

3. oktober 2025

Optimering af kulstoftilførslen til jorden ved brug af efterafgrøder

Forfattere: Nadja Fuglkjær Bloch^a, Tina Houlborg^a

^a SEGES Innovation, Planter & Miljø



Miljø- og
Fødevareministeriet
Landbrugsstyrelsen



Foto: SEGES Innovation

Sammendrag

Efterafgrøder bidrager til at vedligeholde eller øge kulstofindholdet i jorden. Dels fordi de som udgangspunkt ikke høstes og efterlader deres overjordiske biomasse på jorden, hvormed betydelige mængder kulstof tilføres til jorden. Derudover sker der kulstofftilførsel i løbet af vækstsæsonen gennem blad- og rodafsætning samt via både overjordisk og underjordisk biomasse når efterafgrøden nedmuldes. Dog varierer kulstofindholdet og dermed kulstofftilførslen til jorden afhængigt af faktorer som efterafgrødeart, geografisk placering, jordbundsforhold, etableringstidspunkt, sædskifte, klimatiske forhold og tilgængelighed af kvælstof efter høst af hovedafgrøden. Derfor kan det være en udfordring at fastlægge, hvordan efterafgrøder bedst anvendes til at øge jordens kulstofopbygning på en given lokalitet.

Formålet med denne rapport er at undersøge, hvordan kulstofftilførslen til landbrugsjorden kan optimeres ved brug af efterafgrøder. Undersøgelsen blev baseret på planteklip taget i forbindelse med CatCap-projektet samt supplerende planteklip fra andre projekter, hvorfra kulstofindholdet i den overjordiske biomasse kunne beregnes. Derudover blev den potentielle kulstofindhold og -tilførsel fra underjordisk biomasse inddraget og diskuteret på baggrund af relevante danske og internationale studier.

Resultaterne viste ingen forskel i kulstofindholdet i den overjordiske biomasse mellem efterafgrøder undersøgt i foråret eller sået ved høst, kulstofindholdet varierede mellem 200-650 kg kulstof (C) pr. ha. Kulstofindholdet i underjordisk biomasse blev ikke undersøgt, men tidligere studier tyder på, at efterafgrøder undersøgt i foråret kan have en større kulstofafsætning sammenlignet med efterafgrøder sået ved høst, da de har en længere vækstsæson og dermed kan afsætte kulstof til jorden over en længere periode. En tidligere undersøgelse i projektet viste desuden, at olieræddike, som blev etableret før høst af hovedafgrøden, havde en højere underjordisk biomasse. Derfor kan en tidlig etablering af efterafgrøder bidrage til at optimere kulstofftilførslen til jorden. Den overjordiske biomasses C:N-forhold varierede mellem 8 og 24 på tværs af efterafgrødetyper og etableringstidspunkter, hvor græs havde de højeste værdier.

Det gennemsnitlige kulstofindhold i efterafgrøder fra marker undersøgt under CatCap-projektet (2019, 2020, 2023 og 2024) var 410 kg C pr. ha, men der var betydelige forskelle mellem arter, år og lokaliteter. Dette kan forklares med forskelle i jordtype, næringsstofindhold, etableringstidspunkt og klimatiske forhold. Sammenlignes efterafgrødernes gennemsnitlige kulstofindhold i overjordisk biomasse, havde olieræddike det højest, efterfulgt af efterafgrødeblandinger med kvælstoffikserende arter, mens græs havde det laveste. Olieræddikes hurtige vækst og store biomasseproduktion gør den til en effektiv efterafgrøde til kulstofafsætning. Dog investerer græs mere i rodbiomasse, hvilket kan have en større langsigtet effekt på jordens kulstofindhold. Studier viser, at arter med dybe pælerødder, såsom olieræddike, bidrager til kulstofftilførsel i dybere jordlag, mens græs med et fibrøst rodsystem øger kulstofindholdet i de øvre jordlag via rodafsætning. Blandinger af efterafgrøder havde et højere gennemsnitlig kulstofindhold i den overjordiske biomasse end græs, men lavere end olieræddike og kvælstoffikserende blandinger. Tidligere studier har dog givet modstridende resultater: Nogle viste, at blandinger ikke medførte større biomasseproduktion, mens andre påviste en højere biomasseproduktion og en større samlet kulstofftilførsel til jorden. Dette indikerer, at effekten af blandinger afhænger af, om arternes vækst komplementerer hinanden. Blandinger med kvælstoffikserende arter viste imidlertid et højere kulstofindhold, hvilket sandsynligvis skyldes, at de tilfører kvælstof til jorden og dermed understøtter væksten af andre arter i blandingen.

På baggrund af rapportens indhold blev der opstillet følgende generelle anbefalinger til optimering af kulstofftilførsel til jorden fra efterafgrøder:

- Vælg efterafgrøder med høj biomasseproduktion
- Anvend efterafgrødeblandinger med komplementære arter
- Inkluder kvælstoffikserende arter i blandinger
- Etabler efterafgrøderne tidligt

Indledning

Kulstof findes i alle organismer, både levende og døde, og bevæger sig hele tiden mellem levende organismer, herunder planter og dyr, vand og jorden i det, der kaldes kulstofkredsløbet. En stor del af dette kulstof er lagret i jordens organiske stof, som indeholder cirka tre gange så meget kulstof som plantebiomasse og dobbelt så meget som atmosfæren (European Commission, 2011; Øbing-Safar & Jensen, 2024). I Danmark dækker landbrug en relativt stor andel af landarealet, og derfor kan selv små ændringer i jordens kulstofindhold have stor effekt på kulstofkredsløbet.

Kulstofkredsløbet i landbruget

Kulstofkredsløbet i jorden styres af samspillet mellem planter fotosyntese og respiration. Under fotosyntesen optager planter CO_2 og omdanner det til sukker, som bruges til vækst (eksempelvis dannelse af blade, stængler, rødder og frø). Ved respiration frigiver planterne noget af dette kulstof, som føres tilbage til atmosfæren som CO_2 . Når afgrøden høstes og bruges som mad, foder, eller til produktion af bioenergi, frigives hovedparten af dette kulstof som CO_2 gennem respiration fra dyr og mennesker og vender tilbage til atmosfæren (Prentice et al., 2001; Øbing-Safar & Jensen, 2024).

Overførsel af kulstof fra afgrøde til jord

Den del af afgrøderne, som ikke bliver høstet, såsom rødder, stub og halm, samt de exudater, som rødderne udskiller i løbet af vækstsæsonen, og når blade og andet plantemateriale tabes, tilfører organisk materiale til jorden.

Organisk materiale, er en fællesbetegnelse for både levende og døde organismer – lige fra regnorme og plantemateriale til svampe, bakterier og de forbindelser, de udskiller. En væsentlig bestanddel af det organiske materiale er kulstof. Kulstof tilføres ikke kun direkte fra planter og mikroorganismer, men også via husdyrgødning, der jo er de ufordøjede organiske rester fra de planter, som dyrene har indtaget som foder.

Nedbrydning og omsætning af organisk materiale

Mikroorganismer som bakterier og svampe, og større jordlevende dyr som regnorme, arbejder sammen om at nedbryde organisk materiale. De større jordlevende dyr fragmenterer de større stykker organisk materiale, som derefter yderligere nedbrydes af mikroorganismer, der bruger det som energikilde til vækst. Under denne nedbrydningsproces frigives det meste af kulstoffet til atmosfæren som CO_2 , og særligt det kulstof, der stammer fra det friske og letnedbrydelige organiske materiale, herunder rødder og blade, omsættes hurtigt, da det er relativt let at nedbryde for mikroorganismene. Materiale som halm er derimod mere udfordrende og tidskrævende for mikroorganismene at nedbryde. Det skyldes at der er et højt indhold af forbindelser som lignin (træstof) i plantens cellevægge. Dette stof bruges af planten til at skabe strukturel stabilitet, og det er mere langsomt nedbrydeligt for mikroorganismene. Under nedbrydning af både let- og svært nedbrydeligt organisk materiale opbygges den mikrobielle biomasse, hvilket er et væsentligt element i den samlede pulje af kulstof i jorden. En simpel huskeregel siger, at cirka halvdelen af det organisk materiale er direkte planteafledt, mens den anden halvdel er mikrobielt afledt (Liang et al., 2017; Liang et al., 2019).

Stabilt kulstof bliver i jorden

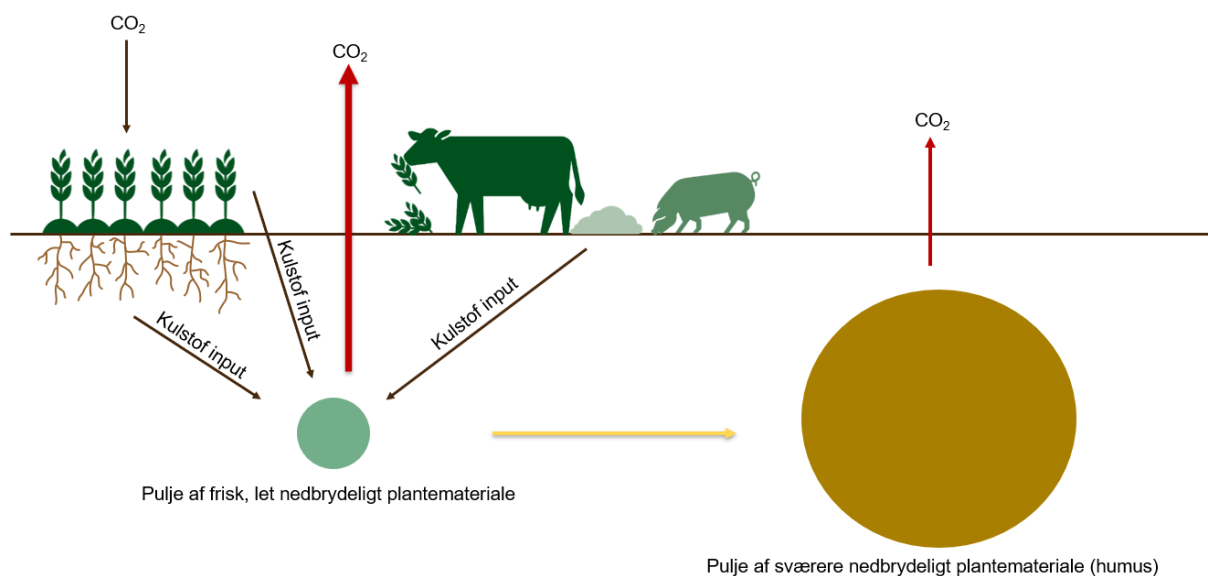
En lille del af kulstoffet fra det langsomt nedbrydelige plantemateriale og den mikrobielle biomasse (især rester af døde mikroorganismer), forbliver i jorden og overgår til en pulje for stabilt kulstof, som traditionelt kaldes jordens humus. Humus er nedbrudt organisk materiale, hvor det ikke længere er muligt at identificere, hvad det oprindeligt stammer fra. Det, der er tilbage, er svært nedbrydeligt og relativt modstandsdygtigt over for mikrobiel nedbrydning på grund af fysisk beskyttelse i jorden og dets kemiske sammensætning. Dette betegnes også som stabilt kulstof (Whalen & Sampedor, 2010).

