

# LANDSFORSØGENE 2021

Forsøg og undersøgelser i  
Dansk Landbrugsrådgivning

Samlet og udarbejdet af  
LANDBRUG & FØDEVARER, PLANTEPRODUKTION  
ved chefkonsulent Jon Birger Pedersen

Aktiviteterne er blandt andet støttet af:

**Promille**afgiftsfonden for landbrug

**Frø**afgiftsfonden

Fonden for **økologisk** landbrug

**Kartoffel**afgiftsfonden



**Innovationsfonden**



## **LANDSFORSØGENE 2021**

Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning

Landsforsøgene 2021 er samlet og udarbejdet af Landbrug & Fødevarer, Planteproduktion ved chefkonsulent Jon Birger Pedersen.

### **Udgivet**

December 2021

### **Trykkeri**

Stibo Complete

### **Udgiver**

Landbrug & Fødevarer F.m.b.A.

SEGES

Plante- & MiljøInnovation

Agro Food Park 15

8200 Aarhus N

T +45 8740 5000

E [info@seges.dk](mailto:info@seges.dk)

### **Omslag**

Foto: Torkild Birkmose, SEGES

### **Køb**

Bogen kan købes i SEGES Netbutik: [www.netbutikken.seges.dk](http://www.netbutikken.seges.dk).

Pdf-udgaven af bogen samt tabeller og figurer i bogen kan hentes på [www.landbrugsinfo.dk/oversigten](http://www.landbrugsinfo.dk/oversigten).

Resultaterne i bogen kan frit gengives med tydelig kildeangivelse inkl. side-tal. F.eks. „Kilde: Landsforsøgene 2021, tabel xx, side yy.“

ISBN 978-87-93051-10-2

ISSN 0900-5293

afrapporteret i Oversigt over Landsforsøgene. På daværende tidspunkt fyldte klimadebatten ikke så meget, og biochar blev ikke efterspurgt, da kiloprisen var meget høj, og der ikke var en dokumenteret udbytteeffekt på vore breddegrader. Produktionen stoppede og er først ved at blomstre op igen pga. nye klimaperspektiver.

Der blev i år planlagt forsøgsaktiviteter med forskellige typer af biochar, dels til afprøvning iblandet gylle på markjorden, til spredetest og til markforsøg i vårbyg. Men de måtte udskydes pga. manglende biochar og i stedet bliver de gennemført i 2022. Der blev i foråret fremskaffet biochar af træ fra Norge til to markforsøg, hvoraf kun det ene forsøg er gennemført.

I forsøget er tilført 0, 6 og 12 ton biochar pr. ha fra norsk fyrretræ, inden såning af vårbyg på lerjord (JB7). Billedet ovenfor viser forsøgsparcel efter udbringning. I det biochar både har en gødnings- og en jordforbedringsværdi, er biocharen afprøvet med og uden supplerende PK-gødning (14 kg fosfor og 50 kg kali pr. ha). Forsøget er tildelt 110 kg kvælstof pr. ha.

Der er udtaget jordprøver i alle led, de har vist reaktionstal, Rt, på 7,4 til 7,8, fosfortal, Pt, fra 1,5 til 1,8 og kalital, Kt, fra 10,4 til 14,5.

Der blev i forsøget høstet mellem 66 og 69 hkg kerne pr. ha, og der er ikke opnået en effekt af biochar, hverken med eller uden supplerende PK-gødning. Det kan her bemærkes, at der i litteraturen oftest ses en positiv effekt af biochar på sure jorder.

I dyrkningssæsonen blev der gennemført respirations-test (Solvita-målinger) i forsøget, og her blev der heller ikke observeret forskelle mellem behandlingerne.

Endelig blev der i efteråret analyseret for Nmin for at undersøge, om biochar havde en effekt. Men der er heller ikke udslag for behandling på denne parameter.

Forsøgsaktiviteter med biochar fortsætter i 2022.

## Jordpakning

> JANNE AALBORG NIELSEN, SEGES

I foråret 2010 blev anlagt tre flerårige forsøg med jordpakning for at belyse, om kørsel med meget tunge maskiner på sandblandet lerjord giver en skadelig pakning af underjorden med varigt udbyttestab til følge. Forsøgene blev anlagt i marker, som ikke tidligere har været udsat for færdsel med tunge maskiner. Parcellerne blev behandlet med en "hjul ved hjul" pakning, så hele parcellen blev overkørt. Forsøgsbehandlingerne med pakning af jorden blev udført i årene 2010-2013. Afgrøden var vårbyg. Efter 2013 har der ikke været kørt med tung trafik i forsøgsparcellerne. I årene 2013-16 blev der hvert år, efter høst, sået olieræddike i halvdelen af parcellerne, og der blev samtidig gødsket med 30 kg kvælstof pr. ha og spredt sneglegift. Dette for at undersøge potentialet for biologisk jordløsning. For nærmere beskrivelse af forsøgsbehandlingerne se tidligere udgaver af Oversigt over Landsforsøgene og afsnit nedenfor. De langvarige forsøg med jordpakning er nu afsluttet.

Ved udarbejdelse af tabel 7 er udbyttestab for alle tre lokaliteter i alle år bearbejdet statistisk for at undersøge, hvilken effekt pakningen med forskellige hjullaster har haft, og hvad efterafgrøde har betydet for eventuel løsning af den pakkede jord. Vær opmærksom på, at de forskellige hjullaster er opnået ud fra forskellige principper, se afsnit nedenfor.

### Forklaring til tabel 7:

I kolonnen 'Gns. udbyttestab i år med hjullast' er udregnet den forventede forskel mellem udbyttet i det pågældende led og leddet uden hjullast.

Kolonnen 'Antal høst efter sidste jordpakning med signifikant udbyttestab' angiver, hvilket år efter jordpakkningens ophør (2013), der første gang ikke er signifikant udbyttestab efter jordpakkningen.

Kolonnen "Merudbytte i første år med efterafgrøde, 2014" er merudbyttet i 2014 (første høstår med forudgående efterafgrøde) i parceller i 2014 sammenlignet med parceller uden efterafgrøde.

I kolonnen "Antal høst med signifikant merudbytte efter første efterafgrøde" er første år efter jordpakkningens ophør, hvor udbyttet ikke var signifikant højere, hvor der havde været efterafgrøder.

**TABEL 7.** Effekt af hjullast ved forskellige jordpakningsbehandlinger (O7). Bemærk at den angivne hjullast dækker over forskellige maskinsystemer.

| Lokalitet       | Hjullast     | Gns. udbyttetab i år med hjullast, hkg kerne pr. ha | Antal høst efter sidste jordpakning med signifikant udbyttetab | Merudbytte i første år med efterafgrøde, 2014 | Antal høst med signifikant merudbytte efter første efterafgrøde |
|-----------------|--------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Aarslev         | 8ti 2010     | 2.7                                                 | 0                                                              | 6.7*                                          | 3                                                               |
|                 | 3ti 2010-13  | 0.8                                                 | 0                                                              | 4.3*                                          | 1                                                               |
|                 | 6ti 2010-13  | 6.4*                                                | 3                                                              | 6.9*                                          | 2                                                               |
|                 | 8ti 2010-13  | 8.3*                                                | 3                                                              | 6.2*                                          | 2                                                               |
|                 | 12ti 2010-13 | 0.7                                                 | 0                                                              | 4.7                                           | 0                                                               |
| Flakkebjerg     | 8ti 2010     | 8.3*                                                | 1                                                              | -1.6                                          | 0                                                               |
|                 | 3ti 2010-13  | 4.7*                                                | 1                                                              | -0.3                                          | 0                                                               |
|                 | 6ti 2010-13  | 12.5*                                               | 3                                                              | 2.7                                           | 0                                                               |
|                 | 8ti 2010-13  | 14.1*                                               | 2                                                              | 4.0*                                          | 1                                                               |
| Taastrup        | 8ti 2010     | 8.7*                                                | 1                                                              | -0.6                                          | 0                                                               |
|                 | 3ti 2010-13  | 6.3*                                                | 2                                                              | 1.8                                           | 0                                                               |
|                 | 6ti 2010-13  | 12.9*                                               | 3                                                              | 4.7*                                          | 3                                                               |
| Alle lokationer | 8ti 2010     | 6.4*                                                | 2                                                              | 2.5                                           | 0                                                               |
|                 | 3ti 2010-13  | 3.4*                                                | 2                                                              | 1.9                                           | 0                                                               |
|                 | 6ti 2010-13  | 10.4*                                               | 4                                                              | 4.8*                                          | 2                                                               |
|                 | 8ti 2010-13  | 11.5*                                               | 3                                                              | 4.9*                                          | 1                                                               |
|                 | 12ti 2010-13 | 3.1*                                                | 0                                                              | 3.5                                           | 0                                                               |

\*Forskel er signifikant større end 0 med signifikansniveau 5 pct.

I figur 3 vises det estimerede merudbytte ved forskellige forsøgsbehandlinger over årene. Det grå område er 95 procent-konfidensintervallet. Den røde, stiplede nul-linje angiver et merudbytte på 0. Det første år, hvor den røde linje skærer 95 procent-konfidensintervallet, er for pågældende forsøgsled det første år uden signifikant udbytteforskel i forhold til ingen jordpakning og ud fra dette er der beregnet antal høst efter sidste jordpakning med signifikant udbyttetab.

Udbyttetabet i første år efter pakning varierede en del mellem forsøgslokaliteterne for samme forsøgsled. For eksempel var udbyttetabet for 6 ton pakning i Aarslev på omtrent det halve af udbyttetabet på de to andre lokaliteter. Til trods for dette er der fundet relativ lille variation i antal høst efter sidste jordpakning med signifikant udbyttetab mellem lokaliteterne for samme forsøgsled.

Set over alle tre forsøgssteder kan en signifikant udbyttereducerende effekt af jordpakning ikke længere findes efter to år for 8 ton hjullast (et års pakning) og 3 ton hjullast (fire års pakning). Og efter tre år for 8 ton (fire års pakning), og efter fire år for 6 ton (tre års pakning).

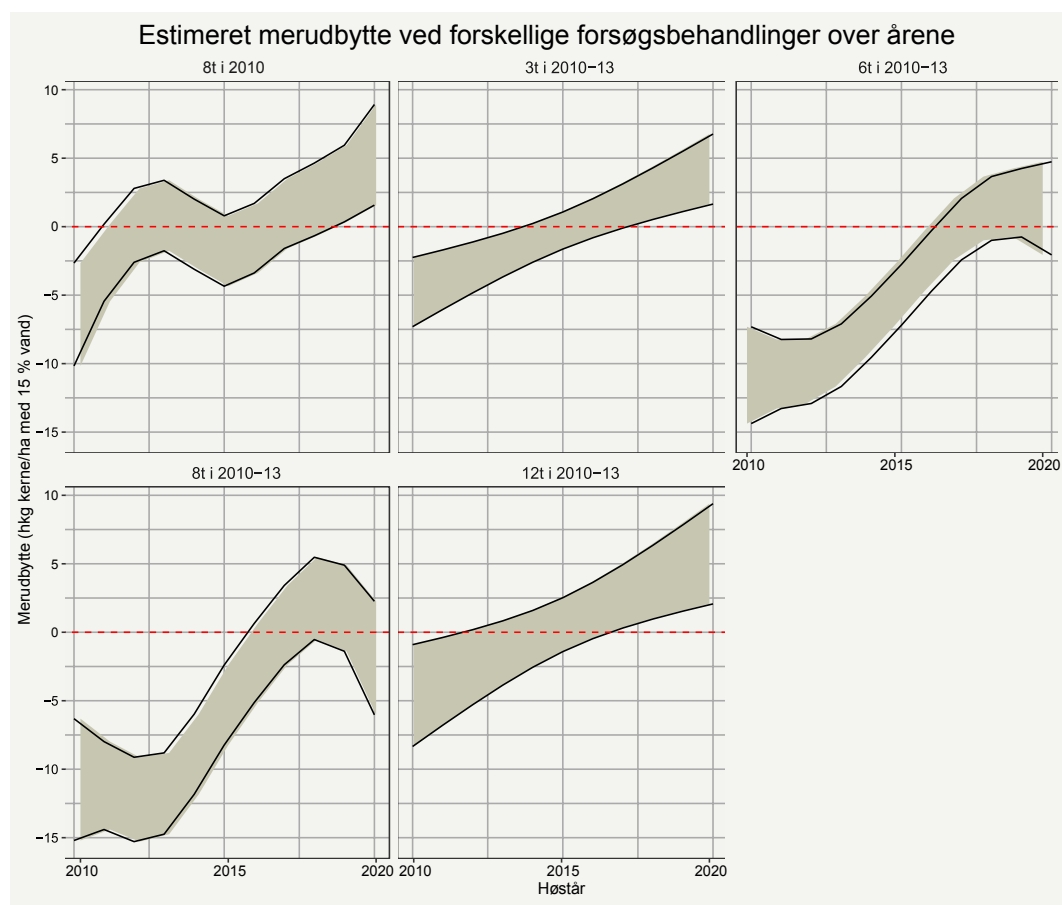
Ligeledes kan man ud fra tabel 7 se effekten af efterafgrøder. Den varierer betydeligt mellem lokaliteterne. På tværs af lokaliteter er det kun i efterafgrøde ved hjullast

på 6 og 8 ton, der er fundet statistisk signifikans i opgørelsen. Det vil sige, at det kun er ved 6 ton og 8 ton hjullast, der er en positiv effekt på udbyttet ved brug af efterafgrøder i gennemsnit over alle tre lokaliteter. Det ses også, at 2016 er det første år, hvor efterafgrøde i 6 ton hjullast ikke giver signifikant højere udbytte, mens det er i 2015 for 8 ton hjullast.

