



Jordbearbejdning og kulstofopbygning i danske, økologisk-regenerative dyrkningssystemer



Direkte såning i økologiske markforsøg, gennemført i projektet Carbon Farm. Fotograf: Christian Bundgaard

Kontakt
Jon Aagaard Enni,
Innovationscenter for Økologisk Landbrug
jone@icoel.dk, 20270837

STØTTET AF

Promilleafgiftsfonden for landbrug



Sammendrag

Dette notat behandler emnet jordbearbejdning i kontekst af regenerativt landbrug og med særligt fokus på jordbearbejdningens betydning for landbrugsjordens kulstofindhold. Der gives en indføring i forskellige paradigmer for partitionering af organisk stof i jorden. Det bliver diskuteret, hvordan paradigmerne påvirker de antagelser, som ligger til grund for modelberegninger af udvikling i jordens kulstofindhold, og der gøres rede for, hvor og hvordan modellerne kommer til kort.

Selvom bevægelsen omkring regenerativt landbrug tæller mange forskellige aktører med vidt forskellige motivationer og livsanskuelser, ses der visse gennemgående træk i bevægelsens forståelse af jordens sundhed og i den sammenhæng vigtigheden af dens kulstofindhold og mikroliv, samt bevægelsens ideer om hvilke konkrete praksistiltag og bagvedliggende virkningsmekanismer der forventes at føre til den ønskede kulstofopbygning. Det diskuteres, hvilke af de "regenerative" ideer, der understøttes af den videnskabelige litteratur, og hvilke der ikke gør.

Notatet afsluttes med tre danske eksempler på praksiserfaringer, og et enkelt fra forskningen, som er samlet op i løbet af 2024 i forskellige projektsammenhænge. Eksemplerne tjener til at belyse betydningen af jordbearbejdning for kulstofopbygning og jordfrugtbarhed i Danmark, og både negative og positive aspekter behandles.

Indhold

Sammendrag	2
Indhold	2
Indledning	3
Landbrugsjordens kulstofpulje	4
Det traditionelle perspektiv: Kulstofopbygning i landbrugsjord	7
Det regenerative perspektiv: Kulstofcirkulering i agro-økosystemet.....	8
At pløje eller ikke at pløje?	9
Delkonklusion 1	11
Praksiserfaringer indsamlet i projektregi i løbet af 2024.....	12
Delkonklusion 2.....	15
Litteratur	17

Indledning

Den offentlige diskurs om grøn omstilling af dansk landbrug inkluderer i stigende grad *regenerativt landbrug* eller *regenerative dyrkningsmetoder* som en mulig vej til at sænke landbrugets samlede klimabelastning. Regenerativt landbrug er en bred paraplybetegnelse for diverse alternative produktionssystemer, der alle har det tilfælles, at de har fokus på jordens sundhed og frugtbarhed, samt i varierende grad betydningen af landbrugsproduktionen for *agroøkosystemet* og miljøet i bredere forstand, herunder klimabelastningen ([Husted & Enni, 2022](#)). Den nok mest omtalte og omdiskuterede, påståede effekt af mange regenerative praksistiltag er forøgelse af jordens kulstofpulje.

I den videnskabelige litteratur er der meget store forskelle i de estimerede, globale potentialer for kulstoflagring i landbrugsjorden, men langt de fleste modelberegninger på baggrund af store, internationale datasæt tyder på, at selv ved 100 % implementering af lokal *best practice* for kulstofopbyggende tiltag på verdensplan, er potentialet moderat, og kan ikke modvirke de menneskeskabte udledninger, hverken de nuværende eller de projekterede (Padarian et al., 2022; Gutierrez et al., 2023).

De såkaldte regenerative tiltag er mange og tæller en række klassiske, økologiske dyder såsom brug af efterafgrøder, grøngødning, afgræsning, sunde sædskifter og god næringsstofhusholdning. De seneste år har det altoverskyggende fokus i debatten om regenerativt landbrug internationalt dog været *pløjefri dyrkning*. Hvorfor netop dét emne har fået så megen opmærksomhed, behandles ikke videre her. Formålet med dette notat er at formidle erfaringer, indsigter og refleksioner vedrørende jordbearbejdning i relation til kulstofopbygning opnået gennem Innovationscenter for Økologisk Landbrugs arbejde med regenerativt landbrug i 2024.

Selvom notatet indeholder mange henvisninger til videnskabelige kilder, er det vigtigt at understrege, at det ikke er en systematisk litteraturgennemgang. Det bør derfor læses som inspiration til videre studier og udviklingsarbejde, men bør ikke citeres som videnskabelig kilde.



Landbrugsjordens kulstofpulje

Hvor kommer jordens kulstof fra?

I fotosyntesen tager planter kulstof fra luften, energi fra solen og ilt og brint fra vandet og danner simple sukkerstoffer, som er byggeklodser for næsten alle andre organiske molekyler. Fotosyntesen er et talent, som kun ganske få organismer har udover planter og alger. Derfor er planternes vækst og vigør det afgørende for kulstofbinding i jord. Jo mere fotosyntese, desto mere kulstofbinding.

Mange tror fejlagtigt, at en sund jord er forudsætningen for kraftig plantevækst og høje udbytter. Moderne væksthushproduktion, hvor højværdiafgrøder vokser lystigt i døde medier som leca eller rock-wool, bør være rigeligt til at afvise den myte. Væksthuseksempel viser dog samtidig, hvad tabet af jordsundhed medfører, nemlig en plantevækst, som er dybt afhængig af kontinuerlige input af gødning og pesticider, for at kunne opretholdes¹.

En sund jord er et robust økosystem, som langt hen ad vejen fungerer af sig selv. Dermed er en sundere jord ikke nødvendigvis vejen til højere udbytter, men snarere vejen til mere stabile udbytter, med mere beskedne behov for input og management (Lal, 2011).

Kulstof er ikke bare kulstof

Igennem de seneste 150 år har videnskabens syn på jordens kulstofindhold ændret sig løbende. Indtil for nyligt var der stort fokus på såkaldte humusforbindelser, som ansås for at være særligt stabile, dvs. svært nedbrydelige, hvilket har vist sig ikke at passe. I løbet af det seneste årti er der dog sket et paradigmeskift, fordi det er blevet klart, at humusforbindelserne i vid udstrækning er produkter, som dannes under ekstraktion af jord i stærke baser, og de lader sig derfor ikke umiddelbart genfinde i "uforstyrret" jord (Lehmann & Kleber, 2015). Dermed er *humificeringsteorien* dømt ude. En anden, nyere teori, som også er blevet afvist for nylig, er teorien om *selektiv bevarelse*. Denne teori kaldes også *preferentiel nedbrydning*, og den bygger på en antagelse om, at opholdstiden af organisk stof i jorden afgøres af det organiske stofs "fordøjelighed" eller "omsættelighed", afhængigt af C-molekylernes kompleksitet (Ibid.). Teorien inddeler det organiske materiale i "labile" (let nedbrydelige) og "stabile" (svært nedbrydelige) forbindelser, og antager, at de stabile forbindelser først omsættes, når de labile forbindelser er brugt op. Konkret antager teorien om selektiv bevarelse derfor, at f.eks. kulstoffet i simple sukre har en kort opholdstid i jorden, hvor kulstoffet i lignin eller cellulose har en lang opholdstid. Problemet med denne teori er, at nyere forskning har vist, at mange af de "stabile" forbindelser kan blive og bliver nedbrudt hurtigere end tidligere antaget, og at nedbrydningen af lignin går hurtigst i de tidlige nedbrydningsstadier, hvor der stadig er labile forbindelser til rådighed som energikilde for omsætningen af lignin (Ibid.).