Stabilt organisk materiale består altså både af plant- og mikrobielt afledt kulstof, hvor kulstoffet er fysisk/kemisk beskyttet i samspil med jordens partikler og mikroorganismer. Dette kan eksempelvis være ved at kulstof indkapsles i jordaggregater, så det bliver svært tilgængeligt for nedbrydning af

mikroorganismerne, eller ved at kulstof i døde mikroorganismer klistrer sig til jordens lerpartikler, såkaldt mineral-associeret organisk stof (Cotrufo & Lavallee, 2022; Øbing-Safar & Jensen, 2024), som dermed bliver til mere stabilt kulstof.

Kulstofandelen udgør omkring 33 til 48 % af plantebiomassens tørvægt (Eller, 2024). Generelt stammer mellem 75-80 % af jordens CO₂-tab fra omsætning af det friske og lettilgængelige kulstof, der typisk kun forbliver i jorden i et par uger til få år. Stabilt kulstof nedbrydes langsomt, da det enten består af komplekse forbindelser, eller sidder indkapslet i aggregater eller på mineralernes overflader, og dermed er sværere at omsætte og kan forblive i jorden i alt fra få år til flere tusinde. Dermed stammer kun mellem 20-25 % af jordens CO₂-tab fra omsætning af fra det mere stabile kulstof (Nielsen & Poulsen, 2022).

Kulstofkredsløbet i landbrugsjorden er illustreret på figur 1 nedenfor.



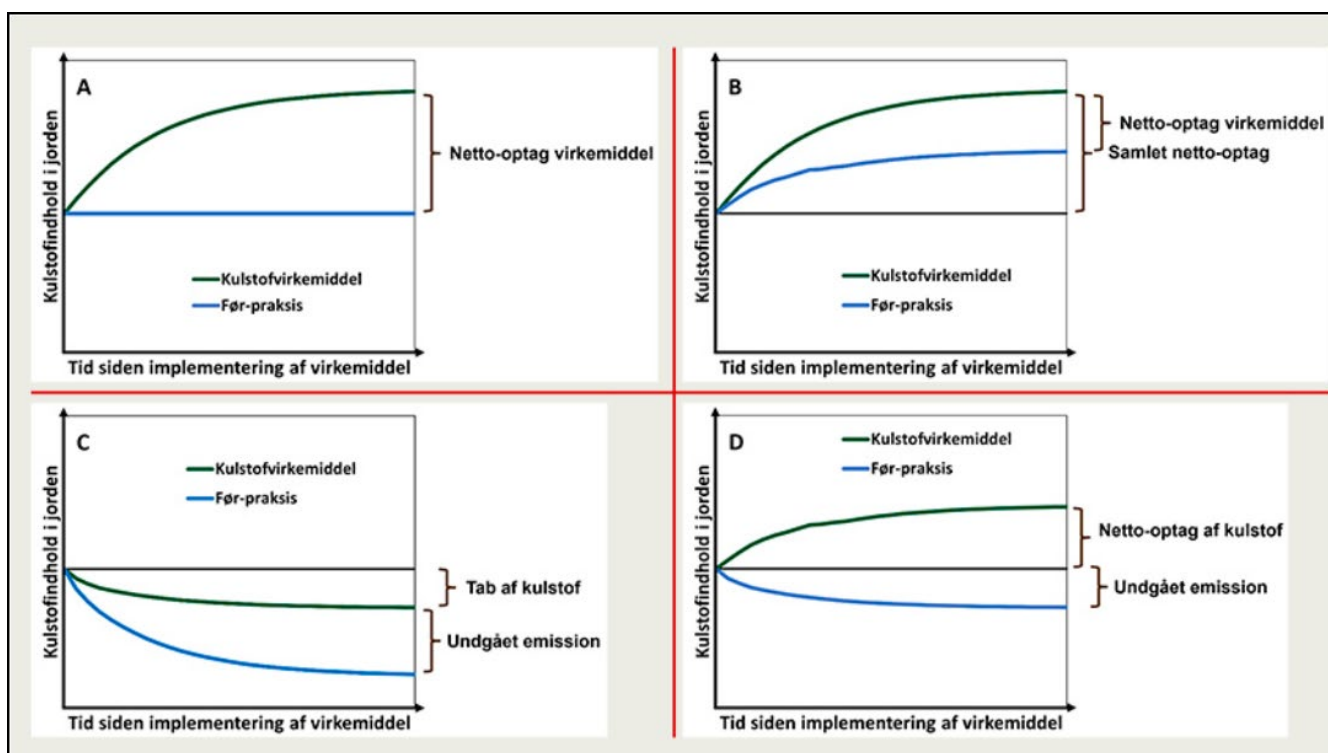
Figur 1. Forsimpleret illustration af tilførsel og tab af kulstof i landbrugsjord (lavet på baggrund af figur af Nielsen & Poulsen, 2022).

Kulstofopbygning eller kulstofnedbrydning

Kulstofkredsløbet i jorden består derfor groft sagt af en mindre pulje af nyere efterladte planterester, husdyrgødning og andre organiske materialer under aktiv nedbrydning og en større pulje af mere stabilt kulstof.

Hvorvidt jordens kulstofindhold stiger eller falder er et resultat af balancen mellem tilførslen af kulstof til jorden via afgrøderne, husdyrgødning og dødt mikrobiel biomasse, og tabet af kulstof fra jorden via mikrobiel omsætning og nedbrydning til CO₂. Hvis jorden tilføres mere kulstof, end den mister, øges kulstofindholdet, og der sker en netto lagring af kulstof. Dog vil en høj tilførsel også øge mikroorganismernes aktivitet, hvilket fører til en større omsætning af kulstof og frigivelse af CO₂. Over tid vil der opstå en balance, hvor tilførsel og tab er lige store, og kulstofindholdet i jorden stabiliserer sig på et højere niveau. Hvis tabet af kulstof derimod er større end tilførslen, falder kulstofindholdet, og kulstoflagret mindskes. Denne proces fortsætter, indtil der igen opstår en balance, men på et lavere niveau. Det er dermed netto-forskellen mellem kulstof tilførsel og omsætning, der afgør, om der sker en stigning eller fald i jordens kulstoflagring.

Dette er illustreret på figur 2 nedenfor.



Figur 2. Udviklingen i jordens kulstofindhold ved før-praksis og implementering af kulstofvirkemiddel frem til ny ligevægt under forskellige forhold: A. Kulstofindholdet ved før-praksis er i ligevægt. Kulstofvirkemidlet fører til et netto-optag af kulstof. B. Kulstofindholdet ved før-praksis er stigende og implementeringen af kulstofvirkemidlet fører til yderligere netto-optag af kulstof. C. Kulstofindholdet ved både før-praksis og kulstofvirkemiddel er faldende, men virkemidlet fører til en undgået emission ift. før-praksis. D. Kulstofindholdet ved før-praksis er faldende. Kulstofvirkemidlet vender udviklingen til et netto-optag af kulstof og en undgået emission ift. før-praksis (kilde: Poulsen, 2024).

Udviklingen af kulstofindholdet i jorden afhænger også af, hvor meget kulstof jorden allerede indeholder. Man kan nemt tro, at en ændring til kulstoføgende praksisser eller virkemidler altid øger kulstofindholdet i jorden, men det gælder kun, hvis kulstofindholdet i forvejen er stabilt eller stigende. Hvis kulstofindholdet derimod er faldende, vil den nye praksis formentlig kun reducere tabet af kulstof, hvilket er positivt, men der vil ikke være tale om opbygning af jordens kulstoflager (Poulsen, 2024).

Kulstoflagring - hvorfor er det vigtigt?

Kulstoflagring i landbrugsjord er et vigtigt fokusområde, da det anses for at være en måde at mindske landbrugets klimabelastning ved at reducere den årlige CO₂-udledning. Samtidig medfører et højt indhold af organisk materiale, hvoraf kulstof er en komponent, en positiv indvirkning på jordens sundhed og frugtbarhed. Organisk materiale påvirker en række jordfysiske parametre, såsom jordstruktur, luftindhold samt jordens vandholdende og vandledende evne, hvilket samlet set kan forbedre dyrkningsforholdene på arealet.

Kulstofinput fra efterafgrøder

Indholdet af organisk materiale der er til stede i jorden, påvirkes blandt andet af sædskiftet. Efterafgrøder tilfører kulstof til jorden både mens de vokser, og når de destrueres og efterlades/nedmuldes på marken. Begge processer bidrager til at øge inputtet til jordens kulstofpulje. Tilførslen af kulstof fra efterafgrøder til jorden kan opdeles i følgende grupper:

- **Overjordisk biomasse:** Omfatter kulstoftilførsel fra plantedele over jorden, såsom stængler og blade, der nedbrydes efter plantens død eller efter nedmuldning.
- **Underjordisk biomasse:** Omfatter kulstoftilførsel fra plantedele under jorden, primært rødder, der gradvist nedbrydes, når planten er død eller nedmuldes.

- **Bladafsætning:** Omfatter kulstoftilførsel fra plantedele over jorden, primært via blade, hvor kulstof afgives som organisk materiale gennem afvaskning eller bladfald under plantens vækst (Mooney, 1972).
- **Rodafsætning:** Omfatter kulstoftilførsel fra de levende rødder under plantens vækst, såsom rodeksudater, rodhår og små rodfragmenter der afstødes, mens planten stadig er levende og aktivt vokser (Bolinder et al. 2007).

