

Kulstofbinding i økologiske græsmarker

Jørgen E. Olesen, Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi
13 december 2018

Notat i FØL projektet Økologisk jordbrug som bidrag til at nå klimamålene

Sammendrag

Kulstofindholdet i jorden afspejler balancen mellem tilførsel af kulstof i organisk materiale og den mikrobielle nedbrydning af dette materiale samt jordens indhold af organisk stof. Ved omlægning fra afgrøder i omdrift til græsmarker sker der en opbygning af kulstof i jorden fordi mængden af tilført organisk stof øges. Resultater fra langvarige forsøg giver grundlag for følgende anslåede værdier for kulstoflagring i forskellige produktionssystemer med kløvergræs.

Kløvergræs til grøngødning med tilbageførsel af biomassen i marken: 1,2 t C/ha/år

Kløvergræs til biogas med returnering af afgasset biomasse: 1,0 t C/ha/år

Kløvergræs til slæt: 0,6 t C/ha/år

Græs ved lavt produktionsniveau 0,3 t C/ha/år

Sammenligning af græsmarker til slæt og afgræsning viser afgræsningen kan øge kulstoflagringen med 0,6-1,2 t C/ha/år. Ved omlægning af vedvarende græsmarker vil kulstoflagringen blive reduceret med ca. 0,2 t C/ha/år.

Indledning

Landbrugsarealer er kilde til drivhusgasemission i form af kuldioxid (CO₂) fra nedbrydning af organisk stof i jorden, og lattergas (N₂O) primært fra omsætningen af kvælstofgødning og planterester. Tilsvarende, vil en øget kulstoflagring i jorden fra bl.a. græsmarker kunne opveje andre emissioner. Ammoniaktab og kvælstofudvaskning er desuden indirekte kilder til lattergas (Olesen et al., 2018).

Kulstoffabet fra mineraljord i form af CO₂ sker kun langsomt, og udviklingen kan forsinkes/vendes ved omlægning til et sædskifte eller driftsform, som sikrer en større tilførsel af organisk stof i form af planterester, herunder rodbiomasse, og/eller organisk gødning. Jordens kulstoflager afspejler således balancen mellem den fortsatte omsætning af jordens organiske pulje med tilhørende tab af kulstof og tilførslen af kulstof med planterester og anden organisk gødning. Ændringer i den dyrkede jords kulstoflager sker kun langsomt, og effekter af ændring i afgrødevalg eller driftstiltag kan derfor først måles efter en årrække. Desuden vil virkningen af et givent tiltag være aftagende med årene, idet der med tiden opstår en ny ligevægt mellem tilførsel af kulstof og frigivelse af kulstof fra jordpuljen. For normalt dyrket jord vil der opnås ligevægt inden for en periode på 20 til 50 år (Christensen og Johnston, 1997). Den årlige opbygning af kulstof under græs vil dog kunne fortsætte over en meget lang periode (mere end 100 år), og det målte kulstofindhold under græs er typisk 50 til 100 % højere end for jord med enårig afgrøder i omdrift (Soussana et al., 2004).

Virkingen af et givent driftstiltag i landbruget på kulstofbinding vil afhænge af jordens kulstofindhold i udgangspunktet. Såfremt den dyrkede jord allerede har et højt indhold af kulstof vil muligheden for yderligere kulstofbinding være ubetydelig, mens en dyrket jord med lavt udgangspunkt kan have et betydeligt potentiale. Potentialet for kulstofbinding afhænger desuden af jordens tekstur, idet langtidslagring af kulstof er knyttet til jordens indhold af ler. Ved samme driftsform vil lerjord have en lidt større bindingskapacitet end sandjord (Schjøning, 1986), men effekten kan i praksis