I dag er baseekstraktion af organisk stof fra jord på vej ud, og moderne analysemetoder som spektroskopi er ved at tage over (Ibid.). De nye metoder har afstedkommet en ny inddeling af jordens organiske kulstof i forskellige puljer. De delmængder, man før kaldte humus, hører nu til i én af to puljer: Partikulært organisk stof (POM) og mineralassocieret organisk stof (MAOM) (Ibid.). Denne nye teori kaldes *progressiv dekomposition*. POM opstår gennem (kemisk eller fysisk) findeling af svært nedbrydeligt organisk materiale i jorden, hvor MAOM betegner plante- eller mikrobederiverede, let nedbrydelige organiske forbindelser, som adsorberes til jordminerale (Ibid.). Adsorptionen til jordminerale "beskytter" MAOM kemisk mod (yderligere) mikrobiel nedbrydning, lige som inkorporation af både MAOM

¹ Fra bogen "Soilless Cultivation Systems" (2024): "The primary goal of soilless cultivation methods is to eradicate problems related to the greenhouse soils such as soil-borne diseases, salinity, and low soil fertility."

og POM i jordaggregater gør fysisk. POM estimeres til at have en opholdstid i jorden på 1-50 år, hvor MAOM's levetid vurderes at være 10-1000 år (Engedal, 2023).

Paradigmeskiftet har medført et øget fokus på dannelsen af MAOM som den vigtigste klimakomponent i planteavlens potentielle kulstofopbygning. Det betyder, at rodeksudater tillægges stadig større betydning, da de 1) anses for at være de mest assimilérbare forbindelser, der tilføres jorden under planters vækst, og 2) i nogen grad kan adsorberes direkte til jordminerale. I Teixeira et al. (2024) kunne mere end 75 % af al rhizodeponeret C, dvs. summen af kulstof i jord, som kommer direkte fra rødderne inkl. rodeksudater, døde rodceller, volatile forbindelser mm., genfindes i MAOM-fraktionen. Ifølge Villarino et al. (2021) er den gennemsnitlige MAOM-dannelseseffektivitet 46 % for rhizodeponeret C, 9 % for rødder og 7 % for overjordiske plantedele. Dvs. at selv om rhizodeponeret C ikke udgør en specielt stor andel af planternes samlede CO₂-assimilation (mellem 7 % (Pausch & Kuzyakov, 2018) og 11 % (Vives-Peris et al., 2019)), bidrager de væsentligt til jordens lager af MAOM (Villarino et al. (2021)).

Rodeksudater

Rodeksudater er organiske forbindelser med lav molekylvægt, som udskilles fra levende planters rødder (Engedal, 2023). Det er bl.a. næringsstoffer til jordens mikrobiologi (primært sukkerstoffer, fedtsyrer og aminosyrer), signalstoffer (volatile forbindelser), allelokemikalier (fenoler, alkaloider og terpenoider). Nogle gange inkluderes forbindelser med høj molekylvægt (rodslim og enzymer) i definitionen. Fordi de fleste af eksudaterne hurtigt inkorporeres i mikrobiel biomasse eller udskilles som mikrobielle restprodukter af såkaldte sekundære metabolitter, er kulstoffets vej fra atmosfæren, gennem planternes eksudater til jordens pulje af "stabilt" kulstof blevet kaldt "The Liquid Carbon Pathway" (Jones, 2008). Denne "flydende kulstofvej" tillægges stor betydning i den regenerative bevægelse, selvom udtrykket ikke umiddelbart er slået igennem i forskningen endnu. Dette ses bl.a. ved, at der i dokumentarfilm eller præsentationer om regenerativt landbrug meget ofte indgår billeder af opgravede afgrøder, hvor rødderne er dækket helt af jord, som klistrer til dem (e.g. Masters, 2023). Disse billeder akkompagneres typisk af udtalelser om, at man "ved at systemet (af plante-mikrobe-interaktioner) virker, når man ser rødder, der ligner dreadlocks" (e.g. Hepler, 2021). Bag påstanden ligger en antagelse om, at rodeksudater er et resultat af "overskydende" fotosynteseprodukter, dvs. at "dreadlocks-fænomenet" indikerer, at planten producerer flere sukkerstoffer mm. end den kan nå at indbygge i sin egen biomasse per dagscyklus. I stedet deles overskuddet ud til det mikrobielle samfund i rhizosfæren (rodzonen), som til gengæld stiller svært tilgængelige plantenæringsstoffer, vand og andre ressourcer til rådighed for planterne, som derved får endnu bedre betingelser for fotosynteseproduktion osv. Det herskende natursyn i den regenerative bevægelse peger dermed på en positiv spiral. I kontrast til denne fortolkning står dog den traditionelle, reduktionistisk-videnskabelige forklaring, som antager en "kulstoføkonomi" i plante-jord-systemet, hvor planter og mikrober "handler" med hinanden. Planternes "valuta" er i denne metafor rodeksudaterne, og mikrobernes valuta er de nævnte ressourcer, som er gavnlige for plantevækst. Her har vi altså at gøre med en "noget-for-noget"-fortolkning – en *cost-benefit*-analyse. Denne anskuelse kommer bl.a. til udtryk ved, at rhizodeponeret C til stadighed ofte betegnes *Carbon lost via rhizodeposition* (e.g. Engedal 2023). Planterne "taber" altså det kulstof, de eksuderer via rødderne ifølge store dele af fagvidenskaben.

Disse to konkurrerende narrativer om rodeksudater afspejler det faktum, at mange plantesymbionter, dvs. mikrober, som generelt siges at indgå i et symbiotisk (gensidigt fordelagtigt) forhold til deres værtsplanter, f.eks. mykorrhizadannende svampe, menes at fungere i et såkaldt *mutualisme-parasitisme-kontinuum* (Johnson et al., 1997). Kontinuum-konceptet er dog blevet kritiseret siden (Smith & Smith, 2013). Det betyder, at i hvert fald nogle mikrober kan agere som gode samarbejdspartnere for værtsplanterne eller som parasitter, afhængigt af forholdene (Ibid.).

