

Vurdering af sandjorders evne til at sikre afgrøders fosforbehov med fokus på arealer i Nordjylland med moderate og høje fosfortal

Endelig rapport ang. resultater opnået i opgave 1, 2, og 3 i projektet ”Arealer med overset P-behov” jf. rammeaftale mellem AU og SEGES

Ingeborg Frøsig Pedersen og Gitte Holton Rubæk, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

December 2022



STØTTET AF

Promilleafgiftsfonden for landbrug

Indhold

Sammendrag.....	1
Forord	3
1. Indledning.....	4
2. Markforsøg	6
2.1 Karakteristik af forsøgssteder.....	6
2.2 Udbyttedata.....	11
3. Test af jordanalyser til vurdering af fosforstatus på jorder med forskellig geologisk oprindelse (opgave 1)	13
3.1 Metode	13
3.1.1 Jordprøveudtagning.....	13
3.1.2 Jordanalyser.....	15
3.2 Resultater og diskussion	16
3.2.1 Jordanalyser af overjord grupperet efter landskabstype.....	16
3.2.2. Sammenhænge mellem jordanalyser.....	30
3.2.3 Sammenhænge mellem jordanalyser og det relative udbytte.....	37
4. Studier af jordfysiske egenskaber, jordtemperatur og tidlig rodvækst i udvalgte markforsøg (opgave 2)	49
4.1 Jordens densitet, vandholdende evne og penetreringsmodstand.....	50
4.1.1 Metoder.....	50
4.1.2 Resultater og diskussion.....	51
4.2 Tidlig rodvækst	55
4.2.1 Metode	55
4.2.2 Resultater og diskussion.....	56
4.3 Jordtemperatur og klimaforhold	59
4.4 Sammenstilling i par relateret til de detaljerede målinger	65
5. Bladprøver: Tidlig udvikling og indsamlingsmetode (opgave 3)	67
5.1 Metode	67
5.2 Resultater og diskussion	69
5.2.1 Fosforkoncentrationer i blad i behandlinger med og uden fosfor	69
5.2.2 Sammenligning af fosforkoncentration i det yngste fuldtudviklede blad og i hele planten	72
5.2.3 Sammenhæng mellem fosforkoncentration i blad og det relative udbytte.....	74
5.2.4 Tidlig udvikling i fosforkoncentrationer i blad	76
5.2.5 Fosforkoncentration i blad relateret til jord P-tests.....	78
6. Mulige årsager til overset fosforbehov på visse arealer med moderate og høje P-tal.....	80
6.1 Ekstraktionsmetode.....	80
6.2 Jordens geologiske oprindelse og georegion	81
6.3 Jordens fysiske egenskaber	82

6.4 Rodvækst	83
6.5 Klimatiske forhold.....	83
6.6 Udpegning af arealer med overset fosforbehov	83
7. Konklusion	85
Referencer	86
Appendix A. Eksperimentelle detaljer for markforsøg	90
Appendix B. Øvrige data for jordfysiske målinger	92
Appendix C. Protokol over ekstraktion af fosfor med kalciumklorid	93
Appendix D. Jordtemperatur i Tylstrup og Jyndevad	94
Appendix E. Sammenhæng mellem det relative udbytte og merudbytte	95

Sammendrag

Det overordnede formål med dette projekt var at identificere arealer med moderat eller højt fosfortal (P-tal), hvor der kan opnås et øget udbytte efter tilførsel af mineralsk fosfor (P) og få bedre forståelse af, hvorfor denne udbytterespons opnås.

Denne rapport opsamler resultater for 32 markforsøg udført i projektperioden fra 2020-2022. Heraf var 27 placeret i Nordjylland, hvor der tidligere er set udbyttestigninger ved placeret P-gødsning på jorder med høje P-tal. De 32 forsøgsarealer blev valgt, så jorder på forskellige marine og ikke-marine aflejringer var repræsenteret. Derudover blev fem forsøg var anlagt i Sydvestjylland på landskabstyperne bakkeø og hedeslette.

I hvert markforsøg blev der placeret stigende mængde mineralsk P (0, 7,5, 15, 30 og 60 kg P/ha) ved såning af vårbyg. Hvert forsøg blev udført som et randomiseret blokforsøg med fire gentagelser. Inden gødsning og såning blev der udtaget jordprøver i pløjelaget til bestemmelse af forskellige P-puljer og andre jordkemiske parametre. I udvalgte forsøg blev der derudover lavet detaljerede studier af jordfysiske forhold, jordtemperatur og rodvækst i tidlige vækststadier. Dette blev gjort for at undersøge, om sådanne forhold kunne medvirke til at forklare de observerede udbytterespons på P-gødsning. Derudover blev P-koncentration i blade i den tidlige vækst bestemt for at vurdere, om P-koncentrationen i blad var en indikator for jordens evne til at forsyne planten med P.

Af de 32 markforsøg var der 14 forsøg, hvor der var signifikant effekt på udbytte efter tildeling af mineralsk P. Alle steder med udbytterespons efter tilførsel af P var beliggende i Nordjylland. I elleve af de 14 forsøg med udbytterespons var det relative udbytte (beregnet som udbyttet i ugødgede plots som procent af udbyttet efter tildeling af 60 kg P/ha) 90% eller lavere.

Steder med udbytterespons efter P-tilførsel var meget forskelligartede både mht. tekstur, landskabstype og P-bindingskapacitet. I alle tre forsøg udført på et inddæmmede areal på Litorinafladen var der signifikant merudbytte efter tildeling af P. Fem ud 14 forsøg med udbytterespons var beliggende på landskabstypen Yoldia (ældre marin aflejring), men også i forsøg udført på landskabstyperne Litorina (yngre marin aflejring), randmoræne og yngre moræne var der udbytterespons. Der var ikke udbytterespons i forsøg udført i Sydvestjylland på landskabstyperne hedeslette og bakkeø.

Indholdet af amorfe (dvs. ikke-krystalliske) aluminiumoxider (bestemt vha. ekstraktion med oxalat) kan bidrage væsentligt til en jords P-bindingskapacitet. For forsøg udført på Yoldia og ikke-marine aflejringer, forekom der positivt udbytterespons efter P-tilførsel med stigende indhold af oxalatekstraherbart aluminium i jorden. Det indikerer, at aluminiumoxiderne kan binde jordens P på en måde, der reducerer planternes mulighed for at optage P fra jorden på kritiske tidspunkter under væksten, og at supplerende P-gødsning kan være nødvendigt. Sammenlignet med de øvrige landskabstyper havde jorder på Litorinafladen et lavere indhold af oxalatekstraherbart aluminium. I fire forsøg (heraf tre inddæmmede arealer) udført på Litorinafladen forekom der også udbytterespons efter P-tildeling trods et lavere indhold af oxalatekstraherbart aluminium, hvilket indikerer, at binding af P til amorfe aluminiumsforbindelser ikke bidrager væsentligt til at forklare udbytterespons i disse forsøg. Alle forsøg på Litorinafladen var klassificeret som mineralsk lavbund, og hermed kunne andre mekanismer være styrende for binding og frigivelse af P end på ikke-lavbundsjorderne.

De tre vækstsæsoner varierede betydeligt ift. nedbør og temperatur. Alligevel forekom der udbytterespons efter P-tildeling i alle tre år, hvilket viser at et merudbytte ved P-tildeling ikke var væsentligt påvirket af vejret i vækstsæsonen.

Opgørelsen viser, at der var ringe sammenhæng mellem jordens P-tal og det relative udbytte. Der var bedre sammenhæng mellem det relative udbytte og P ekstraheret med demineraliseret vand (Pvand) eller en

tynd opløsning af CaCl_2 (PCaCl_2). Sidstnævnte metoder er tæt relateret til P-koncentrationen i jordvæsken. Den bedste forklaringsgrad blev opnået, når forholdet mellem PCaCl_2 og P-tal blev relateret til det relative udbytte. På jorder med en PCaCl_2 / P-tal-ratio under 0,2 havde 10 ud af 11 forsøg et relativt udbytte på < 90%. Det indikerer, at for sandede jorder med $\text{pH} < 7$ beliggende i Nordjylland med P-tal > 2 vil en supplerende jordanalyse af P ekstraheret med CaCl_2 ud over P-talsanalysen, forbedre muligheden for at vurdere, om der på den givne jord kan opnås øget udbytte ved at gødske (placeret) med P. Der er behov for at undersøge, om en supplerende P- CaCl_2 analyse også forbedrer muligheden for at identificere responderende jorder uden for Nordjylland.

Fosforkoncentration i det yngste fuldtudviklede blad i de tidlige vækststadier var også korreleret til de relative udbytter. Måling af P-koncentrationen i blade tidligt i vækstsæsonen kan derfor også give en god indikation af, om den givne jord vil respondere på P-tildeling eller ej.

Forord

Denne rapport opsamler resultater opnået i projektet "Arealer med overset fosforbehov" (2020-2022) jf. rammeaftalen mellem Aarhus Universitet (AU) og SEGES.

SEGES har leveret jordprøver (inkl. resultater for P-DGT-analyser), bladprøver og udbyttedata fra markforsøg udført i regi af Landsforsøgene[®] til AU, mens AU har stået for analyser af jordprøver og studier af tidlig rodvækst samt statistisk analyse af resultaterne. Placering af markforsøg og den overordnede prøveudtagningsstrategi blev diskuteret og besluttet af i hele projektgruppen forud for hver vækstsæson under hensyntagen til projektets budget. SEGES var ansvarlig for at finde forsøgsværter, der i videst muligt omfang passede til den fastlagte strategi.

Rapporten er skrevet af projektdeltagerne fra AU (Ingeborg Frøsig Pedersen og Gitte H. Rubæk). Rapporten og data for jordprøveanalyser og rodvækst udført af AU er til intern brug indtil offentliggørelse af resultater i internationalt videnskabeligt tidsskrift, hvilket forventes at ske i løbet af 2023. Der må gerne refereres til rapporten og data for jordprøveanalyser og rodvækst indtil da.

Rapporten er internt fagfællebedømt af professor Lars J. Munkholm, Aarhus Universitet.

Rapporten har efter intern fagfællebedømmelse været til ekstern kommentering hos Camilla Lemming, SEGES. Skema med eksterne kommentarer og svar fra AU foreligger.

1. Indledning

Sikker identifikation af arealer med behov for P-tilførsel er vigtigt for at opnå høj udnyttelse af tilførte næringsstoffer og et højt udbytte. Specielt er det vigtigt at kunne identificere områder, hvor fosfortallet (P-tallet) indikerer, at der ikke er behov for tilførsel, men hvor der på trods heraf alligevel er klar positiv respons i udbyttet på P-tilførsel.

Analyser af jordens forskellige puljer af P vha. ekstraktion benyttes ofte som grundlag for gødningsanbefalinger for P-tilførsel (Jordan-Meille et al., 2012; Steinfurth et al., 2022). I en række europæiske lande (Danmark, England, Frankrig, Italien og Spanien) benyttes (varianter af) Olsen-P metoden til vurdering af jordens P-status (Jordan-Meille et al., 2012). I Danmark benyttes P-tallet (angivet i mg P/100 g jord), som metode til at klassificere jordens P-status. Fosfortalsanalysen er en variant af den klassiske Olsen-P metode (Olsen et al., 1954), hvor jorden udrystes i en 0,5 M natriumbikarbonat-opløsning indstillet til en pH-værdi på 8,5 (Rubæk & Kristensen, 2017). I P-talsanalysen tilsættes polyacrylamid som beskrevet i Banderis et al. (1976) for at hindre udfældning af organiske forbindelser, når biokarbonatopløsningen forsures i forbindelse med farvefremkaldelsen (Rubæk & Sørensen, 2011). Det antages, at P-tallet repræsenterer en pulje af labilt P bundet til jordens partikler som vedligeholder koncentrationen af P i jordvæsken, der også defineres som en kvantitetsfaktor Q (van Rotterdam et al., 2012). På baggrund af P-tallet klassificeres jordens P-status og hermed dens evne til at frigive P, der potentielt kan optages af afgrøden. I Danmark anvendes tre overordnede P-klasser; P-tal under 2 indikerer meget lav P-status, hvor der er behov for at tilføre mere P end afgrøden bortfører, P-tal mellem 2 og 4 indikerer moderat P-tal, som bør vedligeholdes ved at tilføre ligeså meget P som bortføres, og et P-tal over 4 indikerer høj P-status, hvor det er muligt at undergødske med P (Jordan-Meille et al., 2012). Fosfortal under 1 betragtes som meget lave og P-tal over 6 som meget høje, hvor P-tilførsel er overflødig.

I visse tilfælde er der dog ikke sammenhæng mellem jordens P-tal og afgrødernes respons på P-tildeling. Allerede i 2000 viste resultater fra to langvarige markforsøg på sandede jorder i Tylstrup i Nordjylland (P-tal 4,8) og Borris i Vestjylland (P-tal 3,4), at flere typer afgrøder responderede positivt på tilførsel af 15 og 30 kg mineralsk P (Rubæk & Sibbesen, 2000). I nyere markforsøg med vårbyg i regi af Landsforsøgene® med fokus på at evaluere P-tals- og Diffusive Gradients in Thin Films (DGT)-metoden responderede syv ud af 33 forsøg på P-gødsning trods moderate til høje P-tal. Merudbytterne i disse syv forsøg var for det meste beskedne og kunne ikke med sikkerhed forbindes med bestemte JB-klasser. DGT-metoden var væsentligt bedre til at identificere jorder med merudbytte end P-tallet, men fejlklassificerede også en del jorder som værende i behov for P-gødsning, hvor der ikke observeredes merudbytte efter P-gødsning (Christensen et al., 2018). Andre forsøg med vårbyg og vinterhvede under Landsforsøgene® (Lemming, 2020; Vestergaard, 2014, 2015) og et forsøg udført af Københavns Universitet (Carstensen et al., 2019) på et inddæmmed areal viste udbytterespons efter P-gødsning, selvom forsøgsarealerne havde høje P-tal. Disse resultater indikerer, at problemstillingen med udbytterespons efter P-gødsning trods høje P-tal særligt var knyttet til Nordjylland og muligvis til de marine aflejringstyper, som er hyppige i denne landsdel.

Det overordnede formål med dette projekt er derfor at undersøge, om problemerne med at P-tallet ikke er i stand til at identificere jorder med behov for P-gødsning korrekt, er særligt knyttet til jorder udviklet på de marine aflejringer, som forekommer hyppigt i Nordjylland. Derudover er formålet at undersøge, om andre P-ekstraktionsmetoder kan identificere jorder med uventet udbytterespons efter P-gødsning, såsom P ekstraheret med demineraliseret vand (Pvand) (Sissingh, 1971) eller en svag kalciumklorid-opløsning (PCaCl_2) (Houba et al., 2000). Indholdet af P ekstraheret med CaCl_2 er på visse jorder med lav P-status relateret til udbytterespons (e.g. Speirs et al., 2013), men hvorvidt disse simple ekstraktionsmetoder også kan bidrage til at forklare udbytterespons efter P-tildeling på jorder med moderate og høje P-tal og på danske jorder er kun sparsomt belyst.

Projektet har derudover undersøgt andre faktorer, der kunne bidrage til at forklare de merudbytter, som ses på jorder med moderate til høje P-tal herunder:

- Tilgængeligheden af P bestemt ved DGT-metoden, som er en såkaldt "sink metode", hvor tilgængeligt P flyttes i jorden via diffusion mod en Fe-oxid gel, der kan binde P (Mason et al., 2010).
- Analyse af oxalatekstraherbart P, aluminium (Al) og jern (Fe), der knytter sig til bestemmelse af jordens P-bindingskapacitet og -mætningsgrad.
- Udvalgte jorder er også analyseret for:
 - Isotop-ombytningskinetik (IEK) af P, hvorfra der kan opnås kendskab om P-frigivelsesraten og mængden af P, der kan ombyttes inden for 1 min (Frossard & Sinaj, 1997).
 - Fysiske forhold i pløjelaget, der kunne påvirke tidlig rodvækst og hermed plantens mulighed for at afsøge tilgængeligt P i jorden
 - P-koncentration i blade i tidlige vækststadier med henblik på at undersøge om P-koncentrationen er relateret udbytterespons ved høst, og hermed kan anvendes som støtte eller alternativ til jordanalyser.

2. Markforsøg

I projektperioden blev der udført 32 markforsøg med konventionelt dyrket vårbyg med almindelig brug af pesticider. Forskellige sorter blev anvendt i forsøgene i 2020. I 2021 og 2022 blev sorten "Flair" anvendt i alle forsøg. Yderligere detaljer om forfrugt, såning, gødskning og høsttidspunkt er angivet i Appendix A.

2.1 Karakteristik af forsøgssteder

Forsøgslokaliteterne blev valgt ud fra kriterier om at P-tallet forventes at være moderat til højt ($> 3,5$) samt at jordbundstypen skulle være sandet (helst JB 2 eller 4). Arealer på marine aflejringer blev prioriteret (både Yoldia- og Litorina-aflejringer), men et mindre antal forsøg blev også anlagt på moræneaflejringer i Nordjylland og på ikke-marine aflejringer uden for Nordjylland (hedeslette eller bakkeø i Sydvestjylland). Forsøgene i Sydvestjylland blev anlagt i nærheden af arealer, hvor der tidligere er observeret udbytterespons ved P-tildeling, selvom jorden havde moderate til høje P-tal. Disse overordnede kriterier for valg af forsøgslokaliteter blev gjort af hele projektgruppen fra SEGES og AU i fællesskab forud for hver vækstsæson, og SEGES lokaliserede i samarbejde med lokale konsulenter de præcise lokaliteter, der bedst muligt opfyldte kriterierne. For hver lokalitet har vi hentet informationer fra forskellige kortlag om lokalitetens landskabstype, jordart, lavbundsklassificering, historisk anvendelse og georegion. En jordprøve fra pløjelaget af hver lokalitet udtaget i forbindelse med valg af forsøgssteder, blev analyseret for tekstur og er brugt til at klassificere jorden med et JB nr.

Tabel 1 viser en oversigt over de 32 markforsøg med data fra korttemaer om landskabstype, jordart, lavbund og dræningsgrad opgivet. En unik kode er desuden angivet for hvert forsøg (se tekstboks 1). Samme lokalitet kan godt gå igen over flere år. Forsøgene er dog ikke udført på samme mark (på nær forsøg udført på lokaliteten Brovst_a i 2020 og 2022 og Jerslev_a i 2020 og 2021), men på nærliggende marker. Den unikke kode fremkommer på figurerne i denne rapport.

Ved fremstilling af figurer i denne rapport har vi kombineret og grupperet resultater fra alle tre forsøgsår på basis af landskabstype.

Tekstboks 1. Fosforresponsforsøgene er navngivet som dette eksempel

***Tylstrup_20**

hvor:

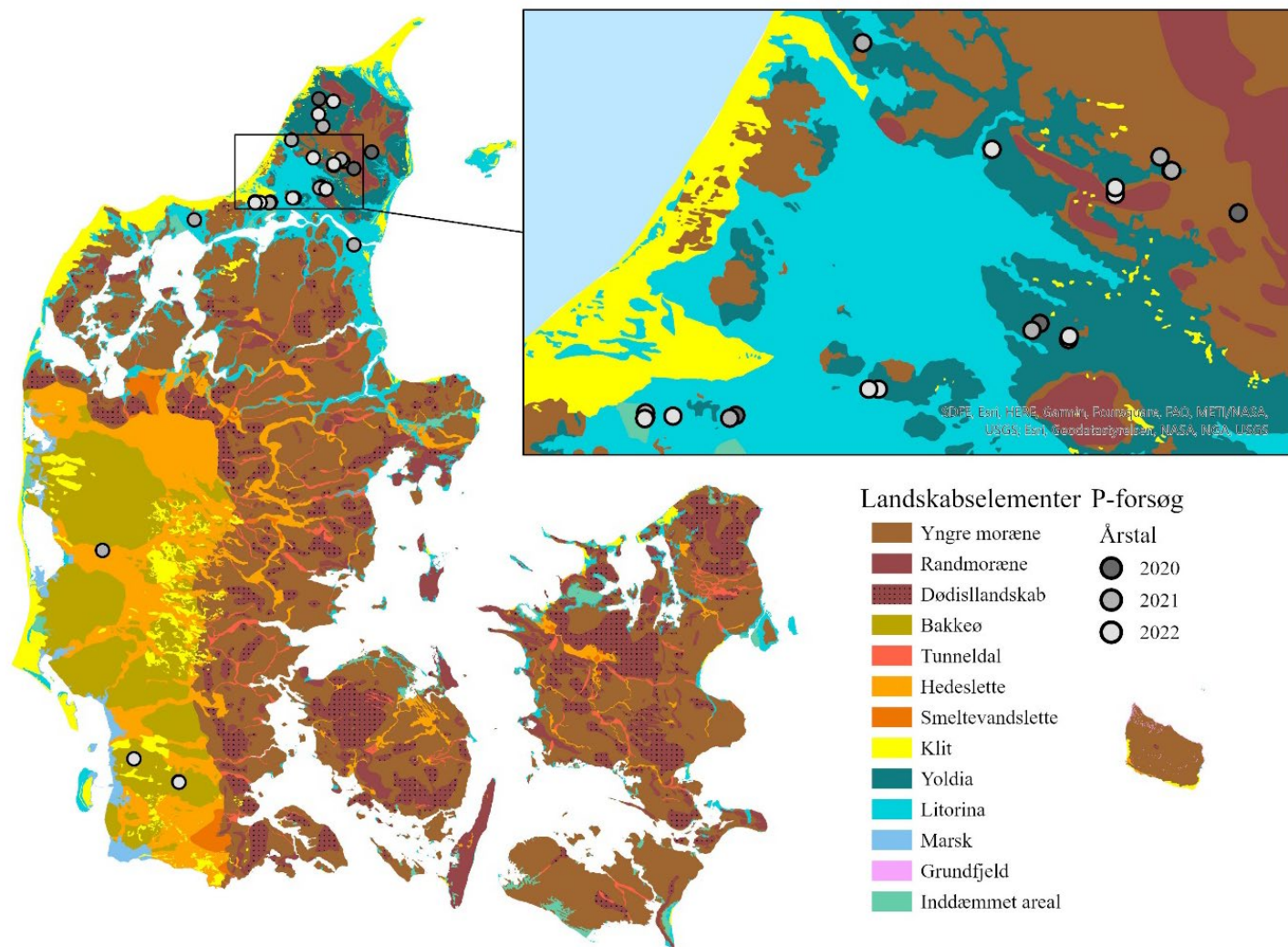
- En lokal stedbetegnelse - her Tylstrup
- Evt. en foranstående * der angiver at der var signifikant udslag for at give fosfor (60 kg P/ha) i forsøget
- Et årstal for forsøgets udførsel (20, 21 eller 22)

På figurerne er der derudover angivet forsøgsstedets landskabstype ifølge kortmaterialet der findes på <https://gis-au.maps.arcgis.com/apps/instant/basic/index.html?appid=6f010eb05af148d8a157f14fa5ac45a4>

1 Tabel 1. Karakterisering af de 32 markforsøg med info om landskabstype, jordart, lavbund, dræningsgrad og jordbundstype. Hvert forsøgssted er desuden angivet med unik kode
2 (se tekstboks 1).

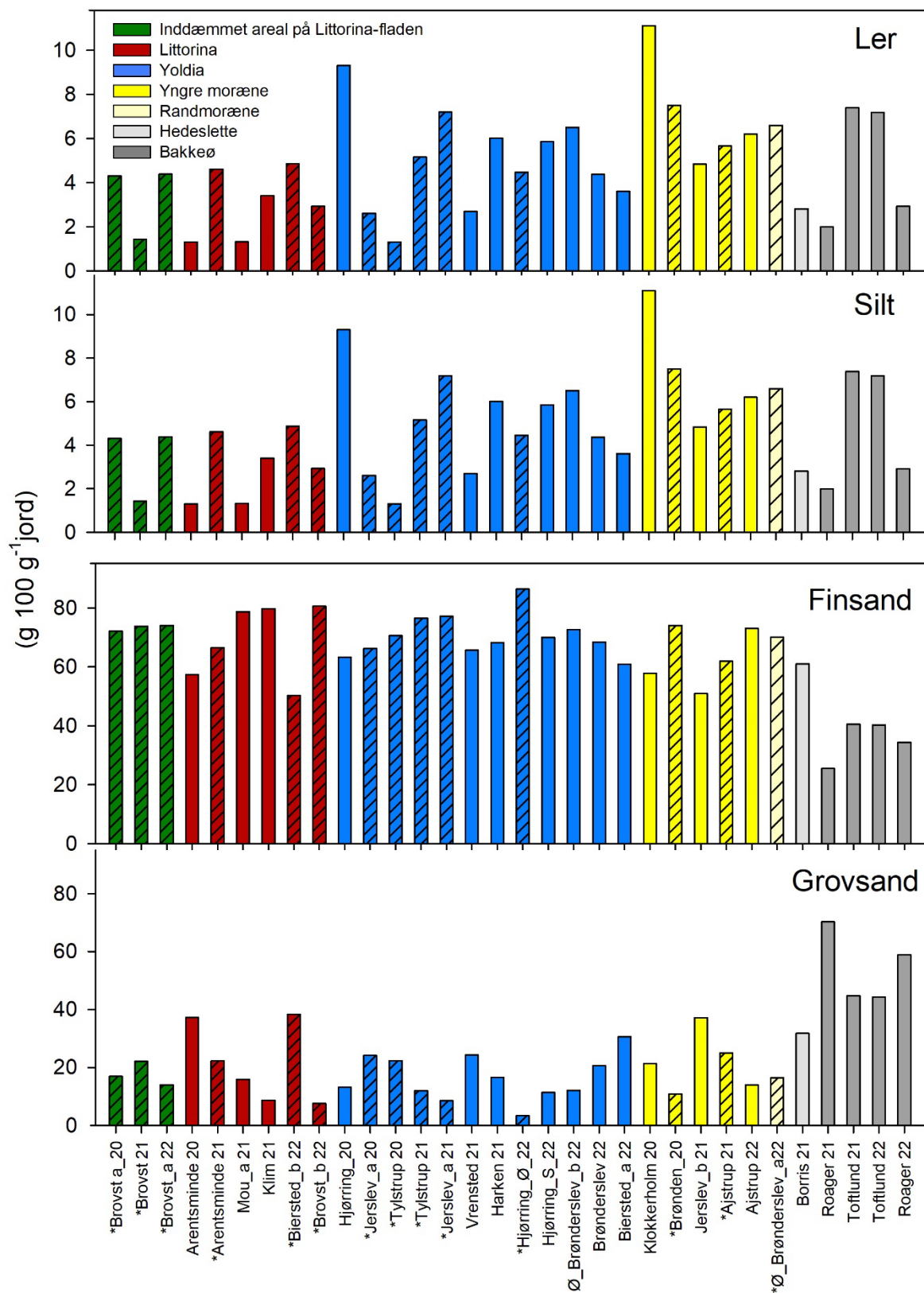
År	Forsøgsnr	Stednavn	Landskabstype	Jordart	Lavbundsclassificering	Dræningsgrad	Historisk anvendelse	JB nr.	Georegion	Unik kode
2020	070532020-001	Hjørring	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	6	Nord	Hjørring_20
	070532020-002	Tylstrup	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	4	Nord	*Tylstrup_20
	070532020-003	Brovst_a	Inddæmmet areal på Litorina-aflejring	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Drænet	Eng	4	Nord	*Brovst_a_20+
	070532020-004	Jerslev_a	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Hede	4	Nord	*Jerslev_a_20++
	070532020-005	Klokkerholm	Yngre moræne	DS - Smeltevandssand	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	Klokkerholm_20
	070532020-006	Arentsminde	Litorina	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Ikke drænet	Mark	2	Nord	Arentsminde_20
	070532020-007	Brønden	Yngre moræne	DS - Smeltevandssand	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	*Brønden_20
2021	070532121-001	Ajstrup	Yngre moræne	FP - Ferskvandsgytje	Mineralsk lavbund	Drænet	Eng	4	Nord	*Ajstrup_21
	070532121-002	Tylstrup	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	*Tylstrup_21
	070532121-003	Brovst	Inddæmmet areal på Litorina-aflejring	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Drænet	Eng	2	Nord	*Brovst_21
	070532121-004	Jerslev_a	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Hede	4	Nord	*Jerslev_a_21++
	070532121-005	Jerslev_b	Yngre moræne	DS - Smeltevandssand	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	Jerslev_b_21
	070532121-006	Arentsminde	Litorina	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	*Arentsminde_21
	070532121-007	Vrensted	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	4	Nord	Vrensted_21
	070542121-001	Borris	Hedeslette	Ukendt	Mineralsk lavbund	Ikke drænet	Hede	2	Vest	Borris_21
	070542121-002	Mou_a	Litorina	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Drænet	Mark	2	Himmerland	Mou_a_21
	070542121-003	Mou_b (forsøg ikke høstet)	Litorina	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Himmerland	Mou_b_21
	070542121-004	Klim	Litorina	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Ikke drænet	Eng	4	Nord	Klim_21
	070542121-005	Harken	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	4	Nord	Harken_21
	070542121-006	Roager	Bakkeø	ML - Moræneler	Ikke lavbund	Ikke drænet	Hede	1	Vest	Roager_21
	070542121-007	Toftlund	Bakkeø	ML - Moræneler	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	3	Vest	Toftlund_21
2022	070532222-001	Biersted_a	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	2	Nord	Biersted_a_22
	070532222-002	Biersted_b	Litorina	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Drænet	Mark	4	Nord	*Biersted_b_22
	070532222-003	Ø_Brønderslev_a	Randmoræne	DS - Smeltevandssand	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	*Ø_Brønderslev_a_22
	070532222-004	Ø_Brønderslev_b	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	Ø_Brønderslev_b_22
	070532222-005	Brønderslev	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	4	Nord	Brønderslev_22
	070532222-006	Hjørring_Ø	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	4	Nord	*Hjørring_Ø_22
	070532222-007	Brovst_b	Litorina	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Ikke drænet	Eng	4	Nord	*Brovst_b_22
	070532222-008	Hjørring_S	Yoldia	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Drænet	Mark	6	Nord	Hjørring_S_22
	070532222-009	Forsøg ikke anlagt	-	-	-	-	-			-
	070532222-010	Toftlund	Bakkeø	ML - Moræneler	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	3	Vest	Toftlund_22
	070532222-011	Roager	Bakkeø	ML - Moræneler	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	1	Vest	Roager_22
	070892222-001	Brovst_a	Inddæmmet areal på Litorina-aflejring	HS - Saltvandssand	Mineralsk lavbund	Drænet	Eng	4	Nord	*Brovst_a_22+
	070892222-002	Ajstrup	Yngre moræne	YS - Saltvandssand	Ikke lavbund	Ikke drænet	Mark	4	Nord	Ajstrup_22
+: Forsøg *Brovst_a_20 og *Brovst_a_22 er udført på samme mark										
++: Forsøg *Jerslev_a_20 og *Jerslev_a_21 er udført på samme mark										

Figur 1 viser placering af de 32 markforsøg udført i årene 2020-22. Langt hovedparten af forsøgene var lokaliseret i Nordjylland (26 i georegion Nord og et i georegion Himmerland). De 32 forsøg repræsenterede steder på både marine (Litorina og Yoldia) og ikke-marine (yngre moræne, randmoræne, bakkeø og hedeslette) aflejringer.

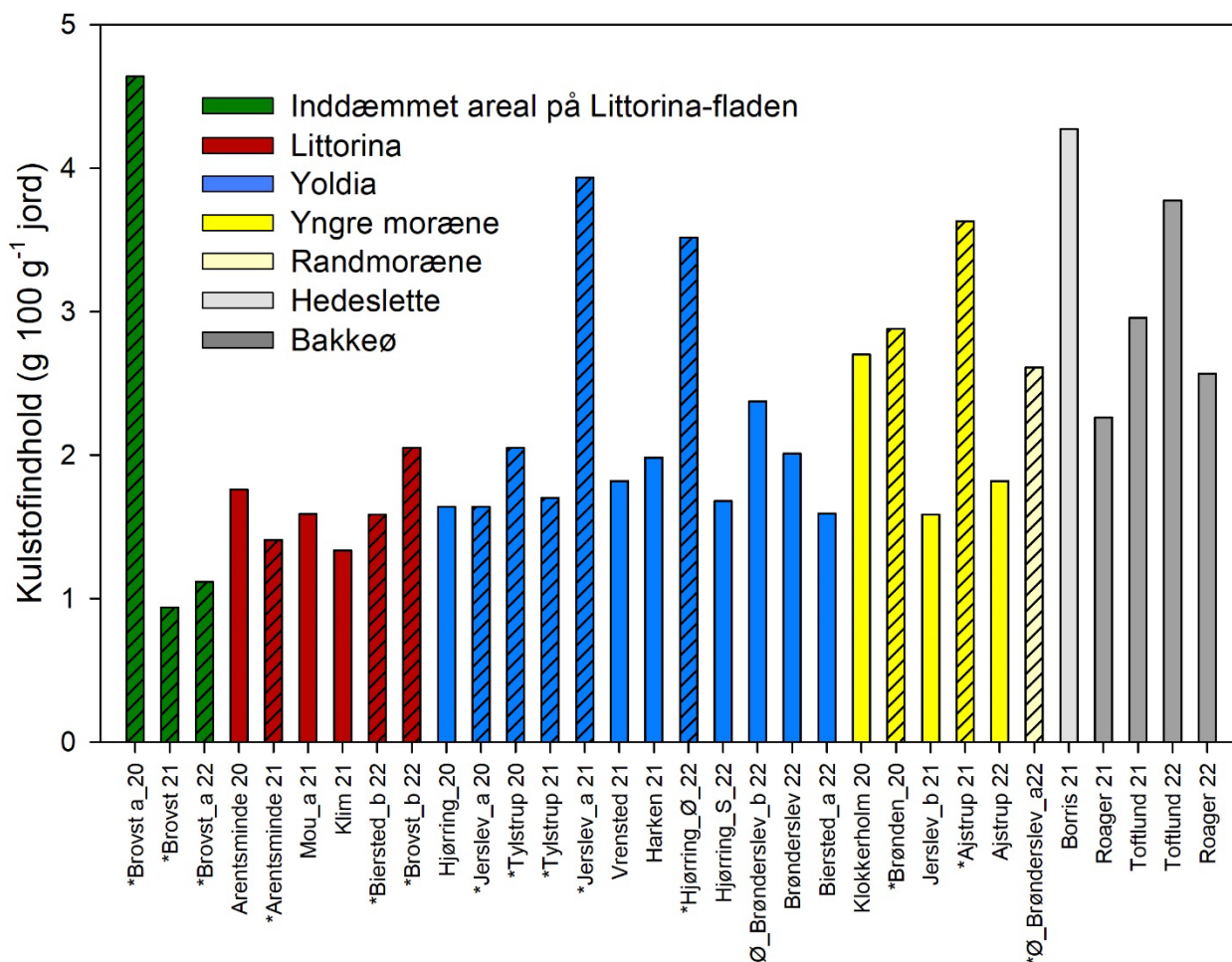


Figur 1. Placering af de 32 markforsøg i forsøgsårene 2020, 2021 og 2022 på et kortlag over landskabselementer. Kort er udarbejdet af Mette Greve, AU.

Indholdet af ler, silt, sand og organisk stof af overjorden (0-25 cm) på forsøgssteder i forsøgsserie 070532020, 070532121, 070542121, 070532222 og 070892222 er angivet i Fig. 2 og 3. Denne karakterisering er baseret på en separat udtaget jordprøve dækkende hele forsøgsarealet jf. forsøgsplan.



Figur 2. Indhold af ler, silt, finsand og grovsand i 0-25 cm dybde i jordprøver udtaget og analyseret af SEGES i forbindelse med anlæg af fosforresponsforsøgene i 2020-22. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$).



Figur 3. Jordens indhold af totalt organisk kulstof i 0-25 cm dybde i jordprøver udtaget og analyseret af SEGES i forbindelse med anlæg af fosforresponsforsøgene i 2020-22. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$).

Langt de fleste forsøg (26 ud af 32) var beliggende på JB2 og JB4. To forsøg nær Hjørning blev udført på JB6, to forsøg i Georegion Vest på JB1, og 2 forsøg op JB3 i Toftlund i Georegion Syd. Jordenes kulstofindhold varierede betragteligt fra 0,94 til 4,64 g/100 g jord.

2.2 Udbyttedata

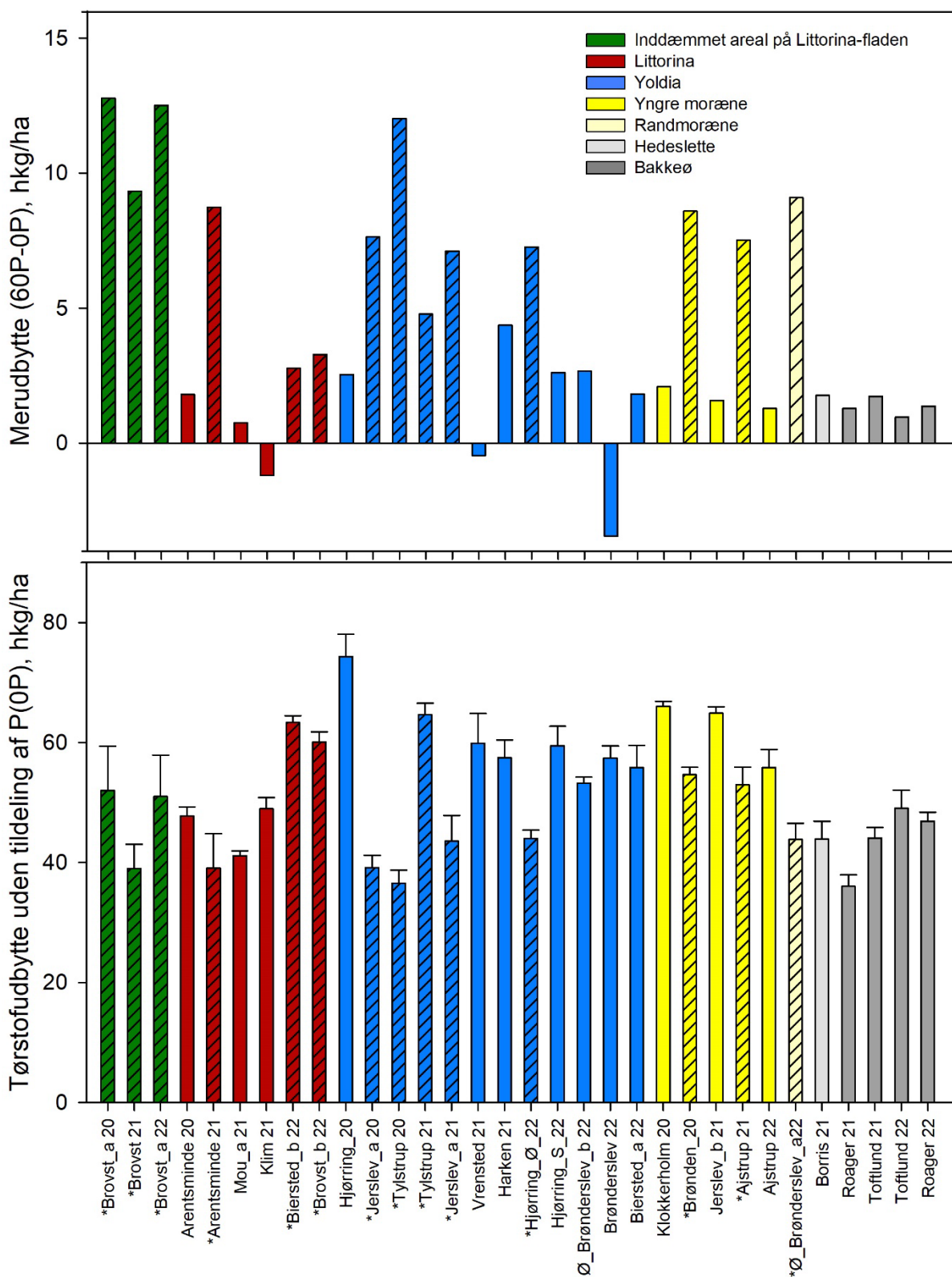
For hvert sted, blev den overordnet effekt af behandlingen (P-tilførsel) analyseret vha. en F-test, hvor tørstofudbytte i plots tilført 60 kg P/ha (60P) blev sammenlignet med tørstofudbyttet i plots uden P-tilførsel (0P, signifikansniveau $p < 0,05$). Blok indgik som tilfældig effekt i den lineære mixed-effekt model, mens behandling (0P eller 60P) var en fixed effekt.

