

Planter

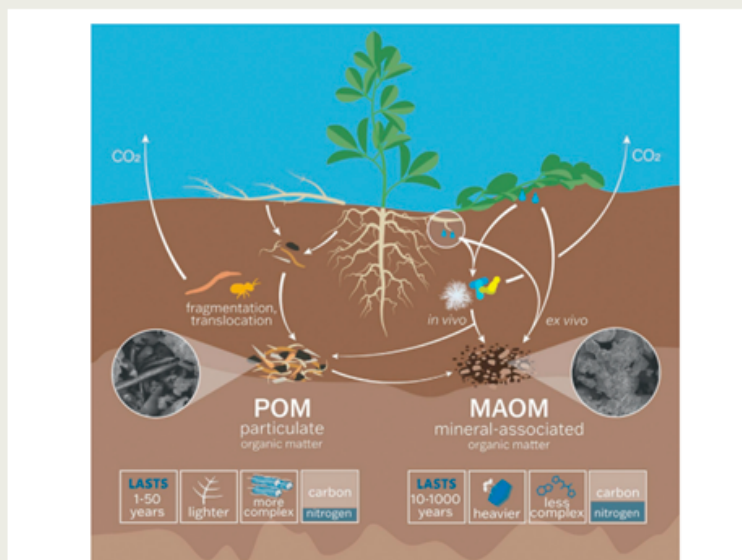
Jordens organiske materiale er nøglen til at forstå kulstoflagring

Planter og mikroorganismer bidrager til den komplekse kulstoflagring i jorden og afgrøder, særligt flerårige med lavt C:N-forhold, påvirker dannelsen af stabilt kulstof. Desuden spiller rhizodeposition en nøglerolle i kulstoflagring i de dybe jordlag.

Viden om

Jordens organiske materiale (SOM) indeholder en række kulstofinput fra planter og mikroorganismer. Noget nedbrydes gradvist over tid og andet forbliver stabilt i årtier, hvis ikke århundreder. Kulstof fra planter stammer især fra blade, rødder og rodesudater. Fra mikroorganismene stammer kulstoffet fra den mikrobielle biomasse, mikroorganismernes metabolitter og fra mykorrhiza (også kaldet svamperod) (Cotrufo and Lavallee, 2022; Lavallee et al., 2020).





Figur 1. Konceptualisering af jordens organiske materiale som fraktioner af POM og MAOM (Cotrufo og Lavallee, 2022).

Partikulært organisk materiale (POM) og mineralsk bundet organisk materiale (MAOM)

For at hjælpe med at forstå og danne sig et billede af hvad SOM er, kan man inddele det i to distinkte fraktioner (Figur 1).

- Den første fraktion, partikulært organisk materiale (POM), består af komplekse organiske forbindelser (f.eks. lignocelluloser). Disse forbindelser kan stamme fra både planter og svampe. POM dannes ved fragmentering og består derfor nærmest udelukkende af delvist nedbrudte forbindelser (figur 1).
- Den anden fraktion er mineralsk bundet organisk materiale (MAOM), der består af små forbindelser med lav molekylærvægt eller andre simple forbindelser som f.eks. aminosyrer fra mikroorganismer og planter. Der er desuden i dannelsen af MAOM, to dominerende mikrobielle processer, der forløber samtidig i jorden. De er defineret som in vivo-transformation og ex vivo-modifikation (Liang et al., 2017, 2019).

In vivo-transformation er en proces hvor svampe og bakterier udnytter kulstof til mikrobiel vækst og dernæst omsætning af den dannede mikrobielle biomasse og produkter.

Ex vivo-modifikationsvejen fører til depolymerisering af planteinputs gennem produktion af mikrobielle ekstracellulære enzymer. Begge processer resulterer i produktionen af små forbindelser

med lav molekylærvægt, som integreres på mineralske overflader og danner MAOM (Cotrufo og Lavallee, 2022; Lavallee et al. 2020).

