

Fosforindhold og fosforbindingskapacitet i sandede jorde og sedimenter

Vibeke Ernstsen



Fosforindhold og fosforbindingskapacitet i sandede jorde og sedimenter

Vibeke Ernstsen

Indholdsfortegnelse

Sammendrag	3	
1	Introduktion	6
2	Feltarbejde og analysemetoder	7
3	Indhold af fosfor i sandede sedimenter	9
3.1	Yoldia flade	9
3.1.1	Fosfor - $P_{H_2SO_4}$	9
3.1.2	Fosfor - P_{Olsen}	9
3.2	Alluvialkegle	9
3.2.1	Fosfor - $P_{H_2SO_4}$	9
3.2.2	Fosfor - P_{Olsen}	10
3.3	Proximal hedeslette.....	10
3.3.1	Fosfor - $P_{H_2SO_4}$	10
3.3.2	Fosfor - P_{Olsen}	10
3.4	Distal hedeslette.....	10
3.4.1	Fosfor - $P_{H_2SO_4}$	10
3.4.2	Fosfor - P_{Olsen}	11
3.5	Bakkeø - smeltevandssand.....	11
3.5.1	Fosfor - $P_{H_2SO_4}$	11
3.5.2	Fosfor - P_{Olsen}	11
3.6	Bakkeø - morænesand.....	11
3.6.1	Fosfor - $P_{H_2SO_4}$	11
3.6.2	Fosfor - P_{Olsen}	12
3.7	Moræneflade - morænesand.....	12
3.7.1	Fosfor - $P_{H_2SO_4}$	12
3.7.2	Fosfor - P_{Olsen}	12
4	$P_{H_2SO_4}$ i relation til dybde og landskabstype	20
5	P_{Olsen} i relation til dybde og landskabstype	22
6	Sammenhæng mellem puljer af $P_{H_2SO_4}$ og P_{Olsen}	23
7	Fosforbindingskapacitet og forbrug af kapacitet	25
7.1	Forskellige beregningsmetoder	25
7.1.1	Yoldiaflade – PSC og DPS.....	26
7.1.2	Alluvialkegle - PSC og DPS	27
7.1.3	Proximal hedeslette - PSC og DPS.....	27
7.1.4	Distal hedeslette - PSC og DPS.....	27
7.1.5	Bakkeø, smeltevandssand - PSC og DPS	28
7.1.6	Bakkeø, morænesand - PSC og DPS	28

7.1.7	Moræneflade, morænesand - PSC og DPS	29
8	Fosforbindingskapaciteter	30
8.1	Dybde og landskabstype	30
8.2	Beregningsmetode	30
9	Forbrug i fosforbindingskapacitet	32
9.1	Dybde og landskabstype	32
9.2	Beregningmetode	33
10	Sammenfatning	34
11	Perspektivering	35
12	Referencer	36

Sammendrag

Puljer af forskellige former for fosfor er undersøgt i sandede jord- og sedimentprøver fra den umættede zone, ned til maksimalt 10 meter under terræn. Desuden beregnes fosforbindingskapaciteten efter forskellige metoder og kapaciteterne sammenholdes med fordelingen af fosfor til brug for en vurdering af forbruget af fosforbindingskapacitet.

Prøverne er indsamlet på 25 lokaliteter (marker), der er fordelt på *forskellige landskabstyper* (Yoldia flade, hedeslette - alluvialkegle, proximal og distal -, bakkeø eller moræneflade) karakteriseret ved *forskellige typer sandede aflejringer* (marint sand, smeltevandssand eller morænesand) af *forskellige aldre* (Saale, Weichsel eller postglaciale). Alle marker er karakteriseret ved 1) at høre til samme bedriftstype (svinebrug med >1 dyrenhed pr. ha), 2) at være beliggende tilstrækkelig langt fra ejendommen så overgødskning minimeres, samt 3) at modtage husdyrgødning i form af gylle. Desuden inddrages allerede publicerede data fra andre marker, der ligeledes opfylder de her nævnte kriterier.

Fosfortallet (Pt) i pløjelaget på de undersøgte marker varierer mellem 3,1 og 8,5. Det laveste fosfortal blev målt i en jordprøve fra Yoldia fladen og det højeste fosfortal blev målt på den distale del af hedesletten samt i aflejringer af smeltevandssand og morænesand på bakkeø.

Puljen af uorganisk bundet fosfat i de undersøgte jord- og sedimentprøver er bestemt ved ekstraktion med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$). I 78 % af prøverne ($n=188$) var indholdet af $P_{H_2SO_4} < 5 \text{ mmol P kg}^{-1}$, 14 % indeholdt 5-10 mmol P kg^{-1} , 5 % indeholdt 10-15 mmol P kg^{-1} og de resterende 3 % indeholdt $> 15 \text{ mmol P kg}^{-1}$.

På samtlige lokaliteter, med undtagelse af en enkelt på morænesand på bakkeø, fremstår indholdet af $P_{H_2SO_4}$ markant forøget i pløjelaget sammenlignet med prøver, der er udtaget dybere nede. På tre af de undersøgte marker kunne forøgelsen af $P_{H_2SO_4}$ registreres under pløjelaget, ned til maksimalt 1 meter under terræn.

Under den fosforberigede zone er baggrundskoncentrationen af $P_{H_2SO_4}$ betydelig højere i de marine aflejringer på Yoldia fladen (2-11 mmol P kg^{-1}) og i morænesand af Weichsel alder (3-7 mmol P kg^{-1}) end i prøver fra andre landskabstyper. Baggrundskoncentrationerne i sedimenterne på hedesletten hører til en mellemkategori med indhold af $P_{H_2SO_4}$ på 0,3-1,5 mmol P kg^{-1} mens sedimenterne på bakkeøerne hører til kategorien med de laveste indhold af $P_{H_2SO_4}$ ($< 0.5 \text{ mmol P kg}^{-1}$). På enkelte af de undersøgte lokaliteter på bakkeø steg indholdet af $P_{H_2SO_4}$ i prøver udtaget dybere end fire meter under terræn. Denne dybe pulje af uorganisk bundet fosfat kan eksempelvis skyldes en omfordeling og opkoncentrering af fosfor som følge af mikrobiologiske og kemiske processer, geologiske forhold eller afspejle fordelingen af fosfor efter en tidligere ugødnet skov.

Kun en del af den tilstedeværende fosfor forekommer på en form, der er plantetilgængelig. I nærværende undersøgelse er denne pulje af fosfor bestemt stort set som beskrevet af Olsen et al. (1954), ved ekstraktion med natriumhydrogencarbonat, og denne pulje beskrives i det følgende som P_{Olsen} .

Indholdet af P_{Olsen} er markant lavere end indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ og udgør således kun en lille del af puljen af uorganisk bundet fosfat. I 83 % af de undersøgte prøver var indholdet af $P_{\text{Olsen}} < 0,5$ mmol P kg^{-1} , i 15 % mellem 0,5 og 2,5 mmol P kg^{-1} og i de resterende 2 % var indholdet $> 2,5$ mmol P kg^{-1} .

En analyse af hele datamaterialet viste en ringe sammenhæng ($R^2=0,54$) mellem indholdet af P_{Olsen} og $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$. For prøver udtaget i den overfladenære fosforberigede zone ses en rimelig god sammenhæng mellem de to fosforpuljer ($R^2=0,79$). Sammenhængen kan beskrives som $P_{\text{Olsen}} = 0,60 \times \ln P_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 0,55$ (mmol P kg^{-1}). Det har imidlertid ikke været muligt, at beskrive samme gode sammenhæng for de to fosforpuljer i prøver udtaget under den fosforberigede zone ($R^2 = 0,13$). Dette kan skyldes forskelle i bl.a. mængde og sammensætning af de tilstedeværende fosforholdige mineraler ligesom forskelle i opløselighed og bindingsmekanisme kan spille en rolle.

Resultaterne viser således, at der i forbindelse med studier af bl.a. binding og mobilitet af fosfor med fordel kan differentieres mellem fosfor der er blevet tilført fra overfladen og fosfor, der findes under den fosforberigede zone og som er geologisk betinget.

Fosforbindingskapaciteten, der ofte ses forkortet PSC (efter det engelske *Phosphor Sorption Capacity*) beskriver jordlagenes evne til at tilbageholde fosfor. I litteraturen findes flere metoder til beregning af jordens fosforbindingskapacitet. I denne undersøgelse er jorden fosforbindingskapacitet beregnet efter Borggaard et al. (2004) - PSC - baseret på indholdet af jernoxiderne Fe_d og Fe_o samt indholdet af aluminiumoxider (Al_o) og efter en modificeret version af Borggaard et al. - PSC_1 - baseret alene på indholdet af Fe_o og Al_o .

Fosforbindingskapaciteterne PSC og PSC_1 beregnet for en del af de indsamlede prøver ($n=66$) fra A-, B-, og C-horisonter viste en god lineær sammenhæng ($R^2= 0,996$) mellem de to beregningsmetoder, der kunne beskrives som $\text{PSC}_1 = 0,98 \times \text{PSC}$ (mmol P kg^{-1}).

Analysen viste endvidere, at Fe_o i danske, sandede, kalkfrie jord- og sedimentprøver, som de her undersøgte, kun bidrager i meget ringe grad til den samlede fosforbindingskapacitet og at beregningerne af fosforbindingskapaciteten kan baseres på den billigere og mindre analysekrævende beregningsmetode beskrevet for PSC_1 .

Fosforbindingskapaciteter - PSC_2 - beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) viser samme trend som beskrevet for PSC_1 ($R^2=0,99$). Sammenhængen kan her beskrives som $\text{PSC}_2 = 2,80 \times \text{PSC}_1$ (mmol P kg^{-1}) og den hollandske beregningsmetode giver således næsten tre gange højere fosforbindingskapaciteter end de beregnet efter PSC_1 .

Beregninger af fosforbindingskapaciteten PSC_3 , som beskrevet af Van der Zee (1988), korrelerer ret godt med PSC_1 ($R^2=0,99$) og sammenhængen kan beskrives som $\text{PSC}_1=0,93 \times \text{PSC}_3$ (mmol P kg^{-1}).

Beregningerne af fosforbindingskapaciteterne viser - uanset beregningsmetode - at prøver fra den øverste ½-1 meter under terræn normalt besidder en større evne til at binde fosfor end dybereliggende sedimenter, der i langt mindre grad har været udsat for forvittrings- og jordbundsdannede processer. Beregningerne viser desuden, at de ældste og de mest forvitrede aflejringer (morænesand og til dels også smeltevandssand på bakkeøer) er karakteriseret ved de største

fosforbindingskapaciteter og at de laveste fosforbindingskapaciteter er beregnet for prøver fra den proximale - og distale hedeslette.

Forbruget af fosforbindingskapacitet (DPS) er forholdsvis højt i pløjelaget på alle landskabselementer. Puljen af $P_{H_2SO_4}$ udgør mellem 55 og 157 % af den beregnede PSC_1 fosforbindingskapacitet i pløjelaget på 21 af de undersøgte marker, og mindre end 50 % på de resterende 4 undersøgte marker. Kun på Yoldia fladen samt på en enkelt lokalitet på morænesand på bakkeø forbliver forbruget af fosforbindingskapacitet høj i de underliggende jordlag.

På nuværende tidspunkt foreligger der ikke resultater der kan beskrive om sammenhængen mellem forbruget i fosforbindingskapaciteter beregnet efter PSC_1 metoden og kvaliteten af det nedsivende vand. Det anbefales at denne sammenhæng etableres til brug for en vurdering af samspillet mellem sandede jorde og sedimenters evne til at binde fosfor i relation til vandmiljøet. Således beskriver Schoumans og Groenendijk (2000) at det nedsivende vand vil indeholde mere end $0,1 \text{ mg ortho-P L}^{-1}$, når mængden af fosfor (ekstraheret med en ammoniumoxalat opløsning) udgør mere end 25 % af fosforbindingskapaciteten, som beregnet efter PSC_2 metoden.

1 Introduktion

I forbindelse med den øgede og intensiverede produktion i landbruget op gennem det sidste århundrede er fosforforbruget i landbruget steget betydeligt. Fosforanvendelsen var omkring 10.000 tons i år 1900 og steg til omkring 110.000 tons pr. år i midten af firserne, hvorefter tilførslen aftog til omkring 71.000 tons omkring årtusindskiftet. Ved at sammenholde til- og fraførslen af fosfor i landbruget kunne det årlige overskud beregnes til godt 33.000 tons i 2000, hvilket svarer til ca. 13.4 kg fosfor per ha. (Poulsen et al., 2005). Alene for perioden fra 1989 og frem til 2001 skete der en nettotilførsel og absolut ophobning af fosfor på landbrugsarealerne på godt 200 kg pr. ha. (Rubæk et al., 2005).

Fosfor findes i jorden dels bundet i organiske stof dels på uorganisk form som fosfat. Planterne kan kun optage fosfor i form af fosfat, hvorfor puljen af fosfor bundet i organisk stof først bliver plantetilgængeligt når det organiske stof mineraliseres (Borggaard et al., 1991). Uorganisk fosfat i jorden findes næsten udelukkende som orthofosfat bundet i tungtopløselige fosfater (eksempelvis calciumfosfater) eller sorberet til uorganiske bestanddele, herunder især aluminium- og jernoxider samt lersilikater.

Indholdet af fosfat i jord og sedimenter kan bestemmes ved ekstraktion med stærke syrer, eksempelvis saltsyre og svovlsyre, medens organisk bundet fosfor beregnes ved forskellen mellem det totale indhold af fosfor og indholdet af fosfat. En række analytiske parametre (eksempelvis syrestyrke, ekstraktionstid, temperatur etc.) er afgørende for hvor meget fosfor der bestemmes ved ekstraktionen (Borggaard et al., 1991).

I nærværende undersøgelse bestemmes to puljer af uorganiske fosfater, henholdsvis $P_{H_2SO_4}$ efter ekstraktion med svovlsyre og P_{Olsen} efter ekstraktion med natriumhydrogencarbonat. Jordlagenes potentielle fosforbindingskapacitet beregnes og forbruget i fosforbindingskapacitet beskrives for sandede, kalfrie jorde og sedimenter fra den umættede zone med maksimal udtagingsdybde på 10 meter under terræn.