Det relative udbytte for hvert forsøg blev beregnet således:

$$\text{Relativt udbytte}(\%) = \frac{Udbytte_{0P}}{Udbytte_{60P}} \times 100 \quad (\text{ligning 1})$$

Det relative udbytte er benyttet som responsvariabel, idet det muliggør en sammenligning af udbytter på tværs af steder med forskelligt udbyttepotentialer (Holford et al., 1985; Mason et al., 2010; Menzies et al., 2005). Til vurdering af kritiske niveauer for jord P tests, der indikerer P-mangel, anvendes en grænseværdi for relative udbytter på 90% eller derunder til at skelne mellem respons og ingen respons på P-gødsning. Denne grænseværdi er også benyttet i en lang række andre studier (e.g. Holford et al., 1985; Mason et al., 2010; Menzies et al., 2005; Speirs et al., 2013)

I forsøgsår 2022, blev udbyttet i plots tilført 30 kg P/ha i enkeltforsøg 070532222-10 (Toftlund_22) og 070532222-11 (Roager_22) brugt til beregning af merudbytte og det relative udbytte i stedet for 60 kg P/ha. Det skyldes, at der i forsøget Roager_22 var rapporteret om hæmmet fremspiring efter tildeling af 60 kg P/ha, mens der i forsøget Toftlund_22 var et signifikant lavere udbytte i plots tilført 60 kg P/ha, hvorimod der ikke var forskel i kerneudbytte i de øvrige plots uanset P-tildeling.



Figur 4. Udbytte i ugødede plots (0 P) og merudbytte (60P-0P) for hvert forsøg. Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$). Merudbyttet er beregnet ift. tørstofudbytte efter tildeling af 60 kg P/ha, undtagen Toftlund_22 og Roager_22, hvor merudbytte er beregnet ud fra tørstofudbytte efter tildeling af 30 kg P/ha.

3. Test af jordanalyser til vurdering af fosforstatus på jorder med forskellig geologisk oprindelse (opgave 1)

Formålet med opgave 1 jf. kontrakt var at undersøge, hvorvidt andre jordanalyser relateret til jordens evne til at binde og frigive P end P-tallet kan forklare, hvorfor man på visse jorder med højt P-tal observerer merudbytte i vårbyg efter placering af mineralsk P og om de observerede merudbytter ved højt P-tal var knyttet til specifikke geologiske aflejringer.

3.1 Metode

3.1.1 Jordprøveudtagning

I 2020 blev der udtaget dybe jordprøver (ned til 100 cm dybde) for at kunne belyse om P-status i hele jordprofilen kunne bidrage til forklaring på udbytterespons efter P-tildeling. Første års resultater indikerede, at P status i underjorden næppe var af afgørende betydning for de observerede merudbytter. I 2021 og 2022 rettedes fokus derfor på overjorden. Samtidig blev det prioriteret at udtage jordprøver på blokniveau i visse forsøgsserier for at afdække variationen inden for hver mark. Et litteraturstudie udført i første projektår (Pedersen et al., 2020) pegede ydermere på, at udover jordens P-status kunne forhold for tidlig rodvækst, som finder sted i de øvre jordlag, være blandt de væsentligste faktorer, der kunne forklare udbytterespons. Litteraturstudiet dannede således også udgangspunkt for de supplerende undersøgelser af jordfysiske parametre, temperatur og rødder, der blev gjort i udvalgte forsøg og som er beskrevet i kapitel 4.

Udtagning af jord i forsøgsserie 070532020

I alle forsøgsstederne (001-007) blev der udtaget jordprøver i marts 2020 inden gødsning og såning i de fire dybdeintervaller 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm og 75-100 cm. For hver dybde blev der udtaget en repræsentativ prøve af hele forsøgsarealet bestående af 20-40 stik puljet til én prøve for hvert dybdeinterval.

Udtagning af jord forsøgsserie 070532121

I 2021 blev jordprøverne udtaget inden gødsning og såning i 0-25 og 25-50 cm dybde for hver blok inde for hvert forsøgssted for at afdække variationen inden for marken for hvert forsøgssted. For hver dybde og blok, blev der udtaget minimum 15 stik, der blev puljet til én prøve.

Udtagning af jord i forsøgsserie 070542121

Jordprøver blev udtaget inden gødsning og såning i 0-25 cm dybde. Jordprøven bestod af 20-40 stik puljet til én prøve dækkende hele forsøgsstedet.

Udtagning af jord i forsøgsserie 070532222 og 070892222

I 2022 blev jordprøverne udtaget inden gødsning og såning i 0-25 cm dybde for hver blok inden for hvert forsøgssted for at afdække variationen inden for marken for hvert forsøgssted. For hver blok, blev der udtaget minimum 15 stik, der blev puljet til én prøve.

Tabel 2 angiver oversigt over jordprøveudtagning, relativt udbytte og overordnet effekt af P-tilførsel for hvert forsøg.

Tabel 2. Oversigt over sådato, jordprøveudtagning, relativt udbytte og overordnet effekt af P-tilførsel for hvert forsøg.

År	Sådato	Forsøgsnr.	Jordprøver		Relativt udbytte	Overordnet effekt af P-tilførsel	Unik kode
			Dybde	Mark-ell. blok	(OP/60P*100)	(F-test, signifikansniveau 0,05).	
2020	14.04.20	070532020-001	0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm	Mark	97	nej	Hjørring_20
	14.04.20	070532020-002	0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm	Mark	75	ja	Tylstrup*_20
	15.04.20	070532020-003	0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm	Mark	80	ja	Brovst*_20
	30.03.20	070532020-004	0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm	Mark	84	ja	Jerslev_a*_20
	31.03.20	070532020-005	0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm	Mark	97	nej	Klokkerholm_20
	15.04.20	070532020-006	0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm	Mark	96	nej	Arentsminde_20
	03.04.20	070532020-007	0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm	Mark	86	ja	*Brønden_20
2021	14.04.21	070532121-001	0-25, 25-50 cm	Blok	88	ja	*Ajstrup_21
	23.03.21	070532121-002	0-25, 25-50	Blok	93	ja	*Tylstrup_21
	16.04.21	070532121-003	0-25, 25-50	Blok	81	ja	*Brovst_21
	06.04.21	070532121-004	0-25, 25-50	Blok	86	ja	*Jerslev_a_21
	06.04.21	070532121-005	0-25, 25-50	Blok	98	nej	Jerslev_b_21
	20.04.21	070532121-006	0-25, 25-50	Blok	82	ja	*Arentsminde_21
	26.03.21	070532121-007	0-25, 25-50	Blok	101	nej	Vrensted_21
	22.04.21	070542121-001	0-25 cm	Mark	96	nej	Borris_21
	19.04.22	070542121-002	0-25 cm	Mark	98	nej	Mou_a_21
		070542121-003	0-25 cm	Mark	-	-	-
	16.04.21	070542121-004	0-25 cm	Mark	102	nej	Klim_21
	17.04.21	070542121-005	0-25 cm	Mark	93	nej	Harken_21
	20.04.21	070542121-006	0-25 cm	Mark	97	nej	Roager_21
	20.04.21	070542121-007	0-25 cm	Mark	96	nej	Toftlund_21
2022	25.03.22	070532222-001	0-25 cm	Blok	97	nej	Biersted_a 22
	25.03.22	070532222-002	0-25 cm	Blok	96	ja	*Biersted_b 22
	29.03.22	070532222-003	0-25 cm	Blok	83	ja	*Ø_Brønderslev_a 22
	29.03.22	070532222-004	0-25 cm	Blok	95	nej	Ø_Brønderslev_b 22
	30.03.22	070532222-005	0-25 cm	Blok	106	nej	Brønderslev_22
	29.03.22	070532222-006	0-25 cm	Blok	86	ja	*Hjørring_Ø 22
	29.04.22	070532222-007	0-25 cm	Blok	95	ja	*Brovst_b 22
	29.03.22	070532222-008	0-25 cm	Blok	96	nej	Hjørring_S 22
	-	070532222-009	-	-	-	-	-
	20.04.22	070532222-010	0-25 cm	Blok	98**	nej **	Toftlund 22
	21.04.22	070532222-011	0-25 cm	Blok	97**	nej **	Roager 22
	25.03.22	070892222-001	0-25 cm	Blok	80	ja	*Brovst_a 22
	24.03.22	070892222-002	0-25 cm	Blok	98	nej	Ajstrup 22
** Sammenligning mellem OP og 30P							

3.1.2 Jordanalyser

Alle jordprøver blev lufttørret og sigtet (2 mm) inden videre analyse.

Der er lavet følgende analyser på jordprøverne:

- Total P (Kafkafi, 1972). Bestemt på kuglemølleformalet jord.
- Total uorganisk P. Ekstraheret med 0.5 M H_2SO_4 (Shah et al., 1968). I 2021 blev total uorganisk P kun bestemt i overjorden (0-25 cm) i forsøgsserie 070532121. Ikke bestemt i 2022.
- pH (CaCl_2) (0,01 M CaCl_2 , 1:2,5 w/w)
- Fosfor ekstraheret med 0,5 M natriumbikarbonat-opløsning indstillet til en pH-værdi på 8,5, herefter benævnt "P-tal" (Banderis et al., 1976; Rubæk & Kristensen, 2017)
- Oxalatekstraherbart P, Fe og Al (hhv. Pox, Feox og Alox (Schoumans, 2000)
- Fosfor ekstraheret med vand (Pvand) efter Sissingh (1971)
- Fosfor ekstraheret med 0,01 M CaCl_2 (P(CaCl_2)) (Houba et al., 2000). En analyseprotokol med noter for denne analyse er givet i appendiks C.
- Isotop ombytningskinetik (IEK) med den radioaktive ^{33}P isotop, hvorfra modelparametrene n og m estimeres (Frossard & Sinaj, 1997):
 - n: raten, hvormed radioaktiviteten fjernes fra jord-væske-opløsningen efter 1 minut
 - m: andelen af radioaktivitet tilbage i jord-væske-opløsningen efter 1 minut.
 - IEK blev bestemt på jordprøver udtaget i 2020 (alle fire prøvedybder) og i 2021 (bestemt på jordprøver i 0-25 cm).

Ud fra de ovenstående analyser er det muligt at bestemme følgende:

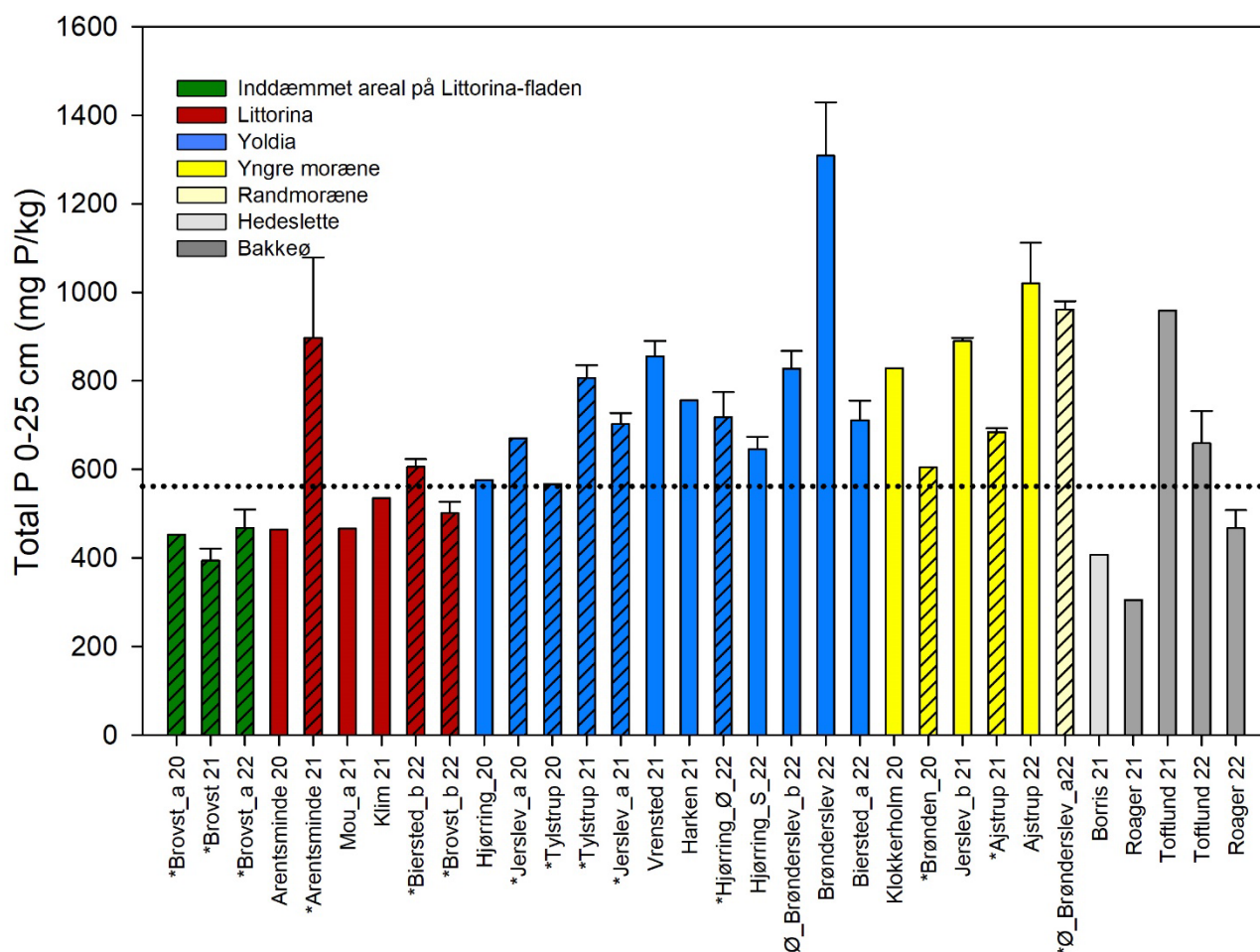
- Total organisk P (Total P fratrukket indholdet af total uorganisk P)
- Jordens P-bindingskapacitet (PSC)
 - $\text{PSC} = 0,5 (\text{Alox} + \text{Feox})$ efter Van Der Zee og Van Riemsdijk (1986) (ligning 2)
- Fosformætningsgraden defineret som Pox/PSC (Schoumans, 2000) (ligning 3)
- Ud fra IEK er det muligt at estimere mængden af P ombyttet inden for 1 minut ($E_{1\text{min}}$). Denne fraktion repræsenterer P i jorden, der er umiddelbart tilgængeligt for planteoptag (Frossard & Sinaj, 1997).

Desuden blev data for P-DGT i 0-25 cm dybde leveret af SEGES til AU. Analysen blev udført på jordprøver udtaget, så de dækkede hele forsøgsareal for hvert enkeltforsøg.

3.2 Resultater og diskussion

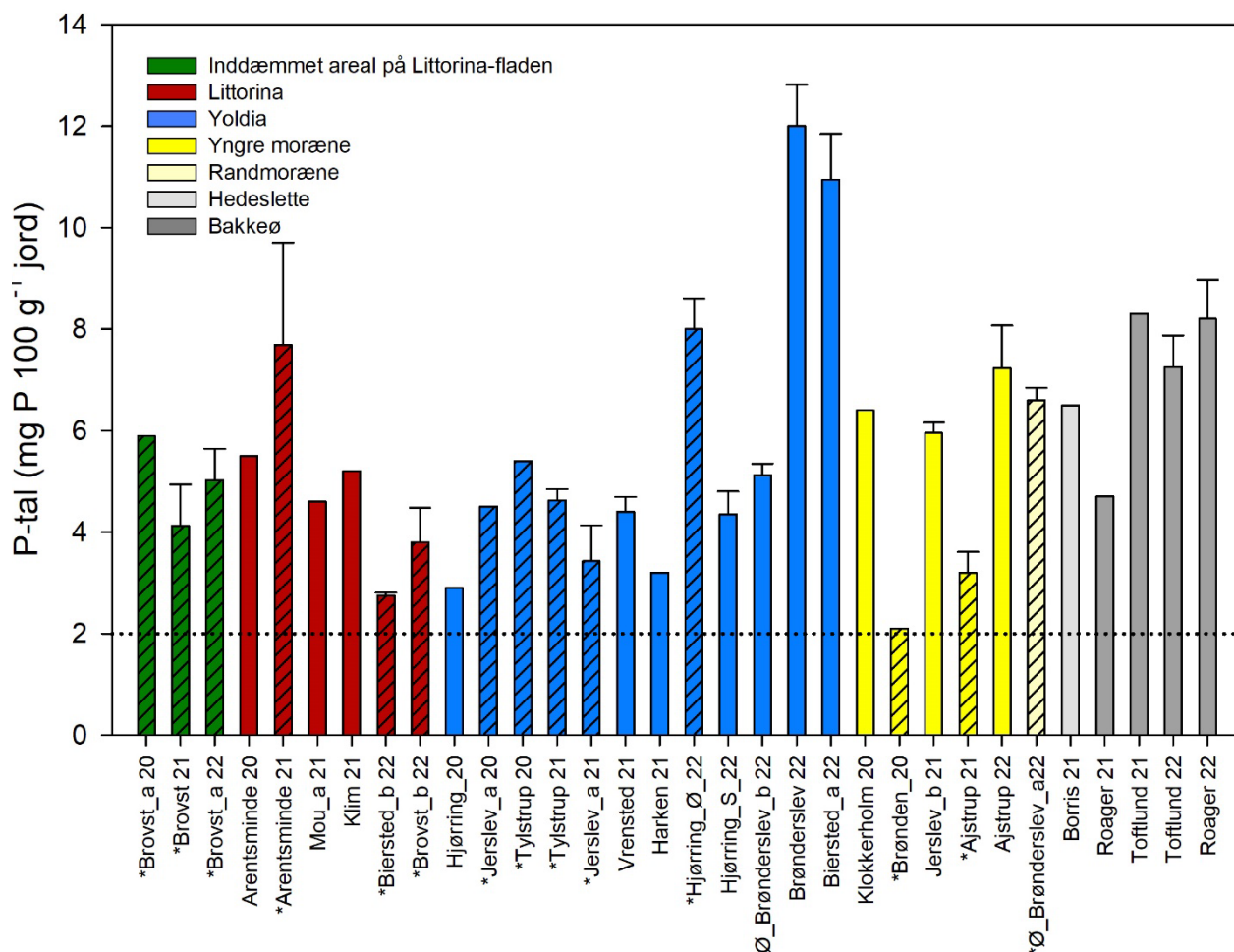
3.2.1 Jordanalyser af overjord grupperet efter landskabstype

I nærværende rapport er opgivet resultater for jordprøver i 0-25 cm dybde, da denne dybde går igen for alle tre forsøgsår, og fordi det øvre jordlag har størst indhold af plantetilgængeligt P, hvor den tidlige rodvækst finder sted. Resultater fra jordprøver i 25-100 cm dybde (2020 data) og 25-50 cm dybde (2021 data) er angivet i Supplerende Materiale 1.



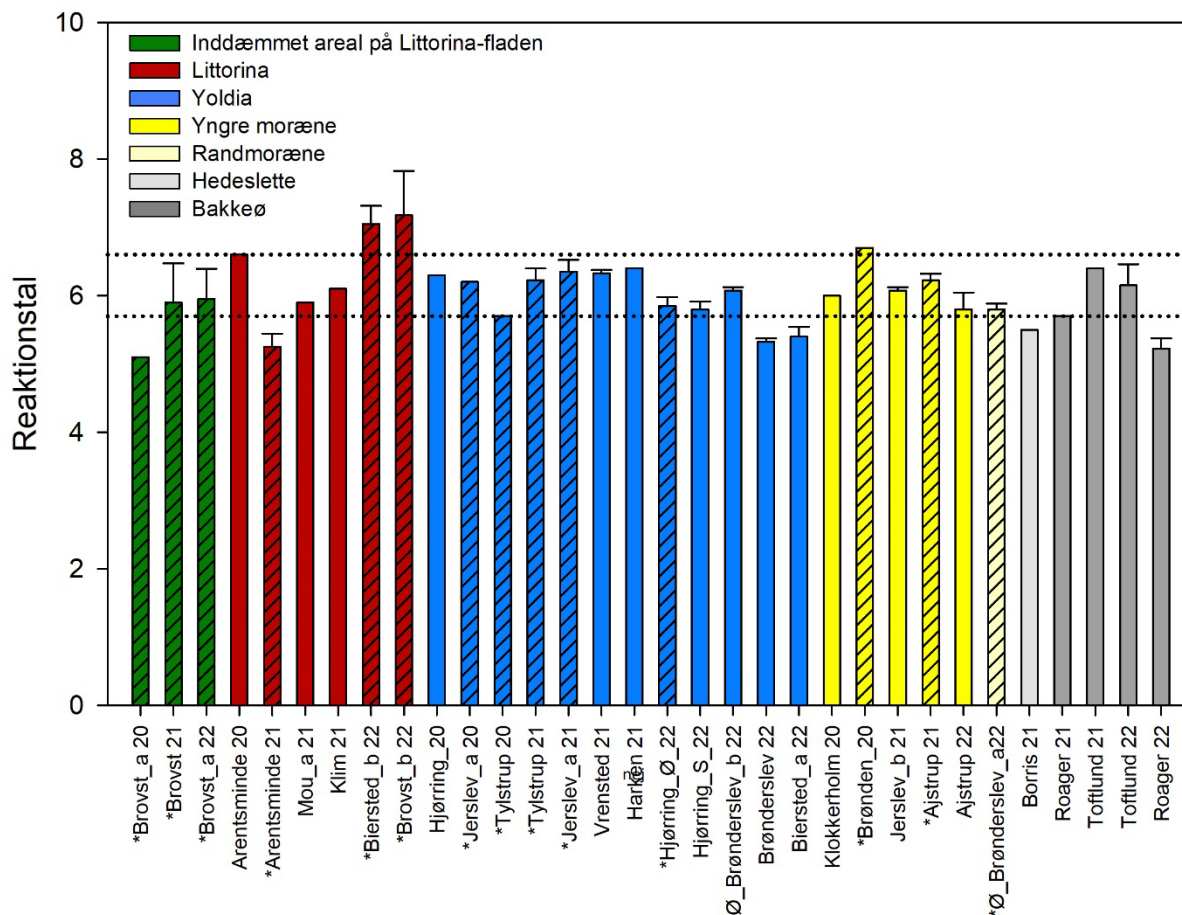
Figur 5. Total fosfor i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på bløkniveau, og standardafvigelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$). Gennemsnitsindholdet for total P i overjorden (562 mg P/kg) jf. Rubæk et al (2013) er angivet med stiplet vandret linje.

Det totale indhold af P i overjorden varierede betragteligt mellem forsøgene fra 305 mg P kg⁻¹ til 1309 mg P kg⁻¹ (Fig. 5). Gennemsnittet for total P-indhold for dyrkede overjorder i Danmark er 562 mg P kg⁻¹ (Rubæk et al., 2013). Toogtyve ud af de 32 forsøg havde et total P indhold, der var større end 562 mg P kg⁻¹, og resultaterne bevidner hermed, at langt de fleste af forsøgsstederne var meget P-holdige.



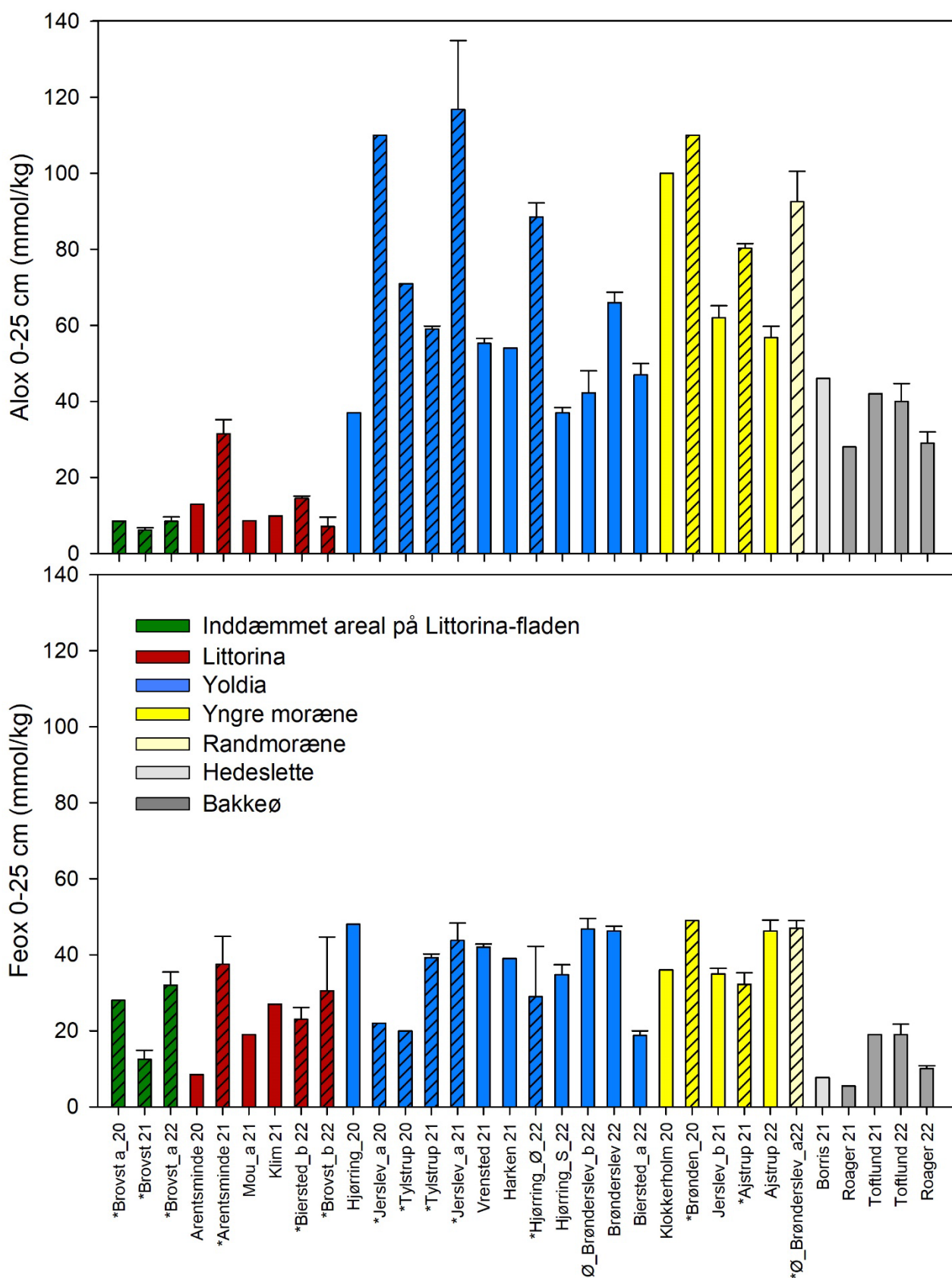
Figur 6. P-tal i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedsbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafgivelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$). Kritisk grænseværdi (P-tal= 2,0) jf. Jordan-Meille et al. (2012) er angivet med stiple vandret linje, hvor det antages at jorder under denne grænseværdi har et kritisk lavt indhold af tilgængeligt P.

P-tallet varierede betydeligt mellem de 32 forsøgssteder og spændte fra 2,1 (*Brønden_20) til 11,9 (Brønderslev_22). Forsøgsstederne repræsenterer dermed jorder kategoriseret som både moderat, høj og meget høj P-status. På jorder med høj P-tal (>4) forventes det ikke at P-tilførsel vil resultere i udbytterespons (Jordan-Meille et al., 2012). På yngre moræne havde forsøgene *Brønden 20 og *Ajstrup_21 moderate P-tal (hhv. 2,1 og 3,2), og ligeledes havde *Biersted_b_22 på Littorinafladen og *Jerslev_a_21 på Yoldia-fladen et P-tal på hhv. 2,8, og 3,4 hvor der kan forventes ingen eller evt. beskedne merudbytter efter P-gødsning. De øvrige jorder med udbytterespons efter P-tilførsel havde et P-tal >4, hvor det ellers ikke forventes at supplerende P-gødsning er nødvendigt.

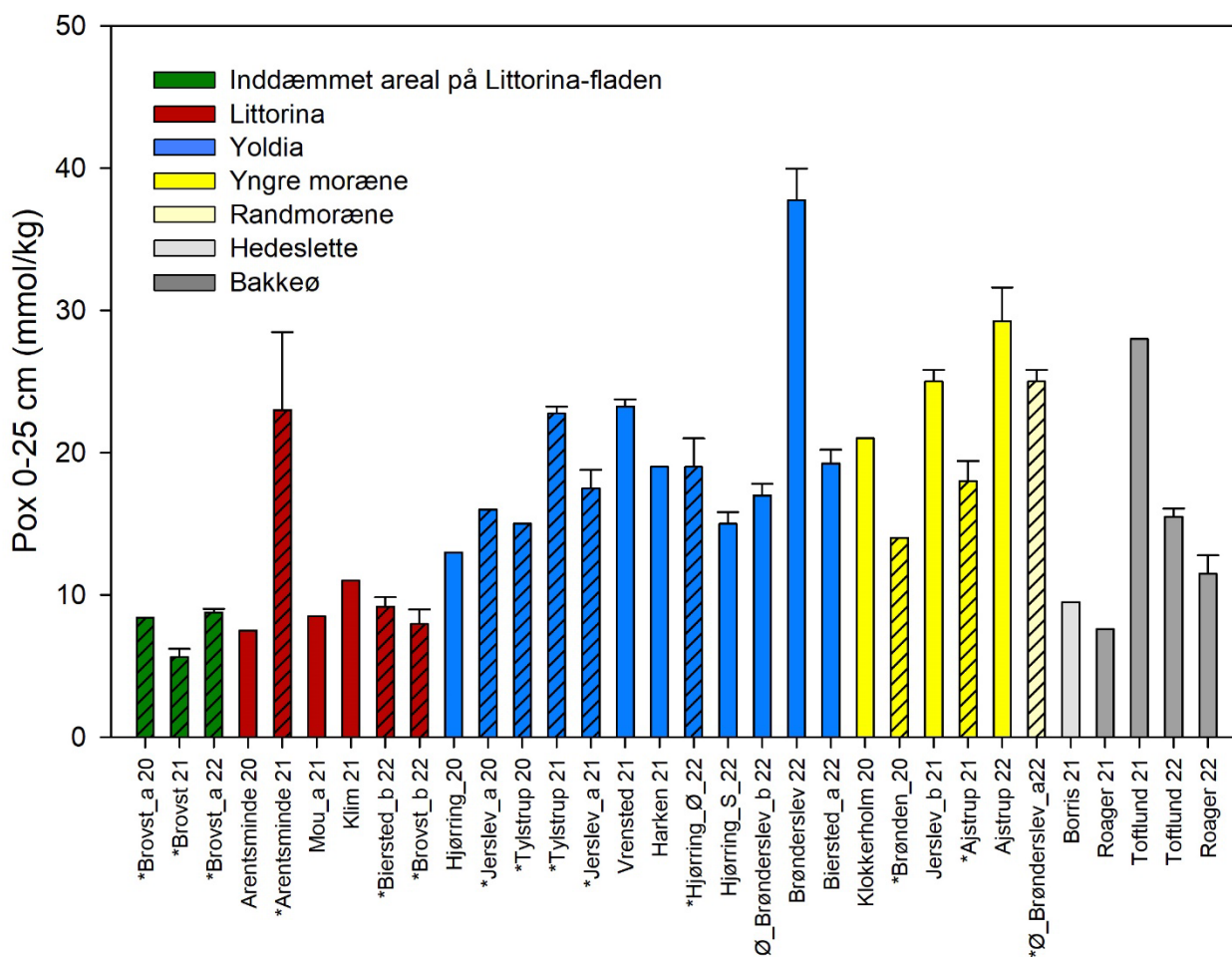


Figur 7. Reaktionstal i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafgivelsen ($n=4$) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p<0.05$). Den nederste stiplede linje ($Rt=5,7$) og den øverste stiplede linje ($Rt=6,6$) angiver hhv. en kritisk lav og høj grænseværdi for reaktionstal for følsomme afgrøder som vårbyg på JB1-4 jf. Knudsen (2021).

Flere jorder havde bemærkelsesværdig lave reaktionstal (fx *Brovst_a_20, Roager_22 og *Arentsminde_21). Jordens reaktionstal var dog ikke signifikant lavere i forsøg med udbytterespons end uden udbytterespons (gns. reaktionstal på hhv. 5,9 og 6,1 for responderende og ikke-responderende jorder). I tilfælde af lav meget pH-værdier (<5) i jorder med højt indhold af Al-oxider, kunne der forekomme aluminium-toksicitet (Rahman & Upadhyaya, 2021). I forsøget *Arentsminde_21 og Roager_22 var der både lav pH og højt indhold af Alox, og det kan ikke udelukkes, at der forekom toksiske effekter aluminium i disse forsøg, som kunne gå ind og påvirke de endelige høstudbytter. I *Arentsminde_21 var der også en tydelig gradient i pH og indhold af P på tværs af forsøgsarealet, hvor blok 3 og 4 havde lavere pH og højere P-tal og total P. Det var også i disse to blokke, at der var en særlig tydelig effekt af P-gødskning på udbytterespons.

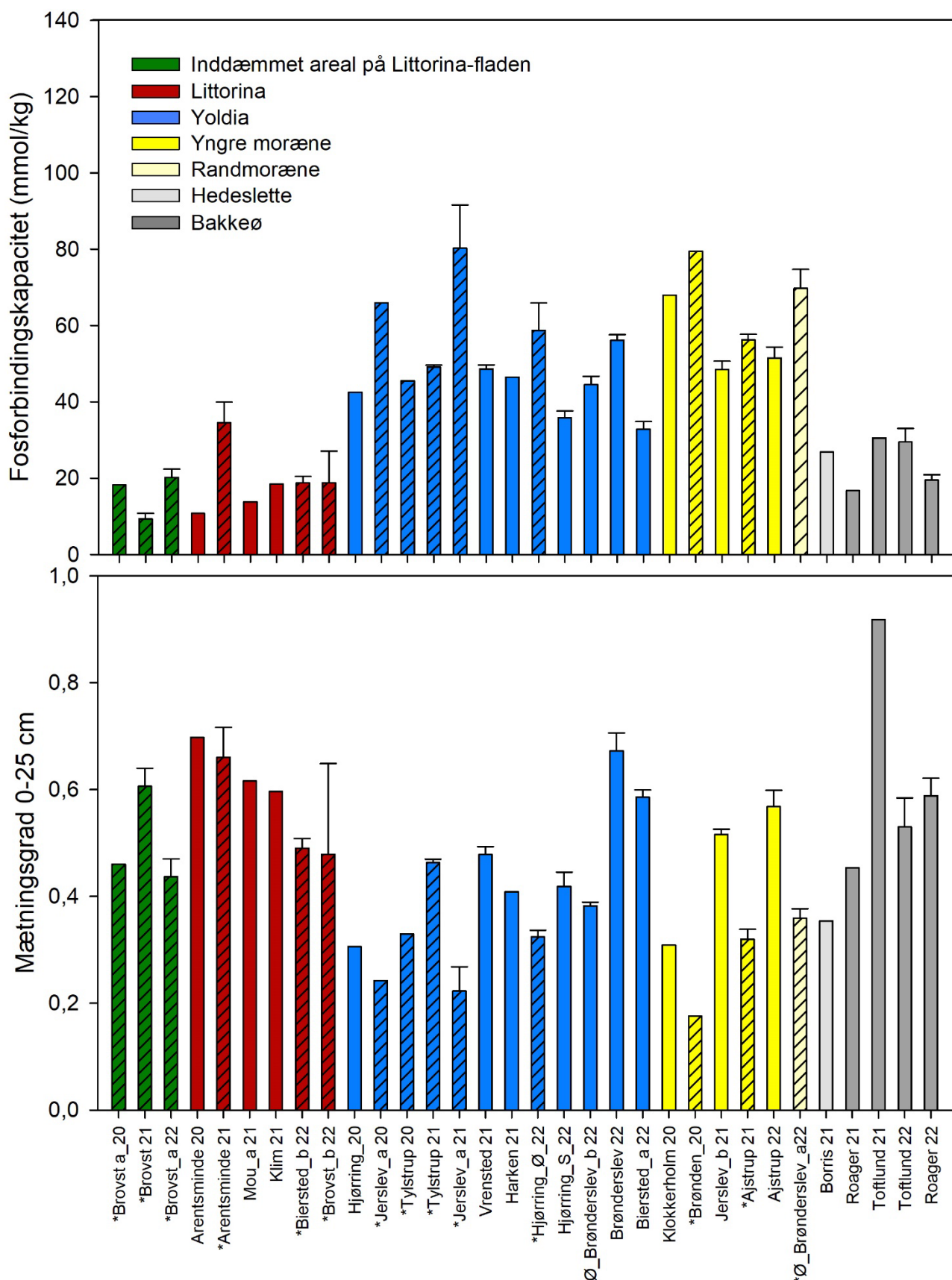


Figur 8. Oxalatekstraherbart aluminium (Alox, øverst) og jern (Feox, nederst) i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedsbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafvigelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$).



Figur 9. Oxalatekstraherbart fosfor (Pox) i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedsbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafgivelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$).

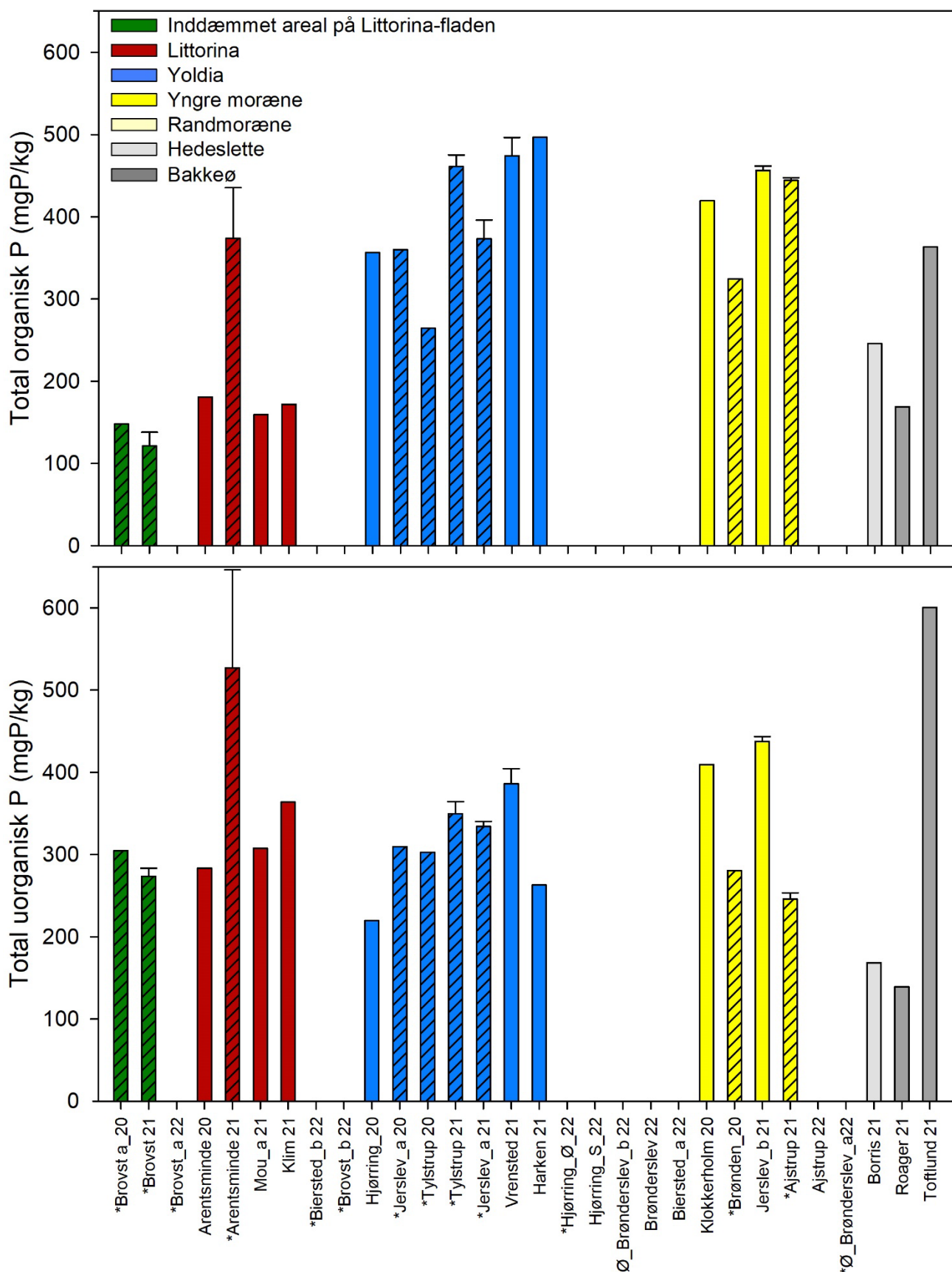
Forsøgssteder på Litorina-fladen (inkl. inddæmmede arealer) havde et særligt lavt indhold af Alox sammenlignet med Yoldia og yngre moræner (Fig. 8 øverst). Bakkeø og hedeslette havde tendens til lavest indhold af Feox (Fig. 8 nederst). Andersen og Heckrath (2020) fandt også, at jordens geologiske udgangsmateriale er bestemmende for indholdet af Alox og Feox. I studiet fandt de, at koncentrationen af Alox var særligt lav på yngre marine aflejringer (Litorina) og højere på sandede moræneområder (over 146 mmol/kg) og på ældre aflejringer med høj forvitringsgrad (Yoldia-fladen) i Nordjylland. Nærværende rapport viser dog også, at der kan være stor forskel i indholdet af Alox inden for de forskellige udgangsmaterialer (fx Alox varierer fra 37 til 117 mmol/kg på Yoldia-fladen), og disse forskelle fremgår ikke med samme tydelighed i Andersen og Heckrath (2020).