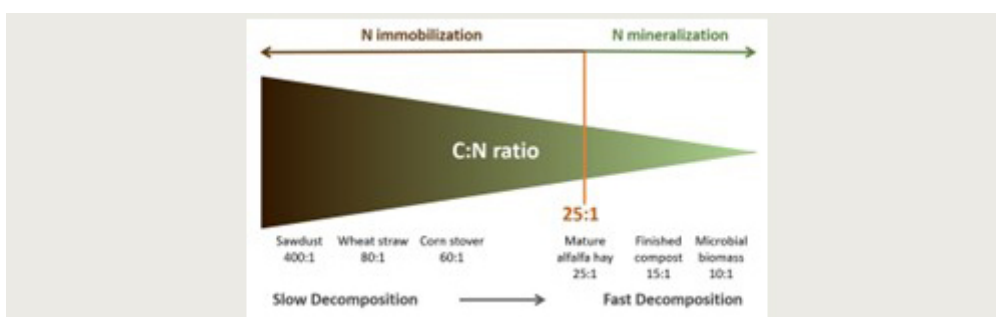
Det er værd at bemærke, at POM generelt antages at persistere mellem 1 og 50 år og at det er mere sårbart over for klimaændringer og forstyrrelser af jorden end MAOM. Det skyldes, at POM enten er ubeskyttet eller er indesluttet i store aggregater. Til gengæld forventes MAOM at persistere i årtier til århundreder og være mindre sårbart over for forstyrrelser, da det bundet til mineralske overflader og indesluttet i mindre aggregater og derved bedre beskyttet mod enzymatisk nedbrydning end POM.

Derfor er det afgørende, at man arbejder for at beskytte POM og samtidig øge produktionen af MAOM. Der er desværre ikke en nem måde at teste, hvad forholdet mellem POM og MAOM er i ens jord, da det kræver en separation af de to fraktioner.

C:N forholdet

C:N-forholdet er forholdet mellem massen af kulstof og kvælstof og er en nyttig indikator for stabiliteten af jordens organiske materiale. Da mikroorganismer kræver et relativt lavt C:N-forhold (<25:1) for at forblive aktive, kan ændringer i forholdet påvirke nedbrydeligheden af jordens organiske materiale (SOM).

Specifikt vil et højt C:N-forhold resultere i en langsommere nedbrydning, da jordens mikroorganismer derved er mere begrænset af kvælstof, hvilket fører til immobilisering af nitrogen. Når C:N-forholdet bliver lavere eller mere afbalanceret, vil det resultere i mineralisering og hurtigere nedbrydning.

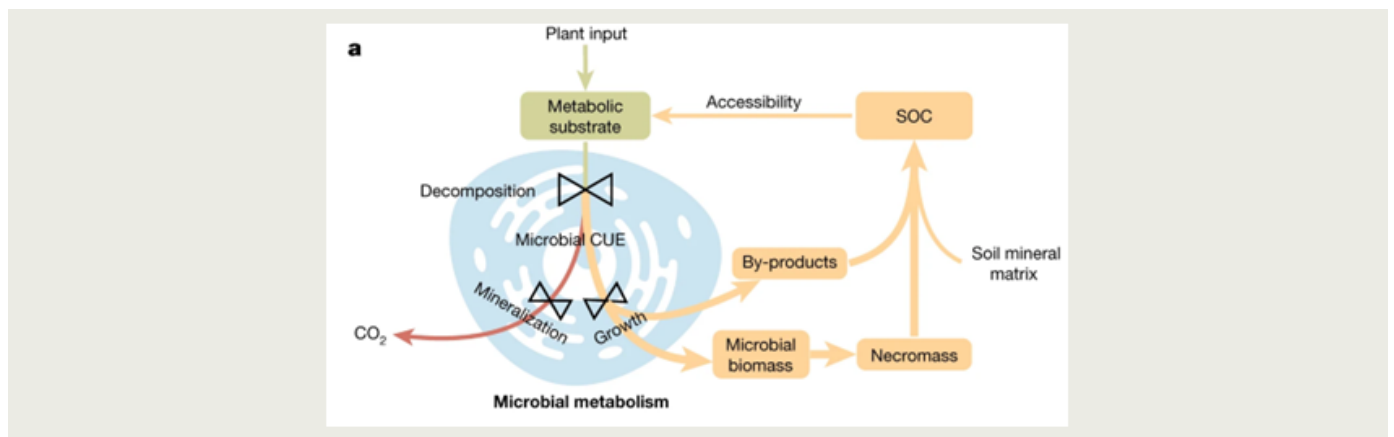


Figur 2.