2 Feltarbejde og analysemetoder

Jord- og sedimentprøver er indsamlet på 25 lokaliteter (marker) fordelt på *forskellige landskabstyper* (Yoldia flade, hedeslette – alluvialkegle, proximal og distal -, bakkeø eller moræneflade) karakteriseret ved *forskellige typer sandede aflejringer* (marint sand, smeltevandssand eller morænesand) af *forskellige aldre* (Saale, Weichsel eller postglacialt), figur 1. Alle marker er karakteriseret ved 1) at høre til samme bedriftstype (svinebrug med mere end 1 dyrenhed pr. ha), 2) at være beliggende tilstrækkelig langt fra ejendommen så overgødskning minimeres samt 3) at modtage husdyrgødning i form af gylle.

Jordprøver fra jordoverfladen og ned til ca. 1 meter under terræn er udtaget i udgravninger og prøver fra større dybde er udtaget med snegl i borer, der blev placeret i umiddelbart nærhed af udgravningerne.

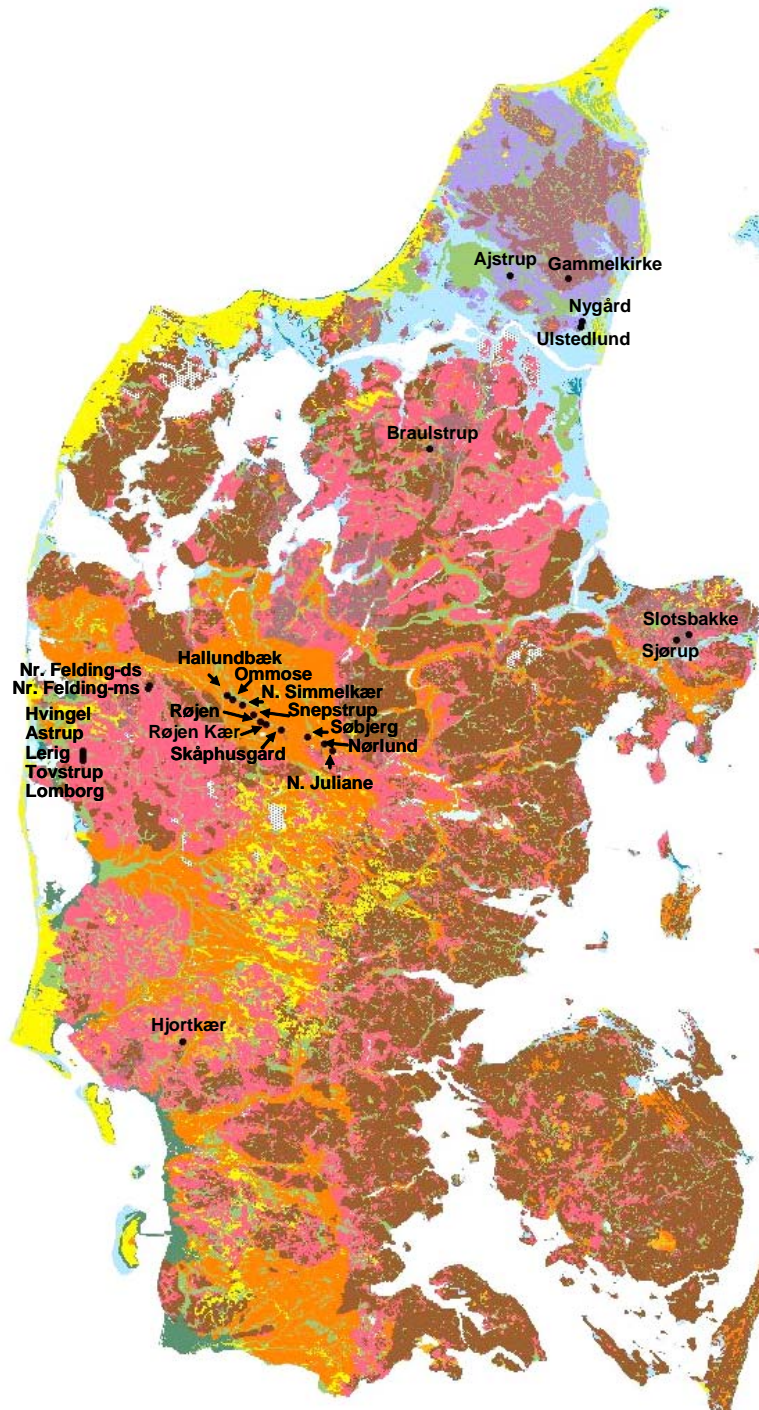
Jordprøverne blev bragt til laboratoriet, hvor de blev homogeniseret og sigtet (< 2mm) og efterfølgende lufttørret.

Indholdet af uorganisk bundet fosfat i jord- og sedimentprøver (< 2mm) er ekstraheret med 0,2 N svovlsyre (H_2SO_4) og indholdet er bestemt fotometrisk (metode 402 i Hansen og Sørensen, 1996). Denne pulje af fosfor beskrives i det følgende som $P_{H_2SO_4}$. Resultater opnået ved denne metode kan anvendes ved beregning af fosforsyretallet (Ft), hvor 1 Ft er defineret som 3 mg P pr. 100 g jord.

Indholdet af plantetilgængeligt fosfor i jord- og sedimentprøver (< 2mm) er ekstraheret med 0,5 M natriumhydrogencarbonat ($NaHCO_3$) og indholdet er bestemt fotometrisk ved 890 nm (metode 403 i Hansen og Sørensen, 1996). Metoden bygger på Olsen et al. (1954) og puljen af fosfor bestemt ved denne metode omtales ofte som Olsen-P og i det følgende som P_{Olsen} . Fosfortallet (Pt) er baseret på resultater opnået ved denne metode og 1 Pt er defineret som 1 mg PO_4 -P pr 100 gram jord.

Frie, ikke krystallinske jernoxider (Fe_o) og frie aluminiumoxider (Al_o) er bestemt ved at behandle lufttør jord (< 2 mm) med en ammoniumoxalat-opløsning (pH 3) bestående af 0,2 M ammoniumoxalat og 0,2 M oxalsyre. Indholdet af jern og aluminium i ekstrakten er bestemt ved atomabsorptionsspektrometri (AAS) (Schwertmann, 1964).

Frie amorfe og krystallinske jernoxider (Fe_d) er bestemt ved at behandle lufttør jord (< 2mm) med en blanding af 0,3 M natriumcitrat og 1 M natriumhydrogencarbonat (1:8), opvarme opslæmningen til 70-80 °C og derefter tilsætter natriumdithionit. I ekstraktet måles indholdet af jern ved atomabsorptionsspektrometri (AAS) (Mehra og Jackson, 1960).



Figur 1. Kort med de 25 lokaliteter hvorfra der er indsamlet jord- og sedimentprøver. Lokaliteterne er fordelt på forskellige landskabstyper: Ajstrup, Nygård og Ulstedlund på *Yoldia flade*; Nedre Juliane, Nørnlund og Søbje på *alluvialkegle*; Skåphusgård, Røjen Kær, Røjen på *proximal hedeslette*; Snepstrup, Nedre Simmelkær, Ommose og Hallund bæk på *distal hedeslette*; Nr. Felding-ds og Hjortkær på *smeltevandssand på bakkeø*; Lomborg, Tovstrup, Lerig, Astrup, Hvingel og Nr. Felding-ms på *morænesand på bakkeø*; og Gammelkirke, Braulstrup, Slotsbakke og Sjørup på *morænesand på moræneflade*.

3 Indhold af fosfor i sandede sedimenter

3.1 Yoldia flade

For landskabstypen Yoldia flade er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ og P_{Olsen} bestemt på prøver udtaget på tre lokaliteter beliggende ved Ajstrup, Nygård og Ulstedlund, figur 1.

3.1.1 Fosfor - $P_{H_2SO_4}$

Ved Ajstrup er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ 13 mmol P kg^{-1} i pløjelaget, hvorefter indholdet aftager og varierer mellem 1,5 og 4,8 mmol P kg^{-1} i de efterfølgende prøver udtaget ned til 6 meter under terræn, figur 2. Ved Nygård er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ i pløjelaget 10 mmol P kg^{-1} og herefter aftager indholdet til 6,6 mmol P kg^{-1} i 0,55 meter under terræn hvorefter det stiger til 11,3 mmol P kg^{-1} i 4 meters dybde. Ved Ulstedlund er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ 22 mmol P kg^{-1} i pløjelaget og 32 mmol P kg^{-1} i 0,4 meters dybde hvorefter indholdet aftager til 9 mmol kg^{-1} i 1 meter og yderligere til 4 mmol P kg^{-1} i 4 meters dybde.

3.1.2 Fosfor - P_{Olsen}

Indholdet af P_{Olsen} er markant lavere end indholdet af $P_{H_2SO_4}$ mens fordelingen er nogenlunde som beskrevet for $P_{H_2SO_4}$, figur 2. Ved Ajstrup er indholdet af P_{Olsen} lavt ($<0,1$ mmol P kg^{-1}) i pløjelaget, og stiger til 1,4 mmol P kg^{-1} i 0,35 meter hvorefter det aftager til 0,1 mmol P kg^{-1} ned til 6 meter under terræn. Ved Nygård er indholdet af P_{Olsen} 2,0 mmol P kg^{-1} i pløjelaget, hvorefter det aftager til 0,1 mmol P kg^{-1} i 1 meter under terræn for atter at stige til 0,5 mmol P kg^{-1} i 4 meter under terræn. Ved Ulstedlund er indholdet af P_{Olsen} bestemt til henholdsvis 2,3 og 3,0 mmol P kg^{-1} i henholdsvis 0,2 meter og 0,4 meter under terræn, hvorefter indholdet aftager til 1,2 mmol kg^{-1} i 1 meter under terræn og yderligere til omkring 0,2 mmol P kg^{-1} i 3 og 4 meter under terræn.

Fosfortallet (Pt) i pløjelaget er beregnet til 4,2, 6,2 og 7,2 på de undersøgte marker.

3.2 Alluvialkegle

For landskabstypen alluvialkegle (dvs. den israndsnære del af hedesletten) er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ og P_{Olsen} bestemt på prøver udtaget ved Nedre Juliane, Nørlund og Søbjerg på Karup hedeslette, figur 1.

3.2.1 Fosfor - $P_{H_2SO_4}$

På samtlige lokaliteter er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ i pløjelaget bestemt til mellem 5 og 9 mmol P kg^{-1} , figur 3. Ved Nedre Juliane aftager indholdet af $P_{H_2SO_4}$ under pløjelaget og ned til 6 meter under terræn til 0,7 mmol P kg^{-1} . Ved Nørlund aftager indholdet af $P_{H_2SO_4}$ ligeledes markant under pløje-

og varierer mellem 0,2 og 1,4 mmol P kg⁻¹ ned til 8 meter under terræn. Ved Søbjerg sker der ligeledes et markant fald i indholdet af P_{H₂SO₄} under pløjelaget hvor indholdet er bestemt til mellem 1,1 og 1,5 mmol P kg⁻¹ ned til 2 meter under terræn.

3.2.2 Fosfor - P_{Olsen}

Indholdet af P_{Olsen} er ved alle tre lokaliteter højest i pløjelaget hvor indholdet er 1,0 - 2,1 mmol P kg⁻¹, figur 3. Herefter aftager indholdet af P_{Olsen} til < 0,1 mmol P kg⁻¹ i prøver udtaget ned til 8 meter under terræn.

Fosfortallet (Pt) i pløjelaget er 3,1, 4,3 og 6,4 på de undersøgte marker.

3.3 Proximal hedeslette

For landskabstypen proximal hedeslette (dvs. den del af hedesletten, der følger efter alluvialkeglen, i retning væk fra isranden) er indholdet af P_{H₂SO₄} og P_{Olsen} bestemt for prøver udtaget ved Røjen Kær, Røjen og Skåphusgård på Karup hedeslette, figur 1.

3.3.1 Fosfor - P_{H₂SO₄}

Ved samtlige lokaliteter er indholdet af P_{H₂SO₄} i pløjelaget, bestemt til mellem 5,2 og 12 mmol P kg⁻¹, figur 4. Indholdet af P_{H₂SO₄} aftager under pløjelaget til mellem 0,5 og 1,0 mmol P kg⁻¹.

3.3.2 Fosfor - P_{Olsen}

Indholdet af P_{Olsen} varierer mellem 1,3 og 2,2 mmol P kg⁻¹ i pløjelaget, hvorefter indholdet aftager til under 0,1 mmol P kg⁻¹ for prøver udtaget ned til 2 meter under terræn, figur 4.

Fosfortallet (Pt) i pløjelaget er beregnet til 4,1, 6,2 og 6,7 på de undersøgte marker.

3.4 Distal hedeslette

For landskabstypen distal hedeslette (dvs. den del af hedesletten, der følger umiddelbart efter den proximale del af hedesletten og som ligger længst væk fra isranden) er indholdet af P_{H₂SO₄} og P_{Olsen} bestemt for prøver udtaget på fire lokaliteter ved Ommose, Hallund bæk, Snepstrup og Nedre Simmelkær på Karup hedeslette, figur 1.

3.4.1 Fosfor - P_{H₂SO₄}

Ved alle lokaliteter er indholdet af P_{H₂SO₄} i pløjelaget mellem 4,0 og 9,2 mmol P kg⁻¹, figur 5. Indholdet af P_{H₂SO₄} aftager under pløjelaget og ligger ved Ommose, Snepstrup og Nedre Simmelkær typisk mellem 1,0 og 2,0 mmol P kg⁻¹ og ved Hallund bæk mellem 0,5 og 1,0 mmol P kg⁻¹.

3.4.2 Fosfor - P_{Olsen}

Indholdet af P_{Olsen} varierer mellem 1,0 og 2,3 mmol P kg^{-1} i pløjelaget på de tre lokaliteter. Under pløjelaget aftager indholdet af P_{Olsen} til $<0,2$ mmol P kg^{-1} , figur 5.

Fosfortallet (Pt) i pløjelaget er beregnet til 4,2, 4,6, 5,2 og 7,0 på de undersøgte marker.

3.5 Bakkeø - smeltevandssand

For landskabstypen bakkeø er indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ og P_{Olsen} bestemt på prøver af smeltevandssand udtaget ved Nr. Felding på Skovbjerg bakkeø og ved Hjortkær på Esbjerg bakkeø, figur 1.

3.5.1 Fosfor - $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$

Ved Nr. Felding er indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ bestemt til 19 mmol P kg^{-1} og således markant forøget sammenlignet med de efterfølgende prøver udtaget ned til 4 meter under terræn, hvor indholdet er bestemt til $<0,5$ mmol P kg^{-1} , figur 6. Herefter stiger indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ atter til mellem 4 og 7 mmol P kg^{-1} i de næste 4 meter. Ved Hjortkær er indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ligeledes markant højere i pløjelaget (10 mmol P kg^{-1}) end i prøver udtaget ned til 5 meter, hvor indholdet er $<0,7$ mmol P kg^{-1} .