Kulstofindholdet i den overjordiske biomasse kan nemt bestemmes ved planteklip, hvor kulstofkoncentrationen måles i bladmaterialet gennem en planteprøve, hvor tørstof, kulstof og kvælstof analyseres. De tre andre grupper af input er derimod langt vanskeligere at bestemme. Den underjordiske biomasse er svær fordi det kræver opgravning af rødder, samt adskillelse af rødder og jordpartikler og efterfølgende vask, tørring og formaling før der kan laves en analyse af kulstofindholdet. Derudover er der ved metoden risiko for at beskadige små, fine rødder, som derved går tabt. Blad- og rodafsætning er vanskelige at måle direkte da det eksempelvis kræver anvendelse af isotop-mærkning samt adskillelse af rødder og jordpartikler for at estimere kulstofbidraget. Ofte anvendes i stedet simple 'allometriske funktioner', som angiver afgrødespecifikke forholdstal mellem overjordisk biomasse og underjordisk biomasse og rodafsætning til at beregne den samlede tilførsel af over- og underjordiske puljer.

I kraft af sædskiftets betydning for indholdet af organisk materiale giver efterafgrøder potentielt et væsentligt bidrag til indholdet af organisk kulstof i jorden. Dette skyldes deres relativt store kulstoftilførsel, idet hele biomassen fra efterafgrøderne forbliver på marken og enten nedmuldes eller bliver liggende på jordoverfladen. I Danmark er der siden 2020 etableret mellem 400.000 og 500.000 ha efterafgrøder om året, hvilket især skyldes det lovgivningsmæssige krav om efterafgrøder. Størstedelen af de efterafgrøder der etableres, er korsblomstrede arter, primært olieræddike (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), foderræddike (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus*), gul sennep (*Sinapis alba*) og raps (*Brassica napus*); men også andre arter er at finde såsom vintervikke (*Vicia villosa*), der tilhører ærteblomstfamilien, og græsserne almindelig rajgræs (*Lolium perenne*), almindelig rug (*Secale cereale*) og vårbyg (*Hordeum vulgare*). Derudover finder man også flere andre efterafgrødearter på de danske marker, herunder kurveblomsterne cikorie (*Cichorium intybus*) og honningurt (*Phacelia tanacetifolia*) (Eller, 2024).

Kulstoftilførslen til jorden fra efterafgrøder varierer, både fordi der er artsforskelle i væksthastighed og potentiel biomasse, men også fordi der er forskelle i overjordisk og underjordisk biomasse, og dette afhænger blandt andet af forholdet mellem rødder og skud, som er artsspecifikt. Kulstofindholdet i biomassetilførslen påvirkes desuden af faktorer som jordtype, temperatur, næringstilgængelighed, rodtype og dyrkningspraksis (Engedal, 2023a; Bolinder et al., 2007). Gældende for de ovennævnte gængse arter, med undtagelse af cikorie, er rodbiomassen som regel mindre end skudbiomassen; der udvikles dermed et mindre underjordisk biomasse end overjordisk biomasse. Litteraturstudier har vist, at rodbiomassen udgør mellem 12 % og 56 % blandt de gængse efterafgrødearter, samt at rodbiomassen bliver større ved lavere næringsstoftilgængelighed (Eller, 2024). Andre studier under CatCap (Engedal et al., 2023c og Hansen et al., 2025) har dog vist at rod kulstofindholdet kan være af samme størrelsesorden eller endda over det overjordiske, men lavest for vikke. Den underjordiske biomasse er vigtig i forhold til at opbygge en kulstofpulje i jorden, og både rødderne og rodafsætning bidrager væsentligt til kulstoftilførslen i jorden.

Hvor meget kulstof der kommer via rodeksudaterne fra rodafsætningen varierer mellem afgrøder. Selve rodtypen har også stor indvirkning på hvor meget kulstof der tilføres jorden via rodafsætning. Rødder, der forgrener sig meget, og dermed har et stort overfladeareal, tilfører mere kulstof til jorden via rodafsætning sammenlignet med mindre forgrenede rødder, som har et mindre overfladeareal. Rødder med stærke forgreninger ses blandt andet hos vintervikke og rug, mens mindre forgrenede rødder blandt andet ses hos olieræddike og cikorie. I de studier af rodafsætning der er gennemført i CatCap udgjorde den i overjorden ca. 25 % (min. 8 %, max. 40 %) af rod kulstof (Mortensen et al. 2021; Engedal et al. 2023a; Martins et al 2024; Hansen et al., 2025). Roddybde kan også påvirke hvor meget kulstof der afsættes i jorden, og kulstof afsat dybt i jorden, formodes at være mindre udsat for at blive mineraliseret,

og dermed er der en større chance for langvarig lagring. Dybere rødder i underjorden udgjorde i CatCap studierne 13-39 % af total rod kulstof (Liang et al 2022; Hansen et al. 2025). Total rod kulstof input er derfor ofte af samme størrelsesorden som eller større end det overjordiske biomassekulstof - men hvis kvælstoftilgængeligheden eller jordfrugtbarheden var høj resulterede det i en lavere rod andel.

Resultater og diskussion

I perioden 2019-2024 blev der udtaget planteklip af overjordisk biomasse fra i alt 454 marker med efterafgrøder, hvorfra der blev målt kvælstofindhold. I 315 af observationerne blev der også målt kulstofindhold, hvilket fremgår af tabel 1. Størstedelen af disse målinger er udført i forbindelse med CatCap-projektet, men der blev også medtaget målinger fra andre projekter. Kvælstof- og kulstofindholdet er således beregnet på baggrund af målinger i den overjordiske biomasse. Planteklip i efterafgrøder var primært fra korsblomstrede, kvælstoffikserende og græsefterafgrøder i form af alm. rajgræs. Fordelingen af de forskellige typer af efterafgrøder på årsniveau fremgår også af tabel 1. Foruden indholdet fremgår forholdet mellem kulstof og kvælstof (C:N) i overjordisk biomasse for de forskellige typer efterafgrøder, som derudover er inddelt i forhold til etableringstidspunktet, henholdsvis forårs- og efterårs-etablerede efterafgrøder.

Effekt af etableringstidspunkt på kulstofindhold i overjordisk- og underjordisk biomasse

Der blev ikke påvist en forskel i kulstofindholdet i overjordisk biomasse i relation til efterafgrødernes etableringstidspunkt eller variationer i såtidspunkt mellem arter. Der er i alt udtaget 166 planteklip i efterafgrøder undersøgt i foråret og 288 planteklip i efterafgrøder etableret ved høst (tabel 1). Forårsetablerede efterafgrøder som græsudlæg og kløvergræs indeholdt over årene mellem 225 og 654 kg C pr. ha, med enkelte højere værdier – eksempelvis 954 kg C pr. ha i kløvergræs i 2020, baseret på én observation. Til sammenligning var det gennemsnitlige kulstofindhold i kløvergræs 353 kg C pr. ha i foråret 2023, beregnet ud fra 8 observationer.

I efterafgrøder etableret ved høst varierede kulstofindholdet mellem 229 og 626 kg C pr. ha, med en lavere enkeltstående måling på 193 kg C pr. ha i korn i 2020. Selvom der ikke kunne findes en forskel i kulstofindholdet i den overjordiske biomasse mellem de to etableringstidspunkter, er det sandsynligt, at de forårsetablerede efterafgrøder har haft en større kulstofafsætning til jorden fra den underjordiske biomasse grundet den længere vækstsæson (Cottney et al., 2022).

Samlet set spændte det gennemsnitlige kulstofindhold i efterafgrødernes overjordiske biomasse fra 193 til 954 kg C pr. ha. I CatCap markforsøg udført ved KU og AU (Jensen, 2024) er der fundet mellem ca. 500 – 2200 kg C pr. ha i overjordisk biomasse, men totalt (overjordisk + rødder i over og underjord + rodafsætning) svarede det til 1100-3600 kg C pr. ha, med en større andel underjordisk ved de lavere overjordiske skudbiomasser. Gennemsnitligt er kulstofindholdet observeret i landmandsmarker altså lidt lavere end i de refererede studier udført af universiteterne, hvilket kan skyldes at der generelt opstår forskelle, når forsøg sammenlignes med observationer i marker (Knudsen, pers. korrespondance). Dette kan blandt andet være grundet faktorer som højere udsædsmængder eller bedre etablering end muligt i praksis. I efteråret 2024 var olieræddike efterafgrøderne generelt meget veletablerede, hvilket blev afspejlet i et højere kulstofindhold målt i den overjordiske biomasse fra flere lokationer. På enkelte marker nåede kulstofindholdet således helt op på mellem 1500 og 1900 kg C pr. ha.

Tabel 1. Gennemsnitligt årlig kvælstof- og kulstofindhold (kg pr. ha) og C:N-forhold i overjordisk biomasse af efterafgrøder, opdelt efter type af efterafgrøde, antal observationer samt etableringstidspunkt (forår eller ved høst). Planteklippene i græs blev udtaget i marker med alm. rajgræs. Kvælstofindholdet, der fremgår i parentes, er anvendt til beregning af C:N-forholdet i de tilfælde, hvor antallet af observationer for N og C ikke er det samme.

** I 2023 er alle planteklip i græsudlæg udtaget fra majsmarker, i de øvrige år er der udtaget planteklip fra græsudlæg udlagt i både majsmarker og kornmarker.*

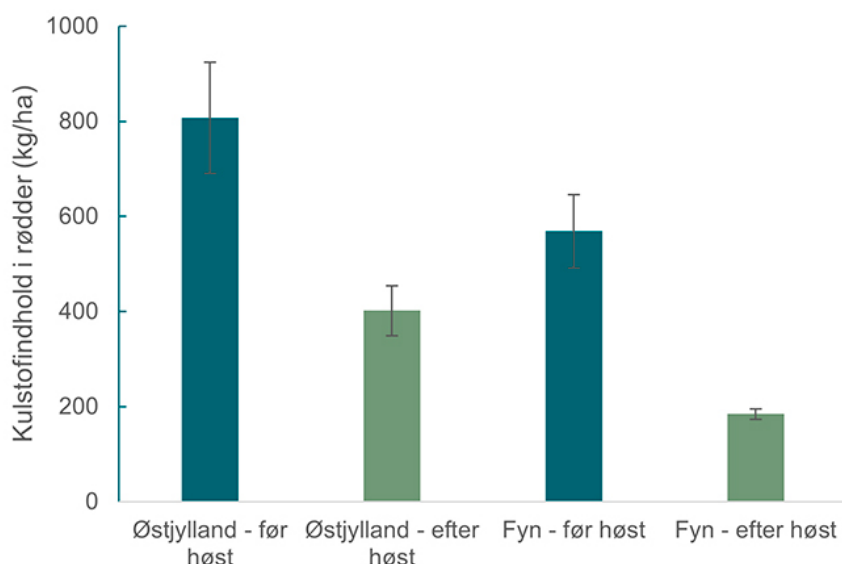
Etableringstidspunkt	Efterafgrødetype	Gennemsnit pr. år					
		Årstal	Antal observationer	Kvælstofindhold kg N pr. ha	Antal observationer	Kulstofindhold kg C pr. ha	C:N
Efterafgrøder undersøgt i forår	Græsudlæg*	2019	18	18	18	423	23
		2020	5	19	5	389	20
		2021	5	28	0	-	-
		2023	30	16	30	225	14
		2024	46	20	46	405	20
	Frøgræsudlæg	2020	6	21	0	-	-
	Udtjent frøgræsmark	2020	2	50	0	-	-
	Kløvergræs	2019	20	26	0	-	-
		2020	1	65	1	954	15
		2021	15	41	0	-	-
		2023	8	28	8	342	12
	Blanding m. bælplanter	2023	2	35	2	275	8
		2024	8	38	8	654	17
Efterafgrøder etableret ved høst	Blanding m. bælplanter	2019	12 (2)	20 (29)	2	484	17
		2023	9	30	9	373	12
		2024	16	42	16	543	13
	Honningurt	2020	13	24	13	281	12
	Korn	2019	13	13	13	229	17
		2020	21 (1)	13 (8)	1	193	24
		2021	10	10	0	-	-
	Olieræddike og blanding m. korsblomster	2019	57 (51)	29 (29)	51	372	13
		2020	73 (61)	33 (32)	61	432	13
		2021	33	43	0	-	-
		2023	1	38	1	365	10
		2024	30	41	30	626	15
	I alt		454	-	315	-	-