Den mikrobielle kulstofomsætnings-effektivitet (CUE)

Den mikrobielle kulstofomsætnings-effektivitet (CUE) refererer til fordelingen af kulstofforbindelser som bliver omsat og brugt til enten opbygning af mikrobiel biomasse (vækst) eller respireret som CO₂ (mineralisering).

En højere mikrobiel CUE indikerer en effektiv mikrobiel vækst ud fra de omsatte kulstofforbindelser, hvilket fører til akkumulering af mikrobielle biprodukter og biomasse. Denne proces fører til forøget lagring af SOC på grund af interaktionen mellem nekromasse (døde mikroorganismer) og jordens mineralske matrix (Tao et al., 2023).



Figur 3.

Den nyeste forskning

Fold alle ud

Enkelte arter i efterafgrødeblandinger fremmer dannelsen af mineralsk bundet organisk materiale (MAOM)

Jordens kulstofindhold i monokulturer af tre forskellige efterafgrøder er undersøgt i et langvarigt økologisk korn-sædskifte (majs-soya-vinterhvede) i Pennsylvania, USA (Zhang et al., 2022). Eftergrøderne i forsøget var blodkløver (bælgplante), triticale (græs), raps (korsblomst) samt en blanding af de tre arter. Jordens kulstof var højere i MAOM-faktionen under kløveren og blandingen i forhold til både rapsen og triticale (højere kulstofindhold i POM-faktionen).

Det hænger sandsynligvis sammen med kvaliteten af C-inputs (dvs. C:N forholdet i roden) i de forskellige efterafgrøder. Her giver det lave C:N-forhold, der karakteriserer bælgplanter, lettilgængelige kulstof- og kvælstofkilder til mikrobiel assimilering. Det resulterer i in vivo transformation, som efterfølgende fører til dannelsen af MAOM (f.eks. Liang et al. 2017, 2019, Cotrufo et al., 2019). Det kan også skyldes en øget tilgængelighed af kvælstof til mikrobiel

omdannelse af POM til MAOM, baseret på en øget udskillelse af kvælstofrige forbindelser fra bælgplanternes rødder (Cotrofu et al., 2019, Lavallee et al., 2020).

På linje med denne rationalisering, blev den højere andel af kulstof i POM-fraktionen i græs og korsblomstrede efterafgrøder også tilskrevet lavere kvalitet eller højere C:N-forhold i studiet. Det er direkte forbundet med en lavere mikrobiel kulstofomsætnings-effektivitet, hvilket resulterer i en relativt større andel af planteprodukter og forbindelser end mikrobielle. Generelt er inklusionen af bælgplanter i efterafgrødeblandinger vigtig for at tilføre stabilt kulstof til SOM.

Planternes rhizodeposition: En nøgle til underjordisk kulstoflagring

Kulstof som stammer fra levende rødder, kaldet rhizodeposition, spænder fra små lavvægtsforbindelser i form af rodeksudater (såsom sukker, organiske syrer og aminosyrer) til mindre rodfragmenter (rodhår) (Rasmussen et al., 2019). Rhizodeposition anses for at være en nøgle til at binde kulstof i jorden, hvor eksudater udgør den største del af det rhizodeponerede kulstof. Teoretiske modeller viser, at rodeksudater er vigtige kulstofinput under jorden, da mikroorganismer bruger disse forbindelser mere effektivt (f.eks. Cotrufo et al., 2013).