3.5.2 Fosfor - P_{Olsen}

Indholdet af P_{Olsen} ved Nr. Felding er bestemt til 2,8 mmol P kg^{-1} i pløjelaget hvorefter indholdet aftager til $<0,2$ mmol P kg^{-1} i prøver udtaget ned til 8 meter under terræn, figur 6. I prøver fra Hjortkær er indholdet af P_{Olsen} ikke bestemt i pløjelaget, men indholdet er bestemt til omkring 0,1 mmol P kg^{-1} i prøver fra 1 til 5 meter under terræn.

Fosfortallet (Pt) i pløjelaget er beregnet til 8,5 for Nr. Felding lokaliteten.

3.6 Bakkeø - morænesand

For landskabstypen bakkeø af Saale alder er indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ og P_{Olsen} bestemt på prøver af morænesand fra Lomborg, Tovstrup, Astrup, Lerig, Hvingel og Nr. Felding på Skovbjerg bakkeø, figur 1.

3.6.1 Fosfor - $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$

Ved Nr. Felding er indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ nogenlunde konstant (1-3 mmol P kg^{-1}), fra overfladen og ned til 4 meter under terræn, figur 7. Ved Hvingel, Tovstrup og Lomborg indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ i pløjelaget (11-21 mmol P kg^{-1}) markant højere end i efterfølgende dybder ned til maksimalt 10 meter under terræn, hvor indholdet typisk $<1,5$ mmol P kg^{-1} . Ved Lerig og Astrup findes de største indhold af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ligeledes i pløjelaget (henholdsvis 14 og 9 mmol P kg^{-1}). Ved Lerig er indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ligeledes forholdsvis højt i 0,9 meter under terræn (1,5 mmol P kg^{-1}) hvorefter indholdet aftager til $<0,5$ mmol P kg^{-1} ned til 5 meter under terræn. Ved Astrup er indholdet af $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ligele-

des forholdsvis højt i prøver fra 0,6 og 1,0 meter under terræn (omkring $2,4 \text{ mmol P kg}^{-1}$) sammenlignet med indholdet i prøver udtaget fra 1 meter til 5 meter under terræn, hvor indholdet af $P_{H_2SO_4}$ typisk er $<1,0 \text{ mmol P kg}^{-1}$.

3.6.2 Fosfor - P_{Olsen}

På samtlige lokaliteter er indholdet af P_{Olsen} størst i pløjelaget, med indhold på $1,6\text{-}2,7 \text{ mmol P kg}^{-1}$, figur 7. Ved Lerig er P_{Olsen} ligeledes forholdsvis højt i prøven udtaget i 0,4 meter hvorefter indholdet aftager til samme lave niveau som på de øvrige 5 lokaliteter, hvor indholdet af P_{Olsen} er $<0,3 \text{ mmol P kg}^{-1}$ for prøver udtaget ned til 10 meter.

Fosfortallet (Pt) i pløjelaget er beregnet til 4,8, 5,1, 6,6, 7,2, 7,4 og 8,5 på de undersøgte marker.

3.7 Moræneflade - morænesand

For landskabstypen moræneflade er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ og P_{Olsen} bestemt for prøver af morænesand af Weichsel alder fra fire lokaliteter med Slotsbakke og Sjørup på Djursland, Braulstrup i Himmerland og Gammelkirke i Vendsyssel, figur 1.

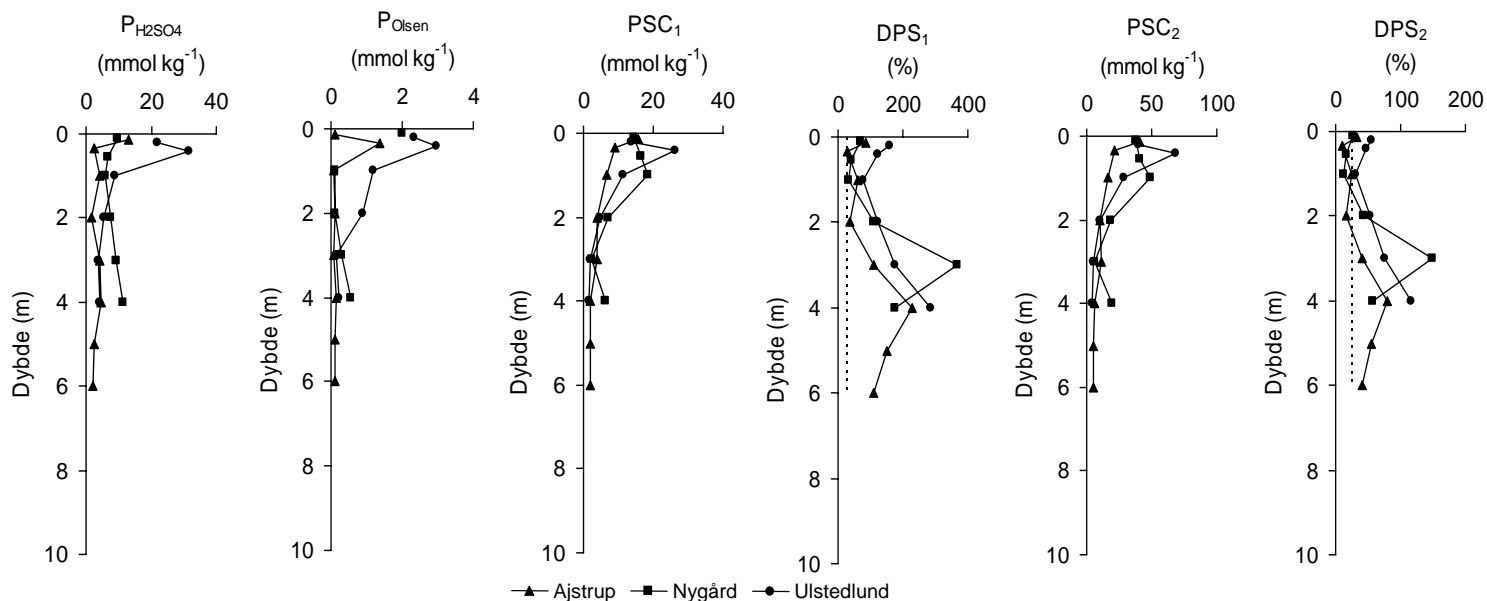
3.7.1 Fosfor - $P_{H_2SO_4}$

På samtlige lokaliteter er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ højere i pløjelaget ($9\text{-}15 \text{ mmol P kg}^{-1}$) end under pløjelaget hvor indholdet af $P_{H_2SO_4}$ normalt er $3\text{-}7 \text{ mmol P kg}^{-1}$ ved Slotsbakke og Sjørup (få højere værdier), $3\text{-}6 \text{ mmol P kg}^{-1}$ ved Braulstrup og $3\text{-}4 \text{ mmol P kg}^{-1}$ ved Gammelkirke (enkelte højere værdier i 2 og 3 meter under terræn).

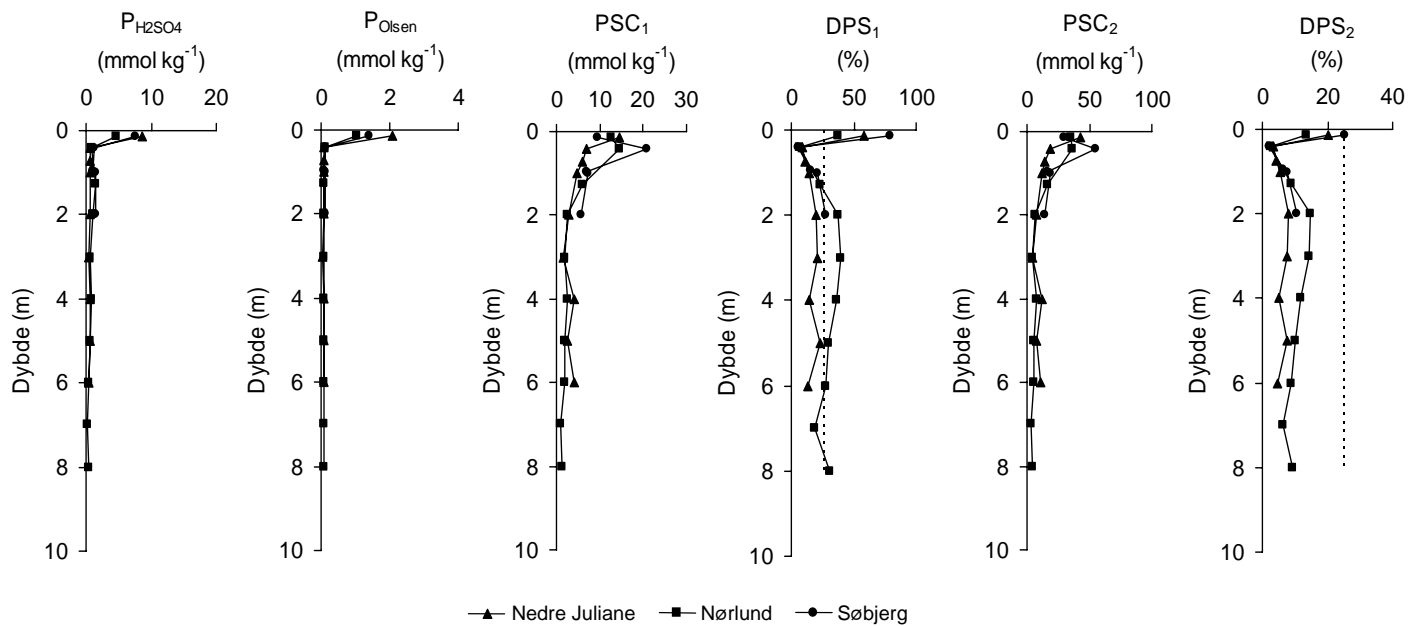
3.7.2 Fosfor - P_{Olsen}

Indholdet af P_{Olsen} er målt i pløjelaget ved Slotsbakke og Braulstrup til henholdsvis $1,6$ og $2,3 \text{ mmol P kg}^{-1}$, figur 8. Under pløjelaget aftager indholdet af P_{Olsen} til $<0,4 \text{ mmol P kg}^{-1}$ for prøver udtaget ned til 6 meter under terræn.

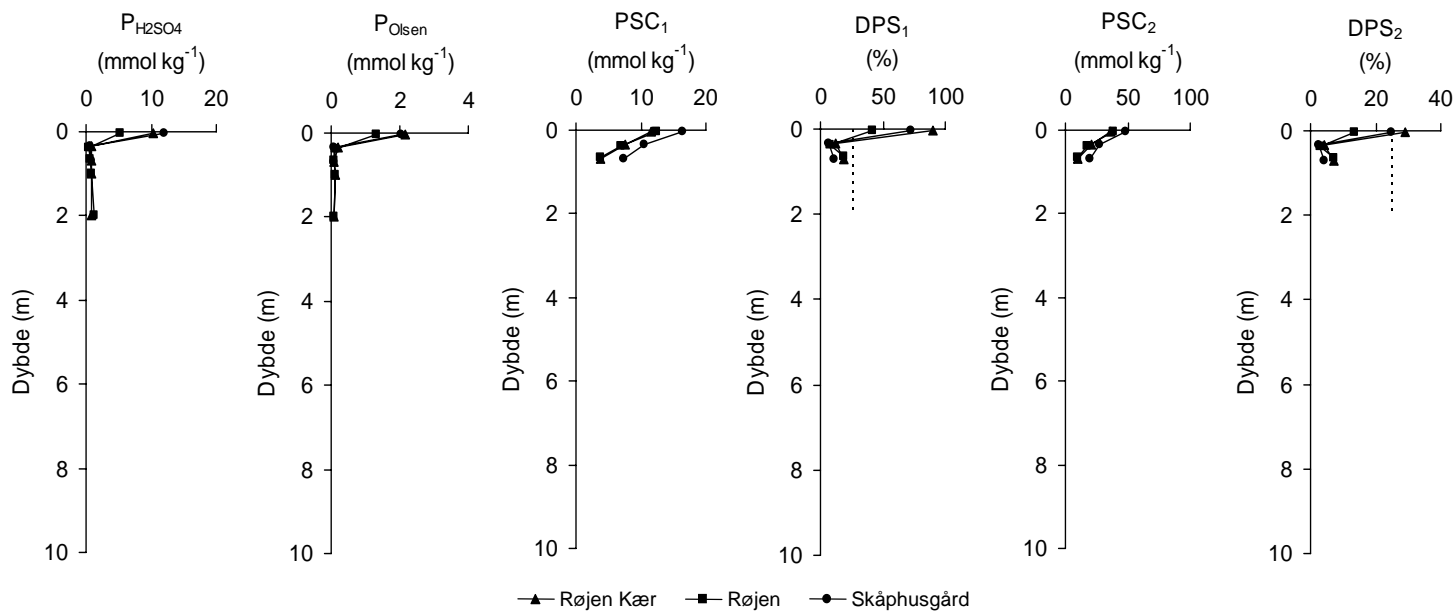
Fosfortallet (Pt) i pløjelaget er beregnet til $4,9$ og $7,1$ ved Slotsbakke og Braustrup.