I 2021 blev der af SEGES Innovation gennemført en undersøgelse i to markforsøg med efterafgrøder for at belyse, om etableringstidspunktet påvirkede kulstofindholdet i olieræddikerødder (pælerods-dele). Resultaterne viste, at tidspunktet for etablering havde stor betydning for kulstofindholdet i roden. Forsøgene med etableringstidspunkt for olieræddike blev udført i Østjylland og på Fyn, hvor kulstofindholdet på begge lokaliteter var markant højere, når olieræddiken blev etableret før høst af hovedafgrøden (figur 3). I Østjylland blev der målt et kulstofindhold på ca. 850 kg C pr. ha i pæleroden ved etablering før høst og 400 kg C pr. ha ved etablering efter høst, mens værdierne på Fyn var henholdsvis 600 kg C pr. ha før høst og 225 kg C pr. ha efter høst. Kulstofindholdet var således næsten dobbelt så højt ved tidlig etablering sammenlignet med efter høst, hvilket skyldes den længere vækstperiode for olieræddike etableret før høst af hovedafgrøden. Det er værd at nævne, at datagrundlaget for indholdet i rødderne for 2021 bygger på et spinklere datagrundlag sammenlignet med data fra planteklip og dermed også er mere usikre.

En undersøgelse af Nilsson et al. (2024) fandt ligeledes, at en længere vækstsæson ved tidlig etablering af olieræddike resulterede i markant større biomasseproduktion sammenlignet med senere såning. Dette var især gældende for den overjordiske biomasseproduktion. Lignende resultater blev fundet af Cottney et al. (2022) i en undersøgelse af forskellige efterafgrødearter.

Såtidspunktet anses generelt for at være en meget afgørende faktor for vækst af biomasseproduktion af efterafgrøder, og dermed hvor meget kulstof de tilfører til jorden. Det påvirker længden af vækstsæsonen og dermed både biomasseproduktionen og kulstoftilførslen via plantemateriale og blad- og rod-afsætning. For at maksimere kulstoftilførslen er det vigtigt at etablere efterafgrøderne tidligt og anvende en effektiv såteknik, da dette sikrer en længere vækstperiode (Kristensen, 2020; Lyngvig & Mikkelsen, 2020). Eksempelvis forekommer den største rodvækst for olieræddike i Danmark fra september til midten af oktober. En tidligere såning i august kan fremme en dybere rodvækst, og rodmålingerne har vist, at kulstofindholdet i rødderne er næsten dobbelt så højt, når olieræddiken blev etableret før høst af hovedafgrøden (Eller, 2024; Xie et al., 2021). Tidlig såning af efterafgrøder, eksempelvis ved undersåning eller udspreddning før høst, kan derfor være en vigtig faktor for at øge kulstoftilførslen fra efterafgrøderne.

Derudover blev der observeret forskelle mellem de to lokaliteter, hvor rødderne fra Østjylland generelt indeholdt mere kulstof end dem fra Fyn. Dette fremgår også af figur 3 og kan muligvis forklares ved en højere anvendelse af husdyrgødning i Østjylland sammenlignet med Fyn. Husdyrgødning indeholder en betydelig mængde kulstof, hvilket kan bidrage til et højere kulstofindhold i jorden, som kan være til gavn for efterafgrøderne (Knudsen et al., 2018).



Figur 2. Sammenhængen mellem kulstofindholdet i pæleroden af olieræddike og etableringstidspunktet, med standardfejl for hver behandling, i de to forsøg i Østjylland og på Fyn.

Tidligere studier har vist, at en væsentlig større mængde kulstof afsættes i rødderne end i skuddene, men denne fordeling varierer betydeligt afhængigt af efterafgrødearten (Jensen et al., 2024). Variationerne skyldes primært forskelle i fordelingen af overjordisk og underjordisk biomasse (rod/top-forholdet), hvoraf kulstof fra de overjordiske plantedele nedbrydes hurtigere end kulstof fra rødderne, blandt andet fordi kulstof i rødderne typisk er bedre fysisk beskyttet eksempelvis i jordaggregater. Danske studier har eksempelvis vist, at arter som cikorie og rajgræs producerer en stor mængde underjordisk biomasse i forhold til overjordisk biomasse, mens arter som honningurt i højere grad investerer kulstof til udvikling af overjordisk biomasse (Eller, 2024).

Nyere studier har vist, at det store bidrag fra rødderne sammenlignet med skuddene, skyldes, at rødderne er længere tid i kontakt med jorden, samt den større interaktion mellem rødder, jord og mikroorganismer. Derudover er det også blevet fundet, at særligt det nedbrudte materiale, der stammer fra udskillelsen af rodexudater og døde mikroorganismer, bidrager væsentligt til indholdet af kulstof i jorden (Engedal, 2023a; Liang et al., 2017; Liang et al., 2019).

Overjordisk kulstofindhold på tværs af årene

Af tabel 2 fremgår de samlede resultater af indholdet af kvælstof og kulstof for de tre efterafgrødetyper med det største datagrundlag: Græsudlæg, kvælstoffikserende efterafgrøder og korsblomstrede efterafgrøder. Endvidere er medtaget resultater for tidligt sået korn, der kan anvendes som alternativ til efterafgrøder. Tabellen viser derudover middelværdien og spredningen blandt resultaterne. Planteklip i almindelig rajgræs stammer fra arealer, hvor det har efterfulgt hovedafgrøderne majs eller korn. I 2023 er alle planteklippene i almindelig rajgræs lavet i marker med majs som hovedafgrøde, mens det er en blanding af korn og majs-hovedafgrøder i de øvrige år. Det har tilmed været uklart i nogle udtagninger, hvad hovedafgrøden har været, og derfor har det ikke været muligt at opdele græsefterafgrøderne efter henholdsvis majs og korn.

Generelt var spredningen i kvælstofindholdet ikke så stor blandt de fire grupper af efterafgrøder, og den varierede kun med 0,1 – 10,4 kg N pr. ha, hvor de kvælstoffikserende efterafgrøder stod for den største spredning. Kulstofindholdet varierede samlet set med 25,2 – 122,1 kg C pr. ha. Den mindste spredning forekom blandt korn, mens den største spredning forekom blandt korsblomstrede efterafgrøder. Tabellen viser også 95 % konfidensintervallerne for kvælstof- og kulstofindholdet. Som det fremgår af resultaterne, var konfidensintervallerne generelt mindre for kvælstofindholdet end for kulstofindholdet. Ses der på de enkelte grupper, havde korn det laveste konfidensinterval beregnet for både kulstof- og kvælstofindholdet, efterfulgt af græsefterafgrøder.

Tabel 2. Overjordisk kvælstof- og kulstofindhold i efterafgrøder opdelt i typer. Resultaterne for kvælstoffikserende og korsblomstrede efterafgrøder er en sammenstilling af både renbestand og blandinger blandt de to typer af efterafgrøder. Resultater fra almindelig rajgræs stammer fra både græs i majs og i korn.

	Antal marker	Middel-værdi	Spredning	95 % konfidensinterval
Almindelig rajgræs				
Kvælstofindhold, kg N pr. ha	99	19	1,9	0,4
Kulstofindhold, kg C pr. ha	99	361	91,5	18,0
Kvælstoffikserende efterafgrøder				
Kvælstofindhold, kg N pr. ha	47	30	10,4	3,0
Kulstofindhold, kg C pr. ha	37	478	104,7	33,7
Korsblomstret				
Kvælstofindhold, kg N pr. ha	161	35	5,5	0,8
Kulstofindhold, kg C pr. ha	143	449	122,1	20,0
Korn				
Kvælstofindhold, kg N pr. ha	34	13	13	0,05
Kulstofindhold, kg C pr. ha	14	211	211	13,2

De gennemsnitlige værdier for kulstofindholdet der er målt i efterafgrøder udtaget i CatCap-projektet, er sammenlignelige med øvrige resultater, fra andre danske markforsøg, hvor der er udført planteklip (Jensen et al., 2024).

Kulstofindhold per år fra planteklip taget i CatCap-projektet

I ovenstående afsnit er alle data fra planteklip fra forskellige projekter blevet behandlet. I dette afsnit fokuseres på resultater fra data udtaget i CatCap-projektet.

Tabel 3 viser det gennemsnitlige kulstofindhold i fire forskellige efterafgrødetyper, hvorfra der er taget planteklip i mindst ét år. Det er henholdsvis græsudlæg, korsblomstrede blandinger, olieræddike og kvælstoffikserende efterafgrøder. Græsudlæggene stammer delvist fra græs i majs og fra græs i vårkorn, men behandles som en type af efterafgrøde.

Tabel 3. Gennemsnitlig årlig kulstofindhold (kg pr. ha) i efterafgrøder, der har indgået i projektet CatCap, og som er udvalgt på baggrund af efterafgrødetyper, hvorfra der er taget planteklip i mere end ét år. Planteklippene i græs blev udtaget i marker med alm. rajgræs, hovedafgrøden har i 2023 og 2024 udelukkende været majs, mens

hovedafgrøden i de to øvrige år, er fortrinsvis vårsæd og vintersæd. Resultaterne for korsblomstrede efterafgrøder er en sammenstilling af både renbestand og blandinger, og for kvælstoffikserende efterafgrøder stammer resultaterne fra blandinger.

