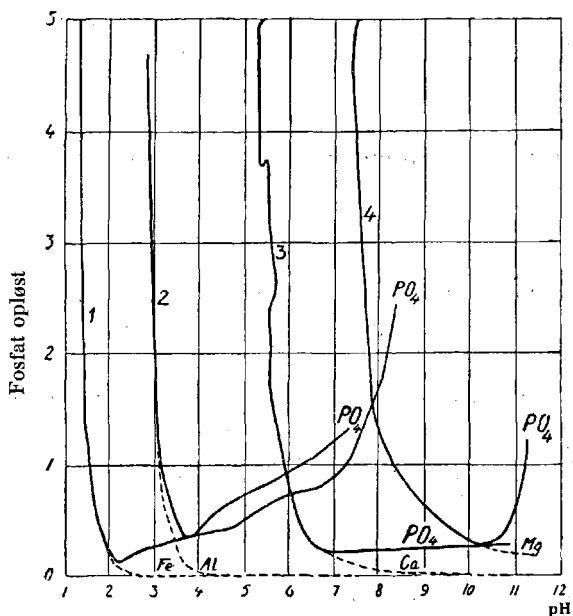


Fig. 1. (Efter Gaarder, 1930).

Opløseligheden af fosfat ved forskellig reaktion, når der er ækvivalent mængde base til stede i henholdsvis Fe (kurve 1) Al (2) Ca (3) og Mg (4).

søgelse af disse fire fosfateres opløselighedsforhold har givet et lignende billede, dog med lidt andre pH-værdier ved opløsningsminimum (Teakle 1928, Doughty 1930, McGeorge & Breazeale 1932, Benne et al. 1936, Murphy 1939, Rathje 1942, Swenson et al. 1949, Struthers & Sieling 1950).

Manganfosfat har mindst opløselighed ved pH 6,3 (Teakle 1928), hvad der kan have nogen interesse for såvel fosfat- som manganproblemer. Titan danner forbindelser med fosfat, der har minimal opløselighed ved lavt pH — 1—2 — og er opløselige ved pH over 5—6 (Pugh 1934). Dette kan have nogen interesse ved undersøgelser af jorders indhold af fosfat opløselig i svag syre.

Da der i de fleste jorder findes meget jern, aluminium og calcium, er der mulighed for, at jordens fosfater findes udfældede som salte af disse kationer i hele det normale pH område (4—8). Af disse forbindelser vil ferri- og aluminiumfosfater sandsynligvis være fremtrædende i sur jord, medens calciumfosfater vil være dominerende i kalkede, neutrale og alkaliske jorder.

Om de i jorden udfældede fosfaters sammensætning vides meget lidt. Ved udfældning af ferri- og aluminiumfosfat i laboratoriet kan man få bundfald af meget forskellig sammensætning alt efter de reagerende stoffers koncentration og systemets pH (Gaarder 1930). Det må derfor antages, at der i jord kan dannes forskellige ferri- og aluminiumfosfater.

Om mulige calciumfosfater ved man, at hydroxylapatit, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ er det eneste fosfat, der er bestandigt i et neutralt eller alkalisk vandigt system, indeholdende calcium og fosfat, medens rent tertiært fosfat $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ikke dannes ved fældning (Bassett 1917, Schleede et al. 1932, Bjerrum 1936, Rathje 1942). I jord med pH over ca. 6 må man derfor regne med, at dannede calciumfosfater er apatiter, hovedsagelig hydroxylapatit. I kalkholdige jorder synes der endvidere at være mulighed for dannelsen af fluorapatit (MacIntire & Hatcher 1942, Nagelschmidt & Nixon 1944) og calciumkarbonatholdige apatiter (Buehrer 1932, McGeorge & Breazeale 1932).

Som det fremgår af foranstående, kan magnesiumfosfat udfældes ved pH over 7,4, men ved tilstedeværelsen af silikationer dannes der ikke magnesiumfosfat (derimod det tungere opløselige magnesiumsilikat), hvorfor magnesiumfosfat ikke skulle findes i jord (Mattson & Karlsson 1938).

Det skal her indskydes, at der er en stadig løbende diskussion mellem jordbundskemikerne om omfanget af og betyd-

ningen af henholdsvis sorption — adsorption og absorption — af fosfat i og på kolloider og fosfat fældet som tungtopløselige salte.

Noget nuanceret fremhæver en del forskere sorptionen (Mattson og medarbejdere, Scarseth 1934 og 1935, Ravikovitch 1934, Davis 1935, Murphy 1939, Burd & Murphy 1939, Stout 1940, Midgley 1941, Bray & Dickman 1942, Black 1943, Kelly & Midgley 1943, Kurtz et al. 1946, Dean & Rubins 1947), og går så vidt som til at forklare udfældningen i et system af FeCl_3 og H_3PO_4 som sorption (Mattson & Karlsson 1938).

Andre forskere lægger derimod vægt på fældningen af fosfater (Gaarder 1930, Ford 1933, Heck 1934, Metzger 1940 og 1941, Chandler 1941, Rathje 1942, Coleman 1943 og 1945, Ghani & Islam 1946). Enkelte går så vidt som til at forklare bindingen af fosfat til kaolin som en opløsning af kaolinet i silikat og aluminium og udfældning af aluminiumsfosfat (Low & Black 1948) eller påstå, at lerminerallernes fosfatbinding skyldes deres indhold af frie jern- og aluminiumhydroxyder (Coleman 1945). Dog skal det tilføjes, at der er nogenlunde almindelig enighed om, at i neutrale og alkaliske jorder vil en del af fosfatet findes som fældede calciumfosfater, medens der i sur jord findes en del fosfat i forbindelse med jern- og aluminiumforbindelser (oxyder, hydroxyder og silikater). Diskussionen omfatter alene sidstnævnte fosfaters natur.

Fosfor opløst i jordvædsken udgør i reglen under 1 p.p.m.P og er hovedsagelig dissocierede fosfationer, dog kan der forekomme et ret stort indhold af opløste organiske fosforforbindelser — oftest dog kun spor. Indholdet i jordvædsken afhænger af jordtype, gødskning, vandindhold m. v. og varierer mellem spor og 1 p.p.m.P (Wrangell & Haase 1926, Pierre & Parker 1927). Det er således en meget lille part af jordens totale fosforindhold, der findes i jordvædsken — oftest under 0,1 pct.

2. Fosfat i jord- vand- systemet.

Naturlig jordbund er et system af jord, vand og luft, hvori indholdet af fosfat fordeler sig mellem jord og jordvæd-

ske. Det kan vises, at fjernelse af fosfat fra jordvædsken bevirker en vandring af fosfat fra fast til flydende fase, og omvendt at tilførsel af fosfationer til jordvædsken får disse til at vandre ind i den faste fase. Da det antages, at planterne kun optager fosfat fra den flydende fase, har denne reversible proces stor interesse, og den har været genstand for omfattende studier. Det er dog således, at mange forskere kun beskæftiger sig med processens ene retning og ikke fremhæver, at den er reversibel. Det må indskydes, at processen har visse begrænsninger. Selv om man fortsat kunne fjerne fosfat fra jordvædsken uden iøvrigt at ændre dens sammensætning, ville man sikkert ikke få jorden udtømt for fosfat. Det må antages, at vandringen af fosfat fra jorden vil standse, når de i skemaet side 557 med 1b, 1c, 2 og 3 betegnede fraktioner er fjernet — om ikke tidligere. På den anden side er der, som det omtales senere, en vis maksimal mængde fosfat, der kan fastholdes af den faste fase. Det er endnu et spørgsmål, om fosfat, der er vandret ind i jorden fra jordvædsken, restfrit kan vandre ud igen, blot jordvædskens fosfatkoncentration nedsættes. Når man ser bort fra overførsel i organiske forbindelser ad biologisk vej, må det dog antages, at alt i jorden indvandret fosfat kan vandre ud igen, selv om de få undersøgelser, der foreligger, kun viser, at en del vandrer ud igen (Davis 1935, Black 1943). Ingen af de nævnte forskere har dog søgt at bevise, at processen er fuldt reversibel, og dette vil være meget vanskeligt at gøre.

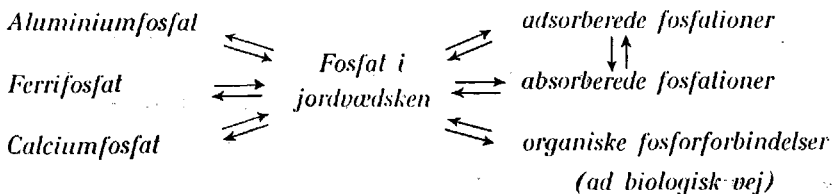
Her vil vandringen af fosfationer fra fast til flydende fase blive betegnet som opløsning, medens den modsatte proces betegnes som binding (undtagelse er dog isotopombytninger). Disse betegnelser henviser således alene til processens retning og ikke til dens natur, for hvilken der sjældent kan gøres rede. Der må regnes med, at opløsnings-bindings-processen kan være følgende enkeltprocesser: a. Opløsning og dissociation, hvorved et fosfat opløses og dissocieres i kationer og fosfationer (H_3PO_4 , $\text{H}_2\text{PO}_4 \div$, $\text{HPO}_4 \div \div$, eller $\text{PO}_4 \div \div \div$ alt efter systemets pH). Den modsvarende proces er fældning. b. Anionombytning, hvor anioner fra jordvædsken bytter plads med fosfationer i jorden — eller omvendt. Af særlig teoretisk interesse er ombytningen mellem fosfationer af det normale fosfor, P^{31} , og fosfationer af den radioaktive fosforisotop, P^{32} , — her be-

tegnet som isotopombytning. Det bemærkes, at denne isotopombytning kan ske uden ændring i jordvædskens fosfatkoncentration.

Det må antages, at fosfatets bevægelser i systemet jord-vand altid går i retning mod en ligevægtstilstand, men alle undersøgelser i rene fosfater og jord viser, at fosfaternes opløsnings- og bindingsprocesser er langsomme og dertil sker med aftagende hastighed, således at der skal meget lang tid — måneder eller år — til at få processen til ende (f. eks. brugte *Bassett*, 1917, 18 måneder ved 25 °C for at opnå ligevægt i et vandigt calciumfosfat-system). Dog er det muligt, at processen (i hvert fald tilsyneladende) går i stå før ligevægtstilstanden er nået (*Bjerrum* 1936).

Opløsnings-bindings-processernes langsomme forløb gør det næsten umuligt at undersøge ligevægtstilstanden mellem jord og fosfatopløsninger. Dette gør egentlig heller ikke så meget, fordi studiet af fosfatets bevægelser i jord-vand-systemet tilsigter en klaring af planternes muligheder for at optage fosfat fra jordvædskan, og da der i jordbunden sikkert aldrig opnås ligevægt mellem fosfat i jord og jordvædske, har opløsnings-bindings-processernes reaktionsvej og hastighed ligeså stor eller større interesse end selve ligevægtstilstanden.

Som nævnt i forrige afsnit, må man regne med tilstedeværelsen af flere fosfatforbindelser i jorden (sammenfattes under betegnelsen jordfosfaterne). Derfor kan ligevægtssystemet skematiseres således:



Hver af de anførte grupper består sandsynligvis af flere forbindelser med forskellige opløselighedsforhold.

Tilførsel eller bortførsel af fosfationer i jordvædskan vil bevirke en vandring af fosfat til eller fra alle de nævnte forbindelser undtagen de organiske forbindelser.

Dog må der regnes med forskellig bindings- og opløsnings-hastighed for de forskellige fraktioner, således at en binding eller opløsning kan ske i flere trin. Når der til et jord-vand-system i ligevægt tilføres fosfationer i vædsken, overskrides alle de uorganiske stoffers opløselighedsprodukt, og vandringen af fosfat ind i fast fase begynder. Hvis f. eks. bindingen i calcium-fosfat sker langt hurtigere end i absorberet form, kan der dannes calciumfosfat i bindingens første fase, og derefter kan dette opløses og absorberes i en senere fase. Muligvis sker absorption altid via adsorption. Processer af sidstnævnte art — hvorved fosfat overføres i anden kemisk forbindelse evt. med jordvædsken som mellemlid — betegnes her som *omlejring*.

Studier af fosfaters bevægelser i jord-vand-systemer er gennem årene udført ad to forskellige veje. Enkelte forskere (Parker 1921, Burd & Martin 1924, Wrangell & Haase 1926, Pierre & Parker 1927, Teakle 1928) har undersøgt fosfatindholdet i jordvædske udvundet af jord passende fugtig for planterne. (Udvindingen af denne jordvædske er sket ved hjælp af stærkt tryk eller ved fortrængning med olie o. l.).

De fleste undersøgelser er dog udført ved hjælp af ekstraktion efter følgende skema: En afvejet mængde lufttør jord er tilsat vædske (i forhold, der ligger mellem 1:1 og 1:100) og efter henstand eller rystning ($\frac{1}{2}$ min. til måneder) er vædsken skilt fra jorden (ved filtrering, centrifugering eller bundfældning ved henstand) og fosfatindholdet i vædsken (eller i jorden) er bestemt. Endelig findes der nogle få undersøgelser over fosfatindhold i vædske, der har været ledet gennem en jordsøjle (Dukes 1935, Hibbard 1935, Dorph-Petersen 1950).

Af disse arbejdsmetoder synes førstnævnte at komme de »naturlige forhold« i jordbunden nærmest, men da der ikke kan fastlægges noget »naturligt« eller »normalt« vandindhold i jord, og da undersøgelsernes resultat i høj grad afhænger af forholdet jord:vand, synes det berettiget at ændre forholdet jord:opløsning så stærkt, at der bliver tale om en ekstraktion, hvilket giver en langt nemmere arbejdsteknik end undersøgelser af jordvædske udvundet ved tryk eller på anden måde.

Det må dog understreges meget stærkt, at man kun med forbehold kan overføre resultaterne fra ekstraktionsundersøgel-

ser til forholdene i jordbunden. Dette fremgår bl. a. af de undersøgelser, der er udført over forholdet jord:opløsningsmiddel i ekstraktioner og som viser, at den mængde fosfat, der går i opløsning (eller bindes), kan være en ret sammensat funktion af forholdet jord:opløsningsmiddel (Wrangell 1926, Bondorff & Steenbjerg 1932, Dukes 1935, Mattson et al. 1950, Aslyng 1950, Bondorff 1952)).

Det er også muligt, at rystning af en vandig jordopslemning medfører en ændring i jordkolloidernes struktur og dermed deres bindingsevne overfor fosfat (Gaarder & Grahl-Nielsen 1935). Det er således en almindelig erfaring, at jo længere tid en jordopslemning rystes, desto mere dispergeres den, og vanskeligere filtrerbar bliver den.

A. Bindingskurver.

Forholdet mellem de fosfatmængder, der opløses fra eller bindes i jorden, og opløsningsmidlets fosfatindhold kan demonstreres ved følgende forsøg: Til en række lige store portioner (20 g) af samme jord sættes lige store rumfang (200 ml) vand indeholdende forskellige mængder — fra 0 og opefter — opløst fosfat (KH_2PO_4). Blandingen rystes (24 timer) og filtreres, hvorpå der bestemmes fosfat i filtratet. Resultaterne er vist grafisk i fig. 2., hvor bundet fosfat = tilsat fosfat ÷ fosfat i filtrat. En sådan funktion mellem tilsat fosfat og bundet fosfat betegnes her som en bindingskurve. Der findes adskillige data om sådanne bindingskurver, dog ofte med en noget anden grafisk fremstilling (f. eks. Hibbard 1935, Davis 1935, Kurtz et al. 1946).

Af fig. 2 ses det, at uden fosfattilførsel opløses der lidt af jordens oprindelige fosfatindhold — her vist som negativ binding. Ved en vis fosfatkoncentration i vædsken er der hverken vandret fosfat ud af eller ind i jorden (eller rettere disse to vandringer er lige store), hvorfor den her betegnes som ligevægtskoncentrationen. Med stigende fosfattilførsel — stigende fosfatkoncentration i vædsken — tiltager mængden af bundet fosfat efter en kurve med aftagende stejlhed, og teoretisk skal bindingskurven forløbe vandret ved meget store fosfat-

koncentrationer. Dette er dog vanskeligt at vise eksperimentelt, fordi der sammen med fosfationerne nødvendigvis må tilsættes kationer, som indvirker på bindingskurvens form (se side 582—585).

Med samme arbejdsmåde giver forskellige jorder vidt forskellige bindingskurver, d. v. s., at de har forskellig b i n d i n g s e v n e. Dette demonstreres af fig. 3, der viser bindingskurver i 4 danske jorder. Når man udfører tilsvarende bindingsundersøgelser med fosfatfrie mineraler — f. eks. kaolin —, får man

Fosfat bundet, p.p.m.P

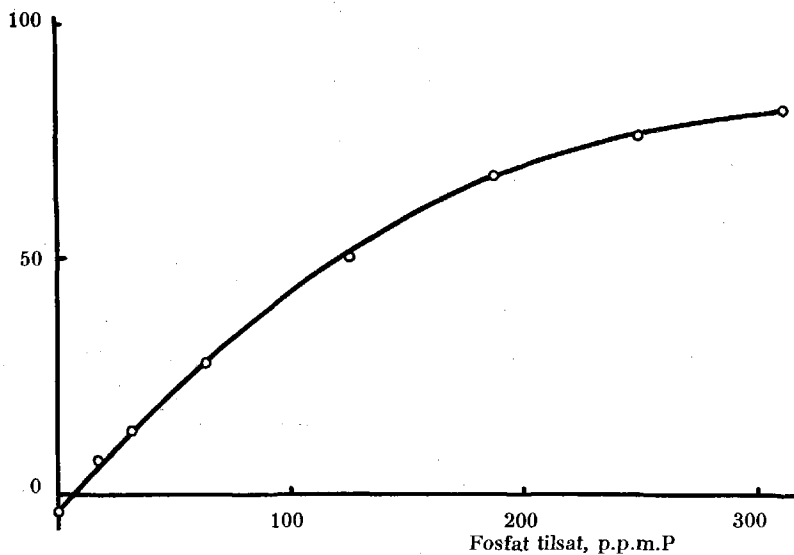


Fig. 2. Bindingskurve for en sandjord fra Ikast.

Tilsat og bundet fosfat er beregnet i p.p.m.P i lufttør jord.

bindingskurver, der udgår fra koordinatssystemets nulpunkt, d. v. s., at ligevægtskoncentrationen er nul. At der ved forsøg i jord fås lidt fosfat opløst ved tilførsel nul, og at ligevægtskoncentrationen har en vis lille værdi, kan opfattes på den måde, at jorden allerede inden forsøget har bundet en del fosfat, og at de bindingskurver, man finder i jord, kun er en part af den fosfatfrie jords fulde bindingskurve. Når man i jord finder en meget fladt forløbende kurve, kan dette derfor betyde, at jorden har ringe bindingsevne, eller at den i forvejen har bundet så

meget fosfat, at undersøgelsen »starter« oppe på bindingskurvens vandrette del.

For at få talmæssige, sammenlignelige udtryk for jorders fosfatbindingsevne er der foreslået adskillige bestemmelsesmetoder, hvoraf de fleste kan indordnes i følgende her opstillede bindingsmål.

Ud fra den forudsætning, at bindingskurverne vil forløbe vandret ved store fosfattilførsler, kan man betegne den fosfat-

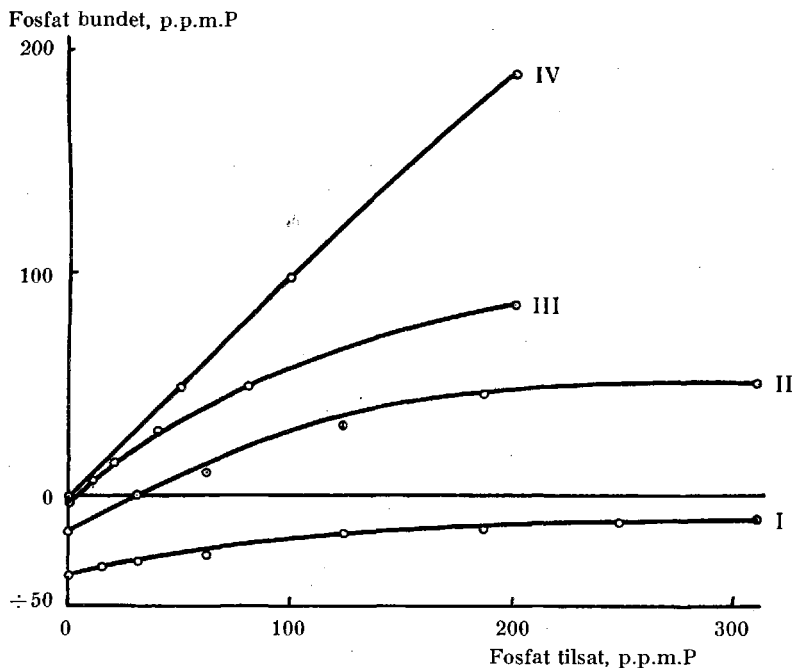


Fig. 3. Fosfatbindingskurver i fire danske jorder. I hedesandjord (fra Sunds) uden bindingsevne — selv ved en tilsætning svarende til 10 t superfosfat pr. ha (310 p. p. m. P.) er der ikke bundet noget fosfat. II. fosfatrig, let lerjord (Askov). III. let sandjord (Jyndevad). IV. surt undergrundslers (Askov) med stor bindingsevne — idet så godt som alt tilsat fosfat er bundet.

mængde, en jord maksimalt kan binde, som dens fosfatbindingsskapacitet. Denne bindingskapacitet vil nogenlunde kunne måles ved at behandle en jordprøve med ret koncentreret

fostfatopløsning, filtrere, og bestemme det bundne fosfat, enten ved at måle fosfatet i opløsningen eller ved at bestemme fosfat i jorden, idet denne ekstraheres med et stærkt opløsningsmiddel. Undersøgelser efter et sådant skema er da også foreslået af flere forskere (Hester 1937, Dean & Rubins 1947, Toth & Bear 1947). Det kan tilføjes, at et par af de bestemmelsesmetoder, der af forfatterne betegnes som kapacitetsbestemmelser, er udført med så små mængder fosfat, at de falder ind under den bestemmelsesmåde, som her betegnes som bindingsprocent (Heck 1934 og 1935, Murphy 1939).

De foreliggende undersøgelser viser, at bindingskapaciteten er meget forskellig fra jord til jord, og at det ofte er overordentlig store mængder fosfat, der kan bindes — selv i jorder, hvorpå planterne er velforsynede med fosfat. Beregnet for pløjelaget er bindingskapaciteten af størrelsesordenen 10—400 tons superfosfat pr. ha.

Til sammenligneligt mål for jorders bindingsevne er foreslået anvendelse af den mængde fosfat, der skal tilsættes jordvædske-systemet, for at opløsningen efter en bestemt rystetid skal indeholde en fastsat fosfatkoncentration. Da der er tale om binding ved en bestemt standardiseret fosfatkoncentration, er dette bindingsmål her betegnet som *standardbindingen*. Analytisk kan denne måles ved at bestemme 2—4 passende beliggende punkter på bindingskurven og grafisk interpolere til den mængde fosfat, der skal tilsættes, for at opløsningen får den vedtagne standardkoncentration. Bestemmelse af standardbindingen er foreslået af Hibbard 1935 under betegnelsen »fixing power« (standardkonc. = 1p.p.m. PO_4) og er senere anvendt af Semb 1943 og Larsen 1945.

Den almindeligst anvendte metode til måling af jorders fosfatbindingsevne udføres efter følgende skema: Jordprøver tilsættes vand indeholdende en bestemt mængde opløst fosfat, rystes, filtreres, hvorpå der bestemmes fosfat i filtratet. D. v. s., at man med samme arbejdsmåde bestemmer det punkt af de pågældende jorders bindingskurver, som svarer til een vedtagen fosfattilførsel — *x*-værdi. Et blik på fig. 3 vil vise, at en sådan undersøgelses resultater ganske vil afhænge af den valgte fosfatmængdes størrelse. Undersøgelsesresultaterne kan udtrykkes i

den bundne fosfatmængde pr. vægtenhed jord eller pr. ha, men på grund af målingens relative karakter må det foretrækkes, at den bunde fosfatmængde udtrykkes i procent af den tilsatte mængde, selv om denne procent også afhænger af den tilsatte fosfatmængdes størrelse. Dette mål for jorders fosfatbindingssevne betegnes her som bindingsprocenten, men anvendes under forskellige navne i litteraturen (bl. a. af Ford 1933, Heck 1934, Hibbard 1935, Beater 1937).

Alle de nævnte mål for jorders fosfatbindingsevne er dog relative og de dermed vundne resultater kun sammenlignelige, hvis der anvendes nøjagtig samme arbejdsforhold — herunder især forholdet jord:vædske, rystetid, temperatur og det tilsatte fosfats kation.

Ændring i forholdet mellem jord og vædske vil med samme fosfattilsætning bevirke, at jorden behandles med forskellig fosfatkoncentration, og derved ændres i hvert fald resultaterne af bestemmelser af bindingsprocent, idet denne aftager med stigende mængde vædske til samme mængde jord (Hibbard 1935). Ved bestemmelse af bindingskapaciteten skulle jord:vædskeforholdet spille mindre rolle, når der blot anvendes tilstrækkeligt fosfat. Ud fra undersøgelser af Davis 1935 og Kurtz et al. 1946 må man vente, at standardbindingen er konstant, selv om jord:vædskeforholdet ændres betydeligt.

Flere undersøgelser viser, at med samme fosfattilførsel tiltager den i jord eller mineraler bundne mængde fosfat med tiltagende rystetid, således at der pr. tidsenhed (time, dag) bindes mest i den første enhed, og derefter aftager bindingen mod nul (Heck 1934, Hibbard 1935, Davis 1935, Murphy 1939, Black 1943, Coleman 1945, Kurtz et al. 1946, Sieling 1947). Dog er forholdet mellem binding og rystetid stærkt afhængig af systemets pH (Black 1943, Coleman 1945, Perkins & King 1946).

Årsagen er det side 567 omtalte forhold, at ligevægten i et vandigt system af fosfat først opnås efter lang tid. Dog kan en af forøget rystetid forårsaget findeling og dispergering af jordpartiklerne være medvirkende, fordi bindingsevnen i mange lerminerale, f. eks. kaolin, tiltager med aftagende partikelstørrelse (Hibbard 1935, Murphy 1939, Perkins & King 1945,

Sieling 1947). Med hensyn til den med tiden tiltagende fosfatbinding kan indskydes, at der også i jord, der henstår i »markfugtig« tilstand, sker en fortsat tiltagende binding. I nogle forsøg (Hibbard 1935, Moser 1941, Kurtz et al. 1946, Maas & Bentley 1946) er der i laboratoriet sat vandopløseligt fosfat til fugtig jord, og med mellemrum — uger til år — er fosfatets opløselighed målt ved rystning i kort tid med vand eller fortyndet syre. Både i vand og fortyndet syre aftager opløseligheden med tiden, d. v. s., at der sker en med tiden tiltagende binding. Endvidere er det muligt, at der efterhånden sker en omlejring af det bundne fosfat fra mere opløselige til mindre opløselige former.

Den med tiden tiltagende fosfatbinding bevirker, at resultaterne af de tre målemetoder, bindingskapacitet, standardbinding og bindingsprocent, bliver afhængig af rystetiden. Ydermere er forholdet mellem fosfatbindingen og tiden ikke ens i forskellige jorder (Hibbard 1935), således at det indbyrdes forhold mellem en række jorders fosfatbindingsevne — målt med et af de nævnte mål — også ændres, når rystetiden forandres.

B. Opløsningskurver.

Ved ekstraktion af jord med fosfatfrit opløsningsmiddel opløses der fosfat, og denne mængde er afhængig af opløsningsmidlets art, især dets pH-værdi, hvilket kan demonstreres ved forsøg efter følgende skema: Til lige store prøver af samme jord sættes lige store rumfang af blandinger af vand og syre (evt. vand og base) i forskelligt forhold. Efter rystning eller henstand måles pH i opslemningen og fosfat i vædsken — efter filtrering eller centrifugering. Resultaterne optegnes ofte som en funktion mellem opslemningens pH og mængden af fosfat i filtratet — se fig. 4. Denne funktion betegnes her som opløsningskurven. Af de mange undersøgelser af denne art ses det, at opløsningskurverne er vidt forskellige i forskellige jorder (se f. eks. Hibbard 1931, Gaarder & Grahl-Nielsen 1935, Vries & Hetterschij 1938, Gardner & Kelly 1940, Salonen 1941, Kelly & Midgley 1943, Semb 1943, Burd 1948).

Når man som syre og base anvender henholdsvis HCl og NaOH, får man ofte opløsningskurver med et minimumsområde ved pH 5—6 og en kurve, der stiger stærkt ved pH lavere end 3, medens stigningen for højere pH end svarende til minimum er moderat. Der er nogen tendens til, at sure calciumfattige jorder har opløsningskurver med minimum ved lavt pH og ret stærk stigning i mængden af opløst fosfat ved højere pH. Calciumholdige jorder har opløsningskurver med et »bredt« minimumsområde ved pH 6—8, og stigningen i mængden af opløst fosfat ved højere pH er ubetydelig (Benne et al. 1936).

Fosfat opløst, p.p.m.P

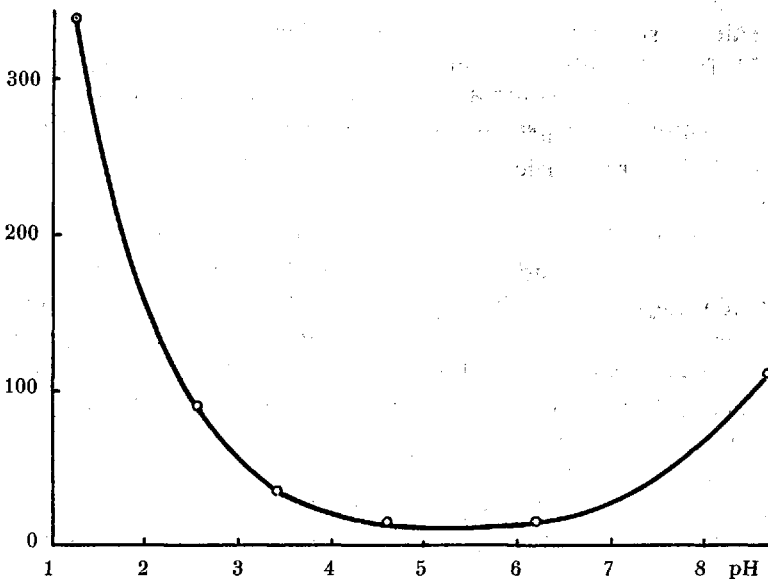


Fig. 4. Opløsningskurve for en fosfatrig, let lerjord fra Askov.

Tilsvarende opløsningskurver får man, når kurvens basiske gren fremstilles med CaCO_3 eller $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i stedet for NaOH (se side 585). I enkelte tilfælde er der i jord fundet opløsningskurver med to minima og et mellemliggende maksimum (Gaarder & Grahl-Nielsen 1935, Benne et al. 1936, Mattson & Karlsson 1938, Stelly & Pierre 1943).

Opløsningskurvernes forløb er øjensynligt bestemt af jordernes indhold af fosfatfældende jern-, aluminium- og calcium-

forbindelser, samt adsorberende kolloider. Selv om man ud fra Gaarders undersøgelser — se fig. 1 — kan forklare hovedtrækkene i opløsningskurvernes forløb, således den stærke stigning i mængden af opløst fosfat ved pH under 2—3, hvor både calcium-, aluminium- og ferrifosfater opløses, såvel som forskellen mellem kurverne i calciumrige og -fattige jorder og forekomster af kurver med to minima i jord med hovedsagelig jern og calcium som bindende stof, — så viser Gaarders undersøgelser også, at opløsningskurvernes form afhænger stærkt af forholdet mellem mængderne af anioner og kationer, hvorfor det ikke er muligt ud fra opløsningskurvernes form at slutte sig til, hvilke stoffer, der binder fosfat i vedkommende jord, således som enkelte forfattere har forsøgt det.

Ud fra opløsningskurvernes almene forløb — med minimumsområde omkring pH 6 — er det forståeligt, at mængden af vandopløseligt fosfat afhænger stærkt af jordernes pH og oftest er størst i sure jorder. (Gaarder & Grahl-Nielsen 1935).

De fleste opløsningskurver i jord omfatter kun pH mellem 1—2 og 8—10, og med denne begrænsning finder man stedse tiltagende stejlehed mod kurvens ender. Hvis syremængden øges yderligere, ser man, at kurven får aftagende stejlehed ved tiltagende syremængde. For forholdene ude i jordbunden har dette ingen betydning, medens det er af stor interesse i analyseteknisk henseende (Salonen 1941, Damsgaard-Sørensen 1946, Bondorff 1952).

Som mål for fosfatets opløselighed i en række jorder har man i stor udstrækning anvendt bestemmelsen af et punkt af opløsningskurven, idet jorden enten er behandlet med en stødpudeblanding med det ønskede pH — i reglen omkring pH 3 — (Truog 1930, Egnér 1932), eller der er bestemt 2—3 punkter på opløsningskurven og interpoleret til den fastsatte pH-værdi (Bondorff & Steenbjerg 1932). Sådanne etpunktsbestemmelser er i stor udstrækning anvendt til praktisk vejledning vedrørende jorders gødsning med fosfat (se side 640).

På samme måde som for bindingskurver gælder det, at opløsningskurvernes form i nogen grad er afhængig af den valgte arbejdsmåde: rystetid, forholdet jord:vand, filtreringsmetode, samt den anvendte syres (bases) art.

Når jord behandles med fortyndet syre eller base, så pH ændres, sker der både opløsning og binding af fosfat, idet nogle fosfatforbindelser opløses og andre dannes, fordi jorden indeholder en blanding af fosfatfældende kationer (Fe, Al, og Ca) samt adsorberende kolloider, hvis fosfatforbindelser har vidt forskellige opløsningskurver (se skemaet side 567 og fig. 1). Da disse opløsnings- og bindingsprocesser antagelig foregår med

Fosfat opløst

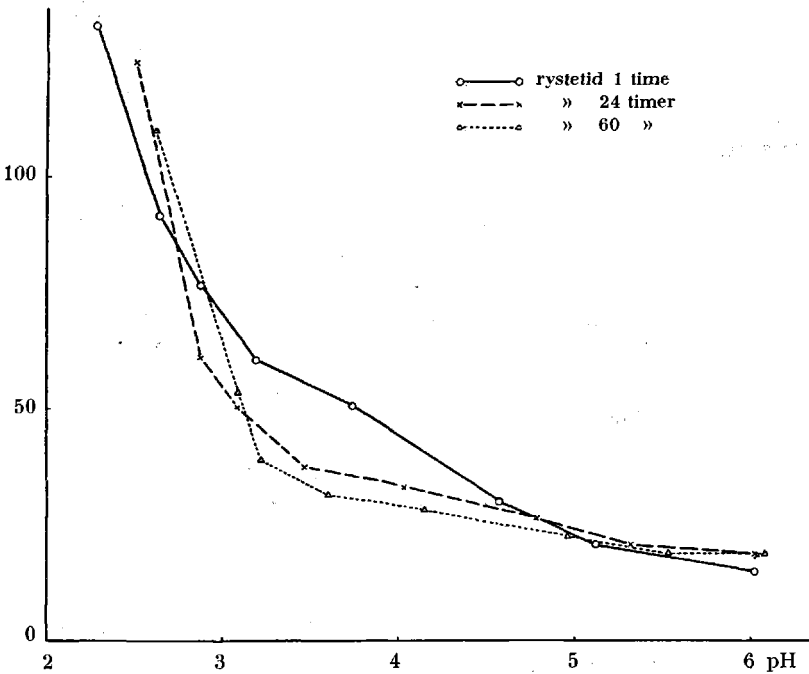


Fig. 5. Opløsningskurver ved forskellig rystetid.
Fosfatrig, let lerjord fra Askov.

forskellig hastighed, kan man få en meget kompliceret virkning af en ændring i pH. Dette demonstreres af fig. 5, der viser opløsningskurver ved forskellig rystetid i samme jord (Dorph-Petersen 1953). Over pH 5 er rystetidens virkning ret usikker, idet den opløste mængde fosfat er meget lille, men ofte tiltager den lidt med tiltagende rystetid (Meyer 1930). I området mellem pH ca. 3 og ca. 5 er den opløste mængde fosfat størst efter een times rystning og aftager derefter. Under pH 3 tiltager mængden af opløst fosfat ofte med tiltagende rystetid.