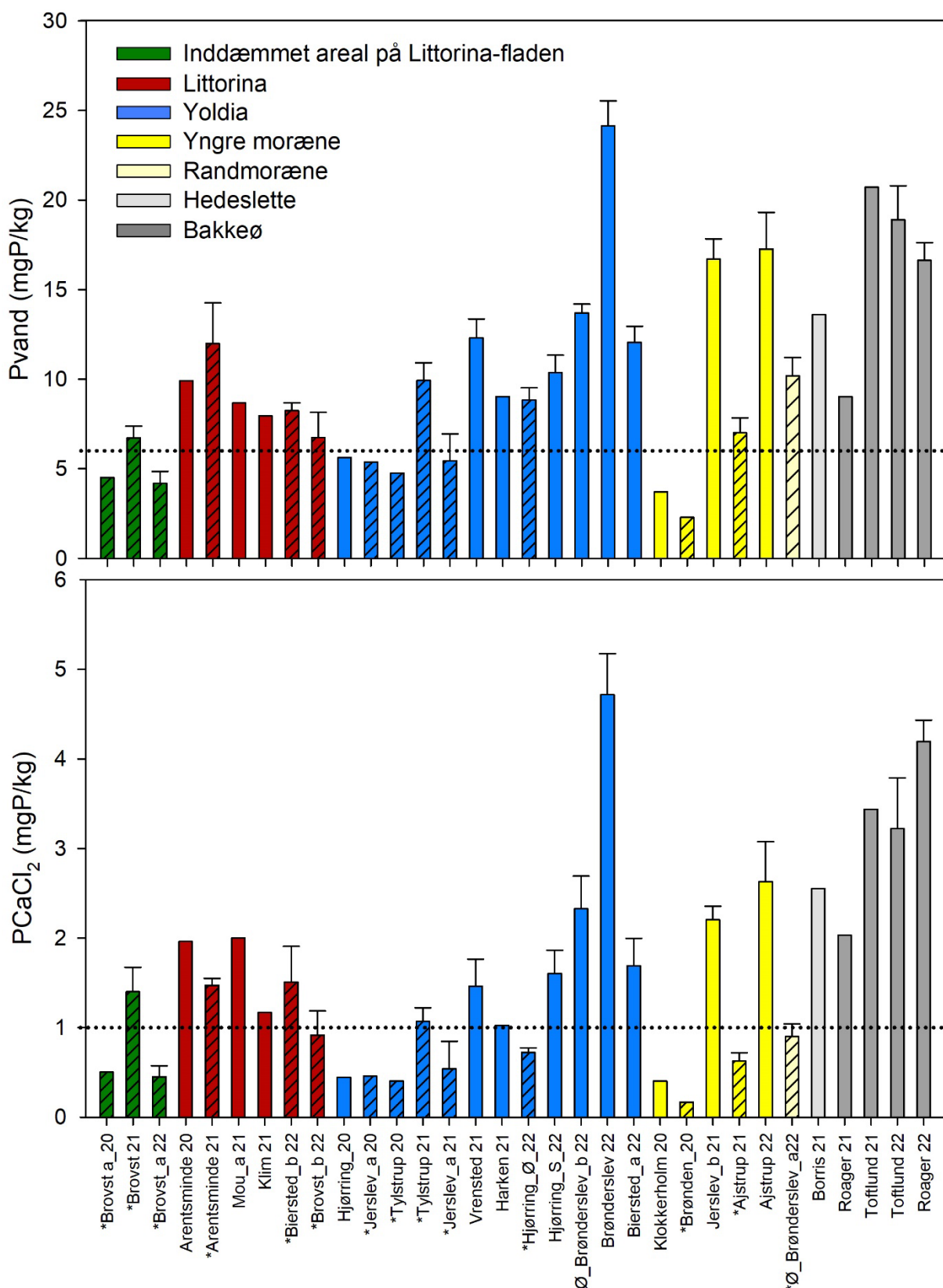
Figur 10. Fosforbindingskapacitet (øverst) og mætningsgrad (nederst) i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafgivelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$).

Fosforbindingskapaciteten beregnet ud fra indholdet af Alox og Feox varierede betydeligt mellem forsøgsstederne (Fig. 10, øverst), hvor Yoldia og yngre moræner havde størst bindingskapacitet.

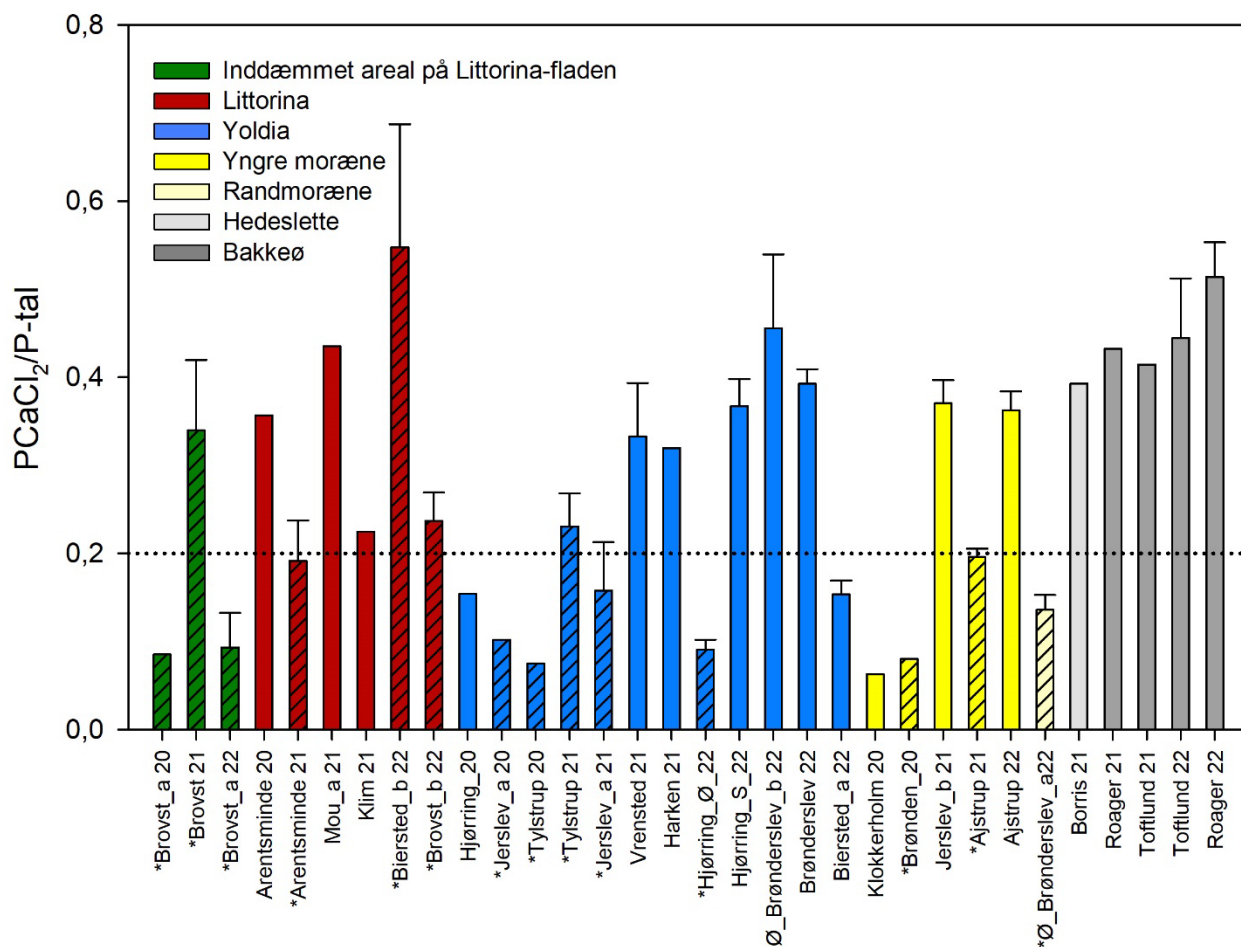
Mætningsgraden varierede fra 0,17 til 0,92 (Fig. 10, nederst) med et gennemsnit på 0,47. Data fra kvadratnetpunkter i Danmark viste, at landbrugsjorder (0-25 cm dybde) havde en gennemsnitlig mætningsgrad på 0,32 i 1998 (standardafvigelse = 0,11) (Rubæk et al., 2013), og hermed har jorder i nærværende rapport en højere mætningsgrad end landsgennemsnittet. Nioogtyve af de 32 forsøg havde en mætningsgrad på mere end 0,25. I Holland antages det, at en mætningsgrad på 0,25 eller højere antages at være kritisk for tab af P i jordvæsken for jordlag i umiddelbar nærhed af øvre grundvandsspejl (Breeuwsma & Silva, 1992), men det er ikke afklaret om denne grænseværdi også er gældende for danske jorder (Andersen et al., 2016).



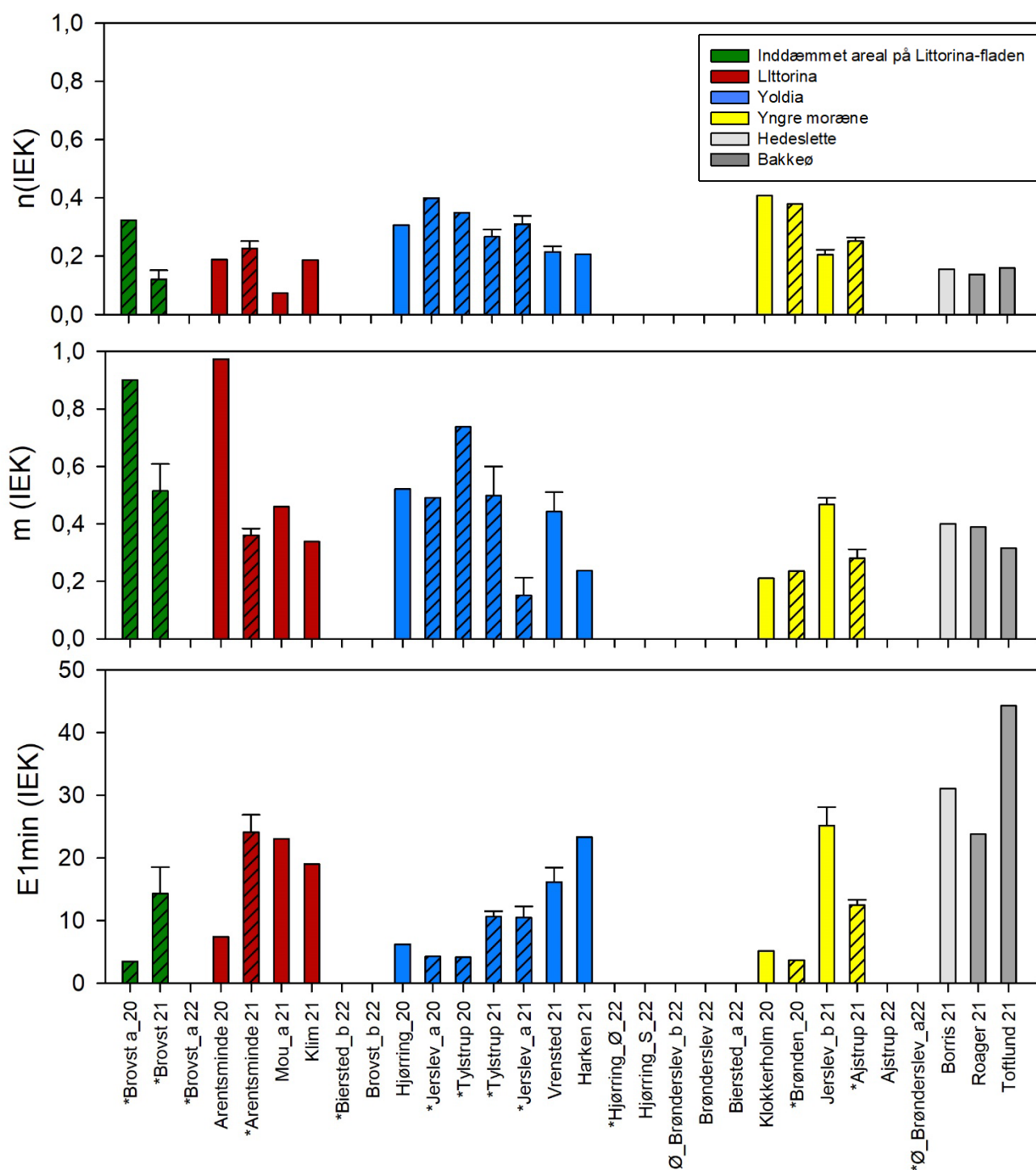
Figur 11. Total organisk og uorganisk P i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafgivelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$).



Figur 12. Fosfor ekstraheret med vand (Pvand) og en 0,01 M kalciumklorid-opløsning (PCaCl₂) i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedsbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafvigelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, p<0.05). Kritiske grænseværdier er angivet for Pvand (6 mg/kg) jf. Jordan-Meille et al. (2012), der anvendes i Holland, og for PCaCl₂ (1 mg P/kg) baseret ud fra data i nærværende rapport som vandrette stiplede linjer.

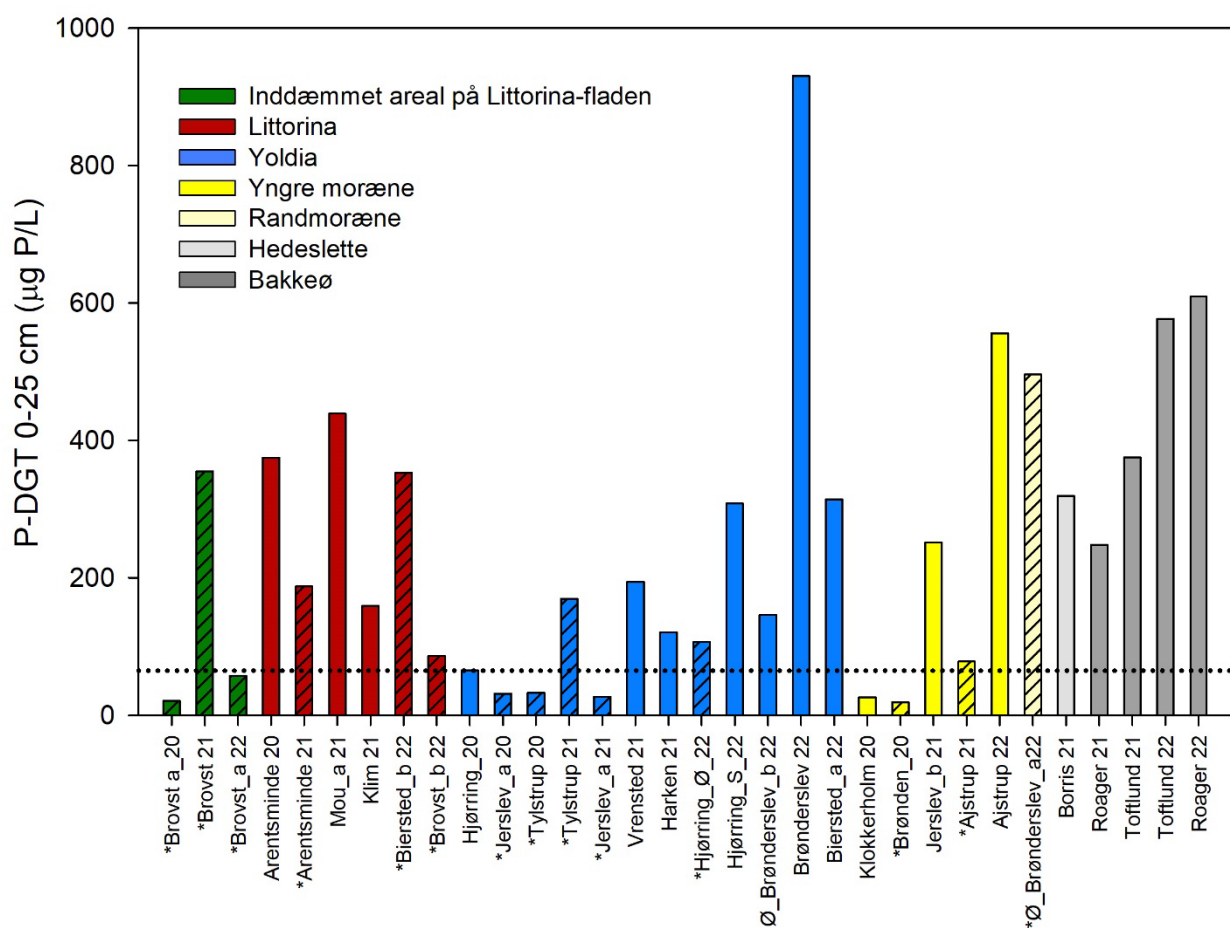


Figur 13. Ratio mellem PCaCl₂/P-tal i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Jordprøver fra 2021 og 2022 blev udtaget på blokniveau, og standardafgivelsen (n=4) er angivet. Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, p<0.05). Kritisk værdi for forholdet mellem PCaCl₂ og P-tal er vist (0,2) som den vandrette stiplede linje baseret ud fra data i nærværende rapport.



Figur 14. Parametre n, m og E1min bestemt ved isotopombytningskinetik (IEK) på jordprøver 0-25 cm dybe udtaget i 2020 og 2021. For prøverne fra 2021, som blev udtaget for hver gentagelse er standardafvigelsen vist (n=4). Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p < 0.05$).

Figur 14 angiver parametrene n, m og E1min bestemt ved isotopombytningskinetik (IEK). Parameteren n og m er estimeret som hhv. hældning og skæring med Y-akse i et log-log plot af tilbageværende radioaktivitet i væsken og tid, mens E1min estimerer mængden af P, der kan ombyttes mellem jordvæske og jordens overflader inden for 1 minut.



Figur 15. P-DGT i 0-25 cm dybde målt i jordprøver udtaget til AU. Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype. Analysen er foretaget af KU for SEGES på jordprøver dækkende hele forsøgsarealet ($n=1$). Skravering af en stolpe angiver at der var statistisk signifikant merudbytte for at give fosfor i forsøget (F-test, $p<0.05$). Kritisk grænseværdi for P-DGT ($65 \mu\text{g/L}$ jf. Mason et al. (2010) er angivet som vandret stiplede linje.

Karakteristik af landskabstyper

Ved projektstart kategoriserede og udvalgte vi forsøgsstederne ud fra om de lå på marine aflejringer eller ej ud fra en hypotese om, at P-tallet ikke altid formåede at identificere responderende jorder beliggende på marine aflejringer. I forbindelse med denne samlede opgørelse af resultater fra 2020-22 har vi inddraget flere kortlagte oplysninger, som kan bruges til at kategorisere de marine og ikke-marine forsøgssteder yderligere.

Marine og ikke-marine arealer kan underopdeles yderligere, og denne underopdeling kan være væsentlig fordi den geologiske aflejringstype såvel som aflejringens alder kan have betydning for hvilke mineraler, jorden indeholder (Breuning Madsen et al., 1992) og for disses egenskaber mht. P-binding. I denne undersøgelse adskiller de forskellige aflejringer sig særligt på indholdet af oxalatekstraherbart aluminium. Der kan være andre egenskaber, der er forskellige, men som ikke er målt i dette projekt. Inddelingen efter landskabstype fremgår derfor i grafikken i denne rapport. Der er følgende opmærksomhedspunkter vedrørende de involverede landskabstyper i dette studie og de jordkemiske målinger vi har udført:

Marine aflejringer:

- Landskabstypen "Yoldia" er en ældre marin aflejring dannet i den senglaciale istid (ca. 14.000 år f.Kr). Den ligger typisk højere i landskabet og er mere veldrænet end Litorina-aflejringer (Tabel 1). I denne kategori er der udført 12 markforsøg, hvor der var signifikant merudbytte for at give P i fem af disse. Forsøgene *Jerslev_a_20 og *Jerslev_a_21 er også udført i samme mark, men de to forsøg varierer alligevel en del på de teksturelle egenskaber (Fig. 2). Alle 12 forsøg havde P-tal større end 2,9 og indhold af total-P større end 567 mg/kg (gennemsnittet for danske landbrugsjorder er 562 mg/kg ifølge Rubæk et al. (2013). Indholdet af oxalat-ekstraherbart aluminium er højere i denne kategori end i forsøg på Litorinafladen.
- Landskabstypen "Litorina" er en yngre marin aflejring (dannet for ca. 7000 år siden), og den ligger ofte på fladt lavt terræn og kan være præget af lavbunds karakteristika. Den falder derfor ofte ud som mineralsk lavbundsjord i kortlaget om lavbundsjord (Tabel 1). Der er udført seks forsøg i denne landskabstype, hvor udbyttet steg signifikant på tre forsøgssteder: *Arentsminde 21, *Brovst_b_22 og *Biersted_b_22. Sidstnævnte havde et P-tal på 2,8, og det var derfor ikke overraskende at der var et signifikant, men beskedent merudbytte for P-gødsning (Fig. 4 øverst, +2,8 hkg TS /ha). *Arentsminde 21 havde et P-tal på 7,7. Til trods herfor var der et stort og signifikant merudbytte efter P-tildeling. Jorden i netop dette forsøg adskiller sig fra de øvrige ved at have et lavt reaktionstal og højere indhold af oxalatekstraherbart jern og aluminium end de øvrige jorder i denne kategori.
- Landskabstypen "inddæmmet areal på Litorina-aflejring" er forholdsvis sjælden, og det må forventes, at der inden for denne landskabstype vil være stor variation alt efter hvor, hvornår og hvordan inddæmningen er sket. I denne undersøgelse indgår tre forsøgssteder på et inddæmmet areal på Litorina-fladen. De ligger alle på samme inddæmmede område forholdsvis tæt på hinanden. Området var en sø frem til 1950'erne og blev herefter inddæmmet. Forsøg *Brovst_a_20 og *Brovst_a_22 er udført på samme mark, og derfor har de to forsøg meget ens tekstur (Fig. 2). Trods samme forhistorie og at forsøgene i 2020 og 2022 er udført i samme mark, er der forskel på f.eks. de tre forsøgsarealers reaktionstal (Fig. 7) og kulstofindhold (Fig. 3): Forsøget *Brovst_a_20 har meget højt indhold af kulstof, men en volumenvægt på knap 1,4 g/cm³ (Fig. 34), hvilket er et niveau, der typisk forbindes med jorder uden højt indhold af organisk kulstof. Det høje kulstofindhold i *Brovst_a_20 kunne skyldes tilstedeværelse af tungtopløselige karbonat-mineraler

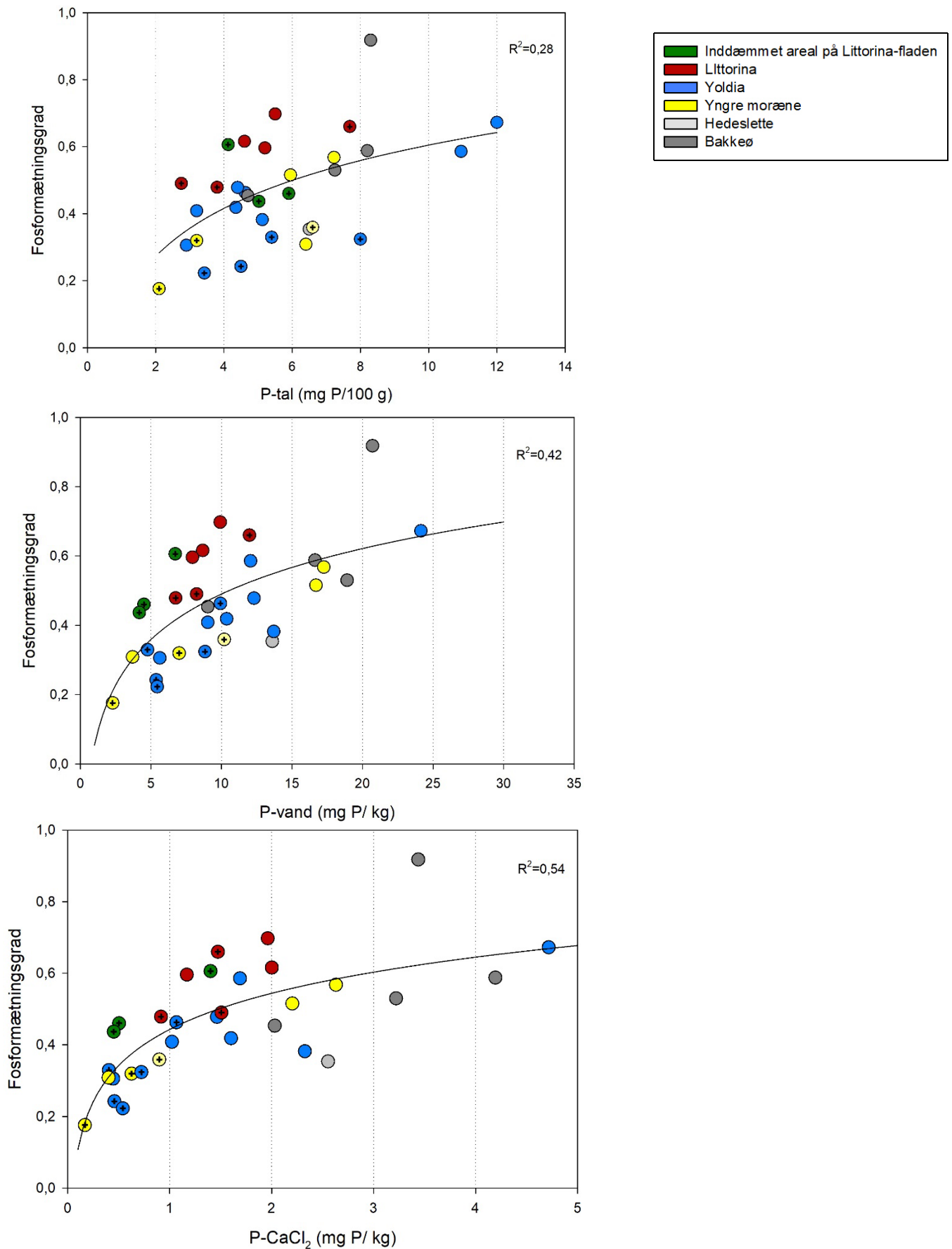
f.eks. fra skaller, der fejlagtigt er bestemt som organisk kulstof. For ringprøver udtaget i forsøget er der også bemærket tilstedeværelse af skaller, som kunne understøtte ovenstående forklaring. Totalfosforindholdet varierede derimod ikke så meget mellem de tre steder, hvorimod der var betydelige forskelle i de andre jord P-tests (Fig. 12+15). Alle forsøg på denne landskabstype gav signifikante merudbytter efter P-gødsning, trods høje P-tal på mellem 4 og 6.

Forsøg udført på Litorinafladen (inkl. inddæmmede arealer) havde et generelt lavere niveau af Alox end Yoldia og moræne-jordene, hvilket også stemmer overens med de prædikterede værdier for indholdet af Alox (Andersen & Heckrath, 2020). Det lavere indhold af Alox på Litorina-fladen var også styrende for, at P-bindingskapacitet var lavere på denne type af marin-aflejring. Indholdet af Feox varierede derimod mindre mellem landskabstyperne.

Ikke-marine aflejringer:

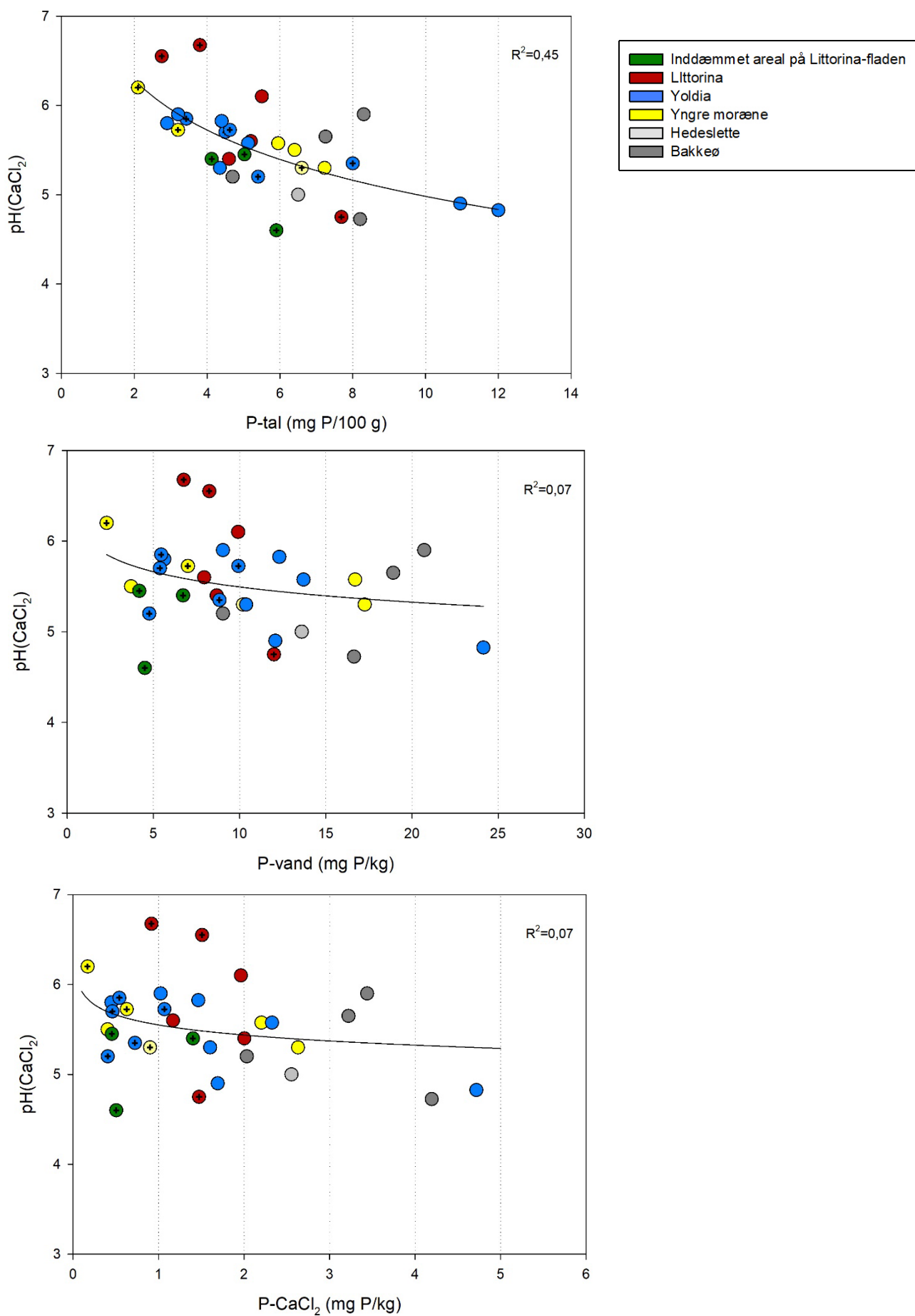
- Yngre moræne og randmoræne er en ikke-marine aflejring, og de blev inddraget som referencesteder for de marine aflejringer i Nordjylland, for at kunne vurdere effekten af marin vs. ikke-marin aflejring på udbytterespons efter P-tilførsel. Der er udført i alt 6 forsøg på disse landskabstyper, og i tre tilfælde var der signifikant merudbytte efter tildeling af P. Forsøget *Ajstrup 21 med udbytterespons skiller sig ud fra de øvrige resterende moræne jorder ved at have et ganske højt kulstofindhold. Jordarten angives også til at være en ferskvandsgytje – en forholdsvis speciel og sjælden jordtype. Både jordart og kulstofindhold kunne antyde at jorden er vandlidende. Jorden har et højt total P-indhold (684 mg/kg) og et P-tal på 3,2. Forsøget *Brønden 20 havde et P-tal på 2,1, så her var udbytteresponsen ikke overraskende. Forsøget *Ø_Brønderslev_a 22 med udbytterespons havde et højt P-tal på 6,6, og forsøget er placeret på en randmoræneaflejring, der er kendetegnet ved at være en voldformet moræne opstået foran en gletsjers rand. *Ø_Brønderslev_a 22 havde et højt indhold af Alox og til dels også Feox, hvilket resulterede i en høj bindingskapacitet. Den høje bindingskapacitet kunne gøre P akkumuleret fra tidligere P-tilførsler mindre tilgængeligt, og kunne hermed forklare, hvorfor P-tildeling gav signifikant udbytterespons.
- Bakkeø og hedeslette er ikke-marine aflejringer. Fem forsøg på disse landskabstyper fandt sted uden for georegion Nord. P-tal varierede fra 4,7 til 8,3, og på ingen af stederne var der signifikant effekt af P-tilførsel, selvom der tidligere er observeret udbytterespons efter P-tildeling på arealer tæt på forsøget udført på hedeslette (Borris_21). Bakkeø og hedeslette havde det laveste indhold af Feox ift. de andre landskabstyper.

3.2.2. Sammenhænge mellem jordanalyser

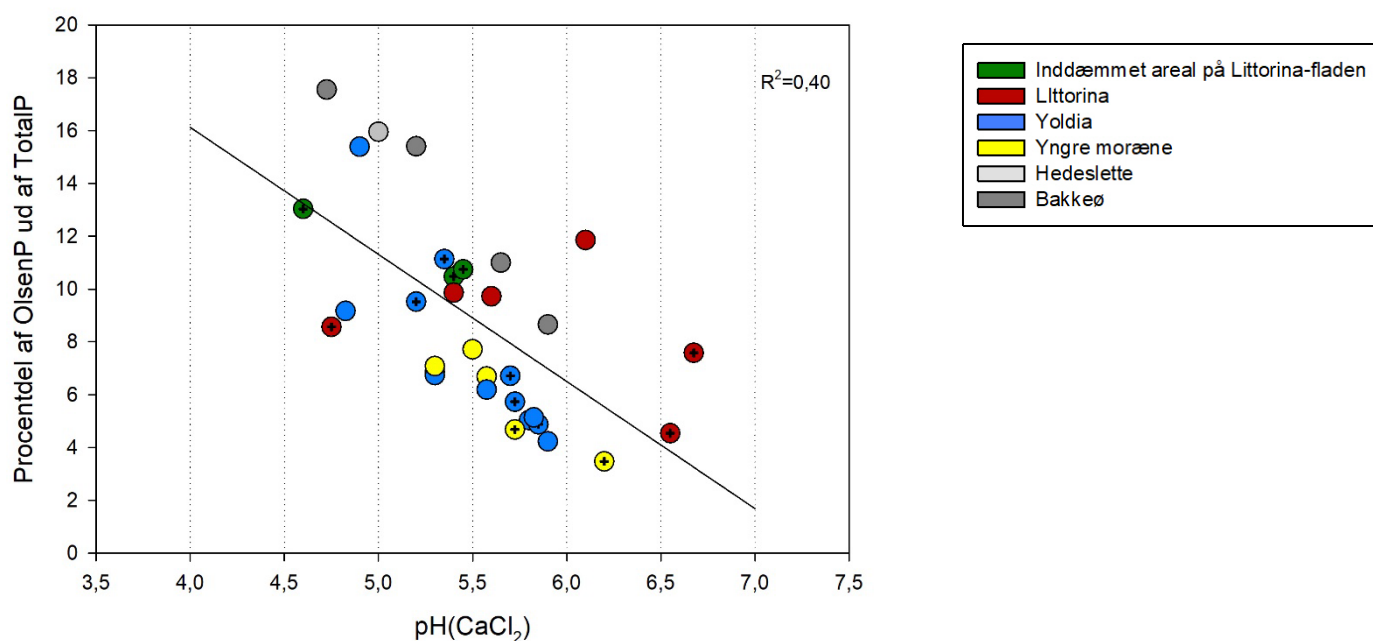


Figur 16. Mætningsgrad relateret til hhv. P-tal (øverst), Pvand (midt) og PCaCl₂ (nederst). Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p<0.05$).

Der var en positiv sammenhæng mellem P-tal og P-mætningsgraden (Fig. 16 øverst). Det er også set i andre studier (Andersen et al., 2016), og kan tilskrives at P bindes mindre hårdt ved stigende mætningsgrad, og hermed kan P nemmere frigives ved ekstraktion med natriumbikarbonat ved P-tals analysen (Andersen et al., 2016). Der var ligeledes også en positiv sammenhæng mellem Pvand og PCaCl_2 og P-mætningsgraden (Fig. 16 midt og nederst). Det kan igen hænge sammen med, at P bindes mindre hårdt ved høj mætningsgrad, og hermed lettere frigives ved ekstraktion med hhv. vand og kalciumklorid, som beskrevet ovenfor.

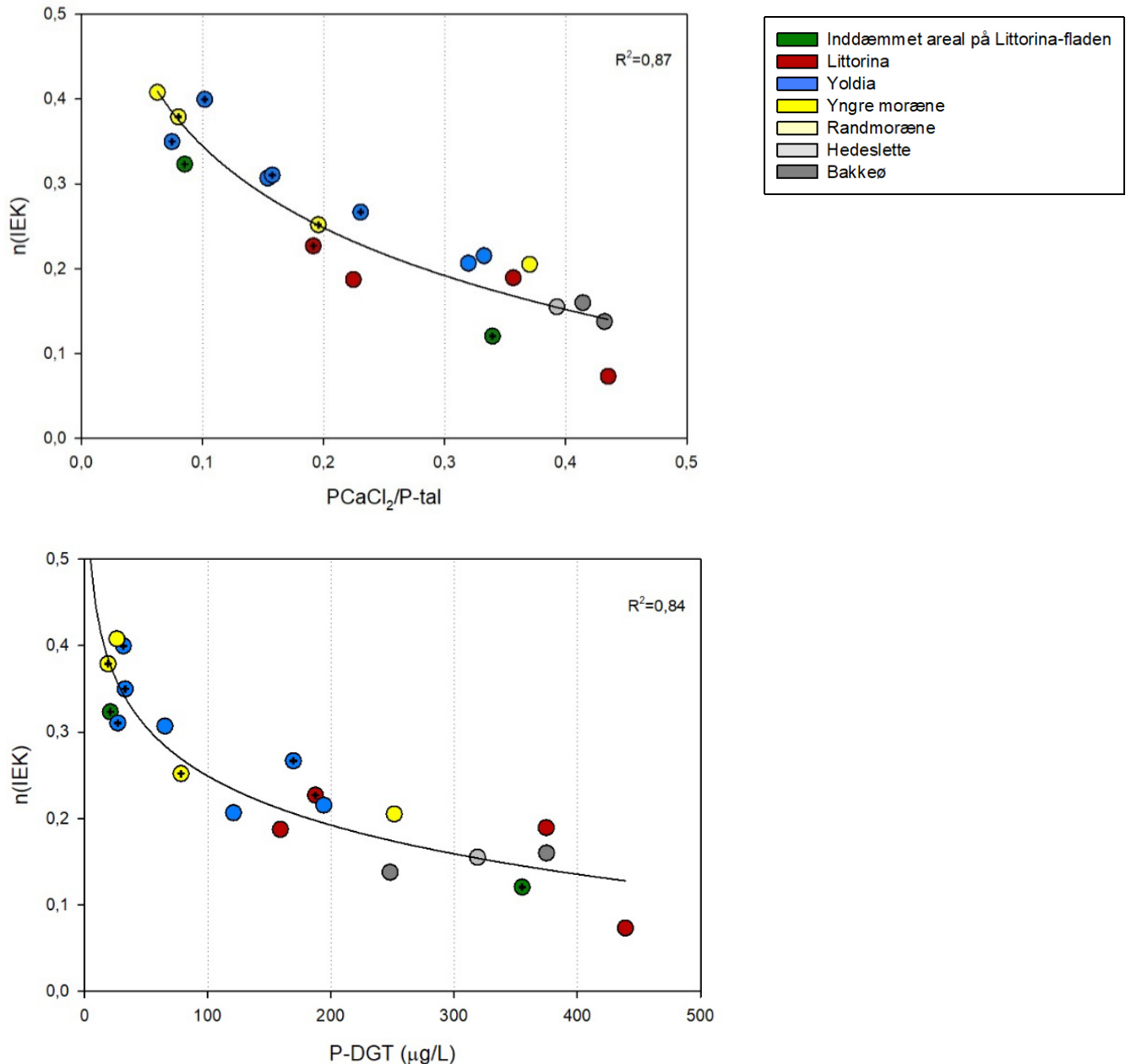


Figur 17. Jordens pH målt i CaCl₂ plottet mod P-tal (øverst), Pvand (midt) + PCaCl₂ (nederst). Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, p<0.05).