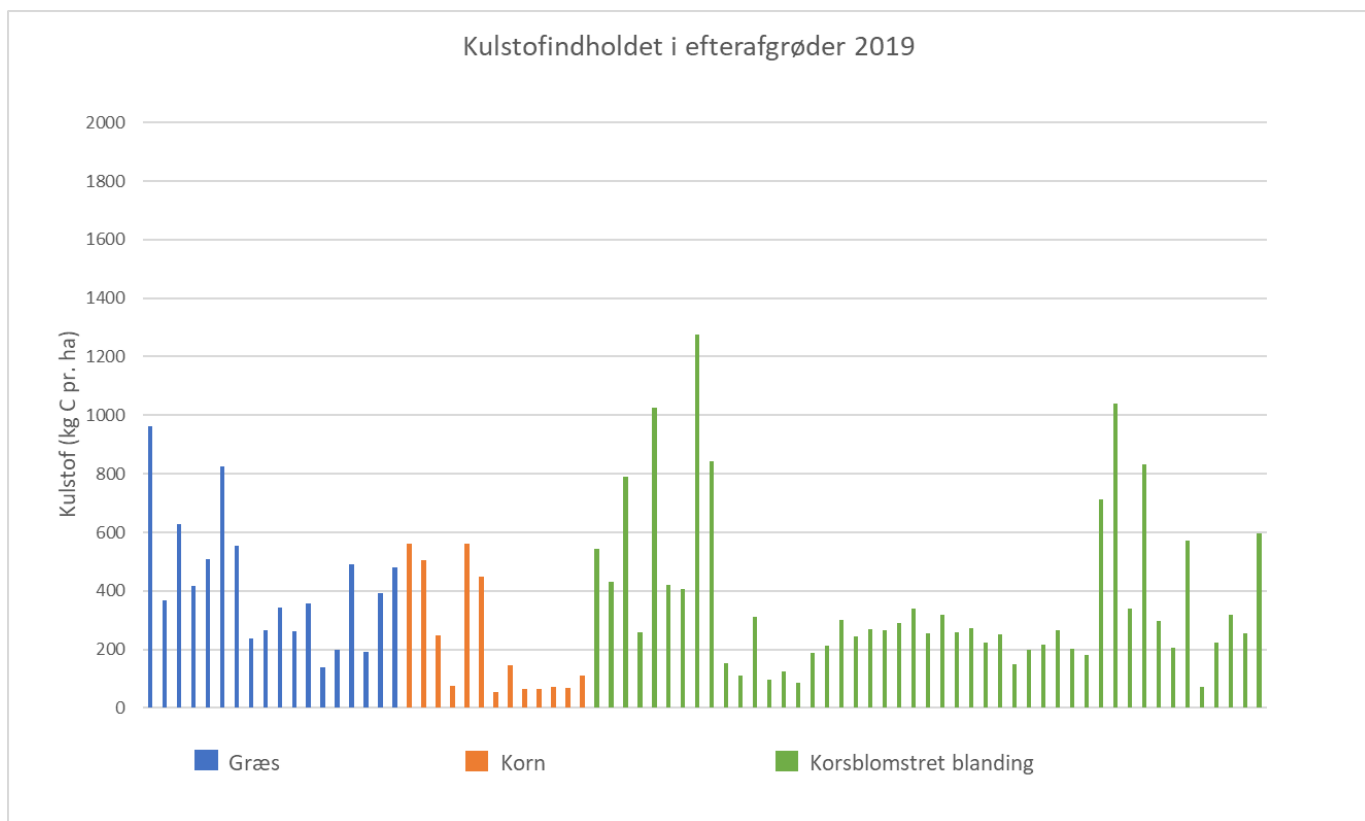
*Græsudlæg i 2019 og 2020 er udtaget i marker med korn som hovedafgrøde, mens græsudlæggene i 2023 og 2024 er udtaget i majsmarker.

Efterafgrødetype pba. planteklip i CatCap-projektet	Gennemsnit pr. år			Samlet gennemsnit i CatCap-planteklip
	Årstal	Antal observationer	Kulstofindhold kg C pr. ha	Kulstofindhold kg C pr. ha
Græsudlæg*	2019	18	423	354
	2020	5	389	
	2023	28	219	
	2024	46	405	
Korsblomstret blanding	2019	51	372	397
	2020	39	430	
Olieræddike	2020	22	435	564
	2024	19	714	
Kvælstoffikserende	2023	13	349	533
	2024	26	624	

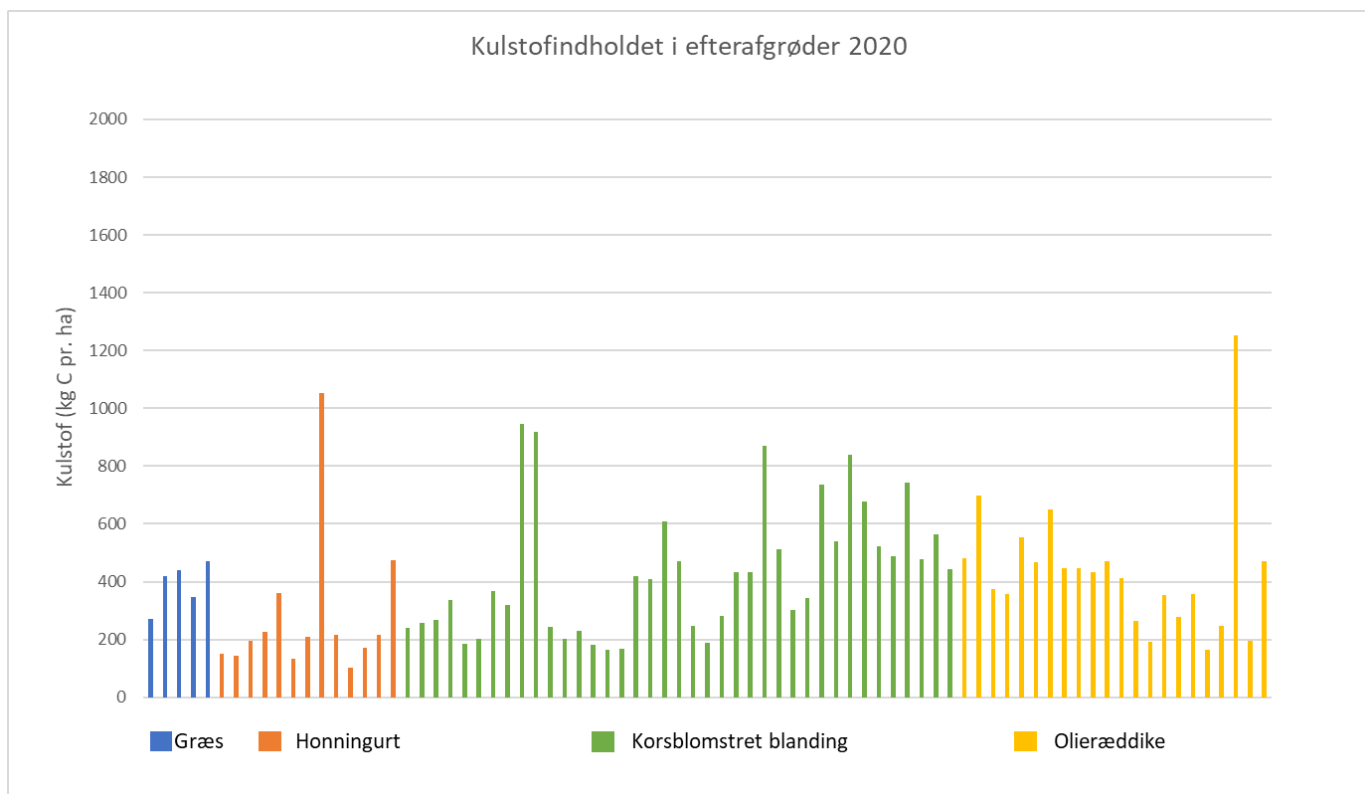
Figurerne 4-7 viser fordelingen af kulstofindholdet i planteprøver, som udelukkende blev indsamlet i regi af CatCap-projektet i 2019, 2020, 2023 og 2024. Der var tendens til, at der for hver efterafgrødetype kunne findes høje observationer, hvor en enkelt eller to efterafgrøder havde et større kulstofindhold sammenlignet med de øvrige observationer i samme kategori og år.

Som det fremgår af figuren for 2023 (figur 6), var indholdet af kulstof i græsefterafgrøder efter majs generelt lavere sammenlignet med resultaterne fra 2024. Det gennemsnitlige kulstofindhold i græs på tværs af alle observationer efter majs var 335 kg C pr. ha. I 2019 og 2020 blev der udtaget planteklip i græsudlæg efter korn; her var det gennemsnitlige kulstofindhold for alle observationer i disse to år 416 kg C pr. ha.