Spørgsmålet melder sig derfor, om fænomenet med klistrede rødder primært ses i sunde, vitale planter eller i stressede, væksthæmmede planter. Svaret ligger desværre ikke lige for. Der findes eksempler fra begge ekstremer, og i forbindelse med dette notats tilblivelse har det ikke været muligt

at finde forskning, som søger netop dette svar, selvom den muligvis eksisterer. Vi kan dog afvise ideen om, at "dreadlocks-rødder" kun ses hos planter, som har gunstige vækstbetingelser, med et anekdotisk eksempel.

Billedet herunder viser en Enårig rapgræs-plante, som voksede i en sandkasse. Sandkassen er etableret ca. 1 år, før billedet er taget, med vasket, indkøbt strandsand på et gammelt betondæk. Derfor har det eneste umiddelbare input af plantenæringsstoffer været nedfaldne blade og frøkapsler fra de træer, der vokser omkring kassen. Det synes derfor rimeligt at antage, at græsplantens vækstbetingelser har været stærkt begrænsende, og den tydelige eksudering fra rødderne kan næppe tilskrives et stort overskud af fotosynteseprodukter.



Enårig Rapgræs med rødder, som er klistrede af eksudater. Foto: Jon Aagaard Enni

Rodeksudaters bidrag til jordens kulstofpulje kategoriseres i forskningen ofte sammen med øvrige "mikroinput" fra planterødderne (e.g. rodhår, afstødte rodceller og rodslim), som tilsammen kaldes *rhizodeponeret C*. Det hænger sammen med, at det er yderst vanskeligt at skille rhizodeponeret C ad i sine bestanddele, ja, nærmest umuligt i dyrkningsforsøg, hvor planter dyrkes i jord, fremfor hydroponisk (Oburger & Jones, 2018). På trods af de metodiske udfordringer er der fortsat stor interesse for eksudaterne i jordbunds- og planteforskningen, fordi de bidrager til så mange forskellige processer i rodzonen, bl.a. 1) aggregatdannelse, forvitring og pedogenese (jorddannelse), 2) mobilisering af næringsstoffer, 3) signalering mellem planter eller mellem planter og mikrober, og bl.a. derfor 4)

ændringer i omsætningen af kulstof og næringsstoffer, vanddynamikker og udledning af drivhusgasser (Ibid.).

Det traditionelle perspektiv: Kulstofopbygning i landbrugsjord

Når processen kulstofopbygning i landbrugsjord skal kvantificeres, opstilles den som et input-output-regnestykke. Man forsøger at beregne, hvor meget organisk kulstof, landbrugsdriften tilfører jorden i form af organisk gødning og planterester, og hvor meget kulstof der tabes fra jorden via CO₂ fra mikrobiel respiration og i den høstede biomasse. Denne tilgang gør det muligt at modellere udviklingen i landbrugsjordens kulstofindhold som følge af praksistiltag, men der er store metodiske udfordringer, som gør beregningerne usikre.

Case: C-TOOL

For det første er modeller som C-TOOL baseret på den forældede humificeringsteori (Taghizadeh-Toosi et al., 2015). Det betyder bl.a. at modellen inddeler jordens organiske stof (SOM) i tre kategorier: frisk organisk stof (FOM), humificeret organisk stof (HUM) og resistent organisk stof (ROM). FOM defineres som C-input fra overjordiske plantedele, rødder og rodeksudater samt en fraktion af det organiske stof i husdyrgødning. Disse input til FOM tilskrives den samme nedbrydningshastighed, hvilket i sig selv begrænser modellens nøjagtighed, idet der i virkeligheden er stor forskel på nedbrydningshastigheden for de forskellige fraktioner. HUM defineres som organisk stof, der har gennemgået mikrobiel omsætning, og som er fysisk og/eller kemisk stabiliseret i jorden (Ibid.). HUM antages i C-TOOL at have en omsætningstid, der kan måles i årtier. Dermed repræsenterer HUM for størstedelens vedkommende dét, man i det nye paradigme kalder MAOM. Som nævnt vurderes MAOM's nedbrydningstid at være årtier til århundreder i den nyeste forskning, så HUM kan umuligt repræsentere hele MAOM-puljen, men derimod kun den lettest nedbrydelige del.

ROM defineres i C-TOOL som organisk stof, som "gennem fysisk-kemiske mekanismer er blevet resistent mod biologisk nedbrydning", og som derfor har en meget lang, næsten uendelig, omsætningstid (Ibid.). Fraværet af biologisk omsætning i denne definition gør, at ROM må tolkes til at udgøre den sværest omsættelige del af dét, som i det nye paradigme kaldes POM – dvs. den del af POM, som beskyttes fysisk i aggregater, også kaldet *occluded POM*, forkortet oPOM. oPOM menes i dag at have en nedbrydningstid på år til årtier, afhængigt af jordens aggregatstabilitet (Engedal, 2023), og det er dermed tydeligt, at nedbrydningshastighederne for de antagne kulstofpuljer HUM og ROM i C-TOOL er i uoverensstemmelse med det nye paradigme.

Udover problematikken med fraktionering af jordens pulje af organisk stof har C-TOOL andre blinde vinkler, som gør den uegnet til modellering af ændringer i jordens kulstofindhold i kortere tidsintervaller, hvilket dog heller aldrig har været dens formål. C-TOOL er udviklet til at modellere kulstof i jord over årtier til århundreder (Taghizadeh-Toosi et al., 2014).

En model som C-TOOL kan umuligt være bedre end de data, der ligger til grund for den. Selvom C-TOOL kan simulere udvikling i jordens kulstoflager ned til en dybde på 1 m, er den optimeret på data for de øverste 30 cm (Ibid.). Det er rimeligt nok, idet modellen er udviklet til at beregne, hvilken påvirkning landbrugsdrift generelt har på jordens kulstof, og det almindelige landbrug med dyrkning af primært enårige afgrøder yder langt den største påvirkning på overjorden. Det forhindrer dog beregning af landbrugsscenarier, som ikke ligner almindelig landbrugsdrift. Det kunne f.eks. være skovlandbrug, holistisk planlagt afgræsning af permanente græsarealer eller biointensiv market gardening, hvor grøntsager dyrkes i permanente bede med små eller ingen maskiner.