(Dette forløb er tidligere påvist bl. a. af Russell & Prescott 1916, Hibbard 1931 og Lemmermann & Rauterberg 1949 har fundet aftagende mængder opløst fosfat med tiltagende rystetid i området mellem pH 3 og 5).

Forklaringen er antagelig følgende: I neutral jord findes en del af fosfatet som calciumfosfat, der har ringe opløselighed over pH ca. 6 (fig. 1), men opløses, når pH sænkes under 5,5. Mellem pH ca. 3 og ca. 5 bindes det fra calciumfosfat opløste fosfat som ferri- og aluminiumfosfat eller adsorberes af kolloiderne, men denne binding sker langsommere end opløsningen. Under pH 2—3 opløses også ferrifosfat, således at den opløste fosfatmængde tiltager med øget rystetid, således som normalt for tungtopløselige salte.

I jord fra markforsøg med stigende mængder kalk er fundet, at den mængde fosfat, der midlertidigt opløses ved pH mellem 3 og 5, tiltager med stigende kalkmængder.

Det skal sluttelig påpeges, at i normale jorder med indhold af ler, jern og calcium, er det kun en ringe part — ofte under 2 pct. — af jordernes indhold af uorganisk fosfat, der er opløselig ved pH-værdier, som kan forekomme i dyrket jord. Kun i sure sandjorder — f. eks. fra jydsk hedeflader — kan en meget stor part — op mod 100 pct. — af de uorganiske fosfater være opløselige i vand (Dorph-Petersen 1950, samt ikke offentliggjorte data).

C. Opløsnings-bindingskurveflader.

Ved at gentage målingen af en jords bindingskurve ved andre pH-værdier (pH ændret ved syre- eller basetilsætning) kan man få en samlet fremstilling af opløsnings-bindingsforholdets afhængighed af pH. Det samme opnås ved at gentage måling af opløsningskurven med forskellig tilsætning af fosfat til jorden.

Der foreligger en del sådanne undersøgelser over opløsnings-bindingsforholdets afhængighed af pH udført dels i rene salte (Gaarder 1930), dels i mineraler (Black 1943, Perkins & King 1944 og 1945, Coleman 1945), samt kolloid udvundet af lerjord (Scarseth & Tidmore 1934 og 1935, Allison 1943). Desværre findes kun enkelte undersøgelser i jord, (Mattson & Karlsson 1938, Black 1943).

Resultaterne af sådanne undersøgelser fremstilles ofte grafisk i form af opløsningskurver med en kurve for hver af de fosfatmængder, der sættes til jorden eller det undersøgte mineral.

Her er foretrukket en tredimensional fremstilling med tilsat fosfatmængde (x) og pH (y) som de vandrette akser og bundet fosfat som lodret akse (z) — opløst fosfat er betragtet som negativ

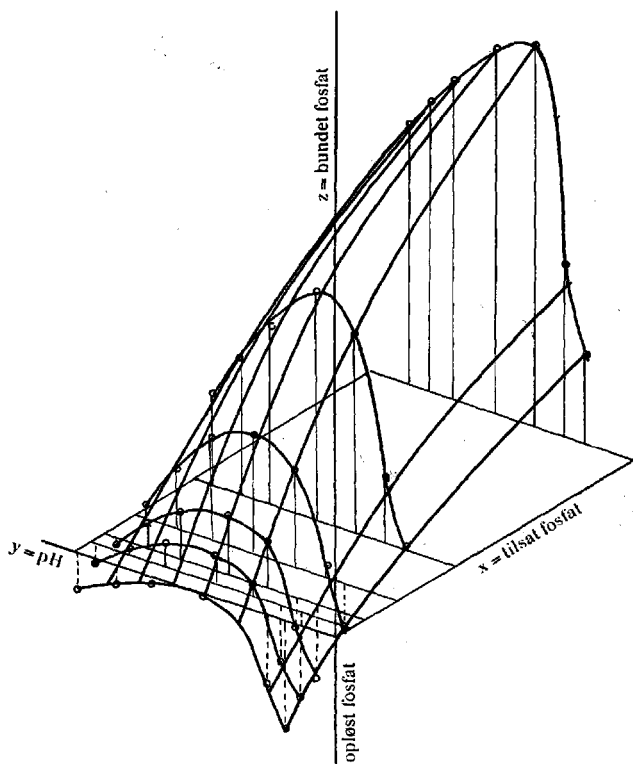


Fig. 6. Opløsnings-bindingskurveflade for en sandjord fra Jyndevad. x = tilsat fosfat er 0-200 p. p. M. y = pH går fra 0 til 8. z = bundet fosfat er tegnet i dobbelt målestok i forhold til x . Opløsningskurverne (i y - z planet) er frihåndskurver efter de målte punkter, men da disse ikke svarer til helt ens pH-værdier, er bindingskurverne (i x - z planet) interpoleret for pH-værdierne 1.5, 2, 3, 4, 5, 6 og 7.

binding. I fig. 6 er vist resultaterne af en af forfatteren udført undersøgelse i sandjord på forsøgsstationen ved Jyndevad. pH er ændret med HCl og NaOH, og fosfat er tilsat som KH_2PO_4 . Rystetid

24 timer, filtrering gennem membranfilter, fosfat i filtratet bestemt kolorimetrisk. I fig. 7 er der ud fra de ovenfor omtalte undersøgelser og egne målinger i 2 jorder vist et idealiseret tilfælde for jord med pH ca. 7. Tegnet på denne måde giver målings-

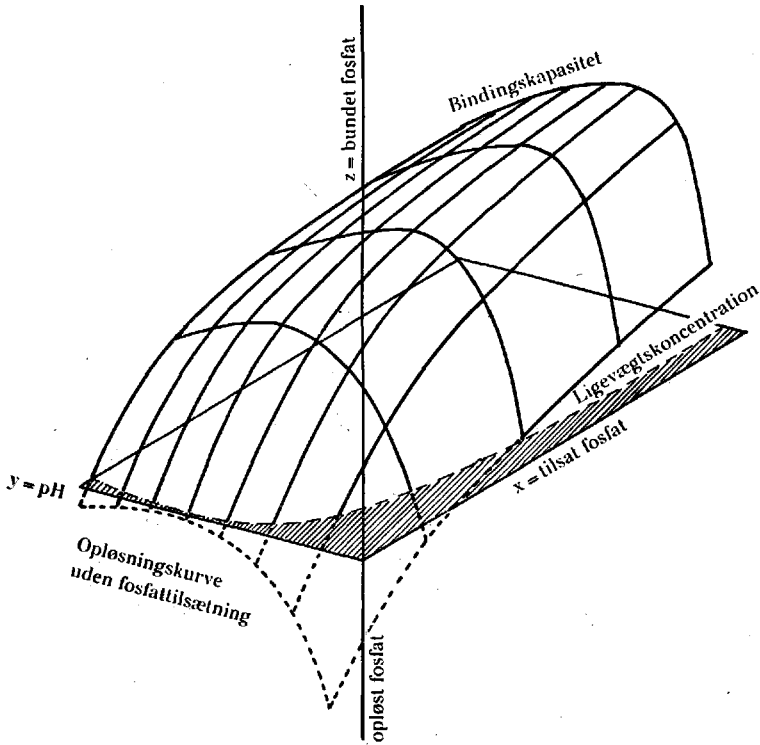


Fig. 7. Teoretisk opløsnings-bindingskurveflade konstrueret for pH mellem 0 og 8 og for fosfattilsætning fra 0 til meget store værdier. Figuren viser foruden opløsningskurven for jord uden fosfattilsætning også opløsningskurver for jord tilsat fire ækvivalente fosfatmængder. Bindingskurverne er tegnet for hver af de hele pH-værdier fra 1 til 8. Ved sammenligning mellem fig. 6 og 7 må bemærkes, at fig. 7 tænkes at omfatte langt større fosfatmængder end fig. 6.

resultaterne en kurveflade, der her betegnes som opløsningsbindingskurvefladen. Kurverne i x - z planet (kurven fra venstre mod højre) er bindingskurver ved forskelligt pH, og det forudsættes (i fig. 7), at de alle forløber vandret ved store fosfattilførsler. Kurverne i y - z planet (fra højre bagud mod

venstre) er opløsningskurver, der er drejet 180° i forhold til fremstillingen i fig. 4 og 5. Kurven på figurens venstre ende ($y-z$ planet for $x = 0$) er opløsningskurven i jord uden tilsætning (i P-frit materiale falder denne sammen med y -aksen, d. v. s. $z = 0$). Ved meget store fosfatmængder vil kurven på $y-z$ planet vise bindingskapacitetens afhængighed af pH.

Kurvefladens skæring med det vandrette $x-y$ plan angiver ligevægtskoncentrationens afhængighed af pH, og det ses, at ligevægtskoncentrationen har en minimumsværdi — her ved pH 5 — og jo lavere pH er derunder, desto større er ligevægtskoncentrationen. Det må antages, at der ikke kan bindes fosfat under en vis pH-værdi, men denne kan være ret lav — *Davis*, 1935 finder således binding ved pH 0,25—0,70.

Kurvefladens form er selvsagt afhængig af det bindende stofs art, for jord af dens sammensætning. Af *Scarseth's* undersøgelser (1935), hvortil der er anvendt et lerkolloid mættet med henholdsvis calcium og jern, ses de nævnte kationers store virkning. For neutrale og svagt sure jorder med ler- og jernindhold er den maksimale binding (minimale opløselighed) ved pH mellem 4 og 6, og dette maksimumspunkt forskydes mod lavere pH ved stigende fosfattilførsel — således som den idealiserede fig. 7 viser det. I kalkede jorder med pH over 7 ligger den maksimale binding ved et højere pH og forskydes kun lidt opad med øget fosfattilførsel. Dette svarer til *Garders* undersøgelser over opløseligheden af ferri-, aluminium- og calciumsfosfater (se side 563).

I nogle jorder kan der være to bindingsmaksima, et ved pH 3—5, antagelig hidrørende fra jernforbindelser og et over pH 7 — calciumforbindelser. Ved stigende fosfattilførsel fjerner de to maksima sig fra hinanden, og det mellemliggende minimum bliver tydeligere (*Mattson & Karlsson* 1938, *Allison* 1943).

Det skal dog tilføjes, at mange af de undersøgelser, der kan tjene til at belyse opløsnings-bindingsforholdene ved forskellig pH, er så ufuldstændige (omfatter få punkter af kurvefladen), at det er vanskeligt at få noget overblik, med mindre man optegner en idealiseret kurveflade som fig. 7 og indlægger forsøgenes data heri. Ved at arbejde på denne måde ser man, at de foreliggende data faktisk kan indordnes under en sådan opløs-

nings-bindingskurveflade, hvis form er afhængig af det bindende stofs art.

Naturligvis er denne kurveflades forløb afhængig af den i laboratoriet anvendte arbejdsmåde — rystetid, temperatur, anioner og kationer i syre, base og fosfattilførsel. Her skal ikke gøres nærmere rede for disse faktorerers virkning, men kun peges på det forhold, at rystetidens (eller henstandstidens) virkning er stærkt afhængig af pH (Black 1943, Coleman 1945), idet øget fosfatbinding ved forlænget rystetid især er fremtrædende ved lavt pH.

Bestemmelse af en given jords opløsnings-bindingskurveflade har antagelig kun ringe interesse, medens det almindelige billede af denne kurveflade må tillægges betydning, idet man ud fra det vil kunne fortolke mange resultater af bindings- og opløsningsundersøgelser, som ellers nemt giver anledning til mis-tydning.

D. Opløsnings-bindingsforholdenes påvirkning af forskellige ioner.

I de to foregående afsnit er omtalt virkningen af pH — brintioner — på fosfatets opløsning og binding, hvilket er et af de bedst undersøgte forhold og vel også det mest primære. Derudover foreligger der forskellige undersøgelser over andre ioners indvirkning på fosfaternes opløsnings-bindingsforhold. Sådanne undersøgelser burde omfatte vedkommende ioners indvirkning på hele opløsnings-bindingskurvefladen, men der er i reglen kun undersøgt virkningen for en enkelt opløsnings- eller bindingskurve, undertiden kun for et enkelt punkt af kurvefladen.

For oversigtens skyld deles materialet i: a anioner, b kationer, der danner tungtopløselige fosfater og c andre kationer.

a. Virkningen af anioner. Når der til et system af vand og jord i ligevægt sættes et neutralt alkalisalt, vil dettes anioner ændre ligevægten, idet de fortrænger fosfatet fra dets forbindelser i den faste fase. Denne fortrængning kan være en ombytning med adsorberet og absorberet fosfat eller skyldes, at de tilsatte anioner danner salte eller komplekse forbindelser med jern, aluminium og calcium, der er mindre opløselige end de tilsvarende fosfater, hvorved fosfatet bringes i opløsning. I den

nye ligevægt, der efterhånden indtræder, vil forholdet mellem fosfat og den tilsatte anion i henholdsvis fast og flydende fase være afhængig af de to anioners koncentrationer og deres fortrængningsevne overfor hinanden. Sidstnævnte synes afhængig af den anvendte jord, hvilket er sandsynligt, da det kan dreje sig om flere processer.

Anionernes virkning er vist ved undersøgelse af jordfosfatets opløselighed ved tilsætning af neutralsalte (Dickman & Bray 1941, Kurtz et al. 1946, Dean & Rubins 1947, Sieling 1947, Swenson et al. 1949, Struthers & Sieling 1950) eller ved sammenligning mellem opløsningskurver fremstillet med forskellige syrer (Russell & Prescott 1916, Bondorff & Steenbjerg 1932). Disse undersøgelser har vist, at de forskellige anioner har vidt forskellig fortrængningsevne overfor fosfat. Stor fortrængningsevne har f. eks. fluorid og arsenat samt flere organiske anioner såsom citrat, oxalat, medens sulfat, klorid og nitrat har ringe evne til at fortrænge fosfat fra jord. Anioner med stor fortrængningsevne kan både forøge opløseligheden af jordfosfaterne og hindre binding af tilsat fosfat (Cooke 1951). Dog er de her nævnte anioners virkning stærkt afhængig af systemets pH.

Flere undersøgelser har vist, at silikat i form af alkalisilikat eller kiselsyregel forøger jordfosfaternes opløselighed og nedsætter bindingen af fosfat i jord-, ler- og jernminerale — dog især over pH 4 (Gaarder 1930, Gaarder & Grahl-Nielsen 1935, Hibbard 1935, Semb 1943).

På tilsvarende måde virker humus og humater (dog ikke calciumhumat) (Gaarder & Grahl-Nielsen 1935, Flieg 1935, Kappen 1936 og 1943, Semb 1943, Swenson et al. 1949), hvorfor man må regne med, at en jords humusindhold er en vigtig faktor for fosfatets opløsningsforhold.

En særlig teoretisk interesse knytter sig til ombytningen mellem fosfationer med det normale fosfatatom, P^{31} , og fosfationer med den radioaktive isotop, P^{32} . Da disse to slags fosfationer må forudsættes at have ens fortrængningsevne overfor hinanden, må der ved ligevægt gælde følgende forhold mellem koncentrationerne:

$$\frac{P^{32} - \text{fosfat i jordvædske}}{P^{31} - \text{fosfat i jordvædske}} = \frac{P^{32} - \text{fosfat i jord}}{P^{31} - \text{fosfat i jord}}$$

i fald al fosfat i jord kunne deltage i ligevægtsprocesserne. Ved at sætte en kendt mængde P^{32} -fosfat til et system af vand og jord og lade det løbe til ligevægt (eller hen imod) kan man efter filtrering og bestemmelse af P^{31} og P^{32} i filtratet beregne de fire led i foranstående ligning. Sidste led — P^{31} -fosfat i jord — bliver dog væsentlig mindre end jordens totale fosfatindhold — også mindre end indholdet af uorganiske fosfater — og dette viser, at kun en part af jordens fosfatindhold deltager i ombytningsprocessen. Denne part kan betegnes som ombytteligt fosfat. På grund af vanskelighederne ved at opnå ligevægt, vil bestemmelser af ombytteligt fosfat påvirkes af den anvendte arbejdsmåde — f. eks. af tilsat fosfatkoncentration, rystetid, temp. m. v.

Mængden af ombytteligt fosfat i jord har man tidligere søgt at bestemme ved at fortrænge fosfatet med andre anioner, arsenat eller fluorid (Bray & Dickman 1942, Dean & Rubins 1947, Schollenberger 1947).

b. Fosfatfældende kationer. Som venteligt ud fra undersøgelserne over jern- og aluminiumfosfaternes opløselighed ved forskelligt pH (fig. 1) finder man, at blanding af vandopløselige ferri- og aluminiumsalte i jord eller lerminerale har større evne til at binde fosfat, især ved pH 3—6, end vedkommende jord eller mineral (Davis 1943, Perkins 1948).

Modsat nedsættes bindingsevnen, når der fjernes jern og aluminium fra jord- og lerminerale — dog må det bemærkes, at fjernelsen af jern og aluminium med syre er et så drastisk indgreb, at der samtidig kan ske meget andet (Davis 1935, Chandler 1941, Coleman 1943 og 1944, Kelly & Midgley 1943, Dean & Rubins 1947, Wild 1953).

I god overensstemmelse hermed finder man stor korrelation mellem en række jorders fosfatbindingsevne (målt ved standardbindingen) og forholdet mellem acidoider og basidoider i samme jorder, således at øget indhold af basidoider (Fe- og Alhydroxyder) øger bindingen, medens øget indhold af acidoider (silikat og humuskolloider) nedsætter denne (Gaarder & Grahl-Nielsen 1935, Semb 1943).

Over pH ca. 5,5 har jordernes indhold af calcium afgørende indflydelse på fosfatets opløsnings-bindingsforhold, idet mængden af fosfationer i jordvædsken aftager, når mængden af calcium-

ioner øges (Aslyng 1950). Tilsætning af et neutralt opløseligt calciumsalt formindsker jordfosfaternes opløselighed og øger fosfatbindingen (Hibbard 1935, Burd & Murphy 1939, Perkins 1948, Lehr & Weesemael 1952, Wild 1953).

Det må bemærkes, at kalkning — tilførsel af CaCO_3 — ændrer fosfatets opløsnings-bindingsforhold både gennem ændring af pH og forøgelse af calciumkoncentrationen. Ved at sammenligne opløsningskurver, hvor den »basiske« gren er fremstillet med såvel NaOH som $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ser man, at ved samme pH opløses der langt mindre fosfat ved anvendelse af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ end ved anvendelse af NaOH (McGeorge & Breazeale 1932, Benne et al. 1936, Davis 1943, Pratt & Thorne 1949). Tilsvarende viser Scarseth's undersøgelser (1935), at over pH 5 binder en calciummættet kolloid langt mere fosfat end den tilsvarende natriummættede kolloid.

c. Andre kationer. Ved koncentrationer, hvori natrium, kalium og ammonium forekommer i almindelig dyrket jord, har disse ioner ingen eller ringe indflydelse på fosfatets opløsnings-bindingsforhold. Flere undersøgelser viser, at i store koncentrationer har disse ioner en målelig virkning (Hibbard 1935, Mattson & Karlsson 1938, Eriksson 1940 og 1942, Semb 1943, Kurtz et al. 1946, Wild 1953).

Denne virkning kan være en almindelig virkning af ionkoncentrationen eller en specifik virkning af vedkommende ion. De foreliggende resultater synes ikke helt overensstemmende, men det kan skyldes, at de nævnte ioners virkning ikke er ens over hele opløsnings-bindingskurvefladen, og så vil virkningen målt i et punkt deraf afhænge af den valgte pH-værdi og fosfatkoncentrationen. Hele forholdet har hovedsagelig kun analyseteknisk interesse. Det kan tilføjes, at ændringen af forholdet mellem jord og vædske i ekstraktionsforsøg meget vel kan ændre koncentrationen af andre ioner i opløsningen og derigennem medvirke til ændringen i fosfatets opløsnings-bindingsforhold (se side 569). Tilsvarende gælder i forsøg, hvor man behandler samme portion jord med flere hold vand (rystning eller gennemløb). Der kan da fås en række filtrater med aftagende calciumindhold og tiltagende fosfatindhold (Hibbard 1935, Burd 1948).

E. Tilførsel af tungtopløselige fosfater til jord-vædskesystemet.

I alle forannævnte bindingsundersøgelser er fosfatet tilført i vandopløselig form, og alle betragtninger vedrørende ligevægtsprocesserne er gjort ud fra den forudsætning. Tilføres der jordvædskesystemet et tungtopløseligt fosfat — f. eks. råfosfat — bliver forholdet noget anderledes. Medens et vandopløseligt fosfat — som superfosfat — opløses meget hurtigt og derfor kan betragtes som tilførsel til den flydende fase — jordvædsken — må råfosfater betragtes som tilførsel i den faste fase. De sandsynlige processer, der kan ske efter tilførsel af råfosfat til jordvædskesystemet, kan nærmest anskueliggøres ved i den skematiske fremstilling af ligevægtssystemet side 567, at indføre en ny gruppe fosfater, der ligesom de øvrige er i reversibel ligevægtsforbindelse med jordvædsken. Da råfosfaterne oftest har større opløselighed end jordfosfatet, d. v. s. at vand i ligevægt med råfosfat har større fosfatkoncentration end jordvædsken normalt har (W r a n g e l l 1926), må man regne med, at der i reglen vil vandre fosfat fra råfosfatet, via jordvædsken, til de andre fosfatformer. Dog er der stor forskel på råfosfaternes opløselighed, og denne er stærkt afhængig af jordvædskens reaktion og calciumkoncentration, således at alle råfosfater (der er calciumfosfater) er mest opløselige i sur, calciumfattig jordvædske. (For tungtopløselige teriære jern- og aluminiumsfosfater er dette forhold sandsynligvis omvendt).

Men selv i sur jord vil der medgå væsentlig længere tid inden råfosfater omlægges i andre fosfater end den, der går inden superfosfat er endt i de samme forbindelser. Dette behøver ikke skyldes, at ligevægten mellem jordvædske og råfosfat ikke er forskudt nok, men derimod at råfosfatets kornstørrelse sætter grænsen for vandringshastigheden, idet opløsningshastigheden for råfosfater i vand og svage syrer er bestemt af formalingsgraden. Ved tilførsel af groft formalet råfosfat til jord, vil der sandsynligvis gå år, inden der opnås ligevægt mellem råfosfatet og de øvrige fosfater, eller alt råfosfatet er omlægret i andre fosfater.

3. Fosfatets bevægelser i naturlig jordbund.

Normale jorders store evne til at binde fosfat medfører, at jordfosfat og gødningsfosfat har meget ringe bevægelighed i

såvel lodret som vandret retning. De forhold, der kan bevirke en bevægelse af fosfat, er de rent mekaniske bevægelser af jorden, forårsaget af mennesker og dyr, samt vandets bevægelser i jorden.

Ved normal jordbehandling vil jordfosfaterne og tilført gødningsfosfat efterhånden — ad åre — blive blandet jævnt i pløjelaget, men en enkelt jordbehandling vil kun bevirke en dårlig fordeling af gødningsfosfat i pløjelaget — harvning bringer således kun fosfat 0—4 cm ned i jorden (T o r s t e n s s o n 1937, T o r s t e n s s o n & E r i k s s o n 1939). Regnorme og andre dyr kan i nogen udstrækning medvirke til blanding af jorden og dermed til fordeling af fosfat — også mellem over- og undergrund.

Plantevæksten kan utvivlsomt påvirke fosfatfordelingen mellem jordprofilens forskellige lag. Det almindeligste er vel, at planterne optager fosfat i dybere lag — ned til ca. 1 meter — og en del deraf aflejres i jordoverfladen, når planterne dør. Den modsatte bevægelse — at der føres fosfat fra en fosfatrig overgrund via planterødderne ned i en fattig undergrund — er dog også mulig.

Af de foregående afsnit fremgår det, at jordvædskenes fosfatindhold er meget ringe — 0—1 p.p.m.P. Derfor er den fosfatmængde, der udvaskes fra almindelige jorder gennem drænvand og anden afstrømning, også ubetydelig set fra et landøkonomisk synspunkt. Her i landet udgør afstrømningen mellem 2000 og 4000 tons pr. ha, og deraf kan beregnes, at fosfatudvaskningen er under 1 kg P pr. ha årlig, ofte endog under 0,1 kg P. Analyser af dræn- og grundvand (W e s t e r m a n n 1898) samt undersøgelser over fosfatudvaskningen i kar- og lysimeterforsøg viser tilsvarende ringe udvaskning fra normale jorder (K r ü g e l et al. 1934, E h r e n b e r g 1938, W i l d 1950. Alle tre har referater af mange tidligere arbejder over fosfatnedvaskning og -udvaskning fra jord. Endvidere I v e r s e n 1945).

Dog findes der enkelte jorder, der har så ringe fosfatbindingsevne, at der ved stærk gødskning med superfosfat kan ske en betydende udvaskning. Det drejer sig om sure, ofte husmusholdige sandjorder uden indhold af ler og jern.

Sådanne er fundet i Holland, Florida og i de jyske hede-flader (V r i e s & H e t t e r s c h i j 1936, N e l l e r 1947, D o r p h - P e t e r s e n 1950).

Foruden udvaskningen kan den nedadgående vandbevægelse forårsage en nedvaskning af fosfat, d. v. s. at fosfat opløses i et jordlag og bindes i et dybere. Undersøgelser af forskellig art, f. eks. over fosfatets fordeling ned gennem pløjelaget i gamle fosfatgødede græsmarker, tyder dog på, at nedvaskningen er af ringe landøkonomisk betydning (Stephenson & Chapman 1931, Midgley 1931, Gericke 1932, Gisiger 1933,

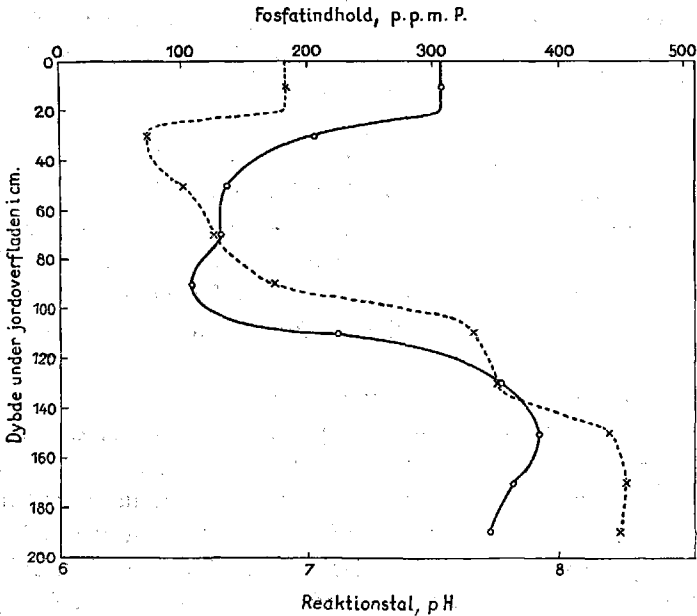


Fig. 8: Fosfatindhold og reaktionstal ned gennem en lerjordsprofil på Askov forsøgsstation. Fosfatindholdet er angivet med fuld streg, pH med punkteret streg.

Krügel et al. 1934, Brown 1935, Franck 1938, Eriksson 1938, Metzger 1939, Schaller 1941, Semb 1941, Semb & Rimeslåttén 1944, McGregor 1953). På tilsvarende måde har laboratorieundersøgelser over fosfatnedvaskningen i jordsøjler vist, at denne er ringe (Greisenigger 1910, Hilbert et al. 1938, Henderson & Jones 1941, Jordan et al. 1952, Larsen 1952).

Selv om man ved disse undersøgelser har vist, at fosfat er relativt ubevægeligt i jorden — d. v. s. at der i en kortere

årrække kun kan konstateres ringe ned- og udvaskning — så er fosfat (bl. a. calciumfosfat) geologisk set letopløseligt og derfor bevægeligt, og i århundreders løb sker der da også en bevægelse i jordbundens fosfater. Dette kan bl. a. vises ved at undersøge fosfatindholdet (totalindholdet) i lag ned gennem jordprofiler — ned til 2—5 m. Sådanne undersøgelser viser, at der ofte er en stor variation i de enkelte lags fosfatindhold, og denne variation skyldes sandsynligvis ikke oprindeligt forskelligt fosfatindhold, men derimod bevægelser i fosfatet (Peter 1916, Alway & Clayton 1916, Pearson et al. 1940, Semb & Rimeslåtten 1944, Wiklander & Hallgren 1949, Dorph-Petersen 1949, Mattson et al. 1950 og 1951).

I flere morænelerjorder er der i 30—100 cm's dybde fundet et relativt surt, fosfatfattigt lag, medens undergrundens kalkholdige ler var fosfatrikt — se fig. 8. Det fosfatfattige lag under pløjelaget kan skyldes opadgående transport gennem planter og nedadgående bevægelser forårsaget af vandet, der opløser mere fosfat i dette sure lag end i de over- og underliggende lag med højere reaktion.

I hedejorder findes en stor part af disse jorders ringe fosfatindhold i allaget (Weis 1929), der har højere reaktion end de overliggende lag. Som helhed må man regne med, at fosfat føres væk fra jordlag med lavt pH og udfældes i dybere lag med højere pH.

II. Undersøgelser af jordens fosfatindhold og tilført gødningsfosfat ved hjælp af dyrkningsforsøg.

Det kan indledningsvis nævnes, at dyrkningsforsøg med planter — især markforsøg — er en meget usikker undersøgelsesmetode. Dette skyldes dels den relativt store måleusikkerhed (»forsøgsfejl«), som dyrkningsforsøg altid har på grund af uensartethed i jorden, variation i plantematerialet m. v., men skyldes dog især det forhold, at alle andre vækstfaktorer, ud over den i forsøget prøvede, indvirker på planternes vækst. I forsøg med fosfatgødning — f. eks. superfosfat — vil såvel udbyttet af grundgødet (uden superfosfattilførsel), merudbyttet for su-

perfosfat, som planternes optagelse af fosfat være afhængig af de øvrige vækstoffaktorer konstellation. Dette kan illustreres med tal fra forsøg på Lundgaard 1927—46 — gennemsnit af 4-årigt sædskifte (Iversen & Dorph-Petersen 1949).

Grundgødning	Udbytte, hkg f. e. pr. ha		Afgroernes optagelse kg P pr. ha	
	uden supf.	med supf.	uden supf.	med supf.
Ingen.....	13.1	14.4	4.1	5.0
Kali.....	16.9	21.0	5.4	7.3
Kvælstof.....	20.4	22.4	6.7	8.4
Kvælst. + kali...	24.3	34.6	6.8	10.7

Det er med rette fremhævet, at planternes optagelse af fosfat (og tilsvarende gælder de fleste andre stoffer) er resultatet af et sammenspil af de fysisk-kemiske kræfter, der påvirker fosfat i jorden og de fysiologiske forhold i planterne. I nærværende afsnit vil der hovedsagelig blive set på det samlede resultat af dette sammenspil, men analysering af dets enkeltprocesser vil dog blive forsøgt nu og da.

Uden at gå i enkeltheder skal der kort refereres lidt om selve optagelsesprocessen.

Under naturlige forhold optager planterne kun fosfat gennem rødderne, rodhårene, men de kan optage fosfat gennem bladene, når en opløsning deraf sprøjtes på planterne (Oliverson 1952).

Optagelsen sker normalt i form af ortofosfationer (hovedsagelig $H_2PO_4^-$). Desuden optages meta- og pyrofosfater, samt simple organiske fosforforbindelser (Allison et al. 1941), medens lavere iltningsgrader, såsom fosfiter og hypofosfiter ikke optages.

Optagelsen af fosfationer sker med jordvædsken som mellemled, d. v. s. at faste fosfater må opløses og passere gennem vand til rodhårene — evt. kun et lag af få molekylers tykkelse (Dean & Rubins 1945). Der kan skelnes mellem følgende faser i optagelsen: 1. opløsning af jordfosfat. 2. diffusion af fosfat gennem jordvædsken. 3. adsorption af fosfationer på rodhårenes yderside. 4. passage gennem rodhårenes cellevæg. 5. transport af fosfat til andre dele af planten. 6. opbygning i organiske fosforforbindelser.

Opløsningen — herunder anionombytningen — af jordfosfaterne er omtalt i foregående hovedafsnit. Om diffusion af fosfat i jordvædsken skal kun nævnes, at dens hastighed (i m pr. tidsenhed) er afhængig af koncentrationsforskellen og er ofte ringe. Rodhårenes ydre cellevægge er ampholytiske kolloider, d. v. s., at de adsorberer såvel kationer som anioner. Deres evne til at adsorbere fosfationer afhænger af mange forhold f. eks. kationbelægningen, hvorfor tilførsel af neutralssalte kan ændre fosfatoptagelsen ved at ændre cellevæggenes ampholytiske egenskaber (M a t t s o n et al. 1949).

Selve fosfatoptagelsen gennem cellevægge er en aktiv, energi-krævende proces. Derfor afhænger optagelseshastigheden af rodens tilstand — livsfunktioner — og ikke af den omgivne vædskes fosfatkoncentration. Når man alligevel i forsøg finder, at trinsvis stigende fosfattilskud — og dermed stigende fosfatkoncentration i jordvædsken — medfører stigende fosfatoptagelse i planterne, skyldes dette ikke, at optagelseshastigheden afhænger af fosfatkoncentrationen, men derimod, at diffusionen af fosfat hen til rødderne er den begrænsende enkeltproces, og dens hastighed er afhængig af fosfatkoncentrationen. Rigtigheden af dette er vist i vandkulturer med stadigt omrørt næringsvædske, hvor diffusionen således er elimineret, og da er optagelseshastigheden uafhængig af fosfatkoncentrationen (O l s e n 1950).

Fosforets vandringer i planterne foregår ret hurtigt, og fosfor er ikke stationært i planterne, men bevæges stadigt rundt deri (H e v e s y et al. 1936 og 1937). Fosfatets opbygning i organiske forbindelser er livsproccesser af ret ukendt natur. Det kan endvidere nævnes, at der kan gå fosfat fra planterødderne ud i jorden, og at planterne kan afgive lidt fosfat ved udsvedning fra bladene (A c h r o m e i k o 1936).

Fosfatoptagelsen er uafhængig af vandoptagelsen. At planterne ikke simpelthen optager jordvædsken med det deri værende fosfat ses af følgende lille kalkulè. Pr. kg produceret tørstof optager planterne 300—400 kg vand og 800—4000 mg P, d. v. s. 2—10 mg pr. kg vand. Men jordvædsken indeholder sjældent 1 mg P pr. kg, oftest kun 0,1—0,2, og der er iagttaget gode afgrøder på jord med 0,03—0,06 mg P pr. kg jordvædske

(Tidmore 1930). Det må derfor antages, at planterne stadig nedsætter jordvædskeens fosfatindhold, medens de foran omtalte ligevægtsprocesser søger at genoprette dette indhold. Det må dog fremhæves, at planterne sandsynligvis øver en betydelig virkning på opløsningen af jordfosfaterne ved at ændre på ligevægtstilstanden i jord-vædske-systemet. I denne henseende er røddernes CO_2 -produktion den vigtigste faktor. Ved dannelse af HCO_3^- - og H^+ -nedsættes jordens pH og mest lige omkring rodhårene. Denne pH-nedsættelse kan ikke måles, men det må antages, at pH kan nedsættes til omkring 4 i røddernes umiddelbare nærhed, hvis jordens stødpudevirkning (især calciumkarbonatindhold) ikke er for stor (Burd 1947 og 1948). Af foregående afsnit vil det fremgå, at en sådan pH-sænkning oftest vil medføre højere fosfatindhold i jordvædsken. Endvidere må man regne med, at de ved CO_2 -produktionen dannede HCO_3^- anioner i nogen grad fortrænger fosfationer fra jordkolloiderne.