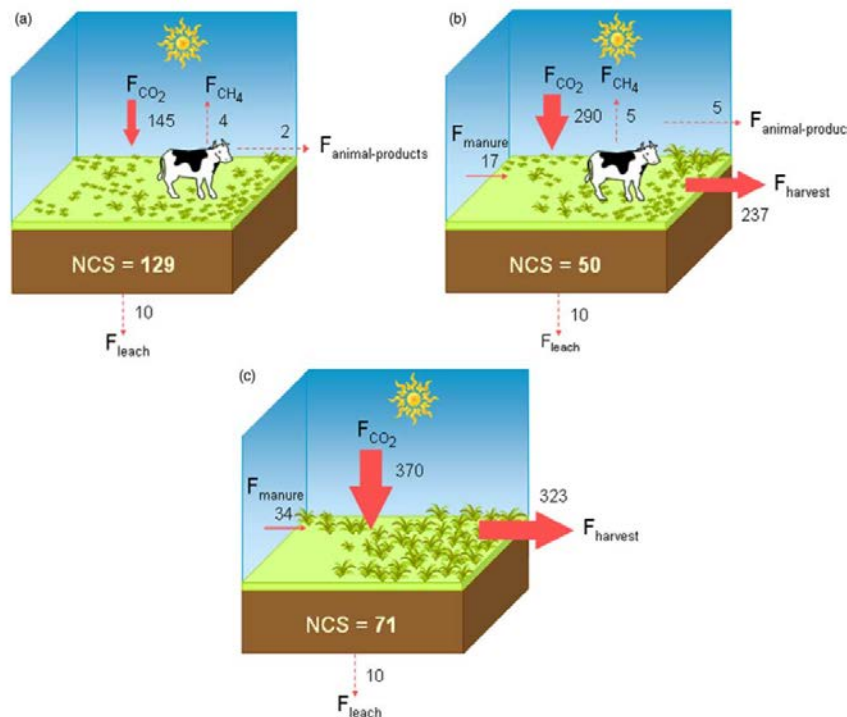
være beskeden (Taghizadeh-Toosi og Olesen, 2016). Bidraget til jordens kulstoflager er nøje knyttet til mængden af kulstof, der tilføres dyrkningslaget med afgrøderester (Christensen og Johnston, 1997; Hu et al., 2018a).

Der redegøres her for effekt af dyrkning af græsmarker på kulstoflagring, idet der tages udgangspunkt i en sammenligning med en jord, der har været domineret af dyrkning af fortrinsvis enårige afgrøder. I praksis vil effekten på kulstoflagring ved dyrkning af græs være så stor, at forhistorien er af mindre betydning. I økologiske produktionssystemer vil græsmarker være domineret af kløvergræs. Der ses her, hvor intet andet er angivet, alene på kulstofudviklingen i topjorden (øverste 20-30 cm af jorden).

Kulstoflagring i græsmarker

For græs- og kløvergræs vil kulstoflagringen afhænge af produktionsniveauet, der bestemmer hvor store mængder kulstof (og kvælstof), der tilbageføres jorden i planterester. For græs- og kløvergræs ved højt produktionsniveau forudsættes, at disse i økologisk jordbrug afgræsses eller indgår i slæt, ofte med gødsning med husdyrgødning (kvæggylle). Dette kan også omfatte brug af kløvergræs til biogas med tilbageførsel af det afgassede materiale (Thomsen et al., 2013). Der kan desuden være tale om kløvergræs til grøngødning, hvor græsset afslås og efterlades i marken. Effekten er således betinget af, at en del af det høstede plantemateriale tilbageføres i form af husdyrgødning eller afgasset biomasse. I praktisk økologisk dyrkning vil alle disse marker have en moderat eller højt indhold af kløver. Det høje produktionsniveau kan forekomme uanset om græsmarken indgår i et sædskifte eller henligger som vedvarende græs. Græsmarker ved et lavt produktionsniveau vil have et lavt indhold af kløver og et lavt gødningsniveau. Dette svarer typisk til braklagte arealer eller overdrevsarealer med lavt græsningstryk.