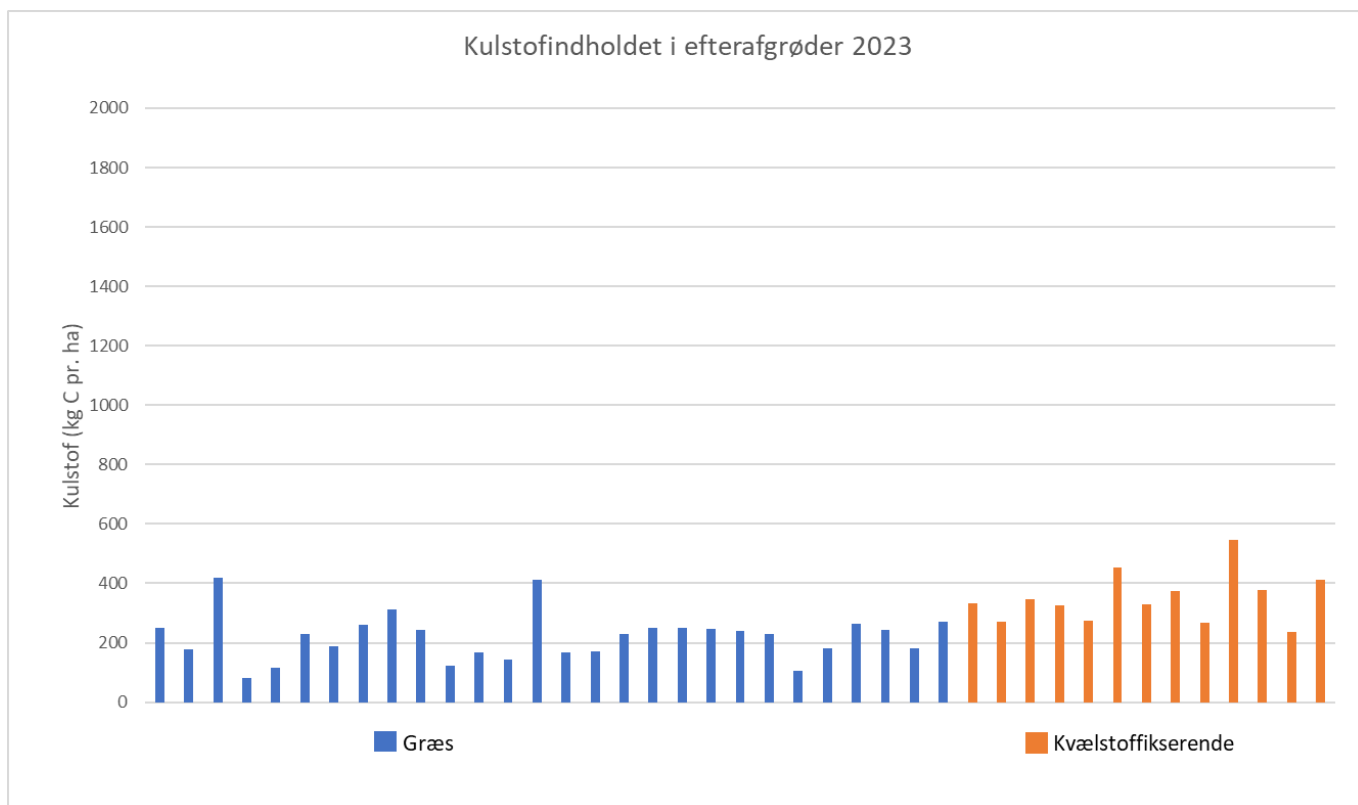
Også for de kvælstoffikserende efterafgrøder var der en tendens til, at indholdet af kulstof var lavere i 2023 i sammenligning med øvrige år, hvor indholdet var blevet målt uagtet om den kvælstoffikserende efterafgrøde var forårsudlagt eller efterårsudlagt. I kvælstoffikserende efterafgrøder udlagt i 2023 var det gennemsnitlige kulstofindhold 380 kg C pr. ha, mens den i 2024 var 624 kg C pr. ha, svarende til en forskel i kulstofindhold på 79 % fra 2023 til 2024.



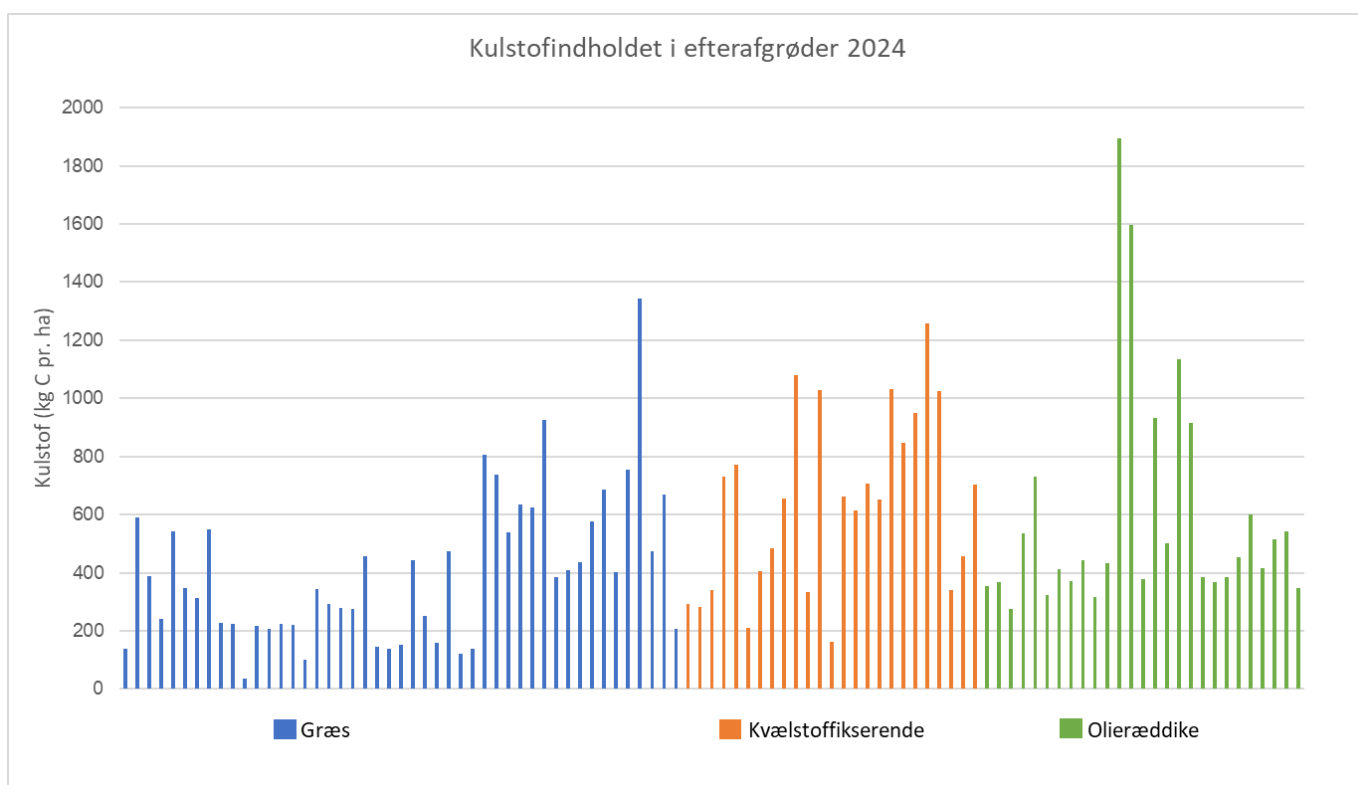
Figur 3. Kulstofindholdet (kg C pr. ha) i overjordisk biomasse i 2019 for efterafgrødetyperne: græs efter korn (blå), korn (orange) og korsblomstrede blandinger (grønne), hvor hver søjle repræsenterer én måling.



Figur 4. Kulstofindholdet (kg C pr. ha) i overjordisk biomasse i 2020 for efterafgrødetyperne: græs efter korn (blå), honningurt (orange), korsblomstrede blandinger (grønne) og olieræddike (gul), hvor hver søjle repræsenterer én måling.



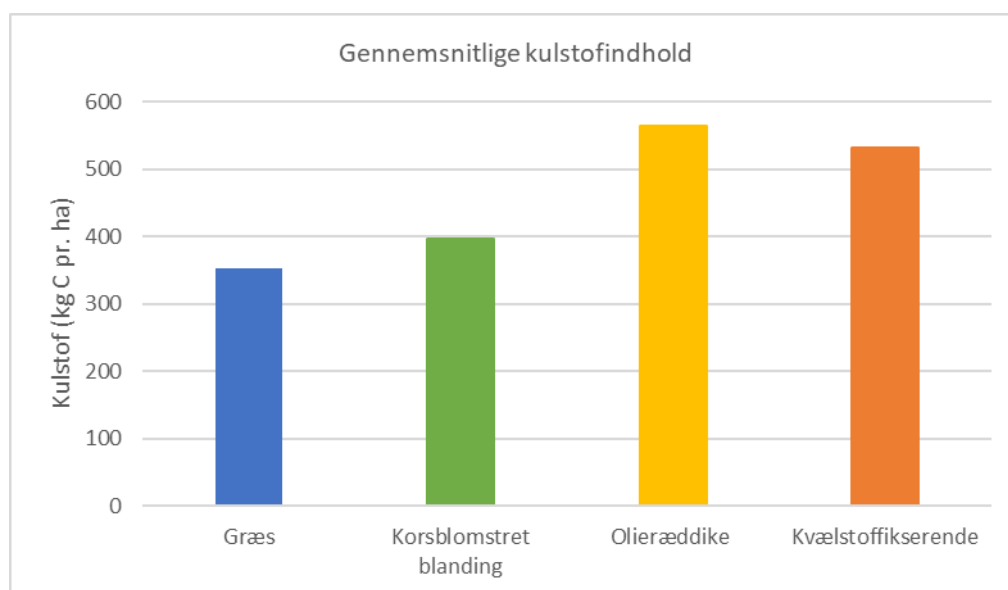
Figur 5. Kulstofindholdet (kg C pr. ha) i overjordisk biomasse i 2023 for efterafgrødetyperne: græs efter majs (blå) og kvælstoffikserende efterafgrøder (orange), hvor hver søjle repræsenterer én måling.



Figur 6. Kulstofindholdet (kg C pr. ha) i overjordisk biomasse i 2024 for efterafgrødetyperne: græs efter majs (blå), kvælstoffikserende efterafgrøder (orange) og olieræddike (grønne), hvor hver søjle repræsenterer én måling.

For alle fire år kunne der observeres forskelle i kulstofindholdet, både mellem de forskellige efterafgrødetyper og inden for samme type. For eksempel blev der i 2024 registreret en meget stor variation i

kulstofindhold for græsmarker på mellem 35 og 1342 kg C pr. ha. En tilsvarende stor relativ variation blev observeret for græs i de øvrige år samt for de andre efterafgrøder.



Figur 7. Gennemsnitlige kulstofindhold i overjordisk biomasse for de fire typer efterafgrøder/ efterafgrødeblandinger: græs, korsblomstret blanding, olieræddike, kvælstoffikserende efterafgrøder.

Efterafgrødetyperne græs, korsblomstrede blandinger, olieræddike og kvælstoffikserende blandinger indgik i flere af måleårene. Planteklip i græs blev foretaget i alle fire år, mens målinger i korsblomstrede efterafgrøder blev udført i 2019 og 2020, olieræddike i 2020 og 2024, og kvælstoffikserende efterafgrøder i 2023 og 2024.

Sammenlignes det gennemsnitlige kulstofindhold i overjordisk biomasse på tværs af de år, hvor målingerne blev foretaget, havde olieræddike det højeste kulstofindhold, tæt fulgt af kvælstoffikserende efterafgrøder, mens græs havde det laveste (figur 8). Der skal tages forbehold for, at dette bygger på forskellige datamængder, da der blev udtaget flere planteklip i græs og olieræddike end i korsblomstrede blandinger og kvælstoffikserende efterafgrøder, samt at data stammer fra forskellige år. Olieræddike er kendt for sin hurtige vækst og store biomasseproduktion, hvilket kan forklare det høje kulstofindhold i den overjordiske biomasse. Græs vokser derimod langsommere og producerer mindre overjordisk biomasse, men kan muligvis kompensere ved at lagre mere kulstof i rødderne. En undersøgelse af Thorup-Kristensen (2001) viste, at italiensk rajgræs havde den største rodbiomasse blandt de testede efterafgrøder, men relativt få dybe rødder. Omvendt havde olieræddike en lavere samlet rodbiomasse, men dybere rødder. Andre danske studier har vist, at arter som cikorie og rajgræs producerer en stor mængde rodbiomasse i forhold til skudbiomassen (Eller, 2024).