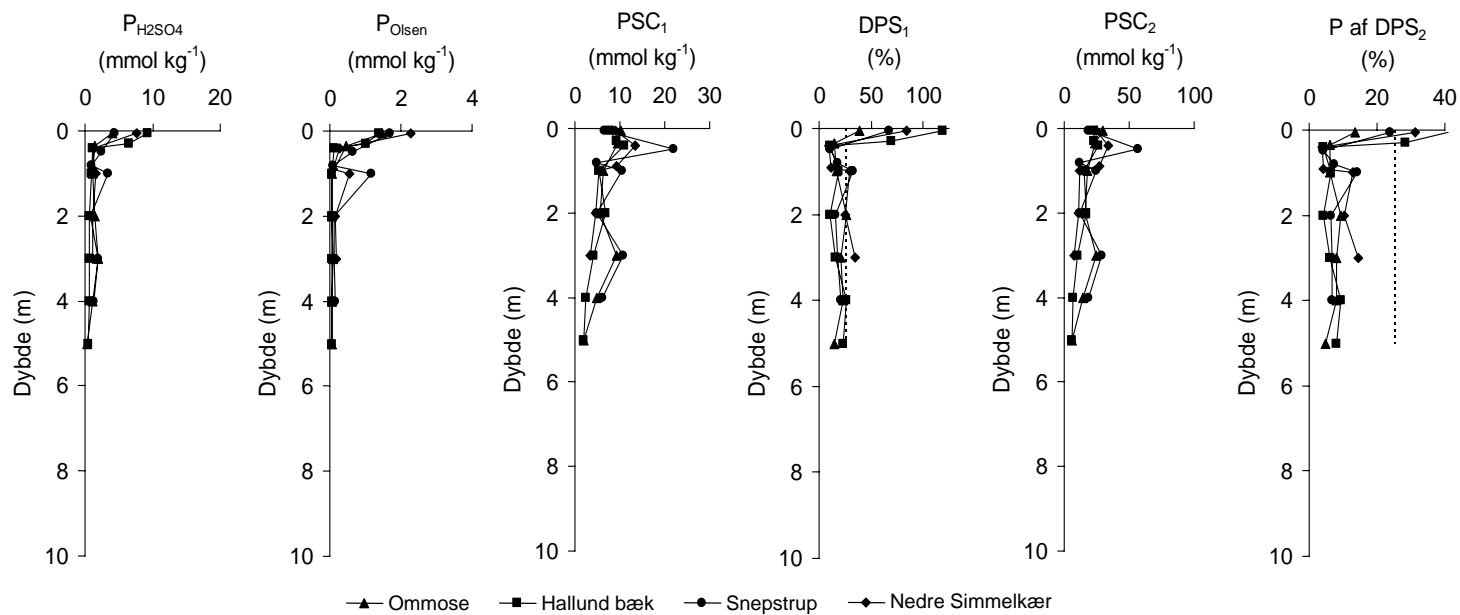
Figur 2. Profiler på Yoldia flade ved Ajstrup, Nygård og Ulstedlund. Indhold af fosfor ekstraheret med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$) og natriumhydrogencarbonat (P_{Olsen}), fosforbindingskapacitet (PSC_1) er beregnet delvis efter Borggaard et al. (2004) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_1) baseret på $P_{H_2SO_4}$ samt fosforbindingskapacitet (PSC_2) beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_2) baseret på $P_{H_2SO_4}$. Den stiplede linie svarer til et forbrug i fosforbindingskapacitet på 25 %.



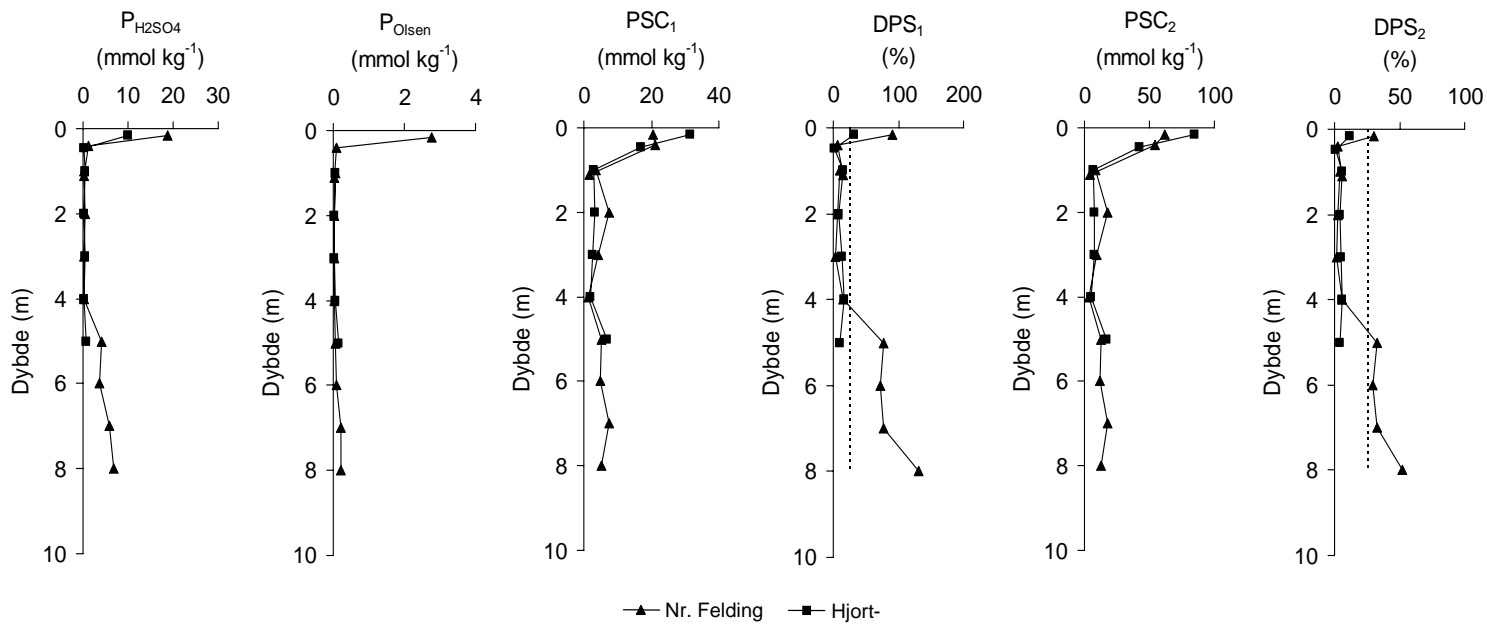
Figur 3. Profiler på alluvialkegle (hedeslette nærmest israndslinien) ved Nedre Juliane, Nørlund og Søbjerg. Indhold af fosfor ekstraheret med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$) og natriumhydrogencarbonat (P_{Olsen}), fosforbindingskapacitet (PSC_1) er delvis efter Borggaard et al. (2004) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_1) baseret på $P_{H_2SO_4}$ samt fosforbindingskapacitet (PSC_2) beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_2) baseret på $P_{H_2SO_4}$. Den stiplede linie svarer til et forbrug i fosforbindingskapacitet på 25 %.



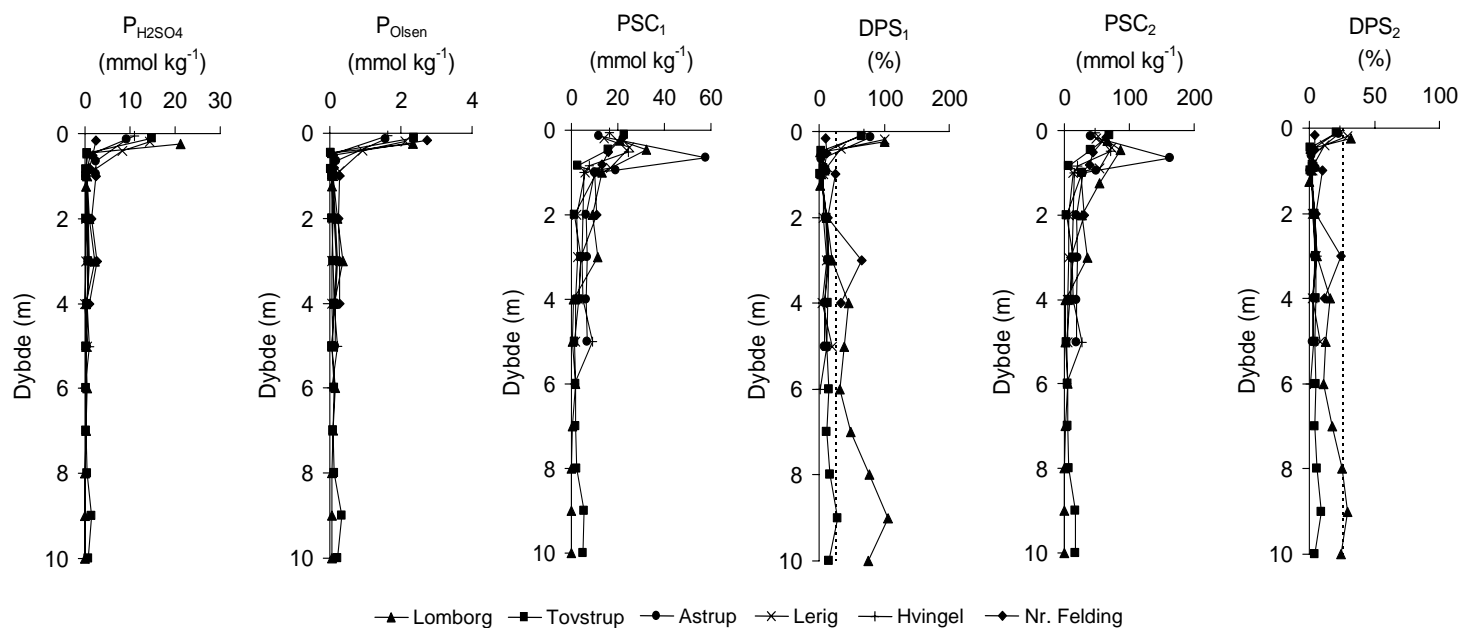
Figur 4. Profiler på proximal hedeslette (hedeslette, der følger efter alluvialkegle i retning væk fra isranden) ved Røjen Kær, Røjen og Skåphusgård. Indhold af fosfor ekstraheret med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$) og natriumhydrogencarbonat (P_{Olsen}), fosforbindingskapacitet (PSC_1) er beregnet delvis efter Borggaard et al. (2004) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_1) baseret på $P_{H_2SO_4}$ samt fosforbindingskapacitet (PSC_2) beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_2) baseret på $P_{H_2SO_4}$. Den stiplede linie svarer til et forbrug i fosforbindingskapacitet på 25 %.



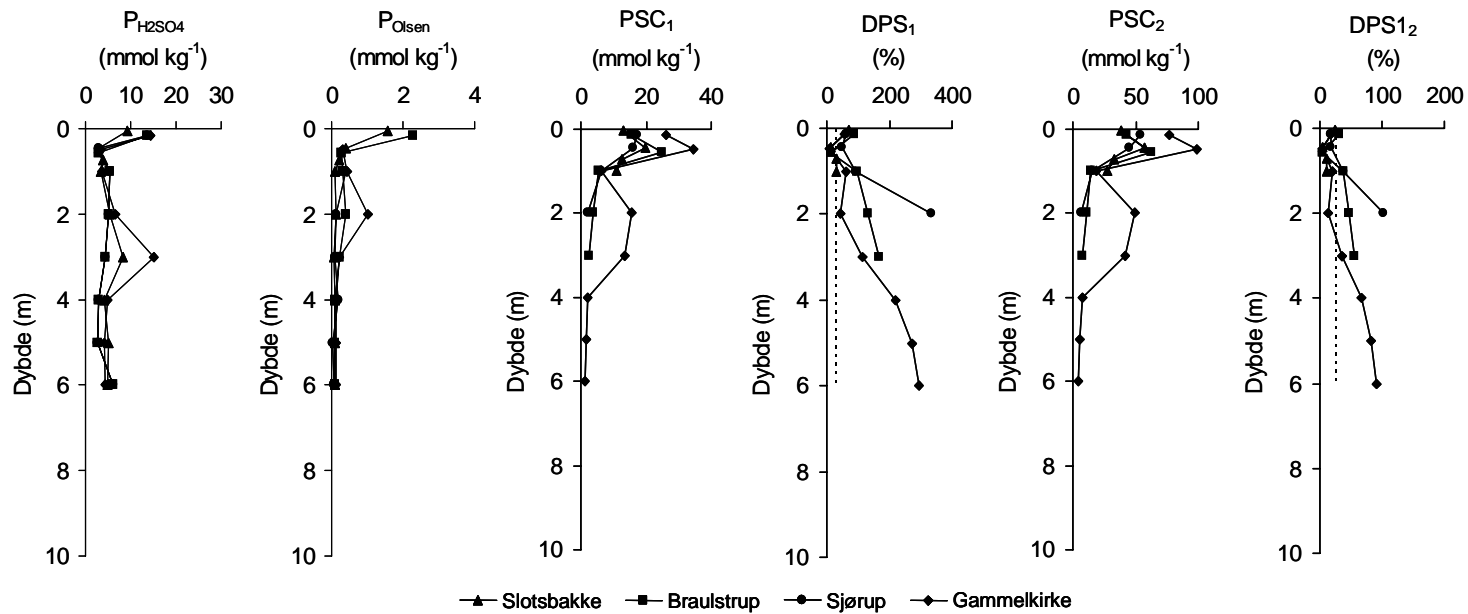
Figur 5. Profiler på distal hedeslette (hedeslette, der følger umiddelbart efter den proximale hedeslette og som er beliggende længst væk fra isranden) ved Ommose, Hallund bæk, Snepstrup og Nedre Siimmelkær. Indhold af fosfor ekstraheret med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$) og natriumhydrogencarbonat (P_{Olsen}), fosforbindingskapacitet (PSC_1) er beregnet delvis efter Borggaard et al. (2004) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_1) baseret på $P_{H_2SO_4}$ samt fosforbindingskapacitet (PSC_2) beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_2) baseret på $P_{H_2SO_4}$. Den stiplede linie svarer til et forbrug i fosforbindingskapacitet på 25 %.



Figur 6. Profiler i smeltevandssand på bakkø ved Nr. Felding og Hjortkær. Indhold af fosfor ekstraheret med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$) og natriumhydrogencarbonat (P_{Olsen}), fosforbindingskapacitet (PSC_1) er beregnet delvis efter Borggaard et al. (2004) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_1) baseret på $P_{H_2SO_4}$ samt fosforbindingskapacitet (PSC_2) beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_2) baseret på $P_{H_2SO_4}$. Den stiplede linie svarer til et forbrug i fosforbindingskapacitet på 25 %.



Figur 7. Profiler i morænesand på bakkeø ved Lomborg, Tovstrup, Astrup, Lerig, Hvingel og Nr. Felding. Indhold af fosfor ekstraheret med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$) og natriumhydrogencarbonat (P_{Olsen}), fosforbindingskapacitet (PSC_1) er beregnet delvis efter Borggaard et al. (2004) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_1) baseret på $P_{H_2SO_4}$ samt fosforbindingskapacitet (PSC_1) beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_2) baseret på $P_{H_2SO_4}$. Den stiplede linie svarer til et forbrug i fosforbindingskapacitet på 25 %.



Figur 8. Profiler i morænesand af Weichsel alder ved Slotsbakke, Braulstrup, Sjørup og Gammelkirke. Indhold af fosfor ekstraheret med svovlsyre ($P_{H_2SO_4}$) og natriumhydrogencarbonat (P_{Olsen}), fosforbindingskapacitet (PSC_1) er beregnet delvis efter Borggaard et al. (2004) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_1) baseret på $P_{H_2SO_4}$ samt fosforbindingskapacitet (PSC_2) beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000) med tilhørende forbrug af fosforbindingskapacitet (DPS_2) baseret på $P_{H_2SO_4}$. Den stiplede linie svarer til et forbrug i fosforbindingskapacitet på 25 %. Ved Slotsbakke, Braulstrup og Sjørup findes kalkholdige sedimenter fra henholdsvis 2 meter, 4 meter og 3 meter der ikke er omfattet af metoderne for beregning af fosforbindingskapacitet.