Det er muligt, at planterødderne udskiller forskellige organiske syrer, der på tilsvarende måde fremmer jordfosfaternes opløsning.

Desuden kan planternes optagelse eller binding af andre ioner, især calcium, ændre jordvædskeens sammensætning og dermed ligevægten mellem fosfater og jordvædske, således at der opløses mere fosfat.

Igennem vækstperioden følges fosfatoptagelsen ret nøje med tilvæksten af tørstof, medens f. eks. optagelsen af nitrat og kalium er »forud for væksten«, således at de unge planter har højere procentisk indhold af kvælstof og kalium end de ældre (Tallie 1937). Denne senere optagelse af fosfat kan skyldes, at røddernes CO_2 -udvikling er af afgørende betydning for fosfatfrigørelsen og optagelsen, således at tilvækst, CO_2 -udvikling og fosfatoptagelse er nøje forbundet.

Jordens mikroflora har sandsynligvis stor betydning for de højere planters fosfatoptagelse, og dette skyldes antagelig mikroorganismernes CO_2 -produktion. Det er således vist, at planter i sterile kulturer optager mindre af tungtopløselige fosfater end i samme voksemedium med mikroorganismer (Gerritsen 1948). For planter med mykorrhiza (svamperod) er det vist, at

svampehyferne optager fosfat til den højere plante (Melin & Nilsson 1950).

Med disse mere plantefysiologisk prægede data som baggrund skal der i det følgende fremdrages en del resultater fra mark- og karforsøg, som kan tjene til at belyse den samlede proces ved planternes optagelse af fosfat.

1. Tilgængeligt fosfat i jorden.

Gennem bestemmelse af afgrødernes fosforindhold, der for danske afgrøder er af størrelsesordenen 8—40 kg P pr. ha (som middel kan regnes 16 kg P pr. ha), er det mange gange fastslået, at der i een afgrøde kun optages en lille part af jordens fosforindhold — dette er i danske jorder omkring 1000 kg P i pløjelaget (se side 556). Selv af det syreopløselige, uorganiske fosfat optages der kun få procent i hver afgrøde. Dette ses af følgende resultater fra mangeårige forsøg (Iversen & Dorph-Petersen 1949 og 1951).

Forsøgssted	Jordfosfat opl. i 0.2 n H ₂ SO ₄ kg P pr. ha i pløjelaget	Årlig optagelse i afgrøderne, kg P pr. ha
Askov Lermark.....	297	15.2
Askov Sandmark.....	446	16.2
Lundgaard.....	332	10.7
Tylstrup.....	673	16.2

Selv på jord, hvor forsøg har dokumenteret, at afgrøderne lider af fosfatmangel — d. v. s. at gødskning med fosfat giver udbytteforøgelse — er optagelsen i een afgrøde kun få procent af jordens fosfatindhold eller af dens indhold af uorganiske fosfater. Deraf kan sluttet, at optagelsen højst kan blive denne lille part. Ikke desto mindre kan man på en sådan jord år efter år dyrke afgrøder uden fosfattilførsel, og selv om hver afgrøde optager så meget fosfat, som den kan, så får den følgende afgrøde tilsyneladende ligeså meget fosfat.

Tilsvarende forhold gælder for de fleste plantenæringsstoffer, men alligevel må man ud fra de foreliggende forsøgsdata antage, at f. eks. kvælstof og fosfat har vidt forskellig virkemåde, og derfor bliver gødskningens teori for disse to stoffer forskellig.

Der skal her anvendes en ofte fremsat teori om jord- og gødningsfosfaternes forhold overfor planterne, og i det følgende vil denne teori's rigtighed blive sandsynliggjort gennem forsøgsresultater.

Først antages, at jordens fosforindhold kan deles i en utilgængelig og en tilgængelig part. Ved tilgængeligt fosfat forstås her hele den mængde fosfat, der kan optages uden anden kemisk omdannelse end opløsning og som er beliggende således, at den kan opløses og optages. Med andre ord hele den mængde fosfat, der er bestemte for afgrødens størrelse.

Det må endvidere antages, at planternes optagelse af det tilgængelige fosfat er en så langsomt forløbende proces, at kun en lille part deraf kan optages i en afgrøde. Den brøkdelen af det tilgængelige fosfat, der optages i en afgrøde betegnes som optagelseskoefficienten. Optagelsen i en afgrøde bliver da = mængden af tilgængeligt fosfat \times optagelseskoefficienten.

(Tilsvarende teori er fremsat gentagne gange tidligere bl. a. af Bondorff 1930 og 1952 — der dog foruden »tilgængeligt fosfat« bruger betegnelsen »aktivt« eller »effektivt« fosfat. På engelsk bruges betegnelsen »available phosphorus« skiftevis om de her anvendte begreber »tilgængeligt fosfat« og »fosfattilstand«).

Undersøgelser over planternes optagelse af jordens fosforindhold alene giver ingen holdepunkter for vurderingen af størrelsesordenen for mængden af tilgængeligt fosfat og optagelseskoefficienten. Ud fra resultater af forsøg med fosfatgødning og da især med gødning indeholdende mærket fosfat (den radioaktive isotop, P^{32}) sammenholdt med de i afsnit I omtalte jordbundskemiske resultater må det antages, at det tilgængelige fosfat ofte udgør en stor part — op til halvdelen — af jordens samlede fosforindhold, medens optagelseskoefficienten er meget lille — af størrelsesorden 0,02—0,10.

Til underbygning af denne teori skal foreløbig anføres følgende. I forsøg med stigende tilskud af superfosfat kan man

ved hjælp af en af de kendte ligninger for udbyttekurven beregne, hvor meget fosfat — af samme optagelighed som superfosfat — udbyttet på grundgødet svarer til d. v. s. man beregner, hvor meget »superfosfat«, der skulle »fjernes fra jorden« for at give udbytte nul. Selv om en sådan ekstrapolation må tages med forbehold — resultatet er blandt andet afhængig af, hvilken udbytte-ligning man anvender — så giver resultater af sådanne beregninger dog en forestilling om størrelsesordenen. For normale dyrkningsjorder finder man, at der til udbyttet på grundgødet svarer en fosfatmængde ækvivalent med 1000—5000 kg superfosfat pr. ha, selv om denne afgrøde kun indeholder fosfat svarende til 200—300 kg superfosfat (B o n d o r f f 1930). For meget fosfatfattige jorder — som den senere omtalte jord på Borris Nørrehede (se side 597), svarer udbyttet af grundgødet til få hundrede kg superfosfat pr. ha, men her skal der også tilføres 2000—4000 kg superfosfat pr. ha, før man kan opnå et antageligt udbyttensniveau. Man kommer ad denne vej til det resultat, at for at få fuldt udbytte må jorderne indeholde en fosfatmængde, der reagerer på samme måde som 1000—5000 kg superfosfat, eller denne gødningsmængde må tilføres. Men i begge tilfælde optager afgrøderne kun fosfat svarende til 200—300 kg superfosfat.

Efter den her anførte definition for tilgængeligt fosfat, må organiske fosforforbindelser (undtagen lidt vandopløseligt organisk fosfor, der måske kan optages uden mineralisering) samt silikatbundet eller silikatomgivet fosfor henregnes til den utilgængelige part, medens alle fosfater, der deltager i ligevægtsprocessen i jord-vædske-systemet kan henregnes til den tilgængelige part (D a m s g a a r d - S ø r e n s e n 1945). Endvidere udelukker definitionen også alt fosfat beliggende udenfor rodzonen fra mængden af tilgængeligt fosfat. Dog bør det noteres, at selv eenårige planter kan hente fosfat op fra indtil en meters dybde (B e h r e n s 1934).

Den tilgængelige mængde fosfat er sandsynligvis ikke homogen, men består tværtimod af fraktioner med vidt forskellige optagelseskoefficienter. Dog vil der for overskuelighedens skyld tales om een optagelseskoefficient og om ændring af denne, selv om en sådan ændring i reglen skyldes, at fosfat omlægges fra en fraktion til en anden med anderledes optagelseskoefficient.

Ved mineraliseringen af organiske fosforforbindelser og forvitring kan der overføres fosfor fra den utilgængelige til den tilgængelige del, og derfor er mængden af tilgængeligt fosfat i en jord ikke helt konstant. Dog betyder det næppe meget i almindelige jorder, hvor mineraliseringen kun er nogle få kg P årlig pr. ha, og der er 100—500 kg tilgængeligt fosfat i pløjelaget (se side 560). For humusjorder under stærk omsætning, på grund af opdyrkning og kalkning, kan mineraliseringen af organisk fosfor øge mængden af tilgængeligt fosfat kendeligt. Tilsvarende gælder for nogle nyopdyrkede tropejorder, hvor tilførsel af tilgængeligt fosfat ad denne vej har stor betydning for afgrødernes fosfatforsyning (M a r e l 1947). Dannelsen af tilgængeligt fosfat ved forvitring må anses for aldeles ubetydelig.

2. Optagelsen af vandopløseligt gødningsfosfat.

Mange mark- og karforsøg har vist, at meroptagelsen for vandopløseligt fosfatgødning — superfosfat — i een afgrøde kun udgør 5—25 pct. af gødningens fosfatindhold, selv om der er fosfatmangel i det gødede forsøgsled, d. v. s. at yderligere tilskud giver merudbytte. (Meroptagelse = optagelse på fosfatgødet jord ÷ optagelse på grundgødet).

Dette kan illustreres af følgende sammendrag. (Forsøgene, men ikke de her anførte tal, er omtalt af I v e r s e n & D o r p h - P e t e r s e n 1948, D o r p h - P e t e r s e n 1953).

	kg superfosfat pr. ha			
	0	200	2000	4000
<i>Lundgaard 1940, kålroer.</i>				
Udbytte, hkg tørstof pr. ha, rod + top.....	107.6	109.2	114.6	119.3
Fosfatoptagelse, kg P pr. ha.....	19.6	23.8	37.4	42.9
Meroptagelse i % af tilførsel.....	—	26	11	7
<i>Askov 1942, runkelroer.</i>				
Udbytte, hkg tørstof pr. ha, rod + top.....	110.6	117.0	122.1	125.4
Fosfatoptagelse, kg P pr. ha.....	18.3	21.5	32.0	39.7
Meroptagelse i % af tilførsel.....	—	20	9	6
<i>Jyndeved 1944, kålroer (4000 kg kalk).</i>				
Udbytte, hkg tørstof pr. ha, rod + top.....	27.7	37.5	53.4	—
Fosfatoptagelse, kg P pr. ha.....	7.4	8.9	22.8	—
Meroptagelse i % af tilførsel.....	—	10	10	—

I alle tre forsøg har der været fosfatmangel selv efter tilførsel af 200 kg superfosfat, og alligevel udgør meroptagel-

sen her kun 10—26 pct. af det tilførte fosfat. I korn er meroptagelsen i reglen endnu lavere, oftest under 10 pct. af gødningens indhold.

I forsøg, hvor der kun måles merudbyttet for superfosfat, men ikke meroptagelsen, da afgrødeanalyser mangler, kan man ud fra normalindholdet af fosfat i de forskellige afgrøder skønne sig til meroptagelsen. Selv i forsøg med stigende superfosfatmængder, der medfører stigende udbytte, finder man oftest, at merudbyttet for det første tilskud er så lille, at det kan forklares ud fra en meroptagelse på 10—20 pct.

Det kan derfor fastslås, at der første år efter tilførsel af superfosfat kun optages 5—25 pct. af dets fosfat — som norm kan regnes med 10 pct.

Dette er dog langt fra den totale virkning af gødskning med superfosfat, thi adskillige forsøg viser, at tilførsel af superfosfat i et eller få år kan give merudbytte og meroptagelse i 5—10 år (Bushnell 1941, Ware et al. 1942, Iversen 1942, Volk 1945, Iversen & Dorph-Petersen 1948, Dorph-Petersen 1953, endvidere mange lokale forsøg med store mængder superfosfat siden 1943). Som eksempel kan henvises til efterfølgende udbyttet fra Borris Nørrehede, der viser, at virkningen af 2000 og 4000 kg superfosfat pr. ha givet 1940 stadig er tydelig i 1946. Iøvrigt var der stort merudbytte endnu i 1953.

Hvor man som forsøgsgødning har anvendt 100—200 kg superfosfat pr. ha årlig, kan man i enkelte forsøg konstatere, at merudbyttet og meroptagelsen stiger med årene. Som eksempel herpå kan anføres udbyttet af kærne i vårsæd i ovennævnte forsøg på nyopdyrket hedejord på Borris Nørrehede (Iversen & Dorph-Petersen 1948).

kg superfosfat pr. ha:	0	Udbytte i hkg kærne pr. ha			
		100	200	2000	4000
		årlig	årlig	1940	1940
1940, havre.....	1.4	2.2	2.7	14.6	15.0
1941, —	1.6	5.3	7.9	14.3	15.7
1942, —	9.7	20.3	28.2	34.4	34.8
1943, —	6.0	17.5	26.6	30.8	34.5
1944, byg.....	11.5	23.6	29.9	31.6	33.0
1945, —	5.8	21.7	31.9	30.8	39.4
1946, havre.....	8.9	18.9	26.4	27.8	24.3

Medregnet de uundgåelige variationer, som vejrliget giver, kan der læses følgende af disse tal. På grundgødet stiger udbyttet gennem årene — antagelig en følge af kalkning 1940. 2000 og 4000 kg superfosfat pr. ha giver stort merudbytte alle år, dog således, at merudbyttet for 2000 efterhånden bliver mindre end for 4000. 100 og 200 kg superfosfat årlig giver med årene stigende merudbytte, og dette kan være et udtryk for, at det enkelte års merudbytte er en sum af virkningen af årets fosfattilførsel + eftervirkning af tidligere års gødskning.

Rodfrugterne i samme forsøg og de øvrige forsøg efter samme plan (Lundgaard, Askov og Studsgaard) giver lidt mere uregelmæssige resultater, men antyder dog en tilsvarende stigning i merudbyttet for 100 og 200 kg superfosfat pr. ha årlig. I disse forsøg har 2000 og 4000 kg superfosfat pr. ha i anlægsåret givet stort merudbytte i alle forsøgsår.

Hvis merudbyttet og meroptagelsen for 100—200 kg superfosfat årlig skyldes en opsummering af virkning og eftervirkning, måtte man vente, at meroptagelsen beregnet i procent af den årlige tilførsel skulle stige mod 100 i løbet af en tilstrækkelig lang årrække. Resultaterne af de mangeårige forsøg med staldgødning og kunstgødning tyder også på noget sådant, således som det ses af følgende sammendrag omfattende forsøgsleddene $\frac{1}{2}$ og 1 kunstgødning.

Forsøgssted	Forsøgsår	Meroptagelse i pct. af årlig tilførsel		
		$\frac{1}{2}$ gødning	1 gødning	
Lundgaard.....	1—4	15	13	} Iversen 1941
do.	5—8	22	18	
Lundgaard.....	5—12	41	29	} Iversen & Dorph-
Tylstrup.....	5—16	50	39	
Lyngby.....	15—17	64	43	} Dorph-Petersen 1946
Askov Lermark.....	38—54	67	61	
Askov Sandmark.....	38—54	85	61	Petersen 1951

Jo senere i forsøgsperioden optagelsen er målt, desto større er meroptagelsen i pct. af den årlige tilførsel.

Det ses endvidere, at meroptagelsen i procent af tilførslen aftager med tiltagende gødningsmængde, hvilket er en almindelig erfaring fra forsøg med stigende mængder superfosfat (se også side 596). Dette forhold udtrykkes ofte på den måde, at optagelsen af fosfat er en krumliniet funktion af tilførslen, medens optagelsen af nitrat indenfor ret store gødningsmængder er en retliniet funktion af tilførslen (Lohse 1930).

De her nævnte forhold — lille meroptagelse af fosfat i første år, men virkning igennem en lang årrække samt opsummering af virkning og eftervirkning ved årlige tilførsler — kan forklares ud fra den foran omtalte teori om fosforets forhold i jorden — stor mængde tilgængeligt fosfat med lav optagelseskoefficient — når man dertil antager, at vandopløseligt gødningsfosfat simpelthen indgår i det tilgængelige fosfat og virker ligesom dette.

I faglitteraturen tales der i denne forbindelse ofte om, at gødningsfosfat »bindes i jorden«, og at den årlige optagelse derfor er ringe. Da man tilmed ofte samtidig anvender betegnelsen »binding« om den rent kemiske proces (vandring af fosfat fra flydende til fast fase), som her defineres som binding, er udtrykket »binding« i forbindelse med planternes optagelse uheldig. Antagelig skyldes fosfatgødningens lave optagelseskoefficient, at fosfatet bindes kemisk i jorden, men vi ved det ikke, og da planterne er aktive partnere i optagelsesprocessen — se bl. a. om arternes forskellige optagelse side 615 — er det indtil videre uhensigtsmæssigt at sætte lighedstegn mellem kemisk binding af fosfat og lav optagelsesprocent, thi man vil da nemt ved rent sproglige midler få en forestilling om en kendsgerning, hvor man kun har et problem.

Her anvendes derfor betegnelsen, at gødningsfosfat har lav optagelseskoefficient, men der fremdrages stadig forhold, som tyder på, at optagelse og kemisk binding har nær forbindelse med hinanden.

I de senere år har man opnået værdifuldt kendskab til jord- og gødningsfosfaternes virkemåde gennem anvendelse af den moderne isotopteknik, idet der i forsøg anvendes gødning indeholdende den radioaktive fosforisotop, P^{32} , også kaldet mærket fosfat. Teknikken i disse forsøg er i korthed følgende: I den an-

vendte forsøgsgødning indblandes en lille kendt mængde P^{32} i samme kemiske forbindelse som det øvrige fosfat. I den høstede afgrøde bestemmes såvel den totale fosfatmængde som mængden af P^{32} . På grundlag af udbyttet og disse analyser kan beregnes, hvor stort part af afgrødens fosforindhold, der stammer fra gødningen, og hvor meget der er optaget fra jordens fosforindhold. (Om isotopteknik kan iøvrigt henvises til Hendricks & Dean 1948, Jansson 1948, Larsen 1949, 1950 og 1951, Frederiksson 1950, Sanengen 1950).

Ud fra den efterhånden anselige mængde forsøg med mærket fosfat kan der drages følgende hovedlinjer.

Selv om der i gødning tilføres 1—4 gange afgrødens fosforbrug, optager planterne fosfat fra såvel jord som gødning.

Med samme mængde fosfatgødning (200—400 kg superfosfat pr. ha) anvendt på forskellige jorder bliver kvotienten, fosfat optaget fra jord: fosfat optaget fra gødning, afhængig af jordernes fosforindhold, således at den er mindst (omkring 1) på jorder, hvor afgrøderne lider af fosformangel og størst (op til 10) på jorder, der kan give fuld afgrøde uden fosfatgødning.

Ved tilførsel af stigende mængder mærket fosfatgødning til een jord aftager nævnte kvotient, idet optagelsen fra jorden stiger lidt ved første gødningstilskud og er derefter konstant eller lidt aftagende ved større tilskud, medens optagelsen fra gødningen stiger med stigende tilskud (dog ikke retliniet).

Gennem vækstperioden tiltager kvotienten, fosfat optaget fra jord: fosfat optaget fra gødning, noget, hvilket viser, at de unge planter fortrinsvis henter deres fosfat fra gødningen, medens de senere udnytter jordfosfaterne i højere grad, måske fordi rødderne da går dybere end det gødede lag.

Dette kan dog også skyldes, at frisk tilført, vandopløseligt fosfat har lidt højere optagelseskoefficient end jordfosfaterne, men at gødningsfosfatets optagelseskoefficient aftager efterhånden. (Vedrørende disse forhold henvises til Ballard & Dean 1941, Dean et al. 1948, Spinks et al. 1947 og 1948, Nelson et al. 1948 og 1949, Hendricks & Dean 1948 og 1950, Blaser & McAuliff 1949, Fried & MacKenzie 1950, Hall et al. 1949, Jacob et al. 1949, Krantz et al. 1949, Olsen & Gardner 1949, Stanford & Nelson

1949, Welch et al. 1950, Frederiksson & Wiklander 1950, Jordan et al. 1952, Prince 1953, Kapp et al. 1953, Neller 1953).

Disse resultater er forståelige, hvis man antager, at det tilførte (mærkede) gødningsfosfat i jorden »blandes« med en i mange jorder ret stor mængde tilgængeligt fosfat med nogenlunde samme lave optagelseskoefficient som gødningsfosfatet; dog således, at gødningsfosfatet en tid — dage eller måneder — kan have noget større optagelseskoefficient end det øvrige tilgængelige fosfat. D. v. s., at med sidstnævnte forbehold bekræfter disse forsøg den her anvendte teori, der siger, at dyrkningsjorder indeholder ret store mængder plantetilgængeligt fosfat (varierende fra jord til jord) med lav optagelseskoefficient og at tilført gødningsfosfat indgår i mængden af tilgængeligt fosfat.

Ved hjælp af forsøg med mærket fosfat kan man ud fra den tilførte fosfatmængde og den gennem afgrødeanalyser bestemte kvotient, fosfat optaget fra jord: fosfat optaget fra gødning, beregne, hvor stor mængde tilgængeligt fosfat, der oprindeligt var i jorden (Larsen 1950 og 1952, Fried & Dean 1952, Rubins 1953). Ad denne vej kan det vises, at selv i jorder, hvor afgrøderne lider af fosfatmangel, er mængden af tilgængeligt fosfat af en størrelsesorden som 5—10 gange afgrødernes årlige behov, og i fosfatrige jorder svarer mængden af tilgængeligt fosfat til 5—10 t superfosfat pr. ha.

Det er flere gange nævnt, at man antager, at tilført vandopløseligt gødningsfosfat indgår i mængden af tilgængeligt fosfat og efter nogen tid får samme lave optagelseskoefficient som dette. En sådan antagelse stemmer således særdeles vel med de i afsnit I omtalte erfaringer vedrørende kemisk binding af fosfat i jord. Når man betænker, at mængden af tilgængeligt fosfat sandsynligvis består af en række fraktioner med forskellige optagelseskoefficienter, er det et spørgsmål, om der i jorden ikke kan ske omlejninger af gødningsfosfatet (se side 568) således at dets optagelseskoefficient aftager mod nul. Endvidere om gødningsfosfat tilført i vandopløselig form efterhånden kan overføres i utilgængelig form. Med andre ord, vil planterne i løbet af en

årrække kunne optage hele den tilførte mængde fosfat, eller vil der normalt forblive en rest i jorden?

Ud fra de kemiske erfaringer om fosfat i jorden, må man indrømme, at overgang fra tilgængeligt til utilgængeligt fosfat er mulig. Dels kan uorganisk gødningsfosfat overføres i utilgængelige organiske forbindelser, og selv om dette må anses for ret unormalt (se side 560), så sker det antagelig alligevel ved stærk gødskning af fosfatfattig jord — flere forhold tyder på en sådan biologisk binding i et forsøg på Trinderup (D o r p h - P e t e r s e n 1953, endvidere W a r e et al. 1942). Endvidere er der mulighed for, at gødningsfosfat gennem adsorption og absorption efterhånden indlejres således i kolloider og partikler, at dets optagelseskoefficient bliver nær nul, og fosfatet dermed bliver nærmest utilgængeligt.

Gennem dyrkningsforsøg er det meget vanskeligt eller nærmest umuligt med fuld sikkerhed at fastslå, om al gødningsfosfat optages efterhånden, eller der normalt sker et vist »tab«, fordi fosfatet bliver utilgængeligt eller efterhånden får en meget lav optagelseskoefficient, »bliver tungere tilgængeligt«.

Det skal påpeges, at dette »tab« ved anvendelse af fosfatgødning omtales gang på gang i faglitteraturen, uden at det dog defineres, hvad der menes, eller at dette »tabs« normale tilstedeværelse dokumenteres. I reglen drejer det sig tilsyneladende om misforståelser af den normale lave optagelseskoefficient i første år, som jo ser meget »tabsgivende« ud, hvis man ser bort fra fosfatets mangeårige eftervirkning.

Ud fra sit kendskab til danske forsøg, er det forfatterens opfattelse, at i normale danske landbrugsjorder sker der intet eller ringe »tab« af vandopløseligt gødningsfosfat ved overgang til utilgængelige former, og at man derfor kan påregne total optagelse af tilført fosfat i sum af en lang (teoretisk uendelig) række afgrøder.

På den anden side kan man ikke benægte, at et sådant »tab« er muligt og uundgåeligt på fosfatfattige jorder. Endvidere vil ændring i flere af de forhold, der påvirker optagelseskoefficienten (især ændring af jordens reaktion i sur retning) kunne komme til at se ud som en overgang af tilgængeligt fosfat til utilgængeligt (se side 613).

Denne opfattelse — at der normalt ikke sker et »tab« af tilført fosfat — begrundes med følgende forsøgsresultater.

I en række forsøg på jorder med mere eller mindre fosfatmangel i afgrøderne er der i 1940—44 givet store mængder superfosfat — 2000—4000 kg pr. ha ad en gang (Iversen & Dorph-Petersen 1948, Dorph-Petersen 1953). I alle forsøgene har denne eengangsdosis givet tydelig virkning i 5—10 år (se side 598), og nedgangen i merudbyttets størrelse gennem årene er med en enkelt undtagelse (sukkerroer på Trinderup) ikke større, end den kan forklares ud fra afgrødernes optagelse af gødningsfosfat. Forholdet mellem merudbyttet af eengangsdosis på 2000 kg superfosfat pr. ha og årlig tilførsel af 200 kg superfosfat har været, som dette måtte ventes under forudsætning af, at fosfatet forbliver tilgængeligt og har en optagelseskoefficient på 0,1—0,2, idet den store eengangsdosis giver størst udbytte de første år, men »indhentes« af forsøgsleddet 200 kg superfosfat årlig i 4.—8. år, hvorefter sidstnævnte led giver størst udbytte (se side 597).

Mange lokale forsøg med sammenligning mellem 1000 kg superfosfat første år og 200 kg årlig viser, at i gennemsnit af 5 år giver disse to forsøgsled praktisk taget ens merudbytte (de provinsielle planteavlberetninger 1950—52). Dette må betyde, at der ikke er væsentlig forskel på superfosfatets optagelseskoefficient i de første 5 år.

Hvis der ikke sker en omlægning til utilgængeligt fosfat — eller optagelseskoefficienten stadig aftager — skulle en jord, der lige har tilgængeligt fosfat nok til at dække afgrødernes behov, kunne bibeholde denne tilstand, blot der tilføres ligeså meget fosfat i gødning, som der bortføres i afgrøderne.

Der foreligger resultater fra en række 16—24 årige forsøg, i hvilken man i staldgødning har givet samme mængde eller noget mindre fosfat, end afgrøderne kan beregnes at indeholde. Da der ikke er afgrødeanalyser i alle forsøg, er denne beregning kun nogenlunde. I flere af disse forsøg er der intet eller ringe merudbytte for superfosfat givet som tilskud til staldgødning, medens der uden staldgødning er tydeligt merudbytte for superfosfat. D. v. s. at jorden alene ikke kan dække afgrødernes fos-

fatbehov, men jord + staldgødning kan (Iversen 1943 og 1946 samt endnu ikke offentliggjorte beretninger om samme forsøg).

I de nu 60 år gamle forsøg på Askov Lermark tilføres der (1923—48) i forsøgsled »1 kunstgødning« gennemsnitlig 216 kg superfosfat pr. ha og efter 12 års afgrødeanalyser bortfører afgrøderne omtrent samme mængde fosfat (Iversen & Dorph-Petersen 1951). Af udbyttetallene er der intet, der tyder på, at denne »erstatningsdrift« har medført fosfatmangel — der høstes 4690 f. e. pr. ha i gens. af en 4-årig rotation. Da samme mængder kvælstof og kali, men uden superfosfat (prøvet fra 1935), i løbet af få år giver udbyttenedgang i forhold til »1 kunstgødning«, kan jordens fosfatindhold ikke alene opretholde udbyttet, hvorfor det indtil nu ikke aftagende udbytte på »1 kunstgødning« kan tages som udtryk for, at en årlig tilførsel af størrelsesorden som bortførselen kan vedligeholde jordens beholdning af tilgængeligt fosfat. Og dermed ses det indirekte, at der ikke her er sket et væsentligt »tab« af tilgængeligt fosfat ved overgang til utilgængeligt.

I flere af de andre langvarige forsøg — Askov Sandmark, Lyngby, Lundgaard, Tylstrup og Studsgaard — er der forsøgsled, hvor tilførsel og bortførsel af fosfat er nær ens, uden at det har medført tydelig fosfatmangel. Dog må bemærkes, at et par af disse jorder er tydelig fosfatrige — Askov Sandmark og Tylstrup.

Det skal indrømmes, at på dette særdeles vigtige punkt — total virkning af tilført gødningsfosfat eller fastlægning af en part deraf i utilgængelig form — giver vore forsøg ikke noget absolut sikkert svar, men forfatteren finder, at den totale virkning er overvejende sandsynlig og har kun set få forsøgsresultater, der tyder på et »tab« af tilført fosfat.

Det må tilføjes, at et »tab« af fosfat ved permanent fastlægning i utilgængelige former kun kan tænkes i fosfatfattige jorder, der gødes stærkt med fosfat og kan ikke være en normal foreteelse i alle jorder. Thi var det således, at blot een procent af det fosfat, der tilføres jorden i kunstgødning, staldgødning eller planterester, altid blev overført i absolut permanente utilgængelige former, så ville vi aldrig have haft mulighed for at konstatere det, for så ville alt fosfat være blevet utilgængeligt

for årmillioner siden og dermed al plantevækst på landjord ophørt.

Vel vidende, at der herved foretages en utilstødelig simplificering af komplicerede forhold, skal der her med nogle simple taleksempler vises, hvorledes den anvendte teori om fosfatets tilgængelighed vil virke rent regnemæssigt (tilsvarende anvendt af D o r p h - P e t e r s e n 1942).

Hvis afgrøderne hvert år har et behov på 100 enheder P og optagelseskoefficienten er 0,10, må den tilgængelige mængde fosfat i jorden hvert forår være 1000 enheder P, for at dette behov kan dækkes. Er der mindre, må hele den manglende mængde tilføres i gødning, og denne forøgelse af mængden af tilgængeligt fosfat kan ske ved en eengangsdosis af hele den manglende mængde, men sker også blot ved at tilføre en årlig mængde = det normale forbrug — her 100 enheder P. Dette ses nemmest ved at betragte opgødsningen af en jord, der er helt uden tilgængeligt fosfat. Med en årlig tilførsel på 100 enheder P og optagelseskoefficient 0,10 fås følgende — alt i P-enheder.

År	Tilførsel	Rest fra tidligere år	Ialt tilgængeligt	Optagelse
1.....	100	0	100	10
2.....	100	90	190	19
3.....	100	171	271	27
4.....	100	244	344	34
5.....	100	310	410	41
6.....	100	369	469	47
7.....	100	422	522	52
8.....	100	470	570	57
∞.....	100	900	1000	100

Havde afgrødernes behov været større end den årlige tilførsel, ville billedet blive det samme, men optagelsen nåede aldrig at dække behovet.

Med en tilførsel lig med eller mindre end forbruget, opnår man efter mange år (teoretisk uendelig mange), at mængden af tilgængeligt fosfat bliver = tilførsel : optagelseskoefficienten, og at optagelsen bliver konstant fra år til år.

Gøres den årlige tilførsel større end afgrødernes behov, får man følgende billede:

År	Tilførsel	Rest fra tidligere år	Ialt tilgængeligt	Optagelse behov = 100
1.....	200	0	200	20
2.....	200	180	380	38
3.....	200	342	542	54
4.....	200	488	688	69
5.....	200	619	819	82
6.....	200	737	937	94
7.....	200	843	1043	100
8.....	200	943	1143	100
∞.....	200	∞	∞	100

Her bliver optagelsen — bestemt af behovet — ret hurtigt konstant, medens mængden af tilgængeligt fosfat i jorden stadig stiger.

Når der tages hensyn til årsvariationen m. v. og man erindrer sig, at fosfatforbruget ved lavt udbyttensniveau ligger mellem indholdet i 100 og 200 kg superfosfat, kan udbytte-tallene for 100 og 200 kg superfosfat årlig i forsøget på Borris Nørrehede (se side 597) godt forklares ud fra ovenstående regneeksempler.

Med et forbrug på 100 enheder P og optagelseskoefficient på 0,1 vil en jord, der indeholder 1000 enheder P i tilgængelig form kunne dække afgrødernes behov, når der årlig tilføres 100 enheder P i gødning. Gives mindre end 100 enheder i gødning, vil optagelsen aftage med årene — stærkere jo større underskudet er. Dette ses af følgende eksempel:

	Optagelse ved årlig tilførsel, enheder P.					
	0	20	40	60	80	100
1. år.....	100	100	100	100	100	100
2. år.....	90	92	94	96	98	100
3. år.....	81	85	89	92	96	100
4. år.....	73	78	84	89	95	100
5. år.....	66	73	79	86	93	100
6. år.....	59	67	75	84	92	100
7. år.....	53	63	72	81	91	100
8. år.....	48	58	69	79	90	100
∞.....	0	0	0	0	0	100

Af dette og førstnævnte eksempel ses, at i et forsøg, hvor et forsøgsled gødes med 100 enheder P om året (= afgrødernes

forbrug), og et andet gødes med 1000 enheder første år og ikke senere, vil disse to forsøgsled have ens optagelse i 7. år. Dette kan jævnføres med forsøget på Borris Nørrehede, hvor forsøgsled 200 kg superfosfat årlig og leddet gødet med 2000 kg superfosfat i 1940 giver ens udbytte i 5.—7. år (se side 597).

Det ses endvidere, at hvor tilførslen udgør over 80 pct. af det normale forbrug, vil nedgangen i optagelsen være meget lille fra år til år. I praktiske forsøg, hvor så mange forhold spiller ind, vil det være vanskeligt at fastslå, om en gødning — f. eks. grundgødning med staldgødning — fuldt ud dækker bortførslen, eller om der ad åre kan opnås merudbytte for ekstra gødnings-tilskud f. eks. superfosfat. Hertil kommer, at i fald jorden oprindelig indeholder væsentlig mere tilgængeligt fosfat end svarende til forbrug : optagelseskoefficient — i regneeksemplet her mere end 1000 enheder P — vil der med underskudsdrift (tilførsel mindre end bortførsel) kunne gå mange år, inden den tilgængelige mængde er nedsat til 1000 enheder og nedgang i optagelsen og udbytte kan sætte ind. (Derfor er de side 603 dragne slutninger kun baseret på langvarige forsøg, hvor jorden uden fosfat-tilførsel gav tydelig fosfatmangel i afgrøderne).

Ved foranstående eksempler er der gået ud fra konstant behov i afgrøderne — 100 enheder P —, men ifald dette stiger i årenes løb, må tilførslen stige langt stærkere. Hvis man har en jord med 1000 enheder P i tilgængelig form, optagelseskoefficient 0,10, vil afgrøden kunne tage 100 enheder, og resten i jorden er 900 enheder. Ønsker man næste år at forøge afgrødernes størrelse og fosfatforbrug med 5 pct. til 105 enheder P, må der tilføres 150 enheder, idet $(900 + 150) \times 0,1 = 105$. D. v. s. ønsker man hvert år at øge avlen med 5 pct. må man hvert år tilføre 150 pct. af forrige års fosfatoptagelse — stadig under forudsætning af en optagelseskoefficient på 0,1.