Case: Holistisk planlagt afgræsning af permanente græsgange

Eksemplet med holistisk planlagt afgræsning af permanent græs illustrerer problemet godt, fordi areaerne under denne driftsform på mange måder minder mere om natur end om landbrug, selvom der

produceres slagtedyr på arealerne. På naturlige arealer med græs bliver rødderne generelt dybere, og en større del af den samlede kulstofpulje findes i 2-4 meters dybde, end tilfældet er i kulturgræs. F.eks. estimerede Jobbágy & Jackson (2000), at mængden af kulstof i 2. og 3. meters dybde svarede til 63 % af den samlede mængde i den 1. meter under naturlige græsgange i tempererede klimazoner. Der er også grund til at tro, at en lavere tilgængelighed af især P og N medfører dybere rødder, hvilket er blevet vist i græsmarker i et tempereret klima af bl.a. Dodd et al. (2011). I det samme studie blev det vist, at 20 % stigning i rodmassen i dybden 1-2 m førte til en tilsvarende 20 % stigning i jordens kulstofpulje efter 13 år, imens 20 % stigning i rodmassen i dybden 0-1 meter kun medførte 5 % stigning i jordens indhold af kulstof i samme dybde. De anfører dog, at kulstofpuljen i jordens øverste meter i dette eksempel var over 20 gange større end puljen i den næste meter. Der er altså grund til at mene, at naturlige græsmarker har en betydeligt større kulstofpulje i de dybe jordlag end kulturgræs. Det er gode nyheder for landbrugere, der praktiserer holistisk planlagt afgræsning af permanent græs, idet der sjældent tilføres anden gødning end den, kvæget afsætter under afgræsningen, og idet græsset får en længere restitutionsperiode end i storfoldsdrift eller slætproduktion, hvilket medfører højere planter og dybere rødder (Jordon et al., 2022). Artsdiversiteten i plantesamfundet er typisk også højere i permanente græsmarker end i omdriftsgræs, hvilket Mueller et al. (2013) viste, i sig selv kan medføre større roddeybde og øget kulstofindlejring.

Disse og andre forhold lader sig umiddelbart ikke modellere, hvilket kan betyde, at positive effekter af praksistiltag, som forbindes med regenerativt landbrug, overses.

Det regenerative perspektiv: Kulstofcirkulering i agro-økosystemet

Ligesom der er mange definitioner af regenerativt landbrug, er der mange opfattelser af og narrativer omkring jordkulstof i den regenerative bevægelse. Ideerne om genopbygning af jordens kulstofpulje kan placeres på et spektrum fra den traditionelle, reduktionistiske input-output tanke til den mere holistiske idé om kulstofcirkulering.

Ideen er, at det ikke giver mening at betragte input og tab af kulstof som separate processer, fordi det kulstof, som "tabes" fra jorden i form af CO₂, i større eller mindre grad genoptages af planter lokalt på marken, hvor det udledes. Derfor fremføres argumentet, at man bør søge at kvantificere mængden af kulstof, som cirkuleres i plante-jord(-luft)-systemet, fremfor alene at kigge på delmængden i jorden på et givet tidspunkt. Det betyder bl.a. at der argumenteres for, at levende biomasse i jorden, i form af rødder, mikro- og mesofauna bør tælles med, når den samlede kulstofmængde beregnes. Derudover bør CO₂ fra biologisk respiration i jorden kun indgå i beregningerne som netto-tab, hvilket vil sige den CO₂, som ikke genoptages lokalt af levende planter, men reelt tabes til atmosfæren.

CO₂ fra biologisk respiration i jorden

I Danmark har især nedbør og temperatur afgørende betydning for udfaldet af den enkelte vækstsæson, lige som fysiske og kemiske jordbundsforhold kun langsomt og i begrænset omfang lader sig ændre, og dermed vurderes det som usandsynligt, at tilgængeligheden af atmosfærisk CO₂ bliver udbyttebegrænsende i planteavl. Der er dog foretaget studier internationalt med CO₂-berigelse under markforhold – også under vækstbetingelser, der minder om Danmarks. Long et al. (2006) viste i en metaanalyse, at CO₂-berigelse under markforhold til 550 ppm ift. atmosfærens dengang 380 ppm gav merudbytter på 12, 13 og 14 % i hhv. ris, hvede og sojabønner. Batts et al. (1998) undersøgte i et markforsøg i det sydlige England effekten af en fordobling af luftens CO₂-indhold og af stigende temperaturer på bl.a. udbytte og rodbiomasse i vinterhvede, og fandt udbyttestigninger på 12-65 % ved dobbelt CO₂-koncentration, sammenlignet med kontrollen ved atmosfærisk niveau. De fandt dog også, at stigende temperaturer modvirkede udbytteeffekten. Interessant nok fandt de også, at forhøjet CO₂ førte til markant større (49-186 %) rodbiomasse.

Som nævnt tidligere er der i den regenerative bevægelse stort fokus på at øge roddybden og -biomassen, og det særligt interessante er derfor, at dette resultat, hvis det lader sig generalisere, antyder en mulig positiv spiral, hvor mere rodbiomasse giver højere CO₂-frigivelse fra jorden pga. større respiration fra rødder og mikrober, og højere CO₂-koncentration fører til større rodbiomasse, og så fremdeles.

At pløje eller ikke at pløje?

Kontekst

Effekten af direkte såning på opbygning af jordens kulstofpulje blev undersøgt grundigt af Sun et al. (2020). De fandt, at der er en klar sammenhæng mellem på den ene side forholdet mellem gennemsnitlige temperaturer og nedbørsmængder, og på den anden side kulstofopbygning som følge af reduceret jordbearbejdning. Groft sagt viste deres resultater, at jordbearbejdningens betydning for jordens kulstofopbygning aftager med faldende temperaturer og stigende nedbørsmængder. De viste samtidig, at effekter på kulstofopbygning som følge af praksisændring fra pløjning til direkte såning er stærkt betingede af, at udbytterne opretholdes eller øges (Ibid.). Pittelkow et al. (2015) viste i en stor metaanalyse, at no-till gennemsnitligt medførte udbyttetab i alle undersøgte afgrødekategorier, under fugtige, kølige forhold. Analysen viste samtidig, at no-till havde de største, positive udbytteeffekter under forhold, hvor vand er en udbyttebegrænsende faktor (Ibid.).

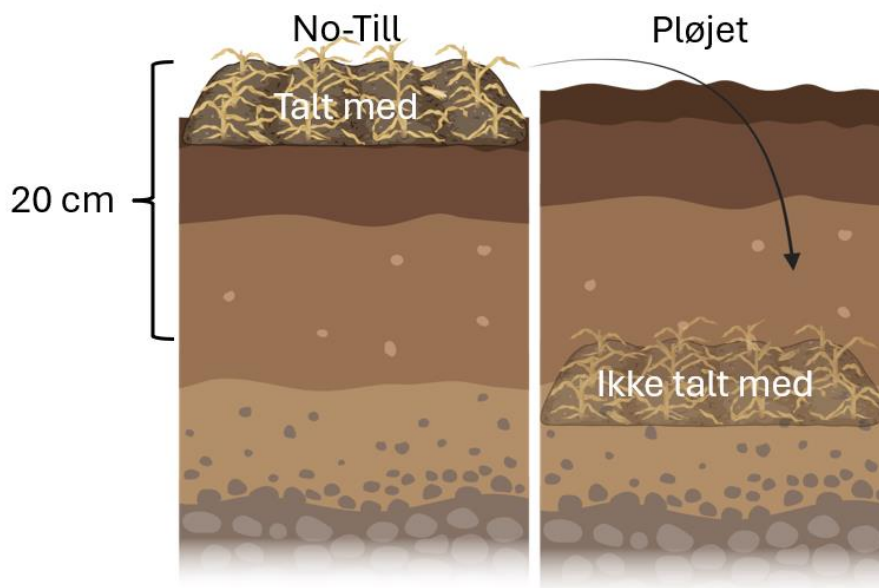
I den helt modsatte boldgade undersøgte et interessant, tysk studie (Alcántara et al., 2016) effekten af særligt dyb pløjning (55-90 cm) på jordens kulstofindhold i den øverste meter 35-50 år efter behandlingen. De undersøgte lokationer, hvor halvdelen af hver mark var blevet dybdepløjet, og den anden halvdel tjente som reference. Alle andre behandlinger var ens på tværs af den enkelte mark. Studiet fandt, at de dybdepløjede jorder i gennemsnit indeholdt 42 +/- 13 t/ha mere kulstof end referencejorderne. Forfatternes forklaring går dels på, at i de dybdepløjede jorder er muldlaget begravet, hvilket alt andet lige sænker omsætningshastigheden, og dels på, at den kulstoffattige underjord, som udgjorde den "nye" topjord i de behandlede led, havde et meget lavere kulstofindhold og derfor var længere fra ligevægt, hvilket betød, at "topjordens" potentiale for opbygning af kulstof var langt højere i de behandlede led. De noterer i øvrigt, at der på intet tidspunkt i forsøgets historie er rapporteret signifikante udbytteforskelle mellem behandlingerne.