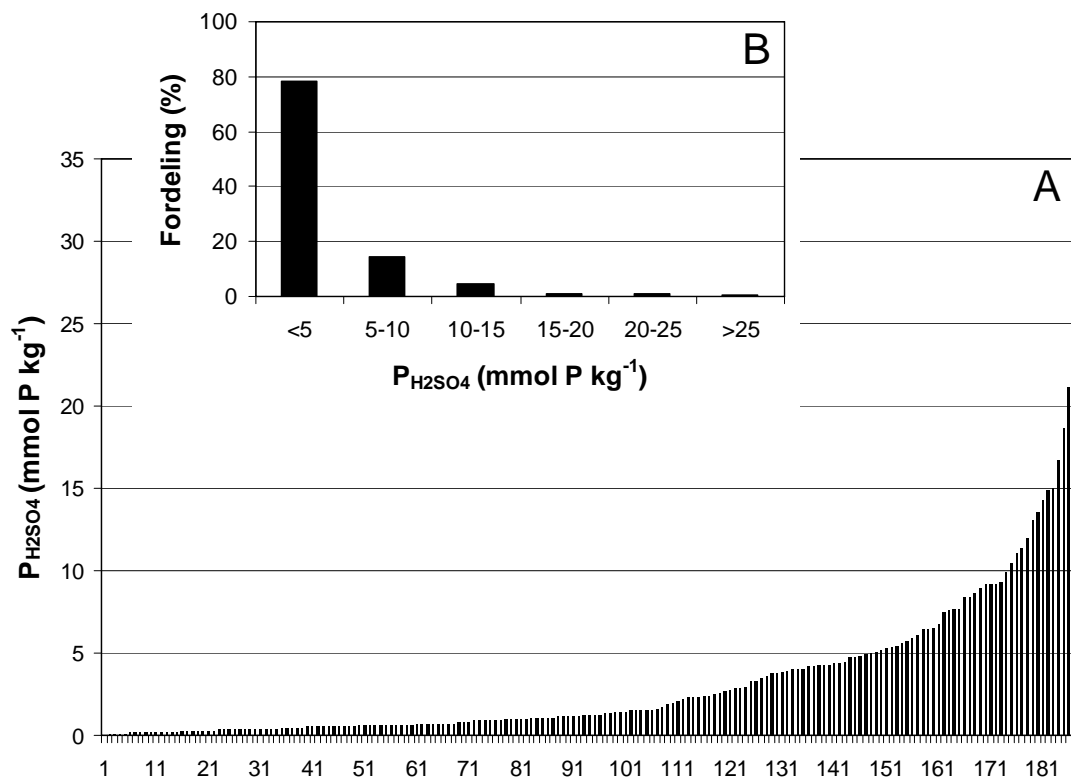
4 $P_{H_2SO_4}$ i relation til dybe og landskabstype

Som det fremgår ovenfor forekommer der betydelige forskelle i indholdet af $P_{H_2SO_4}$ i den umættede zone bestemt ved dybde såvel som ved landskabstype.

Indholdet af $P_{H_2SO_4}$ i samtlige 188 undersøgte prøver fremgår af figur 9 A. Indholdet af $P_{H_2SO_4}$ varierer i de undersøgte prøver mellem $<0,1$ og $32 \text{ mmol P kg}^{-1}$. I den overvejende del af prøverne (78 %) var indholdet af $P_{H_2SO_4} < 5 \text{ mmol P kg}^{-1}$, medens 14 % indeholdt mellem $5-10 \text{ mmol P kg}^{-1}$, 5 % indeholdt $10-15 \text{ mmol P kg}^{-1}$, 1 % indeholdt $15-20 \text{ mmol P kg}^{-1}$, 1 % indeholdt $20-25 \text{ mmol P kg}^{-1}$ og de resterende 0,5 % indeholdt $>25 \text{ mmol P kg}^{-1}$, figur 9B.

Resultaterne viser desuden, at der på samtlige lokaliteter, med undtagelse af en enkelt lokalitet (Nr. Felding) på morænesand, er sket en markant berigelse af fosfor i pløjelaget efter tilførsel af fosforgødninger. På tre lokaliteter (Nygård, Lerig og Astrup) når den fosforberigede zone dybere ned, til maksimalt 1 meter under terræn.

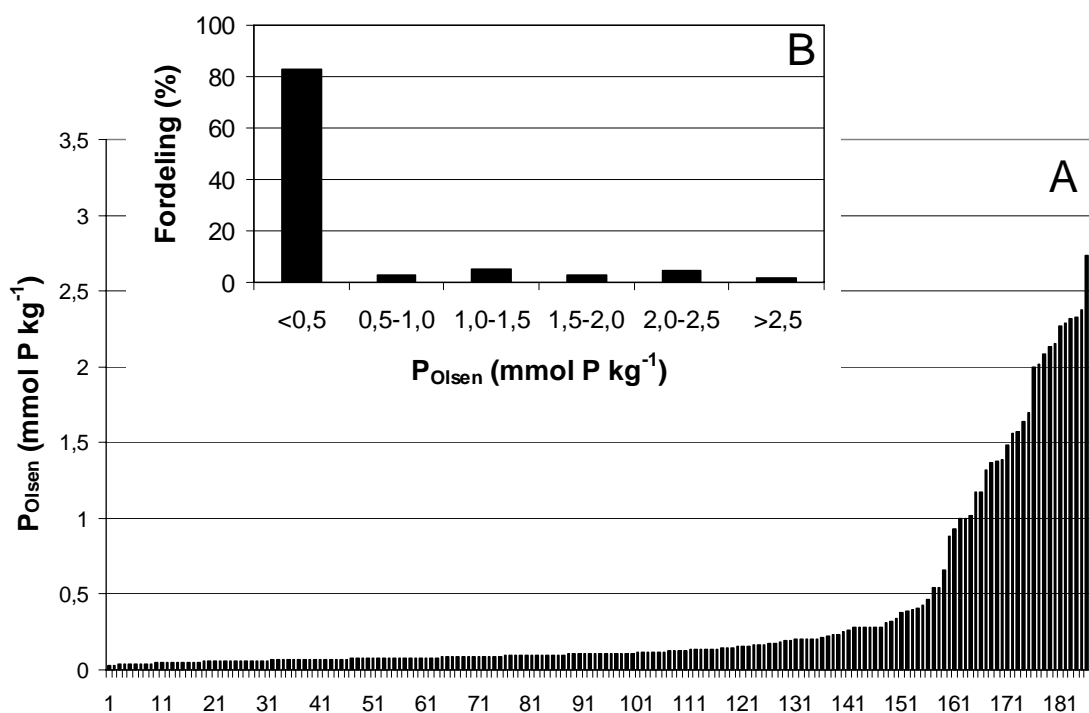
Resultaterne viser desuden, at baggrundskoncentrationen af $P_{H_2SO_4}$ varierer i henhold til sediment- og landskabstype. Således er indholdet af $P_{H_2SO_4}$ betydelig højere i de postglaciale marine aflejringer på Yoldia fladen ($2-11 \text{ mmol P kg}^{-1}$) og i morænesand fra Weichsel ($3-7 \text{ mmol P kg}^{-1}$) end for andre typer. Hedesletteaflejringerne udgør en mellemkategori ($0,3-1,5 \text{ mmol P kg}^{-1}$) og de laveste indhold af $P_{H_2SO_4}$ findes i aflejringer af smeltevandssand og morænesand på bakkeøer med typiske koncentrationer af $P_{H_2SO_4}$ på $<0,5 \text{ mmol P kg}^{-1}$. På enkelte lokaliteter på bakkeø, eksempelvis Lerig og Nr. Felding, aftager indholdet af fosfor under pløjelaget og ned til ca. 4 meter under terræn hvorefter indholdet af $P_{H_2SO_4}$ atter stiger. Denne dybe pulje af uorganisk fosfat kan eksempelvis være 1) resultatet af en omfordeling og opkoncentrering af fosfor som resultat af en kombination af mikrobiologiske og kemiske processer samt vertikal eller lateral vandtransport, 2) være geologisk bestemt eller 3) vise fordelingen af fosfor efter en tidligere ugødnet skov.



Figur 9A. Indhold af $P_{H_2SO_4}$ i alle jord- og sedimentprøver. **Figur 9B.** Procentvise fordelingen af prøver efter indhold af $P_{H_2SO_4}$.

5 P_{Olsen} i relation til dybde og landskabstype

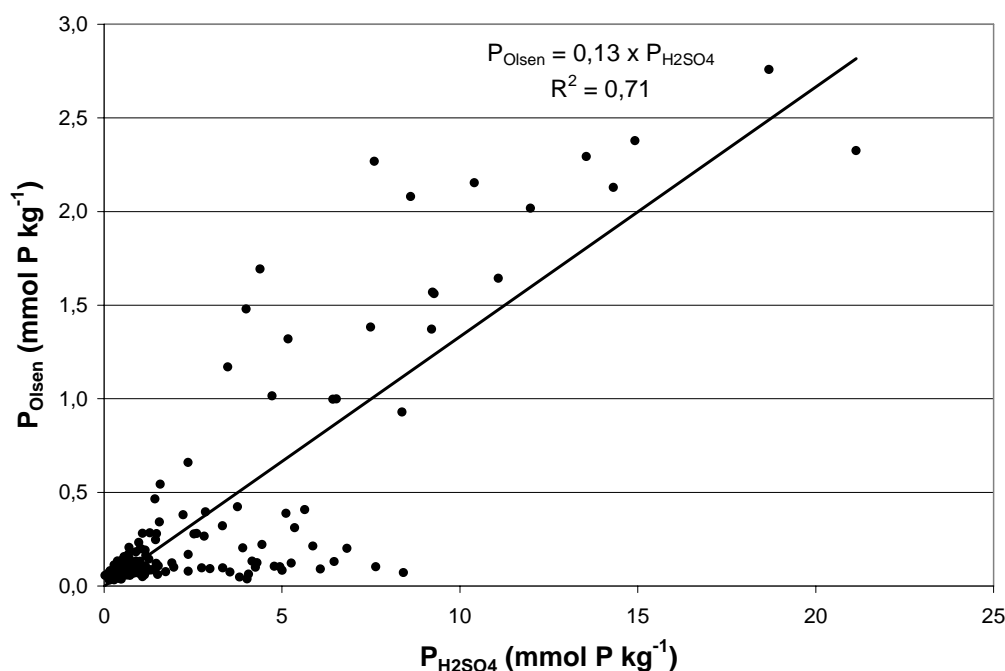
Indholdet af P_{Olsen} er markant lavere end indholdet af P_{H₂SO₄}. Indholdet af P_{Olsen} varierer i de undersøgte prøver mellem <0,1 og 3,0 mmol P kg⁻¹, figur 10 A. I 83 % af de undersøgte prøver er indholdet af P_{Olsen} < 0,5 mmol P kg⁻¹, i 3 % mellem 0,5 og 1,0 mmol kg⁻¹, i 5 % mellem 1,0 og 1,5 mmol kg⁻¹, i 3 % mellem 1,5 og 2,0 mmol kg⁻¹, i 5 % mellem 2,0 og 2,5 mmol kg⁻¹ og i 2 % >2,5 mmol kg⁻¹, figur 10 B.



Figur 10A. Indhold af P_{Olsen} i alle jord- og sedimentprøver. **Figur 10B.** Procentvise fordelingen af prøver efter indhold af P_{Olsen}.

6 Sammenhæng mellem puljer af $P_{H_2SO_4}$ og P_{Olsen}

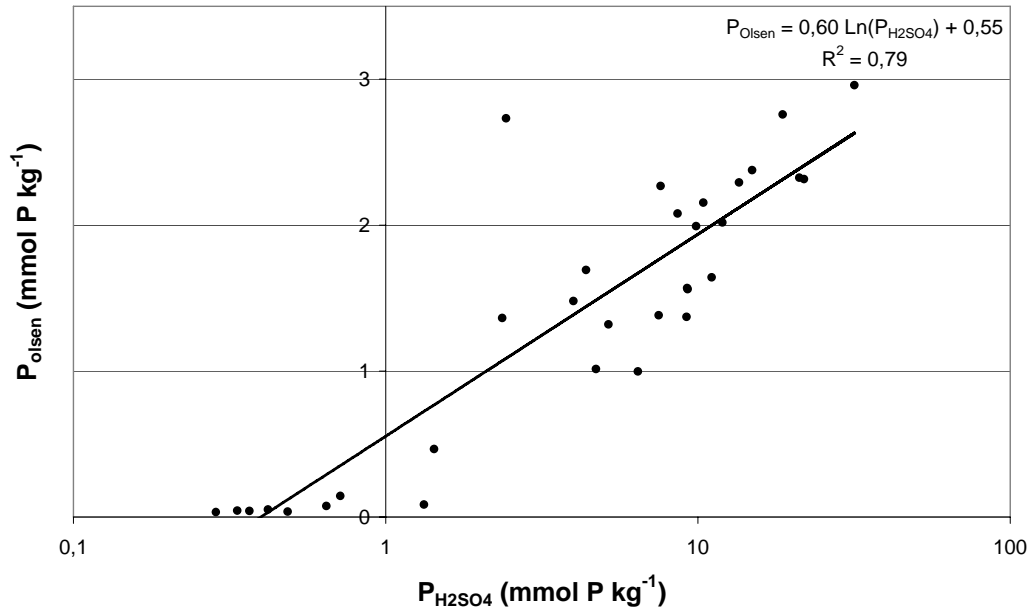
En analyse af hele datamaterialet viser en ringe sammenhæng ($R^2=0,54$, data ikke vist) mellem indholdet af $P_{H_2SO_4}$ og P_{Olsen} . Ved at reducere datamaterialet så det ikke længere indeholder værdier for Yoldia fladen samt en enkelt værdi for pløjelaget i morænesand (meget høj P_{Olsen} samtidig med lav $P_{H_2SO_4}$) samt et par værdier for morænesand af Weichsel alder (4 meter ved Braulstrup og 3 meter ved Gammelkirke, der begge har meget høje indhold af $P_{H_2SO_4}$ samtidig med meget lave indhold af P_{Olsen}) forbedres relationen mellem de to fosforpuljer betydeligt ($R^2=0,71$), figur 11. Sammenhængen mellem de to fosforpuljer kan herefter beskrives som $P_{Olsen} = 0,13 \times P_{H_2SO_4}$ (mmol P kg^{-1}).