Figur 18. Sammenhæng mellem jordens pH og procentdel af Olsen-P (P-tal x10) ud af Total P. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

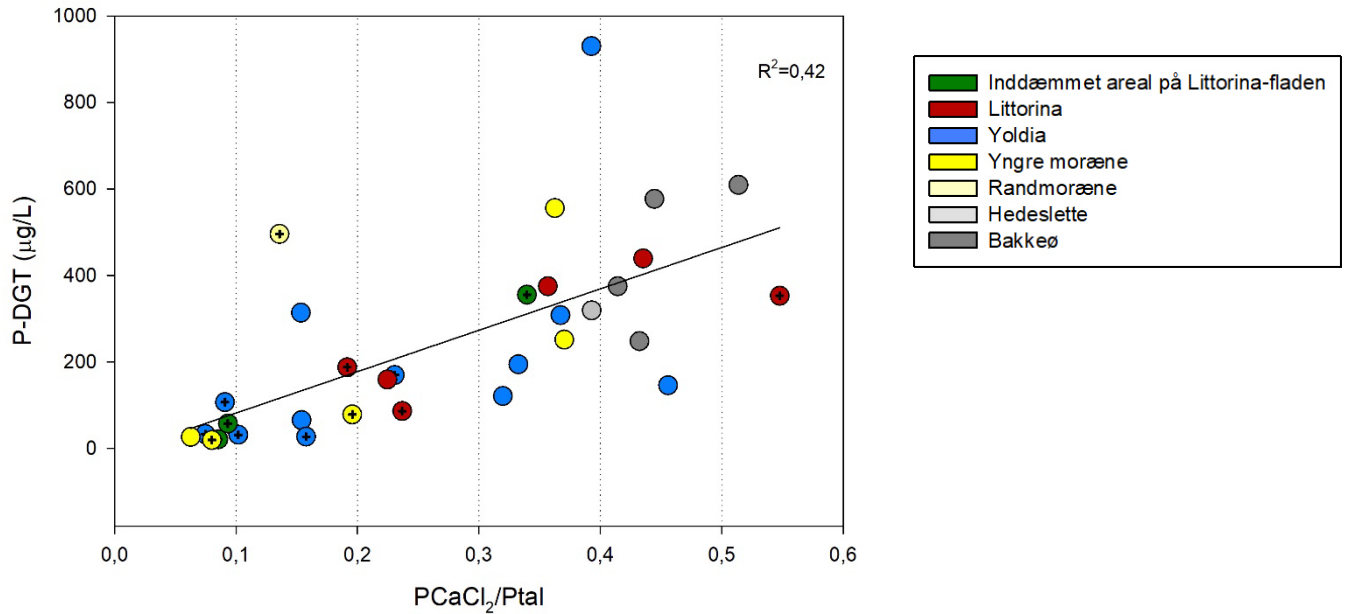
Der var en klar sammenhæng mellem jordens pH og P-tallet, så P-tallet var højere des lavere pH, mens der ikke var sammenhæng mellem de øvrige P-tests (Pvand og PCaCl_2) og pH (Fig. 17). Vi fandt også, at Olsen-P indholdet udgør en større del af jordens totale P-indhold, des lavere pH (Fig. 18). Azeez et al. (2020b) fandt også denne sammenhæng på en grovsandet jord. Dette indikerer, at P-tals metoden, hvor ekstraktionsvæsken er let basisk, kan overestimere jordens indhold af labilt P på steder med meget lave pH-værdier såsom *Brovst 20, *Arentsminde 21, Brønderslev 22 og Biersted a 22, og hermed kan det meget høje P-tal ikke være retvisende i forhold til at vurdere jordens P tilgængelighed.



Figur 19. Sammenhæng mellem parameteren n og ratio mellem PCaCl_2 og P-tal (øverst) og P-DGT (nederst) i 0-25 cm dybde. Parameteren n blev bestemt ved isotopombytningskinetik på jordprøver i 2020 og 2021. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

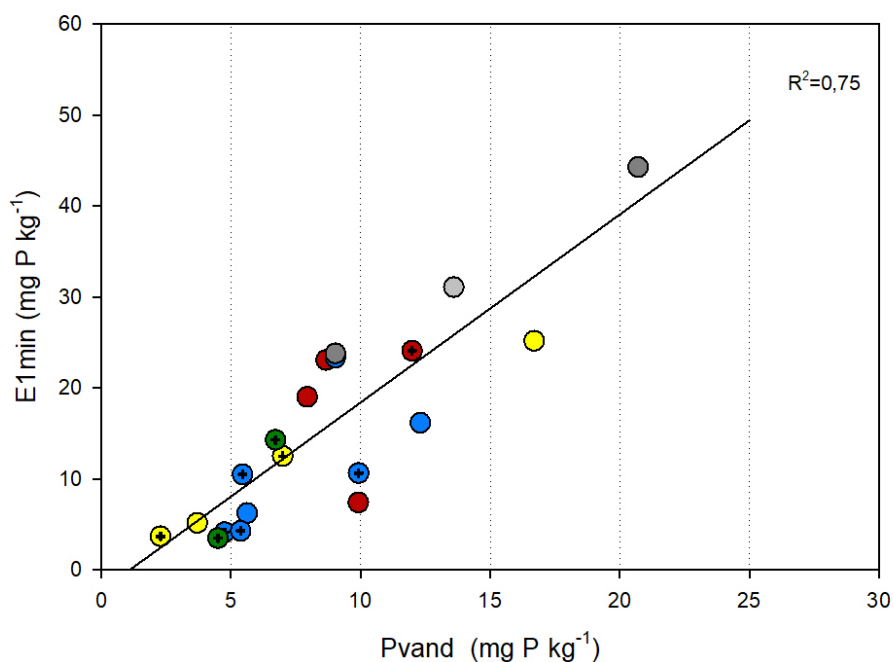
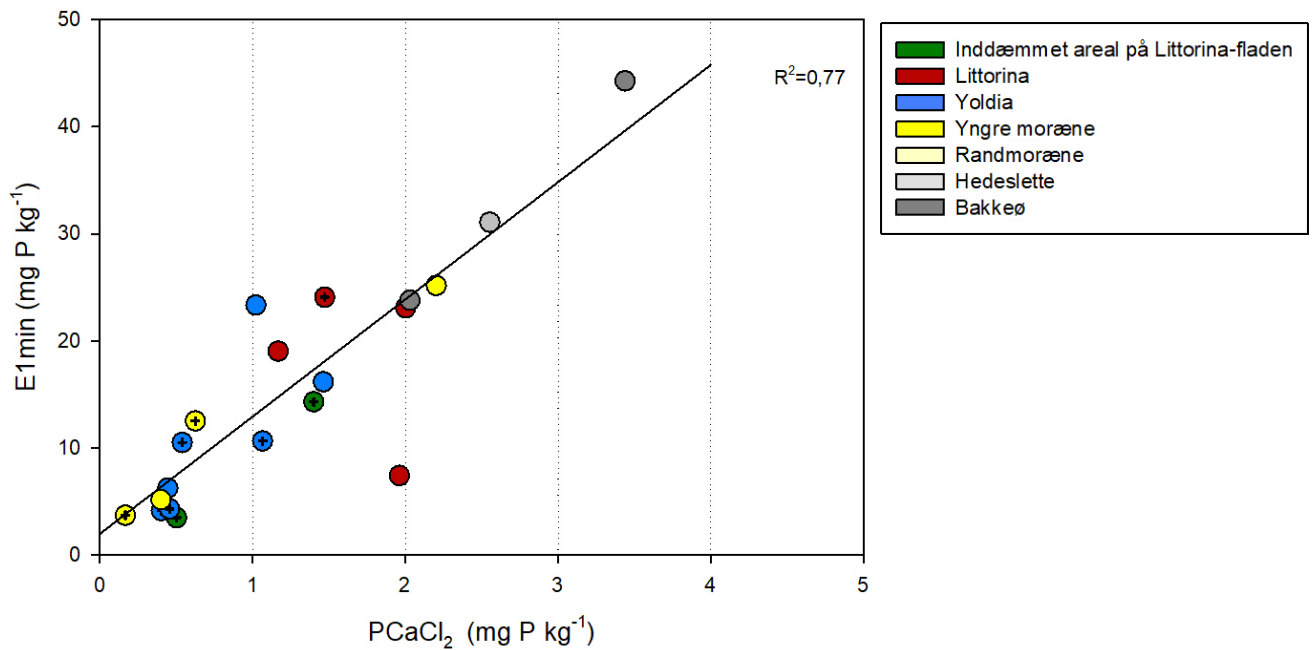
For jordprøver udtaget i 2020 og 2021 blev der lavet studier af isotopombytningskinetik (IEK). Der var en meget stærk sammenhæng mellem $\text{PCaCl}_2/\text{P-tal}$ og parameteren n fra IEK. Parameteren n angiver raten, hvormed radioaktiviteten fjernes fra jord-væske-opløsningen

Lav værdi af n indikerer at jorden har høje koncentrationer af tilgængeligt P (=hurtig frigivelse), mens høj værdi af n indikerer at jorden frigiver mindre P per tidsenhed. Des højere ratio mellem PCaCl_2 og P-tal, des lavere værdi for n , og hermed mere P der kan frigives pr. tidsenhed. Braun et al. (2020) fandt også denne stærke sammenhæng, og resultaterne viser at forholdet mellem PCaCl_2 og P-tallet beskriver dermed jordens evne til at frigive tilgængeligt P.



Figur 20. Lineær sammenhæng mellem DGT og ratio mellem PCaCl_2 og P-tal. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

Der var også en god sammenhæng mellem P-DGT og parameteren n (Fig. 19, nederst) og ligeledes mellem DGT og $\text{PCaCl}_2/\text{P-tal}$ (Fig. 20). Det viser hermed, at parameteren n , DGT og forholdet mellem PCaCl_2 og Olsen P fortæller noget af det samme om jordens evne til at frigive P. Fælles for n og DGT er, at disse analyser er mere krævende analyser, hvorimod P-tal og i særdeleshed ekstraktion med en kalciumklorid-opløsning er simple og billige analyser. Resultaterne fra dette projekt viser hermed, at en supplerende ekstraktion med CaCl_2 ud over P-tals analysen kan give ekstra information om jordens evne til at frigive P på de undersøgte jorder.

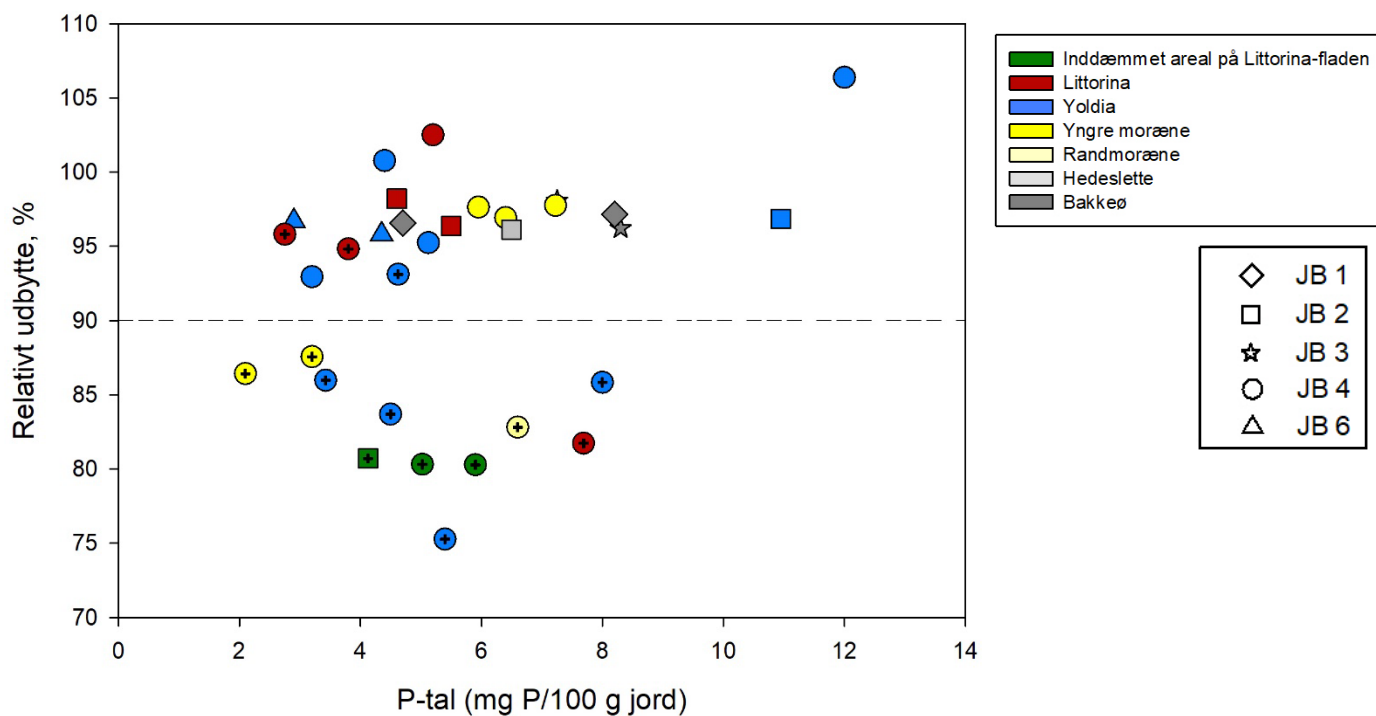


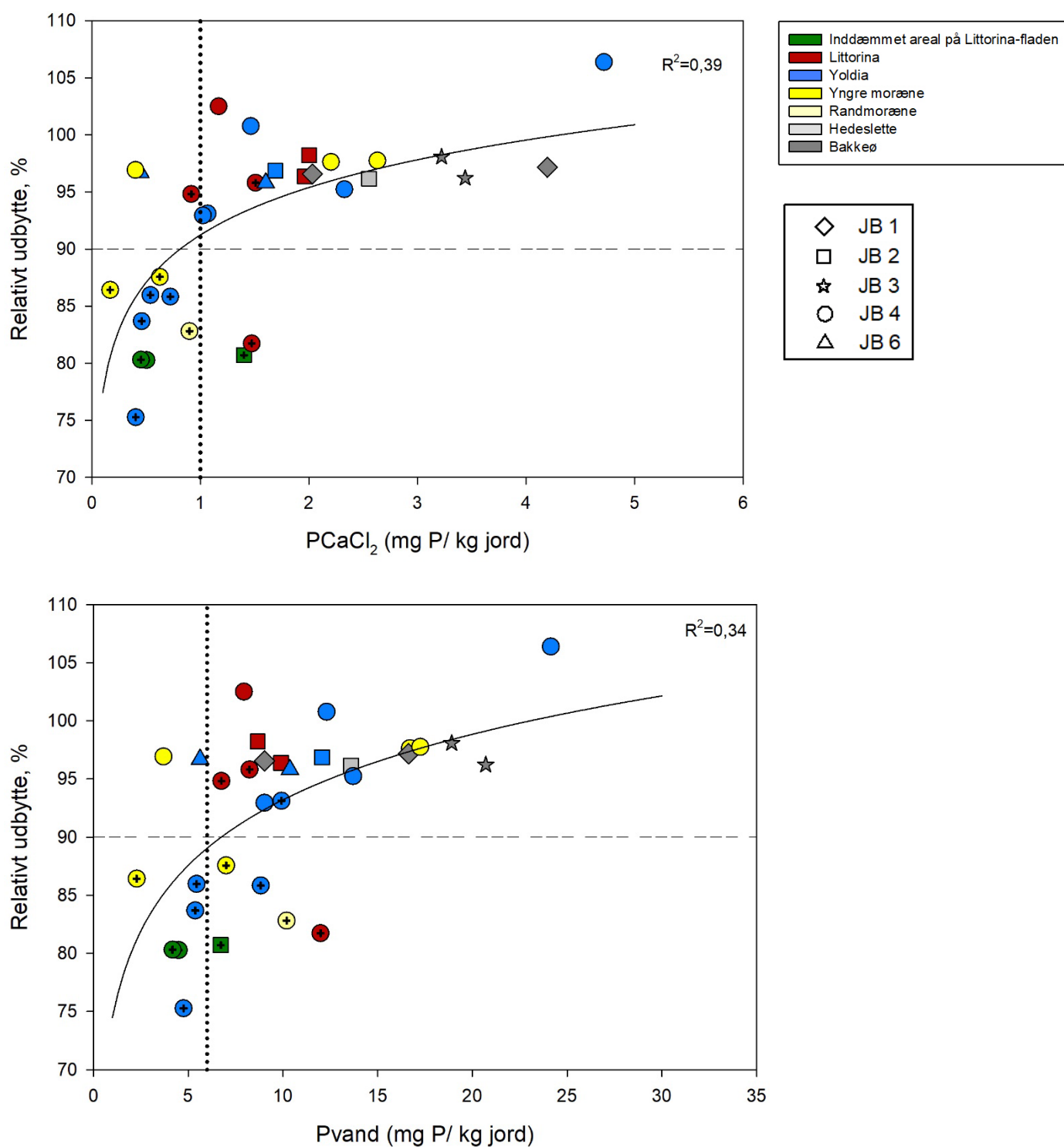
Figur 21. Fraktionen E1min relateret til $PCaCl_2$ (øverst) og $Pvand$ (nederst). Forsøg med signifikant udbytterrespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p<0.05$).

Der var en meget stærk sammenhæng mellem E1min og $PCaCl_2$ (Fig. 21, øverst) og $Pvand$ (Fig. 21, nederst). Fraktionen E1min angiver mængden af P ombyttet inden for 1 minut og repræsenterer dermed P i jorden, umiddelbart tilgængeligt for planteoptag (Frossard & Sinaj, 1997). Resultaterne viser dermed, at mængden af P ekstraheret med vand eller kalciumklorid repræsenterer de samme puljer af P i jorden som fraktionen E1min.

3.2.3 Sammenhænge mellem jordanalyser og det relative udbytte

Det relative udbytte blev relateret til forskellige jord P tests med det formål at vurdere, hvilke tests der havde de bedste sammenhænge til det relative udbytte. Derudover blev det relative udbytte også relateret til jordens tekstur og indhold af Alox og Feox.



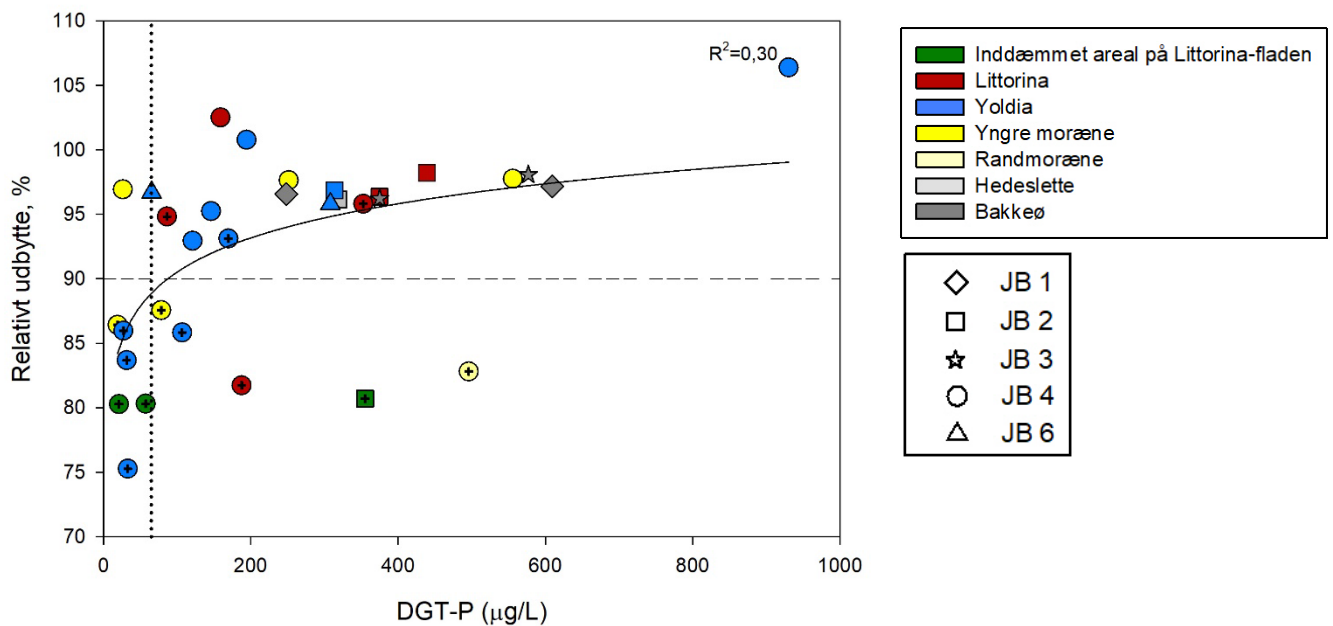


Figur 23. Det relative udbytte plottet mod P ekstraheret med CaCl_2 (øverst) og vand (nederst). For Pvand er angivet en kritisk grænseværdi på 6 mg P/kg jf. Jordan-Meille et al. (2012), mens der for PCaCl_2 er angivet en grænseværdi på 1 mg P/kg. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p<0.05$).

De to milde ekstraktionsmetoder PCaCl_2 og Pvand var bedre relateret til det relative udbytte (Fig. 23) end P-tallet var. Begge disse tests er såkaldte intensitetstests og er tæt relateret til den koncentration af P, som planten vil opleve i den jordvæske, hvorfra den optager P. Generelt havde jorder med højt indhold af PCaCl_2 eller Pvand ikke behov for yderligere P-tildeling, mens jorder med lavt indhold af PCaCl_2 eller Pvand responderede på P-tildeling.

En kritisk lav værdi for Pvand er angivet til at være 6 mg /kg i Jordan-Meille et al. (2012). Otte forsøg i nærværende rapport havde et indhold af Pvand på 6 mg /kg eller lavere. Seks ud af disse 8 forsøg responderede signifikant på P-tildeling, mens forsøgene Klokkeholm_20 og Hjørring_20 ikke responderede på P-tildeling trods Pvand indhold på hhv. 3,7 og 5,6 mg P/kg (Tabel 3). Fem jorder havde et Pvand-indhold på mere end 6 mg /kg og havde samtidig et relativt udbytte på <90%, og hermed formår Pvand analysen ikke at identificere disse fem responderende jorder.

Ud fra data i nærværende rapport synes en grænseværdi for PCaCl_2 på 1 mg P/kg jord at være fornuftig (Fig. 23 øverst) og den er ikke langt fra den grænseværdi på 1,2 mg P/kg jord, som foreslås af Nawara et al. (2017). Tolv jorder havde et indhold af PCaCl_2 på mindre end 1 mg P/kg, og ni af disse steder responderede signifikant på P-tildeling. De to ikke-responderende steder med et PCaCl_2 indhold på 1 eller mindre var Klokkeholm_20 og Hjørring_20 (Tabel 3). Hermed faldt forsøgene Klokkeholm_20 og Hjørring_20 "forkert" ud i begge intensitetstest. Kun to forsøg (*Brovst_21 og *Arentsminde_21) havde et højere indhold af PCaCl_2 end 1 mg P/kg, men responderede alligevel på P-tilførsel. Hermed synes ekstraktion af P med CaCl_2 ift. vand at være bedre til at identificere jorder med udbytterespons efter P-tildeling.

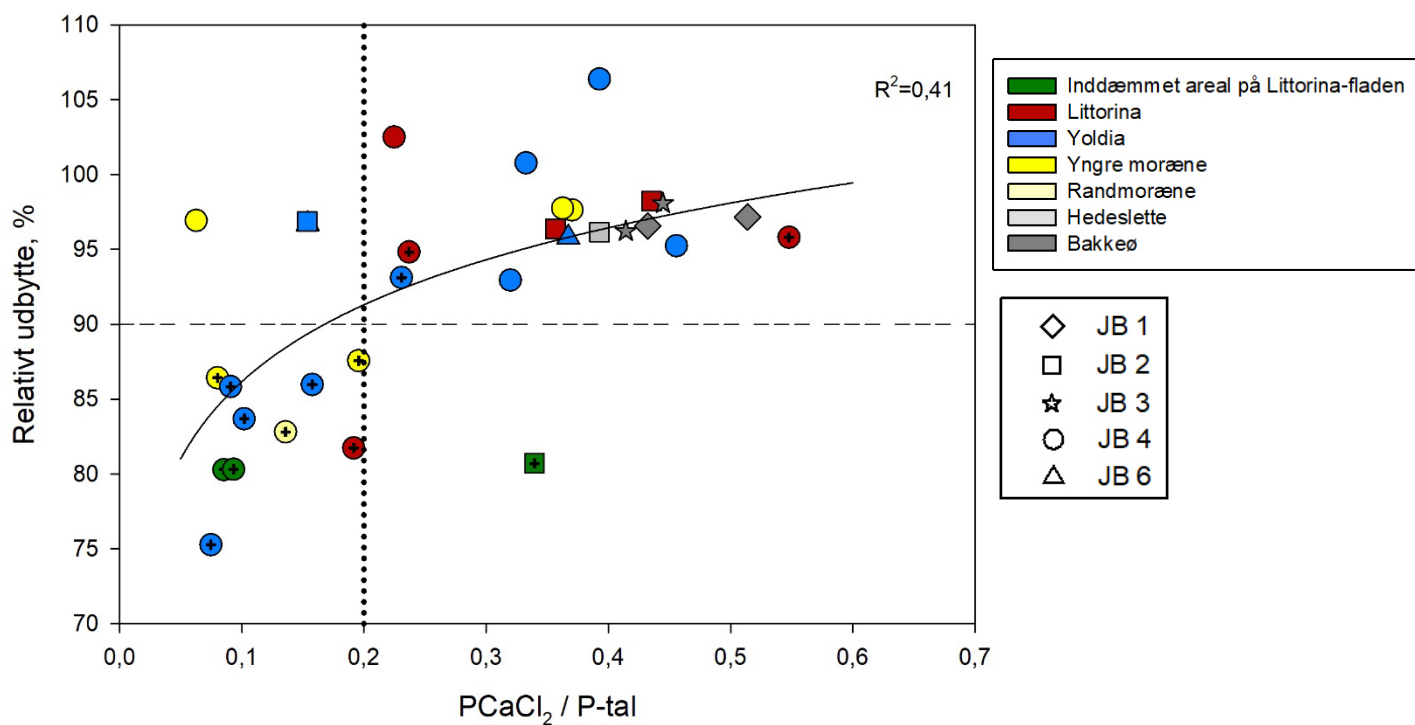


Figur 24. Det relative udbytte plottet mod DGT. Kritisk grænseværdi på 65 µg P/L er angivet jf. Mason et al. (2010). Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

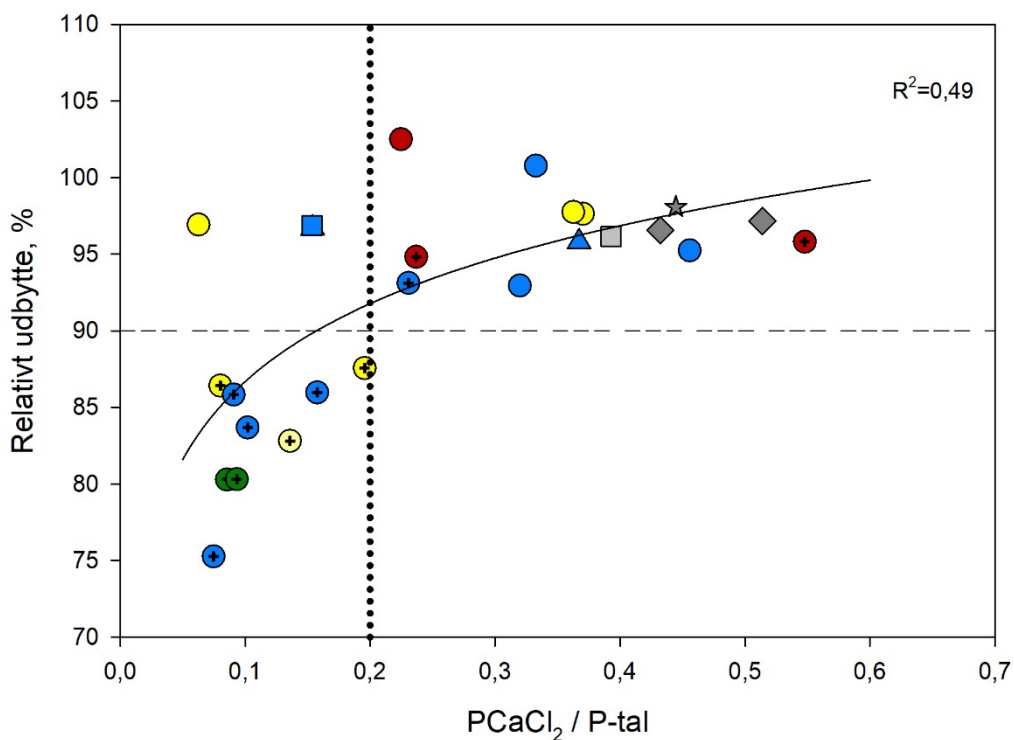
Indholdet af P målt med DGT-metoden var også bedre relateret til det relative udbytte end P-talsanalysen, men havde dog en lidt ringere forklaringsgrad end PCaCl_2 og Pvand i dette studie.

Det antages, at en kritisk grænseværdi for DGT-P er 65 µg P/L (Mason et al., 2010), hvor jorder med et DGT-P indhold under denne værdi er P-manglende. Kun syv jorder i dette projekt havde et indhold af DGT-P på 65 µg P/L eller lavere, og 6 ud af disse syv forsøg responderede signifikant på P-tildeling, mens Klokkeholm_20 ikke responderede på P-tildeling (Tabel 3). Der var dog også fem forsøg med et relativt udbytte < 90%, hvor indholdet af DGT-P var over 65 µg P/L. Hermed overså DGT-metoden ca. halvdelen af de responderende jorder, og DGT-metoden synes derfor at være ringere til at identificere responderende jorder ift. de to intensitetstests.

Christensen (2021) fandt i et studie af seks forskellige P-tests evne til at forudsige merudbytte i markforsøg med P-gødsning fra Landsforsøgene® 2013 til 2016 på sandede danske jorder, hvoraf få/ingen var beliggende i Nordjylland. heller ingen sammenhæng mellem P-tal og merudbytte, og mere beskedne forklaringsgrader for Pvand ($R^2=0,25$), PCaCl_2 ($R^2=0,22$) og DGT ($R^2=0,25$) end vi fandt i dette studie. De lavere forklaringsgrader kan dels være relateret til, at der i disse markforsøg var langt færre forsøg med signifikant udbytterespons på P-gødsning (seks ud af 33 forsøg med signifikant merudbytte for at give P og kun 3 af disse havde et relativt udbytte < 90%). Det kan dog også hænge sammen med, at de forsøg i nærværende rapport hovedsageligt var beliggende i Nordjylland, medens undersøgelsen af Christensen (2021) omfattede andre lokaliteter i Danmark.



Figur 25. Det relative udbytte plottet mod ratioen mellem PCaCl₂ og P-tal. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødskning er markeret med + (F-test, p<0.05).



Figur 26. Det relative udbytte plottet mod ratioen mellem PCaCl₂ og P-tal hvor jorder med høj mætningsgrad (>0,60) ikke er medtaget. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødskning er markeret med + (F-test, p<0.05).

Forholdet mellem PCaCl_2 og P-tal og relativt udbytte havde den bedste relation (Fig. 25). Ti ud af 13 Jorder med en PCaCl_2 /P-tal ratio på 0,2 eller mindre havde et relativt udbytte på mindre en 90%. Ratioen mellem PCaCl_2 og P-tallet var derfor bedst til at identificere responderende jorder i dette studie. De tre jorder med en PCaCl_2 /P-tal ratio under 0,2 som ikke responderede på P-tildeling var Klokkeholm_20, Hjørring_20 og Biersted_a_22, og de to førstnævnte forsøg faldt også forkert ud i de to intensitetstest. Kun en jord, hvor det relative udbytte var mindre en 90% havde en PCaCl_2 /P-tal ratio over 0,2. Det drejede sig om *Brovst_21, som var et forsøg udført på inddæmmede areal på Litorina-fladen. Som ovenfor beskrevet er inddæmmede arealer en sjælden landskabstype og de tre forsøg udført på denne landskabstype stammer fra den samme lokalitet. *Brovst_21 havde et lavere indhold af ler og silt og højere af grovsand end de to andre forsøg på inddæmmede arealer (*Brovst_a_20 og *Brovst_a_22). I tråd med teksturdata, var bindingskapaciteten (baseret på Alox og Feox) også langt mindre på *Brovst_21, som hænger sammen med lavere indhold af ler, hvor det oxalatekstraherbare jern- og aluminium typisk er associeret til. Tilsvarende var mætningsgraden stor (0,61), idet der hermed ikke skulle meget P til at "mætte" jorden på ledige sorptionssteder. Fosforbindings- og frigivelsesmekanismerne i *Brovst_21-forsøget kan derfor være anderledes end de to øvrige forsøg på det inddæmmede areal (som er kendt for stor variation indenfor korte afstande). Dette ses også på indholdet af PCaCl_2 , der var højere for *Brovst_21-forsøget (1,4 mg P/kg jord) end for de andre forsøg på inddæmmede arealer, der kan tilskrives at P kan være mindre hårdt bundet når jorden er meget mættet med P, og herved frigives P lettere til den vandige opløsning ved ekstraktion. Trods det højere indhold af PCaCl_2 var der effekt af P-tildeling, hvilket også kunne hænge sammen med et fald i jordtemperatur lige efter den sene såning (16/4, Fig. 37), og hermed dårligere betingelser for god tidlig rodvækst og hermed optag af P fra jorden.

Resultaterne viser hermed, at ved at inddrage ratioen mellem PCaCl_2 og P-tal er der færre responderende jorder, der overses ift. brug af DGT, PCaCl_2 og Pvand alene. Ved brug af forholdet mellem PCaCl_2 og P-tal stadig er jorder, der ifølge P-testen skulle respondere på P-tildeling, men som ikke gør det (Klokkeholm_20, Hjørring_20 og Biersted_a_22). Disse tre forsøg er forskelligartet både mht. tekstur, landskabstype. Biersted_a_22 havde en PCaCl_2 /P-tal ratio på 0,15 (Fig 13). Den lave PCaCl_2 /P-tal ratio kan hænge sammen med det meget høje P-tal (11,0). Samtidig var pH lav i dette forsøg (pH=4,9), og P-tallet kunne derfor være overestimeret (Fig. 17 øverst), hvilket kunne forklare at forsøget er et af de punkter, der "falder uden for kurven".

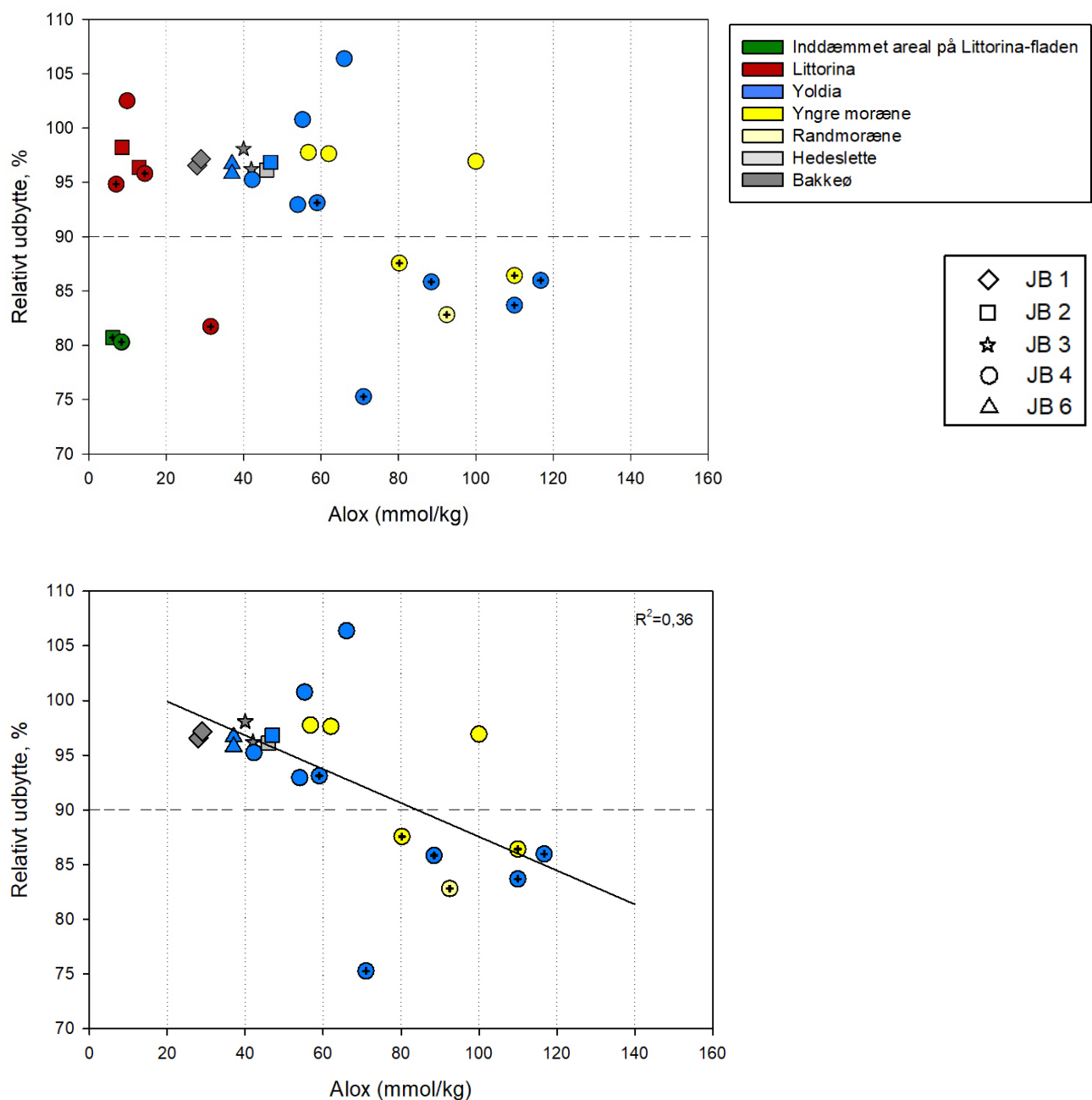
For de seks jorder med meget høj mætningsgrad (>0,60) var der generelt dårlige sammenhæng mellem udbyttrespons og PCaCl_2 /P-tal rationen. Hvis disse jorder ikke blev medtaget, steg forklaringsgraden markant (Fig. 26, $R^2=0,49$). De seks jorder med meget høj mætningsgrad (>0,60) var meget forskelligartede og repræsenterede både landskabstyper Litorina, Inddæmmede areal på Litorina, Yoldia og Bakkeø. Total P varierede fra 394 til 1309 mg P/ kg jord, og ligeledes var bindingskapaciteten i 0-25 cm meget forskellig mellem de seks jorder (fra 9 til 56 mmol/kg). I et studie af van Rotterdam et al. (2012) fandt man også, at jorder med høj mætningsgrad på de reaktive overflader opførte sig anderledes end jorder med lavere mætningsgrad mht. forudsigelse af jordernes P-frigivelsespotentiale. Det kunne indikere, at andre faktorer kontrollerede P-frigivelse på meget mættede jorder.

Tabel 3. Fosfor-analysernes evne til at forudsige, om der vil forekomme et udbytterespons (relativt udbytte <90%) eller ej (relativt udbytte >90%).