Der er altså ingen umiddelbar grund til at forvente øget kulstofbinding som resultat af direkte såning i Danmark under de nuværende dyrkningsbetingelser. Klimaforandringer, som medfører længere tørkeperioder, kan dog føre til, at denne opfattelse må tages op til revision.

Kigger vi dybt nok?

Fra årtusindskiftet sås en stigende tendens i jordbundsforskningen til, at minimal jordbearbejdning blev forbundet med kulstofbinding i jorden. Talrige studier fremlagde forsøgsresultater, som viste store klimagevinster, når ploven blev parkeret. Problemet var bare, at effekten hvilede på utilstrækkelig videnskabelig metodik. Dengang tog man stort set udelukkende jordprøver i pløjelaget, dvs. de øverste 15-25 cm af jorden, hvilket i sig selv medførte en overvurdering af kulstofbindingseffekten. I dag ved vi, at reduceret jordbearbejdning primært omfordeler kulstoffet i jorden, så en større del af det samlede kulstofindhold er koncentreret tæt på jordoverfladen (Pittelkow et al., 2015; Haddaway 2017; Sun et al., 2020)

Man kan forestille sig to lagkager, som indeholder præcist lige meget flødeskum. I den ene er flødeskummet fordelt ligeligt imellem alle kagebundene, og i den anden er over halvdelen af flødeskummet placeret på kagens top. Hvis man måler kagernes indhold af flødeskum ved at stikke et jordspyd halvvejs ned i hver kage og analysere de udtagne prøver, vil man komme til den konklusion, at kagen med flødeskum på toppen indeholder langt mere skum end den anden. Se nedenstående illustration.



Figur 1 - Illustration af Tine Engedal, postdoc, KU, genereret i biorender

Den nyere, mere nuancerede forskning, som tager dybe jordprøver og korrigerer for jordens massefylde, viser som sagt, at pløjefri dyrkning ikke i sig selv fører til øget kulstofbinding. Det gør derimod øget plantevækst. Når pløjefri dyrkning øger jordens samlede kulstofpulje, er det som regel i de egne af verden, som er meget varme og tørre. Her er jordbearbejdning en kilde til øget fordamning af jordfugt, og no-till kan dermed være et effektivt middel til bedre plantevækst. Dermed kan man også argumentere for, at relevansen af no-till vil stige i takt med klimaforandringerne, hvor tørke ses hyppigere, men indtil videre er vand fortsat sjældent den primære udbyttebegrænsende faktor for plantevækst. Selvom der ikke er meget, der tyder på, at øget kulstofopbygning er en forventelig effekt af no-till i Danmark, er der en række andre, potentielle fordele ved direkte såning, som gælder under danske forhold. F.eks. reduceres risikoen for jorderosion betragteligt (Li et al., 2014). I Danmark er det især om efteråret i vintersæd (Veihe et al., 2003), og den beskyttende virkning forstærkes, når direkte såning kombineres med de øvrige Conservation Agriculture-principper om at efterlade afgrøderester og fornuftigt sædskifte med aktiv brug af efterafgrøder (Palm et al., 2014, Pittelkow et al., 2014).

Nedslag i litteraturen

Prøvedybde

Baker et al. forklarede allerede i 2006 i en kommentarartikel, hvorfor konklusioner vedr. kulstofopbygning som følge af reduceret jordbearbejdning er problematiske, når de baseres på forsøg, hvor der kun udtages jordprøver i pløjelaget. Artiklen fremførte en række argumenter for, at *sampling bias* i form af for overfladisk prøvetagning var den primære årsag til, at man på det tidspunkt regnede no-till og reduceret jordbearbejdning for at være effektive klimavirkemidler pga. forventningen om netto kulstofopbygning sammenlignet med pløjning. Et af de centrale argumenter var, at de fleste afgrøder har potentiale til en betydelig rodvækst under pløjelaget. Baker et al. tilføjede til dette argument, at flere videnskabelige studier viser, at betingelserne for dyb rodvækst generelt er bedre i pløjede systemer end i mindre intenst bearbejdede systemer. Det hænger bl.a. sammen med, at jordens massefylde er højere i mindre intenst bearbejdede systemer, hvilket giver større penetrationsmodstand for rødderne. Desuden peger Baker et al. på, at no-till-jorde generelt er koldere end bearbejdede jorde, især i den tidlige vækstsæson for vårafgrøder, hvilket også kan hæmme rodvæksten, og dermed sænke rodtybden (Ibid.). Forfatterne understreger i deres konklusion, at der er mange gode grunde til at reducere jordbearbejdning, men at kulstoflagring ikke ser ud til at være én af dem.



Haddaway et al. konkluderede i en systematisk oversigtsartikel (2017), at no-till og reduceret jordbearbejdning gennemsnitligt øger kulstofindholdet i de øverste 30 cm af jordprofilen, sammenlignet med pløjning. De tilføjede, at der **ikke** var forskel i kulstofindholdet, når man undersøgte hele jordprofilen. Artiklen behandlede data fra 351 studier, og var fokuseret på klimazoner, som er relevante i Sverige.

Roddybde

Herhjemme undersøgte Munkholm et al. (2008) effekten af hhv. pløjning, harvning til 8-10 cm og direkte såning i vinterhvede på bl.a. plante- og rodvækst. De fandt, at både harvning og direkte såning hæmmede afgrødens rodvækst, især i begyndelsen af vækstsæsonen, sammenlignet med pløjning. Forsøget foregik over to dyrkningssæsoner, og den negative effekt på hvedens roddybde var mere udtalt i år 2. Udbytte var højest i det pløjede forsøgsled på begge lokationer i begge forsøgsår, men effekten var kun signifikant i år 2 og kun på én af lokationerne. Munkholm et al. undersøgte forskellige mulige årsager til den hæmmede rodvækst i de upløjede parceller og konkluderede, at højere penetrationsmodstand var den mest sandsynlige forklaring. Begge lokationer (Foulum og Flakkebjerg) var på sandjord. Den negative effekt af omlægning fra pløjede til direkte såede systemer på rodvæksten er vist mange gange tidligere, selvom effekten ofte kun varer få år og en eventuel pløje- eller trafikals i det pløjede system kan udviske forskellene mellem behandlinger (e.g. Pietola, 2005; Ball-Coelho et al., 1997).