Det hænger sammen med den mikrobielle kulstofomsætnings-effektivitet (CUE), der defineres som den relative andel af kulstof, der assimileres af jordens mikroorganismer (dvs. kulstof brugt til at opbygge mikrobiel biomasse) sammenlignet med den relative andel af kulstof, der respireres som CO₂. Den mikrobielle CUE påvirkes af kvaliteten af forbindelsernes kvalitet, og da rodeksudater er af højere kvalitet (lavt C:N-forhold), resulterer det i en højere mikrobiel CUE, der fører til dannelsen af MAOM og stabilisering af kulstof. Yderligere er det vist, at effektiviteten i dannelsen af MAOM fra rhizodeposition var 46%, sammenlignet med 7% fra blad- og 9% fra rodmaterialer (Villarino et al., 2021).

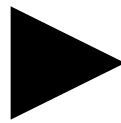
For at kvantificere rhizodeposition kræver det, at man bruger atmosfærisk mærkning med kulstofisotoper (¹³C og ¹⁴C). Ved at indslutte planten i et lufttæt kammer og en atmosfære beriget med disse isotoper, optager planten dem og kan afsætte dem under jorden. Efter mærkning indsamles rødder, rhizosfæren (jord der klæber til rødderne), og bulkjord, for at måle mængden af mærket kulstof i hver fraktion (Peixoto et al., 2022).

Baseret på denne metode, viste en litteraturgennemgang, som inkluderede 44 studier, at den estimerede andel af nyligt assimileret kulstof i jorden som rhizodeposition, svarer til 3 % for enårige afgrøder og 5 % for græsser (fortrinsvis flerårige arter) (Pausch and Kuzyakov, 2018). Det skal dog bemærkes, at disse estimater kun tager hensyn til C-allokering til topjorden, hvis bio-

geo-kemiske forhold, er forskellige fra de dybere jordlag. Dette resulterer sandsynligvis i en undervurdering af den nuværende kvantificering af underjordisk C-allokering.

Se video fra Aarhus Universitet om hvordan atmosfærisk mærkning laves:

In situ isotopic labeling of cover crops with $^{13}\text{C-CO}_2$



https://www.youtube.com/embed/eifer5j03_0

Kulstof i underjorden

Underjorden fra 30-100+ cm betragtes som det største globale kulstofreservoir på landjorden med opholdstider på årtusinder. Baseret på kulstofanalyser af radioaktive kulstofisotoper, estimeres den globale kulstofalder i græsarealer og landbrugsjord til henholdsvis 3690 og 5380 år mellem 30 og 100 cm dybde. Dette er betydeligt ældre end overfladejorden (0-30 cm), hvor alderen er estimeret til 770 og 1200 år for landbrugsjord og græsarealer (Shi et al., 2020). Der er konsensus om, at evnen til at binde yderligere kulstof er begrænset i topjorden i forhold til de dybere jordlag (Button et al., 2022). Det skyldes at kulstof mineraliseres hurtigere i topjorden og gradvist meget langsommere i dybden. Denne reduktion i mineralisering skyldes fysisk, eller rumlig, utilgængelighed af organisk materiale og en proportionel mindre mikrobiel biomasse i underjorden.

Mineraliseringen i underjorden reduceres yderligere af en højere mængde tilgængelige mineralske overflader (bl.a. aktive lerpartikler). Det kobles yderligere med en reduktion i input af

tilgængelige kulstof- og kvælstofkilder, der kræves for mikrobiel mineralisering (Salome et al., 2010; Rumpel et al., 2012; Button et al., 2022).

En potentiel metode til at forbedre bindingen af kulstof i underjorden er ved at bruge flerårige afgrøder med dybe rødder. Disse afgrøder kan deponere kulstof i de dybere jordlag i form af rhizodeponeret kulstof og rodbiomasse. I Danmark dyrker vi almindeligvis afgrøder med dybe rødder, men de dyrkes ofte som enårige afgrøder, såsom cikorie, sukkerroer, solsikker og raps (Thorup-Kristensen et al., 2020).

Dog blev der for nyligt lavet forskning i Taastrup med lucerne, som er en flerårig kvælstoffikserede bælgeplante. Her undersøgte man netto kulstofinput i jorden ned til 1,5 m dybde, målt over én vækstsæson (Peixoto et al., 2022). Her var netto kulstofinput i topjorden 11,5 Mg C pr. ha i 0-25 cm dybde og 3,6 Mg kulstof pr. ha mellem 25-150 cm. Dog var den mikrobielle stabilisering af dette nyligt deponerede kulstof større i dybden. Det antyder, at selvom netto kulstofinputet var lavere i underjorden, kan det indgå i den stabiliserede MAOM-fraktion.