Et andet forhold er, at de forskellige afgrøder ikke har samme behov for fosfat. I så fald vil det være bedst at tilføre hele den fosfatmængde, der skal anvendes i sædskiftet, til den mest forbrugende afgrøde. Dette vises af følgende regneeksempel, hvor der antages, at afgrøderne i en rotation har behovene 130, 90, 90 og 90 enheder P.

1. Hele fosfatmængden gives til mestforbrugende afgrøde.

År	Tilførsel	Rest fra tidligere år	Ialt tilgængeligt	Optagelse	Afgrødens behov
1.....	400	900	1300	130	130 Dækket
2.....	0	1170	1170	90	90 —
3.....	0	1080	1080	90	90 —
4.....	0	990	990	90	90 —
5.....	400	900	1300	130	130 —

2. Lige meget fosfat hver år.

1.....	100	900	1000	100	130 Udækket
2.....	100	900	1000	90	90 Dækket
3.....	100	910	1010	90	90 —
4.....	100	920	1020	90	90 —
5.....	100	930	1030	103	130 Udækket

I sidstnævnte tilfælde vil den mestforbrugende afgrøde have et udækket behov i mange år, og dette kan medføre udbytte-nedgang. Der findes et par forsøg på ikke-staldgødet jord, som antyder, at tilførsel af superfosfat til rodfrugt alene kan være en fordel (upublicerede data).

Gens. udbytte af 4-årigt sædskifte, hkg f. e.

	Uden supf.	200 kg supf. årlig	800 kg supf. til rodfrugt
Lundgaard 1935—50	28.7	33.3	33.8
Tylstrup 1935—50..	37.7	38.2	38.9

Hvor jorden indeholder mere tilgængeligt fosfat end den mestforbrugende afgrødes behov : optagelseskoefficienten (her over 1300 enheder) vil tilførsel af fosfat være overflødig eller tilførselstidspunktet uden betydning.

Som nævnt tidligere er disse regneeksempler for simplificerede, men de giver alligevel en oversigt over den rent skematiske virkning af et næringsstof som fosfat, hvor jorderne nødvendigvis må indeholde en tilgængelig mængde på 10—50 gange årsforbruget, da optagelseskoefficienten er lav — 0,02—0,10. Det er ofte en fordel at holde sig disse skematiske forhold for øje, når man skal bedømme forsøgsresultater.

3. Jordens fosfattilstand.

Som omtalt må man som teori antage, at planternes fosfatoptagelse er bestemt af jordens indhold af tilgængeligt fosfat og dettes optagelseskoefficient. Men kun i specielle forsøg — med mærket fosfat — kan man måle størrelsesordenen af disse to faktorer. I almindelige markforsøg kan man kun måle eller få et skøn over disse to faktorerers produkt — samt måle eller skønne over gødningens optagelseskoefficient. Det vil derfor være praktisk at anvende endnu et begreb, som dækker disse to faktorerers produkt og som har direkte tilknytning til forsøgsarbejde og praktisk gødskningsvejledning.

Ved en jords fosfattilstand forstås her jordens »evne« til at stille fosfat til afgrødernes rådighed eller bedre afgrødernes mulighed for at optage fosfat fra jorden. Planternes andel i processen må fremhæves, idet fosfattilstanden ikke kan betragtes som en egentlig »tilstand«, der er tilstede i jorden og eventuelt kunne måles ad kemisk vej, men derimod som et resultat af samspillet mellem de fysisk-kemiske forhold i jord og planter. Dette samspil er allerede nævnt side 592 og vil blive behandlet igen (se side 615). For anskuelighedens skyld er det holdt i baggrunden i de foregående »skematiserende« underafsnit.

(Betegnelsen »fosforsyretilstand« er tidligere anvendt på samme måde som »fosfattilstand« bruges her — bl. a. af Bondorff 1933, Land Jensen et al. 1947).

Bestemmelse af jordens fosfattilstand kan selvsagt kun ske gennem dyrkningsforsøg, og det samme gælder undersøgelse af de faktorer, der indvirker på fosfattilstanden.

Det må dog fremhæves meget stærkt, at fosfattilstanden er defineret som afgrødernes mulighed for fosfatoptagelse fra jorden og i forsøg, hvor denne mulighed kun udnyttes delvis, kan man ikke bedømme fosfattilstanden.

Dette illustreres med afrundede tal fra nogle forsøg i kårroer, som under gunstige vækstvilkår vil kunne give omkring 100 hkg tørstof pr. ha på de pågældende jorder.

Jord A, der giver lavt udbytte af grundgødet og stort merudbytte for superfosfat, har utvivlsom en særlig ringe fosfat-

Forsøg	Udbytte i kálroer, hkg tørstof pr. ha			
	A	B	C	D
0 superfosfat, grundgødet .	21	69	104	42
1000 — pr. ha.....	56	76	106	43
2000 — pr. ha.....	66	84	101	41

tilstand. I B er fosfattilstanden noget bedre, medens jord C med højt udbytte på grundgødet og intet eller usikkert merudbytte må siges at have tilfredsstillende fosfattilstand. På jord D er udbyttet uden superfosfat lavt, og der er intet merudbytte for fosfattilførsel. Her har en anden vækstfaktor end fosfat begrænset udbyttet (og fosfatoptagelsen), hvorfor fosfattilstanden må betegnes som ubestemt i dette forsøg. Det bemærkes, at på jord C kan forsøget kun vise, at fosfattilstanden er tilfredsstillende for vedkommende — normale — afgrødestørrelser, men forsøget kan ikke vise, om der også er fosfat nok til en langt større afgrøde. Som det vil fremgå heraf og af følgende afsnit er begrebet »en jords fosfattilstand« et særdeles relativt begreb og tilfredsstillende fosfattilstand betyder kun, at der er fosfat nok til i hvert fald »normal« eller »fuld« afgrøde d. v. s. at fosfattilførsel ikke øger udbyttet. Men hvad der i dag betragtes som en normal afgrødestørrelse, ville have været hen mod rekordavl for 50—60 år siden.

Bedømmelser af jorders fosfattilstand ud fra forsøg vil af mange grunde altid blive skønsmæssig, og derfor bør man kun sondre mellem ganske få grupper, hvor fosfattilstanden kan betegnes som »meget ringe«, »ringe«, »knap tilfredsstillende«, og »tilfredsstillende«, samt den særdeles vigtige gruppe med »ubestemt fosfattilstand«. Selvfølgelig kan der også anvendes få — 3—6 — talværdier herfor (L a n d J e n s e n et al. 1947).

4. Forhold, der påvirker planternes fosfatoptagelse og dermed jordens fosfattilstand.

Som nævnt flere gange må den her anvendte teori om jord- og gødningsfosfaternes virkemåde betragtes som stærkt forenklet og skematisk. Mange af de forhold, der belyses gennem mark- og karforsøg, tyder på en mere kompliceret virkemåde, men vil

alligevel kunne indordnes i det anvendte skema, når man antager, at mængden af tilgængeligt fosfat og især dets optagelseskoefficient lader sig påvirke af forskellige faktorer. De fleste forsøg, der har interesse i denne forbindelse, viser dog kun, at jordens fosfattilstand påvirkes af forskellige forhold, medens en nærmere udredning af disse forholds virkning på mængden af tilgængeligt fosfat eller optagelseskoefficienten må søges ad andre veje, ofte gennem kemiske undersøgelser af jorden.

a. *Jordtype*. De mange superfosfatforsøg, der gennemføres hvert år viser, at de forskellige jorders fosfattilstand er meget forskellig (se side 619). Dette kan dels skyldes variation i mængden af tilgængeligt fosfat, dels at optagelseskoefficienten er forskellig fra jord til jord.

Da de forskellige jorder har vidt forskelligt fosforindhold — såvel totalindhold som indhold af syreopløseligt, uorganisk fosfat — er det venteligt, at de også har forskelligt indhold af tilgængeligt fosfat.

Ud fra de i afsnit I omtalte undersøgelser over jordernes forskellige bindingsevne overfor fosfat, må man formode, at optagelseskoefficienten for såvel jordens indhold af tilgængeligt fosfat som for gødningsfosfat er meget varierende fra jordtype til jordtype. Det er dog vanskeligt at underbygge denne formodning med forsøgsresultater. I de forholdsvis få markforsøg, hvor fosfatgødningens optagelseskoefficient kan beregnes, ser man ud fra de enkelte års resultater i samme forsøg, at optagelseskoefficienten er meget påvirket af afgrødens art, vejrlig m. v., således at sammenligning fra jord til jord er umulig. I karforsøg, hvor disse forhold kan elimineres, er vist, at optagelseskoefficienten for vandopløseligt gødningsfosfat er væsentligt større (0,25—0,50) i rent sand end i jord, ligesom der er fundet forskel fra jord til jord (Mitscherlich 1940 og 1948, Opitz 1944).

Det skal dog tilføjes, at sammenligning mellem resultaterne af to serier danske superfosfatforsøg og bindingsevnen overfor fosfat (henholdsvis standardbinding og bindingsprocent) bestemt i de pågældende jorder ikke har ført til et klart resultat (Larsen 1945 og forfatterens upublicerede data). Det kunne ikke fastslås, at jorder, der ud fra merudbyttet for superfosfat

måtte skønnes at have relativ høj optagelseskoefficient, også altid havde lav bindingsevne overfor fosfat og omvendt.

b. Mængden af tilført, vandopløseligt fosfat. Ud fra bindingskurvens form må man vente, at optagelseskoefficienten stiger med stigende tilførsler af vandopløseligt fosfat, idet den ikke bundne del stiger stærkere end tilførslen. Forsøg med stigende mængder fosfatgødning viser dog det omvendte forhold (se side 596), men det kan skyldes, at planterne ikke udnytter optagelsesmulighederne fuldt ud.

Ud fra bindingskurvens form må man også vente, at i fald samme mængde fosfat bliver indblandet i henholdsvis een del og ti dele jord, vil planterne kunne optage mest fosfat der, hvor gødningen er indblandet i mindst jord. At dette virkelig er tilfældet, ses af mange kar- og markforsøg med ensidig placering af superfosfat, d. v. s. radsåning, spredning i smalle bånd, anvendelse af granuleret gødning og lignende. Således viser svenske markforsøg med sammenligning mellem radsåning og almindelig bredsåning af superfosfat en fordel for radsåning på fosfatfattige, stærkt fosfatbindende jorder (Frank 1948). Tilsvarende er fundet — om end med nogen variation — i flere engelske og amerikanske forsøg. Dog er denne fordel for radsåning ret ringe i de fleste danske forsøg, men det skyldes muligvis, at fosfatfattige, stærkt fosfatbindende jorder er sjældne (de provinsielle planteavlberetninger 1949—52). På tilsvarende måde har man i udlandet fundet en fordel ved anvendelse af granuleret superfosfat fremfor den almindelige pulveriserede vare (Frank 1948, Krügel et al. 1949).

Disse forsøg viser således, at stærk gødskning af en lille part af jordvolumet giver større fosfatoptagelse, end når samme fosfatmængde fordeles i hele pløjelaget. Dermed er vist, at optagelseskoefficienten stiger med stigende tilførsel og dermed også ved tiltagende mængder tilgængeligt fosfat i jorden.

c. Tidsmæssig ændring af tilført gødningsfosfat. Det er tidligere fremhævet, at selv om man kan regne med, at vandopløseligt gødningsfosfat simpelthen indgår i jordens fond af tilgængeligt fosfat, så har frisk tilført fosfat noget højere optagelseskoefficient end det øvrige tilgængelige fosfat.

Dette forhold er forståeligt ud fra de side 573 omtalte un-

dersøgelser over rystetidens indflydelse på fosfatets binding i jord.

I markforsøg kan forholdet vises ved at sammenligne superfosfat udstrøet længere eller kortere tid før afgrødernes såning — i markforsøg især som efterårs- og forårsudbringning. Så godt som alle forsøg viser lidt større virkning af superfosfat udbragt lige før såningen end af samme mængde udbragt tidligere (Beretning om Planteavlssarbejdet i Landboforeningerne i Jylland 1914, 1921 og 1936, Lee 1940, Iversen 1941, Maas & Bentley 1946, Lewis et al. 1950).

d. Jordens reaktions- og kalkforhold. Adskillige mark- og karforsøg har vist, at kalkning af sur jord forbedrer dens fosfattilstand, idet kalkningen øger udbyttet og fosfatoptagelsen (Salter & Barnes 1935, Franck 1937 og 1938, Davis & Brewer 1940, Albrecht & Smith 1940, Dunn 1943, Semb 1943, Bohne 1949, Paauw 1950, Gericke 1951, Tind-Christensen 1951, Dorph-Petersen 1953).

Dette kan demonstreres ved følgende resultater fra ikke-fosfatgødede forsøgsled i forsøg på let sandjord ved Jyndevad (Dorph-Petersen 1953).

	Afgrødernes fosfatindhold, kg P pr. ha			
Tilført kalk, tons pr. ha	0	4	8	12
Rt.....	5.0	5.9	6.7	7.2
Kålroer, rod + top.....	1.2	4.9	5.0	4.3
Rug, kærne + halm.....	4.0	5.5	6.4	6.6
Havre, do.....	4.9	6.9	7.8	8.0
Lupin, frø alene.....	9.6	9.7	9.8	9.0

Moderat kalkning — 4 og 8 t jordbrugskalk pr. ha — øger fosfatoptagelsen, dog forskelligt i de fire afgrøder (hvorved forholdet mellem afgrødernes optagelse ændres). Da der med undtagelse af lupin har været stort merudbytte for superfosfat på alle kalkningstrin (merudbyttet aftager dog ved kalkning), må optagelsen af fosfat uden superfosfattilførsel anses for den størst mulige, og derfor kan sluttes, at kalkning til jordens optimale Rt fremmer optagelsen.

Dette kan delvis skyldes, at kalkning bevirker en hur-

tigere mineralisering af de organiske fosforforbindelser, hvorved mængden af tilgængeligt fosfat øges.

Endvidere kan det skyldes ændring i optagelseskoefficienten ud fra følgende forklaring. Planternes CO_2 -produktion nedsætter jordens pH til omkring 4 umiddelbart omkring rodhårene (se side 592), hvorved fosfatet midlertidigt går i opløsning for senere at bindes (se side 577). Denne kortvarige opløsning af fosfat er langt større på kalkede jorder end på ukalkede, hvilket ses af følgende sammendrag. Ved interpolation på opløsningskurver for jord fra et kalkforsøg på forsøgsstationen ved Jyndevad bestemtes mængden af opløst fosfat ved pH 4 efter forskellig rystetid (D o r p h - P e t e r s e n 1953).

Kalkning	Jordens reaktion	Rystning i timer		
		1	24	60
Ukalket.....	4.8	1.1	0.6	0.4 p. p. m. P
4 t kalk	5.8	1.4	0.7	—
8 t —	6.5	2.5	1.1	—
12 t —	7.0	3.9	1.6	1.1 —

Kalkningens virkning på jordens fosfattilstand kan muligvis forklares alene ved denne ændring i fosfatets opløselighed.

Stærk kalkning — til Rt omkring 8 — hemmer sandsynligvis fosfatoptagelsen. Der foreligger ikke danske markforsøg, der viser dette sikkert, men flere forsøg på stærkt kalket lerjord på Lolland sandsynliggør det. I U.S.A., især i Arizona og Texas, har man kalkjorder, der efter analyser af jorden at dømme er fosfatrige, men afgrøderne mangler fosfat. Denne mangel kan ophæves ved at sætte Rt ned eller ved at tilføre organisk stof, der dog omsættes hurtigt, men giver stor CO_2 -udvikling i jorden. Problemet om disse kalkjorders fosfatforhold er behandlet i flere arbejder af M c G e o r g e og B r e a z e a l e, endvidere C h a p m a n 1936, F u l l e r & M c G e o r g e 1950 og 1951 og L o r e n z & J o h n s o n 1953.

Denne skadevirkning af stærkt kalkning må også ses i forbindelse med planternes CO_2 -udvikling. Hvis jorden indeholder betydelige mængder calciumkarbonat, kan den af rødderne udviklede CO_2 ikke nedsætte pH til under 6, som er betingelsen for, at calciumfosfaterne får en betydelig opløselighed, og at

den ovenfor omtalte midlertidige store opløselighed indtræffer — se fig. 5.

e. Vandopløseligt silikat. Mange karforsøg og enkelte markforsøg har vist, at tilførsel af kolloidal kiselsyre eller alkalisilikat kan forøge planternes vækst og fosfatoptagelse på fosfatfattig jord eller sand gødet med tungtopløselige fosfater. Dog er der i enkelte forsøg ingen virkning af silikat (L e m m e r m a n n et al. 1922, 1924, 1925 og 1928, A c h r o m e i k o 1934, B l a n c k et al. 1936 og 1938, K ü p p e r 1938, D e w a n & H u n t e r 1949).

Forklaringen på denne virkning er sandsynligvis, at silikatet gennem anionombytning øger fosfatkoncentrationen i jordvædsken og dermed det tilgængelige fosfats optagelseskoeficient.

f. Forskellige plantearter. På samme jord kan de forskellige plantearter optage vidt forskellige mængder fosfat, selv om alle arter lider af fosfatmangel. Som eksempel kan henvises til foranstående resultater fra forsøg på Jynde vad (side 613) og anføres følgende tal fra forsøg på sandjord ved Lundgaard (I v e r s e n & D o r p h - P e t e r s e n 1949).

	Udbytte, hkg f.e. pr. ha		Fosfat i afgrøderne, kg P pr. ha	
	NK	NPK	NK	NPK
Gødskning:				
Rug.....	25.5	34.0	6.2	8.5
Havre.....	16.3	23.3	5.7	7.8
Kålroer.....	25.8	54.3	13.0	29.7
Kartofler.....	67.9	81.0	10.9	14.2
Kløvergræs.....	11.5	13.6	3.5	4.5

Merudbyttet og meroptagelsen for superfosfat viser, at der har været fosfatmangel i alle afgrøder, således at optagelsen i forsøgsleddet gødet med kvælstof og kali (NK) må være nær maksimal, og alligevel er der stor forskel mellem plantearternes fosfatoptagelse. Bemærkelsesværdigt er det, at afgrødernes rækkefølge med hensyn til fosfatoptagelse ikke er ens på alle jorder — ses af ovenstående tal sammenlignet med resultaterne fra Jynde vad side 613. Normalt optager rodfrugterne mest fosfat, således som det er tilfældet ved Lundgaard, men på Jynde vad har

kålroerne den mindste optagelse. Dog er lupiner almindeligvis anerkendt som en afgrøde med speciel evne til at optage tilstrækkeligt fosfat selv på jorder, hvor andre afgrøder giver misvækst uden fosfattilførsel. Omtalte forhold, at plantearterne har vidt forskellig evne til at optage fosfat fra samme jord, er vist i flere mark- og karforsøg (Butkewitsch 1933, Opitz 1944, Iversen & Dorph-Petersen 1949 og 1951, Mitscherlich 1940, 1948, 1949, Lemmermann & Rauterberg 1949, Dorph-Petersen 1953).

Hvad der er årsagen til plantearternes forskellige fosfatoptagelse er ikke klarlagt, men der skal nævnes nogle muligheder. Forskellig voksetid, der dog ikke kan være eneste årsag, idet lupiner i forannævnte forsøg på Jyndevad havde større fosfatoptagelse end kålroer. Forskellig rodudvikling og dermed optagelse fra forskelligt jordvolumen. Almindelige erfaringer om arternes rodudvikling gør det dog ikke sandsynligt, at dette er hovedårsagen. Røddernes CO₂-udvikling og udsondring af organiske syrer kan være en medvirkende årsag til artsforskellen. Endvidere optagelsen af calcium, der ændrer jordvædsakens koncentration og dermed kan påvirke fosfatopløsningen. Desuden kan der være forskel i rodhårsvæggens fysiologiske forhold fra art til art. Man kan vist nok gå ud fra, at forskellen mellem plantearterne skyldes, at de alle — men i forskellig grad — indvirker på fosfatets opløsning i jorden og dermed på optagelseskoefficienten, medens indvirkning på mængden af tilgængeligt fosfat må anses for umulig.

Det må fremhæves, at denne artsforskel bevirker, at bedømmelsen af jordernes fosfattilstand ud fra markforsøg er stærkt afhængig af hvilke afgrøder, der har været i forsøgene. Egentlig burde man for hver jord angive en fosfattilstand for hver afgrøde, eller fosfattilstanden burde defineres som een bestemt afgrødes »bedømmelse« af jorden. Når der i følgende ikke anvendes noget sådant, er det ud fra den indstilling, at fosfattilstanden er et »praktisk betonet« meget relativt begreb. Hvor betegnelsen fosfattilstand anvendes her, er der underforstået, at den er bedømt i de almindelige landbrugsafgrøder — fortrinsvis korn, bede- og kålroer, og der er regnet med, at rodfrugt i reglen giver en »skarpere« bedømmelse end korn.

g. **Andre vækstfaktorer.** Det er tidligere nævnt, at de øvrige vækstfaktorerers konstellation indvirker stærkt på fosfatoptagelsen, selv om der i alle tilfælde er fosfatmangel. Dette ses for kvælstof og kaligødningens vedkommende af resultaterne fra forsøget på Lundgaard, anført side 590. At den dominerende vækstfaktor vand også indvirker på fosfatoptagelsen fremgår af karforsøg (Pfeiffer et al. 1919, Gericke 1949).

Også her må man søge forklaringen i planterøddernes aktive part i fosfatoptagelsen, således at de planter, der er velforsynede med kvælstof, kali og andre næringsstoffer, er bedre i stand til at skaffe sig fosfat end de, der lider af næringsstofmangel.

Det må dog bemærkes, at alle forhold, der påvirker jordens mikroflora — herunder kalkning, gødsning — også kan indvirke på planternes fosfatoptagelse bl. a. gennem mikrofloraens CO₂-udvikling.

5. Virkning af andre fosfatgødninger.

I foranstående afsnit er der kun omtalt virkningen af vandopløselige fosfatgødninger — oftest superfosfat. Derudover er der især grund til at beskæftige sig med vor vigtigste fosfatgødning, staldgødning, medens andre gødninger såsom råfosfat og forskellige glødningsfosfater — herunder thomasfosfat — kan behandles mere summarisk, da de næsten ikke anvendes her i landet. I staldgødning og halm findes hovedparten (70—80 pct.) af fosforforbindelserne i uorganisk form (Damsgaard-Sørensen 1946) og resten i organiske forbindelser, hvoraf en part antagelig mineraliseres hurtigt i jorden. Det er derfor forståeligt, når man i danske markforsøg finder meget nær samme optagelse fra fosfat tilført i henholdsvis staldgødning og superfosfat (Iversen 1942, Iversen & Dorph-Petersen 1949 og 1951). Som eksempel kan anføres optagelsen i 4 år fra staldgødning og superfosfat tilført første forsøgsafgrøde — ens mængde fosfat i 1 staldgødning og 1 kunstgødning.

Praktisk taget kan man derfor tillægge fosfor i staldgødning samme gødningsværdi som fosfat i superfosfat. Tilsvarende gælder antageligt for fosfor i rod, stub og grøngødning. Dog må det tilføjes, at forsøg med organiske fosforforbindelser isoleret

	Meroptagelse i pct. af tilførsel			
	$\frac{1}{2}$ staldg.	1 staldg.	$\frac{1}{2}$ kunstg.	1 kunstg.
1. år. Rodfrugt.....	14.2	12.2	14.4	11.4
2. — Byg.....	2.1	2.5	1.0	0.9
3. — Runkelroer.....	6.9	5.6	6.5	4.7
4. — Byg.....	0.8	0.8	0.2	0.3
Sum af 4 år.....	24.0	21.1	22.1	17.3

fra staldgødning og plantemateriale har vist, at disse forbindelser mineraliseres langsomt og har ringere gødningsvirkning i første år end superfosfat (Bertramson & Stephenson 1942, Kaila 1949 og 1950, Fuller & Dean 1949, McAuliffe et al. 1949, Fuller & Rogers 1952). Når denne ringere virkning af organiske fosforforbindelser ikke påvirker den samlede virkning af staldgødning kendeligt, skyldes det dels disse forbindelsers ringe andel i staldgødnings fosforindhold, og dels at fosfat fra superfosfat også optages meget langsomt.

Helt anderledes er forholdet mellem virkningen af superfosfat og råfosfat, idet få danske (Kristensen & Christensen 1913, Christensen 1923, Rasmussen 1949, Koføed 1950) og mange udenlandske forsøg viser, at råfosfat i kortvarige forsøg oftest giver væsentlig ringere virkning (merudbytte og meroptagelse) end samme mængde fosfat i superfosfat.

Dog er råfosfaternes virkning afhængig af en række forhold, hvoraf disse fosfaters fluoridindhold, deres kornstørrelse og jordens reaktion er de vigtigste. For sidstnævnte forhold gælder, at råfosfaternes virkning (i forhold til superfosfat), er bedre på sur jord end på neutral eller alkalisk jord.

Ved glødning af råfosfat og behandling med vanddamp eller soda kan fjernes en del af deres fluoridindhold, hvorved gødningsværdien øges (fluor fjernes også delvis ved fremstilling af superfosfat). Dette har bevirket, at der hist og her Verden over fremstilles en række forskellige glødningsfosfater — hvortil thomasfosfat, der er affaldsprodukt fra stålfremstillingen, kan henregnes. I disse glødningsfosfater er der intet eller kun lidt af fosfatet i vandopløselig form, og deres virkning er meget afhængig af deres kemiske sammensætning og derfor også af udgangsmaterialets art og fremstillingsmåden (Poulsen 1946).

Ferri- og aluminiumfosfater har i reglen lavere gødningsværdi end superfosfat, men disse fosfaters gødningsværdi afhænger også af deres fremstillingsmåde (P o u l s e n 1948 og 1950).

Endelig kan nævnes, at flere metafosfater er prøvede som gødning med godt resultat — ofte samme virkning pr. kg P som superfosfat, hvilket skyldes, at metafosfatet i jorden omsættes til ortofosfat inden optagelsen, og at planterne kan optage metafosfat.

III. Gødskning med fosfat i danske landbrug.

Hvor store mængder fosfatholdig kunstgødning, det kan betale sig at anvende, afhænger af jordens fosfattilstand, den anvendte driftsform — her især mængden af staldgødning — samt prisforholdet mellem afgrøde og kunstgødning.

1. Danske landbrugsjorders fosfattilstand.

Resultaterne af de mange superfosfatforsøg, der er udført her i landet, viser at merudbyttet for samme mængde superfosfat veksler overordentlig meget fra jord til jord, og en bedømmelse af jordernes fosfattilstand ud fra forsøgsresultater viser, at denne varierer særdeles meget.

Som eksempel herpå skal anføres et udpluk af 331 forsøg udført 1942—47 (L a n d J e n s e n et al. 1947).

Sted	Jord	Udbytte af grundgødet	Merudbytte for 1000 supf.	Fosfattilstand bedømt til
Stenderup.....	ler	28.4	30.3	klasse 1
Skærbæk.....	sand	37.7	13.0	— 2
Askov.....	ler	59.4	8.6	— 3
Horsens.....	ler	59.6	3.9	— 4
Ramsing.....	ler	68.9	1.8	— 5
Rønde.....	ler	80.5	0.5	— 6

Forsøgsgødningen, 1000 kg superfosfat pr. ha, er tilført i første år, og udbyttet er beregnet i hkg f. e. i gennemsnit af en roeafgrøde og to kornafgrøder. På grundlag af udbyttet på grundgødet og merudbyttet for 1000 kg superfosfat er jorderne inddelt i 6 klasser efter fosfattilstand, idet bedømmelsen for 27 forsøg

dog lyder på, at fosfattilstanden er ubestemt, d. v. s., at andre faktorer har begrænset udbyttet.

Tager man ekstremerne med, så varierer danske jorders fosfattilstand helt fra de overordentlige fattige hedejorder, der kun kan give en kummerlig afgrøde uden fosfattilførsel, til jorder, der i forsøg har givet 16—24 gode afgrøder uden nogen fosfattilførsel, og uden at fosfattilførsel har givet merudbytte noget år. Ud fra jordbundsanalyser — fosforsyretal, Ft, — kan det skøn-

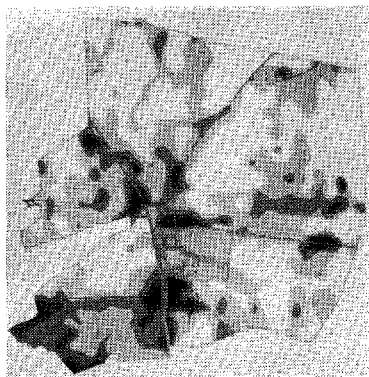


Fig. 9. Variationen i fosforsyretallene (salpetersyremetoden) indenfor een ejendoms jorder vist ved forskellig farve, således at de mørkeste partier har højest Ft. Tjele Hovedgaard. (Efter Damsgaard-Sørensen 1940 og 1946).

nes, at nogle jorder med Ft på 30—40 kunne give fuld avl i hundrede år uden nogen fosfattilførsel.

Det er dog ikke alene indenfor landets grænser, at jordernes fosfattilstand varierer stærkt, det samme gælder i nogen grad indenfor de enkelte ejendomme, ja, indenfor hver mark. Dette kan ses af de mange systematiske jordbundsundersøgelser, der er udført i den sidste halve snes år, og som ofte viser en stor variation i jordens fosforsyretal. Om fosforsyretallene, som mål for jordens fosfattilstand, må henvises til side 643. Resultatet af en sådan undersøgelse er vist i fig. 9 (Damsgaard-Sørensen 1940 og 1946).

Når denne variation i jordernes fosfattilstand er erkendt, rejser sig derefter spørgsmålet: Hvor store dele af landbrugsarealerne har for ringe fosfattilstand, og hvor store dele har tilfredsstillende fosfattilstand? Spørgsmålet lader sig ikke endelig besvare, men foreliggende forsøgsresultater og jordbundsundersøgelser giver et fingerpeg derom.

Her kan nævnes opgørelsen af forannævnte 331 forsøg med 1000 kg superfosfat som forsøgsgødning (Land Jensen et al. 1947). Her var fordelingen mellem forsøgene i de 6 klasser for fosfattilstand følgende:

Klasse 1	11 forsøg
— 2	43 —
— 3	50 —
— 4	104 —
— 5	66 —
— 6	30 —

Klasse 1 og 2, der indeholder 18 pct. af forsøgene, har særdeles ringe fosfattilstand, medens klasse 5 og 6, der betegner tilfredsstillende fosfattilstand, udgør 32 pct. af forsøgene. Dog tør man ikke gå ud fra, at samme fordeling gælder for alle landets jorder, idet mange af forsøgene sandsynligvis er anlagt på arealer, hvor man havde formodning om, at afgrøderne led af fosfatmangel.

Gennem jordbundsundersøgelser får man også en forestilling om landbrugsjordernes fosfattilstand. Et materiale på 104630 Ft-bestemmelser udført ved Statens Planteavlslaboratorium i 1949—50 viste, at disse jordprøver i gennemsnit havde Ft 4,7, og fordelingen var følgende:

Ft under 4	45 pct. af jorderne
Ft mellem 4 og 10	51 pct. af jorderne
Ft over 10	4 pct. af jorderne

Hvis man tør gå ud fra, at jorder med Ft 4—6 og derover har tilfredsstillende fosfattilstand, skulle dette være tilfældet på godt halvdelen af landbrugsjorderne. Dog er det ikke sikkert, at denne prøveudtagning er helt repræsentativ — tværtimod må det anses for sandsynligt, at fosfatfattige jorder er overrepræ-

senteret, idet der fortrinsvis foretages jordbundsundersøgelser på arealer, hvor afgrøderne lider af en eller anden mangel.

Opdelt efter amter udviser samme materiale en betydelig egnsvariation, idet Ft er væsentlig højere på øerne (Odense Amt Ft = 6,6) end i Vestjylland (Ribe Amt Ft = 2,6).

Hvad er så årsagen til denne store variation i jordernes fosfattilstand? Her kan nævnes tre muligheder. 1. Forskelligt oprindeligt (geologisk) indhold af total-fosfat og antagelig dermed også af tilgængeligt fosfat. 2. Forskellig fosfattilførsel. 3. De faktorer, der påvirker fosfattilstanden — her især jordernes bindingsevne og deres reaktionsforhold.

Utvivlsomt har de lerholdige, kalkrige morænelerjorder i landets østlige egne haft betydeligt større fosfatindhold inden opdyrkningen end de midt- og vestjydske sandjorder. Dette ses blandt andet af fosfatbestemmelser i undergrunden (1—2 m dybde), der blandt andet har vist, at enkelte ler- og mergelforekomster er særdeles fosfatrige, medens hedejorderne oftest er meget fattige (D o r p h - P e t e r s e n 1949). Dog må der regnes med, at maritime sandaflejringer kan være fosfatrige. For moser, kær og andre ferskvandsaflejringer gælder det, at deres fosfatindhold (totalindhold) helt er bestemt af deres dannelsesmåde. Ofte er sådanne jorder ret fosfatrige, og der forekommer kærjorder med vivianit og lignende fosforaflejringer (C h r i s t e n s e n et al. 1912).

Ligeså betydningsfuld som den geologiske forskel er tilførsel og bortførsel af fosfat gennem dyrkning og gødskning. Mange jorder med tilfredsstillende fosfattilstand er antagelig ret fosfatfattige fra naturens side, men fosfalet er tilført ved århundreders gødskning. Dette ses blandt andet af det forhold, at undergrunden under en fosfatrig jord kan være fosfatfattig, selv om over- og undergrunden er af tilsyneladende ens geologisk oprindelse. Systematiske jordbundsundersøgelser viser ofte, at fosforsyretallene er væsentlig højere omkring gamle gårde og landsbyer end i de fjernere marker (A r r h e n i u s 1931, 1934 og 1935). Dette kan skyldes, at man i århundredernes løb stadig har ført fosfat i afgrøder og dyr fra alle markerne og overdrevene hjem til gården, medens staldgødning og andet fosfatholdigt affald fortrinsvis er anvendt på de nærmeste arealer.

For denne langsomme fosfatophobning har dyrkningsalderen stor betydning. Dette kan ses ved at sammenligne fosforsyretal i arealer med forskellig dyrkningsalder indenfor samme område. En sådan undersøgelse i Skodborg sogn i Sønderjylland viste følgende: I arealer dyrket før udskiftningen havde 150 jordprøver (hver i 1—2 ha) i gennemsnit $F_t = 4,9$, medens F_t i 210 prøver fra jorder opdyrket siden 1791 var 2,7 (D o r p h - P e t e r s e n 1947). Det kan i denne forbindelse nævnes, at man har kunnet påvise tidligere bebyggelser og stenalderboplads

Udbytte i hkg tørstof pr. ha

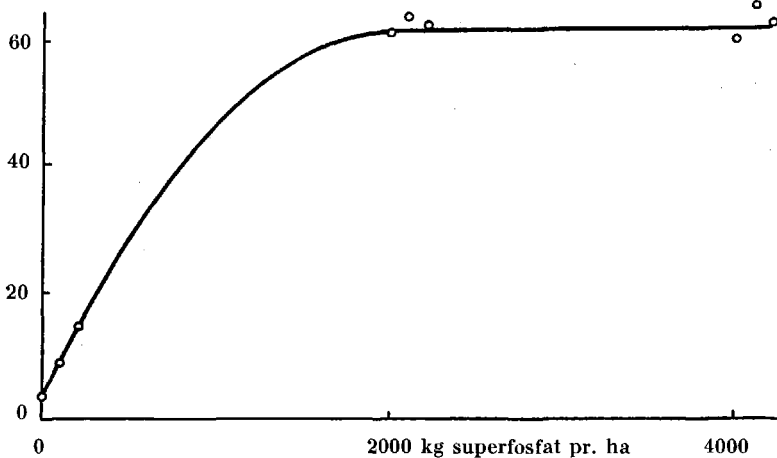


Fig. 10. Udbyttekurve for superfosfat i forsøg med kartofler på Borris Nørrehede 1940.

gennem fosfatanalyser i jorden. (A r r h e n i u s 1931, 1934, 1935 og 1938, C h r i s t e n s e n 1939).