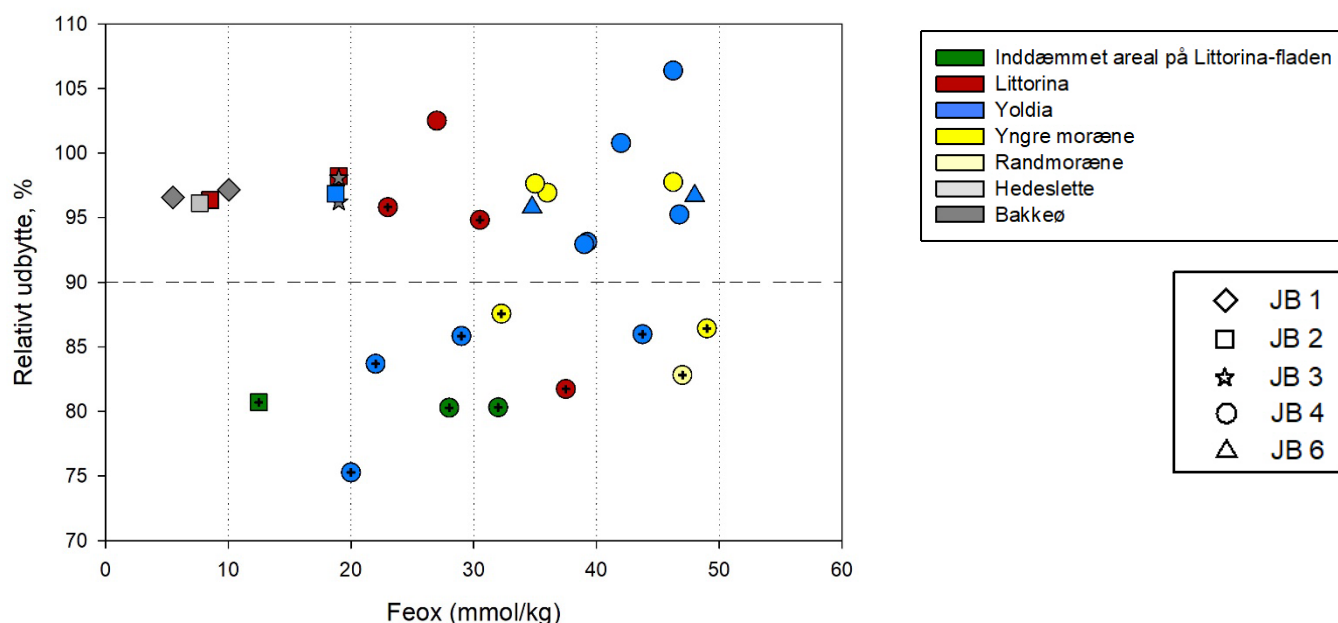
	Grænseværdi	11 forsøg med relativt udbytte <90%		21 forsøg med relativt udbytte >90%	
		Rigtigt (identificeret P-behov)	Forkert (overset P-behov)	Rigtigt (identificeret at P-gødsning ikke er nødvendigt)	Forkert (overset at P-gødsning ikke er nødvendigt)
P-tal	2 mg P/100 g	0	11	21	0
P-DGT	65 µg P/L	6	5	20	1 Klokkerholm_20
Pvand	6 mg P/kg	6	5	19	2 Klokkerholm_20 Hjørring_20
PCaCl₂	1 mg P/kg	9	2 *Brovst_21 og *Arentsminde_21	18	2 (3) Klokkerholm_20, Hjørring_20 og (*Brovst_b_22) ^a
PCaCl₂/P-tal ratio	0.2	10	1 *Brovst_21	18	3 Klokkerholm_20, Hjørring_20 og Biersted_a_22

^a I forsøget *Brovst_b_22 var der et signifikant merudbytte efter P-tilførsel, men det relative udbytte var 95.

I Tabel 3 er angivet en oversigt over, hvor mange forsøg de forskellige P-metoder identificerer korrekt som responderende og ikke-responderende jorder. Her fremgår det tydeligt, at PCaCl₂/P-tal ratioen er den metode, der identificerer flest responderende jorder, og at kun én responderende jord bliver overset.



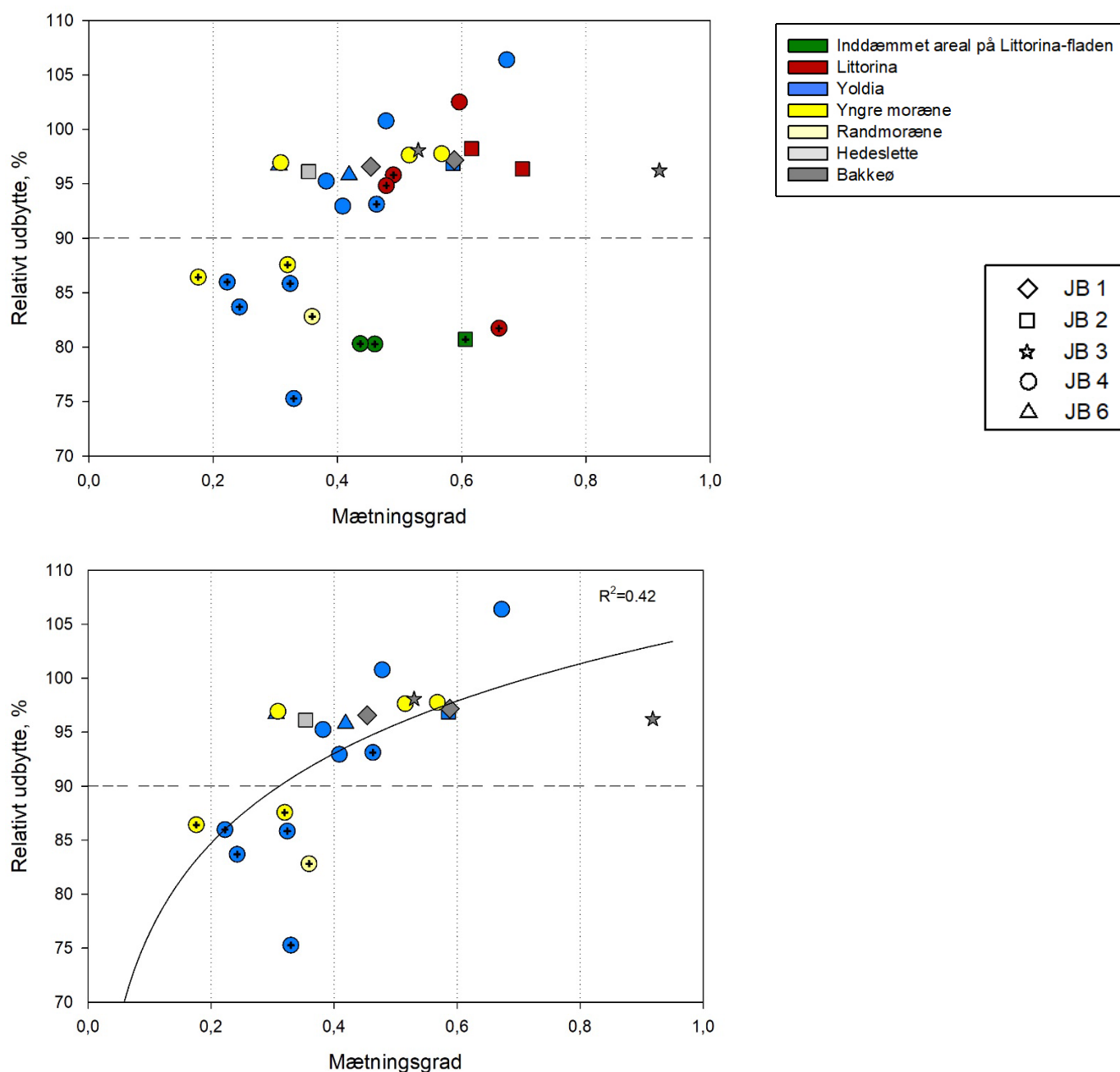
Figur 27. Relativt udbytte relateret til indhold af oxalatekstraherbart aluminium (Alox) i forsøg udført på alle landskabstyper (øverst) og hvor forsøg på Litorinafladen er udeladt (nederst). Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødskning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).



Figur 28. Relativt udbytte relateret til indhold af oxalatekstraherbart jern (Feox). Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

Indholdet af Alox var tydeligvis lavere i forsøg udført på Litorinafladen end de øvrige landskabstyper. Sammenhængen mellem Alox og det relative udbytte for forsøg, der ikke var placeret på Litorinafladen, viste, at et højere indhold af Alox resulterede i et større udbytterespons efter P-tildeling (Fig. 27, nederst), og langt de fleste jorder med et indhold af Alox > 70 mmol/kg responderede positivt på P-tildeling. Der var ingen sammenhæng mellem jordens indhold af Feox og det relative udbytte (Fig. 28). For jorder, der ikke findes på Litorina-aflejringer, synes indholdet af Alox hermed at være mere styrende for sorption af P til jorden end indholdet af Feox hvilket også er set i andre studier udført på danske jorder (Azeez et al., 2020a; Borggaard et al., 1990).

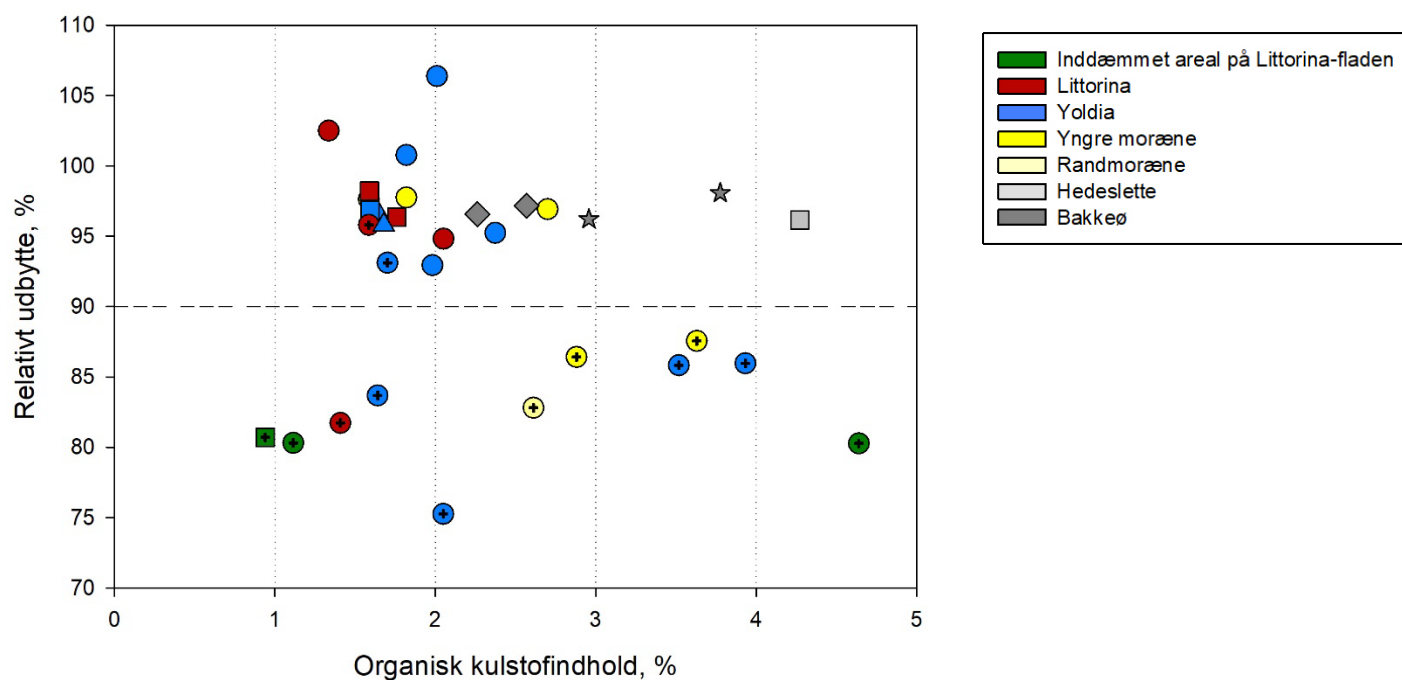
Forsøgene udført på Litorinafladen repræsenterede både inddæmmede og ikke-inddæmmede arealer, og alle forsøgene på Litorinafladen var også klassificeret som mineralsk lavbundsjord (Tabel 1). De tre forsøg på inddæmmede arealer på Litorinafladen responderede positivt på P-tilførsel trods lavt indhold af Alox (< 10 mmol/kg), og hermed kunne andre faktorer, som ikke var relateret til indholdet af Alox, være styrende for P-tilgængeligheden i disse tre forsøg. Et forsøg på et ikke-inddæmmet areal på Litorinafladen (*Arentsminde_21) responderede også på P-tildeling. Dette forsøg havde et indhold af Alox på 32 mmol/kg og et lavt reaktionstal ($R_t = 5.25$). Hvordan meget lavt R_t og moderat indhold af Alox kan have interageret med P-tilførsel og evt. have påvirket det endelige udbytterespons synes ikke at være klar, og yderligere forsøg på jorder med samme egenskaber kunne være nødvendigt for at forstå, hvordan disse forhold generelt påvirker udbyttet efter P-tilførsel. Derudover kan andre bindings- og frigivelsesmekanismer af P være dominerende på mineralske lavbundsjorder. Særligt forholdet mellem P og jern ekstraheret med bikarbonat-dithionit kan være bestemmende for P-frigivelsesraten under reducerende forhold (Forsmann & Kjaergaard, 2014). Yderligere undersøgelser af disse forhold kunne være relevant for at fastslå, om indholdet af jern spiller også en afgørende rolle for binding og frigivelse af P i jorderne på Litorina-aflejringer undersøgt i nærværende rapport.



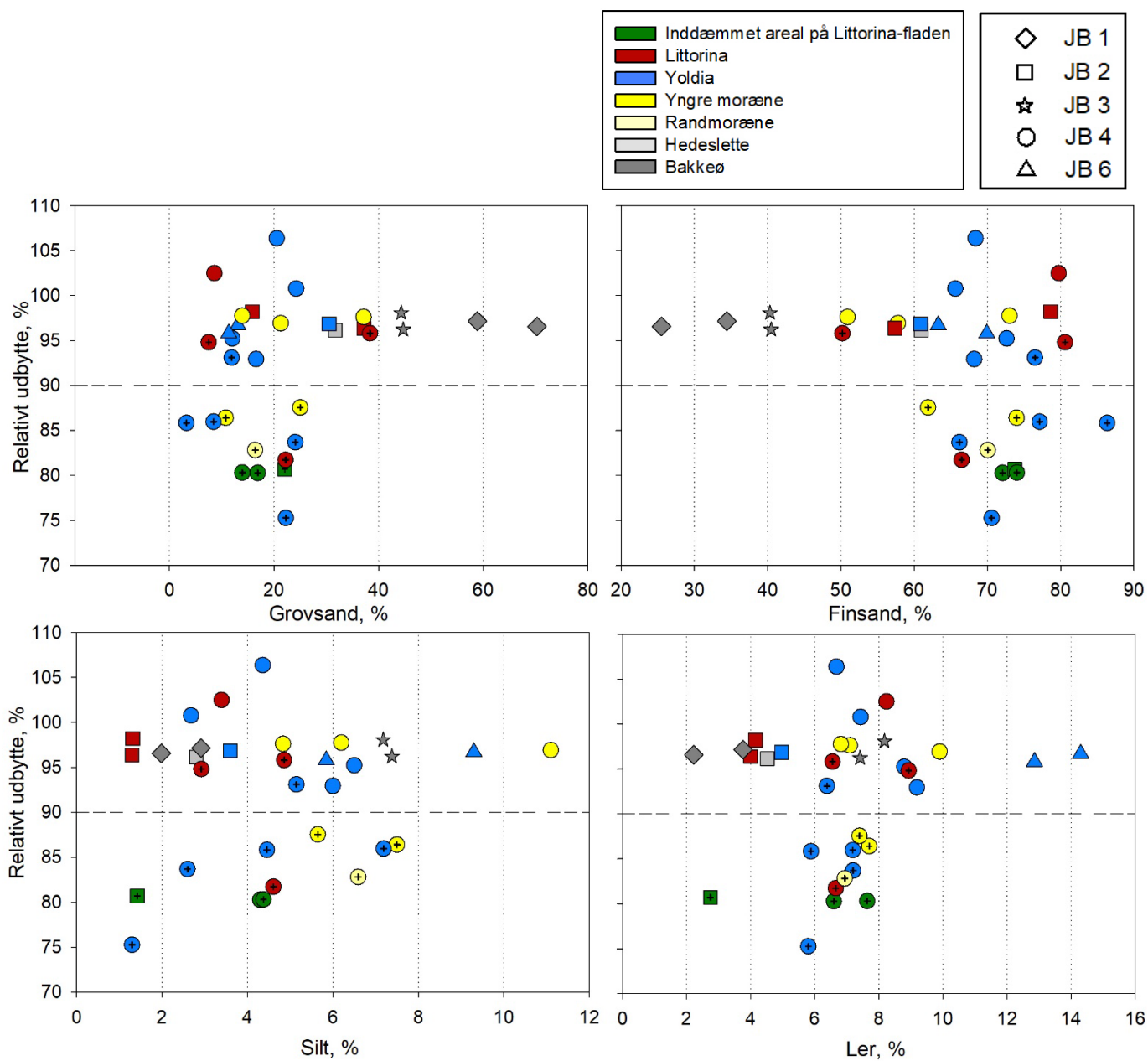
Figur 29. Relativt udbytte relateret til fosformætningsgraden udregning efter ligning 3 i alle forsøg (øverst) og i forsøg hvor steder på Litorinafladen er udeladt (nederst). Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødskning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

Der var ikke nogen klar sammenhæng mellem jordens P-mætningsgrad (udregnet ud fra ligning 3) og det relative udbytte på tværs af alle landskabstyper (Fig. 29, øverst). Når forsøg udført på Litorinafladen blev udeladt (Fig. 29, nederst), var der en bedre sammenhæng mellem det relative udbytte og mætningsgraden ($R^2=0.42$). For forsøg udført på Yoldia og yngre moræne med mætningsgrad under 40% var der en tendens til, at der forekom et merudbytte efter P-gødskning, mens jorder på disse aflejringer med mætningsgrad $>40\%$ i større grad kunne forsyne afgrøden med tilstrækkelig P. I forsøg udført på inddæmmede arealer på Litorinafladen og i *Arentsminde_21 forekom der merudbytte efter P-tilførsel trods mætningsgrad over 40%. Disse resultater tyder på, at processer, der styrer P-bindings og -frigivelsesmekanismer i jorden, er mindre relateret til mætningsgraden beregnet ud fra oxalatekstraherbart jern og aluminium i disse forsøg på Litorinafladen ift. de øvrige landskabstyper, hvor denne mætningsgrad synes at være mere

bestemmende for udbytterespons efter P-tilførsel. Det kunne være relateret til lavbundkarakteristikken for forsøg udført på Litorinafladen, som diskuteret ovenfor.



Figur 30. Overjordens (0-25 cm) indhold af kulstof (SOC) plottet mod det relative udbytte. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).



Figur 31. Overjordens (0-25 cm) indhold af grovsand, finsand, silt og ler relateret til det relative udbytte. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødskning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

Jordens indhold af organisk kulstof og mineralske bestanddele var ikke relateret til de relative udbytter (Fig. 30 og 31), hvilket indikerer at de teksturelle egenskaber ikke var af afgørende betydning for, om der forekom udbytterespons efter P-tildeling.

4. Studier af jordfysiske egenskaber, jordtemperatur og tidlig rodvækst i udvalgte markforsøg (opgave 2)

På udvalgte forsøgsarealer blev der lavet supplerende analyser for at undersøge, om særlige forhold omkring jordens fysiske egenskaber herunder vandholdende evne, volumenvægt og penetreringsmodstand, jordtemperatur og tidlig rodudvikling kunne bidrage til at forklare udbytterespons på P-gødskning, der ikke var forventet ud fra de jordkemiske analyser (opgave 2 jf. kontrakt). I 2020 blev der kun udført jordfysiske målinger, mens der i 2021 og 2022 blev suppleret med målinger af jordtemperatur og rodstudier i udvalgte forsøg (Tabel 4). I 2021 og 2022 blev nogle af forsøgene sammenstillet i "par", som var sået samtidig og lå geografisk tæt på hinanden, hvilket gjorde det muligt at lave en direkte sammenligning af rodvækst mellem stederne. Par a, b og c er ligeledes angivet i Tabel 4.

Jordfysiske målinger til bestemmelse af jordens densitet, vandholdende evne og den modstand en rod bliver mødt med, når den vokser ned gennem jorden (=penetreringsmodstanden) blev inddraget for at belyse, om disse forhold kunne forklare, hvorfor afgrøden nogle steder responderer på P-gødskning. Disse undersøgelser fandt (af resurse-mæssige årsager) kun sted på udvalgte lokaliteter. Derudover var det i sagens natur nødvendigt at vælge lokaliteterne før høstresultaterne fra markforsøgene var i hus, selvom det ville have været ideelt, at kunne udvælge de lokaliteter, hvor P-test metoderne ikke ramte rigtigt (kapitel 3).

Tabel 4. Overblik over forsøg med detaljerede jord- og rodstudier i 2020, 2021 og 2022. Desuden af angivet forsøgspaar, der har samme sådato og ligger geografisk tæt på hinanden.

Unik kode	Forsøgsnr.	"Par"	Ringprøver			Penetrering smodstand	Rodstudier ved V2/3	Jordtemp.
			8-12 cm dybde	38-42 cm dybde	Udtagningsdato			
Tylstrup*_20	070532020-002		x	x	26/10+27/10 2020	-	-	-
Brovst*_20	070532020-003		x	x	26/10+27/10 2020	-	-	-
Jerslev_a*_20	070532020-004		x	x	26/10+27/10 2020	-	-	-
Klokkerholm_20	070532020-005		x	x	26/10+27/10 2020	-	-	-
*Tylstrup_21	070532121-002		x	-	4/6 2021	x	x	x
*Brovst_21	070532121-003		x	-	19/5 2021	x	X	x
*Jerslev_a_21	070532121-004	Par_a	x	-	19/5 2021	x	x	x
Jerslev_b_21	070532121-005	Par_a	x	-	4/6 2021	x	x	x
Biersted_a 22	070532222-001	Par_b	x	-	26/4 2022	-	-	x
*Biersted_b 22	070532222-002	Par_b	x	-	26/4 2022	-	-	x
*Ø_Brønderslev_a 22	070532222-003	Par_c	x	-	26/4 2022	-	-	x
Ø_Brønderslev_b 22	070532222-004	Par_c	x	-	26/4 2022	-	-	x
*Brovst_b 22	070532222-007		-	-	-	-	-	x
*Brovst_a 22	070892222-001		x	-	26/4 2022	-	x	x
Ajstrup 22	070892222-002		x	-	26/4 2022	-	x	x

4.1 Jordens densitet, vandholdende evne og penetreringsmodstand

4.1.1 Metoder

Udtagning af prøver af jorden i naturlig lejring i 100 cm³ stålringe, og måling af penetreringsmodstand blev foretaget i parceller, der ikke blev gødsket med P (OP behandlingen). For hvert forsøgssted blev der udtaget tre ringprøver i hver af de fire gentagelser.

I 2020 blev ringprøver udtaget i efteråret i 8-12 og 38-42 cm dybde. Tidspunktet for udtagning af ringprøver blev i 2021 og 2022 ændret til mindst 14 dage efter såning, så de jordfysiske forhold blev bestemt på samme tid som den tidlige rodvækst fandt sted. Ligeledes blev penetreringsmodstanden i marken målt på dette tidspunkt. Derudover blev der kun udtaget ringprøver i 8-12 cm dybde, idet denne dybde er mest relevant for at kunne vurdere betingelserne for den tidlige rodudvikling i foråret.

Desværre var det ikke muligt at måle penetreringsmodstanden ved markkapacitet i 2020 og 2022, idet AU's penetrometer var gået i stykker.

Pga. meget nedbør i starten af maj, blev udtagning af ringprøver og penetreringsmodstand foretaget den 20/5 2021 i forsøgene *Brovst_21 og *Jerslev_a_21, og den 6/4 2021 i forsøgene *Tylstrup_21 og Jerslev_b_21. Sidstnævnte forsinkelse skyldtes forkert udtagning af ringprøver i første omgang.

Ud fra ringprøverne blev følgende jordfysiske parametre bestemt:

- Vandindhold ved markkapacitet (pF2) og volumenvægt
- Luftpermeabilitet ved pF2 (kun for ringprøver udtaget i 2020) (Schjønning & Koppelgaard, 2017)

Ud fra disse data estimeredes:

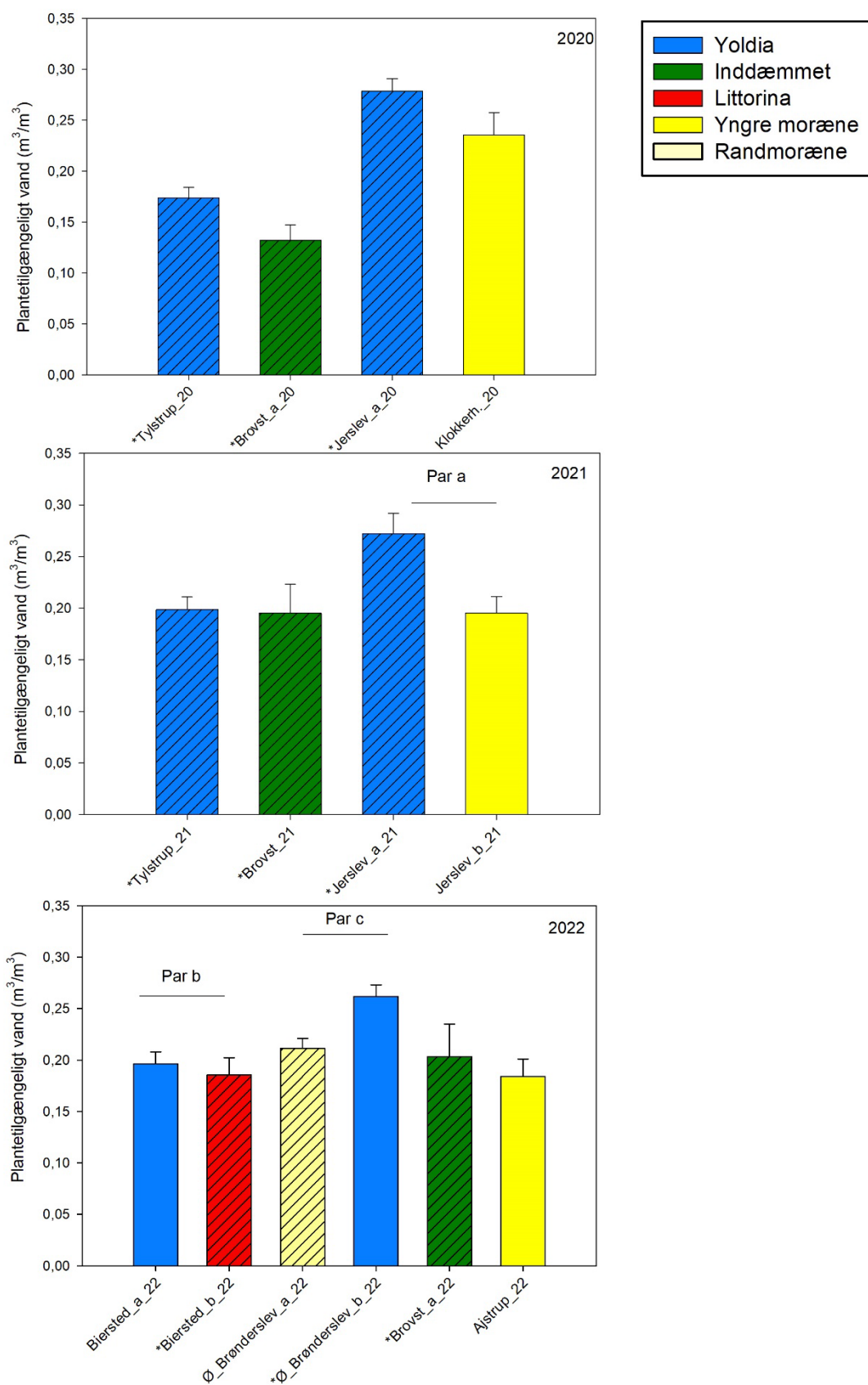
- Plantetilgængeligt vand i 0-25 cm dybde (forskellen mellem vandindhold ved pF2 og pF4,2). Vandindhold ved pF4,2 (visnegrænsen) i 0-25 cm dybde estimeret efter Hansen (1976)
- Porøsitet. For ringprøver taget i 8-12 cm dybde, er partikeldensiteten estimeret ud fra kendt ler- og kulstofindhold efter Schjønning et al. (2017). For ringprøver taget i 38-42 cm dybde, er partikeldensiteten sat til 2,65.
- Poreandel > 30µm → disse porer repræsenterer strukturelle porer, som normalt er luftfyldte ved markkapacitet.
- Poreandel < 30µm → disse porer repræsenterer teksturelle porer



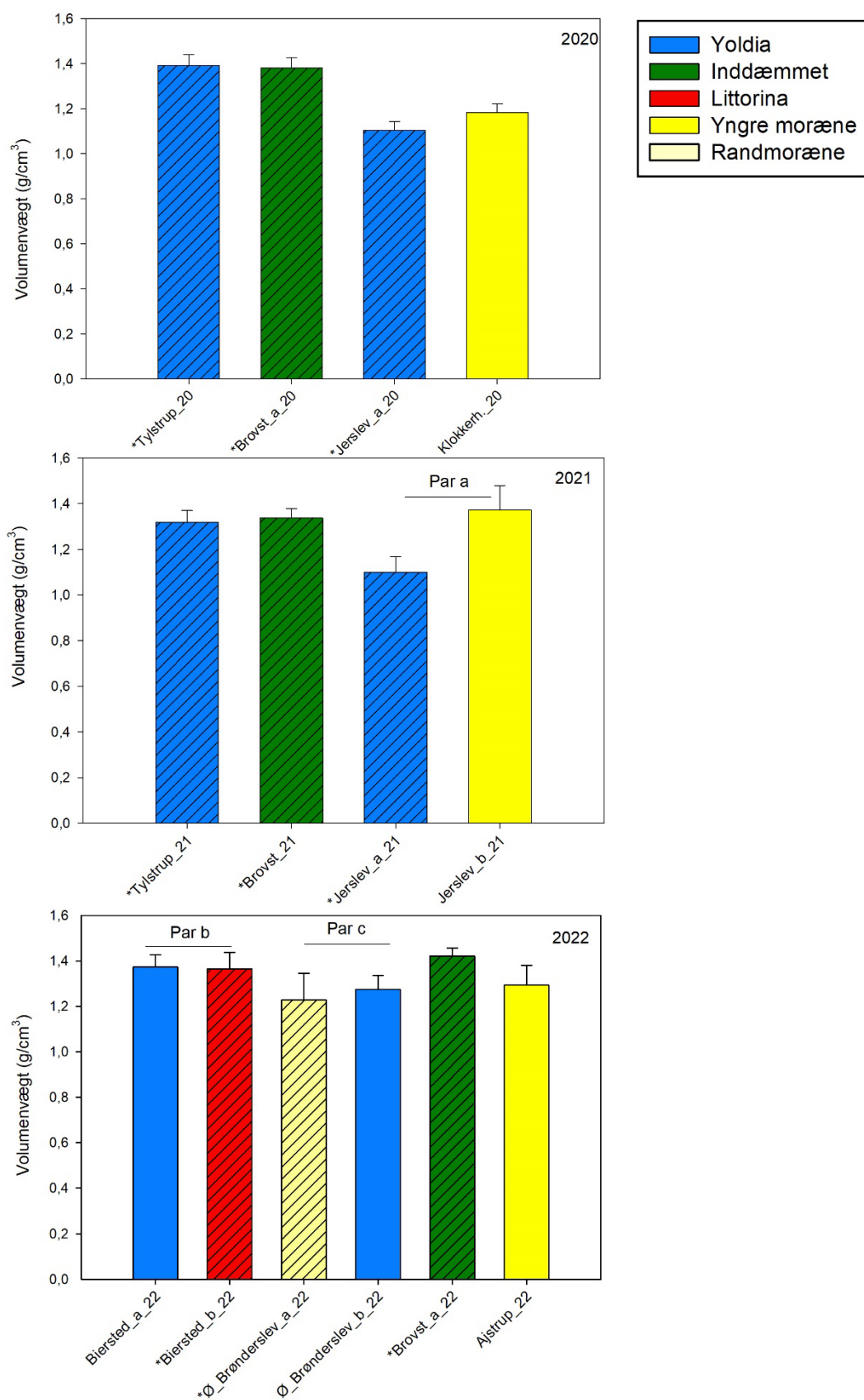
Figur 32. Ringprøver i sandboks udtaget forsøgene 2020 i 8-12 og 38-42 cm dybde. Ringprøverne er ikke sorteret efter dybde eller lokalitet. Foto: Ingeborg Frøsig Pedersen.

4.1.2 Resultater og diskussion

I nærværende rapport er opgivet resultater for ringprøver i 8-12 cm dybde, da denne dybde går igen for alle tre forsøgsår, og fordi det er i det øvre jordlag at den tidlige rodvækst finder sted. Resultater fra ringprøver i 38-42 cm dybde (2020 data) er angivet i Supplerende Materiale 1.



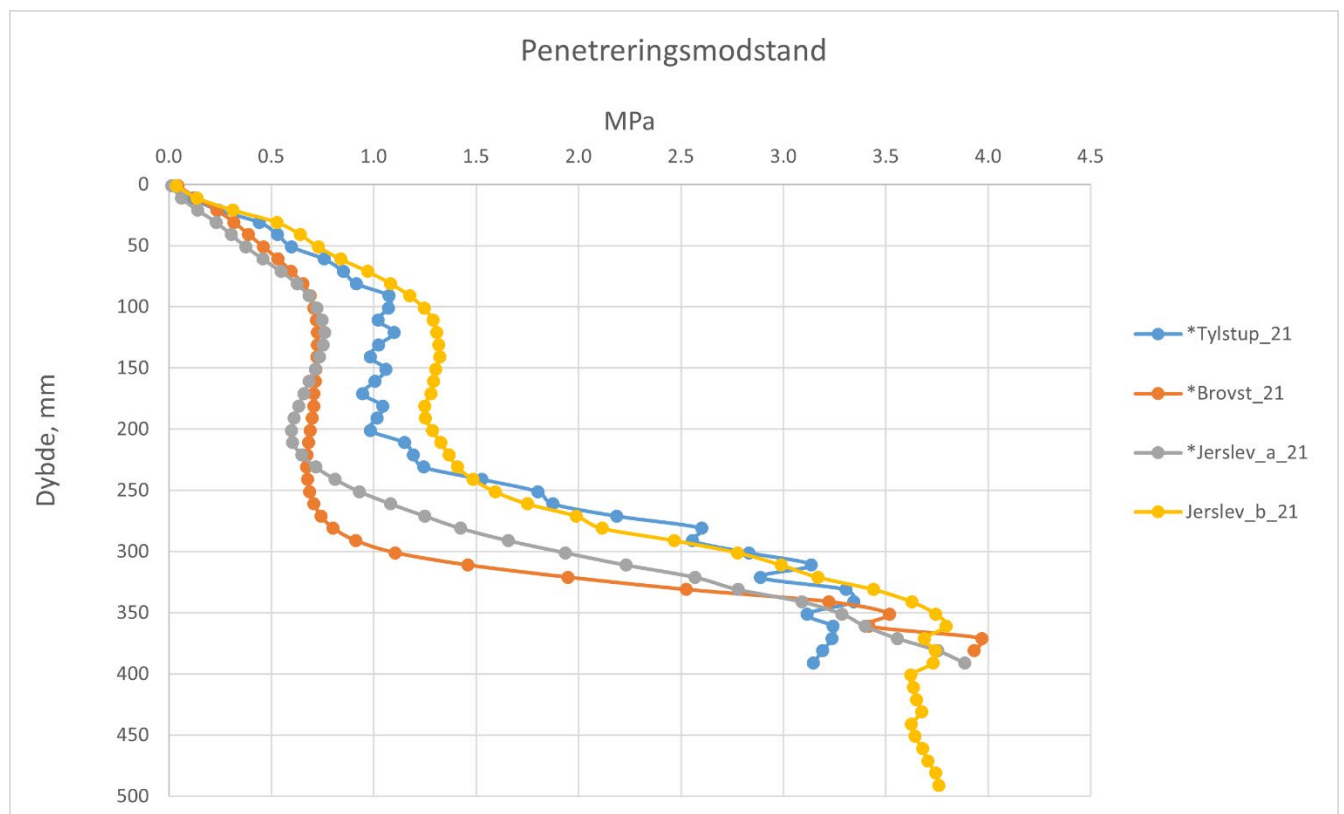
Figur 33. Estimeret plantetilgængeligt vand i 8-12 cm dybde i udvalgte forsøg i 2020, 2021 og 2022. Skraverede søjler repræsenterer forsøg med positiv udbytterespons efter tildeling af fosfor (F-test, $p < 0.05$). Se tekstboks 1 for forklaring af stedsbetegnelser og inddeling efter landskabstype.



Figur 34. Volumenvægt i 8-12 cm dybde i udvalgte forsøg i 2020, 2021 og 2022. Skraverede søjler repræsenterer forsøg med positiv udbytte respons efter tildeling af fosfor (F-test, $p < 0.05$). Se tekstboks 1 for forklaring af stedbetegnelser og inddeling efter landskabstype.

Det antages at mængden af plantetilgængeligt vand ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) skal være over 0,15 for sikre optimale forhold for rodvækst- og funktion (Reynolds et al., 2009). I forsøget *Brovst_a_20 var indholdet af plantetilgængeligt vand i 0-25 cm dybde under denne grænse (Fig. 33), og dermed kunne plantevæksten være begrænset af tilgængeligt vand dette år. De øvrige forsøg havde ikke et indhold af plantetilgængeligt vand under den kritiske grænse.

Volumenvægt varierede betragteligt mellem de 14 forsøgssteder fra $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ (*Jerslev_a_21) til $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ (*Brovst_a_22) i 8-12 cm dybde. Ingen forsøgssteder havde dog en densitet over $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ i denne dybde, hvilket indikerer, at kompaktering ikke var et problem på forsøgsstederne jf. grænseværdier angivet i Greve et al. (2018).



Figur 35. Penetreringsmodstand målt i parceller, der ikke har modtaget fosforgødning i forsøg *Tylstrup_21, *Brovst_21, *Jerslev_a_21 og Jerslev_b_21 i forsøgsserie 070532121. Alle forsøg ligger i georegion nord, de tre første på marin aflejring, mens Jerslev_b_21 ligger på en moræneaflejring. NB. Forsøg *Tylstrup_21 og Jerslev_b_21 blev målt godt 2 uger senere end de to andre forsøg.

Penetreringsmodstand blev kun målt i fire forsøg i 2021 (Fig. 35). Der var ret høj penetreringsmodstand i alle fire forsøg under pløjelaget (specielt under 35 cm). Forskellene mellem forsøgene antages primært at være relateret til forskelle i humusindhold. Den forskel i vandindhold der har været imellem jordene på tidspunkt for måling (afvigelser fra markkapacitet) antages heller ikke alene at kunne forklare de observerede forskelle i penetreringsmodstand mellem forsøgene. Penetreringsmodstanden var højere i Jerslev_b_21 uden udbytterespons end i *Jerslev_a_21 med udbytterespons (par a) og forskellene i penetreringsmodstand kan derfor ikke forklare de observerede merudbytter, idet den større penetreringsmodstand på forsøgsstedet uden udbytterespons ikke synes at resultere i ringere mulighed for optagelsen af P fra det omkringliggende jordvolumen.

4.2 Tidlig rodvækst

Udbytterespons efter P-tildeling på jorder med højt indhold af P kunne også skyldes forskelle i rodvækst, og vi arbejdede ud fra en hypotese om, at steder med udbytterespons efter P-tildeling havde dårligere rodvækst, evt. betinget af jordfysiske forhold eller vejrlig, og hermed ringere mulighed for at optage P fra jorden. Også for dette studie var det i sagens natur nødvendigt, at udvælge forsøg til studier af tidlig rodvækst før udbytterespons var kendt, hvilket gør at vi ikke nødvendigvis har studeret de mest relevante forsøgssteder med udbytterespons.

4.2.1 Metode

Planter med rødder blev udtaget vha. shovelomic-metoden ved 2. eller 3. bladstadiet i ugødede plots (0P) og plots gødet med 60 kg P/ha (60P, Tabel 5). Der blev udtaget 9-13 planter per plot (Fig. 36).

Efter udtagning blev planterne delt i rødder og skud, og rødderne blev vasket og herefter opbevaret i 3% eddikesyre indtil scanning på en Epson XL 10000 scanner. Total rodlængde og gennemsnitlig roddiameter blev bestemt vha. WinRhizo. Skud blev tørret ved 60 °C og gemt til Opgave 3 (afsnit 5.2.2).

Tabel 5. Oversigt over forsøg med studier af tidlig rodudvikling.