Delkonklusion 1

Effekten af jordbearbejdning på jordens kulstofindhold er et kompliceret emne, hvorfor entydige, kategoriske budskaber for eller imod reduceret jordbearbejdning sjældent holder vand. Der er mange gode grunde til at begrænse jordbearbejdningen i Danmark, herunder bedre forhold for mikro- og mesofauna i de øvre jordlag, lavere brændstofforbrug, bedre farbarhed på markerne – især om foråret – mindre arbejdspress i perioder med spidsbelastning for markarbejde og meget andet. Øget kulstofopbygning ser ikke umiddelbart ud til at være iblandt.

I regi af regenerativt landbrug kunne det derfor være et mål kun at foretage den mængde jordbearbejdning, som fører til bedre betingelser for afgrødens vækst, og, hvis målet er øget kulstofopbygning, navnlig rodvækst i dybden.

Praksiserfaringer indsamlet i projektregi i 2024

Innovationscenter for Økologisk Landbrug har i 2023 og 2024 gennemført projektet "Regenerativt landbrug til videreudvikling af den økologiske planteproduktion". I projektet er 5 danske case-bedrifter blevet fulgt, og der er gennemført en studietur til Østrig, hvor en række økologiske bedrifter med regenerativt fokus er besøgt. Her følger nogle observationer fra bedriftsbesøgene, som kan medvirke til at forklare, hvor modeller for kulstofopbygning kommer til kort.

Eksempel 1: Biodynamisk soja i Østrig

Vi besøgte en biodynamisk dyrket mark i Østrig, som ved besøget var sået til med soja. Forud havde der været en kraftig, artsrig, overvintrende efterafgrøde, som var blev slået ca. midt marts med en slagleklipper, nedmuldet ved fræsning og i samme arbejdsgang blev et ferment/kompostekstrakt a sprøjtet ud på den findelte plantemasse. Målet med udsprøjtningen var såkaldt "flade-kompostering" – et kontroversielt emne, som ikke har vist sig overbevisende i videnskabelige afprøvninger. Efter landbrugerens udsagn var jordstrukturen ved nedmuldning af efterafgrøden særdeles god og velaggregeret. Efter ca. 6 ugers omsætning af efterafgrøden, blev der sået sojabønner (ca. 1. maj), og siden striglet mod ukrudt én enkelt gang. Det første, som sprang os i øjnene ved besøget sidst i juni, var hvor fri for ukrudt afgrøden var (se Foto 2)



Foto 2 - Biodynamiske sojabønner i Østrig. Fotograf: Jon Aagaard Enni

Det næste spændende aspekt og grunden til, at eksemplet tages frem her, var, at jordstrukturen ved spadeprøve var meget hård og knoldet. Jorden lignede simpelthen en anden jord, end det, vi havde set billeder af forinden fra nedmuldning af efterafgrøden. Landmanden var meget skuffet, og forstod ikke, hvad der var sket med hans fine krummestruktur. Der kan selvfølgelig være flere forskellige forklaringer, og én af dem er utvivlsomt, at jorden var meget tør, hvilket også delvist kan forklare den

lave forekomst af frøkrudt. En anden mulig årsag er tætheden af levende rødder i jorden. Hvis man kigger godt efter på Foto 3, kan man se nogle opgravede sojaplanser og deres rødder. Det er tydeligt, at rødderne hverken er særligt lange eller forgrenede, hvilket dog er meget normalt for sojabønner, og det virker derfor rimeligt at antage, at en artsrig efterafgrøde har haft en markant større rodmasse og -volumen ved terminering, end sojaafgrøden havde i det viste vækststadium. Selvfølgelig kan man omvendt argumentere for, at sojarøddernes vækst blev hæmmet af den ringe jordstruktur, så det er svært at sige, hvad der kom først. I hvert fald kan man med rette spørge, hvordan sojarødderne havde set ud, hvis marken var blevet pløjet forud for etableringen.



Foto 3 – Skuffende spadeprøve med dårlig jordstruktur. Fotograf: Jon Aagaard Enni

Eksempel 2: Lerjord dyrket økologisk med plov i Danmark

En økologisk planteavlsbedrift i det østlige Danmark fortæller på mange måder den modsatte historie. Her bliver jordstrukturen bedre år for år, hvilket kommer til udtryk via bedre farbarhed om foråret og stigende udbytter på trods af faldende gødningsinput. Planteavleren forklarer, at især en aktiv brug af frivillige efterafgrøder, og en konstant optimering af pløjeteknik har gjort en enorm forskel. På bedriften arbejdes der med varierende pløjedybde for at forebygge dannelsen af pløjesål, og markerne tilsås hurtigst muligt efter pløjning for at forhindre, at jorden ligger bar længere end højst nødvendigt. Jordstrukturen, der før var mere knoldet, er nu så god, at et rotorharve-såsesæt kan følge direkte efter ploven og give en tilfredsstillende etablering. Den fokuserede brug af efterafgrøder betyder, at markerne sjældent dyrkes monokulturelt, og at den nødvendige import af gødning er faldende, i takt med at efterafgrøderne og forvaltningen af dem bliver bedre. Bedriften præsterer udbytter, som ligger helt i top blandt økologer, og i mange tilfælde kan de matche almindelige, konventionelle udbytter. Det til trods for, at bedriften tildeler under 65 kg N/ha/år, og ikke har kløvergræs i sædskiftet.

Her tyder meget altså på, at faktorer som plantedække og –diversitet, god etablering og forvaltning af efterafgrøder med højest mulig forfrugtsværdi samt fokuseret, strategisk pløjning er opskriften på regeneration af den tidligere besværlige lerjord.