Der er således muligheder nok til at give varierende fosfattilstand fra jord til jord, men når så denne variation er fastslået, kommer det næste spørgsmål: Har fosfattilstanden i jorden nogen praktisk betydning, i fald der i staldgødning og superfosfat tilføres jorden nogenlunde samme fosfatmængde, som afgrøderne bortfører?

Besvarelsen heraf kan fås af resultaterne af enårige forsøg med forskellige mængder superfosfat. I fig. 10 er således vist

tørstofudbyttet i kartofler for 0—4200 kg superfosfat i forsøg på Borris Nørrehede (Iversen & Dorph-Petersen 1948). Det ses heraf, at udbyttet stiger stærkt indtil tilførslen er 1600—2000 kg superfosfat — eller en tilførsel på 8—10 gange afgrødernes forbrug. For tilsvarende andre forsøg var resultaterne i første forsøgsår følgende:

Forsøgssted	Afgrøde	Udbytte i hkg pr. ha for kg superf.				
		0	100	200	2000	4000
Borris Nørrehede	Kartofler, tørst. i knolde.	3.5	8.4	14.3	60.4	59.7
—	Havre, kærne.	1.4	2.2	2.7	14.6	15.0
Lundgaard	Kålroer, roetørstof.	99.7	102.0	101.0	106.9	110.3
—	—	87.1	89.1	91.8	106.1	111.0
Askov	Runkelroer, roetørstof.	79.9	81.1	84.5	89.9	94.2
—	Byg, kærne.	38.7	40.7	41.6	45.6	48.5
Studsgaard	Kartofler, tørst. i knolde.	51.7	56.1	58.0	66.0	69.1

Lokale forsøg med 200 kg superfosfat årlig i 5 år kontra 1000 kg superfosfat givet 1. år viser i første afgrøde ofte stor udbyttetigning fra forsøgsleddet gødet med 200 kg superfosfat til forsøgsleddet gødet med 1000 kg superfosfat.

Heraf kan man drage den slutning, at på de fleste jorder med ringe fosfattilstand kan en tilførsel af størrelse som afgrødernes behov (200—300 kg superfosfat pr. ha) slet ikke sikre fuld afgrøde. Tværtimod skal der tilføres 8—10 gange afgrødens optagelse for at få fuld avl — men herved forbedres fosfattilstanden også, så næste år er betingelserne anderledes. Dette er i fuld overensstemmelse med den her anvendte teori om, at gødningsfosfat indgår i mængden af tilgængeligt fosfat og optagelsen deraf er langsom — optagelseskoefficienten kun 0,02—0,10. Som det fremgår af udbyttetallene fra Borris Nørrehede side 597 og kalgulen side 605, kan man ved årlig tilførsel af samme størrelse som afgrødernes forbrug efterhånden få ophobet så meget tilgængeligt fosfat i jorden, så optagelsen bliver lig med tilførslen. Men på jorder med meget ringe fosfattilstand er denne vej til opnåelse af tilfredsstillende fosfattilstand lang og medfører for små afgrøder i en lang årække. Som nævnt side 603 er det i adskillige forsøg vist, at på jorder med tilfredsstillende fosfattilstand kan man opretholde

denne og stadig høste fuld avl ved en fosfattilførsel, der er lig med afgrødernes bortførsel — »erstatningsdrift«. På særlig fosfatrige jorder er end ikke en sådan tilførsel nødvendig.

Man kan derfor fastslå, at jordens fosfattilstand har dominerende betydning for afgrødernes størrelse — for så vidt denne ikke begrænses af en anden vækstfaktor. Følgelig er det af største betydning for den enkelte landmand at kende sin jords fosfattilstand. Hvorledes dette opnås i praksis vil blive diskuteret i afsnit IV, medens der her gås direkte til det næste spørgsmål: Hvorledes kan man forbedre jordens fosfattilstand? Der er her to veje, som ofte bør anvendes samtidig. Man kan først og fremmest tilføre mere fosfat i staldgødning og kunstgødning, end afgrøderne fjerner — enten i een stor dosis eller ved at give et overskud hvert år.

Dertil kan man indvirke på de forhold, der påvirker fosfattilstanden ved at øge optagelseskoefficienten. Her bliver der først og fremmest tale om kalkning, for som omtalt side 613 kan kalkningen forbedre sure jorders fosfattilstand — antagelig ved både at øge mængden af tilgængeligt fosfat og dets optagelseskoefficient. Dog må det frarådes at kalke af hensyn til fosfattilstanden alene — man bør kalke således, at der opnås den reaktion, som erfaringsmæssigt er optimal for vedkommende jord og sædskifte.

En anden mulighed for at øge fosfatoptagelsen er placering af fosfatgødningen i en lille part af jordens volumen, ved hjælp af radsåning, anvendelse af kornet superfosfat eller lignende. Som omtalt side 612 vil en placering utvivlsomt kunne forbedre gødningsfosfatets optagelse og merudbytte på jorder med ringe fosfattilstand og stor fosfatbindingsevne. Dog vil jordbehandlingen — pløjning og harvning — forstyrre placeringen, således at det i reglen kun er første års virkning, der øges, medens resten af fosfatet forholder sig som bredsået. Derfor er det meget tvivlsomt, om en radsåning eller anden placeringsmåde kan anbefales under normale forhold, hvor landmanden kan vælge mellem køb af superfosfat eller udgiftérne til radsåning. Hvis man antager, at bredsået superfosfat har optagelseskoefficient 0,10 og radsået 0,20 første år og derpå 0,10, kan der opstilles en kalkule svarende til den side 605 viste.

Optagelse i fosfatenheder.

	Tilført 100 enheder årlig, bredsået	Tilført 100 enheder årlig, radsået	Bredsået 200 enheder første år, derefter 100
1. år.....	10	20	20
2. år.....	19	28	28
3. år.....	27	35	35
4. år.....	34	42	42
5. år.....	41	48	48
6. år.....	47	53	53

I de første år er der væsentlig forskel mellem 100 enheder bredsået og 100 enheder radsået, men som det ses af sidste kolonne, vil bredsåning med et ekstra tilskud af 100 enheder første år give samme optagelse som radsåning af 100 enheder årlig. Dette er selvfølgelig kun en kalkule, som desværre ikke kan underbygges med forsøgsresultater, men den viser dog problemstillingen. Både med bredsåning og radsåning opnår man en langsom forbedring af jordens fosfattilstand. Mon det så ikke var bedre at forøge denne ved een stor dosis fosfat, fremfor at anskaffe maskiner til radsåning?

En anden form for placering af superfosfat er at indblande dette i staldgødningen, enten i stalden eller når gødningen læsses på vogn til udkørsel (Åslander 1940, Franck 1946, Midgley & Dunklee 1945, Iversen & Dorph-Petersen 1952). Forsøg har vist, at på meget fosfatfattige og fosfatbindende jorder kan denne metode forøge virkningen af superfosfat noget, medens der på jorder med hen mod tilfredsstillende fosfattilstand ikke er nogen gevinst ved indblandingen (spørgsmålet om »konservering« af staldgødningens ammoniakkvælstof med superfosfat ses der i denne forbindelse bort fra).

Selv om det således ikke kan anbefales at ofre arbejde og andre udgifter for at opnå en gunstig placering af superfosfat i jorden, kan det på den anden side frarådes at forårsage en ugunstig ensidig fordeling af fosfatet ved at give superfosfat som overgødskning, især på græsmarker. Som omtalt side 588 kan man ved analyser af jorden vise, at superfosfat, der udstrøes på græsmarker, forbliver i det allerøverste jordlag, og man må antage, at optagelsen derfra er ringe. Enkelte forsøg har vist, at superfosfat, der nedførtes i en græsmark (i små huller), havde

større virkning end samme mængde givet som overgødning (M i d g l e y 1931). I stedet for at gøde græsmarker med superfosfat som overgødning må man hellere give en større mængde før udlæget. For gamle græsmarker kan det være et spørgsmål, om man ikke bør pløje dem op og lægge ud igen for at få fosfatet ned i jorden (F r a n c k 1938).

Ud over kalkning til optimal reaktion — der i alle tilfælde bør gennemføres — kan man kun anbefale at forbedre jordernes fosfattilstand gennem fosfattilførsel. Så godt som alle foreliggende forsøg viser, at jorder med ringe eller meget dårlig fosfattilstand kan bringes i tilfredsstillende tilstand med 2000—4000 kg superfosfat pr. ha. Det er muligt, at der findes jorder, hvor fosfatets optagelseskoefficient er så lille, at der skal væsentlig større mængder fosfat til at bibringe dem tilfredsstillende fosfattilstand, men sådanne tilfælde er endnu ikke fastslåede i danske forsøg. (Det kan tilføjes, at der ikke er iagttaget skadevirkning af indtil 6000 kg superfosfat pr. ha, når dette gives på nogen jord).

Det er således teknisk muligt på et eller få år at tilvejebringe tilfredsstillende fosfattilstand ved kalkning og gødskning. Den økonomiske side af sagen vil blive diskuteret senere, side 632 m. fl.

Tilbage er spørgsmålet om vedligeholdelse af en tilfredsstillende fosfattilstand. Som det er omtalt side 603 må man ud fra forsøgsresultater og kendskabet til fosfatets kemiske forhold i jorden gå ud fra, at mængden af tilgængeligt fosfat kan holdes konstant, når tilførsel i gødning er lig bortførsel i afgrøder. Sker der ikke nogen ændring i de forhold, som påvirker optagelseskoefficienten — især jordens reaktion — vil tilfredsstillende fosfattilstand kunne vedligeholdes ved erstatningsdrift, d. v. s. tilførsel af fosfat = bortførsel.

Det må her tilføjes, at tilfredsstillende fosfattilstand er et relativt begreb, der kun betyder, at jorden kan tilfredsstille afgrødernes behov i det foreliggende sædskifte ved en vis normal afgrødestørrelse, således at øget fosfattilførsel ikke giver udbytteforøgelse. Hvis man gennem ændring i sædskiftet, anvendelse af nye sorter og stammer, øget gødskning med kvælstof og kali eller andre kulturforanstaltninger hæver udbytteneiveauet,

kan en tilfredsstillende fosfattilstand blive for ringe. Derfor må man under stedse stigende udbyttestørrelser — som i 60—70 år har været det normale her i landet — tilføre mere fosfat end der bortføres, for at fosfattilstanden stadig kan være tilfredsstillende. Som nævnt side 607 må man med optagelseskoefficient 0,1 stadig tilføre 110 pct. af bortførslen, hvis afgrødestørrelsen skal stige med 1 pct. årlig.

Ved foranstående betragtninger om fosfattilstandens forbedring og vedligeholdelse er der gået ud fra normal jord med lav optagelseskoefficient. Men det må tilføjes, at der muligvis findes afvigende jorder her i landet. I rent sand, der ikke binder fosfat, er gødningsfosfatets optagelseskoefficient højere end i jord, og det samme må ventes at være tilfældet i jorder, som ved laboratorieundersøgelser har vist meget ringe bindingsevne. Nogle spredte undersøgelser over jordens bindingsevne har vist, at denne kan være meget ringe i nyopdyrkede jorder på hede-fladerne — men oftest høj i hedejord fra bakkeøerne (D o r p h - P e t e r s e n 1950 og ikke offentliggjorte data). Endvidere har enkelte forsøg på jyske sandjorder givet resultater — usædvanligt stort merudbytte for 200 kg superfosfat i forhold til merudbyttet for 1000 kg —, der tyder på ualmindelig høj optagelseskoefficient. Forholdet er endnu langt fra afklaret og undersøgelser deraf er ønskelige, men det må forudses, at man en dag kan fastslå, at på hede-fladerne skal der gødes med fosfat på en helt anden måde end på andre jorder, idet det på jord med lav bindingsevne ikke er nødvendigt at opgødske med store mængder fosfat — tværtimod må en sådan opgødskning frarådes på grund af faren for udvaskning af fosfat — side 587.

2. Fosfatets kredsløb i danske landbrug.

Stort kvæghold og opfodring af så godt som hele plante-produktionen er et karakteristisk træk for langt de fleste danske landbrug. Dette medfører, at ejendommens fosfatbeholdning stadig cirkulerer i et kredsløb med meget små tab undervejs.

De væsentligste tab af fosfat fra en ejendom sker gennem salg af planteprodukter — korn, halm, kartofler, sukkerroer og frø — og gennem animalske salgsprodukter, her især slagtedyr, idet hovedparten af sødmælkens fosfat vender tilbage gennem

skummetmælken. Dertil må regnes med små tab gennem udvaskning i mødding og mark (Iversen 1945, Iversen & Dorph-Petersen 1949). Tilførsler af fosfat til kredsløbet sker gennem indkøb af foderstoffer — oliekgager er fosfatrige — og især ved anvendelse af superfosfat eller anden fosfatgødning.

Resultaterne af forsøg i stald viser, at foderets fosforindhold fordeles på følgende måde (Iversen & Dorph-Petersen 1949):

	pct. af foderets fosforindhold	
	malkekøer	kvier
Foder.....	100	100
Gødning og ajle.....	73	92
Mælk.....	24	—
Tilvækst.....	3	8

Hvor skummetmælken tages hjem og benyttes som foder, kan man regne med, at over 90 pct. af foderets fosforindhold ender i møddingen.

Gennem statistikken over høsten, ind- og udførsel sammenregnet med det normale indhold af fosfat i de forskellige afgrøder, fodermidler og dyriske produkter, kan der opstilles en kalkule over landets fosfatomsætning. Som eksempel herpå skal indføjes en sådan beregning for 1934—38 (Dorph-Petersen 1944).

Afgrødernes bortførsel fra marken	Mill. kg P
Korn, kærne.....	11.4
— , halm.....	4.4
Rodfrugt, rod.....	8.7
— , top.....	1.3
Græs, grønfoder og hø.....	19.6
Ialt bortført fra marken.....	45.4
Tab og gevinst ved omsætningen	
+ import af korn og oliekgager....	10.0
+ indenlandske industriaffaldsfoder	1.3
÷ salg af planteprodukter.....	2.6
÷ salg af husdyrprodukter.....	6.1
÷ tab i mødding.....	2.6
Ialt tilført marken i staldg. og ajle.....	45.4

Her må indskydes, at der er en betydelig usikkerhed på de fleste af de anførte tal, og at der er sket nogen ændring i tallene

fra 1934—38 og til nu. Men trods al usikkerhed viser denne og lignende beregninger (Bondorff 1939 og 1941), at der i staldgødning og ajle tilføres marken næsten ligeså meget fosfat (85—100 pct.), som der bortføres fra marken i afgrøderne. Dertil kommer yderligere tilførslen i superfosfat, som i de senere år har været på 30—40 mill. kg P årlig. D. v. s. at man nu ialt opnår en tilførsel på 150—170 pct. af bortførslen, medens man i mellemkrigsårene regnede med 130—150 pct. af bortførslen og under verdenskrigene med 80—90 pct.

Nationaløkonomisk synes den nuværende overskudstilførsel at være for stor, men i betragtning af, at mange jorder har for ringe fosfattilstand og derfor kræver stor overskudstilførsel og endvidere, at udbytteneiveauet stiger stærkt, hvilket gør forøgelse af fosfattilstanden ønskelig for de fleste jorder, tør man ikke fraråde det nuværende store superfosfatforbrug. Kun må man stadig minde om, at forbruget bør lægges på de arealer, der har for ringe fosfattilstand — dog er dette et spørgsmål, som vore planteavlskonsulenter aldrig lader hvile, men stadig arbejder med gennem forsøg, jordbundsundersøgelser m. v.

For hver enkelt ejendom burde der opstilles en beregning over, hvor stor part af afgrødernes fosfatindehold, der føres tilbage til marken i staldgødning og deraf beregnes, hvormeget superfosfat, der skal suppleres med, for at opnå erstatningsdrift. For de fleste brug kan man dog nøjes med at anvende den af forstander Karsten Iversen opstillede tabel (Iversen 1951 m. fl.). I denne regnes der med, at en avl på 4500 f. e. i gennemsnit af et almindeligt 8-årigt sædskifte indeholder samme mængde fosfat som 200 kg superfosfat. Ved opfodring af hele avlen (+ skummetmælk) tabes der 15 pct. af fosfatet, som sælges i de dyriske produkter. Af resten, der hovedsageligt findes i staldgødningen, regnes med et opbevaringstab på 5 pct., hvorefter staldgødningen pr. ha årlig svarer til 162 kg superfosfat. Til opnåelse af erstatningsdrift kræves 38 kg superfosfat pr. ha årlig. Sælges hele avlen, bliver den til erstatningsdrift nødvendige superfosfatmængde derimod 200 kg pr. ha årlig.

Med forskellige afgrødestørrelser og forskelligt salg af planterprodukter kommer man til følgende erstatnings- eller vedligeholdelsesmængder i kg superfosfat pr. ha årlig:

Avlens størrelse	Hele avlen opfodres	$\frac{1}{2}$ af avlen sælges	Hele avlen sælges
3000 f.e.	26	80	133
4500 —	38	119	200
6000 —	51	195	266
7500 —	64	198	332

For de fleste landbrug, hvor der sælges lidt korn og enkelte andre planteprodukter, men indkøbes normal mængde foderstoffer, kan der regnes med tallene i første kolonne. Hvor der derimod sælges betydelige mængder korn, sukkerroer eller kartofler, må man benytte de i anden kolonne anførte superfosfatmængder, medens tredje kolonne angiver passende mængder for helt kvægløse landbrug.

Det må dog understreges, at der herved kun opnås balance mellem tilførsel og bortførsel af fosfat. Ønsker man at forbedre jordens fosfattilstand, enten fordi den er konstateret at være for ringe eller fordi man vil imødegå, at den bliver for lav ved stedse stigende afgrødestørrelser, bør superfosfatanvendelsen øges noget ud over de her anførte mængder.

Omvendt kan man på særlig fosfatrig jord anvende mindre fosfat end angivet — ofte kan man nøjes med staldgødningen alene.

Dog vil det sikkert være pædagogisk rigtigt, om lærere og konsulenter ved undervisning og planlægning af gødskning skelner mellem fosfattilførsel til vedligeholdelse af fosfattilstanden og tilførsel til forøgelse af denne.

Normalt anvendes staldgødningen 1—2 gange i sædskiftet fortrinsvis til rodfrugt. Almindeligvis vil det da være praktisk at give den til supplerende nødvendige mængde superfosfat i større doser en eller to gange i sædskiftet. Superfosfat bør fortrinsvis anvendes til ikke-staldgødede rodfrugter og udlægskorn, men aldrig til græsmarker. Ud fra de side 608 anførte betragtninger og forsøgsresultater, vil en sådan anvendelsesmetode også være den mest virkningsfulde.

Hvor der ikke anvendes staldgødning i alle marker, bør den efter foranstående tabel for hele ejendommen til vedligeholdelse beregnede mængde superfosfat fordeles således, at de marker, der ikke får staldgødning, tilføres mængder svarende til »hele

avlen sælges«, og de staldgødede marker deler resten. Tilførsel til forøgelse af fosfattilstanden beregnes efter hver marks individuelle forhold.

3. Økonomien ved gødskning med fosfat.

Betingelsen for rentabel gødningsanvendelse er, at det af gødningen frembragte merudbytte har større værdi end gødningen. Følgelig er den økonomiske grænse for gødskning, den gødningsmængde, hvorved den sidst tilførte enhed (f. eks. kg) netop frembringer et merudbytte af samme værdi som gødningsens pris — på grund af udbyttekurvens form vil den næste enhed gødning give mindre merudbytte og dermed være urentabel.

Hvor selvfølgelig disse forhold er, må man dog ikke ved beregninger over gødningsøkonomien glemme, at der selvsagt må regnes med hele det merudbytte, som den tilførte gødning frembringer i anvendelsesåret og følgende år. Ønsker man — for eenårige forsøg — kun at regne med første års merudbytte, må man som udgift kun regne med den part af gødningen, som denne ene afgrøde har brugt.

For nitratgødninger kan man stort set regne med enårig virkning og derfor beregne økonomien ud fra merudbyttet i anvendelsesåret. Modsat er tilfældet ved fosfatgødninger (og de fleste mikronæringsstoffer), hvor første års merudbytte skyldes en optagelse af 5—20 pct. af gødningen, og hvor der må regnes med en mangeårig virkning. Da man i almindelige forsøg hverken kan få oplysning om det totale merudbytte, som fosfat kan frembringe i en lang årrække, eller hvor stor part, der optages i første (eller få) år, er en direkte beregning af økonomien ved gødskning med fosfat ud fra forsøg nærmest umulig.

Fosfatgødningens økonomi kan dog belyses ad en anden vej. Når en jord er i tilfredsstillende fosfattilstand (eller ringere) vil den alt efter optagelseskoefficienten indeholde en tilgængelig fosfatmængde på 10—50 gange afgrødernes årsforbrug — som norm kan regnes 20 gange årsforbruget eller fosfat svarende til 4000 kg superfosfat pr. ha.

Når der hvert år tilføres samme fosfatmængde, som der

bortføres i afgrøderne, vil denne »fosfatkapital« ikke slides op, og derfor er udgifterne derved alene forrentning + nævnte vedligeholdelse. I normale landbrug vil 80—90 pct. af vedligeholdelsen ske gennem staldgødning og planterester, således at den direkte udgift til vedligeholdelsen er køb af superfosfat svarende til 10—20 pct. af afgrødernes fosfatindhold. Er mængden af tilgængeligt fosfat i jorden 10—50 gange afgrødernes årsforbrug og renten 3—5 pct. p. a., bliver renteudgiften 0,3—2,5 gange årsforbruget af fosfat. Som middel kan man regne med, at forrentning + vedligeholdelse vil andrage 2 gange årsforbruget eller prisen på 400 kg superfosfat pr. ha. årlig ved en avl på 4000—5000 f. e. pr. ha. Her i landet har man hidtil kunnet købe et kg superfosfat for prisen på $\frac{1}{2}$ -1 f.e. — oftest omkring $\frac{1}{2}$ f.e. D. v. s. at ernæringen af afgrøderne med fosfat (400 kg superfosfat = 200 f.e.) almindeligvis vil koste ca. 5 pct. af avlens værdi. Tages ekstremerne i mængden af tilgængeligt fosfat, forrentningsprocent og prisforhold med, bliver udgiften til fosfat fra 1 til 15 pct. af avlens værdi.

Man må her erindre sig fosfatets udbyttekurve, således som den bedst fremgår af resultaterne fra karforsøg i rent sand og markforsøg på stærkt udpint jord — se fig. 10. Denne udbyttekurve stiger så at sige retlinet for derefter at bøje skarpt om til vandret og først ved meget store fosfatmængder går den ned ad igen.

Med en for praksis tilladelig simplificering kan man derfor hævde, at gødsning med fosfat kun koster ca. 5 pct. af avlens værdi, sålænge som fosfattilstanden ikke er helt tilfredsstillende, det vil sige sålænge yderligere fosfattilførsel øger udbyttet, koster den fosfatgødning, der frembringer merudbyttet, kun 5 pct. af merudbyttets pris. Ved fortolkning af forsøgsresultater må man derfor regne med, at superfosfatanvendelse er rentabel, blot den giver merudbytte.

Den praktiske regel, der kan udledes heraf, må blive, at det er økonomisk forsvarligt at gøde med fosfat, således at fosfattilstanden hurtigst muligt bliver tilfredsstillende og derefter vedligeholdes.

Det vil selvsagt være praktisk umuligt at holde netop den

grænse, hvor fosfattilstanden lige er tilfredsstillende, det vil sige at yderligere tilførsel ikke hæver udbyttet, medens mindre tilførsel end vedligeholdelsesmængden nedsætter udbyttet ad åre. Da en gødskning med mindre fosfat end denne ideelle plan medfører risiko for alvorlig udbyttenedgang på grund af udbyttekurvens form, må man hellere gøde lidt stærkere end påkrævet. Den for meget anvendte fosfatgødning er at betragte som en unødvendig investering, hvis virkelige årlige udgift kun er forrentningen. Hvor man har stadig stigende udbyttensniveau, der kræver stigende fosfattilstand i jorden, betyder en lidt for stærk gødskning kun, at investeringen foretages nogle år før den er nødvendig.

Gødskning med fosfat kan ske efter følgende hovedregler:

1. Jordens fosfattilstand undersøges — herom handler afsnit IV.
2. Om fornødent opgødes til tilfredsstillende fosfattilstand samtidig med, at fosfattilstanden forbedres gennem kalkning til optimal reaktion.
3. Der overholdes erstatningsdrift med fosfat.
4. Hvor udbyttensniveauet er stedse stigende, og fosfattilstanden ikke er væsentlig over »tilfredsstillende« tilføres noget mere fosfat end til vedligeholdelse, det vil sige end nødvendigt til erstatningsdrift.
5. Fosfattilstanden undersøges fra tid til anden, hvert 8—12 år.

IV. Bestemmelse af landbrugsjorders fosfattilstand.

Som det fremgår af foregående afsnit, er det af primær betydning at kende en jords fosfattilstand for at kunne gøde den rationelt med fosfat. Og den store variation i fosfattilstanden selv indenfor en ejendom gør detaillere bestemmelse ønskelig.

Det vigtigste forhold med hensyn til kendskabet til fosfattilstanden er at vide, om denne er tilfredsstillende, det vil sige om fosfattilførsel kan øge afgrødens størrelse. Det må dog understreges, at der er tale om et relativt begreb, idet der ved tilfredsstillende fosfattilstand kun forstås, at jorden kan dække afgrødernes behov ved det udbyttensniveau, som de øvrige vækst-

faktorer muliggør. Kunne jordernes fosfattilstand udtrykkes i absolut mål — talværdier — måtte man vente tilfredsstillende fosfattilstand ved et lavere tal i Midt- og Vestjyllands tørre sandjorder, der kun yder 2000—3000 f.e. pr. ha, end i stærkt drevne lerjorder med en årsproduktion på 6000—7000 f.e.

For jorder med en fosfattilstand, der er ringere end tilfredsstillende, har det dog også betydning at vide, hvor meget ringere den er, for derigennem at kunne vurdere, hvor store tilførsler, der er nødvendige for at undgå misvækst eller til at forbedre fosfattilstanden op til tilfredsstillende.

Der skal i det følgende gives en meget kortfattet omtale af de foreliggende muligheder for at bestemme en jords fosfattilstand, idet hovedvægten lægges på de metoder, der anvendes her i landet.

1. Almindelige iagttagelser og mangelsymptomer.

Foruden egentlige bestemmelser af jordens fosfattilstand kan et solidt kendskab til en jord give gode muligheder for at skønne over dens fosfattilstand. Det må her fremhæves, at en jord, der år efter år giver store, veludviklede og sunde afgrøder, i hvert fald har tilfredsstillende fosfattilstand — muligvis mere end det, men dette kan ikke ses direkte. Endvidere kan nævnes, at gammel »byjord« oftest er velforsynet med fosfat, medens jord, der kun har været dyrket i 30—50 år, ofte har for ringe fosfattilstand. Nyopdyrket hedejord har så godt som altid utilfredsstillende fosfattilstand, og det samme gælder arealer, der ligger langt fra ejendommen såsom vedvarende græsgang. Endvidere kan man regne med, at jorden på ejendomme med stor besætning i reglen har bedre fosfattilstand end på store gårde med lille besætning og stort kornsalg.

Desværre giver fosfatmangel ikke noget letkendeligt symptom på planterne, selv om udbyttet nedsættes kendeligt af mangelen. Der findes ganske vist beskrivelser af fosfat-mangelsymptomer på adskillige afgrøder, men fælles for dem alle er, at de er vanskelige at fastslå med sikkerhed, før mangel har medført stor udbyttenedgang eller misvækst. Deres værdi som gødnings-

vejledning kan derfor næppe undervurderes. Om mangelsymptomer må henvises til specielle værker, f. eks. »Hunger signs in crops« og »Diagnostic techniques for soils and crops«. (Sidstnævnte indeholder også en omtale af de fleste i dette afsnit omtalte problemer).

Det er foreslået, at man — i lighed med anvendelsen af »kalktrangsplanter« — brugte ukrudsfloraen som indikator for jordens fosfattilstand (Petersen 1946). Dog giver de foreliggende data ikke nogen mulighed for ad denne vej at foretage en blot nogenlunde skarp sondring mellem jorder med utilfredsstillende og tilfredsstillende fosfattilstand.

2. Markforsøg.

På grund af fosfatets lave optagelseskoefficient må man i enårige forsøg, der skal tjene til bedømmelse af jordens fosfattilstand, anvende mindst 500 kg superfosfat som prøvegødning. Mindre tilskud vil selv på fosfatfattig jord ikke kunne give så stort merudbytte, at dette kan måles sikkert. (Se forsøget på Borris Nørrehede side 597). Da sådanne forsøg helst også skal vise, hvor meget udbyttet kan sættes op ved anvendelse af superfosfat, bør der prøves op til 2000 kg superfosfat pr. ha. Den bedste forsøgsplan er antagelig et 3-leddet forsøg med 0, 1000 og 2000 kg superfosfat pr. ha og 6 fællesparceller i dobbeltkvadrat.

Et velgennemført markforsøg med 500—2000 kg superfosfat pr. ha som prøvegødning kan give det bedst mulige grundlag for bedømmelse af jordens fosfattilstand. Dog må det bemærkes, at kendelsen »tilfredsstillende fosfattilstand« kun kan afgives, hvis udbyttet på grundgødet kan betegnes som fuld avl på vedkommende jord, og dersom 500—1000 kg superfosfat giver intet eller usikkert merudbytte. Tilsvarende kan diagnosen »fosfatmangel« eller for »ringe fosfattilstand« kun stilles, hvor udbyttet på grundgødet er under »normalt«, og der er sikkert merudbytte for superfosfat (se side 610).

Da rodfrugterne — kål- og bederoer — er de afgrøder, der fordrer de største fosfatmængder, vil det være rigtigst at udføre forsøg til prøvning af fosfattilstanden heri. Er fosfattilstanden tilfredsstillende i rodfrugt, kan man slutte, at den også vil være

det i korn og kløvergræs, thi de flerårige forsøg viser altid større merudbytte i rodfrugt end i andre afgrøder (Iversen 1943 og 1946, Land Jensen et al. 1947).

På jorder med utilfredsstillende fosfattilstand vil merudbytets størrelse give nogen oplysning om, hvor ringe fosfattilstanden er og i forsøg med stigende mængder superfosfat (f. eks. 1000 og 2000 kg), kan man skønne over, hvormeget superfosfat, der skal tilføres, for at fosfattilstanden kan blive tilfredsstillende.

Det er en uimodsigelig kendsgerning, at markforsøget giver det bedste og mest direkte svar på spørgsmålet, om superfosfat giver merudbytte, d. v. s. om jordens fosfattilstand er tilfredsstillende. Men alligevel er der så mange forhold, der gør markforsøget uegnet som almen metode til bestemmelse af jordernes fosfattilstand. Der må her nævnes følgende. Markforsøg er en langsom målemetode, da resultatet tidligst kan foreligge efter en vækstsæson. Dertil kommer, at mange forsøg går tabt ved fejl eller skader, og mange er uegnede til deres formål på grund af plantesygdomme, skadedyr og tørke, som begrænser udbyttets størrelse, så fosfattilstanden forbliver »ubestemt«. Endvidere er markforsøg en dyr metode, og med de nuværende forhold er det kun et meget begrænset antal, der kan udføres årlig. Reelt gælder forsøgets resultater kun for selve forsøgsarealet, og da forsøgsresultaterne selvsagt skal anvendes på et 100—1000 gange så stort areal (der udføres et fosfatforsøg pr. ca. 3000 ha) indføres der her en meget alvorlig fejlkilde eller vilkårlighed. Sidst, men ikke mindst, er markforsøg et alt for groft måleinstrument. For at et merudbytte kan erkendes som sikkert, må det være 6—10 pct. af det samlede udbytte (alt efter antal af forsøgsled og fællesparceller m. v.). Men er fosfattilstanden blot så ringe, at en forbedring deraf kan hæve udbyttet 6—10 pct., så har denne været rentabel for år tilbage.

Det er forfatterens opfattelse, at markforsøg ikke har nogen interesse som selvstændig undersøgelsesmetode af jordens fosfattilstand. Derimod bør der til stadighed udføres markforsøg til verification af resultaterne af kemiske jordbundsundersøgelser, men forsøgene bør da planlægges med dette formål for øje (se side 645).

3. Iagttagelsesstriber.

Selv om mangelsymptomer for fosfat ikke har nogen selvstændig betydning, så kan man dog anvende planternes synlige reaktion overfor fosfat til vurdering af jordens fosfattilstand i de tilfælde, hvor man kan sammenligne væksten på stærkt fosfatgødede parceller med den øvrige mark. Dette kan lettest opnås ved tværs over agrene at anlægge såkaldte iagttagelsesstriber, det vil sige 2—3 m brede (gødningssprederens bredde) striber gødet med ca. 1000 kg superfosfat pr. ha. Ved ringe eller meget ringe fosfattilstand kan man i de fleste afgrøder se en tydelig bedre vækst i striberne end udenfor (I v e r s e n 1950 m. fl.).

I fald fosfattilstanden er helt eller næsten tilfredsstillende, vil væksten i striberne ikke adskille sig tydeligt fra den øvrige mark, men så kan man benytte skridningstidspunktet i byg som indikator. Efter forfatterens iagttagelser i forsøg bliver skridningen i byg forsinket en dag eller to af selv ret svag fosfatmangel, medens stærk mangel udskyder skridningen op til 10 dage. Som eksempel anføres følgende fra et 10 år gammelt forsøg på forsøgsstationen ved Askov 1952.

Gødskning	Udbytte, hkg kærne pr. ha	Skridningen	
		begyndt	afsl.
a. Ingen staldgødning, 0 kg supf.	26.6	27/6	10/7
b. — — — 200 - - årlig.....	35.0	21/6	5/7
c. 30 t stg. til roer, 0 kg supf.	35.5	21/6	5/7
d. 30 t - - - 200 - - årlig.....	41.0	17/6	30/6

Hvis man ikke kan se nogen forskel mellem skridningen i iagttagelsesstriberne og den øvrige mark, betyder dette i reglen, at fosfattilstanden er tilfredsstillende, dog kan vejrforholdene være så gunstige, at selv stærk fosfatmangel ikke hæmmer skridningen væsentlig.

4. Jordbundsanalyser.

I det sidste halve århundrede er der verden over gjort talrige forsøg på gennem kemiske og biologiske laboratorieundersøgelser af små jordprøver at vejlede landmændene i rationel anvendelse af fosfatgødning på de pågældende jorder. De fleste af disse forsøg er vel nok forblevet som forslag, men der er

mange metoder — især kemiske — som nu i stedse stigende omfang anvendes i det praktiske vejledningsarbejde.

Om selve teknikken ved laboratorieundersøgelserne kan oplyses følgende:

Biologiske metoder. Fælles for alle biologiske metoder er anvendelsen af væksten af højere planter eller mikroorganismer som mål for jordens fosfattilstand, idet der i laboratorieformat udføres dyrkningsforsøg, ofte med såvel fosfatgødede som ikke-fosfatgødede forsøgsled. Idet der iøvrigt henvises til en ret omfattende beskrivelse af *Vandecaveye* i »Diagnostic techniques for soils and crops« skal nævnes nogle få biologiske jordbundsundersøgelsesmetoder, hvoraf de to førstnævnte har været anvendt en del i Tyskland.

Mitscherlich's metode er regulære karforsøg omfattende forsøgsled med og uden fosfat (samtidig også med og uden kali). Afrøden er havre til modenhed, og analysen varer således en sommer (Mitscherlich 1924 og 1930). Modifikationer af metoden er udarbejdet af Stephenson & Schuster 1941 og Borden 1946.