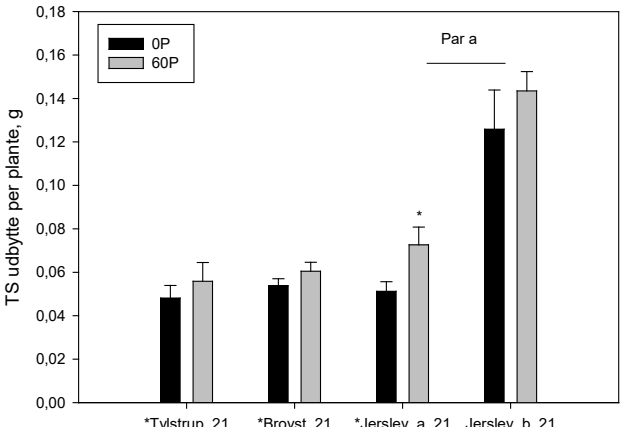
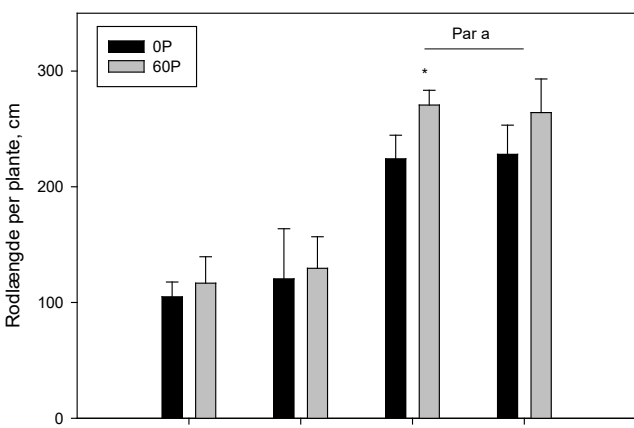
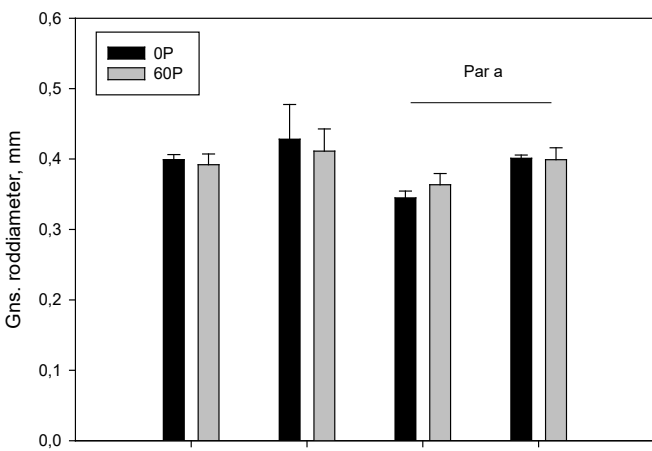
	2021				2022	
Forsøg (unik kode)	*Tylstrup_2 1	*Brovst_2 1	*Jerslev_a_2 1 (par a)	Jerslev_b_2 1 (par a)	*Brovst_a_2 2	Ajstrup_2 2
Dato for udtagning	03.05.21	18.05.21	18.05.21	18.05.21	04.05.22	04.05.22
Behandlinger	0P og 60P	0P og 60P	0P og 60P	0P og 60P	0P og 60P	0P og 60P
Antal fuldtudviklede blade	2	2	2	3	2	2



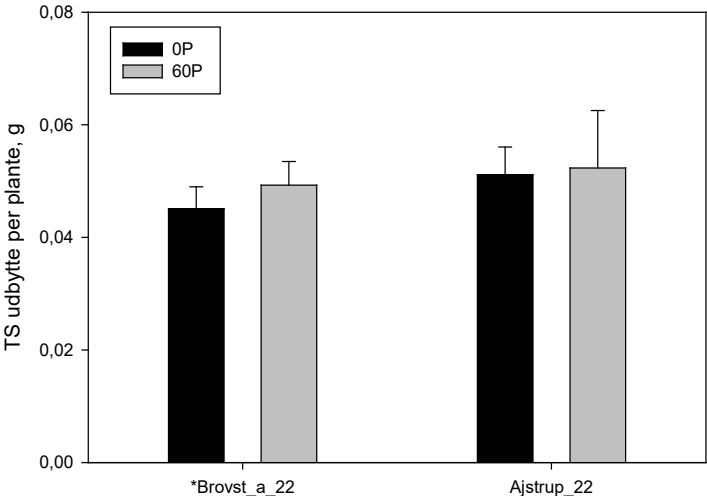
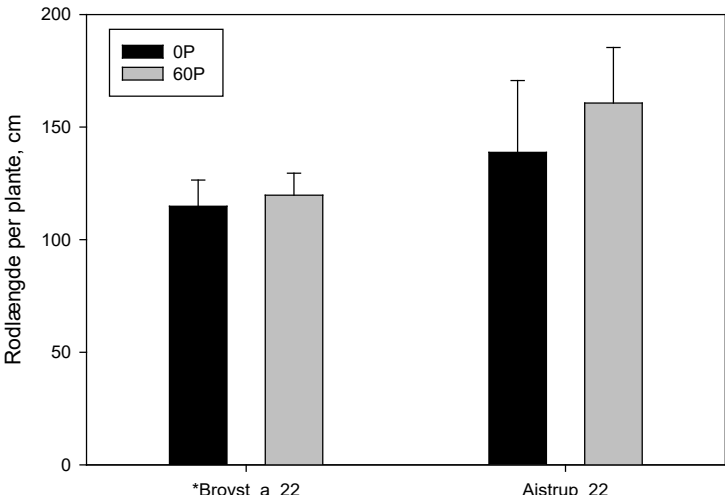
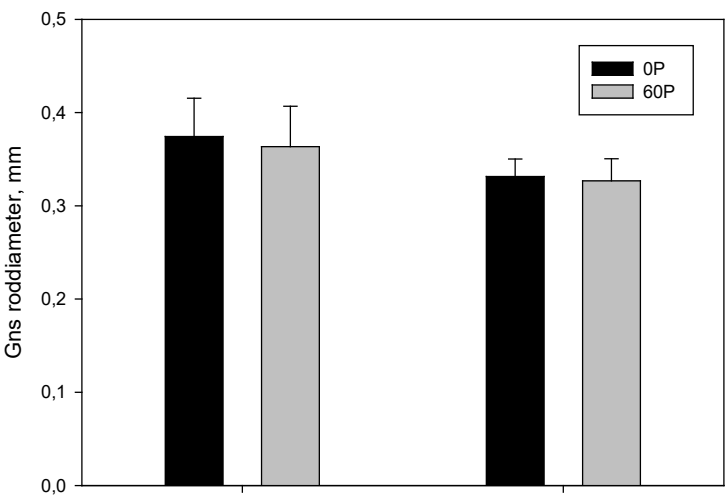
Figur 36. Udtagning af rodprøver vha. Shovelomic-metoden (venstre) og vask af rødder (venstre). Foto: Ingeborg Frøsig Pedersen

4.2.2 Resultater og diskussion

Tabel 6. Tørstofudbytte pr plante, rodlængde og roddiameter i den tidlige vækstfase (V2/3) i udvalgte forsøg i forsøgsserie 070532121 i behandlinger med (60 kg P/ha) og uden (0 kg P/ha) P-gødsning.

2021	Statistik															
 TS udbytte per plante, g <table><tr><th>Forsøg</th><th>0P (g)</th><th>60P (g)</th></tr><tr><td>*Tylstrup_21</td><td>~0,05</td><td>~0,06</td></tr><tr><td>*Brovst_21</td><td>~0,055</td><td>~0,06</td></tr><tr><td>*Jerslev_a_21</td><td>~0,05</td><td>~0,07*</td></tr><tr><td>Jerslev_b_21</td><td>~0,125</td><td>~0,145</td></tr></table>	Forsøg	0P (g)	60P (g)	*Tylstrup_21	~0,05	~0,06	*Brovst_21	~0,055	~0,06	*Jerslev_a_21	~0,05	~0,07*	Jerslev_b_21	~0,125	~0,145	Signifikant højere TS udbytte i V2/V3 i forsøg *Jerslev_a_21 i behandling med 60 kg P tilført (60 P) ift. ugødet behandling (0P). For de øvrige forsøg var der ikke forskel mellem behandlinger inden for hvert forsøg.
Forsøg	0P (g)	60P (g)														
*Tylstrup_21	~0,05	~0,06														
*Brovst_21	~0,055	~0,06														
Jerslev_a_21	~0,05	~0,07														
Jerslev_b_21	~0,125	~0,145														
 Rodlængde per plante, cm <table><tr><th>Forsøg</th><th>0P (cm)</th><th>60P (cm)</th></tr><tr><td>*Tylstrup_21</td><td>~105</td><td>~115</td></tr><tr><td>*Brovst_21</td><td>~120</td><td>~130</td></tr><tr><td>*Jerslev_a_21</td><td>~225</td><td>~270*</td></tr><tr><td>Jerslev_b_21</td><td>~230</td><td>~265</td></tr></table>	Forsøg	0P (cm)	60P (cm)	*Tylstrup_21	~105	~115	*Brovst_21	~120	~130	*Jerslev_a_21	~225	~270*	Jerslev_b_21	~230	~265	Signifikant større rodlængde i V2/V3 i forsøg *Jerslev_a_21 i behandling med 60 kg P tilført (60 P) ift. ugødet behandling (0P). For de øvrige forsøg var der ikke forskel mellem behandlinger inden for hvert forsøg.
Forsøg	0P (cm)	60P (cm)														
*Tylstrup_21	~105	~115														
*Brovst_21	~120	~130														
Jerslev_a_21	~225	~270														
Jerslev_b_21	~230	~265														
 Gns. roddiameter, mm <table><tr><th>Forsøg</th><th>0P (mm)</th><th>60P (mm)</th></tr><tr><td>*Tylstrup_21</td><td>~0,40</td><td>~0,39</td></tr><tr><td>*Brovst_21</td><td>~0,43</td><td>~0,41</td></tr><tr><td>*Jerslev_a_21</td><td>~0,35</td><td>~0,37</td></tr><tr><td>Jerslev_b_21</td><td>~0,40</td><td>~0,40</td></tr></table>	Forsøg	0P (mm)	60P (mm)	*Tylstrup_21	~0,40	~0,39	*Brovst_21	~0,43	~0,41	*Jerslev_a_21	~0,35	~0,37	Jerslev_b_21	~0,40	~0,40	Ikke signifikant forskelle i roddiameter mellem de to behandlinger inden for hvert forsøgssted.
Forsøg	0P (mm)	60P (mm)														
*Tylstrup_21	~0,40	~0,39														
*Brovst_21	~0,43	~0,41														
*Jerslev_a_21	~0,35	~0,37														
Jerslev_b_21	~0,40	~0,40														

Tabel 7. Tørstofudbytte pr plante, rodlængde og roddiameter i den tidlige vækstfase (V2/3) i udvalgte forsøg i forsøgsserie 070892222 i behandlinger med (60 kg P/ha) og uden (0 kg P/ha) P-gødskning.

2022	Statistik
 TS udbytte per plante, g *Brovst_a_22 Ajstrup_22	Ikke signifikant forskel i TS udbytte ved vækststadiet V2 mellem behandlinger, eller mellem de to steder
 Rodlængde per plante, cm *Brovst_a_22 Ajstrup_22	Ingen forskel mellem behandlinger inden for hvert sted. Signifikant forskel i rodlængde (t-test, $p < 0.05$) mellem de to steder på tværs af de to behandlinger *Brovst_a_22: 117 cm Ajstrup_a_22: 150 cm
 Gns roddiameter, mm *Brovst_a_22 Ajstrup_22	Ingen forskel mellem behandlinger inden for hvert sted. Signifikant forskel i roddiameter (t-test, $p < 0.05$) mellem de to steder på tværs af de to behandlinger *Brovst_a_22: 0,37 mm Ajstrup_22: 0,33 mm

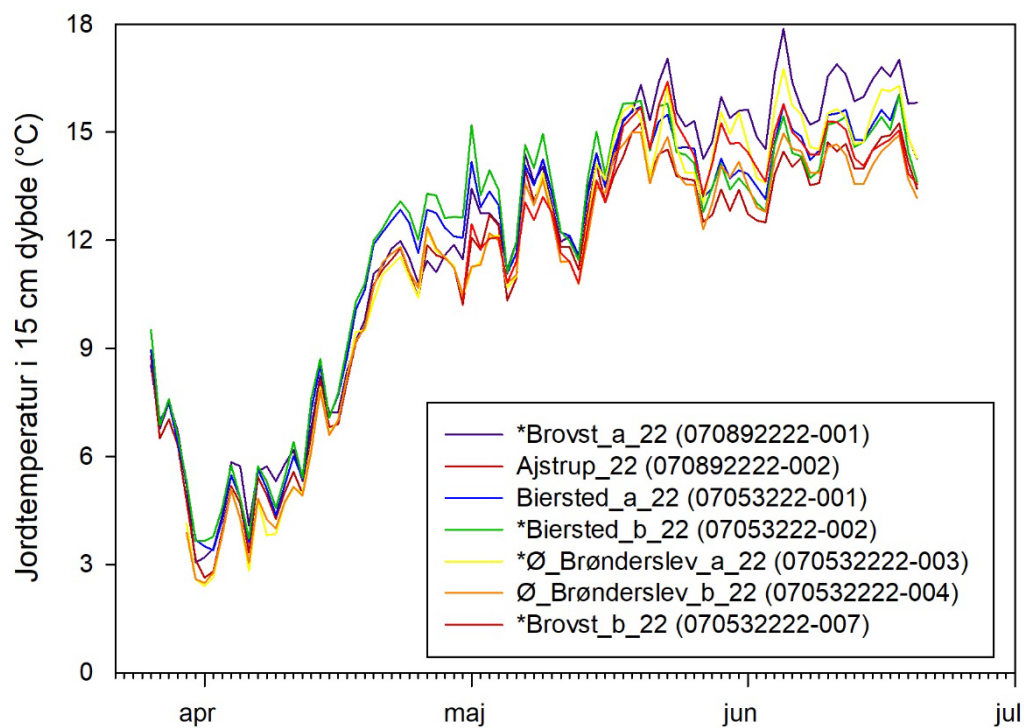
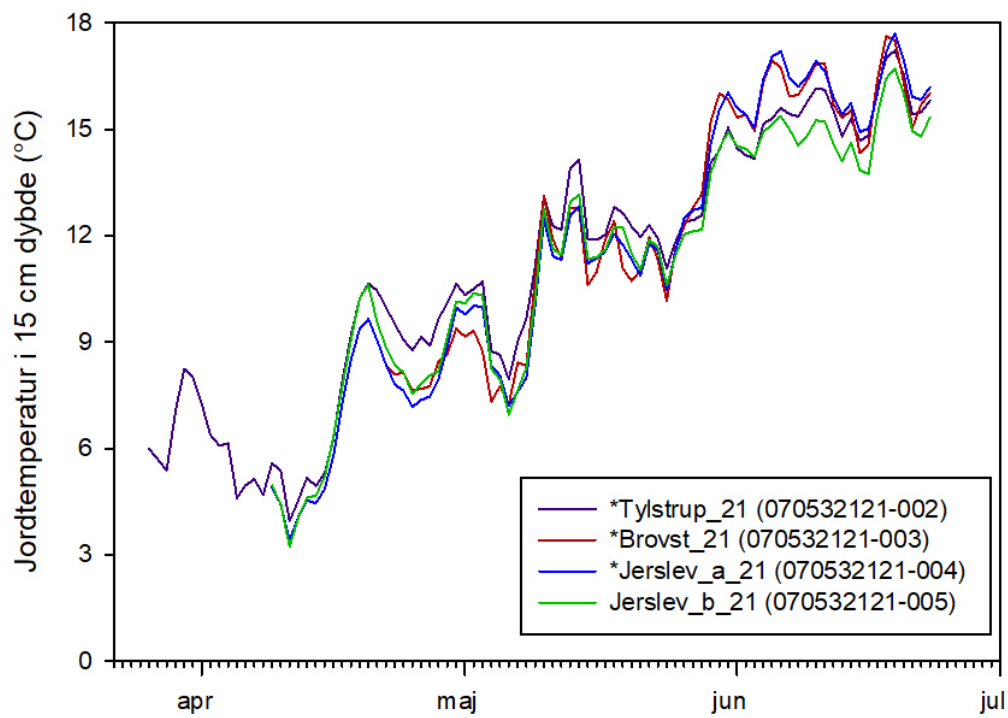
2021 data viste, at rodlængde var signifikant større i *Jerslev_a_21 i behandling med 60 kg P/ha ift. ugødet behandling (Tabel 6). For de øvrige forsøg var der ikke forskel mellem behandlinger. Qua samme sådato og samme måledato i *Jerslev_a_21 og Jerslev_b_21, giver det mening at sammenholde de to Jerslev-forsøg ("Par a"). De findes på hhv. Yoldiafladen og yngre moræne, og der var merudbytte for P i *Jerslev_a_21 på Yoldiafladen, men ikke i Jerslev_b_21 på den yngre moræne flade. Forsøget Jerslev_b_21 havde også større plantebiomasse og var foran udviklingsmæssigt ved udtagning (Tabel 5+6). Det falder sammen med den lidt højere jordtemperatur i den tidlige vækstperiode, medens den generelt højere penetreringsmodstand i Jerslev_b_21 på morænejorden ikke synes at have haft negativ betydning for den tidlige udvikling af afgrøden.

Total rodlængde var markant mindre i forsøgene *Tylstrup_21 og *Brovst_21 (Tabel 6), hvilket kan tilskrives et senere såtidspunkt, og derfor er det vanskeligt at sammenligne disse to forsøg med forsøgene i par a.

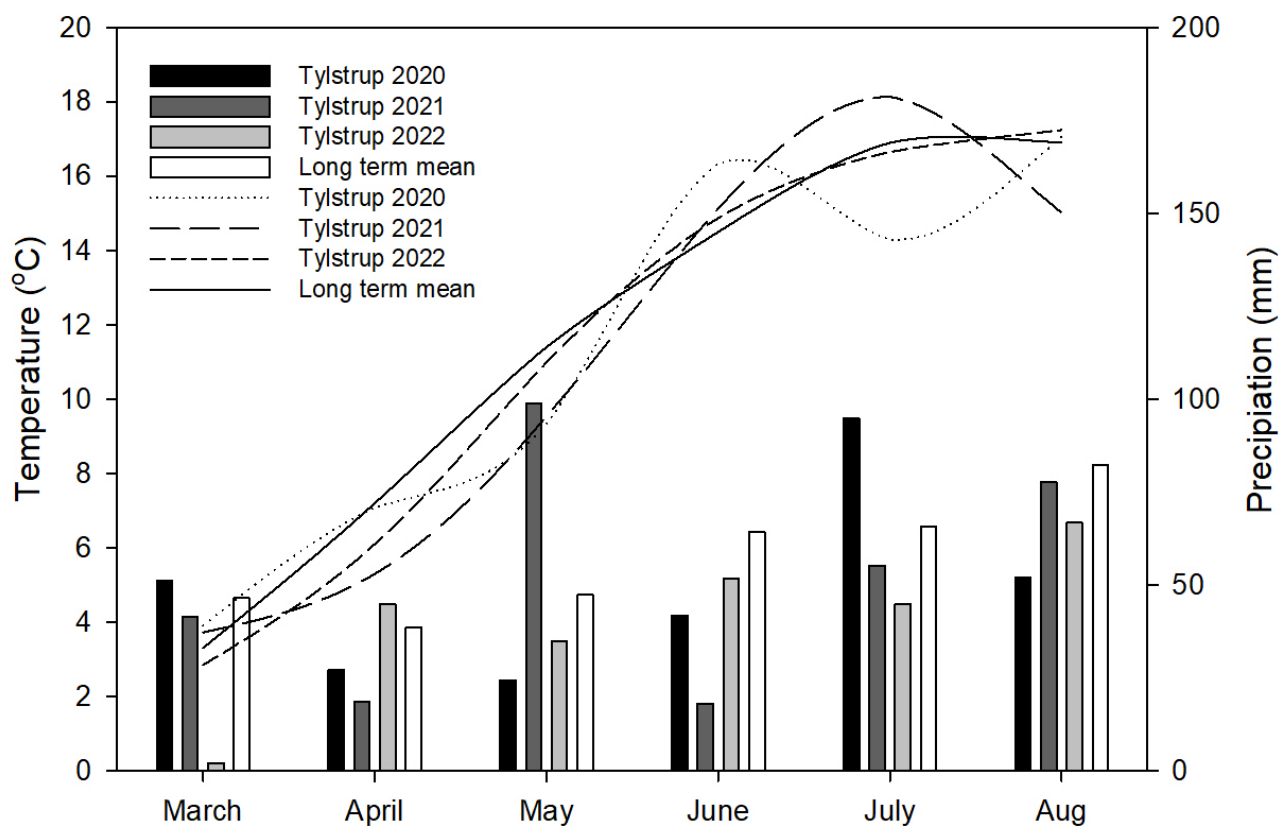
I 2022 blev der i forsøgene *Brovst_a_22 og Ajstrup_22 udtaget rodprøver. De to forsøg var dog ikke placeret tæt geografisk på hinanden, men qua samme sådato og udtagningsdato for rodprøver kan det alligevel give mening at sammenstille disse to forsøg. Rodlængde og roddiameter varierede ikke mellem de to behandlinger inden for hvert forsøgssted (Tabel 7). Rodlængde var signifikant større i Ajstrup_22 end i *Brovst_a_22 på tværs af de to behandlinger, og tilsvarende var roddiameteren mindre i Ajstrup_22 end i *Brovst_a_22 (Tabel 7). Dvs. rødderne var længere og tyndere i Ajstrup_22, og rødderne kunne potentielt have optaget P fra et større jordvolumen. *Brovst_a_22 havde et signifikant større høstudbytte efter tilførsel af P, mens høstudbyttet ikke steg efter P-tildeling i Ajstrup_22. Udbytteresponset i *Brovst_a_22 og Ajstrup_22 kunne derfor godt hænge sammen med rodvæksten, idet P-tildeling tæt på frøet kunne sikre bedre P-forsyning i forsøget *Brovst_a_22 med mindre rodvækst, mens forsøget Ajstrup_22 med bedre rodvækst kunne optage P fra det omkringliggende jordvolumen, og hermed var P-tildeling overflødig i dette forsøg.

4.3 Jordtemperatur og klimaforhold

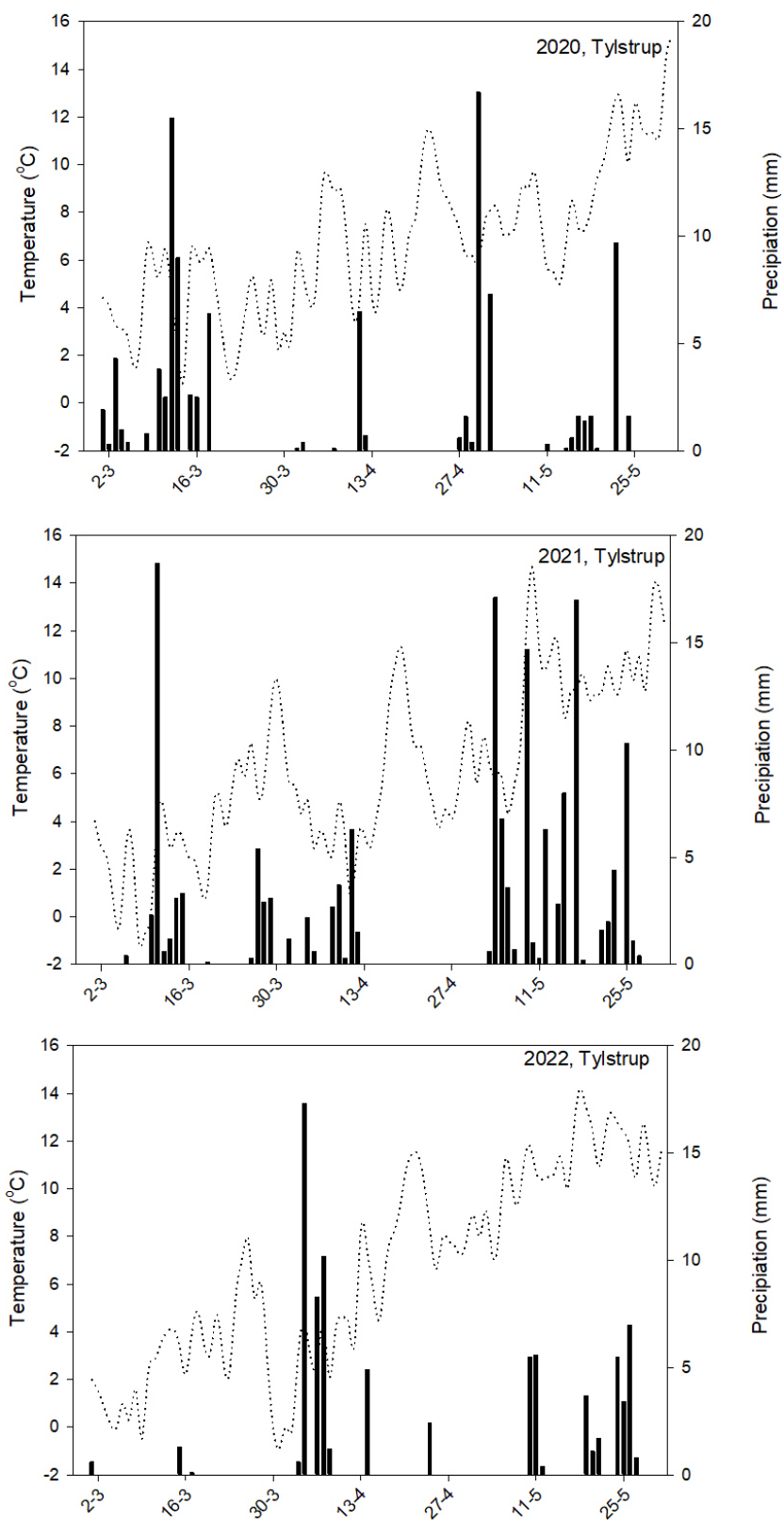
Temperaturloggerne blev installeret i 15 cm dybde i ugødede plots lige efter såning i 2021 og 2022 for at undersøge, om steder med udbytterespons efter P-tildeling generelt var koldere ift. steder uden udbytterespons. Jordtemperatur blev logget to gange i døgnet med 12 timers mellemrum, og gennemsnittet af målingerne for hvert døgn er angivet på Figur 37. Desuden er data for nedbør og temperatur opgjort fra vejrstationen ved Tylstrup i Georegion Nord for hvert af de tre år (Figur 38 og 39 for hhv. måneds- og dagsbasis), for at dokumentere vækstbetingelserne de tre forsøgsår og om forskelle i temperatur og nedbør kunne have betydning for omfanget af respons på P-gødsning mellem forsøgsårene.



Figur 37. Jordtemperatur målt i udvalgte forsøg i 2021 (øverst) og 2022 (nederst).



Figur 38. Gennemsnitstemperatur (angivet som kurver) for hver måned (målt i 2 m højde) og den kumulative nedbør (angivet som søjler) for hver måned (målt i 1,5 m højde) i 2020, 2021 og 2022, og klimanormalen (1991-2020) fra vejrstationen ved Tylstrup i Georegion Nord.



Figur 39. Oversigt over temperatur og nedbør på dagsniveau i marts, april og maj i 2020, 2021 og 2022. Søjler repræsenterer nedbør i 1,5 m højde, mens de stiplede kurver viser temperaturen i 2 m højde. Data er fra vejrstationen ved Tylstrup i Georegion Nord.

Tabel 8. Jordtemperatur i tre/fire delperioder for hhv. par a, b og c, hvor par havde samme sådato og var geografisk tæt placeret på hinanden.

Periode	Temperatur (gennemsnit)	std	Temperatur (gennemsnit)	std
Par a (sådato 6. april)	*Jerslev_a_21 (070532121-004)		Jerslev_b_21 (070532121-005)	
9/4 -8/5	7,39	0,11	7,69	0,14
9/5-24/5	11,53	0,06	11,53	0,09
25/5-23/6	15,59	0,25	14,49	0,18
Par b (sådato 25/3)	Biersted_a_22 (070532222-001)		*Biersted_b_22 (070532222-002)	
Periode				
26/3-30/3	7,01	0,25	7,17	0,13
31/3-12/4	4,65	0,16	4,83	0,07
13/4-1/5	11,05	0,31	11,36	0,11
2/5-20/6	14,20	0,17	14,17	0,08
Par c (sådato 29/3)	*Ø_Brønderslev_a_22 (070532222-003)		Ø_Brønderslev_b_22 (070532222-004)	
30/3-12/4	3,94	0,14	3,99	0,08
13/4-1/5	9,95	0,20	10,03	0,13
2/5-20/6	14,21	0,12	13,47	0,07

2020: Nedbør i marts var tæt på klimanormalen, mens nedbør i april var under klimanormalen, og nedbøren faldt over få dage. Temperaturen i marts var ret fluktuerende. I april omkring såning, var der opadgående temperaturer, men lave nedbørsmængder, der varede ved ind i maj måned.

2021: Nedbør i marts var tæt på klimanormalen dette år. Temperaturen steg markant i slutningen af marts og toppede den 30. marts, hvorefter der kom en noget koldere periode i første halvdel af april, hvor jordtemperaturen også falder markant igen. Temperaturen stiger igen i midten af april, og afløses igen af en koldere periode i slutningen af april. To forsøg blev tilsået i den varme periode i slutningen af marts, mens de resterende blev sået i april. I maj måned lå nedbørsmængden markant over klimanormalen, og temperaturen steg, hvilken kunne understøtte en god tidlig vækst i denne periode.

2022: Dette år havde en kold periode i starten af april efter en noget lunere periode i slutningen af marts. Fra midten af april steg temperaturen igen. Nedbørsmængden i Tylstrup i marts var langt under klimanormalen. I april var nedbørsmængden tæt på klimanormalen, men karakteriseret af meget nedbør i starten af april. 9 ud af 12 forsøg i 2022 blev sået i slutningen af marts. I disse forsøg var der dermed både et koldt og tørt klima for de helt unge spirer. De resterende 3 forsøg blev sået slut april, hvor temperaturen igen var steget.

Trods meget forskellige nedbørsmængder og temperaturforhold i foråret mellem årene, blev der alligevel observeret udbytterespons hvert år. Dette er især tydeligt for de forsøg, der blev udført på samme mark over flere år (*Brovst_a_20 + *Brost_a_22 og *Jerslev_a_20 og *Jerslev_a_21). For disse forsøgspaar var merudbyttet efter P-tildeling meget ens for begge år trods meget forskelligt klima i de forskellige år. Det indikerer, at forskelle i nedbør og temperatur mellem årene ikke udvandede effekten af P-tilførsel.

4.4 Sammenstilling i par relateret til de detaljerede målinger

- Par a): *Jerslev_a_21 havde en signifikant udbytterespons på trods af et moderat højt P-tal på 3,4, mens udbyttet i Jerslev_b_21 med et P-tal på 6,0 ikke steg efter P-tildeling. *Jerslev_a_21 var kendetegnet ved at have et højt indhold af organisk kulstof (Fig. 3), hvilket også kan forklare den lave volumenvægt og højt indhold af plantetilgængeligt vand. Det lavere indhold af plantetilgængeligt vand i Jerslev_b_21, der ellers kunne mindske tilgængeligheden af P i jorden nær rødder (Gahoonia et al., 1994), synes ikke at være en dominerende faktor for plantens mulighed for at udnytte jordens P-puljer. Jordtemperaturen i den første delperiode (9/4-8/5 2021) var kun en anelse koldere i *Jerslev_a_21 end i Jerslev_b_21 (forskel på 0,3 grader), mens jordtemperaturen i delperioden fra 9/5-24/5 2021 var ens i de to forsøg. I den sidste delperiode (25/5-23/6 2021) var jordtemperaturen ca. 1 grad varmere i *Jerslev_a_21 (Tabel 8). Det kan ikke afvises, at den lidt lavere jordtemperatur i *Jerslev_a_21 i den første delperiode kunne mindske den helt tidlige rodvækst, men evt. forskelle mellem forsøgene i par a) var allerede udlignet ved udtagning af rødder den 18/5 2021 (Tabel 6), og hermed synes jordtemperaturen ikke at kunne forklare forskelle i udbytteresponset mellem de to forsøg. Jerslev_b_21 havde større tørstofudbytte i den tidlige vækst og var også foran udviklingsmæssigt ved udtagning af rødder. Der var dog ikke stor forskel i total rodlængde mellem de to forsøg (Tabel 6). Den generelt højere penetreringsmodstand i Jerslev_b_21 på morænejorden ift. *Jerslev_a_21 (Fig. 35) synes ikke at have haft negativ betydning for den tidlige udvikling af afgrøden. *Jerslev_a_21 havde et indhold af P-DGT, PCaCl₂, Pvand og PCaCl₂/P-tal ratio under de angivne grænseværdier, hvor der kan forventes udbytterespons, og hermed forudsiger disse P-tests, at der vil være en udbytterespons i forsøget. Tilsvarende har Jerslev_b_21 et indhold af P-DGT, PCaCl₂, Pvand og PCaCl₂/P-tal ratio over de kritiske niveauer. Derfor er den manglende udbytterespons forventelig på basis af disse P-tests. Indholdet af Alox var også højere i *Jerslev_a_21 ift. Jerslev_b_21 (Fig. 8, øverst). Den højere bindingskapacitet kunne reducere planternes mulighed for at optage tilgængeligt P fra jordvolumen på kritiske tidspunkter under den tidlige vækst, og hermed forklare hvorfor supplerende gødskning med P kunne øge udbytteresponset i *Jerslev_a_21.
- Par b): Biersted_a_22 og *Biersted_b_22 havde et P-tal på hhv. 11 og 2,8 og repræsenterer jorder med hhv. meget høj og moderat P-status. Det signifikante merudbytte i *Biersted_b_22 var lavt (+2,8 hkg/ha), og det relative udbytte på 96% i dette forsøg var stort set identisk med det relative udbytte på 97% i Biersted_a_22. Biersted_a_22 var beliggende op en Yoldia-aflejring, mens *Biersted_b_22 var beliggende på en Litorina-aflejring. De to forsøg i par b) adskilte sig ikke fra hinanden mht. mængden af plantetilgængeligt vand og volumenvægt. Biersted_a_22 havde generelt en anelse lavere jordtemperatur ift. *Biersted_b_22, men den lidt lavere jordtemperatur i Biersted_a_22 synes ikke at have haft en betydende effekt for afgrødens evne til at optage P fra jordvolumen i den tidlige vækst. Begge forsøg ligger over de kritiske grænseværdier for P-DGT, Pvand og PCaCl₂, hvor der ikke forventes udbytterespons efter P-tildeling. Biersted_a_22 har en PCaCl₂/P-tal ratio på 0,15, hvor et udbytterespons ellers ville være forventet. Grunden til at Biersted_a_22 har en lav PCaCl₂/P-tal ratio og hermed falder forkert ud ift. forventet udbytterespons kunne tilskrives overestimering af P-tallet pga. det lave pH (diskuteret side 41).
- Par c): *Ø_Brønderslev_a_22 og Ø_Brønderslev_b_22 havde et P-tal på hhv. 6,6 og 5,1. Hermed ville der ifølge P-tals analysen ikke være yderligere behov for P-tildeling. Alligevel var der signifikant merudbytte i forsøget *Ø_Brønderslev_a_22. Ø_Brønderslev_b_22 havde det største indhold af plantetilgængeligt vand, mens volumenvægten var ens for de to forsøg i par c). Jordtemperaturen i

de to første delperioder var ret ens i begge forsøg, mens jordtemperaturen var højest i *Ø_Brønderslev_a_22 i den sidste delperiode (Tabel 8). Hermed synes de detaljerede målinger ikke at kunne forklare udbytteresponsen i *Ø_Brønderslev_a_22. For forsøget Ø_Brønderslev_b_22 havde P-DGT, PCaCl_2 , Pvand og PCaCl_2/P -tal ratio alle værdier over de kritiske niveauer, hvor der ikke forventes udbytterespons, hvilket også stemmer overens med det reelle udbytte. For *Ø_Brønderslev_a_22 formåede testene P-DGT og Pvand ikke at forudsige udbytterespons, mens værdierne for PCaCl_2 (0,9 mg P/kg) og PCaCl_2/P -tal-ratio (0,14) forudså korrekt, at et udbytterespons ville finde sted på basis af de angivne grænseværdier. *Ø_Brønderslev_a_22 er det eneste forsøg udført på randmoræne og havde et langt højere indhold af Alox og til dels også Feox ift. Ø_Brønderslev_b_22. Den højere bindingskapacitet i *Ø_Brønderslev_a_22 kunne gøre P akkumuleret fra tidligere P-tilførsler mindre tilgængeligt, og kunne hermed forklare, hvorfor P-tildeling gav signifikant udbytterespons.

I ni ud af 14 forsøg med et signifikant udbytterespons efter P-tildeling, blev der foretaget detaljerede studier (tre forsøg i 2020, tre forsøg i 2021 og tre forsøg i 2022). Alle supplerende målinger blev dog ikke udført i alle tre år (Tabel 4). Fx blev de detaljerede målinger af rødder kun udført i seks forsøg, hvoraf fire med signifikans effekt af P-tildeling. Mulighederne for at finde svar ved disse supplerende studier vanskeliggøres derfor af, at det ikke har været muligt inden for projektets rammer at udføre disse detaljerede målinger i alle forsøg. Derudover skulle valg af steder til detaljerede målinger træffes før vi kendte udbytteresponsen. Dermed er det vanskeligt at drage generelle konklusioner vedr. de detaljerede studier, men de kan hjælpe med til at understøtte tolkningen af sammenhænge mellem jordkemiske målinger og udbytterespons.

5. Bladprøver: Tidslig udvikling og indsamlingsmetode (opgave 3)

Formålet med opgave 3 jf. kontrakt var at undersøge, hvordan P-koncentrationen i bladene i den tidlige vækst var relateret til P-gødsning og de endelige høstudbytter, samt undersøge den tidslige udvikling i bladernes P-koncentration under den tidlige vækst. Desuden blev P-koncentrationen i det yngste fuldtudviklede blad sammenlignet med P-koncentrationen i hele planten i forsøgsserie 070892222 med det formål at undersøge, om P-koncentrationen i blad repræsenterede P-koncentrationen i hele planten.

5.1 Metode

I den tidlige vækst (st. 11-21) blev der indsamlet bladprøver i udvalgte forsøg (Tabel 9). Planternes yngste fuldtudviklede blad blev indsamlet, og der blev indsamlet minimum 5 g materiale (friskvægt), svarende til ca. 40 blade blev pr. parcel, og 5-10 g materiale (friskvægt) for de enkeltforsøg, hvor blade blev indsamlet på ledniveau. I forsøgsserie 070892222 blev P-koncentrationen i det overjordiske plantemateriale (herefter benævnt "hele planten") også bestemt på planter udtaget vha. "shovelomic-metoden" (afsnit 4.2).

Tabel 9. Indsamling af planteprøver i forsøgene i år 2020-22.