Der har i Europa været gennemført målinger af kulstofbalancer i en række vedvarende græsmarker. Disse er sammenfattet af Soussana et al. (2010), som opdelte undersøgelserne afhængig af deres benyttelse. Resultaterne er illustreret i figur 1, som viser en kulstofopbygning på 1,29 t C/ha/år i afgræsningssystemer, 0,50 t C/ha/år i kombineret afgræsning og slæt og 0,71 t C/ha/år i slætsystemer.



Figur 1. Kulstofstrømme og kulstofopbygning i jorden (NCS) i europæiske græsmarker baseret på afgræsning (a), kombineret afgræsning og slæt (b) og slæt (c). Kulstofstrømme er vist i $\text{g C/m}^2/\text{år}$ (Soussana et al., 2010).

Analyse af data fra det danske kvadratnet viser en kulstoflagring i græsmarker i topjorden (0-25 cm) på $0,95 \text{ t C/ha/år}$ og for 25-50 cm dybde på $0,58 \text{ t C/ha/år}$ (Taghizadeh-Toosi et al., 2014). Begge værdier er dog behæftet med betydelig usikkerhed ($\pm 0,35 \text{ t C/ha/år}$). Da der ikke har været detaljeret information om benyttelsen af græsmarkerne kan en del af effekten være knyttet til afgræsning eller tilførsel af kulstof i husdyrgødning.

Olesen et al. (2016) estimerede, med henvisning til modelberegninger af Taghizadeh-Toosi og Olesen (2016), at græsmarker til slæt tilfører jorden $0,6 \text{ tons C}$ pr. ha pr. år uanset jordtype og græsmarkens alder. Dette er i overensstemmelse med danske forsøg i græs med slæt (Christensen et al., 2009). Börjesson et al. (2018) fandt tilsvarende en gennemsnitlig mer-akkumulering på $0,59 \text{ tons C/ha/år}$ i en 35-årig periode på en jord med 15 % ler og 1,6 % C. Derimod var den tilsvarende effekt på en svær lerjord (45 % ler, 2-2,2 % C) kun $0,36 \text{ tons C/ha/år}$. For danske forhold svarer et lerindhold på 15 % til JB 7 (lerjord), mens et lerindhold på 45 % svarer til JB 9 (meget svær lerjord), som er meget sjælden i Danmark. Der vil være en øvre grænse for jordens indhold af organisk stof, men det vurderes, at en sådan årlig akkumulering af organisk stof er mulig i mindst 100 år (Olesen et al., 2016).

Langvarige danske sædskifteforsøg har vist, at kløvergræs til grøngødning øger kulstofindholdet i topjorden med $1,20 \text{ t C/ha/år}$ (Hu et al., 2018a). Dette skyldes en betydelig større kulstofinput med nedmulding af grønmassen end når denne bortføres. Hvis grønmassen bortføres til biogas med re-turnering af den afgassede biomasse vil kulstofopbygningen blive reduceret en smule (Thomsen et al. 2013), således at den samlede kulstoflagring formentlig bliver omkring $1,0 \text{ t C/ha/år}$. For udgøede græsmarker uden kløver er det fundet en kulstofakkumulering på $0,3 \text{ t C/ha/år}$ (Hu et al., 2018).

Baseret på disse erfaringer kan der anslås følgende kulstoflagring i forskellige produktionssystemer med kløvergræs.

Kløvergræs til grøngødning med tilbageførsel af biomassen i marken:	1,2 t C/ha/år
Kløvergræs til biogas med returnering af afgasset biomasse:	1,0 t C/ha/år
Kløvergræs til slæt:	0,6 t C/ha/år
Græs ved lavt produktionsniveau	0,3 t C/ha/år

Effekt af afgræsning

Afgræsning er fundet at øge jordens kulstoflager sammenlignet med slætbaserede systemer. Dette skyldes formentlig især, at der ved afgræsningen afsættes gødning på arealet samtidig med at der også returneres plantemateriale i form af spild eller nedtrampning af plantemateriale ved græsnin-gen. Soussanna et al. (2010) fandt at kulstoflagringen ved afgræsning sammenlignet med slæt blev øget med 0,58 t C/ha/år, mens Senapati et al. (2018) fandt en forøgelse på 1,18 t C/ha/år. Intensitet og type af afgræsning kan dog også spille ind. Allard et al. (2007) sammenlignede intensiv og eks-tensiv afgræsning og fandt at den intensive afgræsning havde en kulstoflagring, der var 0,22 t C/ha/år højere end ved ekstensiv afgræsning.