Neubauers kimplantemetode anvender fosfatindholdet i rugkimplanter, der under bestemte vækstbetingelser har vokset 17 dage i en blanding af jord og sand, som mål for vedkommende jords fosfattilstand (Neubauer & Schneider 1923). Modifikationer er foreslået af blandt andet Thornton 1935. Der findes en omfattende litteratur om disse to metoder, ligesom Mitscherlich og Neubauers dyrkningsteknik har fundet stor anvendelse ved undersøgelser af plantefysiologiske spørgsmål m. v. De ofte udmærkede resultater heraf må dog ikke godskrives metodikkens anvendelighed som jordbundsundersøgelsesmetode.

Da mange mikroorganismer er særdeles følsomme overfor fosfatmangel (Bondorff 1918), har man udarbejdet biologiske jordbundsundersøgelser med bakterier eller svampe som »forsøgsafgrøde«. Således har Sackett & Stewart 1931 på grundlag af et arbejde af Winogradsky udarbejdet den såkaldte jordplademetode med *Azotobacter* som forsøgsplante. Metoden er bearbejdet og beskrevet af Petersen 1933. På tilsvarende måde har Mehlich et al. 1934 udarbejdet en metode, hvor svampen *Cunninghamella* dyrkes direkte på jorden som indikatorplante.

Ved disse metoder bedømmes mikroorganismernes vækst alene ved skøn eller måling af koloniernes størrelse. I modsætning hertil bestemmer man i en af N i k l a s et al. 1930 m. fl. udarbejdet metode vægten af svampen *Aspergillus niger*, der dyrkes i en fosfatfri næringsopløsning tilsat lidt af den undersøgte jord. Denne metode er blandt andet anvendt af J e n s e n 1953.

Disse biologiske metoder synes mere »naturlige« end de i følgende omtalte kemiske metoder, men når man betænker de i laboratorierne kunstige vækstvilkår, er det usikkert, om planter, dyrkede under sådanne forhold, er bedre indikatorer for jordens fosfattilstand end en rent kemisk analyse. Derfor må resultaterne af biologiske jordbundsanalyser verificeres i forhold til markforsøg, før de anvendes til almindelig vejledning.

K e m i s k e m e t o d e r, hvoraf der findes foreslået et utal, udføres så godt som alle efter følgende princip.

En tørret og sigtet jordprøve af passende størrelse tilsættes en fastsat mængde ekstraktionsmiddel, og efter bestemt tids rystning eller henstand filtreres jorden, og der bestemmes fosfat i filtratet, og dette fosfatindhold bruges, eventuelt efter omregning, som mål for jordens fosfattilstand (eller indhold af tilgængeligt fosfat).

Det vil fremgå af afsnit I, at den mængde fosfat, man får opløst på denne måde, især er afhængig af jord-vædske-systemets pH, koncentration af andre ioner, specielt calcium, og dertil påvirkes resultaterne også af forholdet jord:vædske, rystetid m. v. Med den her anvendte terminologi er disse metoder kun bestemmelser af et mer eller mindre veldifineret punkt på opløsningskurven.

Af de foreslåede ekstraktionsmidler kan nævnes følgende: Vand, kulsyre-mættet vand, fortyndede organiske syrer i bestemt mængde, der bibringer jord-vædske-systemet en reaktion på 2—5, men ikke fikseret — afhængig af jordens reaktion og stødpude. Således er citronsyre foreslået af D y e r allerede i 1894 og anvendt i adskillige jordbundsanalysemetoder siden. Ligeledes er eddikesyre anvendt af flere forskere.

Da fosfatets opløselighed er stærkt afhængig af pH, anvendes der ofte stødpudeblandinger med pH 3—5 som ekstraktions-

middel. I lighed hermed anvender Bondorff & Steenbjerg 1932 salpetersyre til fikseret $\text{pH} = 2,5$.

I en del metoder anvendes 0,2—0,5 n syre, der giver ekstraktion ved pH under 1, f. eks. Bondorff 1950 og 1952. Endvidere er foreslået NaOH-opløsning eller alkaliske saltopløsninger, calciumkloridopløsning, behandling med vand og fast natriumzeolit, samt elektrolyse.

Her i landet er anvendt følgende tre analysemetoder:

Fosforsyretal, Ft, efter salpetersyremetoden udarbejdet af Bondorff & Steenbjerg 1932. Fosforsyretallet angiver, hvor mange mg PO_4 , der går i opløsning, når 40 g jord rystes i 3 timer med en liter fortyndet salpetersyre, således at slutreaktionen = 2,50. En enhed i Ft svarer til 20,4 kg P pr. ha i 20 cm dybde, 2500 t jord. Den fikserede slutreaktion opnås ved at behandle 2—3 jordprøver med lidt forskellige mængder salpetersyre, hvorved opnås pH mellem 2 og 3, hvorpå der udfra pH og fosfatmængde i disse 2—3 bestemmelser interpoleres til fosfat opløst ved $\text{pH} = 2,5$. Metoden har været anvendt på Statens Planteavls-Laboratorium indtil 1. juni 1948.

Fosforsyretal, Ft, efter svovlsyremetoden beskrevet af Bondorff 1950, og anvendt på Statens Planteavls-Laboratorium siden 1. juni 1948. Ved analysen bestemmes den mængde fosfat, der opløses, når 10 g jord rystes i 2 timer med 250 ml 0,2 n svovlsyre, og resultatet omregnes i Ft-enheder = 200 kg P_2O_5 pr. ha (2500 t) = 87,4 kg P.

Mobiliserbar fosfatsyre udtrykt ved fosfattallet, (Mogensen 1938, Møller & Mogensen 1951) anvendes på Hedeselskabets laboratorium. Fosfattallet udtrykker den mængde fosfat — mg PO_4 pr. liter, der går i opløsning, når 10 g jord rystes i 6 timer med 250 ml vand og 10 g natriumzeolit.

Selv om det ikke nævnes i publikationerne, må det skønnes, at de fleste analysemetoder tilsigter at bestemme jordens fosfattilstand og at man derfor ønsker, at metoden er følsom overfor de faktorer, der ændrer fosfattilstanden gennem påvirkning af optagelseskoefficienten — her især jordens reaktion. Derimod kan analysemetoder, der anvender syre til pH under 1 (f. eks.

Ft efter svovlsyremetoden), kun tænkes at give et udtryk for den tilgængelige mængde fosfat.

Betingelsen for at biologiske og kemiske jordbundsundersøgelser kan anvendes som praktisk vejledning for gødskning med fosfat er, at de ved jordbundsundersøgelsen fundne talværdier (for jordens fosfatindhold opløst under de givne betingelser) har relation til enten jordernes fosfattilstand eller jordernes indhold af tilgængeligt fosfat.

Det må erindres, at jordens fosfattilstand er en relativ størrelse, der kun kan angives skønmæssigt ud fra resultaterne af markforsøg og følgelig kan der ikke drages en eksakt sammenligning mellem jordernes fosfattilstand (selv om den angives i talværdier), og resultater af kemiske undersøgelser af samme jorder. For jordernes mængde af tilgængeligt fosfat gælder tilsvarende, idet størrelsen deraf kun kan skimtes ud fra resultater af almindelige fosfatforsøg og kun bestemmes med nogen begrænsning i karforsøg med mærket fosfat.

Ved de sammenligninger, der hidtil er foretaget mellem markforsøg og jordbundsanalyser, har man benyttet en eller flere af følgende sammenligninger på resultaterne fra en serie forsøg: 1. analysetal contra merudbyttet for en bestemt mængde superfosfat; 2. analysetal contra udbytte på ikke-fosfatgødet jord; 3. analysetal contra relativt merudbytte, det vil sige merudbytte i pct. af udbyttet på grundgødet. For alle tre sammenligninger gælder det, at selv om analysetallene fejlfrit udtrykker jordernes fosfattilstand eller deres indhold af tilgængeligt fosfat, vil disse relationer ikke blive entydige, fordi såvel udbyttet uden fosfat som merudbyttet for fosfat også påvirkes af alle de øvrige vækstfaktorer (Dorph-Petersen 1943 og 1948). Det er kort sagt forfatterens opfattelse, at det er umuligt at angive en eksakt metode til sammenligning mellem resultater af jordbundsanalyser og dyrkningsforsøg i samme jorder. Man kan ved sammenligning af forsøgsresultater og jordbundsanalyser højest nå et skøn over vedkommende analysemetodes brugbarhed, og derfor er vurdering af flere analysemetoders indbyrdes værdi meget problematisk.

Om afprøvning eller verification med markforsøg af de her

i landet anvendte tre jordbundsanalyser for fosfat kan resumeres følgende:

Ft efter salpetersyre metoden er i flere forsøgs-serier sammenlignet med merudbyttet for bestemt superfosfat-tilskud (Bondorff 1933, Bondorff & Damsgaard-Sørensen 1942, Iversen 1950) og der er fundet, at merudbyttet gennemsnitlig er størst ved lave fosforsyretal og aftager med stigende Ft-værdier i jorden, men at »spredningen« i merudbyttetallene er stor ved alle Ft-værdier. Man kan heraf slutte, at i mange af jorderne (men utvivlsomt ikke i alle) er Ft udtryk for jordernes fosfattilstand.

Tilsvarende sandsynliggøres ud fra det forhold, at tiltagende Ft-værdier i en række jorder følges af tiltagende gennemsnitligt udbytte på grundgødet (Iversen 1950).

For en serie på 331 forsøg med 0 og 1000 kg superfosfat pr. ha i 2 eller flere år, er jordernes fosfattilstand bedømt med tallene 1—6 ud fra forsøgsresultaterne — se side 619 (Land Jensen et al. 1947). Der blev her fundet god overensstemmelse mellem Ft og fosfattilstandens værdi, selv om nogle forsøg (kalkholdige jorder og nogle østjydske lerjorder) viste tydelige afvigelser.

Der er i flere forsøg vist, at Ft tiltager ved tilførsel af superfosfat, men også i lige så høj grad ved tilførsel af råfosfat. Sidstnævnte må betragtes som en fejl, når metoden skal måle jordens fosfattilstand, der forbedres mere ved tilførsel af superfosfat end ved samme mængde fosfat i råfosfat (Iversen & Dorph-Petersen 1948, Iversen 1950).

I kalkforsøg tiltager Ft med stigende reaktion, hvilket må anses for en fordel, da fosfattilstanden forbedres ved kalkning af sur jord (Dorph-Petersen 1947 og 1953).

Når der tages forbehold for humusjorder, kalkjorder og nogle østjydske lerjorder, hvor fosforsyretallene ligger på et andet niveau end for de øvrige jorder, kan man betragte Ft efter salpetersyremetoden som et brugbart udtryk for jordernes fosfattilstand.

Der foreligger endvidere undersøgelser over usikkerheden ved prøveudtagningen i marken (Dorph-Petersen 1943, Bundgaard et al. 1944) samt over fosforsyretallets variation

året igennem (Kristensen & Steenbjerg 1947, Dorph-Petersen 1950).

Mobiliserbar fosforsyre, fosfattal, er sammenlignet med Ft-salpetersyremetoden af Bondorff & Damsgaard-Sørensen 1942 og med flere andre metoder af Iversen 1950. For så vidt man ud fra markforsøg kan sammenligne jordbundsanalyser efter forskellige metoder, må man skønne, at fosfattallet er et lige så godt udtryk for jordens fosfattilstand, som de øvrige prøvede analysetal.

Ft efter svovlsyremetoden, må betragtes som et udtryk for jordens indhold af tilgængeligt fosfat, og afprøvning af analysemetoden bør indrettes herefter. I første omgang er denne metode alene verificeret ud fra korrelationen mellem Ft efter salpetersyremetoden og Ft efter svovlsyremetoden i 3410 tilfældigt valgte jordprøver (Bondorff 1950). Endvidere er Ft efter svovlsyremetoden (kaldet St) sammenlignet med resultaterne af 119 forskelligartede danske, norske og svenske markforsøg (Iversen 1950). Da man kun kan få et ret vagt begreb om jordens indhold af tilgængeligt fosfat ud fra forsøgsresultaterne, kan man af sidstnævnte sammenligning kun drage den slutning, at Ft efter svovlsyremetoden kan være et mål for jordernes tilgængelige fosfat, men forsøgsserien er for kort og uensartet til endelig bedømmelse.

Samme sted er vist, at Ft efter svovlsyremetoden stiger ret ens ved tilførsel af samme mængde fosfat i super- og råfosfat, hvilket en analyse, der skal udtrykke mængden af tilgængeligt fosfat, også bør.

Kalkning ændrer kun lidt på Ft efter svovlsyremetoden, og dette er i sin orden, hvis kalkningens forbedring af fosfattilstanden hovedsagelig er en forøgelse af optagelseskoefficienten. Endvidere foreligger der undersøgelser over analysenøjagtigheden (Henriksen 1952).

Som helhed må siges, at der endnu mangler en del forsøgsarbejde, inden man kan fastslå, om dette Ft er et udtryk for jordens tilgængelige fosfat. Derimod ville en samlet opgørelse af de siden 1948 udførte forsøg antagelig kunne vise, om dette Ft er brugbart som praktisk vejledning, men her har konsulenternes erfaringer sikkert allerede afbødet savnet af mere omfattende opgørelse.

Ved anvendelsen af Ft — hvorved der nu menes fosforsyre-tal efter svovlsyremetoden — må man holde sig for øje, at dette fosforsyre-tal sandsynligvis udtrykker mængden af tilgængeligt fosfat, og derfor vil to jorder med ens Ft kun reagere ens som fosfatkilde for planterne, hvis alle forhold, der påvirker optagelseskoefficienten, er så godt som ens — det vil sige især jordtype og reaktion. Derfor bør en verification af Ft begynde med fastsættelse af »grænsetal« indenfor ret små områder med samme jordtype. De grænsetal, der bør stiles mod, er i første linie det Ft, hvorover jordens fosfattilstand er tilfredsstillende, og endvidere bør man fastlægge det Ft, hvorunder der må regnes med misvækst uden fosfattilførsel, men sidstnævnte er mere usikkert defineret.

Til verification kan bedst anvendes gode markforsøg (med 0, 1000 evt. 2000 kg superfosfat pr. ha) på ikke-staldgødede jorder med så forskellige Ft-værdier, som findes indenfor pågældende jordtypeområde. Endvidere kan iagttagelse af afgrøderne på alle arealer, hvori der er bestemt Ft, tjene til underbyggelse af de grænsetal, der er fremgået af forsøgene.

Det må forudses, at disse grænsetal ikke bliver helt ens for alle jordtyper, og at jordens reaktion også må tages i betragtning ved anvendelse af Ft i gødskningsvejledningen. Det er fosfatterens opfattelse, at de fleste planteavlskonsulenter har ret god erfaring for, hvor højt Ft skal være, for at fosfattilstanden er tilfredsstillende på de jordtyper, som de arbejder med. Ud fra sit kendskab til de senere års forsøgsarbejde (hvor der foreligger Ft efter svovlsyremetoden) mener forfatteren at kunne skønne, at jorder med Ft over 4—6 har tilfredsstillende fosfattilstand, medens der ved lavere Ft oftest opnås merudbytte for superfosfat, og under Ft 1,5—2 lider så godt som alle afgrøder af alvorlig fosfatmangel. Derfor må man, indtil bedre verification forefindes, regne med, at jorder med Ft under 4 har for ringe fosfattilstand (muligvis også nogle jorder med Ft 4—6). Som det fremgår af afsnit III er det forfatterens opfattelse, at alle jorder bør bringes i tilfredsstillende fosfattilstand, og dette vil igen sige, at i hvert fald de jorder, der har Ft under 4, bør tilføres så meget fosfat ekstra (ud over den normale vedligeholdelsesmængde til at erstatte afgrødernes bortførsel), at Ft hæves til ca. 4. Da en

Ft-enhed er 200 kg P_2O_5 pr. ha (20 cm pløjelag), skal der teoretisk set tilføres ca. 1200 kg superfosfat for at hæve Ft med en enhed, men i praksis ofte 1600—1800 kg.

For jorder med Ft 4—6 bør man i hvert fald overholde erstatningsdrift — det vil sige lige så stor tilførsel af fosfat som bortførelsen i afgrøderne (se side 630) og et lille overskud i tilførselen kan anbefales. Kun ved væsentlig højere Ft tør man tilråde at anvende mindre fosfatgødning.

Selvfølgeelig kan der nemt fremdrages forsøgsresultater, der viser, at disse simple regler er forkerte på vedkommende jord. Dette kan skyldes, at denne jordtype reelt har andre grænseværdier — hvilket som nævnt foran må forudses at kunne forekomme. Men det kan også skyldes usikkerhed ved forsøgene. Her skal blot påpeges det velkendte forhold, at man i flerårige forsøg kan få meget forskellig bedømmelse af jordens fosfattilstand ved at betragte de enkelte års resultater hver for sig.

Desværre er der vel ikke noget emne indenfor dansk planteavl, der har været så omdiskuteret i de sidste 20 år som netop anvendeligheden eller værdien af fosforsyretallene, og denne diskussion har næppe bragt større klarhed over problemet eller ført til dets løsning. Forfatteren skal her kun fremføre det synspunkt, at man ikke med nogen rimelighed kan opstille spørgsmålet, hvorvidt markforsøg eller jordbundsanalyser giver den bedste vejledning i fosfatgødskning, thi for de fleste landmænd er mulighederne kun: jordbundsanalyser eller ingenting, og set ud derfra, er jordbundsanalyserne værdifulde, blot de er bedre end ingenting.

5. Planteanalyser.

Når man vil bestemme en jords fosfattilstand, er det en naturlig tanke at undersøge de på jorden voksende kulturplanter for derfra at afgøre, om disse planter har manglet fosfat eller ikke. Der foreligger også mange arbejder om planteanalyser til bestemmelse af jordens fosfattilstand eller tilgangen af andre plantenæringsstoffer, men ingen af de foreslåede metoder har vundet nogen praktisk anvendelse.

De ældre arbejder i dette spørgsmål omfatter bestemmelse af det totale fosfatindhold i hele planter eller store dele deraf

— kærne og halm i korn, rod og top i rodfrugt — men der fremkom ikke metoder til bestemmelse af fosfattilstanden som resultat heraf (Hall 1905, Hartwell et al. 1917, Pfeiffer et al. 1919, Münter 1919, Alway et al. 1926). Da adskillige af disse undersøgelser viste, at fosfatindholdet var mindre varierende i frø, roer og rodknolde end i stængel og blade, har senere arbejder med diagnostiske analysemetoder i reglen omfattet de vegetative organer. Især har bladanalyser været anbefalet som grundlag for næringsmangeldiagnose (Lundegårdh 1934, 1938, 1939, 1941, 1945 og 1951. Thomas et al. 1938 og 1945, Chapman 1941, Chubb & Atkinson 1948).

Andre undersøgelser har taget sigte på at anvende plante-saften som næringsstofindikator (Gilbert & Hardin 1927, McCool & Weldon 1928, Pettinger 1931, Pierre & Pohlman 1933, Pohlman 1935).

Ud fra undersøgelser, der viste, at planternes (særlig bladene) indhold af uorganisk fosfat var langt mere påvirkeligt af fosfatgødskning end det totale fosfatindhold, er der udarbejdet diagnostiske metoder bygget på bestemmelse af letopløseligt fosfat i grønne blade (Chapman 1935, Thornton et al. 1939, Scarseth 1943). Se endvidere »Diagnostic techniques for soils and crops«.

For samtlige foreslåede analysemetoder gælder det, at man må have nøje kendskab til det pågældende planteorgans fosfatindhold ved forskellig fosfattilførsel og ved forskellig konstellation af de øvrige vækstfaktorer, for at kunne slutte fra analyseresultater til jordens fosfattilstand eller blot at kunne afgøre, om planterne har lidt af fosfatmangel. Men de fleste af de foreslåede diagnostiske analysemetoder bygger ikke på et så stort forsøgsmateriale, at man med nogenlunde sikkerhed kan anvende dem — og de er heller ikke blevet anvendt (se Steenbjerg 1945).

V. Oversigt.

Enhver plante skal optage fosfor for at leve og vokse. Da fosfor normalt kun optages som (orto)fosfat fra jorden, bliver fosfatets forhold i jorden, samt planternes evne til at optage

fosfat fra jorden, det teoretiske grundlag for vejledning i gødskning med fosfat.

Med store variationer indeholder dansk agerjord gennemsnitlig 0,04 pct. P svarende til 1000 kg P pr. ha i et 20 cm pløjelag. Denne fosformængde findes i såvel uorganiske om organiske forbindelser oftest med omkring halvdelen i hver gruppe. De organiske fosforforbindelser — hovedsagelig proteinstoffer og fy-tater — udgør en bestanddel af jordens humusindhold, det vil sige dødt organisk stof, der til stadighed undergår en meget langsom nedbrydning eller mineralisering. At nedbrydningen af organiske fosforforbindelser er meget langsom, ses deraf, at en årlig tilførsel på 1—5 kg P i organiske forbindelser i staldgødning og planterester kan vedligeholde en humusmængde med 400—500 kg P pr. ha. Flere kulturforanstaltninger — især kalkning — kan forøge mineraliseringshastigheden og dermed nedsætte jordens indhold af organiske fosforforbindelser noget.

De uorganiske fosforforbindelser omfatter en lille part i form for apartitkrystaller eller lignende, der er indlejret i silikater i sten, grus og mindre uforvitrede partikler, men da dette fosfat blotlægges uendeligt langsomt ved forvitring, kan man fra et planteavlssynspunkt se helt bort derfra.

De øvrige uorganiske fosforforbindelser kan indordnes i følgende grupper. 1. Tungtopløselige fosfater af jern, aluminium og calcium, der er udfældet på jordens partikler. Hvilket af disse fosfater, der dannes i en jord, afhænger hovedsagelig af jordens reaktion, da de fleste jorder indeholder mere end nok af de nævnte kationer til at udfælde den tilstedeværende fosfatmængde. I sure jorder (Rt under 6) dannes der hovedsagelig ferri- og aluminiumfosfater, medens calciumfosfater (hydroxylapatit) er dominerende i neutrale og alkaliske jorder. 2. Fosfat bundet adsorptivt til eller absorptivt i jordkolloiderne. Sidstnævnte er at opfatte som kæmpemolekyler med såvel syre- som baseegenskaber og kan derfor adsorbere såvel kat- som anioner. Anionbindingen, herunder bindingen af fosfat, forekommer dog især i sur jord. Muligvis kan fosfatet også indgå i — absorberes i — selve kolloidet, ligesom nogle fosfater har kolloidal natur. 3. Fosfat opløst i jordvædsken — som fosfationer — udgør i reglen under 1 mg P pr. kg vædske, således at der selv med et vandindhold på

1000 t pr. ha (= 100 mm nedbør) er opløst mindre end 1 kg P pr. ha.

Fosfatet i de her nævnte tre grupper (absorptivt bundet måske undtaget) danner et ligevægtssystem således, at der frigøres, opløses fosfat fra den faste fase, når der — f. eks. af planterne — fjernes fosfat fra jordvædsken. Omvendt vil en tilførsel af fosfat til jordvædsken i form af vandopløseligt gødningsfosfat (superfosfat) bevirke en vandring af fosfat ind i den faste fase — dette betegnes her som fosfatbinding. I mange jorder er det en stor part af fosfatindholdet — op til halvdelen — der deltager i dette ligevægtssystem, men alligevel er det kun en yderst ringe part deraf, der findes i jordvædsken. Ved store ændringer i jordvædskens fosfatkoncentration — ved gødskning med superfosfat — forløber bevægelsen i ligevægtssystemet, her bindingen, ret hurtigt, men hastigheden aftager, og det varer meget længe, før ligevægten er helt genoprettet. Der er en grænse for, hvor meget fosfat en jord kan binde, men det er i almindelighed meget store mængder. For pløjelaget svarer den maksimale binding til 10—400 t superfosfat pr. ha. Også jord, der giver fosfat nok til afgrøderne, kan binde store mængder fosfat.

Systemets ligevægtstilstand og dermed koncentrationen af fosfat i jordvædsken er afhængig af en række faktorer. Af disse er mængden af fosfat i systemet, jordens art (ler eller sand), dens indhold af jern-, aluminium- og calciumforbindelser, og systemets reaktion de vigtigste.

På grund af jordvædskens lave fosfatindhold sker der kun meget små bevægelser i jordskorpens fosfatforbindelser, og tab af fosfat fra jorden med dræn- eller grundvand er meget lille i almindelige jorder — oftest under 1 kg P pr. ha årlig.

Planterne optager fosfat fra jordvædsken, hvorved ligevægten mellem fosfat i jord og jordvædske forstyrres, og der opløses fosfat. Afgørende for planternes fosfatoptagelse er dog, at de ved deres livsprocesser indvirker på ligevægtstilstanden for fosfatets fordeling i jord-vædske-systemet. Planterødderne udskiller CO_2 , der nedsætter reaktionen lige om rødderne, og herved forøges fosfatkoncentrationen i jordvædsken. Muligvis udskiller rødderne også organiske syrer, der virker på samme måde. Endvidere kan planternes optagelse af calciumioner fra jordvædsken bevirke højere fosfatkoncentration deri. 41

De her omtalte forhold, der er sammendraget af mange kemiske undersøgelser af jord samt af plantefysiologiske forsøg, falder godt sammen med følgende hovedresultater af kar- og markforsøg. Man må ud fra sådanne forsøg antage, at normal agerjord indeholder en tilgængelig fosfatmængde, der er 10—50 gange så stor som afgrødernes årlige forbrug, men at optagelsen herfra er så langsom, at hver afgrøde kun kan få en lille brøkdelen deraf — denne kaldes optagelseskoefficienten — og er af størrelsesordenen 0,02—0,10. På grund af denne lille optagelseskoefficient er det nødvendigt, at jorden indeholder nævnte fosfatmængde på 10—50 gange årsforbruget for at få fuld avl derpå, og forsøg har vist, at meget fosfattige jorder skal tilføres 2—4 tons superfosfat for at nå op på fuldt udbytte, trods afgrødernes fosfatindhold kun svarer til 200 kg superfosfat, det vil sige, at man må tilføre 10—20 gange årsforbruget. Det må endvidere antages, at vandopløseligt fosfatgødning simpelthen indgår i jordens fond af tilgængeligt fosfat og virker som dette, det vil sige med en lille brøkdelen optaget hver år, men virkning i mange år — dog har frisk tilført fosfat lidt højere optagelseskoefficient end det øvrige tilgængelige fosfat.

I normale jorder sker der kun ringe overgang fra tilgængeligt til utilgængeligt fosfat (der omfatter organiske fosforforbindelser samt silikatbundet fosfat), og da tabet af fosfat ved udvaskning er ubetydeligt, sker der kun afgang af tilgængeligt fosfat gennem fjernelse af afgrøder. Det må derfor antages, at en jords fond af tilgængeligt fosfat kan vedligeholdes ved at tilføre ligeså meget fosfat i gødning, som der fjernes i afgrøderne, og flere langvarige forsøg har sandsynliggjort denne antagelse.

Til denne rent skematiske fremstilling, der siger, at planternes fosfatoptagelse er bestemt af jordens indhold af tilgængeligt fosfat og dets optagelseskoefficient, må dog tilføjes oplysninger om et par andre forhold. Optagelseskoefficientens størrelse er antagelig bestemt af jordtypen, ligesom jordens reaktion også har indvirkning herpå, idet kalkning af sur jord forbedrer planternes mulighed for fosfatoptagelse, antagelig fordi optagelseskoefficienten øges. Dertil kommer, at kalkning forøger mineraliseringen af de organiske fosforforbindelser og derved øger mængden af tilgængeligt fosfat.

Endvidere er optagelseskoefficienten påvirket af planterne, således at forskellige plantearter optager vidt forskellige mængder fosfat fra samme jord, og for samme art er optagelsen afhængig af gødskningen med de øvrige næringsstoffer samt af de andre vækstfaktorerers tilstand.

Ved undervisning og vejledningsarbejde vil det være praktisk at anvende eet begreb om jorden som fosfatkilde for planterne fremfor at operere med de to størrelser: tilgængeligt fosfat og dets optagelseskoefficient. Der kan passende anvendes begrebet jordens fosfattilstand, hvorved forstås jordens evne til at stille fosfat til planternes rådighed, eller rigtigere afgrødernes mulighed for at optage fosfat fra jorden. Når man ser bort fra plantearternes forskellige evne til at optage fosfat fra samme jord og tager fosfattilstanden som et praktisk betonet begreb, der er udtryk for de almindelige landbrugsafgrøders gennemsnitlige mulighed for fosfatoptagelse, kan man ud fra almindelige markforsøg med superfosfat skønne sig til jordens fosfattilstand (derimod kan man ikke bedømme mængden af tilgængeligt fosfat eller dets optagelseskoefficient ud fra almindelige forsøg — derfor anvendelsen af begrebet fosfattilstand). I forsøg, hvor grundgødet (uden superfosfat) giver lavt udbytte og superfosfat (1000—2000 kg pr. ha) giver stort merudbytte, må jordens fosfattilstand betegnes som ringe eller dårlig (eventuelt meget ringe). Hvor der derimod er fuld afgrøde på grundgødet og intet merudbytte for superfosfat, kan fosfattilstanden bedømmes som tilfredsstillende. Forsøg, der giver lavt udbytte af grundgødet og intet eller ringe merudbytte for superfosfat, kan ikke tjene til at bedømme fosfattilstanden, idet det da har været en anden vækstfaktor, der har begrænset udbyttet.

For den enkelte landmand har det især interesse at få konstateret, om jordens fosfattilstand er tilfredsstillende, det vil sige, om jorden uden fosfatgødskning kan give fuld afgrøde, og at tilskud af superfosfat ikke giver merudbytte.

Med de normale prisforhold vil det altid kunne betale sig at bibringe en jord tilfredsstillende fosfattilstand og vedligeholde den, så den stadig er tilfredsstillende.

Er jordens fosfattilstand ikke tilfredsstillende, kan den øges noget ved at kalke jorden op til den reaktion, der erfarings-

mæssigt er optimal for vedkommende jordtype — noget højere for lerjorder end for sandjorder. Yderligere forbedring må ske ved tilførel af fosfat, enten ved en stor engangsdosis eller gennem flere år. For særlige fattige jorder må engangsdosis på 1—2 tons superfosfat pr. ha foretrækkes, da opgødsning gennem en år-række medfører for små afgrøder i de første år.

Er en jords fosfattilstand tilfredsstillende, kan den vedligeholdes på samme niveau ved at tilføre ligesåmeget fosfat i gødning, som der bortføres i afgrøderne. I de almindelige danske landbrug med stort kvæghold og opfodring af det meste af avlen, vil 85—90 pct. af afgrødernes fosfatindhold føres tilbage til markerne i staldgødning m. v. Til supplerings — for at holde erstattingsdrift, det vil sige opnå balance mellem til- og bortførelse — kræves derfor kun små mængder superfosfat — se tabel side 631. På grund af det stedse stigende udbyttensniveau er det ikke nok, at jordens fosfattilstand holdes på samme niveau, men den må stadig øges for stadig at være tilfredsstillende. Derfor må der til vedligeholdelse af tilfredsstillende fosfattilstand tilføres noget mere superfosfat end nævnte tabel angiver.

Gødning med fosfat kan ske efter følgende hovedregler:

1. Jorden fosfattilstand undersøges.
2. Om fornødent opgødes til tilfredsstillende fosfattilstand, samtidig med at fosfattilstanden forbedres gennem kalkning til optimal reaktion.
3. Der overholdes erstattingsdrift med fosfat — de nødvendige mængder superfosfat til supplerings af staldgødningen kan dog tilføres ad en eller to gange i sædskiftet, fortrinsvis til rodfrugt.
4. Hvor udbyttensniveauet er stedse stigende og fosfattilstanden ikke er væsentlig over tilfredsstillende, tilføres noget mere end nødvendig for erstattingsdrift.
5. Fosfattilstanden undersøges fra tid til anden — hvert 8—12 år.

Undersøgelse af jordens fosfattilstand sker sikrest gennem markforsøg med superfosfat (1000 kg pr. ha), men denne vej er i reglen for langsom og for dyr, og forsøgets resultater har kun gyldighed for selve forsøgsarealet. Derfor må man normalt betjene sig af jordbundsanalyser, hvis resultat udtrykkes i fosfor-

syretallet, Ft. Da den nu anvendte analysemetode kun er anvendt fra 1948, og der ikke foreligger en samlet bearbejdelse af analyse-resultater og forsøgsresultater, kan der ikke gives velunderbyggede generelle regler for, hvor højt fosforsyretallet skal være, for at jordens fosfattilstand må anses for at være tilfredsstillende. Man må indtil videre anvende fosforsyretallene efter de stedlige konsulenters erfaringer. Det er forfatterens opfattelse, at jorder med Ft over 4—6 oftest har tilfredsstillende fosfattilstand, medens afgrøder på jorder med Ft under 1,5—2 næsten altid lider af fosfatmangel. Indtil bedre vejledning kan gives, må man tilsigte, at jorder med Ft under 4 tilføres så meget fosfat ekstra (ud over de til erstatningsdriften nødvendige mængder), at Ft hæves til ca. 4. Dertil vil kræves 1200—1800 kg superfosfat pr. ha for hver enhed i fosforsyretallet.

SUMMARY

The Soil as a Source of Phosphorus for Plants.

The present contribution is a review of some of those investigations and field experiments that deal with the relationships of phosphorus from an agricultural point of view. Particular stress has been laid on the problems of chief interest under conditions in Denmark, and the practical and economic questions concerning phosphate fertilization have been dealt with from the premises obtaining in Danish agriculture. The paper, in itself only a review, is concluded with the following summary relating to practical farming conditions.

In order to live and grow, all plants must assimilate phosphorus which is normally taken up from the soil exclusively as orthophosphate. Therefore its behaviour in the soil and the capacity of the plants for phosphorus uptake form the theoretical basis for advisory work on the application of phosphatic fertilizers.

Danish field soils have an average content, subject to large variations, of 0.04 pct phosphorus, corresponding to 1000 kg per hectare in 20 cm top soil. This quantity of phosphorus is present partly as inorganic and partly as organic compounds, approximately half of each. The organic phosphorus compounds, mainly nucleoproteins and phytates, represent a fraction of the soil humus — the dead organic matter that is constantly undergoing a slow decomposition and mineralization. The slow rate at which the organic phosphorus compounds are decomposed is evidenced by the fact that an annual supply of 1 to 5 kg of organic phosphorus in farmyard manure and plant

residues is sufficient to maintain a content of humus with 400 to 500 kg phosphorus per hectare. Various measures of cultivation, particularly liming, may accelerate the decomposition and thus to some extent lower the content of organic soil phosphorus.

The inorganic phosphorus compounds comprise a small fraction represented by apatite crystals, etc., enclosed by silicates in stones, gravel, and smaller unweathered particles. This phosphate fraction may be disregarded from the point of view of plant cultivation, since it is only made available through weathering with extreme slowness. The remaining inorganic phosphorus compounds may be divided into the following groups:

1. Slightly soluble phosphates of iron, aluminium, and calcium, precipitated on the surfaces of soil particles. The formation of these various phosphates depends largely on the reaction of the soil, since most soils contain more than sufficient of the said cations for precipitation of the amount of phosphate present. Ferric and aluminium phosphates are mainly formed in acid soils (at pH less than 6.0) while calcium phosphate (hydroxyl apatite) predominates in neutral and alkaline soils.

2. Phosphate bound by soil colloids through absorption or adsorption. The colloids, being giant molecules of amphoteric character, are able to adsorb cations as well as anions, but the fixation of anions, including phosphate, is prevalent in acid soils. Phosphate ions may also possibly enter the colloid molecule itself (absorption), and certain phosphates possess colloidal character.

3. Dissolved phosphate occurring as phosphate ions in the soil solution usually accounts for less than one mg phosphorus per liter of soil solution. Thus even a soil with 1000 tons of soil solution per hectare (equal to 100 mm precipitation) contains rather less than one kg dissolved phosphorus per hectare.