Forsøgsserie	Enkeltforsøg	Unik kode	led	Blade	Hele planten	Vækststadie/dato	led- eller parcelniveau
07053-2020	001	Hjørring_20	1	x		V2	led
	002	*Tylstrup_20	1	x		V2	led
	003	*Brovst_a_20	1	x		V2	led
	004	*Jerslev_a_20	1	x		V2	led
	006	Klokkerholm_20	1	x		V2	led
	007	Arentsminde_20	1	x		V2	led
07053-2121	001	*Ajstrup_21	1+5	x		V2	Parcel
	002	*Tylstrup_21	1+5	x		V2	Parcel
	003	*Brovst_21	1+5	x		V2	Parcel
	004	*Jerslev_a_21	1+5	x		V2	Parcel
	005	Jerslev_b_21	1+5	x		V2	Parcel
	006	*Arentsminde_21	1+5	x		V2	Parcel
	007	Vrensted_21	1+5	x		V2	Parcel
07054-2121	001	Borris_21	1	x		V2	led
	002	Mou_a_21	1	x		V2	led
	003	Mou_b_21	1	x		V2	led
	004	Klim_21	1	x		V2	led
	005	Harken_21	1	x		V2	led
	006	Roager_21	1	x		V2	led
	007	Toftlund_21	1	x		V2	led
07053-2222	001	Biersted_a_22	1+5	x		V2	Parcel
	002	*Biersted_b_22	1+5	x		V2	Parcel
	003	*Ø_Brønderslev_a_22	1+5	x		V2	Parcel
	004	Ø_Brønderslev_b_22	1+5	x		V2	Parcel
	005	Brønderslev_22	1+5	x		V2	Parcel
	006	*Hjørring_Ø_22	1+5	x		V2	Parcel
	007	*Brovst_b_22	1+5	x		V2	Parcel
	008	Hjørring_S_22	1+5	x		V2	Parcel
	010	Toftlund_22	1+5	x		V2	Parcel
	011	Roager_22	1+5	x		V2	Parcel
07089-2222	001	*Brovst_a_22	1-5	x		V2, 5/5	Parcel
			1	x		9/5	Parcel
			1	x		16/5	Parcel
			1	x		23/5	Parcel
			1+5		x	V2, 4/5	Parcel
	002	Ajstrup_22	1-5	x		V2, 5/5	Parcel
			1	x		9/5	Parcel
			1	x		16/5	Parcel
			1	x		23/5	Parcel
			1+5		x	V2, 4/5	Parcel

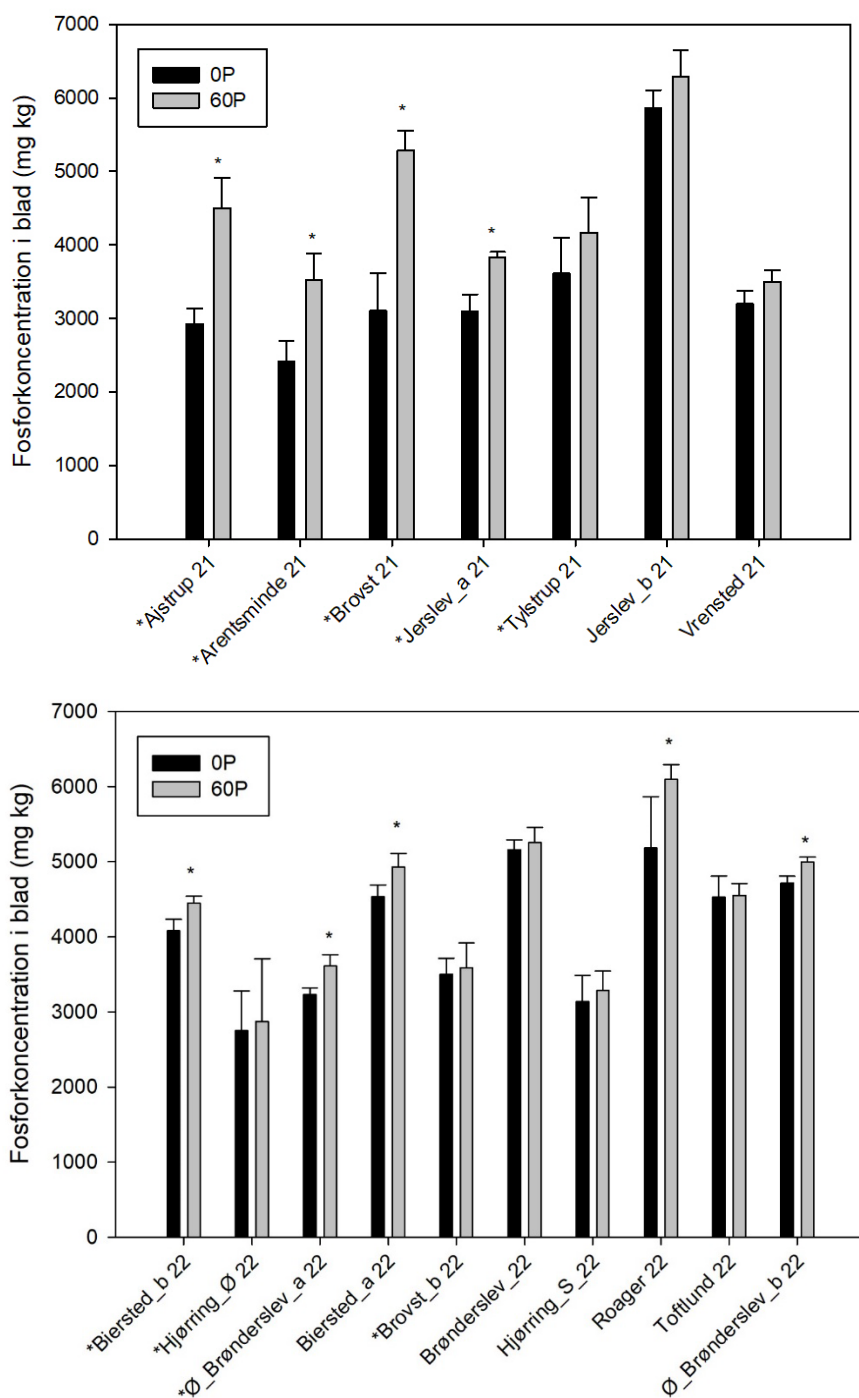
Bladprøverne og hele planter blev tørret ved 60 °C grader, formalet på kuglemølle, og derefter blev P-koncentration bestemt vha. inductively coupled plasma (ICP) jf. beskrivelse i Liu et al. (2013).

Fosforkoncentrationer i blade blev relateret til det relative udbytte (ligning 1).

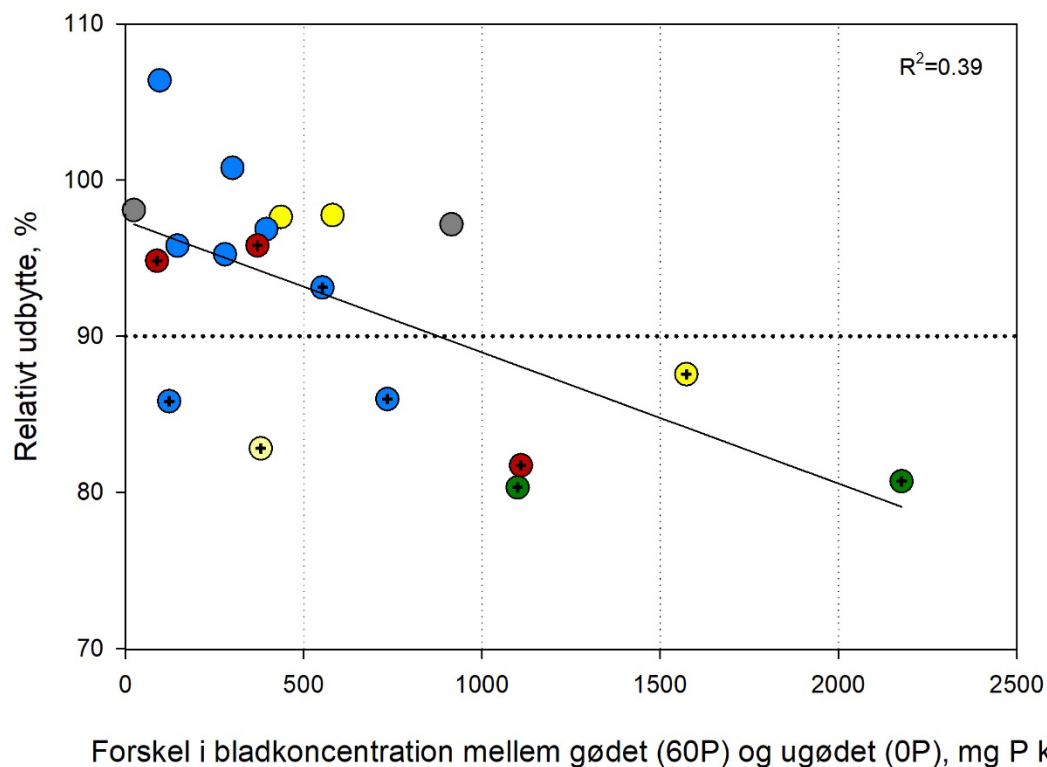
5.2 Resultater og diskussion

5.2.1 Fosforkoncentrationer i blad i behandlinger med og uden fosfor

I 2021 og 2022 blev der målt P-koncentrationer i blade med og uden tilførsel af P-gødning med det formål at undersøge, om P-tildelingen påvirkede P-koncentrationen i blade i den tidlige vækst.

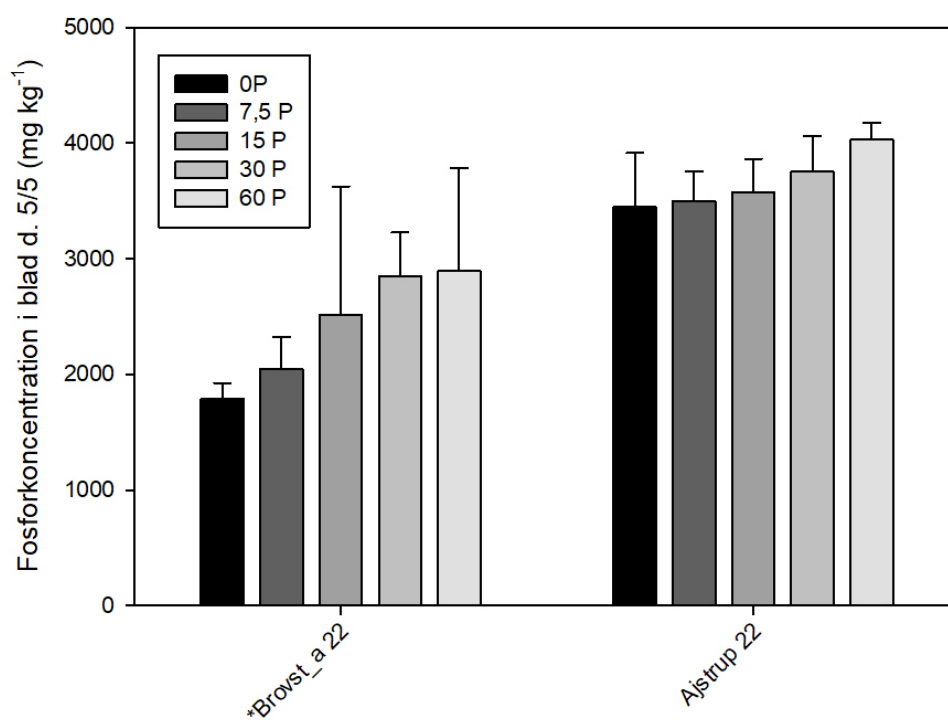


Figur 40. Fosforkoncentration i blad i 070532121-serien (øverst) og 070532222-serien (nederst). * indikerer signifikante forskelle i fosforkoncentrationer i behandling 0P og 60P for hvert forsøgssted (t-test med antagelse om ens varians, signifikansniveau $p=0,05$).



Figur 41. Forskel i fosforkoncentrationer i blad mellem gødgede (60 kg P/ha) og ugødgede plots (0 kgP/ha) relateret til det relative udbytte. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødskning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

I ni forsøg var P-koncentrationen i bladene signifikant højere efter tilførsel af P i ft. ugødgede plots (0P) i forsøgsserie 070532121 og 070532222 (Fig. 40). Generelt var der større forskel i P-koncentrationen mellem gødgede og ugødgede plots i forsøgsserie 070532121 end i forsøgsserie 070532222. Figur 41 viser også, at en større forskel i P-koncentration i blade mellem ugødgede (0 kg P/ha) og gødgede (60 kg P/ha) plots tenderede til at give et lavere relativt udbytte ved høst (dvs. stor effekt af P-tildeling). Hermed indikerer foreliggende data, at effekter af P-tildeling allerede kan ses på bladkoncentrationer i gødgede plots i den tidlige vækstfase, og at denne effekt kan være ved til endelig høst. I visse tilfælde (fx Roager_22) var der en signifikant stigning i P-koncentration efter P-gødskning i bladene under den tidlige vækst, men hvor denne stigning i P-koncentration ikke blev afspejlet i signifikante merudbytter ved høst. Dette kunne dels tilskrives, at andre faktorer senere i vækstsæsonen blev styrende for det endelige høstudbytte, og/eller at stigningen i P-koncentration i blad kunne være luksusoptagelse af P, hvor det tilførte P ikke øger udbyttet, men kun P-koncentrationen i planten.

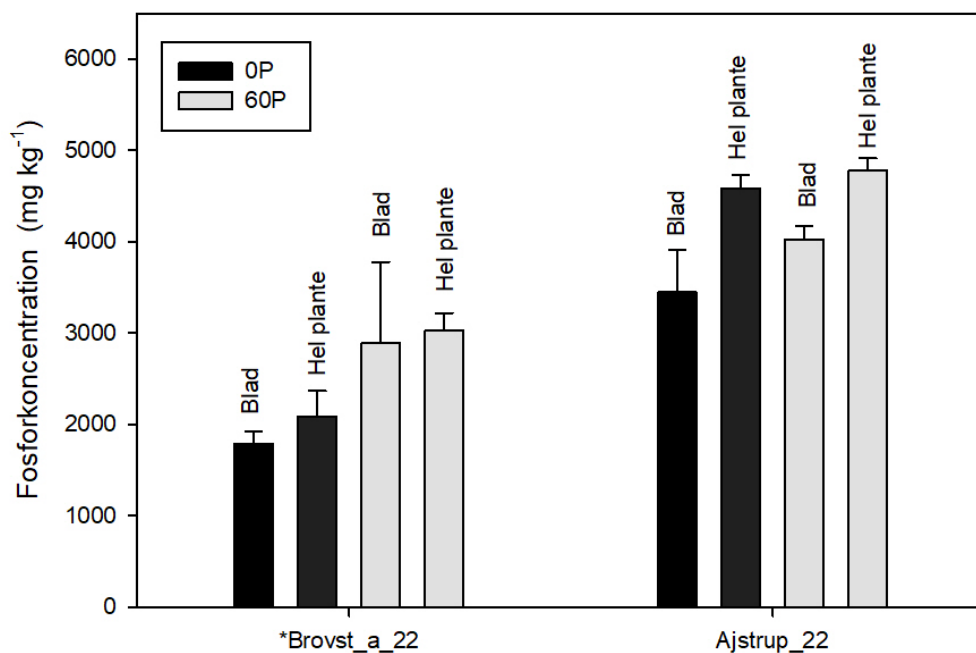


Figur 42. Fosforkoncentration i blade som funktion af P tilførsel (0; 7,5; 15; 30 og 60 kg P/ha) i forsøg 0708952222-001 (*Brovst_a_22) og 002 (Ajstrup_22). Bladprøver udtaget 5/5 2022.

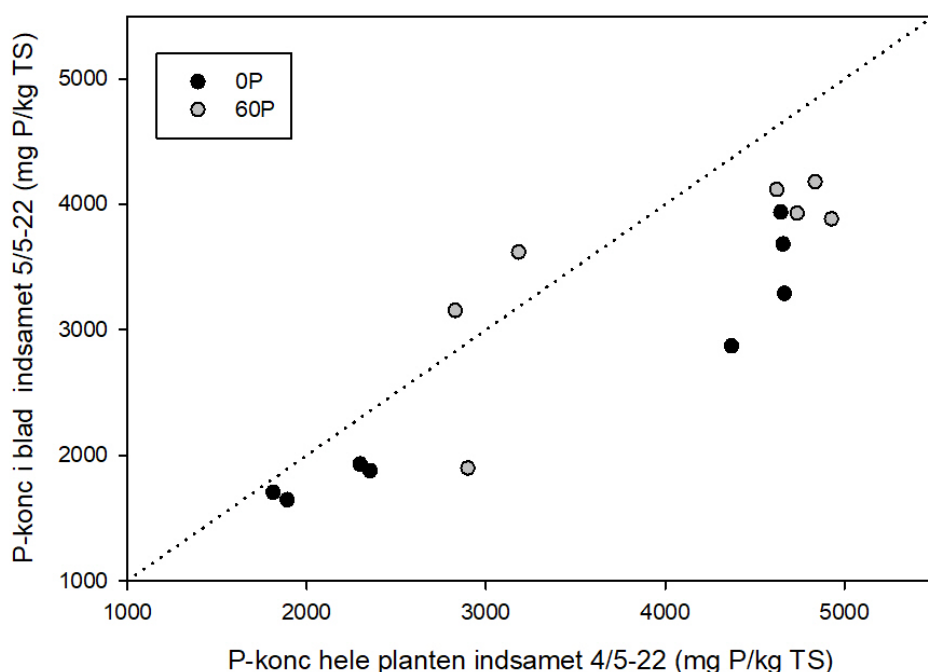
I forsøgsserie 070892222 var der også effekt at P-tilførsel på P-koncentrationen i bladene, og dette var særligt tydeligt i *Brovst-a_22 forsøget, der havde en betydeligt lavere P-koncentration i de ugødede plots sammenlignet med Ajstrup_22 (Fig. 42).

5.2.2 Sammenligning af fosforkoncentration i det yngste fuldtudviklede blad og i hele planten

I 2022 blev P-koncentrationen i V2 i hele planten også bestemt med det formål at undersøge, om der var forskel i P-koncentrationen i det yngste fuldtudviklede blad og hele planten.



Figur 43. Fosforkoncentration i blad og hele planten i led 1 og led 5 i forsøgsserie 070892222 udtaget 4/5 og 5/5 2022.



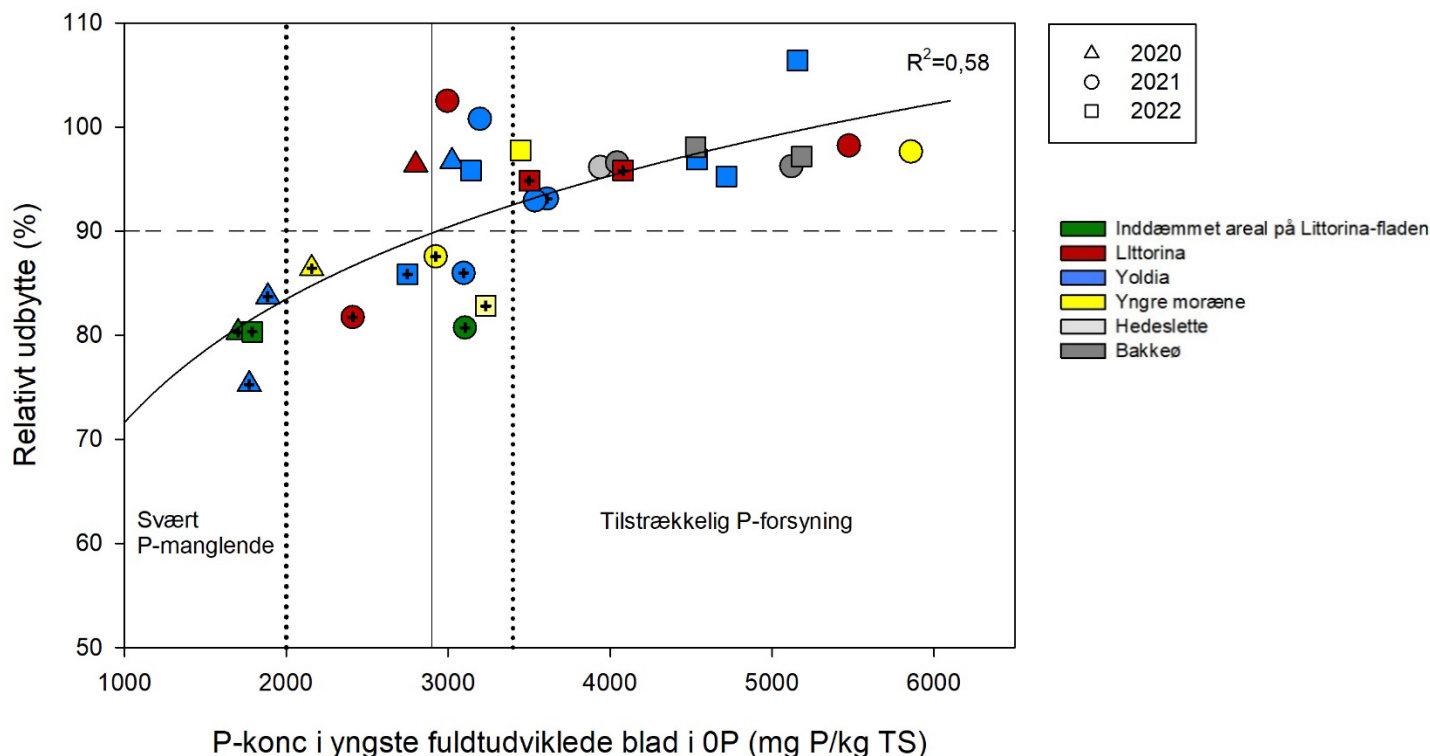
Figur 44. Sammenhæng mellem fosforkoncentration i blad og hele planten i forsøgsserie 070892222. Data er vist på parcelniveau. Den stiplede linje repræsenterer y=x.

Generelt var P-koncentrationen højere i hele planten end i det yngste fuldtudviklede blad ved vækststadiet 2 (Fig. 43+44). Fosforkoncentrationen i bladet i V2 repræsenterer dermed ikke P-koncentrationen i hele planten. Det kan hænge sammen med, at plantens P-forsyning på disse tidlige vækststadier domineres af

P-optag fra jorden, og først i senere vækststadier omfordes P inden i planten fra de ældre til de yngre plantedele (Veneklaas et al., 2012).

Det er dog også vigtigt at pointere, at P-koncentrationen i blad og skud ikke blev målt på samme plante, men blade blev udtaget den 5/5 og hele planter den 4/5. Derfor kan det ikke udelukkes at forskellene i P-koncentrationer mellem blad og skud også t kan skyldes målinger på forskellige planter.

5.2.3 Sammenhæng mellem fosforkoncentration i blad og det relative udbytte



Figur 45. Sammenhæng mellem fosforkoncentrationen i blad i led 1 (0 kg P) og det relative merudbytte. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$). Grænseværdier for kritiske og tilstrækkelige P-koncentrationer i plantemateriale er angivet ud fra grænseværdier nævnt i Haneklaus og Schnug (2016). Fosforkoncentration (2900 mg P/kg TS) for at opnå 90% af relativt udbytte er også angivet.

For de tre års forsøg var der god sammenhæng mellem P-koncentrationen i blad og det relative merudbytte ($R^2=0,58$, Fig. 45). Bladprøverne blev håndteret lidt forskellige mht. tørring og eftertørring mellem årene, idet bladprøver kun blev eftertørret i 2022, og ikke i 2020 og 2021 inden ICP-analysen. Alligevel var der god sammenhæng på tværs af årene mellem P-koncentrationen og det relative udbytte. På basis af den ikke-lineære sammenhæng mellem P-koncentrationen og det relative udbytte, blev P-koncentrationen for at opnå 90% af det relative udbytte estimeret til at være 2900 mg P/kg TS (Fig. 45).

Den klare sammenhæng mellem tidlige P-koncentrationer i blad og relative høstudbytter bekræfter også den generelle antagelse om, at det er særligt P-forsyning i de tidligere vækststadier, der er afgørende for udbyttet (e.g. Grant et al., 2001). En god start i form af tilstrækkelig P-forsyning i den tidlige vækst har dermed helt afgørende betydning for om udbyttepotentialet kan opnås.

I 2020 var der fire forsøg med udbytterespons, og i disse forsøg var P-koncentrationen i bladene under 2200 mg/kg TS. I 2021 var der fem forsøg med udbytterespons, og i disse forsøg varierede P-koncentrationen i bladene fra 2400 til 3600 mg/kg TS. I 2022 havde fire forsøg udbytterespons efter P-tildeling, og i disse forsøg varierede P-koncentrationen fra 1800 mg/kg TS (*Brovst_a_22) til 4100 mg/kg TS (*Biersted_b_22).

Haneklaus og Schnug (2016) rapporterer, at P-koncentrationer i byg under 2000 mg/kg TS indikerer tydelig P-mangel i afgrøden, mens P-koncentration over 3400 mg/kg TS indikerer tilstrækkelig P-forsyning. Disse

foreslåede grænseværdier er også angivet på Fig. 45. Andre studier rapporterer, at den kritiske grænseværdi for byg ligger et sted mellem 2000-3000 mg/kg TS (se referencer i Mundus et al., 2017). Fig. 45 viser, alle fire forsøg med en P-koncentration i blad under 2000 mg/kg TS havde et relativt udbytte på under 85%, og var hermed tydeligt P-manglende, mens at alle forsøg med en P-koncentration i blad over 3400 mg/kg TS havde et relativt udbytte på mere end 90%.

For P-koncentrationer i blad mellem de foreslåede grænseværdier på 2000 og 3400 mg/kg TS jf. Haneklaus og Schnug (2016), var der både forsøg med og uden udbytterespons efter P-tildeling. Sammenhængen mellem relativt udbytte og P-koncentration i blad i denne opgørelse viser, at P-koncentrationer i blad i den tidlige vækst skal være 2900 mg P/kg TS for at opnå 90% af det relative udbytte. Otte forsøg havde en P-koncentration under 2900 mg P/kg TS, og syv af disse havde et relativt udbytte på 90% eller mindre.

Fire forsøg med udbytterespons (relativt udbytte <90%) havde dog en P-koncentration i blad mellem 2900 og 3300 mg P/kg TS, og disse forsøg falder dermed uden for den foreslåede grænseværdi på 2900 mg P/kg TS. Disse fire forsøg med udbytterespons er også forskelligartede mht. landskabstype, bindingskapacitet, mætningsgrad og jord P-tests

Trods den gode forklaringsgrad mellem P-koncentration i blad og det relative udbytte, viser ovenstående gennemgang også, at det er vanskeligt på basis af data i nærværende rapport at fastslå en entydig grænseværdi for P-koncentrationen i blad, idet fire responderende forsøg falder uden for den foreslåede grænseværdi. Hvorfor planter i visse forsøg med udbytterespons har en P-koncentration over 2900 mg P/kg TS i den tidlige vækst kræver yderligere undersøgelser.

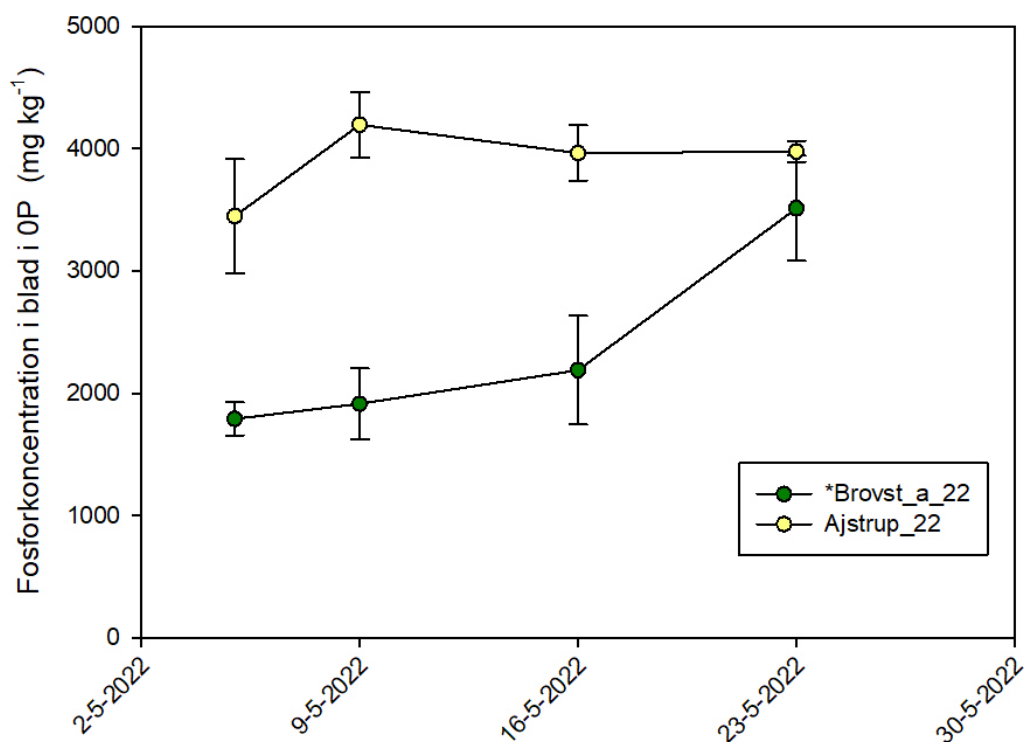
5.2.4 Tidslig udvikling i fosforkoncentrationer i blad

I *Brovst_a_22 og Ajstrup_22 i forsøgsserie 070892222 blev P-koncentrationen i led OP målt ved fire forskellige tider for at vurdere den tidlige udvikling i P-koncentrationen, og om der er særlige tidspunkter, der relaterer sig bedst til det relative udbytte.

Sådato for forsøg *Brovst_a_22 og Ajstrup_22 var hhv. 25. og 24. marts. På figur 47 er angivet dage efter såning, der er beregnet ud fra sådatoen den 24. marts.

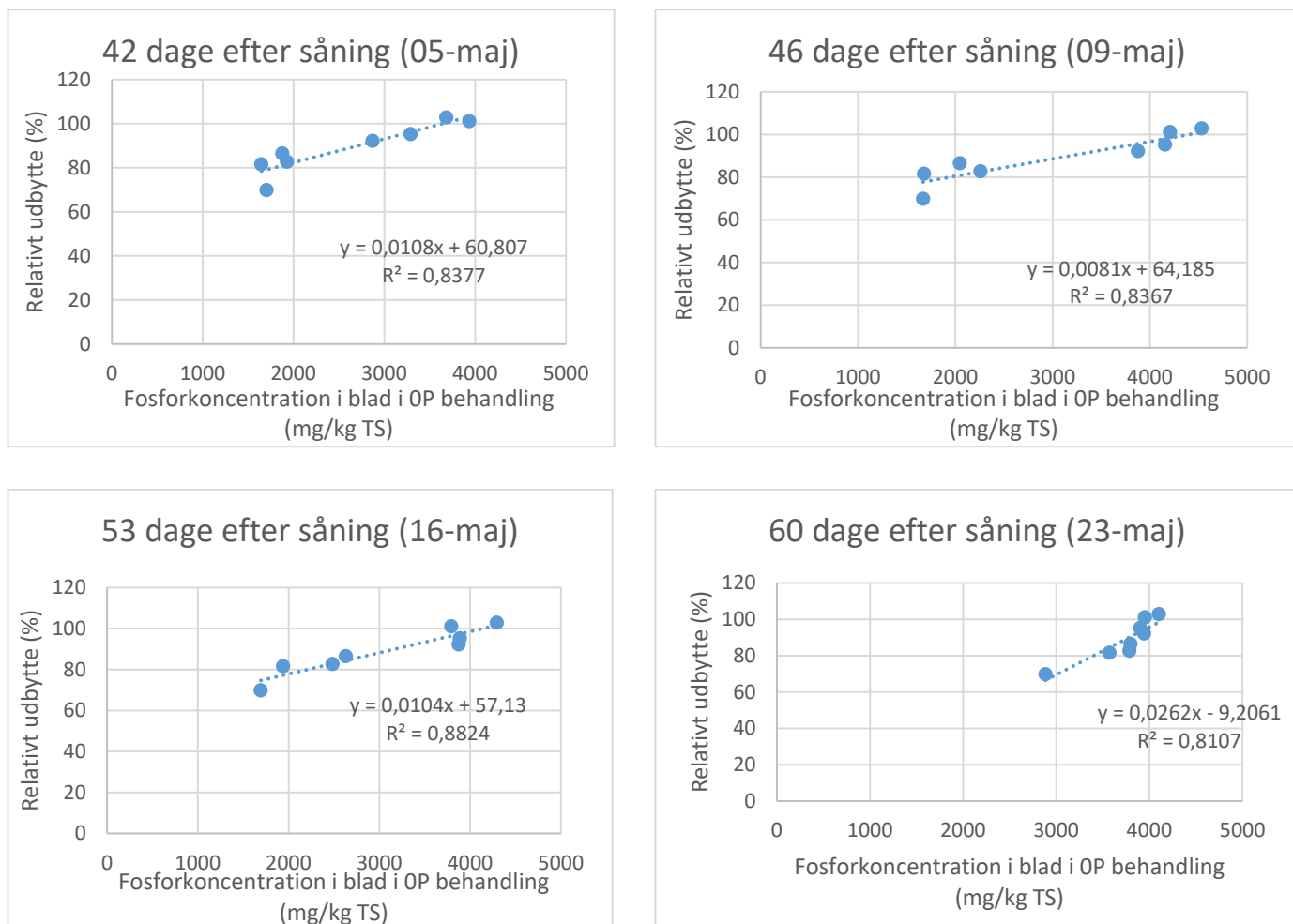
Tabel 10. Oversigt over vækststadiet og antal dage efter såning. Data for vækststadiet er udleveret af SEGES.

	5/5	9/5	16/5	23/5
Vækststadiet (BBCH skala)	12-13	12-13	15-21	24
Dage efter såning (beregnet fra 24. marts)	42	46	53	60



Figur 46. Tidslig udvikling i fosforkoncentrationer i blad i led 1 (0 kg P) i forsøgsserie 070892222 (001+002) fra 5/5 til 23/5 i plots uden tilførsel af fosfor.

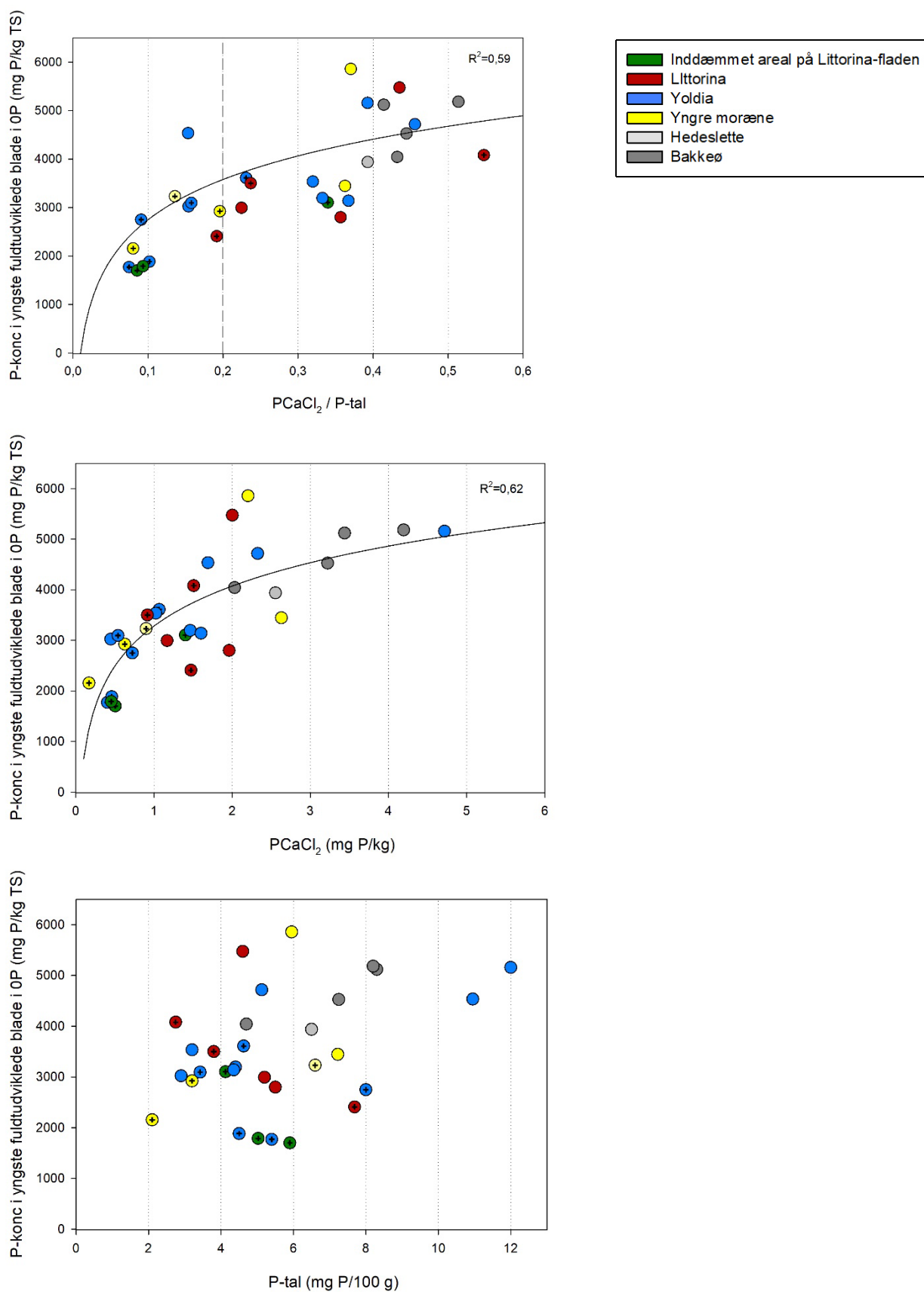
På figur 46 ses, at P-koncentrationen i bladene var meget lav i forsøg *Brovst_a_22 frem til og med 16/5 (53 dage efter såning). Herefter sker en kraftlig stigning i P-koncentrationen til over det kritiske niveau på 2000 mg P/Kg TS. I Ajstrup_22 var P-koncentrationen i bladene på et højere niveau ved alle udtagnings tidspunkterne ift. *Brovst_a_22, og P-koncentrationen i bladene steg kun en anelse fra 5/5 (42 dage efter såning) til 9/5 (46 dage efter såning), hvorefter P-koncentrationen var nogenlunde konstant.



Figur 47. Fosforkoncentration i bladene for de fire forskellige tider relaterer til det relative udbytte målt i forsøgene 070892222-001 og 070892222-002. Data er vist på parcelniveau.

Data for forsøgsserie 070892222 viser, at der generelt var en god sammenhæng mellem det relative udbytte og P-koncentrationen i blad ved alle fire udtagnings tidspunkter (Fig. 47). For udtagningen den 23. maj var sammenhængen dog særligt styret af et enkelt punkt med en P-koncentration i blad under 3000 mg P/kg TS. Derudover var spændet i P-koncentrationen i blade meget mindre ved dette indsamlingstidspunkt, hvilket understøtter, at det sene udtagnings tidspunkt ikke er optimalt for vurdering af bladenes P-koncentration. Datagrundlaget er dog meget lille for at vurdere denne sammenhæng, idet der kun er data for to forsøg, og yderligere validering af disse sammenhænge er nødvendig.

5.2.5 Fosforkoncentration i blad relateret til jord P-tests



Figur 48. Fosforkoncentration i blad i V2/3 i ugødede plots (0P) relateret til PCaCl₂/P-tal-ratioen, PCaCl₂ og P-tal. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødskning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

Figur 48 viser, at der var en god sammenhæng mellem jordens indhold af PCaCl_2 og P-koncentrationen i blad, mens der var mindre god sammenhæng til P-tallet. Resultaterne indikerer dermed, at P-koncentrationen i blad i den tidlige vækst siger noget om jordens indhold af umiddelbart tilgængeligt P i jordvæsken (estimeret som PCaCl_2).

6. Mulige årsager til overset fosforbehov på visse arealer med moderate og høje P-tal

Dette afsnit sammenstiller resultater fra opgave 1, 2 og 3 med det formål at diskutere mulige årsager til, at der observeres merudbytte i vårbyg efter tilførsel af placeret handelsgødning-P på jorder med moderate og høje P-tal med henblik på at kunne identificere jorder med overset P-behov.

6.1 Ekstraktionsmetode

P-talsanalysen

De 32 markforsøg havde et stort spænd i P-tal fra 2,1 til 11,9 mg P/100 g jord i 0-25 cm dybde, og P-tallet ligger hermed over et niveau, der anses som kritisk lavt (Steinfurth et al., 2022). Ingen forsøg i dette projekt havde et P-tal under 2 mg P/100 g jord.

Selvom forsøgene repræsenterede jorder med moderate til høje P-tal (Jordan-Meille et al., 2012), var der alligevel udbytterespons i 14 ud af 32 forsøg fordelt over alle tre år og der var ingen sammenhæng mellem P-tallet og de relative udbytter.

I forsøgene var der en klar sammenhæng mellem jordenes pH og P-tallet (Fig. 17, øverst), idet der blev ekstraheret mere P i P-tals analysen, des lavere pH. Der var ikke en lignende sammenhæng mellem de øvrige P-tests (Pvand, PCaCl₂ og DGT-P) og pH. Dette indikerer, at P-tals metoden kan overestimere jordens indhold af labilt P ved meget lave pH-værdier, hvilket også er set i andre forsøg (Azeez et al., 2020b).

Dog var der ingen sammenhæng mellem jordens pH og det relative udbytte. Det vil sige, at jorder med P-respons ikke konsekvent havde lavere pH end jorder uden P-respons. Derfor kan årsagen til udbytterespons på jorder med højt P-tal ikke kun tilskrives overestimering af P-tallet på sure jorder.

Simple jord P tests som alternativ eller supplement til P-tallet

Fosfor ekstraheret med demineraliseret vand (Sissingh, 1971) eller en tynd vandig opløsning af CaCl₂ (Houba et al., 2000) kan relateres koncentrationen af P i jordvæsken, som i litteraturen ofte benævnes som intensitetsfaktoren I (Moody et al., 1988). Fosforkoncentrationen i jordvæsken nær rødderne er en af to afgørende faktorer for P tilgængeligheden, idet P primært flyttes via diffusion i jordvæsken. Den anden faktor er kvantitetsfaktoren Q, som er P bundet til jordens partikler som vedligeholder koncentrationen af P i jordvæsken. Fosfortallet kan betragtes som en kvantitetstest - et udtryk for Q (van Rotterdam et al., 2012). De to intensitetstest var bedre relateret til de relative udbytter end P-tallet, og PCaCl₂ havde den højeste forklaringsgrad af de to intensitetstest. Brug af en 0,01 M CaCl₂opløsning er også internationalt en mere udbredt P-test-metode i landbrugssammenhæng end ekstraktion med demineraliseret vand. Metoden efterligner saltkoncentrationen i jordvæsken og kan anvendes som et universelt ekstraktionsmiddel til analyse af mange næringsstoffer (Houba et al., 2000).