Effekt af varighed af græsmarker

Der vil ved overgang fra korndyrkning til græs ske en hurtig opbygning af kulstof i jorden over de første par år hvorefter der vil være en mere konstant opbygning. Det skyldes at der især i de første år vil være en meget stor opbygning af kulstof i græssets rodsystem. Taghizadeh-Toosi og Olesen (2016) beregnede en årlig opbygning af kulstof i hele jordprofilet under produktiv græs til slæt på ca. 2 ton C/ha/år, men dette aftog til en årlig opbygning på ca. 0,6 ton C/ha/år i de efterfølgende år-tier. Der blev i denne undersøgelse sammenlignet med et typisk planteavlssystem med tilførsel af mineralsk gødning.

Når vedvarende græsmarker omløjes sker der en stor mineralisering af både C og N pga. et stort input af dødt organisk materiale som eksponeres for mikrobiel omsætning, øget beluftning og ned-brydning af jordaggregater (Panettieri et al., 2017). Det er estimeret, at tabet af kulstof over en 20-års periode i gennemsnit er $0,95 \pm 0,3$ t C/ha/år ved omløjning af vedvarende græs (Soussana et al., 2004). Kulstoflagringseffekten af korterevarende græsmarker som indgår i et sædskifte afhænger af antal år i græs og antal år med enårige afgrøder. Ved sammenligning af kulstoflagring under perma-nent græs, græs i rotation og sædskifte med enårige afgrøder er det fundet, at øgningen af kulstof i jorden over 20 år for græs i omdrift var ca. halvdelen af øgningen ved permanent græs (Soussana et al., 2004).

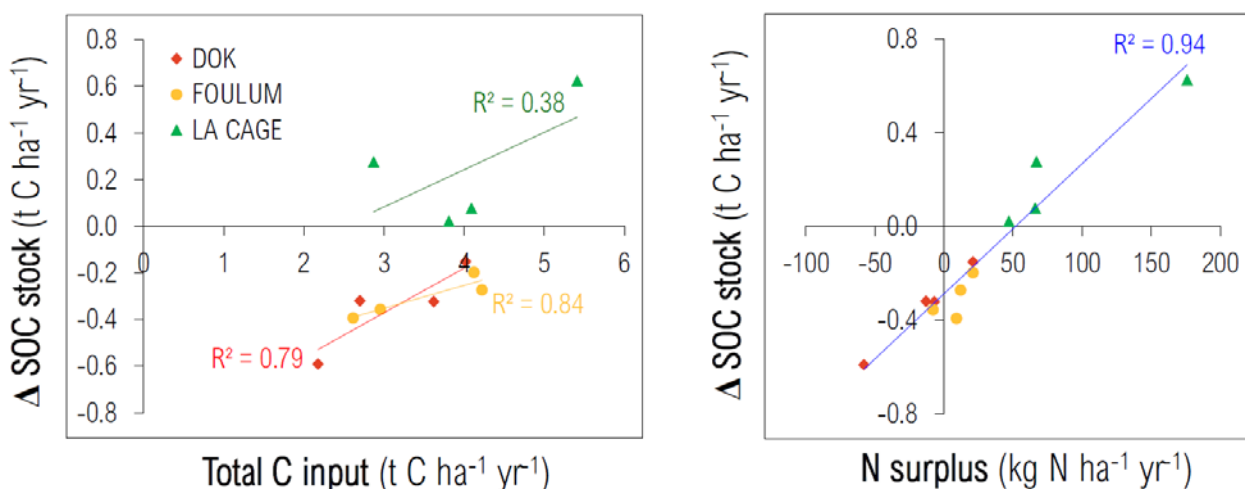
Omlægning af græsmarker vil accelerere nedbrydningen af organisk stof i jorden, med risiko for tab af en del af den kulstofpulje, som er opbygget i perioden med græs. Rutledge et al. (2017) sammen-fattede resultater fra en række undersøgelser af kulstofbalancer i omlægningsår og år uden omlæg-ning. Resultaterne pegede på, at længden af perioden mellem omlægning og etablering af nyt plan-tedække samt årlig middeltemperatur er afgørende for sædskiftets samlede kulstofbalance. Reinsch et al. (2018) fandt tilsvarende ved en model-baseret analyse af vedvarende græsmarker med oplæg-ning (retablering) enten hver 5 eller hver 10 år, at kulstofopbygningen over en 100 årig-periode sammenlignet med permanent græs blev reduceret med henholdsvis 0,21 og 0,14 t C/ha/år ved gen-etablering enten hver 5 eller hver 10 år.