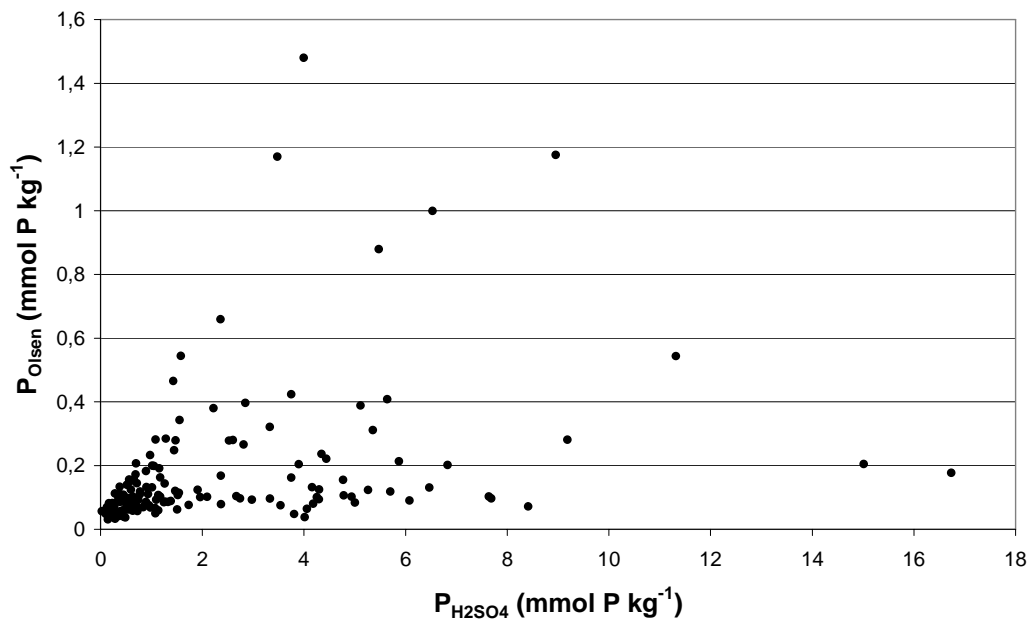
Figur 11. Indhold af fosforpuljerne $P_{H_2SO_4}$ og P_{Olsen} . Data fra Yoldia flade og enkelte værdier for morænesand er ikke medtaget i datagrundlaget, se tekst. Sammenhængen mellem de to puljer er forholdsvis god ($R^2 = 0,71$) og kan beskrives som $P_{Olsen} = 0,13 \times P_{H_2SO_4}$ (mmol P kg^{-1}).

Sammenhængen mellem de to fosforpuljer bliver lidt bedre ($R^2=0,79$) hvis datasættet begrænses til at omfatte overfladenære og fosforberigede jordprøver, og kan herefter beskrives ved $P_{Olsen} = 0,60 \times \ln P_{H_2SO_4} + 0,55$ (mmol P kg^{-1}), figur 12.

Sammenhængen mellem P_{Olsen} og $P_{H_2SO_4}$ i prøver udtaget under den fosforberigede zone er ret dårlig ($R^2=0,13$), figur 13. Indholdet af P_{Olsen} er forholdsvis lavt her og desuden synes det geologisk betingede indhold af fosfor at variere langt mere i bl.a. sammensætning og evne til at sorbere end fosfor tilført fra overfladen, i forbindelse med landbrugsdrift.



Figur 12. Puljer af P_{Olsen} og $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ i jordprøver fra den fosforberigede zone, fra overfladen og ned til 1 meter under terræn. Data fra hedeslette (sen Weichsel alder), bakkeø (smeltevandssand og morænesand af Saale alder) samt moræneflade (morænesand af weichsel alder). Sammenhængen mellem de to fosforpuljer er forholdsvis god ($R^2 = 0,79$) og kan beskrives som $P_{\text{Olsen}} = 0,60 \times \text{Ln } P_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 0,55$ (mmol P kg^{-1}).



Figur 13. Puljer af P_{Olsen} og $P_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ i sedimentprøver udtaget under den fosforberigede zone og ned til maksimalt 10 meter under terræn. Data fra hedeslette (sen Weichsel alder), bakkeø (smeltevandssand og morænesand af Saale alder) samt moræneflade (morænesand af Weichsel alder).

7 Fosforbindingskapacitet og forbrug af kapacitet

Fosforbindingskapaciteten, der i det følgende forkortes PSC (efter **Phosphor Sorption Capacity**) beskriver jordlagenes evne til at tilbageholde fosfor. I litteraturen findes beskrevet flere metoder til beregning af jordens fosforbindingskapacitet. I nærværende rapport er fosforbindingskapaciteten beregnet efter 1) Borggaard et al. (2004) (benævnt PSC), 2) en modificeret version af Borggaard et al. (2004) (benævnt PSC₁), og 3) Schoumans og Groenendijk (2000) (benævnt PSC₂). Desuden sammenholdes resultaterne efter beregningsmetode PSC₁ med resultaterne fra beregningsmetoderne PSC og PSC₂ samt PSC₃, der er beskrevet af Van der Zee (1988). Alle de her nævnte beregningsmetoder for fosforbindingskapaciteten er udviklet for kalkfrie, sandede jordprøver.

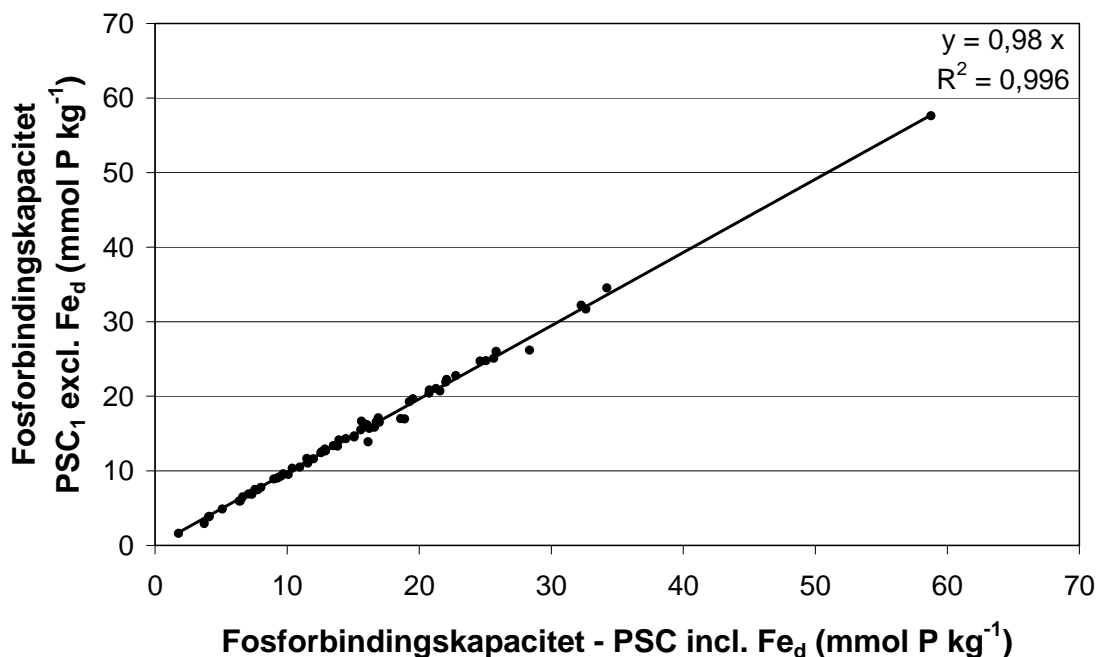
Forbruget i fosforbindingskapacitet, der i det følgende forkortes DPS (efter **Degree of Phosphate Saturation**) er beregnet på baggrund af puljen af P_{H₂SO₄}. Således beskriver DPS₁ forbruget i fosforkapacitet beregnet på baggrund af P_{H₂SO₄} og fosforbindingskapacitet PSC₁ og DPS₂ beskriver forbruget i fosforkapacitet beregnet på baggrund af P_{H₂SO₄} og fosforbindingskapacitet PSC₂.

7.1 Forskellige beregningsmetoder

Beregningsmetoden efter Borggaard et al. (2004) beskriver en lineær sammenhæng mellem jordprøvernes evne til at adsorbere fosfor og disse prøvers indhold af jern- (Fe_o) og aluminium oxider (Al_o) ekstraheret med en oxalat opløsning, pH 3 (Schwertmann, 1964) og jern oxider (Fe_d) ekstraheret med dithionit-citrat-bicarbonat opløsning (Mehra og Jackson, 1960). Fosforbindingskapaciteten beskrives som $PSC = 0.22 \times Al_o + 0,12 \times Fe_o + 0.02 \times (Fe_d - Fe_o)$ (mmol P kg⁻¹).

I en modificeret version af Borggaard et al. (2004) blev sidste led i ligningen udeladt og beregningerne foretaget efter $PSC_1 = 0.22 \times Al_o + 0,12 \times Fe_o$ (mmol P kg⁻¹).

Beregningerne efter de to beregningsmetoder blev gennemført på allerede publicerede data for jern og aluminium fra 66 sandede prøver, der var indsamlet fra A, B og C horisonter (Ernstsen og Torp, 2005 a-h). Værdierne for PSC og PSC₁ viser en god lineær sammenhæng ($R^2 = 0,996$), der kan beskrives som $PSC_1 = 0,98 \times PSC$, figur 14. Forskellen mellem de to beregningsmetoder er i gennemsnit < 5 % og analysen viser endvidere, at Fe_d i danske, sandede, kalkfrie jord- og sedimentprøver, som de her undersøgte, kun bidrager i meget ringe grad til den samlede fosforbindingskapacitet. Beregningerne af fosforbindingskapaciteten kan derfor baseres på den billigere og mindre analysekrævende beregningsmetode beskrevet ved PSC₁. De beregnede fosforbindingskapaciteter efter PSC₁ metoden for de forskellige landskabstyper fremgår af figur 2 til 8. Desuden er den totale sorptionskapacitet beregnet efter Schoumans og Groenendijk (2000), der for hollandske, sandede, kalkfrie jordprøver har beskrevet en sammenhæng mellem sorptionskapaciteten for fosfor og indholdet af Al_o og Fe_o. Beregningsmetoden er beskrevet som $PSC \approx 0.5 \times (Al + Fe)_o$ og fosforbindingskapaciteterne efter denne metode - PSC₂ - er ligeledes afbildet for de forskellige landskabstyper i figurerne 5 til 8.



Figur 14. Fosforbindingskapaciteten (PSC) er beregnet efter Borggaard et al. (2004) med bidrag fra jernoxider ekstraheret med Na-citrat-bicarbonat-dithionit (Fe_d) samt fosforbindingskapacitet (PSC_1) beregnet efter en modificeret version af Borggaard et al. (2004) uden bidraget fra Fe_d . Der hersker en god ($R^2 = 0,996$) lineær sammenhæng mellem de to beregningsmetoder, der kan beskrives ved $\text{PSC}_1 = 0,98 \times \text{PSC}$ (mmol P kg^{-1}).

7.1.1 Yoldiaflade – PSC og DPS

Ved Ajstrup aftager fosforbindingskapaciteten PSC_1 fra 16 mmol kg^{-1} i pløjelaget til 7 mmol kg^{-1} i 1 meter under terræn, hvorefter PSC_1 aftager yderligere til omkring 2 mmol kg^{-1} i 6 meter under terræn, figur 2. Ved Ulstedlund stiger PSC_1 fra pløjelaget (14 mmol kg^{-1}) og ned til 1 meter under terræn (26 mmol kg^{-1}) hvorefter PSC_1 aftager til omkring samme lave niveau som ved Ajstrup (omkring 2 mmol kg^{-1}) i 3 og 4 meter under terræn. Ved Nygård stiger PSC_1 jævnt fra pløjelaget (14 mmol kg^{-1}) og ned til 1 meter under terræn (18 mmol kg^{-1}), hvorefter PSC_1 aftager som beskrevet for Ajstrup og Ulstedlund, men til et lidt højere niveau ($2-6 \text{ mmol kg}^{-1}$). Puljen af fosfor i $\text{P}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ sammenholdt med PSC_1 viser, at forbruget af fosforbindingskapacitet - DPS_1 - ved Ajstrup er 30-80 % i de øverste 2 meter hvorefter DPS_1 stiger til 100-230 %, figur 2. Ved Ulstedlund aftager DPS_1 værdien fra 160 % i pløjelaget til 80 % i 1 meter under terræn, hvorefter forbruget i bindingskapacitet stiger til 120-280 % for dybere prøver. For Nygård er PSC_1 30-70 % i den øverste meter hvorefter forbruget i bindingskapacitet stiger til 110-370 % for resten af profilen.

Beregninger efter den hollandske beregningsmetode - PSC_2 - viser i alle tre profiler samme trend som netop beskrevet for PSC_1 , men fosforbindingskapaciteterne er generelt højere, figur 2. Samtidig med de generelt højere fosforbindingskapaciteter er forbruget af fosforbindingskapacitet DPS_2 generelt lavere end beregnet for DPS_1 , figur 2.

7.1.2 Alluvialkegle - PSC og DPS

Ved Søbjerg stiger PSC_1 fra 10 mmol kg^{-1} i pløjelaget til 21 mmol kg^{-1} i 0,4 m under terræn hvorefter fosforbindingskapaciteten aftager til 6-7 mmol kg^{-1} i 1 og 2 meter under terræn, figur 3. Ved Nørlund stiger PSC_1 ligeledes svagt fra pløjelaget (13 mmol kg^{-1}) og ned til 0,4 meter under terræn (15 mmol kg^{-1}) hvorefter kapaciteten aftager til 3 mmol kg^{-1} i 2 meter under terræn, hvor den bliver nogenlunde konstant (1-2 mmol kg^{-1}) i resten af profilen ned til 8 meter under terræn. Ved Nedre Juliane er den maksimale PSC_1 beregnet for pløjelaget til 15 mmol kg^{-1} hvorefter kapaciteten aftager til 6-7 mmol kg^{-1} med til 0,7 meter i terræn, hvorefter PSC_1 holder sig nogenlunde konstant (1 og 3 mmol kg^{-1}). Sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er forbruget i bindingskapacitet (DPS_1) 37-71 % for pløjelaget, hvorefter DPS_1 aftager til under 25 % for resten af profilen ned til 6 meter under terræn ved Nedre Juliane og ned til 2 meter ved Søbjerg, figur 3. Ved Nørlund aftager DPS_1 ligeledes til under 25 % i prøver under pløjelaget og ned til 2 meter under terræn og er i resten af profilen mellem 19 og 39 % ned til 8 meter under terræn.