The phosphate in these three groups, with the possible exception of that bound by absorption, forms a system of equilibrium where phosphate is liberated by dissolution from the solid phase when phosphate is removed from the soil solution, e.g., through uptake by the plants. Conversely an addition of soluble phosphate (e.g., superphosphate) to the soil solution results in a transfer of phosphate to the solid phase. This latter process is here termed phosphate fixation. In many soils a large proportion of the phosphate content (up to one-half) takes part in this system of equilibrium, yet only an extremely small proportion is found in the soil solution. If a great change in the phosphate content of the soil solution is brought about by fertilization with superphosphate, the change in equilibrium (in this case phosphate fixation) takes place rapidly at first, but at a decreasing rate, and a long time is taken to re-establish complete equilibrium. The amount of phosphate that can be fixed by a soil is limited but usually very large, the maximum phosphate-fixing capa-

city of surface soil equals 100 to 400 tons of superphosphate per hectare. Even soils that supply sufficient phosphate to the crops may fix large quantities of phosphate. The equilibrium of the system, and hence the concentration of phosphate in the soil solution, depends on several factors, the most important of which are the amount of phosphate in the system, the character of the soil (sand or loam), its content of iron, aluminium, and calcium, and the reaction (pH) of the system.

Fluctuations in the phosphorus compounds of the surface soil are only small, owing to the low phosphate concentration of the soil solution, and loss of phosphate in drainage and ground water is negligible in normal soils (mostly less than one kg phosphorus per hectare per annum), but may become economically significant in acid sand soils of low iron content.

Uptake of phosphate from the soil solution by the plants disturbs the equilibrium between phosphates in the soil solution and the soil, and phosphate passes into solution. A decisive moment in the phosphate uptake by plants is the influence of their biological activities on the equilibrium of phosphate distribution in the soil/soil solution system. The plant roots excrete carbon dioxide that lowers pH in the immediate vicinity of the roots, and thus the phosphate concentration in the soil solution is increased. Possibly the plant roots may also excrete organic acids acting in the same way. Furthermore the plant uptake of calcium ions from the soil solution may increase its phosphate concentration.

These relationships, summarized from numerous chemical soil analyses and experiments in plant physiology, agree well with the general results of pot and field experiments. Such experiments lead to the conclusion that normal soils contain an amount of available phosphate 10 to 50 times as high as the annual phosphorus consumption of the crops, but that the rate of uptake is so slow that each crop obtains only a small fraction of the total available phosphate. This fraction is called the coefficient of uptake, and is of the order of 0.02 to 0.10. This small value of the coefficient of uptake renders it necessary that the soil in order to provide maximum crop yield should contain phosphate in quantities 10 to 50 times the annual consumption. Experiments have shown that soils very poor in phosphate require applications of 2 to 4 tons superphosphate per hectare in order to reach maximum yielding capacity, despite the fact that the phosphate content of the crops is only equivalent to 200 kg superphosphate; in other words, an amount 10 to 20 times the annual phosphate consumption must be supplied. It must further be assumed that water-soluble phosphate added as fertilizer simply enters the soil capital of available phosphate and acts in the same way as this, with a small fraction being taken up annually, although recently applied phosphate shows a slightly higher coefficient of uptake than the remaining available phosphate.

In normal soils there is only a slight transfer from available to non-available phosphate, the latter including organically-bound as well as silicate-bound phosphate, and since the loss of phosphate by leaching is insignificant, available phosphate is only lost to the soil through removal by the crops. It therefore seems justified to assume that the soil capital of available phosphate can be maintained by supplying the same quantity of phosphate in fertilizers as is removed by the crops, and several long-term experiments have substantiated this assumption.

This purely schematic exposition, according to which the phosphate uptake by plants is regulated by the soil content of available phosphate and its coefficient of uptake, requires the consideration of a few other factors. The magnitude of the coefficient of uptake depends on the soil type, and is also influenced by the reaction; the improved opportunities of the plants for phosphate uptake due to liming must probably be ascribed to an increase in the coefficient of uptake. Liming furthermore accelerates the mineralization of organic phosphorus and thus adds to the amount of available phosphate. Finally plants have an influence on the coefficient of uptake, inasmuch as different plant species take up widely different quantities of phosphate from the same soil, and within the same species the phosphate uptake depends on the supply of other nutrients as well as other growth factors in general.

For purposes of instruction and advisory work it would be preferable to use a single concept for the soil as source of phosphate for the plants, rather than the dual concept: available soil phosphate, and its coefficient of uptake. The ability of the soil to supply phosphate to the crops, or more correctly, the opportunities of the crops for uptake of phosphate from the soil, might be taken as a convenient single concept called the phosphate status. Field experiments with superphosphate may give a general idea of the phosphate status, if the difference in aptitude of different plants for phosphate uptake is disregarded and the phosphate status is understood as a practical concept that expresses the average opportunity of common agricultural crops for phosphate uptake. (The quantity of available phosphate and its coefficient of uptake cannot be estimated in the usual experiments, and hence it is preferable to use the concept of phosphate status). If a low yield in a field experiment is produced by fertilizer mixture without superphosphate and a large surplus yield by further application of 1000—2000 kg superphosphate per hectare, the phosphate status may be regarded as poor, or very poor. If no surplus yield is produced by superphosphate and high yield in its absence, the phosphate status may be judged satisfactory. Experiments that show a low yield without and no surplus yield with superphosphate give no indication of the phosphate status, since in this case the yield is limited by another factor (or factors) than phosphate.

The individual farmer is chiefly interested in knowing whether the phosphate status is satisfactory, i.e., whether the soil will produce maximum crop yield without phosphate fertilizer. Under normal price conditions it will always pay to bring the soil to a satisfactory status and to maintain it at this level. An unsatisfactory phosphate status may be improved by liming of the soil to the reaction shown by experience to be optimal for the soil type in question (somewhat higher pH-values in loam than in sand soils). Further improvement may be attained through the application of phosphatic fertilizer, either as a single large dressing or distributed over several years. A single dose of 1 or 2 tons superphosphate per hectare is preferable in the case of particularly poor soils where a gradual raising of the phosphate status would entail too small crop yields during the first years.

When the phosphate status is satisfactory it may be maintained at the same level by the application of phosphatic fertilizer in amounts equivalent to the phosphate removal by the crops. In current Danish agricultural practice, where large live stock populations are kept and the main part of the crops used as fodder, some 85 to 90 pct of the crop phosphate is returned to the soil in the farmyard manure. Thus only small amounts of phosphate, equivalent to 25 to 60 kg superphosphate per hectare per annum, will be required as a supplement to maintain an equilibrium between input and outgo of soil phosphate. On account of the steadily rising level of crop yields it is, however, not sufficient to maintain the phosphate status at the same level; this must be continuously raised in order to remain satisfactory. Therefore the maintenance of a satisfactory phosphate status will require the addition of somewhat more superphosphate than stated above.

The use of phosphatic fertilizers may take place according to the following general principles:

1. The phosphate status of the soil is investigated.
2. If required, phosphatic fertilizer is applied until a satisfactory phosphate status is reached, and this is further improved by liming to optimal reaction.
3. Restorative use is made of phosphatic fertilizer. The quantities of superphosphate needed as a supplement to the farmyard manure may be applied once or twice during the rotation, preferably to root crops.
4. Somewhat more phosphate than required for restoration is applied if the level of crop yield is steadily rising and the phosphate status of the soil is not considerably more than just satisfactory.
5. The phosphate status must be tested periodically, at intervals of 8 to 12 years.

The phosphate status is most reliably tested through field experiments with superphosphate in amounts of 1000 kg per hectare, but

this way is usually to slow and expensive, and the experimental results are only valid for the experimental area itself. As a rule it will therefore be necessary to resort to soil analyses, the results of which are expressed by the phosphate value (Ft). The current analytical method has only been in use since 1948, and no general survey of the results of soil analyses and field experiments is yet available. It is therefore impossible to make well founded general statements as to the level of phosphate value that would indicate satisfactory phosphate status, and until further the phosphate values must be interpreted according to the experience of local agricultural advisers. In the opinion of the present author the phosphate status is usually satisfactory in soils of Ft above 4 to 6, while crops on soils of Ft less than 1.5 to 2 nearly always suffer from phosphate deficiency. The general aim, until better guidance can be given, should be to give soils of Ft less than 4 such dressings of phosphatic fertilizers, in addition to those needed for restorative use, that Ft is raised to approximately 4. This will require 1200—1800 kg superphosphate per hectare per unit of Ft.

Under de flerårige forarbejder til nærværende afhandling har forfatteren ofte fået vejledning og inspiration gennem drøftelser af problemerne med landbrugslærer, mag. agro. Sigurd Larsen, Dalum landbrugsskole, som dertil har vist mig den venlighed at gennemse manuskriptet til afhandlingen. Afdelingsbestyrer, dr. agro H. L. Jensen, Statens Planteavlslaboratorium, Lyngby, har foretaget oversættelsen af afhandlingens oversigt til engelsk. For disse værdifulde tjenester bringes herved min bedste tak.

Litteraturfortegnelse.

For periodiske tidsskrifter angiver tallene: Bind eller årgang, trykkeår og side. For nogle af disse tidsskrifters navne anvendes særlige forkortelser:

J.Am.Soc.Agr. = Journal of the American Society of Agronomy (fra 1949 = Agronomy Journal).

S.Sc.Soc.Am.Proc. = Soil Science Society of America. Proceedings.

T.f.P. = Tidsskrift for Planteavl og i forbindelse hermed er

ber. = beretning fra Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur.

ZPDB = Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde.

Fra 1936 til 1945, Bodenkunde und Pflanzenernährung.

Aslander, Alfr.: Undersökningar rörande en fosfatgödslingsmetod. Kungl. Lantbruksakademiens Tidsskr. 79, 1940, 385—398.

Achromeiko, A. I.: Einfluss der Kieselsäure auf die Ausnutzung der P_2O_5 verschiedenen Ursprungs durch die Pflanze. ZPDB, Teil A, 34, 1934, 340—359.

— Über die Ausscheidung mineralischer Stoffe durch Pflanzenwurzeln. ZPDB 42, 1936, 156—186.

- Albrecht, W. A. & Smith, N. C.*: Calcium in relation to phosphorus utilization by some legumes and nonlegumes. *S.Sc.Soc.Am.Proc.* 4, 1940, 260—265.
- Allaway, W. H. & Rhoades, H. F.*: Forms and distribution of phosphorus in the horizons of some Nebraska soils in relation to profile development. *Soil Science* 72, 1951, 119—128.
- Allison, F. E., Pinck, L. A. & Sherman, M. S.*: Comparative availabilities of organic and inorganic phosphates as shown by the Neubauer method. *J.Am.Soc.Agr.* 33, 1941, 918—926.
- Allison, L. E.*: The trend of phosphate adsorption by inorganic colloids from certain Indiana soils. *Soil Science* 55, 1943, 333—342.
- Alway, F. J. & Clayton, O. Rost*: The vertical distribution of phosphorus in the surface soil of prairies. *Soil Science* 2, 1916, 493—497.
- *Shaw, W. M. & Methley, W. J.*: Phosphoric-acid content of crops grown upon peat soils as an index of the fertilization received or required. *Journal of Agricultural Research* 33, 1926, 701—740.
- Arrhenius, O.*: Die Bodenanalyse im Dienst der Archäologie. *ZPDB Teil B*, 10, 1931, 427—439.
- Fosfathalten i skånska jordar, Sveriges geologiska Undersökning. Årsbok 28, 1934.
- Markundersökning och arkeologi. *Fornvännen*, 1935.
- Besondere Anwendungen der Bodenanalysen. *ZPDB* 9—10, 1938, 82—87.
- Aslyng, H. C.*: Jordens kalk- og fosfatpotential. *Nordisk Jordbruksforskning* 31—32, 1950, 312—320.
- Aso, K.*: Über das Vorkommen von Phosphorsäure in organischen Verbindungen im Boden. *Biedermanns Centralblatt*, 34, 1905.
- Auten, J. T.*: Organic phosphorus of soils. *Soil Science* 14, 1923, 281—293.
- The organic phosphorus content of some Iowa soils. *Soil Science* 13, 1922, 119—124.
- Ballard, S. S. & Dean, L. A.*: Soil studies with radioactive phosphorus: Significance of biological measurements of the retention of applied phosphorus by soils. *Soil Science* 52, 1941, 173—183.
- Bassett, Henry*: The phosphates of calcium. *Journal of the Chemical Society of London*, 111, 1917, 620.
- Beater, B. E.*: The measurement of phosphate fixation in soils. *Soil Science* 44, 1937, 277—291.
- Behrens, W. U.*: Die Aufnahme und Verwertung der Phosphorsäure aus den verschieden tiefen Bodenschichten durch die Pflanzen. *ZPDB, Teil A*, 36, 1934, 343—362.
- Benne, E. J., Perkins, A. T. & King, H. H.*: The effect of calcium ions and reaction upon the solubility of phosphorus. *Soil Science* 42, 1936, 29—38.
- Bertramson, B. R. & Stephenson, R. E.*: Comparative efficiency of organic phosphorus and of superphosphate in the nutrition of plants. *Soil Science* 53, 1942, 215—227.
- Bjerrum, Niels & Dahm, C. R.*: Untersuchungen über Aluminiumphosphate. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1931, 627—637.

- Bjerrum, Niels*: Undersøgelser over Kalciumfosfaters Opløselighed. Nordiska (19. skandinaviska) naturforskarmødet i Helsingfors 1936, 344—348.
- Black, C. A.*: The penetration of phosphate into the kaolinite crystal. S.Sc.Soc.Am.Proc. 6, 1942, 157—161.
- Phosphate fixation by kaolinite and other clays as affected by pH, phosphate concentration and time of contact. S.Sc.Soc.Am.Proc. 7, 1943, 123—133.
- Blanck, E., Schorstein, H. & Themlitz, R.*: Über den Einfluss von Kalziumsilikat und -karbonat auf die Ausnutzung verschiedener Phosphorsäuredünger. Journal für Landwirtschaft 84, 1936, 297—319.
- & *Themlitz, R.*: Ein weiterer Beitrag zur Frage nach dem Einfluss von Kalziumsilikat und Karbonat sowie von Kieselsäure auf die Ausnutzung verschiedener Phosphorsäuredünger. Journal für Landwirtschaft 85, 1938, 165—179.
- Blaser, R. E. & McAuliffe, Clayton*: Utilization of phosphorus from various fertilizer materials: I. Orchard grass and ladino clover in New York. Soil Science 68, 1949, 145—150.
- Bohne, H.*: Gefässversuche zur Frage des Einflusses einer Kalkung auf die Ernährung der Pflanzen mit Düngerphosphorsäure auf saurem Boden. ZPDB 48, 1949, 118—134.
- Laboratoriumversuche zur Frage der Mobilisierung der Bodenphosphorsäure durch Kalk auf sauren Böden. (I. Mitteilung). ZPDB 43, 1949, 37—55.
- Bondorff, K. A.*: Om Benyttelse af Mikroorganismer til Bestemmelse af Jordens Indhold af Plantenæringsstoffer, der er tilgængelige for højere Planter. Landbohøjskolens Aarsskrift 1918, 339—371.
- Fosforsyre og Kali. Nordisk Jordbrugsforskning 11—12, 1929—30, 478—494.
- & *Steenbjerg, F.*: Studier over Jordens Fosforsyreindhold. I. Jordfosforsyrens Opløselighed. 256. ber. T.f.P. 38, 1932, 273—308.
- Studier over Jordens Fosforsyreindhold. II. Laboratorieundersøgelsens Forhold til Markforsøget. 270. ber. T.f.P. 39, 1933, 549—589.
- Forelæsninger over Landbrugets Jorddyrkning. II. Gødningslæren. 1939.
- Gødningsproblemet for dansk Landbrug. Ingeniørvidenskabelige Skrifter, 1941, nr. 1, 1—14.
- & *Damsgaard-Sørensen, P.*: Studier over Jordens Fosforsyreindhold. III. En Sammenligning mellem forskellige kemiske Metoder til Bestemmelse af tilgængelige Fosfater i Jord. 353. ber. T.f.P. 46, 1942, 377—425.
- Studier over jordens fosforsyreindhold. V. En ny fremgangsmåde ved undersøgelsen af jordens fosforsyreindhold. 426. ber. T. f. P. 53, 1950, 336—342.
- Om jordbundsanalyser og deres udnyttelse. En oversigt. 1952, 1—46.
- Studier over jordens fosforsyreindhold. VI. Jordfosforsyrens opløselighed i fortyndet svovlsyre. 449. ber. T.f.P. 55, 1952, 185—210.
- Borden, R. J.*: Modified Mitscherlich method for soil cultures. Soil Science 62, 1946, 51—60.

- Bottomley, W. B.*: Isolation from peat of certain nucleic acid derivatives. Proceedings of the Royal Society (London).. 90, 1919, 39—44.
- Bower, C. A.*: Separation and identification of phytin and its derivations from soils. Soil Science 59, 1945, 277—285.
- Studies on the forms and availability of soil organic phosphorus. Iowa Agricultural Experiment Station, Bulletin 362, 1949, 963—996.
- Bray, R. H. & Dickman, S. R.*: Adsorbed phosphates in soils and their relation to crop responses. S.Sc.Soc.Am.Proc. 6, 1942, 312—320.
- & *Kurtz, L. T.*: Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science 59, 1945, 39—45.
- Bremner, J. M.*: A review of recent work on soil organic matter. Part I. The Journal of Soil Science 2, 1951, 67—82.
- Brown, L. A.*: A study of phosphorus penetration and availability in soils. Soil Science 39, 1935, 277—287.
- Buehrer, T. F.*: The physico-chemical relationships of soil phosphates. Arizona Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin 42, 1932, 155—212.
- Bundgaard, Chr. Moth, Larsen, Sigurd & Kristensen, R. K.*: Undersøgelser over Udtagning af Jordprøver. Beretning om Landboforeningernes Virksomhed for Planteavlén paa Sjælland 1944, 101—119.
- Burd, J. S. & Martin, J. C.*: Secular and seasonal changes in the soil solution. Soil Science 18, 1924, 151—167.
- & *Murphy, H. F.*: The use of chemical data in the prognosis of phosphate deficiency in soils. Hilgardia 12, 1939, 323—340.
- Mechanisms of release of ions from soil particles to plant. Soil Science 64, 1947, 223—225.
- Chemistry of the phosphate ion in soil systems. Soil Science 65, 1948, 227—247.
- Bushnell, J.*: The phosphorus content of a sandy loam containing sufficient available phosphorus for vegetable crops. Soil Science 51, 1941, 153—158.
- Butkewitsch, W. W.*: Über die Fähigkeit der verschiedenen Pflanzen, Kalziumphosphate auszunutzen. ZPDB. Teil A. 31, 1933, 67—94.
- Chandler, W. V.*: Phosphorus adsorption by five Alabama soils as influenced by reaction, base saturation, and free sesquioxides. J.Am.Soc.Agr. 33, 1941, 1—12.
- Chapman, H. D.*: Inorganic phosphate in green plant tissue as a measure of phosphate availability. Soil Science 39, 1935, 111—122.
- Effect of nitrogenous fertilizers, organic matter, sulphur, colloidal silica on the availability of phosphorus in calcareous soils. J.Am.Soc.Agr. 28, 1936, 135—145.
- Leaf analysis and plant nutrition. Soil Science 52, 1941, 63—81.
- Chatterjee, B. & Datta, S.*: Phosphate fixation by clay minerals; Montmorillonite and kaolinite. Journal of Soil Science 2, 1951, 224—233.
- Christensen, C. J. (Tind)*: Forskellige Gødningsforsøg paa Mosejord. 167. ber. T.f.P. 29, 1923, 462—509.

- Christensen, Harald, R.*: Jordbundsundersøgelser paa Forsøgsarealerne ved Aarslev Forsøgsstation. 34. ber. T.f.P. 15, 1908, 383—406.
- *Mentz, A. & Overgaard, N.*: Undersøgelser over Moseforsøgsarealerne under Statens Forsøgsstationer ved Studsgaard og Tylstrup. 68. ber. T.f.P. 19, 1912, 595—652.
- Studier over Jordbundsbeskaffenhedens Indflydelse paa Bakterielivet og Stofomsætningen i Jordbunden. II. Undersøgelser over Jordens mannitomsættende Evne. 145. ber. T.f.P. 28, 1922, 1—61.
- Jordbundsundersøgelser i Forbindelse med fastliggende Gødningsforsøg paa Mineraljorder. 205. ber. T.f.P. 33, 1927, 197—411.
- Christensen, Werner*: Fosfatanalysen i Arkæologiens Tjeneste. Fortid og Nutid. 13, 1939—40, 129—156.
- Chubb, W. O. & Atkinson, H. J.*: Plant tissue testing. II. A study of the method of foliar diagnosis. Scientific Agriculture. 28, 1948, 49—60.
- Clarke, F. W.*: The data of geochemistry. 1916.
- Coleman, R.*: The adsorption of phosphate by kaolinitic and montmorillonitic clays. S.Sc.Soc.Am.Proc. 7, 1943, 134—138.
- Phosphorus fixation by the coarse and fine clay fractions of kaolinitic and montmorillonitic clays. Soil Science 58, 1944, 71—78.
- The mechanism of phosphate fixation by montmorillonitic and kaolinitic clays. S.Sc.Soc.Am.Proc. 9, 1945, 72—78.
- Cooke, G. W.*: Fixation of phosphate during the acid extraction of soils. Journal of Soil Science 2, 1951, 254—262.
- Damsgaard-Sørensen, P.*: Systematiske Undersøgelser af tilgængelig Fosforsyre og Kali i nogle danske Jorder. Beretning om Planteavlslarbejdet i Landboforeningerne i Fyns Stift 1940, 94—97.
- Fosforsyreproblemet i dansk Landbrug. Ugeskrift for Landmænd. 90, 1945, 347—351 og 384—387.
- Jordbundsundersøgelser og Gødkningsvejledning. Tidsskrift for Landøkonomi 1946, 141—162 og 253—273.
- Studier over Jordens Fosforsyreindhold. IV. Det organisk bundne Fosfor. T.f.P. 50, 1946, 653—675.
- Davis, F. L. & Brewer, C. A.*: The effect of liming on the absorption of phosphorus and nitrogen by winter legumes. J.Am.Soc.Agr. 32, 1940, 419—425.
- Retention of phosphates by soils. I. Effect of additions of iron and aluminum chloride upon the retention of phosphorus by virgin Hammond very fine sandy loam. Soil Science 56, 1943, 457—478.
- The role of iron and aluminum in the retention of phosphates by soils indicated by the solubility of phosphorus. S.Sc.Soc.Am.Proc. 8, 1944, 167—170.
- Retention of phosphates by soils. II. Effect of drying and of certain cations and anions on the cation-exchange capacity of soils. Soil Science 59, 1945, 175—190.
- Davis, L. E.*: Sorption of phosphates by noncalcareous Hawaiian soils. Soil Science 40, 1935, 129—158.

- Dean, L. A.*: Distribution of the forms of soil phosphorus. S.Sc.Soc.Am. Proc. 2, 1937, 223—227.
- An attempted fractionation of the soil phosphorus. Journal of Agricultural Science 28, 1938, 234—244.
- & *Rubins, E. J.*: Absorption by plants of phosphorus from a clay water system: Methods and ensuing observations. Soil Science 59, 1945, 437—448.
- — Anion exchange in soils I, II og III. Soil Science 63, 1947, 377—387, 389—397, 399—406.
- Dean, L. A., Nelson, W. L., MacKenzie, A. J., Arming, W. H. & Hill, W. L.*: Application of radioactive tracer technique to studies of phosphatic fertilizer utilization by crops. S.Sc.Soc.Am.Proc. 12, 1948, 107—112.
- Dewan, Madan L. & Hunter, Albert S.*: Absorption of P by soybeans and Sudan grass. Soil Science 68, 1949, 401—410 og 479—482.
- Dickman, S. R. & De Turk, E. E.*: A method for the determination of the organic phosphorus of soils. Soil Science 45, 1938, 29—39.
- & *Bray, R. H.*: Replacement of adsorbed phosphate from kaolinite by fluoride. Soil Science 52, 1941, 263—273.
- Dorph-Petersen, K.*: Om Anlæg og Opgørelse af Markforsøg. Ugeskrift for Landmænd. 87, 1942, 589—94 og 605—608.
- Usikkerheden paa Jordbundsanalyser i Markforsøg. T.f.P. 48, 1943, 358—366.
- Jordbundsanalyser som Vejledning for Praksis. Nordisk Jordbrugsforskning 25, 1943, 359—368.
- Kvælstof-, Fosforsyre og Kalibalancen i dansk Landbrug. Ugeskrift for Landmænd 89, 1944, 657—660 og 669—671.
- Forsøg med Staldgødning og Kunstgødning ved Lyngby 1910—1942. 396. ber. T.f.P. 50, 1946, 555—616.
- Forsøg med stigende Mængder Kalk og Mergel. 400. ber. T.f.P. 51, 1947, 1—114.
- Systematiske Jordbundsanalyser paa Horsens- og Røddingegnen. 47. Beretning om Planteavlsarbejdet i Landboforeningerne i Jylland 1947, 345—348.
- Fosforsyretallenes værdi og anvendelse. Ugeskrift for Landmænd 93, 1948, 227—231 og 251.
- Orienterende undersøgelser over fordelingen af fosfat i nogle danske jordprofiler. T.f.P. 53, 1949, 160—172.
- Variationen i en sandjords reaktionstal, fosforsyretal, kaliumtal og mangantal. 433. ber. T.f.P. 53, 1950, 650—677.
- Nogle Tilfælde af ekstrem Fosfatudvaskning af Jord. Ugeskrift for Landmænd. 95, 1950, 13—15 (indsat mellem s. 224—225).
- Planteavlens fosfatproblemer. Horticultura 5, 1951, 65—70.
- Kalkningens virkning på sure jorders fosfattilstand. 463. ber. T.f.P. 56, 1953, 177—221.
- Doughty, J. L.*: The fixation of phosphate by a peat soil. Soil Science 29, 1930, 23—35.

- Doughty, J. L.*: Phosphate fixation in soils particularly as influenced by organic matter. *Soil Science* 40, 1935, 191—202.
- Dukes, H.*: The effect of dilution on the solubility of soil phosphorus. *J. Am. Soc. Agr.* 27, 1935, 760—763.
- Dunn, L. E.*: The effect of lime on the availability of nutrients in certain western Washington soils. *Soil Science* 56, 1943, 297—316.
- Dyer, W. J. & Wrenshall, G. L.*: Organic phosphorus in soils. I. The extraction and separation of organic phosphorus compounds from soil. *Soil Science* 51, 1941, 159—170.
- Organic phosphorus in soils: III. The decomposition of some organic phosphorus compounds in soil cultures. *Soil Science* 51, 1941, 323—329.
- Egnér, H.*: Metod att bestämma lättlöslig fosforsyra i åkerjord. Medd. nr. 425 från Centralanstalten för försöksväsendet på jordbruksområdet. 1932, 1—36.
- Ehrenberg, P.*: Zur natürlichen Bewegung der Phosphorsäure im Erdboden. *Forschungsdienst* 6, 1938, 414—426 og 462—471.
- Eriksson, S.*: Bidrag till frågan om fosforsyrans fastläggning i betesmarker. Kongresberetning, Nordisk Jordbrugsforskning 20—21, 1938—39, 388—395.
- Über die Einwirkung der Kalidüngung auf die Festlegung der Phosphorsäure im Boden. *Lantbrukshögskolans Annaler* 8, 1940, 87—130.
- Untersuchungen über die Einwirkung von Kalisalzen auf die Löslichkeit der Bodenphosphorsäure. 1942, 1—101.
- Fisher, R. A. & Thomas, R. P.*: The determination of forms of inorganic phosphorus in soils. *J. Am. Soc. Agr.* 27, 1935, 863—873.
- Flieg, O.*: Über den Einfluss von Humaten auf die Beweglichkeit der Phosphorsäure im Boden. *ZPDB* 38, 1935, 222—238.
- Ford, M. C.*: The nature of phosphate fixation in soils. *J. Am. Soc. Agr.* 25, 1933, 134—144.
- Franck, O.*: Undersökningar rörande fosforsyrans fastläggning i marken samt därmed sammanhörande gödslings- och kalkningsspörsmål. Medd. nr. 483 från Centralanst. f. försöksväsendet på jordbruksområdet. 1937, 1—37.
- Kan exempelvis fosforsyrans fastläggande i översta jordlagret betinga betesvallens omläggning? Kongresberetning, Nordisk Jordbrugsforskning 20—21, 1938, 381—387.
- Några försöksresultat rörande gyttejalerors brukning, kalkning och gödning. Kongresberetning, Nordisk Jordbrugsforskning 20—21, 1938, 346—354.
- En ny stallgödselvärdsmetod. *Växt-Närings-Nytt*, 2, 1946, H 5, 1—13.
- Försök med nedmyllning av handelsgödsel. *Jordbruksförsöksanstalten. Meddelande nr. 26*, 1948, 1—26.
- Frederiksson, L. & Wiklander, L.*: Studier över potatisens fosfatupptagande med tillhjälp av radioaktiv fosfor. *Kungl. Lantbruksakademiens Tidsk.* 89, 1950, 446—459.
- Något om möjligheterna att med tillhjälp av ledisotoper studera vissa kalknings- och gödslingsproblem. *Kungl. Lantbruksakademiens Tidsk.* 89, 1950, 435—445.

- Fried, Maurice & MacKenzie, A. J.*: Rock phosphate studies with neutron irradiated rock phosphate. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* 14, 1950, 226—231.
- & *Dean, L. A.*: A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Science* 73, 1952, 263—271.
- Fuller, W. H. & Dean, L. A.*: Utilization of phosphorus from green manures. *Soil Science* 68, 1949, 197—202.
- & *McGeorge, W. T.*: Phosphate in calcareous Arizona soils: I. Solubilities of native phosphates and fixation of added phosphates. *Soil Science* 70, 1950, 441—459.
- — Phosphates in calcareous Arizona soils: II. Organic phosphorus content. *Soil Science* 71, 1951, 45—49.
- — Phosphates in calcareous Arizona soils: III. Distribution in some representative profiles. *Soil Science* 71, 1951, 315—323.
- & *Rogers, R. N.*: Utilization of phosphorus from barley residues. *Soil Science* 74, 1952, 373—382.
- Gaarder, T.*: Die Bindung der Phosphorsäure im Erdboden. I. *Medd. nr. 14 fra Vestlandets forstlige Forsøgsstation*, 1930, 1—140.
- & *Grahl-Nielsen, O.*: Die Bindung der Phosphorsäure im Erdboden II. *Medd. nr. 18 fra Vestlandets forstlige Forsøgsstation*, 1935, 1—107.
- Gardner, Robert, & Kelley, O. J.*: Relation of pH to phosphate solubility in Colorado soils. *Soil Science* 1940, 50, 91—102.
- Gericke, S.*: Die Bewegung der Phosphorsäure im Boden. *ZPDB, Teil A*, 27, 1932, 144—162.
- Beziehungen zwischen den Wachstumsfaktoren Wasser, Phosphorsäure und Kali. *ZPDB* 44, 1949, 171—198.
- Phosphorsäure und Kalkdüngung auf sauren Böden. 1951. 1—47.
- Gerretsen, F. C.*: The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. *Plant and Soil* I, 1948, 51—81.
- Ghani, M. O. & Islam, M. A.*: Phosphate fixation in acid soils and its mechanism. *Soil Science* 62, 1946, 293—306.
- Gilbert, B. E. & Hardin, L. J.*: The current mineral nutrient content of the plant solution as a possible means of chemical control of optimum fertilization. *Journal of Agricultural Research* 35, 1927, 185—192.
- Gisiger, L.*: Die Wanderung der Düngerphosphorsäure im Wiesenboden. *Landwirtschaftliches Jahrbuch der Schweiz* 47, 1933, 491—518.
- Greisenegger, I. K.*: Über das Verhalten von Superphosphat im Boden. *Zeitschrift für das landwirtschaftliche Versuchswesen in Oesterreich* 13, 1910, 1—47. Referat i *T.f.P.* 18, 1911, 478.
- Hall, A. D.*: The analysis of the soil by means of the plant. *Journal of Agricultural Science* 1, 1905, 65—88.
- Hall, N. S., Nelson, W. L., Krantz, B. A., Welch, C. D. & Dean, L. A.*: Utilization of phosphorus from various fertilizer materials: II. Cotton and corn in North Carolina. *Soil Science* 68, 1949, 151—156.
- Hartwell, B. L., Hammett, F. S. & Wessels, P. H.*: Reactions of the phosphorus of the thickened root of the flat turnip. *Journal of Agricultural Research*, 11, 1917, 359—371.

- Haseman, J. F., Brown, E. H. & Whitt, C. D.*: Some reaction of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminium. *Soil Science* 70, 1950, 257—271.
- Heck, A. F.*: Phosphate fixation and penetration in soils. *Soil Science* 37, 1934, 343—355.
- Effect of the degree of base saturation of a soil on its capacity to fix phosphorus in difficulty available form. *Soil Science* 38, 1934, 463—470.
- A method for determining the capacity of a soil to fix phosphorus in a difficulty available form. *Soil Science* 37, 1934, 477—482.
- Availability and fixation of phosphorus in Hawaiian soils. *J.Am.Soc. Agr.* 27, 1935, 874—884.
- Henderson, W. J. & Jones, U. S.*: The use of radioactive elements for soil and fertilizer studies. *Soil Science* 51, 1941, 283—288.
- Hendricks, S. B. & Dean, L. A.*: Basic concepts of soil and fertilizer studies with radioactive phosphorus. *S.Sc.Soc.Am.Proc.* 12, 1948, 98—100.
- — Use of P^{32} in measurement of fertilizer effectiveness under field condition. *Transaction of the fourth international congress of soil science.* 1, 1950, 221—223.
- Henriksen, Aa.*: Undersøgelser over analysenøjagtigheden ved bestemmelsen af reaktionstal (Rt), fosforsyretil (Ft) og kaliumtal (T_K). *T. f. P.* 55, 1952, 337—345.
- Hester, J. B.*: The influence of phosphate fertilization upon the amphoteric properties of coastal plain soils. *J.Am.Soc.Agr.* 29, 1937, 10—16.
- Hesey, G., Linderström-Lang, K. & Olsen, C.*: Atomic dynamics of plants growth. *Nature* 137, 1936, 66—67.
- — — Exchange of phosphorus atoms in plants and seeds. *Nature* 139, 1937, 149—150.
- Hibbard, P. L.*: Chemical methods for estimating the availability of soil phosphate. *Soil Science* 31, 1931, 437—466.
- Factors influencing phosphate fixation in soils. *Soil Science* 39, 1935, 337—358.
- Hilbert, G. E., Pinck, L. A., Sherman, M. S. & Tremearne, T. H.*: Organic phosphates. I. Fixation studies with three different soil types. *Soil Science* 46, 1938, 409—418.
- Hallie van, Th. B.*: Über den Verlauf der Aufnahme von Stickstoff, Phosphorsäure und Kali bei verschiedenen Gewächsen auf dem Felde. *Verlagen van Landbouwkundige Onderzoekingen* 43, 1937, 13—54.
- Iversen, Karsten*: Forsøg med Udbringning af Superfosfat og Kaligødning Efteraar og Foraar. *Askov Sandjordsarealer 1932—39.* 350. ber. *T. f. P.* 46, 1941, 222—237.
- Staldgødningens og Kunstgødningens Kvælstof-, Fosforsyre- og Kalivirkning. 358. ber. *T. f. P.* 47, 1942, 1—93.
- Kontrollforsøg med Fosforsyre og Kali 1935—1942 II. 369. ber. *T. f. P.* 48, 1943, 91—162.
- Udvaskning af Fosforsyre og Kali. 389. ber. *T. f. P.* 50, 1945, 106—125.