**Konklusion på jordpakningens betydning for udbyttet**

De langvarige jordpakningsforsøg viser, at udbyttet falder, når der køres med tunge maskiner. Udbyttetabet er størst i de år, hvor forsøgsbehandlinger udføres, det vil sige der køres med gyllevogne i forsøgsparcellerne i foråret, før afgrøden etableres. Efter ophør med denne kørsel i 2013, forbedres udbyttet. Forsøgene viser, at udbyttetabet i pakket jord er signifikant i 1-4 år efter ophørt kørsel afhængig af gyllevognens vægt, opbygning og antal år, jordpakningen er gentaget. Det er kørsel med gyllevogne, der indebærer hjullast på 6 og 8 ton, som giver det største og længstvarende udbyttetab.

Efterafgrøder til biologisk jordløsning har en moderat, positiv effekt på udbyttet for de forsøgsbehandlinger, der indebærer 6 og 8 t hjullast. Den positive udbytteeffekt af efterafgrøder kan skyldes både en generel forbedring af jordstrukturen og den tilførte kvælstofmængde.



**FIGUR 3.** Figuren viser 95 procent-konfidensintervallet for det estimerede udbytte af forskellige jordpakninger sammenlignet med ingen jordpakning. Den røde, stiplede nullinje angiver et merudbytte på 0. Det første år, hvor den røde linje skærer 95 procent-konfidensintervallet, er for det pågældende pakningsled det første år uden signifikant udbytteforskel i forhold til ingen jordpakning. Bemærk at den angivne hullast dækker over forskellige maskinsystemer.

Det er vigtigt at notere sig, at mange jordfysiske undersøgelser og målinger gennem tiden i forsøgene har vist betydende og vedvarende effekter på jordens egenskaber og funktioner. Det kan ikke udelukkes, at det også har effekter på udbyttet, som ikke har været muligt at vise i de langvarige jordpakningsforsøg. Se afsnit nedenfor, og tidligere udgaver af Oversigt over Landsforsøgene.

## Vedvarende effekter af trafik på jordens egenskaber og funktioner

> **SENIORFORSKER PER SCHJØNNING,**  
INSTITUT FOR AGROØKOLOGI, AU

Der er gennem årene lavet mange målinger af jordens egenskaber og pakningens effekt på disse. De fleste af disse undersøgelser er afrapporteret i Oversigten over Landsforsøgene 2010-2020. I denne artikel vil blive bragt resultater, der endnu ikke har været præsenteret i de årlige Oversigter og som giver et indtryk af de længe-revarende effekter af trafikken.

## Opsummering af forsøgsbehandlingerne

Forsøgene har inkluderet kørsel med en traktor forspændt en tre-akslet gyllevogn. Der indgik forsøgsled med tre forskellige belastninger af hjulene på gyllevognen. Desuden er der på forsøgsstedet Aarslev blevet kørt med en selvkørende, trehjulet gyllespreder. I de tidligere afrapporteringer i Oversigt over Landsforsøgene er der for lethedens skyld alene blevet brugt den maksimale hjullast som betegnelse for forsøgsleddene (3, 6, 8 og 12 tons). Det kan misforstås, fordi andet end hjullasten har betydning for trafikken påvirkning af jorden. I dette afsnit anvendes betegnelserne M3, M6 og M8 for de tre kørsler med traktorgyllevogn. Dette for at angive, at der ved de behandlinger er tale om flere efterløbende hjul ('M' for multiple), hvor tallene 3, 6 og 8 så angiver den omtrentlige maksimale hjullast. Modsvarende anvendes betegnelsen S12 for den selvkørende gyllevogn, fordi den med sin opbygning som en trehjulet cykel kun giver en enkelt hjuloverkørsel ('S' for single) og med en maksimal hjullast på cirka 12 tons. Selv disse betegnelser dækker over vigtige forskelle i effekten på jorden. Der er grund til at kigge nærmere på forsøgsbehandlingerne. Både med hensyn til relevans for praksis og i relation til de kræfter, maskinerne har udsat jorden for.

Behandlingen M6 svarer til den mest typiske form for gyllespredning i Danmark. Effekten kan direkte sammenlignes med S12, idet denne behandling også er gennemført, som den udøves i praksis. Det er dog væsentligt at være opmærksom på, at der er tale om sammenligning af to systemer. I forsøgene er anvendt de dæktryk, der typisk bruges i praksis. Ofte er der behov for trafik på vej (med større hastighed end for kørsel i marken), hvorfor dæktrykket for især gyllevognens dæk har været betragteligt over det anbefalede for kørsel i marken. Det betyder, at effekten af M6 behandlingen formodentlig ville have været mindre, hvis der var kørt med anbefalet dæktryk i marken. Den trehjulede maskine (S12) var forsynet med et centralt dækreguleringssystem, der tillod neddrøsling af dæktrykket til det anbefalede ved indkørsel i forsøgsparcellerne. Dæktrykket for S12-behandlingen blev dog ved en fejl sænket til under det anbefalede niveau i to af forsøgsårene. Dæk flader bedre ud og giver en større trædeflade – og dermed et lavere gennemsnitligt trædefladedress – ved lave dæktryk.

Behandlingerne M3 og M8 har ikke direkte relevans for vurdering af effekten af den mest typiske praksis for udbringning af gylle (M6). De cirka 3 tons hjullast i M3 be-

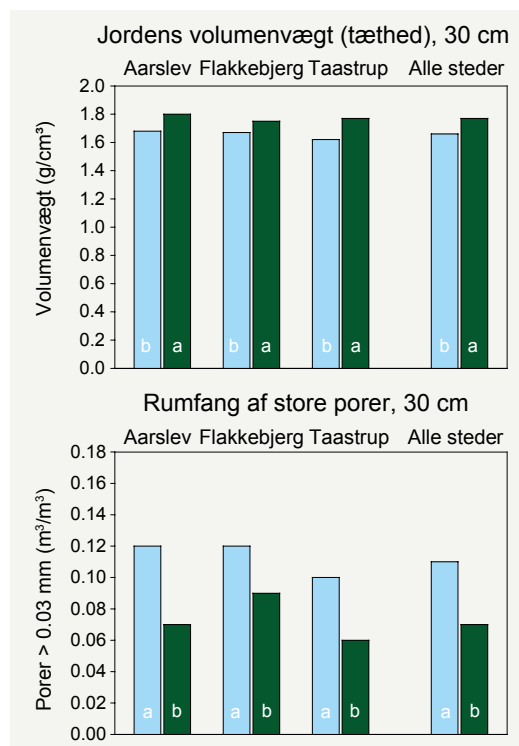
handlingen blev opnået ved at køre med tom vogn. De cirka 8 tons hjullast i M8 behandling blev modsvarende frembragt ved at løfte den første af gyllevognens aksler. M3 og M8 kan dog give et indtryk af effekten ved andre markoperationer, hvor der køres med de nævnte hjullaster og med en kombination af traktor og vogn.

Der er også andre principielle forskelle. Ud over forskellene i hjullast og antal hjul-overkørsler er der markant forskel på de trækkræfter, der overføres til jorden ved kørsel med traktor-gyllevogn henholdsvis den selvkørende, trehjulede maskine. For M-behandlingerne (traktorgyllevogn) skal traktoren ud over sin egen rullemodstand overkomme de kræfter, det kræver at trække den tunge gyllevogn efter sig. Den trehjulede maskine (S-behandlingen i Aarslev) skal alene trække sig selv. Endvidere er der her tale om træk på alle tre hjul. Det vil sige, at trækkræften overføres til jorden i hele køretøjets bredde (som en tromle, i alt 310 cm hjulspor med de anvendte brede dæk). Ved M-behandlingerne bliver den formodet meget større trækraft overført til jorden alene i de to spor med de anvendte dæk på 142-160 cm sporbredde. Opsummerende kan siges, at S-behandlingen har overført den klart største vægt til jorden, mens M-behandlingerne – især M6 og M8 – har indebåret flere hjuloverkørsler og med en formodet langt større trækraftoverførsel til jorden. Det kan nævnes, at en måling af spor-dybde for M8 og S12 i Aarslev – ved kørsel på forårsvåd stubjord – viste henholdsvis cirka 8 og cirka 5 cm. Dette afspejler de nævnte forskelle.

## Effekt af traktor-trailer kombination fire år efter sidste trafik

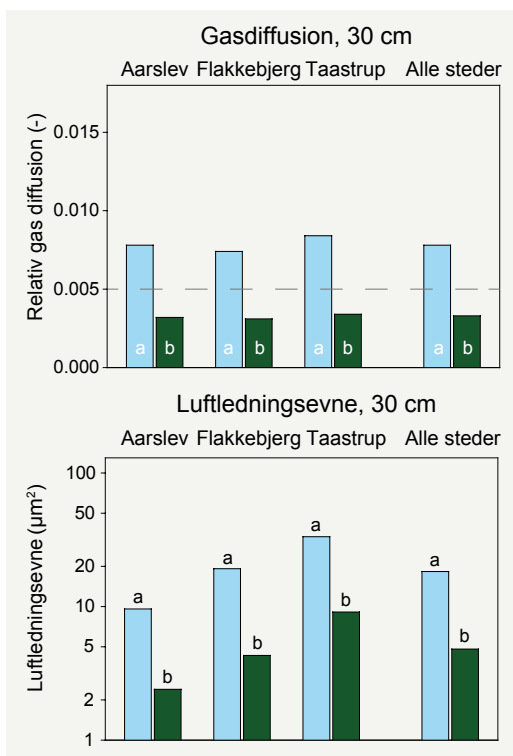
I 2017, fire år efter den sidste af de gentagne eksperimentelle behandlinger 2010-2013, blev der udtaget jordprøver i dybderne 30 og 50 cm. I Aarslev og Flakkebjerg blev prøverne taget i behandling M8, mens undersøgelsen omfattede M6 i Taastrup. Jordprøverne blev afdrænet til et vandindhold svarende til markkapacitet (forårets vandindhold). Dernæst blev målt gasdiffusion og luftledningsevne (Pulido-Moncada m.fl. 2020. Soil Sci Soc Am J 84, 717-730). Resultaterne er vist i figur 4-6 for 30 cm og i figur 7-9 for 50 cm dybde. Der er tale om gennemsnit over delparceller uden og med dyrkning af olieræddike i perioden efter 2013, idet der ikke var vekselvirkning mellem jordpakning og efterafgrøde.