Fosforbindingskapaciteterne PSC_2 følger samme trend som her beskrevet for PSC_1 men er generelt højere, figur 3. Forbruget af fosforbindingskapacitet - DPS_2 - er mindre end 25 % i samtlige undersøgte jordprøver, figur 3.

7.1.3 Proximal hedeslette - PSC og DPS

Grundvandsspejlet blev antruffet tæt på overfladen og der findes kun få beregninger af fosforbindingskapaciteter samt forbrug af kapacitet for denne type sand. Således viser beregninger af PSC_1 ved Røjen, Røjen Kær samt Skåphusgård at fosforbindingskapaciteten i pløjelaget svarer til 12-17 mmol kg^{-1} hvorefter bindingskapaciteten aftager jævnt til 4-7 mmol kg^{-1} i 0,7 meter under terræn, figur 4. Puljen af $P_{H_2SO_4}$ udgør mellem 42-90 % af bindingskapaciteten i pløjelaget hvorefter DPS_1 aftager til 11-19 % i jordprøver udtaget dybere end 0,7 meter under terræn, figur 4.

Beregningen af PSC_2 viser et parallelt forløb med PSC_1 men med generelt højere fosforbindingskapaciteter, figur 4. Forbruget i bindingskapaciteter PSC_2 er 13-29 % i pløjelaget og 4-7 % i prøver udtaget under rodzonen og ned til 0,7 meter under terræn, figur 4.

7.1.4 Distal hedeslette - PSC og DPS

Fosforbindingskapaciteterne PSC_1 for Ommose og Hallund Bæk er på omkring 10 mmol kg^{-1} for de øverste 0,4 meter hvorefter PSC_1 aftager til omkring 2 mmol kg^{-1} i 4-5 meter under terræn, figur 5. Ved Snepstrup og Nedre Simmelkær er PSC_1 henholdsvis 7 og 9 mmol kg^{-1} hvorefter fosforbindingskapaciteten PSC_1 stiger til 14-22 mmol kg^{-1} i 0,5 meter under terræn. I dybere prøver er bindingskapaciteterne 3-5 mmol kg^{-1} , dog således at enkelte prøver fra Ommose og Snepstrup med forholdsvis høje koncentrationer af Al_0 har fosforbindingskapaciteter PSC_1 på 11-13 mmol kg^{-1} . Sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er forbruget i bindingskapacitet - DPS_1 - 39-118 % i pløjelaget. I prøven fra 0,35 meter ved Ommose er forbruget af fosforbindingskapacitet ligeledes højt (70 %). For stort set alle andre prøver er forbruget af bindingskapaciteter under 25 %, figur 5.

De beregnede PSC_2 følger samme trend som for PSC_1 , men de her beregnede bindingskapaciteter er højere, figur 5. Sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er forbruget i fosforbindingskapaciteter DPS_2 mindre end 25 % for lang størstedelen af jordprøverne, figur 5. Et større forbrug i bindingskapacitet ses kun for prøven udtaget umiddelbart under jordoverfladen ved Nedre Simmelskær (31 %) og i et par jordprøver udtaget ned til 0,4 meter ved Hallund bæk (28 og 41 %).

7.1.5 Bakkeø, smeltevandssand - PSC og DPS

For denne landskabsform er PSC_1 for de øverste 0,5 meter beregnet til 17-32 mmol kg^{-1} hvorefter bindingskapaciteten aftager til 2-8 mmol kg^{-1} , figur 6. Sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er forbruget af bindingskapacitet henholdsvis 92 og 31 % i pløjelaget ved Nr. Felding og Hjortkær, figur 6. Ved Hjortkær forbliver DPS_1 under 25 % i resten af profilen ned til 5 meter under terræn, mens DPS_1 ved Nr. Felding stiger til 72-78 % for jordprøver udtaget i 5 til 7 meter under terræn og yderligere til 130 % for jordprøven udtaget i 8 meter under terræn.

Bindingskapaciteterne PSC_2 viser samme trend som for PSC_1 , men værdierne er noget højere end for PSC_1 , figur 6. Sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er forbruget af bindingskapacitet DPS_2 under 25 % for hele Hjortkær profilen ned til 5 meter under terræn, figur 6. Ved Nr. Felding er DPS_2 30 % i pløjelaget og < 25 % for resten af profilen ned til 5 meter under terræn, hvor DPS_2 stiger først til omkring 30 % for prøver ned til 7 meter under terræn og yderligere til 52 % i 8 meter under terræn.

7.1.6 Bakkeø, morænesand - PSC og DPS

Fosforbindingskapaciteten PSC_1 i pløjelaget varierer mellem 12 og 23 mmol kg^{-1} på de seks lokaliteter på bakkeø, figur 7. Under pløjelaget forbliver PSC_1 uændret på nogle af lokaliteterne mens den stiger på andre lokaliteter. Stigningen er mest markant ved Astrup hvor PSC_1 er beregnet til 58 mmol kg^{-1} i 0.6 meter. Ved Lomborg varierer bindingskapaciteten mellem 9 og 13 mmol kg^{-1} under pløjelaget og ned til 3 meter under terræn, hvorefter PSC_1 aftager til <1 mmol kg^{-1} i resten af profilen, ned til 10 meter under terræn. Ved Tovstrup er PSC_1 2-5 mmol kg^{-1} ned til 10 meter under terræn. Ved Astrup er bindingskapaciteten nogenlunde som beskrevet for Tovstrup. Ved Lerig, Hvingel og Nr. Felding, hvor profilerne er 4-6 meter dybe, er de typiske bindingskapaciteter mellem 1 og 10 mmol kg^{-1} . Sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ udgør DPS_1 mere end 25 % for fleste overfladenære jordprøver, figur 7. Ved Tovborg, Astrup, Lerig, og Hvingel aftager bindingskapaciteten til under 25 % i dybere jordprøver. Ved Nr. Felding stiger DPS_1 til henholdsvis 66 % og 33 % i prøver fra 3 og 4 meter og ved Lomborg stiger bindingskapaciteten til mellem 31 og 49 % for jordprøver indsamlet i 4 til 7 meter under terræn og fosforbindingskapaciteten stiger yderligere til 76-106 % i jordprøver udtaget i 8 til 10 meter under terræn.

Den beregnede PSC_2 følger samme trend som PSC_1 og sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er DPS_2 < 25 % for stort set samtlige prøver, figur 7. Kun i et par jordprøver fra pløjelaget ved Lerig og Lomborg samt et par dybere jordprøver (8 og 9 meter) fra Nr. Felding er forbruget i bindingskapacitet større end 25 %.

7.1.7 Moræneflade, morænesand - PSC og DPS

Fosforbindingskapaciteten PSC_1 er beregnet til 13-25 mmol kg^{-1} for pløjelaget, figur 8. Bindingskapaciteten er nogenlunde uændret for Sjørup i 0,4 meter mens der på de resterende tre lokaliteter sker en stigning i PSC_1 til 20-34 mmol kg^{-1} for prøver udtaget ned til 0,6 meter under terræn. Fosforbindingskapaciteten aftager til mellem 1 og 5 mmol kg^{-1} i prøver udtaget dybere end 1 meter og ned til kalkgrænsen, der ved Slotsbakke, Braulstrup og Sjørup er beskrevet i henholdsvis 2 meter, 4 meter og 3 meter. I de kalkfrie sedimenter ved Gammelkirke er PSC_1 beregnet til omkring 14 mmol kg^{-1} ned til 3 meter under terræn, hvorefter fosforbindingskapaciteten aftager til omkring 2 mmol kg^{-1} . Sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er forbruget af bindingskapacitet DPS_1 forholdsvis lav i jordprøver udtaget ned til 1 meter, figur 8. Ved Slotsbakke, Braulstrup og Gammelkirke findes den laveste DPS_1 på omkring 10 % i omkring 0,5 meter under terræn mens DPS_1 ved Sjørup fremstår uændret fra pløjelaget (48 %) i denne dybde. Fra omkring 1 meters dybde stiger DPS_1 til mellem 100 og 300 %.

Fordelingen af PSC_2 viser sammen trend som PSC_1 og sammenholdt med puljen af $P_{H_2SO_4}$ er forbruget i bindingskapaciteten DPS_2 i næsten alle jordprøver større end 25 %, figur 8.

8 Fosforbindingskapaciteter

Fosforbindingskapaciteten for de undersøgte prøver udviser stor variation knyttet til såvel prøvedybde, landskabstype og beregningsmetode.

8.1 Dybde og landskabstype

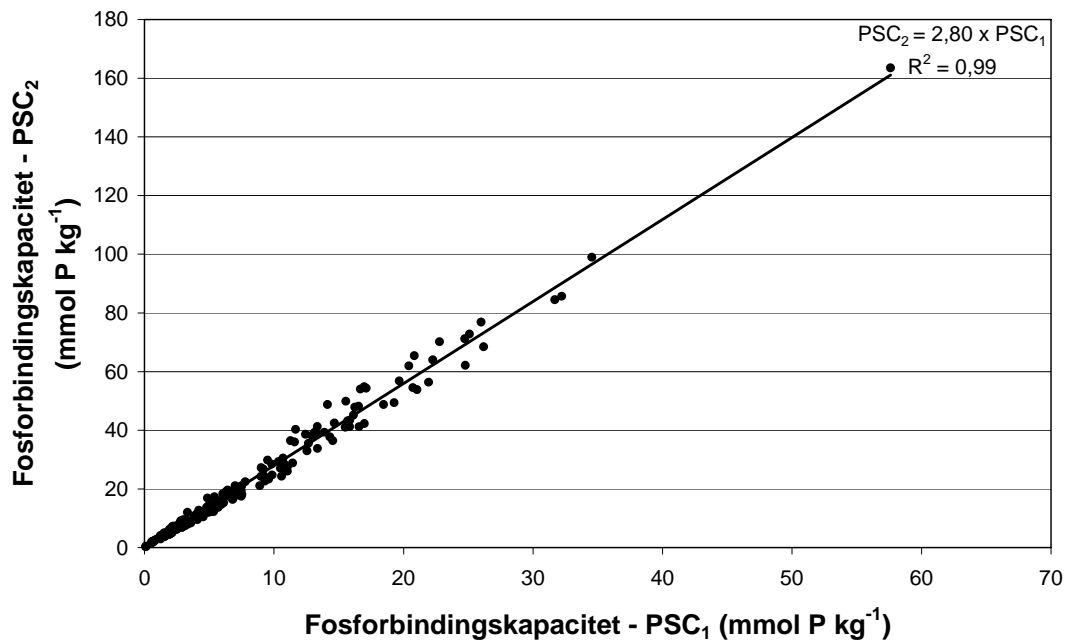
Fosforbindingskapaciteterne PSC_1 fordelt på landskabstype og dybde fremgår nedenfor:

- På Yoldia fladen er fosforbindingskapaciteten 14-16 mmol kg^{-1} i pløjelaget, 7-26 mmol kg^{-1} 1 meter under terræn, hvorefter PSC_1 bliver omkring 2 mmol kg^{-1} i prøver udtaget ned til 6 meter under terræn.
- På alluvialkeglen er fosforbindingskapaciteten 10-15 mmol kg^{-1} i pløjelaget, hvorefter den stiger til 15-21 mmol kg^{-1} i 0,4 meter under terræn for to lokaliteter og falder til 6-7 mmol kg^{-1} på den 3. lokalitet, hvorefter bindingskapaciteten på alle tre lokaliteter er mellem 3 og 7 mmol kg^{-1} .
- Fosforbindingskapaciteterne for proximale hedeslette svarer til dem der er beskrevet for alluvialkegle.
- På den distale hedeslette er fosforbindingskapaciteten i pløjelaget lavere (7-10 mmol kg^{-1}) end i andre dele af hedesletten. På to lokaliteter forbliver PSC_1 uændret ned i 0,4 meter under terræn, mens den stiger til 14-22 mmol kg^{-1} på andre to lokaliteter. Herefter falder fosforbindingskapaciteten til 4-5 mmol kg^{-1} .
- På smeltevandssand af Saale alder (bakkeø) er bindingskapaciteten forholdsvis høj indenfor den øverste halve meter (17-32 mmol kg^{-1}) hvorefter den aftager til samme lave niveau (5-8 mmol kg^{-1}).
- For morænesand på bakkeø er fosforbindingskapaciteten 12-23 mmol kg^{-1} i pløjelaget. På to lokaliteter aftager PSC_1 til 3-7 mmol kg^{-1} i dybere prøver mens PSC_1 på andre 4 lokaliteter ligger i intervallet <2 til 3 mmol kg^{-1} . På en enkelt af disse lokaliteter stiger PSC_1 til 5 i 9 og 10 meters dybde.
- På morænesand af Weichsel alder er fosforbindingskapaciteten i pløjelaget 13-25 mmol kg^{-1} og dermed sammenlignelig den for smeltevandssand og morænesand på bakkeø. Ved Gammelkirke, hvor sedimenterne forbliver kalkfrie i hele det undersøgte profil, er PSC_1 beregnet til omkring 14 mmol kg^{-1} ned til 4 meter og derefter 2 mmol kg^{-1} ned til 6 meter under terræn.