Kulstoflagring og næringsstofbalancer

Kulstof lagres i jorden i form af organisk stof, der består af biologisk materiale, som ud over kulstof også indeholder kvælstof, fosfor og svovl (Kirkby et al., 2011; Richardson et al., 2014). Et øget lagring af kulstof i jorden forudsætter derfor, at der er tilstrækkeligt med disse næringsstoffer. Det vil især være kvælstof, der akkumuleres i græsmarker sammen med kulstofopbygningen. Denne sammenhæng mellem kulstof- og kvælstofopbygningen er knyttet til støkiometrien af grundstoffer (her C and N) i jordens organiske stof, hvor det omsatte organiske materiale i jorden vil have et C:N forhold på ca. 10-11. Da mulighederne for opbygning af kvælstof i jorden er knyttet til markoverskuddet af kvælstof (forskul mellem input og output af kvælstof), vil der være en sammenhæng mellem kulstofopbygningen og kvælstofoverskuddet. Dette er illustreret i figur 2 på baggrund af langvarige forsøg med økologiske systemer i tre europæiske lande. Tilsvarende resultater er fundet af Poeplau et al. (2018) ved analyse af langvarige gødningsforsøg i græsmarker, hvor tildeling af henholdsvis PK, NPK og NPK+ (øget mængde NPK) øgede kulstoflagringen med henholdsvis 0,28, 0,13 og 0,37 t C/ha/år sammenlignet med ugødet.

Der mangler dog viden om, i hvor høj grad f.eks. gødningstildeling og tilstedeværelse af bælplanter påvirker C/N forholdet af jordens organiske stof på lang sigt. Resultater fra et dansk markforsøg viste, at der, ved omlægning til ugødet græs i renbestand skete en stigning i C/N forholdet i 0-20 cm dybde fra 8 til 17 efter 14 år (Hu et al., 2018b). Der kan således ikke forventes et fast forhold mellem stigningen i hhv. C og N på baggrund af jordens C/N forhold. Tilsvarende stigninger i C/N forholdet vil ikke kunne forventes i gødet græs eller græs med en betydende andel bælplanter.

Ved en øget græsandel vil jordens C/N forhold kunne øges, men det forventes derefter at vende tilbage til udgangspunktet, hvis tidligere dyrkningspraksis genoptages. Dette skyldes, at der ved den mikrobielle nedbrydning af akkumuleret organisk stof frigives C til atmosfæren i form af CO₂, mens mikroorganismene i begyndelsen i vidt omfang vil tilbageholde kvælstof til den videre omsætning. Derudover varierer C/N forholdet, der som udgangspunkt findes i jorden. Dette C/N forhold er i Danmark typisk højere på sandjord end på lerjord (Thomsen et al., 2008).



Figur 2. Sammenhæng mellem kulstofopbygning i jorden (Δ SOC) og henholdsvis total C input og kvælstofoverskud baseret på data fra tre langvarigeforsøg i Schweiz (DOK), Danmark (Foulum) og Frankrig (La Cage) (Autret, 2017).