Volumenvægten er et mål for jordens tæthed (gram tør jord per kubikcentimeter jord). Gennemsnitligt over de

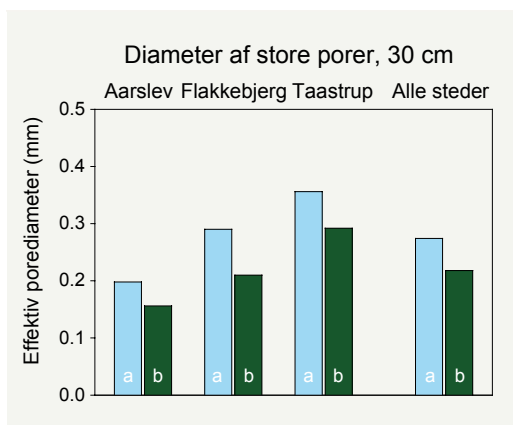


**FIGUR 4.** Volumenvægt (øverst) og rumfang af porer >0.03 mm (nederst) i 30 cm dybde fire år efter forsøgsbehandlingernes ophør for parceller uden eksperimentel trafik (blå søjler) og pakkede forsøgsparceller (grønne søjler; Aarslev og Flakkebjerg: M8; Taastrup: M6). Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).

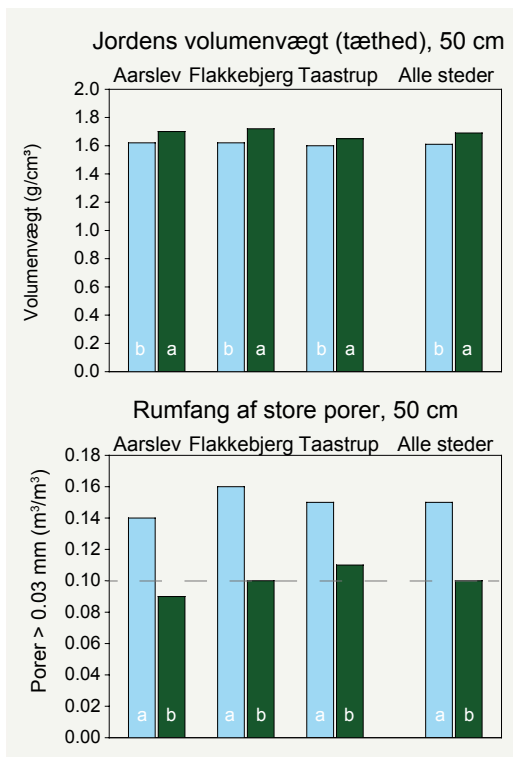
tre forsøgssteder er der for de upakkede parceller målt 1,66 og 1,61 g pr.  $\text{cm}^3$  i 30 og 50 cm dybde (figur 4 og 7, øverst). Det er meget høje værdier. Til sammenligning var volumenvægten i 30 cm dybde for upakkede forsøgsparceller i et forsøg på en lerjord i Schweiz cirka 1,5 g pr.  $\text{cm}^3$ . Både Aarslev, Flakkebjerg og Taastrup er morænejorde med en såkaldt graderet (modsat sorteret) tekstur. Det vil sige, at der findes få men små lerpartikler i kombination med forholdsvis mange mellemstore og store partikler (sand). Sådanne jorde har en naturlig tendens til at blive tætte, hvilket understreger behovet for fokus på pakningsproblematikken i Danmark. Den højere værdi på 1,66 g pr.  $\text{cm}^3$  i 30 cm dybde i forhold 1,61 g pr.  $\text{cm}^3$  i 50 cm dybde afspejler højest sandsynligt den såkaldte pløjesål, hvilket egentlig udtrykker ikke alene en effekt af pløjning, men i høj grad også effekten af gentagen tung trafik.



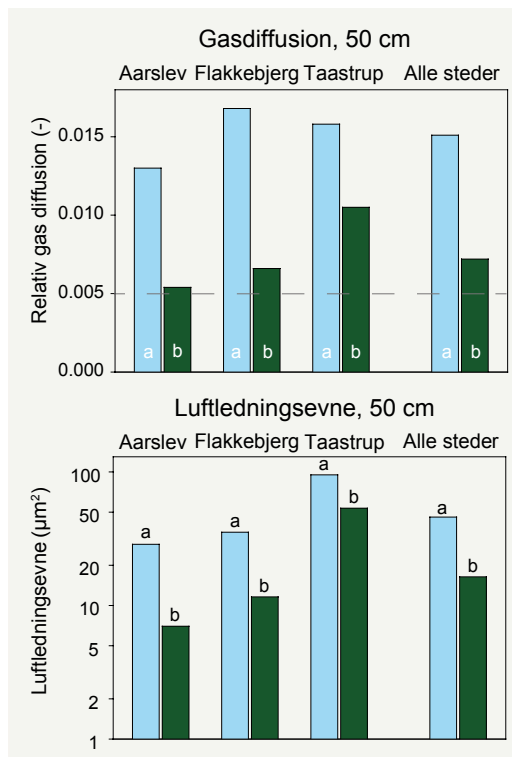
**FIGUR 5.** Gasdiffusion (øverst) og luftledningsevne (nederst) i 30 cm dybde fire år efter forsøgsbehandlingernes ophør for parceller uden eksperimentel trafik (blå søjler) og pakkede forsøgsparceller (grønne søjler; Aarslev og Flakkebjerg: M8; Taastrup: M6). Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).



**FIGUR 6.** Modelberegnet diameter af lodrette porer i jorden i 30 cm dybde fire år efter forsøgsbehandlingernes ophør for parceller uden eksperimentel trafik (blå søjler) og pakkede forsøgsparceller (grønne søjler; Aarslev og Flakkebjerg: M8; Taastrup: M6). Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).



**FIGUR 7.** Volumenvægt (øverst) og rumfang af porer >0.03 mm (nederst) i 50 cm dybde fire år efter forsøgsbehandlingernes ophør for parceller uden eksperimentel trafik (blå søjler) og pakkede forsøgsparceller (grønne søjler; Aarslev og Flakkebjerg: M8; Taastrup: M6). Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).

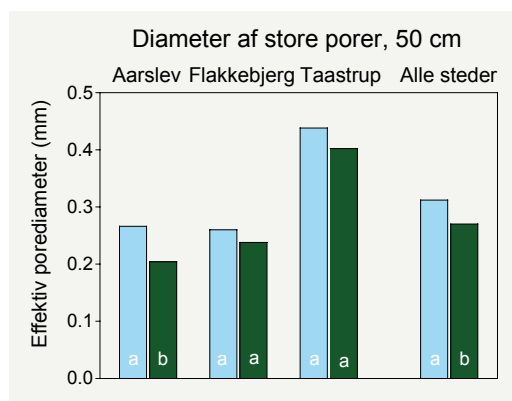


**FIGUR 8.** Gasdiffusion (øverst) og luftledningsevne (nederst) i 50 cm dybde fire år efter forsøgsbehandlingernes ophør for parceller uden eksperimentel trafik (blå søjler) og pakkede forsøgsparceller (grønne søjler; Aarslev og Flakkebjerg: M8; Taastrup: M6). Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).

For både 30 og 50 cm dybde, og på alle tre forsøgssteder, har pakningen (M6 og M8) givet anledning til en statistisk sikker forøgelse af jordtætheden. I 30 cm dybde er der målt meget høje værdier 1,75 (Flakkebjerg), 1,77 (Taastrup) og 1,80 (Aarslev) g pr.  $\text{cm}^3$  (figur 4, øverst).

Den forøgede tæthed i den forsøgs-overkørte jord afspejler sig i rumfanget af luftfyldte porer ved forårets vandindhold (porer > 0,03 mm, figur 4 og 7 nederst). Også her ses en statistisk sikker effekt alle tre forsøgssteder og for begge dybder. I den meget tætte jord lige under pløjedybden er der i de pakkede parceller målt under 0,10  $\text{m}^3$  pr.  $\text{m}^3$ , som udtrykker en rund tommelfingerregel om det mindste luftfyldte porerumfang til sikring af et tilstrækkeligt luftskifte i jorden (figur 4, nederst).

Jordens evne til at lede luft ved diffusion og ved massestrømning er vist i figur 5 og 8. Bemærk, at den neder-



**FIGUR 9.** Modelberegnet diameter af lodrette porer i jorden i 50 cm dybde fire år efter forsøgsbehandlingernes ophør for parceller uden eksperimentel trafik (blå søjler) og pakkede forsøgsparceller (grønne søjler; Aarslev og Flakkebjerg: M8; Taastrup: M6). Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).

ste delfigur med luftledningsevne viser resultaterne i en logaritmisk skala. Luftsiftet i jorden foregår mest ved diffusion. En tommelfingerregel siger, at der sker begyndende hæmning af luftsiftet med en relativ diffusivitet i området fra cirka 0,005 til 0,02. Det vil sige, når diffusionen i jorden er fra 5 til 20 promille af diffusionen i fri luft. Resultaterne viser derfor, at luftsiftetebetingelserne generelt er dårlige især i 30 cm dybde (figur 5, øverst). Igen er der tale om statistisk sikker effekt af pakning for alle forsøgssteder og begge måledybder. Luftledningsevne-resultaterne giver et indtryk af mulighederne for borttransport af vand ved overskudsnedbør, som dermed også er signifikant påvirket af pakningen (se også figur 10).

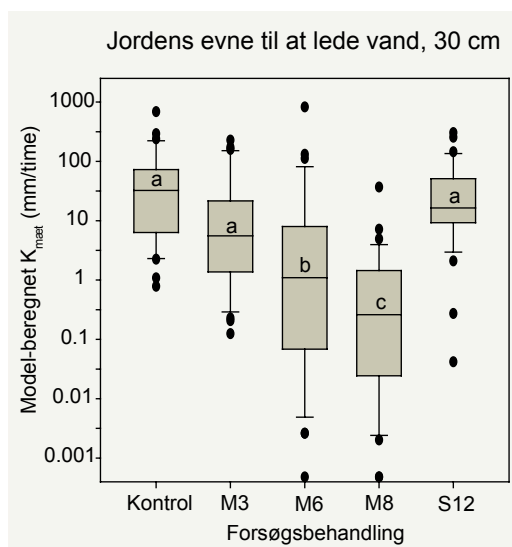
I figur 3 og 6 er der vist en såkaldt effektiv porediameter. Ved kombination af de foretagne målinger er det muligt at beregne en omtrentlig (effektiv/gennemsnitlig) diameter af de luftfyldte porer, der var aktive, når jorden var afdrænet til det anvendte vandindhold (svarende til såkaldt markkapacitet). Det fremgår, at pakningen i begge dybder har givet en formindskelse af denne diameter, dog ikke statistisk signifikant for 50 cm dybde i Flakkebjerg og Taastrup. Resultatet viser, at de gennemsnitlige, lodrette (idet prøverne er udtaget lodret) bioporer (rodkanaler m.m.) i jorden er blevet mindre. Andre undersøgelser har vist, at pakning også giver anledning til lukning og afsnøring af mindre porer, der grener sig ud fra de overvejende lodrette porer. Dette kan ikke afdekkes med de aktuelle undersøgelser, men kan have stor betydning for luftsiftet i jordprofilen som sådan.

Opsummerende viser resultaterne fra 2017-udtagningerne, at pakningseffekten i høj grad findes også fire år efter afslutning af den eksperimentelle trafik. Dette er i overensstemmelse med andre (internationale) forsøgsserier og påpeger nødvendigheden af at være opmærksom på pakningstruslen. Ud fra niveauet af udbytteeffekten vil nogen måske vurdere, at problemet ikke er markant. Man skal dog være opmærksom på, at de her fundne effekter på jordstrukturen kan få betydning også for dyrkningsikkerheden. Endvidere er der generel viden om, at mindskede muligheder for luftsifte kan påvirke biologiske og kemiske processer af betydning for det omgivende miljø, herunder at der afgives klimagas-ser fra jorden.

## Betydning af hjullast, dæktype, dæktryk, gentagne overkørsler og trækraftbehov

Umiddelbart efter den tredje eksperimentelle trafik i foråret 2012 blev der udtaget jordprøver i 30 cm dybde i Aarslev. Udvalgte resultater fra denne udtagning er vist i Oversigten over Landsforsøgene 2012. På grundlag af målingerne af luftledningsevne er det muligt at beregne et estimat for jordens vandledningsevne (figur 10). De såkaldte boxplots skal læses på den måde, at den mest typiske værdi ses som den vandrette streg inde i hver af de grå bokse. Længden af boksene angiver området med estimeret vandledningsevne for 25 til 75 procent af de udtagne jordprøver. Bemærk, at vandledningsevnen vises i en logaritmisk skala.