Eksempel 3: Kulstofopbygning gennem holistisk planlagt afgræsning i Danmark

Der er også i 2024 aflagt besøg hos en bedrift i det østlige Midtjylland, hvor jorden i snart 15 år har ligget i permanent, artsrigt græs. Bedriften producerer kødkvæg med holistisk planlagt helårsafgræsning og driver naturpleje med ammekøer og kalve. Udbyttet per ha ligger på produktionsarealerne med adaptiv rotationsafgræsning omkring 5.000 FE/år, hvilket er ca. to tredjedele af, hvad der kan forventes i økologisk slætgræs med tilførsel af 40 tons husdyrgødning pr. ha, men udbyttet i omdriftsgræs falder normalt efter andet brugsår. På de holistisk afgræssede arealer er udbyttet stabile, hvis ikke stigende, og fordi driftsomkostningerne er minimale, er økonomien i produktionen fornuftig. Der tilføres ingen gødning udover dét, som dyrene afsætter under afgræsningen, og der tilskudsføres kun minimalt (én balle wrap/produceret dyr/år). Desuden har den nuværende praksis hævet jordens indhold af organisk stof fra ca. 2 % til ca. 6 % i de øverste 30 cm ifølge målinger foretaget af rådgivningsfirmaet Jordakademiet². En stigning i jordens kulstofindhold på over 0,25 %-point årligt kan i modelberegninger ikke lade sig gøre. Ser vi omvendt på naturarealerne, som plejes med mere ekstensiv afgræsning med ko-kalv-par, hvor målet er at hæmme græsserne til fordel for gøgeurter og andre truede eller sjældne arter, er jordens kulstofindhold og produktivitet nedadgående. I kulstofmodellerne skæres al afgræsning over én kam, hvis afgræsning overhovedet indgår som selvstændig parameter, hvilket sjældent er tilfældet. Det må forventes at medføre betydelige usikkerheder i beregningerne, jf. dette eksempel og nyere forskning (Stanley et al., 2024; Apfelbaum et al., 2022).

Du kan høre mere om erfaringerne med holistisk planlagt afgræsning i dette podcastafsnit på Innovationscenter for Økologisk Landbrugs kanal ØKO-LYD: <https://www.buzzsprout.com/2176953/episodes/16285627>

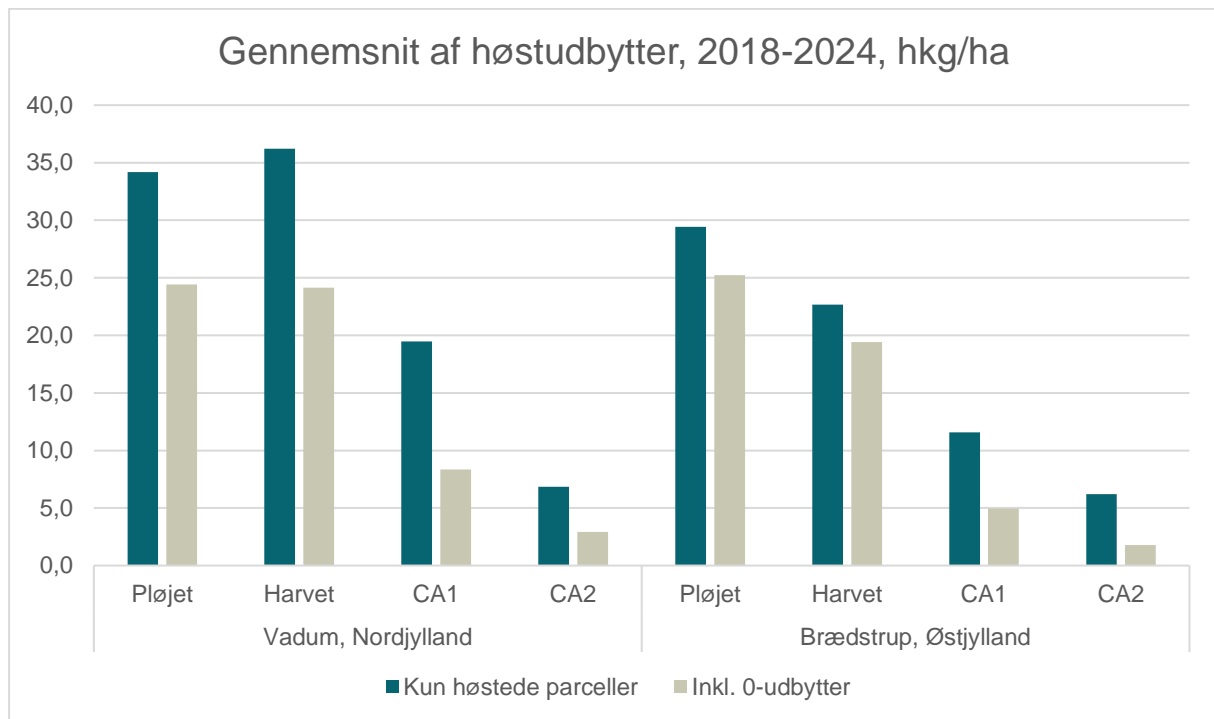
Helårsafgræsning af permanent græs er taget med i denne række af eksempler, fordi det er én af de eneste økologiske driftsformer, som lader sig gøre helt uden jordbearbejdning (efter etablering af græsblandingen selvfølgelig). Eksemplet viser tydeligt, at fokus på biomasseproduktion er altafgørende for jordens kulstofbinding – også i kolde, våde Danmark.

Resultater fra økologiske markforsøg i projektet Carbon Farm

Carbon Farm er et GUDP-projekt, som igennem 7 dyrkningsår har undersøgt betydningen af jordbearbejdning i både konventionelle og økologiske forsøg. Selvom der kun blev taget jordprøver i 20 cm dybde, var der ingen forskel i kulstofindhold mellem behandlingerne. Til gengæld var der i de økologiske forsøg en stærk sammenhæng mellem jordbearbejdning og høstudbyttet, hvor pløjning i de fleste år gav signifikante merudbytter, sammenlignet med harvning. De direkte såede parceller blev kun i få år høstet, og høstudbyttet var, som det fremgår af nedenstående diagram, yderst beskedne. Ingen af de økologiske parceller blev høstet i alle år.

Dyrkningsstrategien for leddene med direkte såning i de økologiske forsøg har udviklet sig i projektets løb og indebar i de sidste to dyrkningsår et permanent bunddække af en småbladet hvidkløver, også kaldet mikrokløver. For at forhindre at kløveren udkonkurrerede afgrøden, blev en rækkeslåmaskine udviklet, men slåningerne var ikke tilstrækkelige, og kornet fik for hård konkurrence. Som nævnt var der ingen signifikante forskelle i jordens kulstofindhold på tværs af forsøgsbehandlingerne, hvilket især var overraskende i lyset af det permanente dække af levende kløver i de økologiske CA-led, som mange i projektgruppen forventede ville føre til øget kulstoflagring.

² Målingerne er ikke videnskabeligt validerede, og resultaterne skal derfor kun betragtes som vejledende.



Figur 2 – Gennemsnitlige udbytter i de økologiske Carbon Farm-forsøg. Data fra 7 høstår.
CA1=Direkte såning med radrensning, CA2=Direkte såning uden radrensning.

Man kan spekulere på, om den manglende effekt af kløverens kunne have at gøre med slåningen, som gjorde, at kløverplanterne blev holdt meget lave det meste af året, hvilket valget af "mikro"-sorten også medvirkede til. Forsøgene blev slået mange gange i løbet af sæsonen, og bunddækkets højde drager paralleller til overafgræs-sede arealer i den forstand, at kløverens rødder formentlig aldrig nåede deres maksimale, potentielle dybde. Desuden betød bunddækkets negative virkning på kornafgrødens vækst, at kornet heller ikke blev særligt højt, hvorfor kornrødderne heller ikke kan have bidraget optimalt til jordens kulstofpulje.