- Iversen, Karsten*: Fosforsyre- og Kaliforsøg ved Statens Forsøgsstationer 1927—1942. 392. ber. T. f. P. 50, 1946, 299—366.
- & *Dorph-Petersen, K.*: Forsøg med store Mængder Fosforsyre- og Kali-gødning. Jordbundsanalyser og Markforsøg. 1940—1946. 406. ber. T.f.P. 51, 1948, 438—479.
- — Forsøg med Staldgødningens Opbevaring og Anvendelse. 1936—1946. 412. ber. T. f. P. 52, 1949, 69—110.
- — Undersøgelse over Produktionen af Staldgødning og Ajle. Askov 1942—1947. 418. ber. T. f. P. 52, 1949, 628—652.
- — Forsøg med staldgødning og kunstgødning på sandjord ved Lundgaard og Tylstrup. 419. ber. T. f. P. 53, 1949, 33—84.
- Om bestemmelse af jordens gødningstrang. Jordbundsanalyser og markforsøg. Nordisk Jordbrugsforskning 31—32, 1950, 189—211.
- Gødningslæren, 5. udg. 1951.
- — Forsøg med staldgødning og kunstgødning ved Askov 1894—1948. 440. ber. T. f. P. 54, 1951, 369—538.
- — Konservering af staldgødning med superfosfat. 453. ber. T. f. P. 55, 1952, 282—302.
- Jackman, R. H. & Black, C. A.*: Solubility of iron, aluminium, calcium and magnesium inositol phosphates at different pH values. Soil Science 72, 1951, 179—186.
- — Hydrolysis of iron, aluminium, calcium and magnesium inositol phosphates by phytase at different pH values. Soil Science 72, 1951, 261—266.
- — Hydrolysis of phytate phosphorus in soils. Soil Science 73, 1952, 167—171.
- Jacob, Walter C., van Middlelem, C. H., Nelson, W. L., Welch, C. D. & Hall, N. S.*: Utilization of phosphorus by potatoes. Soil Science 68, 1949, 113—120.
- Jansson, S. L.*: Isotopmetodik som hjælpemedel inom växtfysiologien, marklären och gödselläran. Kungl. Lantbruksakademiens Tidskr. 87, 1948, 370—392.
- Jensen, H. Land, Dorph-Petersen, K. & Olesen, Johs.*: Forsøg med store Mængder Superfosfat. Opgørelse med særligt Henblik paa Sammenligning af Fosforsyrevirkning og Fosforsyretal. Beretning fra Fosforsyre- og Kaliudvalget og Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur. Beretning om Fællesforsøg i Landbo- og Husmandsforeningerne, 1947, 48—67 (trykt 1948).
- Jensen, H. L.*: Studier over jordens fosforsyreindhold VII. Bestemmelse af fosforsyre i jord ved hjælp af *Aspergillus niger*. 468. ber. T. f. P. 56, 1953, 429—442.
- Jordan, J., Simkins, C. & Correy, G.*: Uptake and movement of fertilizer phosphorus. Soil Science 73, 1952, 305—313.
- Kaila, Armi*: Viljelysmaan Orgaanisesta Fosforista. (On the organic phosphorus in cultivated soils). Valtion Maatalouskoetöiminnan Julkaisuja. 129, 1948, 1—118.

- Kaila, Armi:* Karjanlannan fosforista. (On phosphorus in farm manure). Maataloustieteellinen Aikakauskirja 21, 1949, 67—82.
- Biological absorption of phosphorus. *Soil Science* 68, 1949, 279—289.
- Superfosfaatin käytöstä karjanlannan seassa. (Use of superphosphate with farm manure). Valtion Maatalouskoetoiminnan Julkaisuja no. 134, 1950, 1—35.
- Karjanlanta kasvien fosforin lähteenä. (Farm manure as a source of phosphorus for plants). *Maataloustieteellinen Aikakauskirja* 22, 1950, 107—121.
- Kapp, L. C., Hervey, R. J., & Johnston, J. R.:* Response of evergreen sweet clover and cotton to phosphorus applications on Houston black clay. *Soil Science* 75, 1953, 109—118.
- Kappen, H.:* Über die Humatlöslichkeit der Phosphate. *Forschungsdienst, Sonderh.* 2, 1936, 83—95.
- *Schaal, J. & Krier, A.:* Weitere Untersuchungen über die Humatlöslichkeit der Phosphorsäuredünger. *ZPDB* 31 (76), 1943, 357—376.
- Karlsson, N., & Mattson, S.:* The electrochemistry of soil formation. IV. The salt effect on amphoteric colloids and phosphate fixation. *Lantbruks-högskolans Annaler* 8, 1940, 405—424.
- Kelly, J. B., & Midgley, A. R.:* Phosphate fixation — an exchange of phosphate and hydroxyl ions. *Soil Science* 55, 1943, 167—176.
- Kofoed, A. Dam:* Forsøg med Fosfater. Beret. om Fællesforsøg i Landbo- og Husmandsforen. 1949, 94—103 (trykt 1950).
- *Olesen, J.:* Forsøg med pulveriseret og kornet Superfosfat, samt Sammenligning af Bredsaaning og Radsaaning af kornet Superfosfat. Beret. om Fællesforsøg i Landbo- og Husmandsforen., 1949, 96—98, 1950, 104—107, 1951, 72—75, 1952, 63—65 (trykt henhv. 1950, 51, 52, 53).
- Krantz, B. A., Nelson, W. L., Welch, C. D., & Hall, N. S.:* A comparison of phosphorus utilization by crops. *Soil Science* 68, 1949, 171—177.
- Kristensen, M. K. & Christensen, H. R.:* Beretning om Forsøg med Fosforsyregødninger, udførte i Landboforeningerne i Jylland. 1905—1910. *T. f. P.* 20, 1913, 24—104.
- Kristensen, R. K.:* Kemiske Undersøgelser af Jord, dyrket paa forskellig Maade. 135. ber. *T. f. P.* 26, 1919, 335—351.
- *& Steenbjerg, F.:* Tidsvariationen ved Fosforsyretal og Reaktionstal. 401. ber. *T. f. P.* 51, 1947, 114—135.
- Krügel, C., Dreyspring, C., & Heinz, W.:* Über den leichtlöslichen Phosphorsäurevorrat von Ackerkrume und Untergrund. *ZPDB, Teil A*, 36, 1934, 224—235.
- *& Doerell, E. G.:* Die Gnanulierung von Düngemitteln, insbesondere von Superphosphate, und die Wirkung von granulierten Phosphorsäuredüngern verschiedener Korngrößen. *ZPDB* 46, 1949, 169—175.
- Kurtz, Touby, DeTurk, Ernest E. & Bray Roger H.:* Phosphate adsorption by Illinois soils. *Soil Science* 61, 1946, 111—124.
- Küpper, F. C.:* Beiträge zur Frage der Silikatlöslichkeit der Phosphate. *ZPDB* 6, 1938, 154—186.

- Laatsch, W.:* Die Festlegung der Phosphorsäure an Tone. ZPDB 23 (65), 1941, 17—31.
- Larsen, Sigurd:* Fosforsyrens Fastlægning i Jordbunden. Eksamensopgave 1945. Landbohøjskolens Bibliotek.
- Udviklingen i anvendelsen af radioaktive isotoper inden for jordbrugets forskning. Horticultura 3, 1949, 35—42.
- Studier over planternes fosfatoptagelse med radioaktivt fosfor som indikator. Nordisk Jordbrugsforskning 31—32, 1950, 335—337.
- Om anvendelse af isotoper i gødningsforsøg. Ugeskrift for Landmænd 96, 1951, 528—529.
- The use of P^{32} in studies on the uptake of phosphorus by plants. Plant and Soil 4, 1952, 1—10.
- Lee, Ching-Kwei:* Variations in yield and composition of the wheat plant as affected by the time of applying phosphatic fertilizer. J.Am.Soc.Agr. 32, 1940, 782—788.
- Lehr, J. J. & Wesemael, J. C. van:* The influence of neutral salts on the solubility of soil phosphate. With special reference to the affect of the nitrates of sodium and calcium. Journal of Soil Science 3, 1952, 125—135.
- Lemmermann, O. & Wiesmann, H.:* Die ertragsteigernde Wirkung der Kieselsäure, ZPDB, Teil A, 1, 1922, 185—255.
- — Weitere Versuche über die ertragsteigernde Wirkung der Kieselsäure bei unzureichender Phosphorsäuredüngung. ZPDB Teil B, 3, 1924, 185—197.
- — & *Sammet, K.:* Untersuchungen über die Ursache der ertragsteigernden Wirkung der Kieselsäure. ZPDB Teil A, 4, 1925, 265—315.
- — Zur Frage der Kieselsäurewirkung. ZPDB, Teil A, 13, 1928, 28—39.
- & *Rauterberg, E.:* Über die Ausnutzung schwerlöslicher Phosphorsäureverbindungen durch sogenannte Tiefwurzler nebst einigen anderen Fragen der Stoffaufnahme. ZPDB 43, (88) 1949, 1—18.
- — Das verschiedene Verhalten der Phosphorsäureverbindungen des Bodens gegenüber 1 % igen Essigsäure. ZPDB 43 (88), 1949, 193—207.
- Lewis, G. C., Baker, G. O. & Snyder, R. S.:* Phosphate fixation in calcareous soils. Soil Science 69, 1950, 55—62.
- Lohse, H. W.:* Om Kali- og Fosforsyregødsningens Teori. Landbohøjskolens Aarsskrift 1930, 19—99.
- Lorenz, O. A. & Johnson, C. M.:* Nitrogen fertilization as related to the availability of phosphorus in certain California soils. Soil Science 75, 1953, 119—129.
- Low, P. F. & Black, C. A.:* Phosphate-induced decomposition of kaolinite. S. Sc. Soc. Am. Proc. 12, 1948, 180—184.
- Lundegårdh, H.:* Markbeskaffenhet och gödslingsbehov. Medd. nr. 444 från Centralanstalten för försöksväsendet på jordbruksområdet. 1934, 1—67.
- The triple-analysis method of testing soil fertility and probably crop reaction to fertilization. Soil Science 45, 1938, 447—454.

- Lundegårdh, H.*: Trippelanalys-metodiken för bestämning av gödslingsbehovet. Kungl. Lantbruksakademiens Tidsk. 78, 1939, 157—168.
- Die Tripelanalyse. Lantbrukshögskolans Annaler 9, 1941, 127—219.
- Die Blattenanalyse. Die wissenschaftlichen und praktischen Grundlagen einer Pflanzenphysiologischen Methode der Bestimmung des Düngerbedürfnisse des Bodens. 1945.
- Leaf analysis, 1951.
- Maas, E. F. & Bentley, C. F.*: Phosphorus fixation studies with some Saskatchewan soils. Scientific Agriculture 26, 1946, 275—287.
- MacIntire, W. H. & Hatcher, B. W.*: Evidence in support of a new concept as to the end product of superphosphate in limed soils. Soil Science 53, 1942, 43—54.
- Marel, H. W.*: Tropical soils in relation to plant nutrition. Soil Science 64, 1947, 445—451.
- Mattson, S. & Karlsson, N.*: The electrochemistry of soil formation. II. The phosphate complex. Lantbrukshögskolans Annaler 6, 1938, 109—157.
- The pedography of hydrologic soil series: V. The distribution of K and P and the Ca/K ratios in relation to the Donnan equilibrium. Lantbrukshögskolans Annaler 12, 1944, 119—130.
- Mattson, S. et al.*: Phosphate relationships of soil and plant. 1—8. Lantbrukshögskolans Annaler 16, 1949, 457—484, 17, 1950, 64—91, 107—120, 121—129, 130—140, 141—160, 222—246, 18, 1951, 128—153.
- McAuliffe, Clayton & Peech, Michael*: Utilization by plants of phosphorus in farm manure: I. Labeling of phosphorus in sheep manure with P³². Soil Science 68, 1949, 179—183.
- — & *Bradfield, Richard*: Utilization by plants of phosphorus in farm manure. II. Availability to plants of organic and inorganic forms of phosphorus in sheep manure. Soil Science 68, 1949, 185—194.
- McCool, M. M. & Weldon, M. D.*: The effect of soil type and fertilization on the composition of the expressed sap of plants. J.Am.Soc.Agr. 20, 1928, 778—792.
- McElroy, W D. & Glass, Bentley*: Phosphorus metabolism. A symposium on the role of phosphorus in the metabolism of plants and animals. I, 1951, II, 1952, 762 og 930 sider.
- McGeorge, W. T. & Breazeale, J. F.*: The relation of phosphate availability, soil permeability and carbon dioxide to the fertility of calcareous soils. Arizona Agric. Exp. Sta. Techn. Bull. 36, 1931, 361—412.
- — Phosphate solubility studies in some unproductive calcareous soils. Arizona Agric. Exp. Sta. Techn. Bull. 35, 1931, 319—360.
- — Studies on iron, aluminium and organic phosphates and phosphate fixation in calcareous soils. Arizona Agric. Exp. Sta. Techn. Bull. 40, 1932, 59—111.
- — & *Buehrer, T. F.*: Phosphate availability in calcareous soils: A function of carbon dioxide and pH. J. Am. Soc. Agr. 27, 1935, 330—335.
- The relation of potential alkalinity of phosphate to the availability of phosphate in calcareous soils. Soil Science 39, 1935, 443—452.

- McGeorge, W. T.*: Factors influencing the availability of native soil phosphates and phosphate fertilizers in Arizona soils. *Arizona Agric. Exp. Sta. Bull.* 82, 1939.
- McGregor, A. J.*: Phosphate movement and natural drainage. *Journal of Soil Science* 4, 1953, 86—96.
- Mehlich, A., Fred, E.B. & Troug, E.*: The Cunninghamella plaque method of measuring available phosphorus in soil. *Soil Science* 38, 1934, 445—462.
- Melin, Elias & Nilsson, Harald*: Transfer of radioactive phosphorus to pine seedlings by means of mycorrhizal hyphae. *Physiologia Plantarum* 3, 1950, 88—93.
- Metzger, W. H.*: The nature, extent, and distribution of fertilizer residues in the soil of some old fertility plats. *Soil Science* 47, 1939, 15—27.
- Significance of adsorption or surface fixation of phosphorus by some soils of the prairie group. *J. Am. Soc. Agr.* 32, 1940, 513—526.
- Phosphorus fixation in relation to the iron and aluminum of the soil. *J. Am. Soc. Agr.* 33, 1941, 1093—1099.
- Meyer, L.*: Vergleich der Untersuchungen von Bodenlösungen nach v. Wrangell mit den Vorschlägen von A. Nemeč. *Fortschritte der Landwirtschaft.* 5. 1930, 745.
- Midgley, A. R.*: The movement and fixation of phosphates in relation to permanent pasture fertilization. *J. Am. Soc. Agr.* 23, 1931, 788—799.
- Phosphate fixation in soils — a critical review. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* 5, 1941, 24—30.
- & *Dunklee, D. E.*: The availability to plant of phosphates applied with cattle manure. *Vermont Agric. Exp. Sta. Bul.* 525, 1945, 1—22.
- Mitscherlich, E. A.*: Die Bestimmung des Düngerbedürfnisses des Bodens. 1924 og 1930.
- Über die Phosphorsäure- und Kali-Aufnahme und -Auswertung bei verschiedenen Kulturpflanzen. *Schriften der Königsberger gelehrten Gesellschaft. Naturwissenschaftliche Klasse*, 17, 1940, 1—42.
- Über die Festlegung der Phosphorsäure im Boden. *ZPDB* 34, (79), 1944 209—213.
- Versuche über die Festlegung der Phosphorsäure durch Gaben von kohlenstoffreichem Kalk. *ZPDB* 39, (84), 1947, 1—9.
- Ein Beitrag zur Phosphorsäure- und Kali-Aufnahme der Pflanzen. *ZPDB* 41, (86), 1948, 193—201.
- Zur Ausnutzung schwerlöslicher Phosphatverbindungen durch verschiedene Pflanzenarten. *ZPDB* 44, (89), 1949, 97—100.
- Mogensen, Thorkil*: Beretning om en Metode til Bestemmelse af den mobiliserbare Fosforsyre i Jordbunden. *Jorders Grundforbedring*, IV Rk., 5, 1938, 1—11.
- Moser, F.*: Phosphorus fixation and the assimilation of fixed phosphate. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* 4, 1940, 168—172.
- Fixation and recovery of phosphate from some lateritic soils. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* 6, 1941, 328—334.
- Murphy, H. F.*: The role of kaolinite in phosphate fixation. *Hilgardia* 12, 1939, 343—382.

- Münter, F.*: Pflanzenanalyse und Düngerbedürfnis des Boden. *Journal für Landwirtschaft* 67, 1919, 229—266 og 68, 1919, 207—224.
- Møller, J. & Mogensen, Th.*: Fosforsyre-Problemet. *Hedeselskabets Tidsskr.* 1950, 67—73.
- — Metode til bestemmelse af den mobiliserbare fosforsyre i jordbunden. *Hedeselskabets Tidsskrift*, 1951, 41—62.
- Nagelschmidt, G. & Nixon, H. L.*: Formation of apatite from superphosphate in the soil. *Nature*, 154, 1944, 428.
- Neller, J. R.*: Mobility of phosphates in sandy soils. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* 11, 1947, 227—230.
- & *Lundy, H. W.*: Availability of residual phosphorus of superphosphate and rock phosphate determined by phosphorus in crops from radioactive superphosphate. *Soil Science* 74, 1952, 409—415.
- Effect of lime on availability of labeled phosphorus of phosphates in Rutlege fine sand and Marlboro and Carnegie fine sandy loams. *Soil Science* 75, 1953, 103—108.
- Nelson, W. L., Krantz, B. A., Colwell, W. E., Woltz, W. G., Hawkins, A., Dean, L. A., MacKenzie, A. J. & Rubins, E. J.*: Application of radioactive tracer technique to studies of phosphatic fertilizer utilization by crops. II. Field experiments. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* 12, 1948, 113—118.
- — *Welch, C. D. & Hall, N. S.*: Utilization of phosphorus as affected by placement: II. Cotton and corn in North Carolina. *Soil Science* 68, 1949, 137—144.
- Neubauer, H. & Schneider, W.*: Die Nährstoffaufnahme der Keimpflanzen und ihre Anwendung auf die Bestimmung des Nährstoffgehalts der Boden. *ZPDB* 2, Teil A, 1923, 329—362.
- Niklas, H., Poschenrieder, H. & Trischler, J.*: Eine neue mikrobiologische Methode zur Feststellung der Düngebedürftigkeit der Böden. *ZPDB*, Teil A, 18, 1930, 129—157.
- — — Die Kultur des Schimmelspilzes *Aspergillus niger* zur biochemischen Bestimmung der Kali- und Phosphorsäurebedürftigkeit der Böden. Die Ernährung der Pflanze, 26, 1930, 97—103.
- Odynsky, W.*: Solubility and distribution of phosphorus in Alberta soils. *Scientific Agriculture* 18, 1936, 652—664.
- Oliver, W. F.*: Absorption and translocation of phosphorus by foliage. *Scientific Agriculture* 32, 1952, 427—432.
- Olsen, Carsten*: The significance of concentration for the rate of ion absorption by higher plants in water culture. *Comptes Rendus des travaux du laboratoire Carlsberg série chimique.* 27, 1950, nr. 11.
- Olsen, Sterling R. & Gardner, Robert*: Utilization of phosphorus from various fertilizer materials: IV. Sugar beets, wheat, and barley in Colorado. *Soil Science* 68, 1949, 163—169.
- Opitz, K.*: Über das Aneignungsvermögen und das Düngebedürfnis einiger Kulturpflanzen für Phosphorsäure. *ZPDB* 35, (80), 1944, 58—71.
- Paauw, F. van der*: Invloed van de kalktoestand beschikbaarheit van fosfaat op zandgrond. (Relation between the lime status and the availability of

- phosphate on a sandy soil). Verslag van Landbouwkundige Onderzoekingen 56, 1950, 1—19.
- Parker, F. W.*: Methods of studying the concentration and composition of the soil solution. Soil Science 12, 1921, 209—232.
- Pearson, R. W. & Simonson, R. W.*: Organic phosphorus in seven Iowa soil profiles: distribution and amounts as compared to organic carbon and nitrogen. S. Sc. Soc. Am. Proc. 4, 1940, 162—167.
- *Spry, R. & Pierre, W. H.*: The vertical distribution of total and dilute acid-soluble phosphorus in twelve Iowa soil profiles. J. Am. Soc. Agr. 32, 1940, 683—696.
- Pedersen, Nørgaard, E. J.*: Organiske fosforforbindelser i jorden. Eksamensopgave 1951. Landbohøjskolens Bibliotek.
- On phytin phosphorus in the soil. Plant and Soil 4, 1953, 252—266.
- Perkins, A. T., Wagoner, C. E. & King, H. H.*: Phosphorus fixation by soil separates and fractions. Soil Science 53, 1942, 37—41.
- & *King, H. H.*: Phosphate fixation by soil minerals: Mica and related groups. S.Sc.Soc.Am.Proc. 8, 1944, 154—158.
- — Phosphate fixation by soil minerals. II. Fixation by iron, silicon and titanium oxides. Soil Science 58, 1944, 243—250.
- — Phosphate fixation by soil minerals. III. Particle size. S. Sc. Soc. Am. Proc. 9, 1945, 61—65.
- Phosphate fixation by soil minerals. IV. General. Transactions Kansas Academy of Science 48, 1945, 209—217.
- Phosphate fixation by soil minerals: V. Time of reaction. S. Sc. Soc. Am. Proc. 10, 1946, 102—106.
- Phosphate solubility in relation to cations and pH: Magnesium. S. Sc. Soc. Am. Proc. 12, 1948, 185—187.
- Phosphate fixation by soil minerals. S. Sc. Soc. Am. Proc. 13, 1949, 99—101.
- Peter, Alfred, M.*: On the distribution of phosphorus in a vertical section of bluegrass soil. Soil Science 2, 1916, 387—393.
- Petersen, Erik, J.*: Undersøgelser over Winogradsky-Sacketts Metode til Bestemmelse af Kali- og Fosforsyretræng. T. f. P. 39, 1933, 781—821.
- Petersen, H. Ingvard*: Kan Ukrudtsfloraen give Oplysninger om Jordbundens Indhold af Plantenæringsstof. Ugeskrift for Landmænd 91, 1946, 233—234.
- Pettinger, N. A.*: The expressed sap of corn plants as an indicator of nutrient needs. Journal Agricultural Research 43, 1931, 95—119.
- Pfeiffer, T., Simmermacher, W. & Rippel, A.*: Der Gehalt der Haferpflanzen an Stickstoff, Phosphorsäure und Kali unter verschiedenen Bedingungen und seine Beziehungen zu der durch eine Nährstoffzufuhr bedingten Ertragserhöhung. Journal für Landwirtschaft 67, 1919, 1—57.
- Pierre, W. H. & Parker, F. W.*: Soil phosphorus studies II. The concentration of organic and inorganic phosphorus in the soil solution and the availability of organic phosphorus to plants. Soil Science 24, 1927, 119—128.

- Pierre, W. H. & Pohlman, G. G.*: Preliminary studies of the exuded plant sap and the relation between composition of the sap and the soil solution. *J. Am. Soc. Agr.* 25, 1933, 144—160.
- — The phosphorus concentration of the exuded sap of corn as a measure of the available phosphorus of the soil. *J. Am. Soc. Agr.* 25, 1933, 160—171.
- The phosphorus cycle and soil fertility. *J. Am. Soc. Agr.* 40, 1948, 1—14.
- Pierre, W. H. & Norman, A. G.*: Soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition. *Agronomy. A series of monographs. Prepared under the auspices of the American Society of Agronomy. Volume IV, 1953, 1—492.*
- Pohlman, G. G.*: Some limitations of plant juice analyses as indicators of the nutrient needs of plants. *J. Am. Soc. Agr.* 27, 1935, 195—207.
- Potter, R. S. & Benton, T. H.*: The organic phosphorus of soils. *Soil Science* 2, 1916, 291—298.
- & *Snyder R. S.*: The organic phosphorus of soils. *Soil Science* 6, 1918, 321—332.
- Poulsen, Find J.*: Studier over forskellige Fosfaters Gødningsværdi. I. Om nogle Thomasfosfaters Gødningsværdi. 397. ber. *T. f. P.* 50, 1946, 617—632.
- Studier over forskellige Fosfaters Gødningsværdi. II. Om nogle Ferri- og Aluminiumfosfaters Gødningsværdi. 411. ber. *T.f.P.* 51, 1948, 616—639.
- Studier over forskellige fosfaters gødningsværdi. III. Om stofproduktionen og optagelsen af fosfor fra forskellige fosforgødninger. 428. ber. *T.f.P.* 53, 1950, 413—442.
- Pratt, P. F. & Thorne, D. W.*: Solubility and physiological availability of phosphate in sodium and calcium systems. *S. Sc. Soc. Am. Proc.* 13, 1949, 213—217.
- Prince, A. B.*: Residual effects of superphosphate application on soil phosphorus level and growth of crimson clover as measured by yield and phosphorus uptake. *Soil Science* 75, 1953, 51—57.
- Pugh, A. F.*: Laws of soil colloidal behavior: III. Colloidal phosphates. *Soil Science* 38, 1934, 315—334.
- Rasmussen, L.*: Oversigt over de sjællandske Landboforeningers Virksomhed for Planteavlens Fremme indtil Aaret 1948. 1949.
- Rathje, W.*: Zur Kenntnis der Phosphate, VI. Das Phosphatgleichgewicht im Boden. *ZPDB* 28, (73), 1942, 129—159.
- Ravikovitch, S.*: Anion exchange: I. Adsorption of phosphoric acid ions by soils. *Soil Science* 38, 1934, 219—239.
- Anion exchange: II. Liberation of the phosphoric acid ions adsorbed by soils. *Soil Science* 38, 1934, 279—290.
- Rubins, E. J.*: Residual phosphorus of heavily fertilized acid soils. *Soil Science* 75, 1953, 59—67.
- Russell, E. J. & Prescott, J. A.*: The reaction between dilute acids and the phosphorus compounds of the soil. *Journal of Agricultural Science* 8, 1916, 65—110.
- Sackett, W. G. & Stewart, L. C.*: A bacterial method for determining mineral soil deficiencies by use of the soil plaque. *Colorado Agr. Exp. Sta. Bul.* 375, 1931, 1—36.

- Salonen, Martti*: Fosforin esiintymismuodoista suomen maalajeissa. (Über die Formen des Vorkommens von Phosphor in dem Bodenarten Finnlands). Acta Agralia Fennica 48, 1941, 1—124.
- Kalkituksen vaikutuksista maaporan orgaaniseen ja helppoliukoiseen fosforiin. (Effect of liming on organic and easily soluble phosphorus of soil). Maataloustieteellinen Aikakauskirja 18, 1946, 1—10.
- Salter, R. M. & Barnes, E. E.*: The efficiency of soil and fertilizer phosphorus as affected by soil reaction. Ohio Exp. Sta. Bul. 553, 1935, 1—49.
- Sanengen, A.*: Vekstforsök med fosfatgödsel preparert med P³². Nordisk Jordbruksforskning 31—32, 1950, 338—345.
- Scarseth, G. D. & Tidmore, J. W.*: The fixation of phosphates by soil colloids. J. Am. Soc. Agr. 26, 1934, 138—151.
- — The fixation of phosphates by clay soils. J. Am. Soc. Agr. 26, 1934, 152—162.
- The mechanism of phosphate retention by natural aluminosilicate colloids. J. Am. Soc. Agr. 27, 1935, 596—616.
- Plant-tissue testing in diagnosis of the nutritional status of growing plants. Soil Science 55, 1943, 113—120.
- Schaller, F. W.*: The downward movement of lime and superphosphate in relation to permanent pasture fertilization. S. Sc. Soc. Am. Proc. 5. 1941, 162—166.
- Schleede, A., Schmidt, W. & Kindt, H.*: Zur Kenntnis der Kalziumphosphate und Apatite. Zeits. Elektrochem 30, 1932, 633—641.
- Schoen, U.*: Die Bindung von Anionen, besonders von Phosphat-Ionen an Tonen — eine Übersicht. ZPDB 60, 1953, 31—54.
- Schollenberger, C. J.*: Organic phosphorus of soils. Experimental work on methods for extraction and determination. Soil Science 6, 1918, 365—395.
- Organic phosphorus content of Ohio soils. Soil Science 10, 1920, 127—141.
- Arsenate-displaceable phosphate in long-fertilized and unfertilized plot soils. Soil Science 64, 1947, 371—378.
- Schreiner, O. & Shorey, E. C.*: Chemical nature of soil organic matter. U. S. Dept. Agr. Bur. Soils. Bul. 74, 1911.
- Semb, G.*: Undersøkelser over innholdet av lettoppløselig fosforsyre i ulike skikter i en del jordprofiler. Meld. fra Norges Landbrukshøgskole 21, 1941, 90—126.
- Undersøkelser over fosforsyrens oppløselighet og binding i østnorske jordtyper. Meld. fra Norges Landbrukshøgskole 23, 1943, 1—145.
- Orienterende karforsøk over forholdet mellom jordens surhetsgrad og fosfatvirkningen. Meld. fra Norges Landbrukshøgskole 28, 1943, 1—19.
- & *Rimeslåtten, H.*: Undersøkelser over jordens surhetsgrad og fosfattilstand på en del gårder i Buskerud Fylke og i Ås, Akershus Fylke. Jordundersøkelsen småskrift nr. 29, 1944, 1—86. (også i Meld. fra Norges Landbrukshøgskole 1944).
- Shorey, E. C.*: Some organic soil constituents. U. S. Dept. Agr. Bur. Soils Bul. 88. 1913.
- Sieling, Dale H.*: Role of kaolin in anion sorption and exchange. S. Sc. Soc. Am. Proc. 11, 1947, 161—170.

- Spinks, J. W. T. & Barber, S. A.*: Study of fertilizer uptake using radioactive phosphorus. I. Scientific Agriculture, 27, 1947, 145—156. II. i 28, 1948 79—87 og III i 28, 1948, 309—314.
- Stanford, George & Nelson, L. B.*: Utilization of phosphorus as affected by placement. I. Corn in Iowa. Soil Science 68, 1949, 129—135.
- — Utilization of phosphorus from various fertilizer materials: III. Oats and alfalfa in Iowa. Soil Science 68, 1949, 157—161.
- Steenbjerg, F.*: Om kemiske Planteanalyser og deres Anvendelse. T. f. P. 49, 1945, 158—173.
- Stelly, M. & Pierre, W. H.*: Forms of inorganic phosphorus in the C horizons of some Iowa soils. S. Sc. Soc. Am. Proc. 7, 1943, 139—147.
- Stephenson, R. E. & Chapman, H D.*: Phosphate penetration in field soils. J. Am. Soc. Agr. 23. 1931, 759—770.
- & *Schuster, C. E.*: Laboratory, greenhouse and field methods of studying fertilizers needs. Soil Science 52, 1941, 137—153.
- Stout, P. R.*: Alterations in the crystal structure of clay minerals as a result of phosphate fixation. S. Sc. Soc. Am. Proc. 4, 1940, 177—182.
- Struthers, Paul H., & Sieling, Dale H.*: Effect of organic anions on phosphate precipitation by iron and aluminium as influenced by pH. Soil Science 69, 1950, 205—213.
- Swenson, R. M., Cole., C. V. & Sieling, D. H.*: Fixation of phosphate by iron and aluminium and replacement by organic and inorganic ions. Soil Science 67, 1949, 3—22.
- Teakle, L. J. H.*: Phosphate in the soil solution as affected by reaction and cation concentrations. Soil Science 25, 1928, 143—163.
- Thomas, Walter & Mack, Warren, B.*: Foliar diagnosis in relation to development and fertilizer treatment of the potato. Journal of Agricultural Research 57, 1938, 397—414.
- Present status of diagnosis of mineral requirements of plants by means of leaf analysis. Soil Science 59, 1945, 353—374.
- Thornton, S. F.*: Soil and fertilizer studies by means of the Neubauer method. Purdue Univ. Agr. Exp. Sta. Bul. 399, 1935, 1—38.
- *Connor, S. D. & Fraser R. R.*: The use of rapid chemical tests on soils and plants as aids in determining fertilizer needs. Purdue Univ. Agr. Exp. Sta. Cir. 204, 1939.
- Tidmore, J. W.*: The phosphorus content of the soil solution and its relation to plant growth. J. Am. Soc. Agr. 22, 1930.
- Tind-Christensen, J. C.*: Gødnings- og kalkforsøg på dynd- og klægjorder. 439. ber. T. f. P. 54, 1951, 318—335.
- Torstensson, G.*: Ein Beitrag zur Frage der Verteilung der Düngerphosphorsäure im Ackerboden bei verschiedener Art der Aufbringung. Lantbruks-högskolans Annaler 4, 1937, 191—219.
- & *Eriksson, S.*: Konstgödselns nedbrukning vid användning av olika redskap. Kungl. Lantbruksakademiens Tidsk. 78, 1939, 215—234.
- Toth, S. J. & Bear, F. E.*: Phosphorus adsorbing capacities of some New Jersey soils. Soil Science 64, 1947, 199—211.

- Truog, E.*: The determination of readily available phosphorus in soils. J. Am. Soc. Agr. 22, 1930, 874—882.
- Volk, G. W.*: Response to residual phosphorus of cotton in continuous culture. J. Am. Soc. Agr. 37, 1945, 330—340.
- Vries, de O. & Hetterschij, C. W. G.*: Beweglichkeit der Phosphorsäure im Boden. ZPDB 2 (47), 1936, 178—186.
- — & *Paauw, F.*: Die Löslichkeit von Bodenphosphat in Wasser, Zitronensäure und Königswasser. ZPDB 6, (51) 1938, 144—154.
- Ware, L. M., Brown, O. & Yates, H.*: Residual effects of phosphorus on Irish potatoes in South Alabama. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 41, 1942, 265—269.
- Way, J. T.*: On the power of soils to absorb manure. Journal of the Royal Agricultural Society of England 11, 1850, 313—379.
- Weis, Fr.*: Fysiske og kemiske Undersøgelser over danske Hedejorder. Det kgl. danske Videnskabernes Selskab. Biologiske Meddelelser VII, 9, 1929.
- Weiser, V. L.*: Fixation and penetration of phosphates in Vermont soils. Vermont Agr. Exp. Sta. Bul. 356, 1933.
- Welch, C. D., Hall, N. S. & Nelson, W. L.*: Utilization of fertilizer and soil phosphorus by soybeans. S. Sc. Soc. Am. Proc. 14, 1950, 231—235.
- Westermann, T.*: Om Indholdet af Plantenæring i Vandet fra vore Vandløb. T. f. P. 4, 1898, 157—165.
- Wiklander, L. & Hallgren, G.*: Studies on gyttja soils. I. Distribution of different sulfur and phosphorus forms and of iron, manganese and calcium carbonate in a profile from Kungsängen. Lantbrukshögskolans Annaler 16, 1949, 811—827.
- Kinetics of phosphate exchange in soils. Lantbrukshögskolans Annaler 17, 1950, 407—424.
- Wild, Alan*: The retention of phosphate by soil. A review. Journal of Soil Science 1, 1950, 221—238.
- The effect of exchangeable cations on the retention of phosphate by clay. Journal of Soil Science 4, 1953, 72—85.
- Williams, Colin, H.*: Studies on soil phosphorus. I. A method for the partial fractionation of soil phosphorus. Journal of Agricultural Science 40, 1950, 233—242, 243—256, 257—262.
- Wrangell, M. v.*: Ueber Bodenphosphate und Phosphorsäurebedürftigkeit. I. Landwirtschaftliche Jahrbuch 63, 1926, 627—668.
- & *Haase, W.*: Ueber den Phosphorsäuregehalt natürlicher Bodenlösungen. IV. Landwirtschaftliche Jahrbuch 63, 1926, 707—738.
- Wrenshall, C. L. & Dyer, W. J.*: Organic phosphorus in soils. II. The nature of the organic phosphorus compounds. A, Nucleic acid derivatives. B, Phytin. III, The decomposition of some organic phosphorus compounds in soil cultures. Soil Science 51, 1941, 235—248, 323—329.
- Yoshida, R. K.*: Studies on organic phosphorus compounds in soil, isolation of inositol. Soil Science 50, 1940, 81—89.