Figur 10 viser, hvorledes den stigende hjullast/trækraft for forsøgsbehandlingerne M3 til M8 giver en markant reduktion i jordens evne til at lede vand i 30 cm dybde. Behandling M6 og M8 er signifikant forskellige fra upakket jord. Bemærkelsesværdigt er der kun sket en moderat mindskelse af vandledningsevnen ved S12 behandlingen. Dette på trods af den store hjullast på cirka 12 tons ved kørsel med den selvkørende, trehjulede maskine. Både disse og andre resultater (se Oversigten over Landsforsøgene 2012) viser altså, at der er mere på spil end hjullasten. Det bør nævnes, at målinger af jordens penetreringsmodstand viste den højeste værdi ved behandling S12 under 60 cm dybde (dog ikke statistisk



**FIGUR 10.** Model-beregnet vandledningsevne i 30 cm dybde for forsøgsbehandlingerne i Aarslev. Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).

signifikant). Dette antyder, at den generelle viden om, at høj hullast giver store trykkræfter i stor dybde, er korrekt (vist med statistisk sikkerhed i en række andre undersøgelser). Anvendelse af meget store hullaster bør derfor stadig så vidt muligt undgås. Imidlertid har forsøget i Aarslev og herunder resultaterne i figur 10 åbnet øjnene for andre aspekter end hullasten i pakningsproblematikken.

Som tidligere nævnt, er det formodentlig en kombination af de gentagne hjulpassager og de meget høje trækkræfter ved traktor-trailer kombinationen, der giver de markante effekter på jordstrukturen ned til i hvert fald 50 cm dybde. I 2013 blev der gennemført et ekstra forsøg med behandling M8 og S12 i Aarslev (afrapporteret i Oversigten over Landsforsøgene 2013). I den forbindelse målte vi meget større kræfter (både i 30 og 50 cm dybde) sideværts fra hjulene i M8 end i S12. Andre undersøgelser har vist, at en traktor, der trækker en tung vogn, udsætter jorden for meget store kræfter horisontalt også i kørselsretningen. Ved ekstraprojektet i 2013 målte vi markant større effekt på jordstrukturen for M8 end for S12 både under hjulene, i kanten af dækkene og uden for sporene. Også roddybden i vårbyg sået efter den eksperimentelle trafik i foråret blev påvirket, især i kanten af hjulene. Se Oversigt over Landsforsøgene 2013 for en omtale af disse resultater.

Konklusion og anbefalinger

Forsøgsserien med pakning ved Aarslev, Flakkebjerg og Taastup har givet meget værdifuld, ny viden om effekten af trafik på markerne. Målingerne fra 2017 viser meget sikkert, at der må forventes en blivende effekt på jordstrukturen ned til i hvert fald 50 cm dybde ved brug af traktor-trailer systemer med hullaster på 6-8 tons og den dertil hørende stærke trækraft. Effekten på udbyttet, der er målt som gennemsnit af forsøgsparcellerne, kan virke moderat og ikke alarmerende. Det er dog stærkt bekymrende, at effekten på strukturen må formodes at være meget langvarig. En række undersøgelser har vist, at pakningsskader under pløjedybde stort set er permanente. Undersøgelserne af den mulige effekt af efterafgrøder (se afsnit herom) viser da også, at biologien vil have meget svært ved/have brug for meget lang tid til udbedring af de skader, som trafikken har givet. Pakningseffekten på jordens porer og deres funktion kan meget vel give anledning til en mindskelse af dyrknings-sikkerheden, så plantevæksten og udbyttet – især ved moderat kvælstofgødskning – kan blive særligt påvirket i

tørre og våde vækstår. Desuden vil den reducerede evne til at lede luft og vand meget sandsynligt øge påvirkningen af det omgivende miljø, herunder afgivelsen af drivhusgasser fra jorden.

Forsøgsserien har vist, at høje hullaster ikke nødvendigvis er det største problem ved maskinerne. Det kan stærkt anbefales at mindske antallet af gentagne hjuloverkørsler samt især trækraftbehovet for de trækende hjul. Dette kan opnås ved selvkørende maskiner, f.eks. Vervæet, som er brugt i forsøgssled S12 i denne forsøgsserie. Det er dog også muligt at indføre træk på flere aksler i maskiner med gentagne hjuloverkørsler. Nogle gyllevogne giver således i dag mulighed for træk på gyllevognens aksler.

Forsøg med biologisk jordløsning

> PROFESSOR LARS J. MUNKHOLM,  
INSTITUT FOR AGROØKOLOGI, AU

I pakningsforsøgene har vi set på betydningen af biologisk jordløsning med planter med kraftig og dybgående rodvækst. Danske og udenlandske forsøg har tidligere vist en jordforbedrende effekt af at dyrke kraftige pælerodsplanter i pakket underjord. Spørgsmålet var om biologisk jordløsning ville være effektiv i de stærkt pakkede behandlinger i de langvarige pakningsforsøg.

I årene 2013-16 dyrkede vi olieræddike, som efterafgrøde fire år i træk i halvdelen af parcellerne og målte effekten på underjordens struktur i foråret 2017.

Efterafgrøden havde positiv eftervirkningseffekt på udbyttet i Taastrup og Flakkebjerg indtil 2020. Den positive eftervirkning kunne dog ikke forklares med biologisk jordløsning af den pakkede underjord. I 2017 målte vi

TABEL 8. Effekt af olieræddike efterafgrøde på volumenvægt samt luftfyldt porevolumen og luftledningsevne målt ved jordens vandindhold om foråret, før plantevæksten går i gang (O8)

| Dybde, cm | Volumenvægt, g/cm³ |                  | Luftfyldt porevolumen, % |                  | Luftledningsevne, µm² |                  |
|-----------|--------------------|------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|------------------|
|           | Uden efterafgrøde  | Med efterafgrøde | Uden efterafgrøde        | Med efterafgrøde | Uden efterafgrøde     | Med efterafgrøde |
| 30        | 1,71               | 1,72             | 10                       | 9                | 9,2                   | 9,7              |
| 50        | 1,65               | 1,65             | 13                       | 12               | 29,6                  | 25,3             |

ingen effekt på en række jordfysiske egenskaber – herunder volumenvægt, luftfyldt porevolumen og luftledningsevne (se tabel 8) (Pulido-Moncada m.fl. 2020. Soil Sci Soc Am J 84, 717-730).

I 2017 begyndte vi et screeningsforsøg i samarbejde med DLF med otte forskellige afgrøder. Forsøget lå ved siden af det langvarige pakningsforsøg i Flakkebjerg (JB6). Vårbyg som kontrol blev sammenlignet med lupin, structurator (ræddike), lucerne, cikorie, strandsvingel, rajsvingel og hundegræs. Vårbyg, lupin og structurator er etableret hvert år, mens de øvrige er flerårige. I september 2019 blev der udtaget ringprøver i naturlig lejring fra 30-40 cm dybde i vårbyg, cikorie, lucerne og strandsvingel. Prøverne blev udtaget i lodret og vandret retning for at beskrive funktionen af jordens porer i forskellige retninger og sammenholde resultaterne med rodobservationer i juli 2019 (Pulido-Moncada m.fl. 2022, Geoderma (accepteret)). I laboratoriet blev prøvernes vandindhold justeret til jordens vandindhold om foråret, før plantevæksten går i gang. Jordens luftfyldte porevolumen (volumenet af porer >0,03 mm) og dens luftledningsevne blev målt. Herefter blev prøverne CT-skannet på Aarhus Universitetshospital. Rodmålinger i juli 2019 (Oversigt over Landsforsøgene 2020 s. 251-253) viste, at vårbyg har et fint forgrenet system af fine rødder i pløjelaget, men få rødder i underjorden. Cikorie og lucerne har begge lodretgående pælerødder og god evne til at vokse i pakket underjord. Strandsvingel har et forgrenet rodsystem med mange tynde rødder (trævlerødder). Jordprøverne

viste, at volumenvægten er omkring 1,75 g pr. cm<sup>3</sup> og det luftfyldte porevolumen 7-9 procent for alle behandlingerne med en tendens til lavest volumenvægt for cikorie og lucerne. Det viste, at underjorden var stærkt pakket, og at afgrøderne ikke var i stand til generelt at løsne jorden i 30 cm dybde. Derimod viste resultaterne, at lucerne og cikorie forbedrede luftledningsevnen i lodret sammenlignet med vandret retning, mens der ikke var sikker forskel for vårbyg og strandsvingel (figur 11).

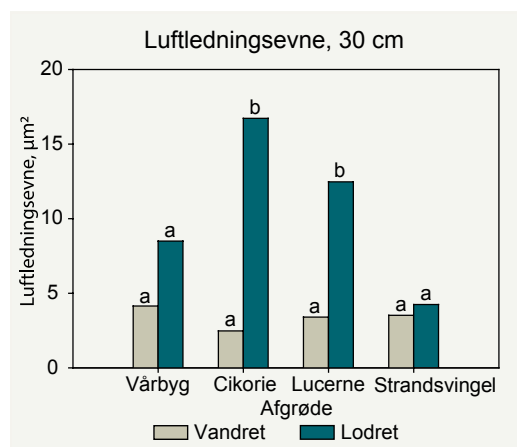
For disse blev der målt kritisk lave værdier i både vandret og lodret retning. Øget luftledningsevne er en indikator for forbedret afdræningsevne under våde forhold. Forøgelsen i luftledningsevnen for lucerne og cikorie i lodret retning relateres til bioporer dannet som følge af kraftige lodretgående rødder. CT-skanningsbilleder bekræfter, at der blev dannet flere sammenhængende lodrette porer i lucerne og cikorie sammenlignet med vårbyg (figur 12). Disse er af meget stor betydning for afdræningsevnen og dermed for jordens dyrkningsikkerhed i et klima med mere nedbør om vinteren og flere skybrud. Der er behov for at udvikle arter og blandinger til biologisk jordløsning af pakket underjord. Det gælder særligt i 25-40 cm dybde, hvor jorden generelt set er pakket på grund af mange års kørsel med tunge maskiner og redskaber (pløjesål). Der er især et behov for undersøgelser af effekten af at dyrke blandinger af arter med dybdegående rodvækst, f.eks. lucerne og cikorie kombineret med dybdegående græsser.

## Særlige undersøgelser i Taastrup

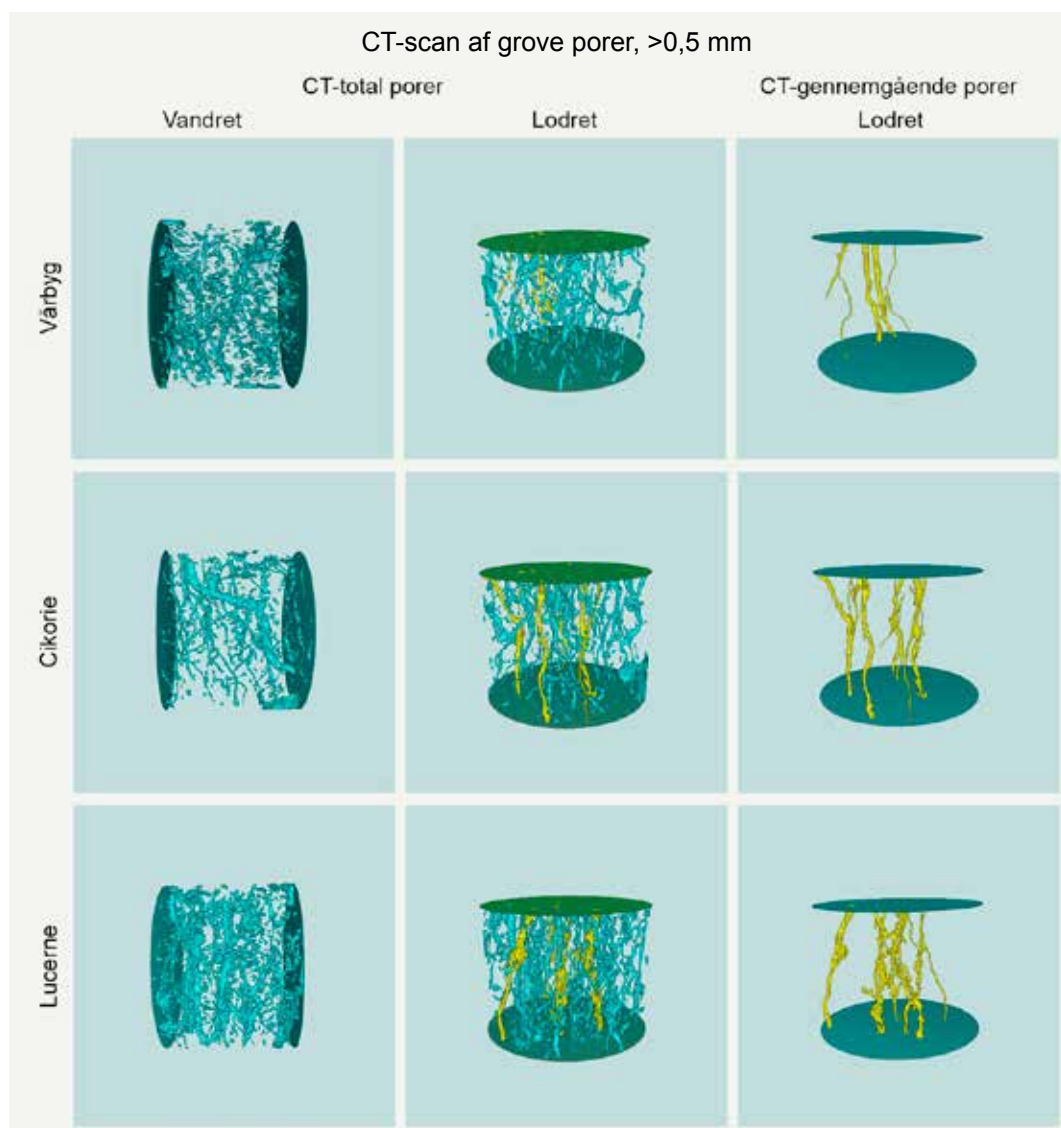
> **LEKTOR CARSTEN TILBÆK PETERSEN,**  
INSTITUT FOR PLANTE- OG MILJØVIDENSKAB, KU OG  
**POSTDOC SØREN DALSGAARD PETERSEN,**  
DTU BIOENGINEERING, INSTITUT FOR BIOTEKNOLOGI  
OG BIOMEDICIN