Delkonklusion 2

De beskrevne eksempler og flere andre erfaringer fra bedriftsbesøg tegner et billede af, at frekvens og intensitet af jordbearbejdning ikke i sig selv kan forklare kulstofopbygning eller -tab i tempererede klimaer. Dette billede stemmer som vist overens med den nyeste og grundigste forskning. Afgrødevalg, sædskifte, plantediversitet, gødningstildeling, og biomasseproduktion ser ud til at påvirke kulstofpuljen i landbrugsjord langt mere end jordbearbejdning under danske dyrkningsbetingelser, lige som kvaliteten af det udførte markarbejde ser ud til at spille en afgørende rolle.

Litteratur

- Alcántara, V., Don, A., Well, R., & Nieder, R. (2016). Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Global change biology*, 22(8), 2939-2956.
- Apfelbaum, S. I., Thompson, R., Wang, F., Mosier, S., Teague, R., & Byck, P. (2022). Vegetation, water infiltration, and soil carbon response to Adaptive Multi-Paddock and Conventional grazing in South-eastern USA ranches. *Journal of Environmental Management*, 308, 114576.
- Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., & Griffis, T. J. (2007). Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know?. *Agriculture, ecosystems & environment*, 118(1-4), 1-5.
- Ball-Coelho, B. R., Roy, R. C., & Swanton, C. J. (1998). Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil and Tillage Research*, 45(3-4), 237-249.
- Batts, G. R., Ellis, R. H., Morison, J. I. L., Nkemka, P. N., Gregory, P. J., & Hadley, P. (1998). Yield and partitioning in crops of contrasting cultivars of winter wheat in response to CO₂ and temperature in field studies using temperature gradient tunnels. *The Journal of Agricultural Science*, 130(1), 17-27.
- Engedal, T., Soil organic carbon input and stabilization from cover crops, Ph.D.-afhandling, Københavns Universitet (2023)
- Gutierrez, S., Grados, D., Møller, A. B., de Carvalho Gomes, L., Beucher, A. M., Giannini-Kurina, F., ... & Greve, M. H. (2023). Unleashing the sequestration potential of soil organic carbon under climate and land use change scenarios in Danish agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 905, 166921.
- Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Kätterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., ... & Isberg, P. E. (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6, 1-48.
- Hepler, J. (2021). Fuller Field School. <https://kansaspermaculture.org/blog/fuller-field-school/>
- Husted, M. & Enni, J. A. (2022). Regenerativt landbrug i en dansk, økologisk kontekst. <https://icoel.dk/planteavl/regenerativt-landbrug-i-en-dansk-oekologisk-kontekst/>
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436.
- Dodd, M. B., Crush, J. R., Mackay, A. D., & Barker, D. J. (2011, January). The "root" to more soil carbon under pastures. In *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* (pp. 43-50).
- Johnson, N. C., Graham, J. H., & Smith, F. A. (1997). Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism–parasitism continuum. *The New Phytologist*, 135(4), 575-585.
- Jones, C., Liquid carbon pathway unrecognised, Australian Farm Journal, [https://www.amazingcarbon.com/PDF/JONES-LiquidCarbonPathway\(AFJ-July08\).pdf](https://www.amazingcarbon.com/PDF/JONES-LiquidCarbonPathway(AFJ-July08).pdf)
- Jordon, M. W., Willis, K. J., Bürkner, P. C., & Petrokofsky, G. (2022). Rotational grazing and multi-species herbal leys increase productivity in temperate pastoral systems—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 337, 108075.
- Kiss The Ground, Tickell & Tickell, Netflix, 2020
- Lal, R. (2011). Soil health and climate change: an overview. *Soil health and climate change*, 3-24.
- Lehmann, J., Kleber, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60–68 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature16069>

- Li, Y., Yu, H., Chappell, A., Zhou, N., & Funk, R. (2014). How much soil organic carbon sequestration is due to conservation agriculture reducing soil erosion?. *Soil Research*, 52(7), 717-726.
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D., Nosberger, J., & Ort, D. R. (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *science*, 312(5782), 1918-1921.
- Masters, N. (2023). Enhancing Underground Communications (Advanced Session) – Part 1 - Groundswell 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=rDK-tu5-yY0&t=205s>
- Mueller, K. E., Tilman, D., Fornara, D. A., & Hobbie, S. E. (2013). Root depth distribution and the diversity–productivity relationship in a long-term grassland experiment. *Ecology*, 94(4), 787-793.
- Munkholm, L. J., Hansen, E. M., & Olesen, J. E. (2008). The effect of tillage intensity on soil structure and winter wheat root/shoot growth. *Soil Use and Management*, 24(4), 392-400.
- Oburger E, Jones DL. **2018**. Sampling root exudates – mission impossible. *Rhizosphere* 6:116–33
- Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A., & Smith, P. (2022). Soil carbon sequestration potential in global croplands. *PeerJ*, 10, e13740.
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 87-105.
- Pausch, J., Kuzyakov, Y., 2018. Carbon input by roots into the soil: quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Glob. Chang. Biol.* 24, 1–12. <https://doi.org/10.1111/gcb.13850>
- Pietola, L. M. (2005). Root growth dynamics of spring cereals with discontinuation of mouldboard ploughing. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2), 103-114.
- Pittelkow, C. M., Liang, X., Linqvist, B. A., Van Groenigen, K. J., Lee, J., Lundy, M. E., ... & Van Kessel, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534), 365-368.
- Smith, F.A., Smith, S.E. How useful is the mutualism-parasitism continuum of arbuscular mycorrhizal functioning?. *Plant Soil* **363**, 7–18 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1583-y>
- Stanley, P. L., Wilson, C., Patterson, E., Machmuller, M. B., & Cotrufo, M. F. (2024). Ruminating on soil carbon: Applying current understanding to inform grazing management. *Global Change Biology*, 30(3), e17223.
- Sun, W., Canadell, J. G., Yu, L., Yu, L., Zhang, W., Smith, P., ... & Huang, Y. (2020). Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture. *Global Change Biology*, 26(6), 3325-3335.
- Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B. T., Hutchings, N. J., Vejlin, J., Kätterer, T., Glendining, M., & Olesen, J. E. (2014). C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecological Modelling*, 292, 11-25.
- Teixeira, P. P., Vidal, A., Teixeira, A. P., Souza, I. F., Hurtarte, L. C., Silva, D. H., ... & Silva, I. R. (2024). Decoding the rhizodeposit-derived carbon's journey into soil organic matter. *Geoderma*, 443, 116811.
- Veihe, A., Hasholt, B., & Schiøtz, I. G. (2003). Soil erosion in Denmark: processes and politics. *Environmental Science & Policy*, 6(1), 37-50.
- Villarino, S. H., Pinto, P., Jackson, R. B., & Piñeiro, G. (2021). Plant rhizodeposition: A key factor for soil organic matter formation in stable fractions. *Science Advances*, 7(16), eabd3176.