Det skal bemærkes, at resultaterne viser kortsigtede forandringer i kulstofindholdet, mens det at observere betydelige ændringer i kulstof i de dybe jordlag kræver flere års observationer. Alligevel er dybdegående flerårige bælgefrugter (som lucerne) en potentiel strategi til at binde yderligere stabilt kulstof, men dette kræver nærmere undersøgelse.

Udfordringer i forhold til lagring af kulstof i dybden og undersøgelser heraf

- Metodiske udfordringer i prøvetagning af underjorden.
- Modeller for lagring af kulstof i underjorden mangler optimal parameterisering, der er specifikke for underjorden.
- Jordtypeudfordringer for dybere rødder på sandjorde i forhold til lerjorde. Mest relevant for Østdanmark.

- Alternative metoder til at binde kulstof i underjorden på markniveau er hverken realistiske eller afprøvet (f.eks. dyb pløjning, tilsætning af ler og nedmuldning af biokul).

Referencer

- Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Deneff, K., Paul, E., 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology* 19, 988-995.
- Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L., Six, J., Lugato, E., 2019. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience* 12, 989-994.
- Cotrufo, M. F., & Lavellee, 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.
- Lavellee, J.M., Soong, J.L., Cotrufo, M.F., 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology* 26, 261-273.
- 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.
- Pausch, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Carbon input by roots into the soil: quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global change biology*, 24(1), 1-12.
- Peixoto, L., Olesen, J. E., Elsgaard, L., Enggrob, K. L., Banfield, C. C., Dippold, M. A., ... & Rasmussen, J. (2022). Deep-rooted perennial crops differ in capacity to stabilize C inputs in deep soil layers. *Scientific Reports*, 12(1), 5952.
- Rasmussen, J., Gylfadóttir, T., Dhalama, N. R., De Notaris, C., & Kätterer, T. (2019). Temporal fate of ¹⁵N and ¹⁴C leaf-fed to red and white clover in pure stand or mixture with grass—

Implications for estimation of legume derived N in soil and companion species. *Soil Biology and Biochemistry*, 133, 60-71.

Rumpel, C., Chabbi, A., & Marschner, B. (2012). Carbon storage and sequestration in subsoil horizons: Knowledge, gaps and potentials. *Recarbonization of the biosphere: ecosystems and the global carbon cycle*, 445-464.

Salome, C., Nunan, N., Pouteau, V., Lerch, T. Z., & Chenu, C. (2010). Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology*, 16(1), 416-426.

Tao, F., Huang, Y., Hungate, B. A., Manzoni, S., Frey, S. D., Schmidt, M. W., ... & Luo, Y. (2023). Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*, 1-5.

Thorup-Kristensen, K., Halberg, N., Nicolaisen, M., Olesen, J. E., Crews, T. E., Hinsinger, P., ... & Dresbøll, D. B. (2020). Digging deeper for agricultural resources, the value of deep rooting. *Trends in Plant Science*, 25(4), 406-417.

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.

Zhang, Z., Kaye, J. P., Bradley, B. A., Amsili, J. P., & Suseela, V. (2022). Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions. *Global Change Biology*, 28(19), 5831-5848.

Emneord

Kulstofopbygning

Publiceret: 15. december 2023

Opdateret: 15. december 2023

Vil du vide mere?



Leanne Peixoto

Specialkonsulent
SEGES Innovation P/S
lpei@seges.dk



Betina Nørgaard Pedersen

Afdelingsleder
SEGES Innovation P/S
benp@seges.dk
+45 3068 0605

Støttet af

Promilleafgiftsfonden for landbrug

SEGES Innovation P/S Tlf. 8740 5000
Agro Food Park 15 Fax. 8740 5010
8200 Aarhus N Email info@seges.dk