### Vandindhold og vandbalance

I årene 2017-19 blev der i Taastrup målt eftervirkninger af pakning med 6 ton hjullast på jordprofilets vandindhold i jordlag ned til 110 cm dybde samt på planternes vandoptagelse fra profilet. Dette for at undersøge jordens evne til at opmagasinere og transportere vand samt rodudvikling og rodfunktion. Målingerne blev gennemført såvel i perioder med overskudsnedbør i efterår og forår som gennem vækstsæsonerne med delvis udtør-



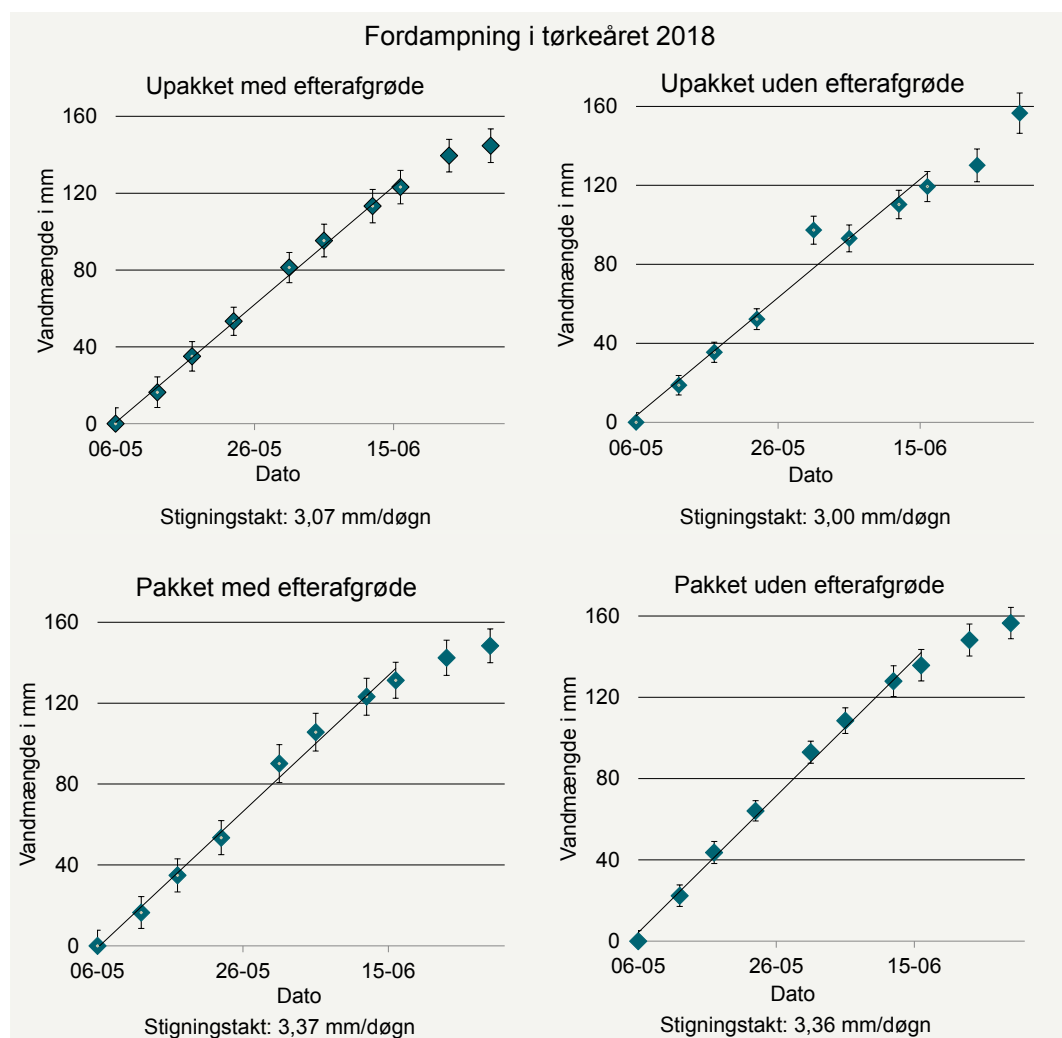
**FIGUR 11.** Luftledningsevne i 30-40 cm dybde i vandret og lodret retning målt ved jordens vandindhold om foråret, før plantevæksten går i gang. Søjler med forskellige bogstaver er signifikant forskellige ( $P=0,05$ ).



**FIGUR 12.** CT-skanningsbilleder af jordens grove porer (>0,5 mm) i vandret og lodretgående retning i 30-40 cm dybde for vårbyg, cikorie og lucerne. De gule porer er sammenhængende fra top til bund i jordprøven.

ring af planternes rodzone. Der blev fundet signifikant ringere afdræning af såvel overjord som af den pakke underjord ned til cirka 45 cm dybde (Oversigt over Landsforsøgene 2017-19). Særligt bemærkelsesværdigt var det, at man stadig kunne måle ringere afdræning af pløjelaget over underjord, der blev pakket i årene 2010-13, selvom jorden pløjes hvert efterår. Effekterne afhænger af, hvornår der måles set i forhold til faktorer som nedbørsmønster og grundvandsstand.

Grundvandsstanden varierer inden for det drænedes forsøgsareal, og særligt høj grundvandsstand med negativ effekt på afvandingen blev observeret i tilknytning til blok 2 i arealets sydvestlige hjørne. Se Schjøning m.fl. 2011, AU Intern Rapport 108, for beskrivelse af forsøgsarealet og Oversigt over Landsforsøgene 2018, mens blok 3 i arealets nordøstlige hjørne overordnet synes at være den bedst afvandede forsøgsblok. Jordens oprindelige følsomhed over for pakningsbehandlinger, der gennemførtes om foråret før såning, kan dermed være



**FIGUR 13.** Opsummeret fordampning for perioden 6. maj til 29. juni 2018 beregnet som nedbør plus nedgang i rodzonens vandindhold (0-110 cm dybde). Resultaterne er vist for upakkeparceller og parceller pakket med 6 ton hjullast i årene 2010-13, hhv. med og uden efterafgrøde i årene 2013-16 (gennemsnitsværdier  $\pm$  standardfej;  $n=8$ ). Der indgår i alt 7680 separate observationer af jordens vandindhold. Fordampningen er nogenlunde konstant i perioden 6. maj – 16. juni og er vist som stigningstakter på figuren.

påvirket af stedvist varierende grundvandsstand. Omvendt kan grundvandsstanden tænkes at være påvirket af behandlingerne, hvis effekter rækker langt ned i underjorden, endda på en måde, som ikke kan isoleres til den enkelte parcel. Målinger og forsøgsdesign giver ikke mulighed for at analysere sådanne sammenhænge.

I 2018 blev der dyrket vinterhvede, og vækstsæsonen var helt usædvanligt nedbørsfattig og fordampningskrævende (Oversigt over Landsforsøgene 2018). Hvis forsøgsbehandlingerne i væsentlig grad påvirkede rod-

nedtrængning og vandoptagelse fra jordprofilen burde dette derfor komme til udtryk. Ser man indledningsvist bort fra eventuelle, mindre vandbevægelser ved bunden af rodzonen (afdræning og kapillær vandstigning), kan vandforbruget til fordampning beregnes efter vandbalancemetoden som nedbør plus nedgang i rodzonens vandindhold. Gennemsnitsværdier for opsummeret fordampning for 0-110 cm jorddybde og regnet fra 6. maj 2018 ses i figur 13. Stigningstakterne udtrykker fordampningen i mm per døgn. Disse er nogenlunde konstante indtil cirka midten af juni og derpå aftagende

i overensstemmelse med, at afgrøden modner og vandforbruget daler. Som gennemsnit for perioden indtil 16. juni bestemmes, at fordampningen ligger mellem 3,0 og 3,4 mm pr. døgn med tendens til lidt højere værdier i de pakkede led (figur 13).

Der var tendens til større vandoptagelse i dybe jordlag (90-110 cm) i de upakkede led i juni (ikke vist). Tendensen kan forklares ved, at der var ringere afdræning af især jordlagene lige under pløjelaget i den pakkede jord, hvorfra der påviseligt hentes mere vand til fordampning. Der er således ikke dokumentation for, at pakningen med 6 ton hjullast i 2010-13 hæmmede rodnedtrængning og hvedens samlede vandoptagelse i tørkeåret 2018. Målingerne understøttes af, at der heller ikke målttes sikre effekter på kerneudbyttet. Efterafgrøden (olieræddike) havde ikke nogen målbar indvirkning, hverken på den samlede vandoptagelse (figur 13) eller på, hvor i profilet vandet blev hentet. Der er dermed heller ikke dokumentation for at olieræddike som efterafgrøde på længere sigt kan fremme hovedafgrødens rodudvikling i dybden på pakket jord og derved lette adgangen til vand. Når den tidligere efterafgrøde samme år uanset pakningsbehandlingen havde positiv indvirkning på kerneudbyttet i hvede (se nedenfor), skyldtes det derfor næppe bedre rodnedtrængning og øget vandoptagelse.

Vandbalanceberegninger for centrale dele af vækstsæsonen i 2019 viste, at årets hvedeafgrøde uanset forsøgsbehandlingerne hentede betydelige vandmængder (mindst cirka 15 procent) fra jorden under 110 cm dybde uden tilnærmelsesvist at tømme vandlageret i 0-110 cm dybde (se Oversigt over Landsforsøgene 2019). Vandoptagelse fra jorden under 110 cm kan være delvist baseret på dyb rodudvikling og delvist på kapillær vandhævning til området over 110 cm.