I undersøgelsen af Eller (2024) blev rodbiomasse ikke analyseret, men rod/top-forholdet, der beskriver, hvordan en plante fordeler sine ressourcer mellem over- og underjordisk biomasse, er blevet beregnet baseret på danske studier af efterafgrøder, herunder olieræddike og græs. Resultaterne viste, at olieræddike havde et gennemsnitligt rod/top-forhold på 0,36, hvilket indikerer, at arten primært investerer ressourcer i overjordisk biomasse frem for rodvækst. Til sammenligning havde græs et rod/top-forhold på 1,34, hvilket understreger fokus på underjordisk vækst kontra overjordisk. Både overjordisk og underjordisk biomasse tilfører kulstof til jorden. Dog menes underjordisk biomasse at bidrage mere til opbygning af kulstofpuljen i jorden sammenlignet med overjordisk biomasse. Dette er blandt andet grundet at rødderne men også rodafsætning af rodeksudater, små rodfragmenter og de løbende inputs fra døde rødder bidrager væsentligt til kulstofforførslen i jorden. Derudover også at rødderne generelt er mindre let nedbrydelige end den overjordiske biomasse.

Ud over biomasseproduktion og fordelingen mellem rødder og skud har også rodtypen stor betydning for, hvor meget kulstof der tilføres jorden. Forskellige rodsystemer bidrager forskelligt til jordens kulstofpulje. Arter med fibrøse rodsystemer, såsom græs, danner et tæt netværk af rødder i de øvre jordlag og

fremmer kulstofinputs tæt på overfladen via rodafsætning, da de har et større overfladeareal, hvorover kulstoffet kan udskilles. Pælerødder, som dem der ses hos olieræddike, vokser dybere og kan i modsætning til græs i højere grad øge kulstofinputtet i de nedre jordlag, da kulstoffet er mindre udsat for mineralisering i dybere jordlag. Rodafsætning spiller en central rolle i denne proces, da den ofte bidrager væsentligt til dannelsen af en stabil kulstofpulje (Engedal et al., 2023a).

Efterafgrødeblandingerne viste et højere gennemsnitlig kulstofindhold i den overjordiske biomasse sammenlignet med græs, men ikke sammenlignet med olieræddike. Nogle internationale undersøgelser har imidlertid fundet, at efterafgrødeblandinger generelt resulterede i en større samlet gennemsnitlig biomasseproduktion sammenlignet med efterafgrøder i renbestand (Florence et al., 2019; Murrell et al., 2017; Elhakeem et al., 2019). Dette menes at skyldes blandingeres artsammensætning og deres evne til at komplementere hinanden. Blandinger hvor arter med forskellige skud- og rodtyper, vækstmønstre, -hastigheder og næringsstofoptagelse arbejder sammen, kan føre til en bedre og mere effektiv udnyttelse af ressourcer og plads, hvilket kan resultere i større biomasseproduktion samt forbedret dyrknings-sikkerhed og økosystemtjenester (Elhakeem et al., 2021; Finney et al., 2016; Florence et al., 2019). Dog har andre undersøgelser fundet, at blandinger ikke nødvendigvis medfører højere biomasseproduktion end enkelte højtydende efterafgrødearter (Finney et al., 2016; Elhakeem et al., 2021). Danske undersøgelser af Martins et al. (2024) og Engedal et al. (2023a) har imidlertid fundet, at efterafgrødeblandinger generelt kan bidrage med en større samlet kulstoftilførsel til jorden sammenlignet med efterafgrøder i renbestand. Effekten af blandinger synes ud fra ovenstående derfor at afhænge af den specifikke artssammensætning. Dette kan også observeres i figur 5, hvor nogle korsblomstrede blandinger havde en større overjordisk biomasseproduktion sammenlignet med olieræddike, mens andre ikke viste samme tendens. En velsammensat blanding, der indeholder arter med forskellig optagelse og frigivelse af næringsstoffer, kan ikke blot potentielt øge kulstoftilførslen til jorden, men også muligvis levere et mere komplet udvalg af næringsstoffer til den efterfølgende afgrøde (Hansen et al., 2021).

De kvælstoffikserende efterafgrødeblandinger havde næsten et lige så stor gennemsnitlig kulstofindhold i den overjordiske biomasse som olieræddike (figur 8). Derimod var det gennemsnitlige kulstofindhold i korsblomstrede blandinger lavere end i blandinger med kvælstoffikserende arter. Lignende blev fundet i planteklip gennemført i 2020 til 2022, hvor der også blev fundet et større kulstofindhold i blandinger med kvælstoffikserende arter, sammenlignet med blandinger uden (Jensen et al., 2024). Denne forskel kan skyldes, at blandinger med kvælstoffikserende arter ikke blot kan optimere ressourceudnyttelsen, men også kan berige jorden via fiksering af atmosfærisk kvælstof, hvilket stimulerer yderligere plante-vækst. Eksempelvis fandt en undersøgelse af Mortensen et al. (2021), at inkludering af vikke i efterafgrødeblandinger medførte et større kulstofindhold i blandingeres overjordiske biomasseproduktion sammenlignet med blandinger uden vikke, hvilket kan resultere i en større kulstoftilførsel til jorden. Den specifikke artssammensætning i blandingerne i CatCap-planteklippene kan også have haft betydning, men komplementariteten mellem arterne blev ikke undersøgt nærmere.

Planteklippene gennem de fire år, blev foretaget på marker i forskellige dele af landet, hvilket indebærer, at flere faktorer kan have påvirket efterafgrødernes biomasseproduktion både inden for det enkelte år og på tværs af år. Vækstbetingelserne afhænger i høj grad af jordtype, jordbundsforhold, næringsstofindhold – særligt kvælstof – samt etableringstidspunktet på den enkelte mark (Eller, 2024). Derudover kan årlige forskelle i klimatiske forhold og næringsstofftilgængelighed føre til forskelle i efterafgrødevæksten og dermed i kulstofindholdet i biomassen. For eksempel har enkimbladede arter som græsser en mindre rodtybdevækst end tokimbladede efterafgrøder og kræver højere temperaturer for optimal vækst. Typisk ligger rodvæksthastigheden for græsser på 1,0–1,2 mm pr. dag pr. °C, mens den for tokimbladede efterafgrøder er 1,5–2,3 mm pr. dag pr. °C (Thorup-Kristensen, 2001). Nedbørsmængderne spiller også en central rolle i rodudviklingen. I tørre år søger rødderne dybere for at søge vand, men bliver ofte mindre tætte, mens de i våde år forbliver kortere og mere overfladiske. Jordtypen har ligeledes betydning, da lerjord generelt fremmer dybere og mere spredte rødder sammenlignet med sandjord (Eller, 2024). En meta-analyse af McClelland et al. (2021) fandt, at efterafgrøder havde en positiv effekt på jordens kulstofindhold, men at lokale forhold påvirkede deres effektivitet. De vigtigste faktorer for forskel i denne effekt var vækstperiodens længde, årlig biomasseproduktion og jordens lerindhold. Derfor kan efterafgrødernes biomasseproduktion variere markant fra sted til sted og år til år, da

den ikke kun påvirkes af art, artssammensætning og dyrkningspraksis, men også af en kombination af jordbundsforhold og klima. Derudover er det, som nævnt tidligere, vigtigt at understrege, at en større kulstoftilførsel ikke nødvendigvis er lig med en større kulstoflagring, da kulstoflagring afhænger af nettoforskellen mellem tilførsel og omsætning.

Anbefalinger til landbrugere, om hvordan kulstofinputtet kan optimeres med efterafgrøder

For at optimere kulstofinputtet gennem efterafgrøder er det vigtigt at tage højde for faktorer som valg af efterafgrødetype, artsammensætning og lokale dyrkningsforhold. Ud fra ovenstående resultater og diskussion af litteraturen kan der opstilles generelle anbefalinger til optimering af kulstoftilførsel til jorden fra efterafgrøder.

1. Vælg efterafgrøder med høj potentiel biomasseproduktion

Valg af efterafgrødearter med en høj potentiel biomasseproduktion, enten overjordisk biomasse såsom olieræddike eller underjordisk biomasse som græs, kan bidrage med en højere kulstoftilførsel til jorden.

2. Anvend efterafgrødeblandinger med hurtigt-voksende arter som komplementerer hinanden

Blandinger af hurtigt-voksende efterafgrøder med forskellige rod- og skudvækst kan sikre en bedre udnyttelse af næringsstoffer, vand og plads og derved øge den samlede biomasseproduktion. Ved at være opmærksom på artssammensætningen og deres evne til at komplementere hinanden, kan effekten øges når forholdene (vand, næring, vejr) varierer.

3. Inkluder af kvælstoffikserende arter i efterafgrødeblandingerne

Kvælstoffikserende arter som kløver og vikke kan optage kvælstof fra luften, hvilket fremmer væksten og øger biomasseproduktionen i blandingen, især når tilgængeligt kvælstof i jorden er begrænsende. Dette kan resultere i en større kulstoftilførsel til jorden.

4. Etabler efterafgrøderne tidligt

Tidlig etablering af efterafgrøder er afgørende for at øge kulstoftilførslen fra efterafgrøderne, da det forlænger vækstsæsonen og giver planterne bedre mulighed for at udvikle både rødder og overjordisk biomasse. Dette kan enten være ved undersåning i foråret eller så tidligt som muligt – enten før eller lige efter høst.

Konklusion

Der blev ikke fundet nogen forskel i kulstofindholdet i den overjordiske biomasse mellem efterafgrøder undersøgt i foråret og efterafgrøder etableret ved høst. Det gennemsnitlige kulstofindhold varierede fra 193 til 954 kg C pr. ha, med enkelte målinger mellem 1500 og 1900 kg C pr. ha i 2024. Det er dog sandsynligt, at efterafgrøderne undersøgt i foråret havde en større kulstofftilførsel sammenlignet med de efterårsetablerede på grund af en længere vækstsæson, men dette blev ikke undersøgt direkte. En tidligere undersøgelse viste også, at olieræddike, som blev etableret før høst af hovedafgrøden, havde en højere underjordisk biomasse sammenlignet med olieræddike etableret efter høst af hovedafgrøden.