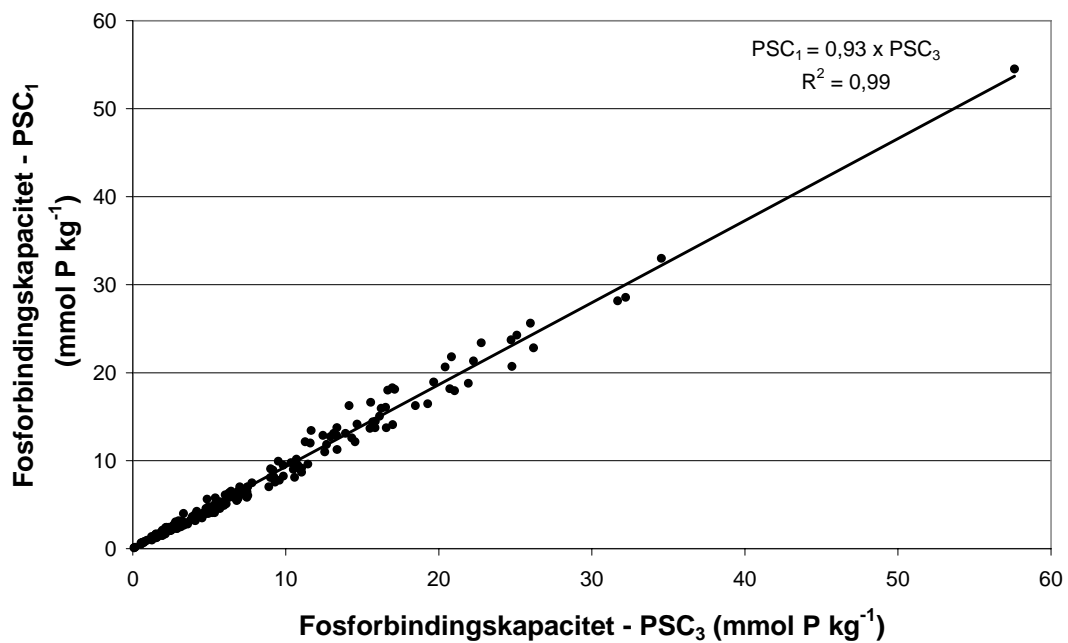
8.2 Beregningsmetode

I beskrivelsen af de forskellige landskabstyper fremgår det, at beregningerne af PSC_1 og PSC_2 giver forskellige fosforbindingskapaciteter, men at forløbet fra overfladen og dybere ned ofte har nogenlunde samme forløb. Således hersker der en god sammenhæng mellem de to beregningsmetoder ($R^2=0,99$), der kan beskrives som $PSC_2 = 2,80 \times PSC_1$, figur 15. Fosforbindingskapaciteter af typen PSC_1 viser sammenholdt med de PSC_3 , der er beregnet efter Van der Zee

(1988), en god lineær sammenhæng ($R^2=0,99$), der kan beskrives ved $PSC_1 = 0,93 \times PSC_3$, figur 16.



Figur 15. Fosforbindingskapaciteter beregnet efter en modificeret udgave af Borggard et al. (2004) - PSC₁ - og Schoumans og Groenendijk (2000) - PSC₂. Sammenhængen kan beskrives som $PSC_2 = 2,80 \times PSC_1$ (mmol P kg⁻¹).



Figur 16. Fosforbindingskapaciteter beregnet efter en modificeret udgave af Borggard et al. (2004) - PSC₁ - og Van der Zee (1988) - PSC₃. Sammenhængen kan beskrives som $PSC_1 = 0,93 \times PSC_3$ (mmol P kg⁻¹).

9 Forbrug i fosforbindingskapacitet

9.1 Dybde og landskabstype

Til at beskrive forbruget i fosforbindingskapacitet er puljen af $P_{H_2SO_4}$ sammenholdt med fosforbindingskapaciteter beregnet som henholdsvis PSC_1 og PSC_2 .

Når $P_{H_2SO_4}$ sammenholdes med PSC_1 beskrives forbruget i bindingskapacitet ved DPS_1 . På Yoldia fladen er DPS_1 30-160 % i pløjelaget og laget ned til 1 meter under terræn. Dybere er puljen af fosfor markant højere end fosforbindingskapaciteten, svarende til 110-370 % ned til maksimalt 6 meter under terræn.

På alluvialkeglen er DPS_1 beregnet til 37-71 % i pløjelaget, hvorefter forbruget aftager til under 10 % i B horisonterne med høje indhold af Fe_o og Al_o . Under B-horisonterne forbliver DPS_1 under 25 % for Nedre Juliane og Søbjerg (henholdsvis ned til henholdsvis 6 meter og 2 meter under terræn) mens DPS_1 ved Nørlund varierer mellem 20 og 40 % i jordlagene ned til 8 meter.

På den proximal hedeslette er forbruget af fosforbindingskapaciteter ligeledes højt, med DPS_1 på 42-90 % i pløjelaget, hvorefter forbruget i bindingskapacitet falder til 11-19 % i 0,7 meter under terræn og således følger samme trend som beskrevet for lokaliteterne på alluvialkeglen.

På den distale hedeslette udgør puljen af $P_{H_2SO_4}$ mellem 39 og 118 % af fosforbindingskapaciteten i pløjelaget hvorefter DPS_1 aftager til 10-15 % i ca. 0,4 meter under terræn for atter at stige svagt i de efterfølgende prøver ned til maksimalt 6 meter.

Forbruget af fosforbindingskapacitet i pløjelaget i smeltevandssand på bakkeøen er ligeledes højt (31 og 92 %) hvorefter DPS_1 blev mindre end 25 % ned til 4-5 meter under terræn, hvor antagelig oprindeligt fosfor - samtidig med et lille indhold af Fe_o og Al_o - bevirker at DPS_1 stiger til 72 - 131%.

I profilerne med morænesand på bakkeø er forbruget af bindingskapacitet ligeledes forholdsvis højt (66-102 %) i pløjelaget (med undtagelse af Nr. Felding - 11 %). Denne landskabstype er desuden typisk karakteriseret ved lave DPS_1 -værdier (<25 %) i de efterfølgende jordlag, ned til maksimalt 10 meter under terræn. Eneste undtagelse er dybe prøver fra Lomborg, der antyder tilstedeværelse af oprindeligt fosfor og hvor DPS_1 værdierne på 46-106 %.

Forbruget af fosforbindingskapacitet i pløjelaget i morænesand af Weichsel alder er ligeledes forholdsvis højt sammenlignet med efterfølgende jordlag. Ved Gammelkirke, der fremstår kalkfrit i hele profilen ned til 6 meter under terræn, er puljen af $P_{H_2SO_4}$ 2-3 gange højere end bindingskapaciteten.

9.2 Beregningmetode

Hvis forbruget af fosforbindingskapacitet baseres på beregninger af PSC_2 vil forbruget i bindingskapacitet DPS_2 være omkring en tredje del af den beskrevet ved DPS_1 .

10 Sammenfatning

På baggrund af resultaterne fra den umættede zone på 25 lokaliteter samt supplerende data fra andre tilsvarende sandlokaliteter kan det konstateres at:

- indholdet af uorganisk bundet fosfat, $P_{H_2SO_4}$, typisk er forøget i pløjelaget og for enkelte lokaliteter kan berigelsen følges ned til maksimalt 1 meter under terræn.
- indholdet af $P_{H_2SO_4}$ i jordlagene under den fosforberigede zone (baggrundskoncentrationen) varierer indenfor de forskellige landskabstyper. De højeste baggrundskoncentrationer findes i marine aflejringer på Yoldia fladen samt i morænesand af Weichsel alder. Hedesletteaflejringerne hører til en mellemkategori og de laveste baggrundskoncentrationer forekommer typisk i smeltevands- og morænesand på bakkekøerne.
- indholdet af plantetilgængeligt fosfor, P_{olsen} , udgør normalt kun en lille del af puljen af $P_{H_2SO_4}$.
- der hersker en forholdsvis god sammenhæng mellem $P_{H_2SO_4}$ og P_{olsen} i jordprøver fra den fosforberigede zone. En tilsvarende god sammenhæng blev ikke fundet for prøver udtaget under den fosforberigede zone. Dette kan bl.a. skyldes forskelle i sammensætningen af de fosforholdige mineraler, deres opløselighed samt bindingsforhold.
- at den beregnede fosforbindingskapacitet kun øges lidt (< 5 %) når Fe_d , Fe_o og Al_o indrages sammenlignet med beregnede fosforbindingskapaciteter baseret på analyser af Fe_o og Al_o . Indholdet af Fe_d bidrager således kun i ringe omfang til fosforbindingskapaciteten i danske, sandede, kalkfrie jorde og sedimenter, dom der her undersøgte.
- fosforbindingskapaciteten i de undersøgte sandjorde normalt er forholdsvis høj i pløjelag og B-horisonter men aftager i de efterfølgende dybere lag.
- den absolutte størrelsen af fosforbindingskapaciteten varierer efter beregningsmetode, men den relative fordeling af fosforbindingskapaciteter er nogenlunde ens for de her anvendte beregningsmetoder.
- forbruget af fosforbindingskapacitet er forholdsvis højt i pløjelaget på alle landskabstyper. Kun på Yoldia fladen samt på en enkelt lokalitet på morænesand på bakkeø forbliver forbruget af fosforbindingskapacitet højt i de efterfølgende dybere jordlag.

11 Perspektivering

Undersøgelsen har bidraget med ny viden vedrørende indhold og fordeling af forskellige fosforpuljer, fosforbindingskapaciteter samt forbrug af fosforbindingskapacitet i typiske danske, sandede, kalkfrie jorde og sedimenter.

Som supplement til de foreliggende analyseresultater anbefales det, at der i fremtidige studier:

- etableres en sammenhæng mellem forbruget i fosforbindingskapacitet beregnet som PSC_1 (delvis efter Borggaard et al., 2004) og fosforkoncentration i det nedsivende vand til brug for bl.a. en bedre forståelse af sammenhængen mellem fosformætning og vandkvaliteten i det akvatiske miljø.
- tilvejebringes et detaljeret kendskab til redoxgrænsens udbredelse på lokal skala som supplement til det allerede foreliggende nationale kort, der har en opløselighed på 1x1 km grid. Supplerende oplysninger vil kunne bidrage til en bedre forståelse af udbredelsen af jordlag, der bidrager til bindingen af nedsivende fosfor.
- af mobilitet og binding af fosfor skelnes mellem puljer af fosfor, der er tilført fra overfladen og geologisk betinget fosfor.
- udarbejdes relevante korttemaer til brug for sårbarhedskortlægningen af fosfor. Her bør bl.a. inddrages oplysninger om 1) tykkelse af den oxiderede zone, 2) jorde og sedimenters fosformætning, 3) jord- og sedimenters fosforbindingskapacitet, 4) nærhed til recipient samt 5) tykkelsen af umættet zone i forbindelse med beskrivelse af det akvatiske miljø.

Således er de mest sårbare områder karakteriseret ved en mangelfuld eller tynd oxideret zone med høj fosformætning, ringe fosforbindingskapacitet, ringe afstand til recipient og højtliggende grundvandsspejl. Grundvandets bidrag til P-indekset kan således ikke begrænses til blot et afstandskriterium – udtrykt ved afstanden mellem mark og recipient.

12 Referencer

Barlebo, H.C. (red.) 2002. Undersøgelser- og analysemetoder anvendt i forbindelse med undersøgelser af sandlokaliteter: Hvilke metoder er anvendt, og hvilke overvejelser er gjort?. Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 2. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Borggaard, O.K., J.P. Møberg og E. Sibbesen. 1991. Indhold og mobilitet af fosfor i jord. I J-O Frier og J.R. Christensen (red.). Kvælstof, fosfor og organisk stof i jord og vandmiljøet. Rapport fra konsensuskonference, 31. januar, 1.-4. februar 1991.

Borggaard, O.K., Szilas, K., Gimsing, A. og Rasmussen, L. 2004. Estimation of soil phosphate adsorption capacity by means of a pedotransfer function. *Geoderma* 118:55-61.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005a. Kapitel 3.3 og 5.4 "Kemiske og mineralogiske undersøgelser" i Barlebo, H.C. (red.). Senglacial marint sand inden for Yoldia fladen: Basisdata fra Vendsyssel. Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 3. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005b. Kapitel 3.3 og 5.4 "Fysiske, kemiske og mineralogiske undersøgelser" Ernstsen, V. (red.). Morænesand af Weichsel alder indenfor moræneflader: Basisdata fra Djursland og Himmerland. Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 6. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005c. Kapitel 3.3 "Fysiske, kemiske og mineralogiske undersøgelser" Ernstsen, V. (red.). Glaciale smeltevandsaflejringer af Saale alder inden for bakkeøer: Basisdata fra Skovbjerg og Esbjerg bakkeøer. Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 9. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005d. Kapitel 3.3 og 5.4 "Fysiske, kemiske og mineralogiske undersøgelser" i Jacobsen, C.S. (red.). Morænesand af Saale alder inden for bakkeøer: Basisdata fra Skovbjerg og Esbjerg bakkeøer. Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 5. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005e. Kapitel 3.3 og 5.4 "Fysiske, kemiske og mineralogiske undersøgelser" i Jacobsen, C. S. (red.) Ekstramarginal smeltevandssand af Sen Weichsel alder inden for den distale del af smeltevandssletten: Basisdata fra Karup og Tinglev hedesletter. Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 7. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005f. Kapitel 3.3 og 5.4 "Fysiske, kemiske og mineralogiske undersøgelser" i Iversen, B.V. (red.) Ekstramarginalt smeltevandssand af Sen Weichsel alder inden for den proximale del af smeltevandssletten: Basisdata fra Karup og Tinglev hedesletter. Koncept for udpegning af pesticidfølsomme arealer, rapport 8. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005g. Kapitel 3.3 og 5.4 "Fysiske, kemiske og mineralogiske undersøgelser" i Torp, S. (red.). Ekstramarginale smeltevandsaflejringer af Sen Weichsel alder inden for alluvialkeglen: Basisdata fra Karup og Tinglev hedesletter. Koncept for udpegnings af pesticidfølsomme arealer, rapport 4. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Ernstsen, V. og S. Torp. 2005h. Kapitel 3.3 "Fysiske, kemiske og mineralogiske undersøgelser" i Torp, S. (red.) Morænesand af Weichsel alder inden for moræneflader: Basisdata fra Vendsyssel. Koncept for udpegnings af pesticidfølsomme arealer, rapport 10. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse.

Hansen, B. og N. K. Sørensen. 1996. Metodereferencer til Centrallaboratoriets analyser. Statens Husdyrbrugsforsøg. Intern rapport nr. 79.

Mehra, O.P. og M.L. Jackson. 1960. Ironoxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and clay minerals* 5: 317-327.

Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe og L. A. Dean (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with bicarbonate. U.S. Dept. Agric. Circular 939:1-29.

Poulsen, H.D., J.F. Hansen, G.H. Rubæk, J. Sehested og A. Kyllingsbæk. 2005. Indledning. I H. D. Poulsen og G.H. Rubæk (red.) Fosfor i dansk landbrug. Omsætning, tab og virkemidler mod tab. Danmarks JorbrugsForskning, Husdyrbrug nr. 68.

Rubæk, G.H., B. Kronvang og G. Heckrath. 2005. Fosforomsætning i og –tab fra marken. I H. D. Poulsen og G.H. Rubæk (red.) Fosfor i dansk landbrug. Omsætning, tab og virkemidler mod tab. Danmarks JorbrugsForskning, Husdyrbrug nr. 68.

Schoumans, O.F. og P. Groenendijk. 2000. Modeling soil phosphorous leaching from agricultural land in the Netherlands. *Journal of Environmental Quality* 29:111-116.

Schwertmann, U. 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Boden durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 1005: 194-202.

Van der Zee, S.E.A.T.M. 1988. Transport of reactive contaminants in heterogeneous soil systems. Ph.D. thesis. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.