### Konklusion på jordvandmålingerne i 2017-19:

1. Der er ikke fundet sikre tegn på, at forsøgsfaktorerne (pakning med 6 ton hjullast i 2010-13 og olieræddike som efterafgrøde i 2013-16) påvirkede rodaktivitet i dybden eller vandoptagelse fra rodzonen som helhed. Dette er specielt bemærkelsesværdigt for tørkeåret 2018, hvor efterspørgslen på vand i dybden var stor.
2. Tung trafik i årene 2010-13 (6 ton hjullast) resulterede i 2017-19 i forringet afdræning af såvel overjord, der hvert år løsnes ved pløjning, som pakkede jordlag

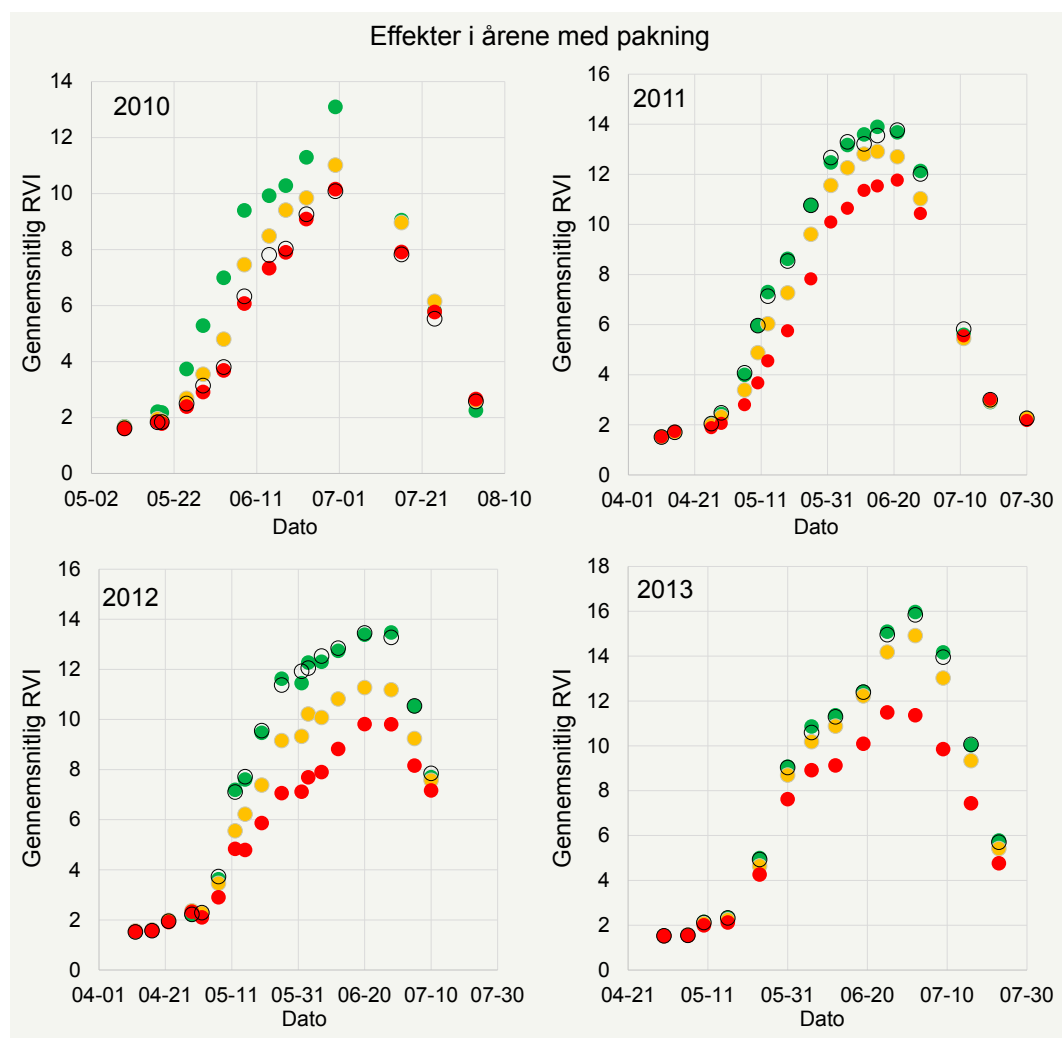
under pløjelaget. Effekterne afhænger af, hvornår der måles set i forhold til faktorer som nedbørsmønstre og grundvandsstand.

### Modelberegning af effekter på kvælstofhusholdningen

Pakningens langsigtede indvirkning på kvælstofhusholdningen er undersøgt i et modelstudium med jordplante-atmosfæremodellen Daisy (Petersen, C.T., Abrahamsen, P. 2021. Predicting effects of soil compaction on crop yield and nitrogen dynamics. Dept. of Plant and Env. Sciences, Univ. of Copenhagen. 45 pp. [https://daisy.ku.dk/about-daisy/projects/commit/Simulating\\_compaction\\_effects\\_gudp.pdf](https://daisy.ku.dk/about-daisy/projects/commit/Simulating_compaction_effects_gudp.pdf)). Beregningerne baseres på målte fysiske egenskaber i den upakkede jord og i jord pakket med 6 ton hjullast, herunder porøsitet, permeabilitet, vandretention og afdræning, og de gennemføres både for veldrænede og dårligt drænede jordbundsforhold svarende til yderligheder observeret på forsøgsarealet. Her gengives kun hovedresultater vedrørende kvælstofbalancer i vårbyg dyrket med og uden olieræddike som efterafgrøde.

Ved modelleringen tilføres hvert forår 115 kg kvælstof pr. ha i NPK-gødning i forbindelse med jordbearbejdning. Vårbyg med efterafgrøde tilføres derudover 30 kg kvælstof pr. ha ved såning af efterafgrøden lige efter høst. Modelberegningerne viser, at der i gennemsnit for 100 år med varierende, østdanske vejrforhold forventeligt, og såvel med som uden efterafgrøde, høstes mindre kvælstof (protein) i kerner, hvor jorden er pakket (op til 11 kg kvælstof pr. ha pr. år på veldrænet jord svarende til 9 procent. Beregningerne gennemføres for de mange år for at opnå gennemsnit, der ikke påvirkes af variation i vejret, ikke for at opnå akkumulerende langtidseffekter på jorden. Der beregnes kun små gennemsnitlige tab af tørstofudbytte i kerner (op til cirka et hkg kerne pr. ha pr. år). Det betyder, at pakning af underjorden forventes at resultere i lavere kvælstofkoncentration i kernerne. Der høstes markant mindre kvælstof i kerner, hvis jorden er dårligt drænet, end hvis den er veldrænet (cirka 21 kg kvælstof pr. ha pr. år), men tabet som følge af jordpakning er isoleret set lidt mindre (op til ni kg kvælstof pr. ha pr. år). Der høstes lidt mere kvælstof i kerner, hvor der også dyrkes en efterafgrøde (op til cirka fire kg kvælstof pr. ha pr. år).

Den beregnede nedgang i mængden af høstet kvælstof på pakket jord må nødvendigvis ende et andet sted i



**FIGUR 14.** Gennemsnitlig RVI-værdi ( $n=32$ ) målt for de fire pakningsbehandlinger, hhv. upakket (grønne symboler), 3 ton hjullast (gule symboler), 6 ton hjullast (røde symboler) og 8 ton hjullast i ét år (2010; åbne sorte symboler). Data for 2010-13.

regnskabet. Beregningerne siger, at hovedparten ender som øgede gasformige tab til atmosfæren ved denitrifikation (op til gennemsnitligt 11 kg kvælstof pr. ha pr. år på veldrænet jord svarende til forøgelse på op til 50 procent). Dyrkningen af vårbyg er forbundet med en nedgang i jordens indhold af organisk stof og dermed organisk bundet kvælstof, men denne nedgang er en smule mindre på pakket jord end på upakket jord (cirka 10 kg kvælstof pr. ha pr. år). Nedgangen er desuden markant mindre, hvor vårbygdyrkningen kombineres med olieræddike som efterafgrøde (op til cirka 31 kg kvælstof pr. ha pr. år). Tabene ved denitrifikation er større på dårligt drænet jord end på veldrænet jord (ekstra ca. 12

kg kvælstof pr. ha pr. år), men tabene grundet pakning er isoleret set mindre på dårligt drænet jord end på veldrænet jord (op til gennemsnitligt fem kg kvælstof pr. ha pr. år). Denitrifikationen er større, hvor der dyrkes en efterafgrøde (op til ekstra 10 kg kvælstof pr. ha pr. år på dårligt drænet jord). Kvælstofudvaskningen til dræn er en smule større på pakket jord (op til fire kg kvælstof pr. ha pr. år på dårligt drænet jord).

Modelberegningerne sandsynliggør dermed, at pakning med 6 ton hjullast på Taastrup-lokaliteten på lang sigt er forbundet med ekstra tab af kvælstof til atmosfæren ved denitrifikation, lidt lavere gennemsnitsudbytter samt

lavere proteinindhold i kerner. Det er ikke ligetil at verificere alle disse beregninger med målinger. Målingerne viser ganske vist, at der i gennemsnit for byg og hvede i årene efter pakningens ophør (2014-2020) høstes lidt lavere udbytter på pakket jord (2,5 hkg kerne pr. ha pr. år eller 2,0 hkg kerne pr. ha pr. år, hvis man alene indregner årene med vårbyg; se tabel 9), men lagringen af organisk bundet kvælstof i jorden samt denitrifikationens størrelse kendes ikke, og begge størrelser er i øvrigt yderst svære at måle under markforhold.

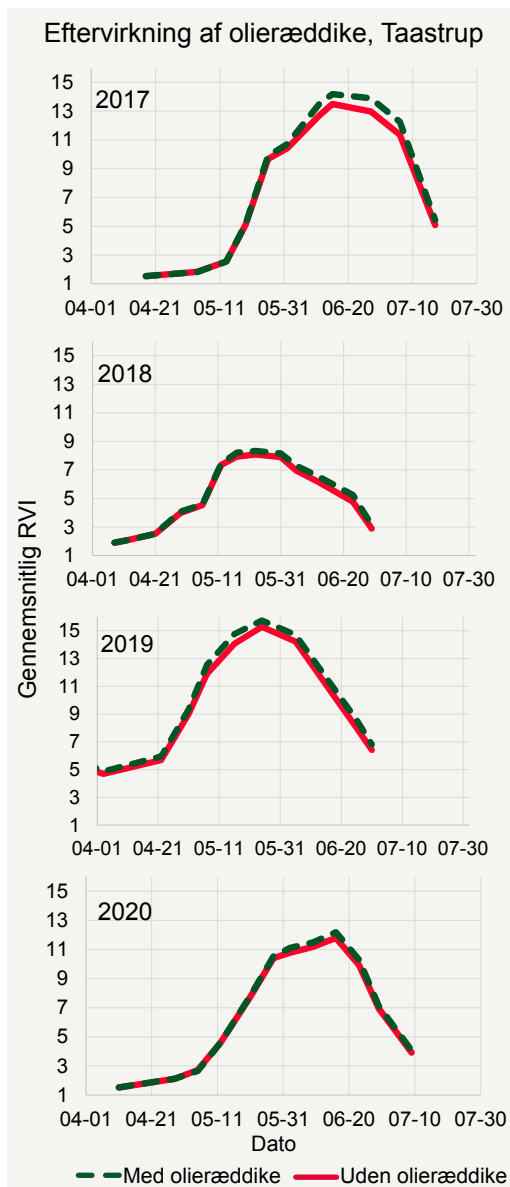
Nitratudvaskningen kendes heller ikke, og der er kun målt kvælstofindhold i kerner i et enkelt år (2019).

Modelberegningerne viser dog, at der er potentiale for en væsentlig forbedring af kvælstofhusholdningen gennem forebyggelse af jordpakning og vedligeholdelse af drænsystemer. Brugen af olieræddike som efterafgrøde inklusiv ekstra 30 kg kvælstof pr. ha pr. år tilført ved høst har også en række positive effekter, men den øgede denitrifikation med risiko for øget produktion af lattergas trækker i den forkerte retning.

### Forsøgsbehandlingernes indflydelse på RVI

RVI (Relativ VegetationsIndeks) er målt på samme måde i alle forsøgsparceller gennem alle år. RVI afspejler med visse begrænsninger mængden af grøn vegetation, som påvirkes af vækstbetingelserne, herunder adgangen til vand og kvælstof. Målingerne er gennemført i detaljer af Petersen, C.T., Jensen, C.R., Mogensen, V.O. 2002. Communications in Soil Science and Plant Analysis 33: 1485-1506.