Det gennemsnitlige kulstofindhold i markerne, hvor der blev taget planteklip som en del af CatCap-projektet i de fire år (2019, 2020, 2023 og 2024), var 410 kg C pr. ha, men der blev observeret meget stor variation både mellem de forskellige efterafgrøder, inden for samme type og mellem årene. Når det gennemsnitlige kulstofindhold blev sammenlignet for efterafgrøder, der indgik i flere måleår, viste resultaterne, at olieræddike havde det højeste indhold i overjordisk biomasse, mens græs havde det laveste. Dette kan skyldes, at olieræddike investerer flere ressourcer i overjordisk biomasseproduktion, mens græs prioriterer underjordisk biomasseproduktion, eller det kan skyldes, at olieræddiken vokser hurtigere end græs, og dermed har et større potentiale. Efterafgrødeblandinger havde et højere gennemsnitlig kulstofindhold i den overjordiske biomasse end græs, men et lavere indhold end både olieræddike og kvælstoffikserende blandinger. Tidligere studier har dog vist modstridende resultater – nogle fandt, at blandinger ikke nødvendigvis øger biomasseproduktionen, mens andre påviste både højere biomasseproduktion og en større samlet kulstofftilførsel til jorden. Dette tyder på, at effekten af blandinger afhænger af, hvor godt arternes vækst komplementerer hinanden og af vækstforholdene. Blandinger med kvælstoffikserende arter havde et højere kulstofindhold, sandsynligvis fordi de tilfører jorden kvælstof, hvilket kan have en positive effekt på væksten. Væksten af efterafgrøder påvirkes desuden af flere faktorer som jordtype, næringsstofindhold og etableringstidspunkt, da målingerne blev udført i forskellige dele af landet og på tværs af år. Klimatiske forhold spiller også en central rolle, da temperatur og nedbør påvirker både biomasseproduktionen og kulstofindholdet. Disse faktorer kan være en yderligere årsag til de observerede forskelle i den overjordiske biomasseproduktion. I rapporten er der ikke skelnet mellem destruktionsstidspunktet, og der bør udføres yderligere undersøgelser om betydningen af denne.

Baseret på resultaterne og diskussionen har vi opstillet generelle anbefalinger til landbrugere om optimering af kulstofftilførslen til jorden gennem brug af efterafgrøder:

- 1) Vælg efterafgrøder med høj potentiel biomasseproduktion.
- 2) Anvend efterafgrødeblandinger med flere hurtigvoksende arter som komplementerer hinanden.
- 3) Inkluder af kvælstoffikserende arter i efterafgrødeblandingerne.
- 4) Etabler efterafgrøderne så tidligt som muligt.

Referencer

- Bolinder, M.A., H.H. Janzen, E.G. Gregorich, D.A. Angers, A.J. VandenBygaart. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, pp. 29-42. DOI: 10.1016/j.agee.2006.05.013.
- Cotrufo, M. F., & Lavelle, J. M. (2022). Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *Advances in agronomy*, 172, 1-66.
- Cottney, P., Black, L., Williams, P., & White, E. 2022. How cover crop sowing date impacts upon their growth, nutrient assimilation and the yield of the subsequent commercial crop. *Agronomy*, 12(2), 369.
- Elhakeem, A., Bastiaans, L., Houben, S., Couwenberg, T., Makowski, D., & van der Werf, W. 2021. Do cover crop mixtures give higher and more stable yields than pure stands?. *Field Crops Research*, 270, 108217.
- Elhakeem, A., van der Werf, W., Ajal, J., Lucà, D., Claus, S., Vico, R. A., & Bastiaans, L. 2019. Cover crop mixtures result in a positive net biodiversity effect irrespective of seeding configuration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285, 106627.
- Eller, F.P. 2024. Notat om rod/top-relation i gængse efterafgrøder. SEGES Innovation.
- Engedal, T. 2023a. Soil organic carbon input and stabilization from cover crops. PhD dissertation by Tine Engedal. Campus Print – University of Copenhagen, pp.130.
- Engedal T, Magid J, Hansen V, Rasmussen J, Sørensen H, Jensen LS. 2023b. Cover crop root morphology rather than quality controls the fate of root and rhizodeposition C into distinct soil C pools. *Global Change Biology* 29, 5677–5690. DOI: 10.1111/gcb.16870
- Engedal, T., Karlsson, M., Andersen, M. S., Rasmussen, J., Thorup-Kristensen, K., Jensen, L. S., ... & Hansen, V. 2023c. Legume-based cover crop mixtures can overcome trade-offs between C inputs, soil mineral N depletion and residual yield effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108408.
- European Commission: Directorate-General for Environment. 2011. Soil: the hidden part of the climate cycle. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/30669>.
- Finney, D. M., White, C. M., & Kaye, J. P. 2016. Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. *Agronomy journal*, 108(1), 39-52.
- Florence, A. M., Higley, L. G., Drijber, R. A., Francis, C. A., & Lindquist, J. L. 2019. Cover crop mixture diversity, biomass productivity, weed suppression, and stability. *PLoS One*, 14(3), e0206195.
- Hansen V., Engedal T., Rasmusen J., Andersen M.S., Magid J., Jensen L.S. (2025). Cover crops make important contributions to belowground topsoil and subsoil carbon. *Agriculture Ecosystems & Environment* 389, 109668. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109668>
- Hansen, V., Eriksen, J., Jensen, L. S., Thorup-Kristensen, K., & Magid, J. 2021. Towards integrated cover crop management: N, P and S release from aboveground and belowground residues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, 107392.
- Jensen, R.E., Poulsen, H.V., Jensen, N., Eller, F., Christensen, A.T., Vestenaa, M.W., Egelund, V.R., Husted, M.H., Pedersen, T.M., 2024. Kulstoflagring på landbrugsjord.

Jensen, L. S. 21. oktober 2024. CatCap efterafgrøder og grøngødninger for C lagring og reduktion af N₂O emissioner Catch crops for Carbon Capture and Mitigation of Nitrous Oxide Emissions. Klima-forskningsprogrammets afsluttende følgegruppemøde, 21. oktober 2024. Intern PowerPoint Præsentation.

Knudsen, L., Hansen, M. N., Østerhaab, M. M., Stougård, K., Filsø, S. S., Vestergaard, A. V., Pedersen, T. M. 2018. FORBEDRING AF JORDENS FRUGTBARHED. SEGES Innovation. Landbrugsinfo: [SEGES rapport](#)

Kristensen, N. H. 2020. Derfor kan dine efterafgrøder være gode for både miljø og klima. SEGES Innovation. Landbrugsinfo: [Derfor kan dine efterafgrøder være gode for både miljø og klima](#)

Liang, C., Schimel, J. P., & Jastrow, J. D. 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature microbiology*, 2(8), 1-6.

Liang, C., Amelung, W., Lehmann, J., & Kästner, M. 2019. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Global change biology*, 25(11), 3578-3590.

Liang Z., Mortensen E., De Notaris C., Elsgaard L., Rasmussen J. (2022) Subsoil carbon inputs by cover crops depends on management history. *Agriculture Ecosystems and Environment* 326, 107800. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107800>

Lyngvig, H. S., Mikkelen, M. 2020. Teknik til etablering af efterafgrøder. SEGES Innovation. Landbrugsinfo: [Teknik til etablering af efterafgrøder](#)

Martins, J., Bloch, N. F., Enggrob, K. L., Liang, Z., Harbo, L. S., Rasmussen, J., Peixoto, L. 2024. Cover crop mixtures enhance belowground carbon input and suppression of spontaneous flora under Danish conditions. *Geoderma Regional* 39.

McClelland, S. C., Paustian, K., & Schipanski, M. E. 2021. Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Ecological Applications*, 31(3), e02278.

Mooney, H. A. 1972. The carbon balance of plants. *Annual review of ecology and systematics*, 3(1), 315-346.

Mortensen, E. Ø., De Notaris, C., Peixoto, L., Olesen, J. E. & Rasmussen, J. 2021. Short-term cover crop carbon inputs to soil as affected by long-term cropping system management and soil fertility. Department og Agroecology, Aarhus University, Tjele, Denmark.

Murrell, E. G., Schipanski, M. E., Finney, D. M., Hunter, M. C., Burgess, M., LaChance, J. C., ... & Kaye, J. P. 2017. Achieving diverse cover crop mixtures: Effects of planting date and seeding rate. *Agronomy Journal*, 109(1), 259-271.

Nielsen, J. A., Poulsen, H. V. 2022. Omsætning af kulstof i jorden. SEGES Innovation. LandbrugsInfo: [Omsætning af kulstof i jorden](#)

Nilsson, J., Ernfors, M., Prade, T., & Hansson, P. A. 2024. Cover crop cultivation strategies in a Scandinavian context for climate change mitigation and biogas production—Insights from a life cycle perspective. *Science of the Total Environment*, 918, 170629.

Poulsen, H. V. 2024. Kulstof i Centrum: Kulstoflagring som klimavirkemiddel. SEGES Innovation. Landbrugsinfo: [Kulstof i Centrum: Kulstoflagring som klimavirkemiddel](#)

Prentice, I. C., Farquhar, G. D., Fasham, M. J. R., Goulden, M. I., Heinmann, M., & Jaramillo, V. J. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In J. T. Houghton (Ed.), *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 183-238). Cambridge: Cambridge University Press.

Thorup-Kristensen K. 2001. Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? *Plant and Soil* 230, 185–195.

Thorup-Kristensen, K. 2023. Dybere rodvækst i vinterhvede, kartofler og græsser kan reducere udvaskningen af kvælstof. SEGES Innovation/ Københavns Universitet. Landbrugsinfo: [Dybere rodvækst i vinterhvede, kartofler og græsser kan reducere udvaskningen af kvælstof](#)

Whalen, J. K., Sampedro, L. 2010. *Soil ecology and management*. CABI. pp. 134-135.

Øbing-Safar, H., Jensen, N. 2024. Kulstof i Centrum: Forstå jordens kredsløb af kulstof og påvirkning på klimaet. SEGES Innovation. LandbrugsInfo: [Kulstof i Centrum: Forstå jordens kredsløb af kulstof og påvirkning på klimaet](#)

Xie. Y., Islam, S., Legesse, H. T., Kristensen, H. L. 2021. Deep root uptake of leachable nitrogen in two soil types is reduced by high availability of soil nitrogen in fodder radish grown as catch crop. *Plant Soil* 465, 213–227.