Den bedste forklaringsgrad blev opnået mellem det relative udbytte og ratioen mellem PCaCl₂ og P-tal. Ratioen mellem en intensitets- og en kvantitetstest er også blevet undersøgt af van Rotterdam et al. (2012), der fandt at forholdet mellem de to P-tests er en indikator for jordens kapacitet til af opretholde flux af P fra jord til "sink", dvs. planten i dette tilfælde. Lewis og Quirk (1967) fandt også, at jordens diffusionskoefficient er relateret til ratioen mellem indholdet af P i jordvæsken og såkaldt labilt P bundet til jorden. Dette understreger, at for næringsstoffer som P, der primært transporteres via diffusion, er både intensitets- og kvantitetsfaktoren styrende for P-tilgængeligheden. Den gode sammenhæng mellem parameteren n fra IEK-analysen og forholdet mellem PCaCl₂ og P-tal, som både er fundet i dette studie og

af Braun et al. (2020), viser også, at ratioen mellem de to test er relateret til jordens evne til at frigive P til planten, og at denne information ikke kan fås ved kun at kigge på én P-test alene.

Indholdet af P målt med DGT-metoden var også bedre relateret til det relative udbytte end P-talsanalysen, men den havde en lidt ringere forklaringsgrad end PCaCl_2 og Pvand i dette studie. DGT-metoden overså ca. halvdelen af de responderende jorder, og DGT-metoden synes derfor at være ringere til at identificere respondere jorder ift. de to intensitetstests.

Resultaterne fra denne rapport viser hermed, at en supplerende intensitetstest (her ekstraktion med CaCl_2) kan forbedre forklaringsgraden af jordens evne til at frigive og dermed forsyne afgrøden med P, som ikke opnås ved udelukkende at anvende en kvantitetstest som P-tallet.

6.2 Jordens geologiske oprindelse og georegion

Marine aflejringer inddeles typisk i Litorina- og Yoldiaaflejringer på basis af alderen. Litorinatransgression fandt sted for ca. 7000 år siden, og den relativt unge alder betyder, at disse arealer har en lavere forvitringsgrad. Yoldiatransgression fandt sted i senglacial istid (ca. 14000 år f.Kr.), og Yoldiaaflejringer, der i Danmark næsten udelukkende findes i Vendsyssel, har en højere forvitringsgrad (Breuning Madsen et al., 1992). Den højere forvitringsgrad kan have betydning for lerkolloidernes anion-ombytningskapacitet, og hermed P-sorption.

På sure ikke-kalkrige jorder bliver P hovedsageligt adsorberet til jern- og aluminiumoxider (Parfitt, 1989). Indholdet af især mindre velkrystalliserede oxider er en af de jordegenskaber, der har størst betydning for sorption af P (Antoniadis et al., 2016). Indholdet af mindre velkrystalliserede oxider stiger des højere forvitringsgrad (Shi et al., 2011). I dette projekt blev indholdet af oxalatekstraherbart jern og aluminium bestemt. Det antages, at jern og aluminium ekstraheret med oxalat repræsenterer amorfe (dvs. ikke-velkrystalliske) jern- og aluminiumoxider (Schwertmann, 1973). Jordens indhold af amorfe jern- og aluminiumoxider er særligt interessant at undersøge, da disse oxider typisk har et stort specifikt overfladeareal, hvortil P let kan adsorbere i modsætning til mere velkrystallinske oxider.

Resultater for dette projekt viste, at Litorina-aflejringerne generelt havde et langt lavere indhold af Alox sammenlignet med Yoldia-aflejringerne og yngre moræne, hvilket også er fundet i Andersen og Heckrath (2020). Det hænger fint sammen med, at forvitringsgraden er mindre på disse yngre marine aflejringer (Litorina) ift. den ældre Yoldia-aflejringer. Indholdet af Alox på Yoldia-aflejringerne dækkede dog over et betydeligt spænd fra 37 til 117 mmol/kg, hvilket viser, at der inden for landskabstyperne også er variation i P-bindingskapacitet.

På tværs af alle landskabstyper var der ikke en god sammenhæng mellem indholdet af Alox og det relative udbytte. Når forsøg på Litorina-aflejringer blev udeladt, var der en bedre sammenhæng på tværs af de øvrige landskabstyper, hvor et Alox-indhold >70 mmol/kg ofte resulterede i udbytterespons efter P-tildeling. Det kan forklares ud fra, at jorder med højt indhold af Alox har større sorptionskapacitet, og at aluminiumoxiderne kan binde jordens P på en måde, der reducerer planternes mulighed for at optage P fra jorden på kritiske tidspunkter under væksten. Det kunne være relevant at etablere yderligere forsøg på arealer med et højt indhold af Alox uden for Nordjylland for at undersøge sammenhængen mellem udbytterespons og indhold af Alox nærmere.

For forsøg udført på Litorinafladen forekom der udbytterespons i fire forsøg trods lavt indhold af Alox (<32 mmol/kg). Hermed synes indholdet af Alox ikke at være den afgørende egenskab for, om der forekom et udbytterespons eller ej efter P-tildeling i disse forsøg på Litorinafladen. Tre af de fire forsøg på Litorinafladen med udbytterespons (relativt udbytte $<90\%$) var udført på inddæmmede arealer. Inddæmmede arealer på Litorinafladen er en forholdsvis sjælden landskabstype. Hvilke andre faktorer end indholdet af Alox, der er styrende for fosforbindingen og udbytteresponsen efter P-tildeling, kunne

undersøges nærmere. Alle forsøg på Litorinafladen var også mineralske lavbundsjorder (Tabel 1), og kun to af de øvrige forsøg (*Ajstrup_21 og Borris_21) havde også denne klassificering. Bindingsforholdene for P kan være anderledes på mineralske lavbundsjorder. Forsmann og Kjaergaard (2014) fandt, at forholdet mellem P og jern ekstraheret med bikarbonat-dithionit var en afgørende parameter for P-frigivelsesraten (og hermed tab) på mineralske lavbundsjorder under reducerende forhold. De mineralske lavbundsjorder i nærværende rapport var både drænede og ikke-drænede, men selv drænede lavbundsjorder kan periodevis opleve højt grundvandsspejl (Andersen et al., 2016). Det kunne betyde, at jern ekstraheret med andet end oxalat kunne være betydende for P-frigivelse i jorderne på Litorinafladen i nærværende rapport, og dette kunne være relevant at undersøge nærmere.

De 14 forsøg med udbytterespons (F-test, $p < 0,05$) var placeret på både marine- og ikke-marine (moræne) aflejringer. Resultaterne kan hermed ikke bekræfte hypotesen om, at udbytterespons hovedsageligt forekommer på marine aflejringer, men alle forsøg med signifikante udbytterespons fandt sted i Nordjylland (georegion Nord). I de fem forsøg i georegion Vest var der ikke udbytterespons efter tilførsel af mineralisk P. Disse forsøg repræsenterede landskabstyperne bakkeø og hedeslette. Der er tidligere blevet observeret udbytterespons efter P-tildeling på arealer tæt på forsøgene i nærværende rapport (fx Rubæk og Sibbesen (2000)). Der er behov for yderligere forsøg uden for Nordjylland for at fastslå, om overset P-behov kun et er anliggende for jorder i Nordjylland, eller om det også forekommer i andre egne af landet. Det kunne være særligt relevant at etablere og/eller analysere data fra forsøg på bakkeø og hedeslette og inddrage flere aflejringer, fx yngre moræne og marine aflejringer i andre georegioner for at blive i stand til at skelne mellem effekten af georegion og landskabstype.

6.3 Jordens fysiske egenskaber

Jordfysiske målinger såsom plantetilgængeligt vand, volumenvægt og penetreringsmodstand blev målt for at undersøge, om steder med udbytterespons efter P-tildeling skilte sig ud fra forsøgssteder uden udbytterespons. Vi arbejdede ud fra en hypotese om, at steder med udbytterespons var karakteriseret ved at have ringere forhold for tidlig rodvækst dvs. mindre plantetilgængeligt vand, højere volumenvægt og højere penetreringsmodstand, der kunne resultere i at planterne havde dårligere mulighed for at optage P fra jorden. De jordfysiske målinger blev kun udført i udvalgte forsøg, som blev udvalgt i forbindelse med anlæg af forsøgene, og derfor før vi kendte udbytteresponsen på P-gødskningen.

Mængden af plantetilgængeligt vand varierede mellem forsøgsstederne, men kun et sted (*Brovst_a_20) havde et indhold under den kritiske grænseværdi på $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Sammenstilling af par viste, at den responderende jord i visse tilfælde havde højere indhold af plantetilgængeligt vand (par a), mens den responderende jord i andre tilfælde havde lavere indhold af plantetilgængeligt vand (par c). Volumenvægt varierede også mellem forsøgsstederne. For par a) havde jorden med den laveste volumenvægt udbytterespons, mens der ikke var forskel i volumenvægt for hvert forsøgssted i par b) og c). Den responderende jord (*Jerselv_1_21) havde lavere penetreringsmodstand end den ikke-responderende jord (Jerselv_b_21) i par a), og hermed synes den højere penetreringsmodstand i den ikke-responderende jord ikke at resultere i ringere optag af P fra jorden.

Ud fra de detaljerede målinger i udvalgte forsøg, var der ikke et klart billede af, at steder med udbytterespons, havde jordfysiske forhold, der kunne påvirke rodvæksten negativt ift. steder uden udbytterespons. De målte jordfysiske målinger synes dermed ikke at kunne give en generel forklaring på, hvorfor visse steder responderer på P-tildeling. Omvendt kan vi ikke udelukke at disse egenskaber kan have haft betydning, da vi ikke har udført målingerne i alle forsøg og heller ikke nødvendigvis er lykkedes os at vælge de forsøg ud, hvor de jordfysiske målinger kunne have bidraget bedre til at forklare udbytterespons på P-gødskning.

6.4 Rodvækst

I 2021 og 2022 blev der i seks forsøg udført studier af tidlig rodvækst, dels for at undersøge om P-tildeling påvirkede rodvæksten inden for hvert forsøg, og dels for at undersøge om rodvæksten var forskellig for steder med og uden udbytterespons.

I 2021 var der i et tilfælde signifikant større rodlængde i behandlinger med P-tildeling end uden i forsøg med udbytterespons (*Jerslev_a_21), hvilket også er set i andre studier (e.g. Drew, 1975). For de øvrige forsøg med udbytterespons var rodvækst ikke øget i behandlinger med P-gødskning.

I 2022 var rodlængden større og den gennemsnitlige roddiameter mindre i Ajstrup_22 end i *Brovst_a_22. Disse to forsøg havde samme sådato, og derfor giver sammenligning af de to forsøg mening. Den mindre rodvækst i *Brovst_a_22 kan give ringere mulighed for optag af P fra jorden, og hermed forklare, hvorfor P-tildeling øgede udbyttet i dette forsøg. I Ajstrup_22 forsøget med større rodvækst var yderligere P-tildeling ikke nødvendigt, da tilstrækkelige mængder af P kunne optages fra jordens puljer.

6.5 Klimatiske forhold

I de tre forsøgsår (2020, 2021 og 2022) var nedbørsmængder og temperaturforhold i foråret forskellige, og alligevel blev der observeret udbytterespons efter P-tildeling hvert år. For de forsøg, der blev udført på samme mark over flere år (*Brovst_a_20 + *Brovst_a_22 og *Jerslev_a_20 + *Jerslev_a_21) var merudbyttet efter P-tildeling relativt ens for begge år trods forskellige nedbørsmængder og temperatur i de tre år. Det indikerer, at forskelle i nedbør og temperatur mellem årene ikke udvandede effekten af P-tilførsel.

I 2021 og 2022 blev jordtemperaturen målt i udvalgte forsøg for at undersøge, om forsøgsssteder med udbytterespons generelt havde lavere jordtemperatur, der kunne hæmme rodvæksten, og hermed give ringere mulighed for optag af P fra jordvolumenen. Idet sådato ikke var ens for alle forsøg, var det mest relevant at sammenstille jordtemperatur i forsøg med samme sådato. For par a) var jordtemperaturen kun en anelse koldere i den første måned efter såning (0,3 grader) i den responderende jord ift. den ikke-responderende jord, mens der for par b) og c) var meget lille forskel i jordtemperatur i perioden lige efter såning for den responderende og ikke-responderende jord. Dermed synes jordtemperaturen i det øverste jordlag ikke at være den betydende faktor for, om der forekom udbytterespons eller ej efter P-tildeling i forsøgsparrerne i Nordjylland.

Forskelle i jordtemperatur mellem forsøgsssteder i georegion Nord og Vest kunne også være en medvirkende årsag til, at der ikke var udbytterespons i forsøgene i georegion Vest. Jordtemperaturen var generelt højere i Sønderjylland end i Nordjylland i vækstsæsonen i de tre forsøgsår målt i vejrstationer i hhv. Jyndevad og Tylstrup (Appendix D). En højere jordtemperatur kunne øge den tidlige rodvækst og hermed også planternes mulighed for at optage P fra det omkringliggende jordvolumen, og hermed kunne tildeling af mineralsk placeret P ikke være nødvendigt. Yderligere undersøgelser af de lokale jordtemperaturforhold sammenstillet med rodvækst i forsøg i Sydvestjylland kunne være med til at understøtte denne antagelse.

6.6 Udpegning af arealer med oversat fosforbehov

Det er helt centralt for en optimal udnyttelse af næringsstofferne N og P at kunne identificere jorder, hvor P-gødskning øger høstudbyttet, og hvor P-gødskning er overflødig. I nærværende rapport, responderede 14 ud af 32 forsøg signifikant på tilførsel af P, og i 11 ud af de 14 responderende forsøg var det relative udbytte 90% eller mindre. Dermed kunne P-gødskning på disse 11 jorder øge udbyttet med mindst 10%.

Tilsvarende responderede 18 ud af 32 forsøg ikke signifikant på P-gødsning (F-test, signifikansniveau på 5%). På disse jorder var P-gødsning overflødigt eller kunne mindskes, således at jordens P-pulje og hermed også risikoen for tab af P til vandmiljøet kunne reduceres.

Anbefalinger ift. P-gødsning er i Danmark baseret på P-talsanalysen. Nærværende rapport viser, at nogle jorder beliggende i Nordjylland responderer på P-tildeling trods moderat eller højt P-tal. Det indikerer, at P-tals analysen i visse tilfælde bør suppleres med andre P-analyser på sandede jorder med pH under 7. Særligt kan opmærksomheden henledes på PCaCl_2 -metoden (se afsnit 6.1). Data fra de 32 markforsøg viser, at 10 ud af 11 forsøg med et relativt udbytte på 90% eller derunder havde en PCaCl_2 /P-tal ratio på mindre end 0,2. Resultater fra dette projekt viser hermed, at hvis forholdet mellem PCaCl_2 og P-tal er under 0,2, er der en overvejende sandsynlighed for, at jordene responderer på tilførsel af mineralsk P. Ved at inddrage forholdet mellem PCaCl_2 og P-tal kan man dermed opnå viden om jordernes evne til at frigive P tilgængeligt for planteoptag på jorder med moderat og højt P-tal på de jorder, der er omfattet af denne undersøgelse.

Analyser af P-koncentrationen i yngste fuldtudviklede blad målt i to- eller trebladsstadiet i ugødede plots i de 32 markforsøg viste, at sådan en måling også kan give information om, hvorvidt udbyttet kan forventes at stige efter P-gødsning. Resultater fra dette projekt viser, at alle 11 forsøg med et relativt udbytte på 90% eller mindre, havde en P-koncentration i blad i ugødede plots på under 3400 mg P/kg tørstof (Fig. 45), mens fem forsøg uden respons også havde en P-koncentration mellem under 3400 mg P/kg tørstof (mellem 2800 og 3400 mg/kg tørstof). Syv ud af otte forsøg med bladkoncentrationer under 2900 mg P/kg tørstof (udregnet ud fra den ikke-lineære sammenhæng Fig. 45, hvor relativt udbytte=90%) responderede signifikant på P-tildeling. Hermed kan P-koncentrationen i blad være en indikator for jordens evne til at forsyne planten med P under den tidlige vækst. Dette bekræftes yderligere af de gode sammenhæng mellem PCaCl_2 /P-tal ratioen og P-koncentrationen i blad og mellem PCaCl_2 og P-koncentrationen i blad (Fig. 48). Den højere forklaringsgrad mellem PCaCl_2 og P-koncentrationen i blad end mellem PCaCl_2 /P-tal ratioen og P-koncentrationen i blad indikerer, at P-optagelsen i den tidlige vækstfase er særligt afhængig af intensitetsfaktoren, som PCaCl_2 repræsenterer.

7. Konklusion

Resultater opgjort i denne rapport viser, at høstudbyttet på jorder med moderat og høj P-tal i visse tilfælde blev øget efter P-gødsning. Der var således signifikant effekt af P-gødsning i 14 ud af 32 markforsøg, hvoraf ni af de 14 responderende jorder havde et P-tal over 4. De 14 forsøg med udbytterespons var placeret på både marine (Litorina og Yoldia) og ikke-marine (yngre moræne og randmoræne) aflejringer i Nordjylland, mens ingen af jorderne i Sydvestjylland på landskabstyperne hedeslette og bakkeø responderede signifikant på P-tildeling. Jordens P-tal havde ringe forklaringsgrad til udbytterespons, mens de såkaldte intensitetstests, hvor P ekstraheres med demineraliseret vand (Pvand) eller en svag kalciumklorid-opløsning (PCaCl_2) havde bedre forklaringsgrad. DGT-P var også bedre relateret til udbytterespons end P-tallet, men var ringere til at identificere responderende jorder ift. intensitetstest. Forholdet mellem PCaCl_2 og P-tal forklarede mest af variationen i det relative udbytte, og ti ud af 13 jorder med en PCaCl_2 / P-tal ratio på 0,2 eller mindre responderende på P-gødsning. Forholdet mellem PCaCl_2 og P-tal er et udtryk for, hvor stor en del af relativt løst bundne P, der kan frigives til jordvæsken, og hermed jordens evne til kontinuerligt at forsyne planten med tilgængeligt P. Ved at supplere P-tallet med måling af jordens indhold af PCaCl_2 forbedredes muligheden for at identificere jorder, hvor der forekom merudbytte efter P-tildeling.

For forsøg udført på Yoldiafladen og ikke-marine aflejringer havde indholdet af oxalatekstraherbart aluminium, der repræsenterer ikke-velkrystalliske aluminiumoxider, sammenhæng til udbytteresponset, idet et højt indhold af oxalatekstraherbart aluminium gav anledning til merudbytte efter P-gødsning. Forsøg udført på Litorinafladen havde et lavere indhold af oxalatekstraherbart aluminium, selvom der også forekom udbytterespons i fire forsøg på denne aflejring. Derfor synes udbytteresponset at være mindre relateret til P sorption på amorfe aluminiumoxider i disse fire forsøg. Forsøg udført på Litorinafladen havde alle mineralsk lavbund, og disse lavbundskarakterer kunne betyde, at andre forhold end indholdet af oxalatekstraherbart aluminium var bestemmende for binding og frigivelse af P på disse jorder.

Fosforkoncentrationen i det yngste fuldtudviklede blad i den tidlige vækst var relateret til det relative udbytte. Syv ud af otte forsøg med P-koncentrationer i blad under 2900 mg P/kg tørstof responderede på P-tildeling, mens langt de fleste forsøg med P-koncentrationer i blad over 3400 mg P/kg ikke responderede på P-tildeling. Ligeledes var der en stærk sammenhæng mellem jordens indhold af PCaCl_2 og P-koncentrationer i blad i ugødede plots, hvilket understreger, at jordens indhold af umiddelbart tilgængeligt P påvirker plantens tidlige P-koncentrationer.

Referencer

- Andersen, H. E., Baatrup-Pedersen, A., Blicher-Mathiesen, G., Christensen, J. P., Heckrath, G., Nordemann Jensen, P. r., Vinther, F. P., Rolighed, J., Rubæk, G., & Søndergaard, M. (2016). *Redegørelse for udvikling i landbrugets fosforforbrug, tab og påvirkning af Vandmiljøet* Technical Report, 77 (pp. 86), Aarhus Universitet, DCE – Danish Centre for Environment and Energy.
- Andersen, H. E., & Heckrath, G. (2020). *Fosforkortlægning af dyrkningsjord og vandområder i Danmark* (pp. 338), Aarhus Universitet. <http://dce2.au.dk/pub/SR397.pdf> DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi
- Antoniadis, V., Koliniati, R., Efstratiou, E., Golia, E., & Petropoulos, S. (2016). Effect of soils with varying degree of weathering and pH values on phosphorus sorption. *CATENA*, 139, 214-219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.008>
- Azeez, M. O., Christensen, J. T., Ravnskov, S., Heckrath, G. J., Labouriau, R., Christensen, B. T., & Rubæk, G. H. (2020a). Phosphorus in an arable coarse sandy soil profile after 74 years with different lime and P fertilizer applications. *Geoderma*, 376, 114555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114555>
- Azeez, M. O., Rubæk, G. H., Pedersen, I. F., & Christensen, B. T. (2020b). Depletion, accumulation and availability of soil phosphorus in the Askov long-term field experiment. *Soil Research*, 58, 117-124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR19203>
- Banderis, A., Barter, D. H., & Henderson, K. (1976). The use of polyacrylamide to replace carbon in the determination of "olsen's" extractable phosphate in soil. *Journal of Soil Science*, 27(1), 71-74. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1976.tb01977.x>
- Borggaard, o. K., Jdrgensen, s. S., Moberg, j. P., & Raben-lange, b. (1990). Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. *Journal of Soil Science*, 41(3), 443-449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00078.x>
- Braun, S., McLaren, T. I., Frossard, E., Tuyishime, J. R. M., Börjesson, G., & Gustafsson, J. P. (2020). Phosphorus desorption and isotope exchange kinetics in agricultural soils. *Soil Use and Management*, 38(1), 515-527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/sum.12674>
- Breeuwsmas, A., & Silva, S. (1992). *Phosphorus fertilisation and environmental effects in the Netherlands and the Po region (Italy)*. DLO The Winand Staring Centre Wageningen, The Netherlands.
- Breuning Madsen, H., Henry Nørr, A., & Aagaard Holst, K. (1992). *Atlas over Danmark. Den Danske Jordklassificering* (Vol. Bind 1). Det Kongelige Danske Geografiske Selskab.
- Carstensen, A., Szameitat, A. E., Frydenvang, J., & Husted, S. (2019). Chlorophyll a fluorescence analysis can detect phosphorus deficiency under field conditions and is an effective tool to prevent grain yield reductions in spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant and Soil*, 434(1), 79-91. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3783-6>
- Christensen, J. T. (2021). *Improved utilisation of phosphorus in soil: Altering soil phosphorus dynamics by liming and use of cover crops* Ph.D Thesis 200 pp, Dept. of Agroecology, Aarhus University.
- Christensen, J. T., Pedersen, I. F., & Rubæk, G. H. (2018). *Can the DGT and Olsen P soil analyses predict phosphorus fertilisation requirements on Danish soils?* (pp. 18), Department of Agroecology, Aarhus University.
- Drew, M. C. (1975). Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. *New Phytologist*, 75(3), 479-490. <http://www.jstor.org/stable/2431588>
- Forsmann, D. M., & Kjaergaard, C. (2014). Phosphorus release from anaerobic peat soils during convective discharge — Effect of soil Fe:P molar ratio and preferential flow. *Geoderma*, 223-225, 21-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.025>
- Frossard, E., & Sinaj, S. (1997). The Isotope Exchange Kinetic Technique: A Method to Describe the Availability of Inorganic Nutrients. Applications to K, P, S and Zn. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 33(1-2), 61-77. <https://doi.org/10.1080/10256019808036360>
- Gahoonia, T. S., Raza, S., & Nielsen, N. E. (1994). Phosphorus depletion in the rhizosphere as influenced by soil moisture [journal article]. *Plant and Soil*, 159(2), 213-218. <https://doi.org/10.1007/bf00009283>
- Grant, C., Flaten, D., Tomasiewicz, D., & Sheppard, S. (2001). The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(2), 211-224.

- Greve, M. H., Munkholm, L. J., Lamandé, M., Krogh, P. H., Knudsen, L., Vestergaard, A. V., & Pedersen, T. M. (2018). *Vurdering af jordens frugtbarhed - giv jorden et sundhedstjek* (pp. 42), *Landbrug & Fødevarer F.m.b.A.* SEGES.
- Haneklaus, S. H., & Schnug, E. (2016). Assessing the plant phosphorus status. In E. Schnug & L. J. De Kok (Eds.), *Phosphorus in agriculture: 100 % zero* (pp. 95-125). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/978-94-017-7612-7_6
- Hansen, L. (1976). Jordtyper ved Statens Forsøgsstationer. *Statens Forsøgsvirksomhed i Plantekultur*, 1312, 742-758.
- Holford, I., Morgan, J., Bradley, J., & Cullis, B. (1985). Yield responsiveness and response curvature as essential criteria for the evaluation and calibration of soil phosphate tests for wheat. *Soil Research*, 23(2), 167-180. <https://doi.org/10.1071/SR9850167>
- Houba, V. J. G., Temminghoff, E. J. M., Gaikhorst, G. A., & van Vark, W. (2000). Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31(9-10), 1299-1396. <https://doi.org/10.1080/00103620009370514>
- Jordan-Meille, L., Rubæk, G. H., Ehlert, P., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G., & Barraclough, P. (2012). An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management*, 28(4), 419-435.
- Kafkafi, U. (1972). Soil phosphorus. In H. M (Ed.), *Analytical chemistry of phosphorus compounds* (pp. 727-741). Wiley, New York.
- Knudsen, L. (2021). *Jordbundsanalyser - hvad gemmer sig bag tallene?* (pp. 7), *SEGES PlantInnovation*. Landbrug og Fødevarer F.m.b.A.
- Lemming, C. (2020). *Sammenstilling af 74 forsøg med efterårsgødskning af vintersæd* (pp. 13), *SEGES, Plante- og MiljøInnovation*.
- Lewis, D. G., & Quirk, J. P. (1967). Phosphate diffusion in soil and uptake by plants: I. Self-diffusion of phosphate in soils. *Plant and Soil*, 26(1), 99-118. <http://www.jstor.org/stable/42949508>
- Liu, N., Jørgensen, U., & Lærke, P. E. (2013). Quality determination of biomass for combustion: A new high-throughput microwave digestion method prior to elemental analysis by inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy. *Energy & Fuels*, 27(12), 7485-7488.
<https://doi.org/10.1021/ef4016747>
- Mason, S., McNeill, A., McLaughlin, M. J., & Zhang, H. (2010). Prediction of wheat response to an application of phosphorus under field conditions using diffusive gradients in thin-films (DGT) and extraction methods [journal article]. *Plant and Soil*, 337(1), 243-258.
<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0521-0>
- Menzies, N. W., Kusumo, B., & Moody, P. W. (2005). Assessment of P availability in heavily fertilized soils using the diffusive gradient in thin films (DGT) technique. *Plant and Soil*, 269(1), 1-9.
<https://doi.org/10.1007/s11104-004-1725-y>
- Moody, P., Aitken, R., Compton, B., & Hunt, S. (1988). Soil phosphorus parameters affecting phosphorus availability to, and fertilizer requirements of, maize (*Zea mays*). *Soil Research*, 26(4), 611-622.
- Mundus, S., Carstensen, A., & Husted, S. (2017). Predicting phosphorus availability to spring barley (*Hordeum vulgare*) in agricultural soils of Scandinavia. *Field Crops Research*, 212(Supplement C), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.026>
- Nawara, S., Van Dael, T., Merckx, R., Amery, F., Elsen, A., Odeurs, W., Vandendriessche, H., McGrath, S., Roisin, C., Jouany, C., Pellerin, S., Denoroy, P., Eichler-Löbermann, B., Börjesson, G., Goos, P., Akkermans, W., & Smolders, E. (2017). A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *European Journal of Soil Science*, 68(6), 873-885.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12486>
- Olsen, S. R., Cole, C. V., & Watanabe, F. S. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. USDA.
- Parfitt, R. L. (1989). Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *Journal of Soil Science*, 40(2), 359-369. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01280.x>
- Pedersen, I. F., Rubæk, G. H., & Munkholm, L. J. (2020). *Rapport over litteraturstudie i projektet "Arealer med overset fosforbehov"* (pp. 1-17), *Dept. of Agroecology*. Aarhus University

- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3), 252-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Rubæk, G. H., & Kristensen, K. (2017). *Protocol for bicarbonate extraction of inorganic phosphate from agricultural soils* DCA report 102, Danish Centre for Food and Agriculture.
- Rubæk, G. H., Kristensen, K., Olesen, S. E., Østergaard, H. S., & Heckrath, G. (2013). Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark. *Geoderma*, 209–210, 241-250. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.022>
- Rubæk, G. H., & Sibbesen, E. (2000). *Long-term phosphorus fertilisation - Effects on crop yield and soil phosphorus status* DIAS report, Plant Production, 31 (pp. 43), Danish Institute of Agricultural Sciences.
- Rubæk, G. H., & Sørensen, P. (2011). *Jordanalyser – kvalitet og anvendelse 2* (pp. 132), Nationalt center for fødevarer og jordbrug.
- Schjønning, P., & Koppelgaard, M. (2017). The Forchheimer approach for soil air permeability measurement. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1045-1053.
- Schjønning, P., McBride, R. A., Keller, T., & Obour, P. B. (2017). Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. *Geoderma*, 286, 83-87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.020>
- Schoumans, O. F. (2000). Determination of the degree of phosphate saturation in non-calcareous soils. In G. M. Pierzynski (Ed.), *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters* (pp. 31-34).
- Schwertmann, U. (1973). Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 53(2), 244-246.
- Shah, R., Syers, J. K., Williams, J. D. H., & Walker, T. W. (1968). The forms of inorganic phosphorus extracted from soils by N sulphuric acid. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 11(1), 184-192. <https://doi.org/10.1080/00288233.1968.10431645>
- Shi, Z., Krom, M. D., Bonneville, S., Baker, A. R., Bristow, C., Drake, N., Mann, G., Carslaw, K., McQuaid, J. B., Jickells, T., & Benning, L. G. (2011). Influence of chemical weathering and aging of iron oxides on the potential iron solubility of Saharan dust during simulated atmospheric processing. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010GB003837>
- Sissingh, H. A. (1971). Analytical technique of the Pw method, used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands [journal article]. *Plant and Soil*, 34(1), 483-486. <https://doi.org/10.1007/bf01372800>
- Speirs, S. D., Scott, B. J., Moody, P. W., & Mason, S. D. (2013). Soil phosphorus tests II: A comparison of soil test–crop response relationships for different soil tests and wheat. *Crop and Pasture Science*, 64(5), 469-479. <https://doi.org/10.1071/CP13111>
- Steinfurth, K., Börjesson, G., Denoroy, P., Eichler-Löbermann, B., Gans, W., Heyn, J., Hirte, J., Huyghebaert, B., Jouany, C., Koch, D., Merbach, I., Mokry, M., Mollier, A., Morel, C., Panten, K., Peiter, E., Poulton, P. R., Reitz, T., Rubæk, G. H., . . . Buczek, U. (2022). Thresholds of target phosphorus fertility classes in European fertilizer recommendations in relation to critical soil test phosphorus values derived from the analysis of 55 European long-term field experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 332, 107926. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107926>
- Van Der Zee, S. E. A. T. M., & Van Riemsdijk, W. H. (1986). Sorption kinetics and transport of phosphate in sandy soil. *Geoderma*, 38(1), 293-309. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7061\(86\)90022-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7061(86)90022-4)
- van Rotterdam, A. M. D., Bussink, D. W., Temminghoff, E. J. M., & van Riemsdijk, W. H. (2012). Predicting the potential of soils to supply phosphorus by integrating soil chemical processes and standard soil tests. *Geoderma*, 189-190, 617-626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.003>
- Veneklaas, E. J., Lambers, H., Bragg, J., Finnegan, P. M., Lovelock, C. E., Plaxton, W. C., Price, C. A., Scheible, W.-R., Shane, M. W., White, P. J., & Raven, J. A. (2012). Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist*, 195(2), 306-320. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>

- Vestergaard, A. (2014). Anden organisk gødning. In J. Pedersen (Ed.), *Oversigt over Landsforsøgene 2014* (pp. p 258-260). Videncentret for Landbrug P/S.
- Vestergaard, A. (2015). Anden organisk gødning. In J. Pedersen (Ed.), *Oversigt over Landsforsøgene 2015* (pp. 238-241). Videncentret for Landbrug P/S.

Appendix A. Eksperimentelle detaljer for markforsøg

Forsøgsnr.	Forfrugt	Såning og placering af P	Sort	N tilførsel, kg ha ⁻¹	K tilførsel, kg ha ⁻¹	Høstdato
2020						
070532020-001	Rajgræs til frøproduktion	14.04.20	RGT planet	130	50	19.08.20
070532020-002	Vinterhvede	14.04.20	Flair	130	50	14.08.20
070532020-003	Vinterhvede	15.04.20	Flair	130	50	14.08.20
070532020-004	Vårbyg	30.03.20	Feedway	130	50	18.08.20
070532020-005	Rajgræs	31.03.20	RGT plant Stairway	130	50	14.08.20
070532020-006	Vinterhvede	15.04.20	Flair	130	50	14.08.20
070532020-007	Vinterhvede	03.04.20	RGT Planet	130	50	13.08.20
2021						
070532121-001	Vinterhvede	14.04.21	Flair	120	50	25.08.21
070532121-002		23.03.21	Flair	120	75	12.08.21
070532121-003	Raps	16.04.21	Flair	120	75	19.08.21
070532121-004	Vårbyg	06.04.21	Flair	120	50	25.08.21
070532121-005	Vinterhvede	06.04.21	Flair	120	50	06.08.21
070532121-006	Vinterhvede	20.04.21	Flair	130	75	19.08.21
070532121-007	Kartofler	26.03.21	Flair	120	50	18.08.21
070542121-001	Vinterhvede	22.04.21	Flair	130	50	10.08.21
070542121-002	Vårbyg	19.04.22	Flair	135	20	23.08.21
070542121-003	-	-	-	-	-	-
070542121-004	Vårbyg	16.04.21	Flair		50	24.08.21
070542121-005	Vinterhvede	17.04.21	Flair	130	75	24.08.21
070542121-006	n.a.	20.04.21	Flair	162	50	26.08.21
070542121-007	n.a.	20.04.21	Flair	175	50	26.08.21
2022						
070532222-001	Majs til helsæd	25.03.22	Flair	130 kg (21.04)	75 kg	15.08.22
070532222-002	Vårbyg	25.03.22.	Flair	130 kg (21.04)	75	15.08.22
070532222-003	Vinterrug	29.03.22	Flair	130 kg (24.04)	75	09.08.22
070532222-004	Vinterrug	29.03.22	Flair	130 kg (25.04)	75	09.08.22

070532222-005	Kartofler	30.03.22	Flair	130 kg (05.04+21.04)	75	15.08.22
070532222-006	Vårbyg	29.03.22	Flair	130 kg (25.04)	75	10.08.22
070532222-007	Majs til helsæd	29.04.22	Flair	130 kg 02.05	75	25.08.22
070532222-008	Rajgræs til frøproduktion	29.03.22	Flair	130 kg (05.04+21.04)	75	10.08.22
070532222-009	-	-	-	-		-
070532222-010	n.a.	20.04.22	Flair	130 kg	75	15.08.22
070532222-011	n.a.	21.04.22	Flair	130 kg	75	15.08.22
070892222-001	n.a.	25.03.22	Flair	130 kg (02.05)	75	25.08.22
070892222-002	n.a.	24.03.22	Flair	130 kg (21.04)	75	14.08.22

Appendix B. Øvrige data for jordfysiske målinger

Øvrige data for jordfysiske egenskaber målt på ringprøver udtaget i 8-12 cm dybde i forsøgsår 2020, 2021 og 2022.

År	Forsøgsnr	Unik kode	Porøsitet m3 luft/m3 tør jord	Luftpermeabilitet v. pF2 (geometrisk gennemsnit)	Porreandel > 30µm	Porreandel < 30µm	Vandindhold med markkapacitet (pF2)
2020	070532020-002	*Tylstrup_20	0.46	4.29	0.21	0.25	17.7
	070532020-003	*Brovst_a_20	0.44	7.32	0.19	0.25	18.2
	070532020-004	*Jerslev_a_20	0.58	65.65	0.24	0.34	30.4
	070532020-005	Klokkerholm_20	0.54	64.72	0.22	0.32	27.3
2021	070532121-002	*Tylstrup_21	0.49	-	0.23	0.26	20.1
	070532121-003	*Brovst_21	0.49	-	0.26	0.23	17.4
	070532121-004	*Jerslev_a_21	0.56	-	0.20	0.36	32.7
	070532121-005	Jerslev_b_21	0.47	-	0.21	0.27	19.3
2022	070532222-001	Biersted_a_22	0.47	-	0.22	0.26	18.7
	070532222-002	*Biersted_b_22	0.48	-	0.22	0.25	18.6
	070532222-003	*Ø_Brønderslev_a_22	0.52	-	0.23	0.29	24.0
	070532222-004	Ø_Brønderslev_b_22	0.50	-	0.16	0.34	26.9
	070892222-001	*Brovst_a_22	0.46	-	0.19	0.27	19.1
	070892222-002	Ajstrup_22	0.50	-	0.25	0.25	19.6

Appendix C. Protokol over ekstraktion af fosfor med kalciumklorid

Analyseprotokol for P ekstraheret med 0,01 M CaCl₂ i denne rapport.

2,50 g sigtet (<2mm) lufttør jord (tørret ved maksimum 40°C) afvejes og opfugtes med 2 ml 0,01 M CaCl₂ ved 20°C i 24 timer. Herefter tilsættes yderligere 23 ml 0,01 M CaCl₂ så der opnås et jord-væskeforhold på 1:10 (w/v). Blandingen rystes i to timer på rysteapparat ved 20°C, hvorefter den centrifugeres ved 1800 g i 10 minutter og fosforkoncentrationen bestemmes spektrofotometrisk i supernatanten, som en bestemmelse af fosfor i vandprøver (ISO 6878 (2004)).

Noter:

- Metoden svarer i alle væsentlige henseender til metoden beskrevet af Houba et al. (2000), med to små modifikationer: (1) Der blev afvejet 2,50 g jord til i alt 25 ml ekstraktionsvæske, mod 10 g jord til 100 ml væske i Houba et al. (2000); (2) Jorden blev opfugtet med ekstraktionsvæsken i 24 timer forud for selve ekstraktionen, parallelt til den opfugtning der gøres ved bestemmelse af Pvand (Sissingh et al., 1971) med det formål at eliminere eventuel variation mellem dobbeltbestemmelser, der måtte opstå ved dårlig opfugtning.
- I hvilket omfang opfugtning før endelig ekstraktion bidrog væsentligt til at mindske ekstraktionsusikkerheden er ukendt.
- Metoden gav i vores undersøgelser større relative afvigelser mellem dobbeltbestemmelser end de udførte analyser af Pvand og P-tal. Dette kan måske forbedres ved at øge den afvejede jordmængde til 10,0 g som i den originale forskrift.
- Analysen bør udføres som dobbeltbestemmelse for at reducere effekten af variation mellem gentagne analyser.

Referencer:

- Houba, E.J.M. Temminghoff, G.A. Gaikhorst & W. van Vark (2000) Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 31:9-10, 1299-1396, DOI: 10.1080/00103620009370514
- ISO 6878 (2004). ISO 6878: Water quality: Determination of phosphorus – Ammonium molybdate spectrometric method. 2. Ed. ISO International Organization for Standardization.
- Sissingh, H. A. (1971). Analytical technique of the Pw method, used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands [journal article]. Plant and Soil, 34(1), 483-486. <https://doi.org/10.1007/bf01372800>

Appendix D. Jordtemperatur i Tylstrup og Jyndeved

Døgn middel jordtemperatur i 10 cm dybde, °C, målt i Jyndeved i Sønderjylland og Tylstrup i Nordjylland i de tre forsøgsår.

	2020		2021		2022	
	Jyndeved	Tylstrup	Jyndeved	Tylstrup	Jyndeved	Tylstrup
	°C					
Marts	5.3	3.8	4.5	2.5	4.2	2.6
April	8.0	5.9	6.4	4.6	7.4	5.1
Maj	11.7	9.1	10.5	9.7	12.4	10.2
Juni	17.3	14.3	16.1	15.1	16.1	14.6
Juli	16.8	15.0	18.6	17.9	17.6	17.3
August	18.3	15.5	17.2	16.1	18.4	17.3

Appendix E. Sammenhæng mellem det relative udbytte og merudbytte

Sammenhæng mellem det relative udbytte (%) og det absolutte merudbytte (/hkg/ha) for de 32 markforsøg udført i projektperioden. Forsøg med signifikant udbytterespons efter P-gødsning er markeret med + (F-test, $p < 0.05$).