Alle RVI-målinger og deres eventuelle sammenhæng med forsøgsbehandlingerne er rapporteret i de årlige udgaver af Oversigt over Landsforsøgene 2010-20, og resultater for enkeltårene gentages ikke her i detaljer. Når RVI afbildes som funktion af tidspunktet i sæsonen opnås en form for vækstkurve. Der er generelt i enkeltårene observeret rigtig god sammenhæng mellem kurvernes forløb og høstudbytter. Generelt var der i de første år (2010-13), hvor pakningsbehandlingerne blev gennemført, store og meget sikre effekter af pakning (se figur 14). Kørsel med høj hjullast mindsker RVI-værdier målt midt i vækstsæsonen. Behandlingen med 8 ton hjullast blev kun gennemført én gang (i foråret 2010) i modsætning til behandlingerne 3 og 6 ton hjullast, der blev gennemført hvert år fra 2010-13. I 2010 var der ikke



**FIGUR 15.** Gennemsnitlig RVI-værdi (n=128) målt hhv. i parceller med olieræddike som efterafgrøde i årene 2013-16 (stipede kurver) og uden efterafgrøde (røde kurver). Data for 2017-20. I 2017 og 2020 dyrkes vårbyg, i 2018 og 2019 vinterhvede. Der er positiv eftervirkning i alle årene.

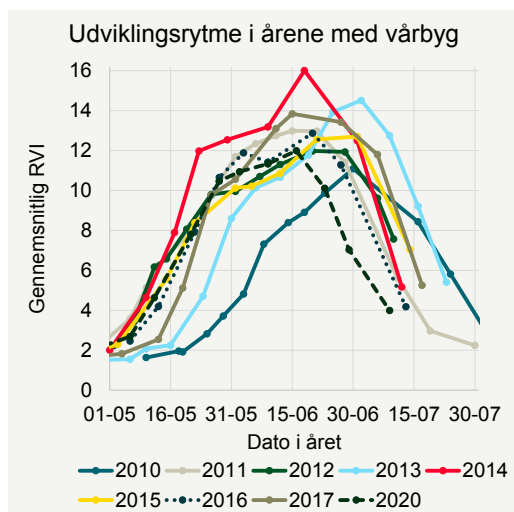
klare forskelle mellem 6 og 8 ton hjullast, og effekten af 8 ton hjullast i 2010 syntes at være helt forsvundet allerede i 2011. Jordens følsomhed over for pakning, der påvirkes af vandindholdet, var sandsynligvis forskellig i de fire år. Sammenlignet med det upakkede led var RVI

i alle år mindre, hvor der var pakket med 3 og 6 ton hjullast og lavest med 6 ton hjullast.

Der var fortsat i årene 2014 og 2016 små, men meget sikre, negative eftervirkninger på RVI af overkørsel med 6 ton hjullast i årene 2010-13, men for de øvrige år (2015, 2017-20) og pakningsbehandlinger sås generelt ikke nogen klar nedgang i RVI.

I perioden 2014-2020 blev der derimod hvert år målt statistisk sikre, positive effekter af olieræddike som efterafgrøde. Olieræddiken blev etableret ved høst i årene 2013-16 hjulpet i gang af ekstra 30 kg kvælstof pr. ha. Effekterne var der selv i tørkeåret 2018 og ender med at blive ganske små i 2020 (figur 15).

Hveden opnåede i tørkeåret 2018 kun en maksimal gennemsnitlig RVI-værdi på cirka 8,5 mens hvedens RVI i 2019 toppede ved en gennemsnitlig værdi på cirka 15,5. Det ses også, at hveden var langt bedre udviklet i starten af april 2019 end på samme tidspunkt i 2018. Hveden blev etableret sent i det våde efterår 2017 og det kolde tidlige forår 2018. Maksimal RVI-værdi måles normalt i tidsrummet omkring skridning. Fuldt afgrødedække opnås ved RVI-værdier på 12-13. Tør og bar jord efter såbedstilberedning har en RVI-værdi på cirka 1,52, mens en helt moden og tæt kornafgrøde har en RVI-værdi på cirka 2,4.



**FIGUR 16.** Gennemsnitligt RVI målt i vårbyg i årene 2010-17 samt 2020 som funktion af dato i året. Det fremgår, at årsvariationen er stor.

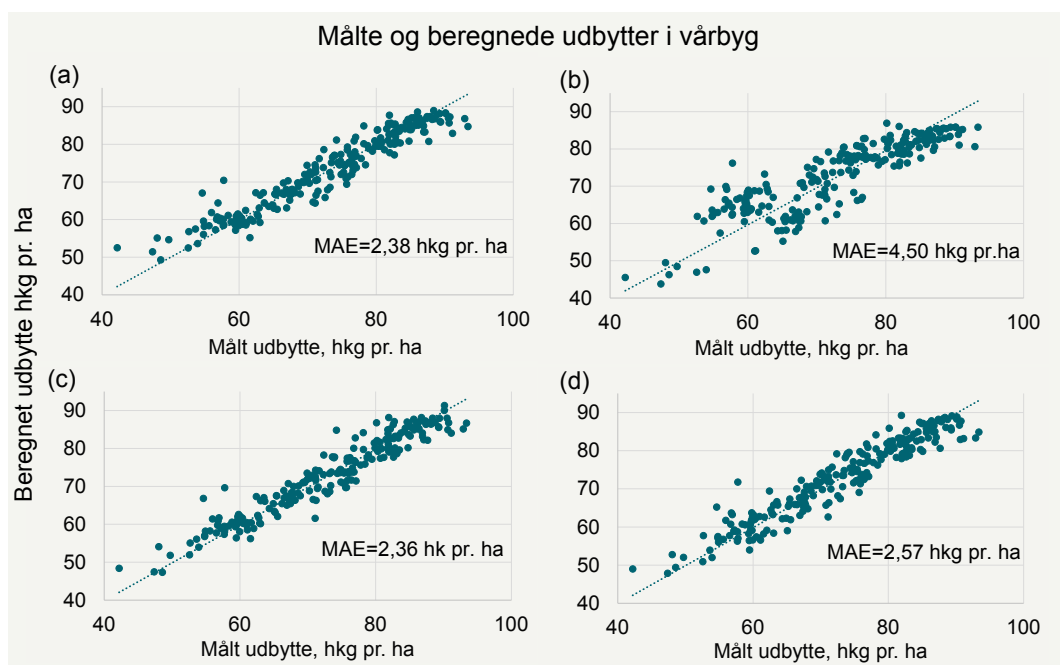
I en samlet oversigt afslører vækstkurverne, at vårbyg-ens udvikling og udviklingsrytme (forskellige sorter) varierede meget imellem årene (figur 16). Dette vanskeliggjorde i nogen grad analysen af sammenhænge mellem RVI-målinger og høstudbytter på tværs af årene. Topudbytter i vårbyg blev opnået i 2014 bare ét år efter pakningsbehandlingernes ophør.

### Sammenhænge mellem RVI og høstudbytter gældende for alle år, 2010-2020

Der er analyseret på måledataene ved brug af programmet AutoML (Automatic Machine Learning) indeholdt i R-programpakken H2O (<https://www.h2o.ai/>). AutoML automatiserer processen med at finde statistiske sammenhænge (det vil sige med at "træne" en lang række af forskellige ML-algoritmer) og med at udvælge den bedste. I den forstand er det måske mere korrekt at kalde AutoML et model-interface. AutoML inddrager blandt andet en algoritme til automatisk bestemmelse af bedste lineære model (GLM; Generalized Linear Model), der kan bruges som reference for andre mere komplekse og ikke-lineære modeller. AutoML kræver ikke nogen forud defineret statistisk model.

Første trin i analysen er at udvælge de mest betydningsfulde inputvariable. Denne proces er ikke ligefrem, men er gjort ud fra bedste faglige vurderinger. Som responsvariabel haves kerneudbyttet høstet i alle 288 kombinationer af parcel og år.

I det efterfølgende, hvor modelberegnete udbytter sammenlignes med målte udbytter, præsenteres alene resultater baseret på såkaldt krydsvaliderede modeller. Der skelnes mellem bedste lineære modeller (GLM) og bedste ikke-lineære modeller (AML). Ved krydsvalideringen opdeles dataene i to grupper, henholdsvis et træningssæt (90 procent) og et testsæt (10 procent). Modellen trænes på de 90 procent og valideres på de 10 procent, som dermed ikke indgår i modeludviklingen. Der roteres således, at alle data bruges ni gange til træning og én gang til validering. Ved inddelingen i trænings- og testdata fordeles dataene nogenlunde ligeligt på forsøgsbehandlinger, forsøgsblokke og årstal styret af AutoML. Der udvikles på denne måde, og for hver ML-algoritme, reelt ti forskellige modeller, men disse sammenvejes i bare én bedste model for hele datasættet, som er grundlag for de rapporterede resultater. Modellerne evalueres på basis af den såkaldte MAE-værdi (Mean Absolute Error), som er gennemsnit-



**FIGUR 17.** Målte og beregnede kerneudbytter i alle forsøgsparcellerne for alle ni år med vårbyg (hkg kerne/ha, 85% tørstof). Beregningerne er gennemført med fire forskellige, krydsvaliderede modeller. (a): Bedste AML model baseret på 2 variable udledt fra RVI-målingerne samt nedbør og referencefordampning målt i juni måned. (b): Bedste GLM model, ellers som (a). (c): som (a) men suppleret med årstal som input. (d): som (b) men suppleret med årstal som input. 1:1 linjen og middelfstanden mellem målte og beregnede udbytter (MAE) vises i alle delfigurer.

tet af afstanden mellem de målte og modelberegne-  
de høstudbytter.

AutoML kan udlede en ganske god, ikke-lineær AML-model for høstudbyttet i de ni år med vårbyg på basis af kun fire inputvariable, nemlig to udledt af RVI-målinger gennemført frem til 30. juni i høståret samt nedbør og referencefordampning i juni måned (figur 17a). Måleværdierne varierer mellem 42,2 og 93,4 hkg pr. ha og de beregnede værdier mellem 44,9 og 90,7 hkg pr. ha. MAE-værdien er 2,38 hkg/ha med en beregnet usikkerhed på 0,49 hkg pr. ha. Den tilsvarende lineære model (figur 17b) er væsentligt ringere ( $MAE=4,50\pm0,60$  hkg pr. ha). Når årstallet inkluderes som ekstra input bliver MAE kun en anelse mindre for den bedste AML-model ( $MAE=2,36\pm0,58$  hkg pr. ha; figur 17c), hvorimod den bedste lineære model bliver meget afgørende bedre ( $MAE=2,57\pm0,66$  hkg pr. ha; figur 17d), og denne er nu næsten på niveau med den bedste ikke-lineære model.

For GLM-algoritmen er det altså nødvendigt at sammenkæde udbytte og årstal, mens oplysninger om nedbør og

fordampningskrav i juni måned rummer nok årsspecifik information for udledning af en god AML-model. Man får derfor problemer, hvis man vil bruge en GLM-model til at forudsige udbytter i et år med ukendt udbyttensiveau, i det mindste med det aktuelle datasæt; her er visse AML-modeller meget bedre. Et eksempel på udbytteprognostisering med en AML-model gennemført 1. juli godt en måned før høst i 2020 er vist i Oversigt over Landsforsøgene 2020.