Udledninger af lattergas ved dyrkning af græsmarker

Tilførsel af kvælstof til jorden er en kilde til dannelse af lattergas. Dette gælder bl.a. ved tilførsel af kvælstofgødninger, også til græsmarker. Derimod er den biologiske kvælstoffiksering i kløvergræs ikke umiddelbart en kilde til lattergas, da denne kvælstof først bliver tilgængelig for jordens mikroorganismer efter omsætning af det kvælstofholdige plantemateriale (Rochette et al., 2018). Derfor vil nedmuldning af kvælstofrig plantemasse, fx græsmarker, være kilde til lattergas (Pugesgaard et al., 2017). Denne øgede udledning af lattergas kan i nogle tilfælde delvis ophæve effekten af øget kulstoflagring på netto drivhusgasudledning (Olesen et al., 2018). Dog vil effekten af lattergas fra nedmuldning af græsmarker oftest være betydeligt lavere end effekten af kulstofopbygningen.

Flere udenlandske undersøgelser, bl.a. Hellebrand et al. (2008), Soussana et al. (2010), Abalos et al. (2016) og Rochette et al. (2018), har konkluderet, at emissioner af lattergas fra flerårige afgrøder er lavere end fra etårige afgrøder. Omlægning af græsmarker vil ofte medføre en betydelig nettomineralisering af kvælstof fra nedbrydningen af planterester, og det indebærer en risiko for lattergasemission. Det bekræftes af Abalos et al. (2016), som dog fandt, at emissionen fra enårige afgrøder også i omlægningsåret var højest. Tilsvarende resultater er set i danske økologiske forsøg med kløvergræs i sædskiftet (Brozyna et al. (2013)). Derfor ser behovet for omlægning ikke ud til at ændre konklusionen om, at flerårige afgrøder som græs i sædskiftet reducerer risikoen for lattergasemission.

Referencer

- Abalos, D., Brown, S.E., VanderZaag, A.C., Gordon, R.J., Dunfield, K.E., Wagner-Riddle, C. (2016) Micrometeorological measurements over 3 years reveal differences in N₂O emissions between annual and perennial crops. *Global Change Biology* 22, 1244-1255.
- Allard, V., Soussana, J.-F., Falcimagne, R., Berbigier, P., Bonneford, J.M., Ceschia, E., D'hour, P., Hénault, C., Laville, P., Martin, C., Pinares-Patino, C. (2007). The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse budget (CO₂, N₂O and CH₄) of semi-natural grassland. *Agriculture*
- Autret, B. (2017). PhD defence. INRA, Frankrig.
- Brozyna, M.A., Petersen, S.O., Chirinda, N., Olesen, J.E. (2013). Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 181, 115-126.
- Börjesson, G., Bolinder, M.A., Kirchmann, H., Kätterer, T. (2018). Organic carbon stocks in topsoil and subsoil in long-term ley and cereal monoculture rotations. *Biology and Fertility of Soils* 54, 549–558.
- Christensen, B.T., Johnston, A.E. (1997). Soil organic matter and soil quality – lessons learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted. *Developments in Soil Science* 25, 399-430.
- Christensen, B.T., Rasmussen, J., Eriksen, J., Hansen, E.M. 2009. Soil carbon storage and yields of spring barley following grass leys of different age. *European Journal of Agronomy* 31, 29-35.
- Hellebrand, H.J., Scholz, V., Kern, J. (2008) Fertiliser induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmospheric Environment* 42, 8403-8411.
- Hu, T., Sørensen, P., Olesen, J.E. (2018a). Soil carbon varies between different organic and conventional management schemes in arable agriculture. *European Journal of Agronomy* 94, 79-88.