De bedste modeller fremkommer, når data for vinterhvede i årene 2018 og 2019 udelades. Der kan ikke laves en robust model for vinterhvede baseret på bare to år, men målingerne i vårbyg kan støtte tolkningen af resultater fra hvede. Med det formål er der analyseret som vist i figur 17, men baseret på data fra alle 11 forsøgsår. AML-modellerne kan godt håndtere udfordringen med to forskellige afgrøder, mens dette ikke i nær samme grad er tilfældet med GLM-modellerne. Inkludering af årstallet som inputvariabel har stor positiv effekt på GLM-modellen, men kun lille positiv effekt på AML-modellen. Den bedste AML-model baseret på alle data fra både vårbyg

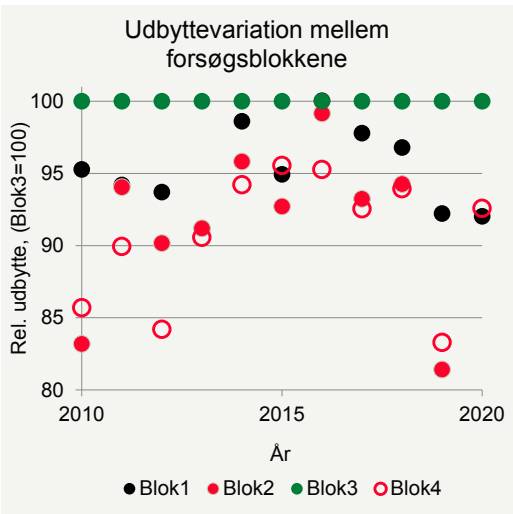
**TABEL 9.** Målte og beregnede gennemsnitsudbytter (hkg kerne/ha) i alle år for alle parceller med den anførte behandling. Beregningerne er lavet med krydsvaliderede modeller. For vårbyg er det gjort med AML-modellen vist i figur 17c, for vinterhvede i årene 2018 og 2019 med en tilsvarende AML-model trænet på såvel vårbyg som vinterhvede. De beregnede værdier er mere sikre for byg (årene 2010-17 samt 2020) end for hvede (årene 2018 og 2019). Efterafgrøden blev etableret første gang efter høst i 2013 (09)

| År   | Pakningsbehandling |          |                |          | Efterafgrøde      |          |                  |          |
|------|--------------------|----------|----------------|----------|-------------------|----------|------------------|----------|
|      | Upakket            |          | 6 ton hjullast |          | Uden efterafgrøde |          | Med efterafgrøde |          |
|      | Målt               | Beregnet | Målt           | Beregnet | Målt              | Beregnet | Målt             | Beregnet |
| 2010 | 65,6               | 63,9     | 50,1           | 53,4     | 57                | 57,4     |                  |          |
| 2011 | 71,1               | 72,1     | 62,7           | 62,9     | 68,5              | 68,6     |                  |          |
| 2012 | 72,7               | 73,7     | 59,2           | 60,0     | 68                | 68,4     |                  |          |
| 2013 | 75,9               | 73,9     | 59,5           | 58,9     | 69,2              | 68,6     |                  |          |
| 2014 | 88,1               | 86,2     | 81,9           | 84,9     | 86,1              | 85,7     | 85,5             | 86,2     |
| 2015 | 83,3               | 81,7     | 80,5           | 81,0     | 79,7              | 79,8     | 85,0             | 83,9     |
| 2016 | 59,6               | 60,4     | 58,5           | 59,5     | 58,0              | 59,6     | 60,5             | 60,2     |
| 2017 | 77,4               | 79,1     | 78,8           | 79,0     | 77,9              | 77,9     | 82,1             | 80,9     |
| 2018 | 71,7               | 69,8     | 68,4           | 70,5     | 68,8              | 70,2     | 71,1             | 70,5     |
| 2019 | 97,0               | 98,5     | 93             | 98,1     | 93,6              | 93,8     | 96,9             | 97,9     |
| 2020 | 67,8               | 68,6     | 66,5           | 68,4     | 68,9              | 68,0     | 69,6             | 69,4     |

og vinterhvede har en MAE-værdi på 2,57 hkg pr. ha. Specifikt for vinterhvede beregnes med denne model en MAE-værdi på 3,21 hkg pr. ha. Vårbyg vægter mest ved træning af modellen, men alligevel er resultatet for hvede ikke dårligt.

Forskellene mellem målte og modelberegnete udbytter i vårbyg i den bedste af ovennævnte modeller (figur 17c) skyldes både usikkerhed på den anvendte AML-model og usikkerhed på de målte udbytter. Det er ikke nemt at afgøre, hvad der betyder mest. Men alene på grund af måleusikkerhed er det næppe muligt at finde en model, der er markant bedre end den viste. Dens lave MAE-værdi på 2,36 hkg kerne pr. ha tyder overordnet set på gode måledata. Modellerede gennemsnitsudbytter ved forskellige behandlinger er sammenholdt med de målte (se tabel 9).

Kerneudbytterne varierer fra år til år og synes i enkeltårerne i højere grad at være stedbundne end relateret til forsøgsbehandlingerne, hvis man ser bort fra de første fire-fem år, hvor pakningsbehandlingerne havde stor indflydelse. Der var eksempelvis betydelig og ret konsistent variation mellem gennemsnitlige høstudbytter opnået gennem årene i de fire forsøgsblokke (figur 18). Udbyttet var altid størst i blok 3 på nær i 2016, hvor det var lige så højt i blok 1. Det var generelt lavest i blok 2 eller



**FIGUR 18.** Relativt udbytte målt i gennemsnit af alle behandlinger i de 4 blokke i alle forsøgsår, idet årsgennemsnittet i Blok 3 hvert år sættes lig med 100.

4. Disse konsistente forskelle tilskrives forskellige former for jordbundsvariation (dræningstilstand, muldlagets tykkelse og tekstur). Vi har ikke tilstrækkeligt detaljerede oplysninger om jordbunden, men det særligt høje udbytt niveau i blok 3 skyldtes sandsynligvis en kombination af alle de nævnte faktorer. Afvandingen var relativt god, muldlaget relativt tykt med mulighed for ekstra kvælstof-mineralisering, og overjordens lerindhold relativt høj (Schjønning m.fl. 2011, AU Intern Rapport 108).

Blokinddelingen er relativt grov. Et mere detaljeret billede af jordbundseffekterne ses i figur 19, hvor fokus er lagt på årene efter pakningens ophør. Det fremgår, at udbytterne var relativt høje i arealets nordøstlige del og relativt lave i den sydlige. Der var endvidere et bælte med lave udbytter, som rakte ind over både blok 1 og 2. Målte relative udbytter varierede imellem 80 og 117 procent af årenes gennemsnitsudbytter. Begge ekstremer fandtes i 2019. Det er interessant, at den største variation i udbytterne fandtes i vinterhvede i 2019, hvor det generelle udbytt niveau var højt, det vil sige første år efter tørkeåret 2018. Målingerne indikerede det år en negativ effekt af pakningen (tabel 9), som imidlertid var størst, hvor der var olieræddike i 2013-16 (se Oversigt over Landsforsøgene 2019). I upakkede parceller høstedes det år i gennemsnit ekstra 16 kg kvælstof pr. ha i kerner, hvor der var olieræddike i 2013-16, men kun ekstra to kg kvælstof pr. ha, hvor jorden blev pakket med 6 ton hjul-

# Udbyttevariation mellem forsøgsparcellerne

| År   | Målte relative udbytter |     |     |    |        |     |     |     | Beregnete relative udbytter |     |     |    |        |     |     |     |
|------|-------------------------|-----|-----|----|--------|-----|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|----|--------|-----|-----|-----|
|      | Blok 2                  |     |     |    | Blok 1 |     |     |     | Blok 2                      |     |     |    | Blok 1 |     |     |     |
| 2014 | 93                      | 100 | 102 | 99 | 96     | 104 | 103 | 103 | 98                          | 101 | 100 | 99 | 98     | 101 | 100 | 101 |
| 2015 | 93                      | 101 | 100 | 93 | 93     | 100 | 102 | 101 | 98                          | 102 | 100 | 94 | 95     | 100 | 98  | 99  |
| 2016 | 98                      | 101 | 105 | 99 | 99     | 101 | 103 | 103 | 100                         | 103 | 101 | 96 | 98     | 103 | 101 | 98  |
| 2017 | 94                      | 101 | 96  | 98 | 100    | 94  | 109 | 105 | 98                          | 101 | 99  | 96 | 97     | 101 | 103 | 103 |
| 2018 | 92                      | 98  | 103 | 99 | 97     | 102 | 103 | 100 | 97                          | 98  | 100 | 98 | 100    | 99  | 102 | 100 |
| 2019 | 80                      | 87  | 104 | 94 | 96     | 105 | 110 | 102 | 94                          | 87  | 106 | 91 | 105    | 106 | 108 | 96  |
| 2020 | 94                      | 104 | 96  | 97 | 93     | 98  | 103 | 99  | 97                          | 98  | 98  | 98 | 98     | 102 | 99  | 102 |

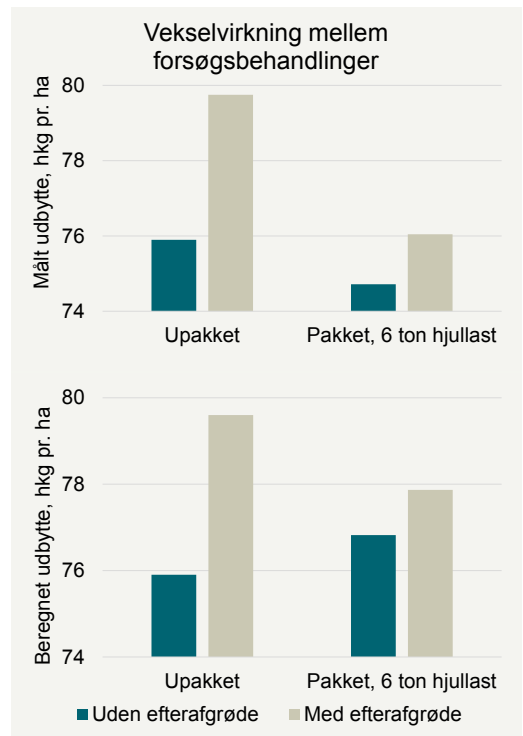
  

|      | Blok 4 |     |     |     | Blok 3 |     |     |     | Blok 4 |     |    |     | Blok 3 |     |     |     |
|------|--------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|--------|-----|----|-----|--------|-----|-----|-----|
|      |        |     |     |     |        |     |     |     |        |     |    |     |        |     |     |     |
| 2014 | 96     | 99  | 102 | 91  | 105    | 102 | 103 | 101 | 102    | 100 | 98 | 98  | 100    | 101 | 101 | 101 |
| 2015 | 100    | 101 | 97  | 100 | 103    | 106 | 104 | 105 | 103    | 97  | 96 | 97  | 102    | 106 | 106 | 106 |
| 2016 | 99     | 96  | 96  | 95  | 101    | 101 | 100 | 103 | 100    | 97  | 98 | 98  | 103    | 103 | 100 | 101 |
| 2017 | 98     | 95  | 93  | 100 | 102    | 102 | 113 | 100 | 98     | 97  | 93 | 98  | 101    | 104 | 106 | 104 |
| 2018 | 100    | 97  | 91  | 102 | 108    | 104 | 103 | 100 | 100    | 93  | 96 | 100 | 105    | 104 | 104 | 104 |
| 2019 | 83     | 88  | 95  | 107 | 110    | 114 | 117 | 107 | 88     | 88  | 89 | 105 | 111    | 109 | 112 | 105 |
| 2020 | 105    | 96  | 97  | 97  | 101    | 109 | 110 | 102 | 100    | 96  | 95 | 98  | 104    | 106 | 106 | 104 |

Nord

Øst

**FIGUR 19.** Relativt udbytte i de 16 (30 m x 8 m) hovedparceller i årene 2014-2020, hvor pakningseffekterne er beskedne (100 = målt årsgennemsnit; farvekodning fra højt udbytte (grøn) til lavt udbytte (rød)). Hver værdi er gennemsnit for to nabo-underparceller hhv. med efterafgrøde (nordlig del) og uden efterafgrøde (sydlig del). Blokkene 1 og 2 (hhv. 3 og 4) ligger tæt sammen, mens der er ca. 30 m mellem blokkene 2 og 4 (hhv. 1 og 3). Måleværdier ses i venstre side af figuren og beregnede værdier i højre side (for vårbyg beregnet med bedste AML-model præsenteret i figur 17c; for vinterhvede i 2018 og 2019 med en tilsvarende AML-model trænet på såvel vårbyg som vinterhvede).



**FIGUR 20.** Målte og beregnede gennemsnitlige kerneudbytter for de anførte behandlinger i årene 2014-2020. Der indgår resultater fra både byg (årene 2014-17 samt 2020) og hvede (årene 2018-19).

last. Målingerne indikerer derved vekselvirkning mellem behandlingerne, og at pakningen reducerede udnyttelsen af det ekstra kvælstof, som kunne stilles til rådighed af efterafgrøden. Der var overordnet set for hele perioden efter 2013 (og i næsten alle enkeltår) tendens til lignende vekselvirkning mellem pakning og efterafgrøde, hvor positive effekter af efterafgrøden (modsat de oprindelige forventninger) var størst i det upakkede led (se figur 20). Samlet set indikerer udbyttevariationerne effekter af underliggende mekanismer med indflydelse på kvælstofhusholdningen.

Der er rigtig god overensstemmelse mellem det billede der tegner sig af udbyttevariationen ud fra målingerne og ud fra beregningerne (se figur 19). Dette indikerer et potentiale for at inddrage spektrale målinger og "Machine Learning" i fremstillingen af detaljerede udbyttekort.