- Hu, T., Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E., Jensen, M.L., Sørensen, P. & Christensen, B.T. (2018b). Converting temperate long-term arable land into semi-natural grassland: decadal-scale changes in topsoil C, N, ^{13}C and ^{15}N contents. *European Journal of Soil Science* (in press).
- Kirkby, C.A., Kirkegaard, J.A., Richardson, A.E., Wade, L.J., Blanchard, C., Batten, G. (2011). Stable soil organic matter: A comparison of C:N:P:S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma* 163, 197–208.
- Olesen, J.E., Jørgensen, U., Hermansen, J.E., Petersen, S.O., Søgaard, K., Eriksen, J., Schjøning, P., Greve, M.H., Greve, M.B., Thomsen, I.K., Børgesen, C.D., Vinther, F.P. 2016. Græsdyrknings klima- og miljøeffekter. Notat til Miljø- og Fødevarerministeriets departement 29. januar 2016. http://pure.au.dk/portal/files/993336628/F_lgebrev_og_Besvarelse_Gr_sdyrknings_klima_og_milj_effekter_29012015.pdf.
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018). Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport, nr. 130.
- Panettieri, M., Rumpel, C., Dignac, M.-F., Chabbi, A. (2017). Does grassland introduction into cropping cycles affect carbon dynamics through changes of allocation of soil organic matter within aggregate fractions? *Science of the Total Environment* 576, 251-263.
- Poeplau, C., Zopf, D., Greiner, B., Geerts, R., Korvaar, H., Thumm, U., Don, A., Heidkamp, A., Flessa, H. (2018). Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 265, 144-155.
- Pugesgaard, S., Petersen, S.O., Chirinda, N., Olesen, J.E. (2017). Crop residues as driver for N_2O emissions from a sandy loam soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 233, 45-54.
- Reinsch, T., Loges, R., Kluss, C. & Taube, F. (2018). Effect of grassland ploughing and reseeded on CO_2 emissions and soil carbon stocks. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 374-383.
- Richardson, A.E., Kirkby, C.A., Banerjee, S., Kirkegaard, J.A. (2014). The inorganic nutrient costs of building soil carbon. *Carbon Management* 5, 265-268.
- Rochette, P., Liang, C., Pelster, D., Bergeron, O., Lemke, R., Kroebel, R., MacDonald, D., Yan, W., Flemming, C. (2018). Soil nitrous oxide emissions from agricultural soils in Canada: Exploring relationships with soil, crop and climatic variables. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 254, 69-81.
- Rutledge, S., Wall, A.M., Mudge, P.L., Troughton, B., Campbell, D.I., Pronger, J., Joshi, C., Schipper, L.A. (2017). The carbon balance of temperate grasslands part II: The impact of pasture renewal via direct drilling. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 239, 132-142.
- Schjøning, P. (1986). Nedmuldning af halm ved ensidig dyrkning af vårbyg II. Indflydelse af halm og stubbearbejdning på jordens indhold af kulstof, kvælstof, kalium og fosfor. *Tidsskrift for Planteavl* 90, 141-149.
- Senapati, N., Chabbi, A., Gastal, F., Smith, P., Mascher, N., Loubet, B., Cellier, P., Naisse, C. (2014). Net carbon storage measured in a mowed and grazed temperate sown grassland shows potential for carbon sequestration under grazed system. *Carbon Management* 5, 131-144.
- Soussana, J.F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., Arrouays, D. 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20, 219-230.
- Soussana, J.F., Tallec, T., Blanfort, V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal* 4, 334-350.
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E., Kristensen, K., Elsgaard, L., Østergaard, H.S., Lægdsmand, M., Greve, M.H., Christensen, B.T. (2014). Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils between 1986 and 2009. *European Journal of Soil Science* 65, 730-740.
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E. (2016). Modelling soil organic carbon in Danish agricultural soils suggests low potential for future carbon sequestration. *Agricultural Systems* 145, 83–89.

- Thomsen, I.K., Petersen, B.M., Bruun, S., Jensen, L.S., Christensen, B.T. (2008). Estimating soil C loss potentials from the C to N ratio. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 849-852.
- Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Møller, H.B., Sørensen, P., Christensen, B.T. (2013). Carbon dynamics and stabilization in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biology and Biochemistry* 58, 82-87.