



**RI
SE** agrønod



Europeiska jordbruksfonden för
landsbygdsutveckling. Europa
investerar i landsbygdsområden

Kol i åkermark

Förstudie för klimatverktyget Agrosfär

Katarina Kyllmar, Danira Behaderovic, Niclas Ericsson, Thomas Kätterer,
Mattias Lundblad och Johanna Wetterlind



Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för mark och miljö
Ekohydrologi 182 • ISSN 0347-9307
Uppsala 2024

Kol i åkermark

Förstudie för klimatverket Agrosfär

Katarina Kyllmar	SLU, Institutionen för mark och miljö, katarina.kyllmar@slu.se
Danira Behaderovic	RISE, Jordbruk och livsmedel, danira.behaderovic@ri.se
Niclas Ericsson	SLU, Institutionen för energi och teknik, niclas.ericsson@slu.se
Thomas Kätterer	SLU, Institutionen för ekologi, thomas.katterer@slu.se
Mattias Lundblad	SLU, Institutionen för mark och miljö, mattias.lundblad@slu.se
Johanna Wetterlind	SLU, Institutionen för mark och miljö, johanna.wetterlind@slu.se

Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2024
Omslagsbild:	Katarina Kyllmar
Serietitel:	Ekohydrologi
Delnummer i serien:	182
ISSN:	0347-9307

Nyckelord: kolinlagring, kolbalans, koldioxid, växthusgaser, jordbruk, odlingssystem, klimatnytta

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för mark och miljö

Sammanfattning

Inlagring av kol i åkermark bidrar till minskad växthusgaseffekt och klimatpåverkan men möjligheterna att öka kolmängden beror av platsens egenskaper och odlingshistorik. För att kunna följa upp om åtgärder har bidragit till kolinlagring behövs data om odlingsssystem, jordar och klimat. Den nationella dataplattformen Agronod som ägs av organisationer och företag i lantbrukssektorn och har stöd från EU genom Jordbruksverket har bildats för att lantbruksdata ska kunna delas och ge mervärde för lantbruksnäringen. I denna rapport har vi undersökt möjligheterna att inkludera beräkning av kolinlagring i Agronods klimatverktyg Agrosfär, och om det går att följa en internationell standard för klimatrapportering i värdekedjan från gård till konsument.

Svensk åkermark innehåller en stor mängd organiskt kol och det finns en förväntan i samhället att öka kolförrådet men möjligheterna varierar stort mellan gårdar och fält. En gård med vallbaserad mjölkproduktion på sandjord kan ha nått sin potential och där mer organiskt material kan ge negativa bieffekter som ökat utsläpp av lustgas och högre kväveläckage. En växtodlingsgård på lerjord kan däremot ha större möjligheter att öka markens kolförråd.

Mätning av förändring av markens kolförråd på ett enskilt fält förutsätter ofta tio år eller mer för att ge säkra resultat. En osäkerhet är jordprovtagning som ofta sker till ett standardiserat djup. Om kolmängden har ökat mellan två provtagningar blir jorden också mer lucker men kolhalten ökar inte i samma omfattning eftersom jorden blir lättare. Mätning av volymvikt kompenserar för att även markstrukturen har förändrats men ingår inte i normal markkartering. Metoden för bestämning av markens kolhalt har också osäkerheter. Kolhalten bestäms oftast med en indirekt metod baserad på glödförlust och skattning av lerhalt. Metoden ger en god uppfattning om fältets mullhalt men räcker sällan som underlag för att bestämma årlig förändring av markens kolmängd. Mätdata från många gårdar tillsammans utgör däremot ett värdefullt underlag för att beskriva variationer inom landet och förändringar. Mätdata är också nödvändiga för att förbättra precisionen i modellberäkningar oavsett om modellerna är baserade på kända samband om omsättning av organiskt material eller fjärranalys.

Greenhouse Gas Protocol är en internationell standard för företags klimatrapportering. Standarden har kompletterats med ett förslag för beräkning av kolinlagring i mark, Land Sector and Removals Guidance. I förslaget ska en kolinlagring kunna spåras ner till gårdsnivå och det ska kunna säkerställas att kolmängden har ökat och att kolet blir kvar i marken över tid. För Sverige innebär förslaget att förändringar i kolmängd på gårdsnivå kan bli svåra att säkerställa även om ett omfattande provtagningsprogram skulle etableras, främst för att förändringar i kolförrådet tar tid och att dagens mätmetoder inte har tillräcklig noggrannhet vid uppföljning med så korta tidsintervall som några år.

Även om nuvarande internationell företagsstandard inte passar för klimatrapportering av organiskt kol i åkermark under svenska förhållanden är det ändå viktigt att kunna värdera och premiera åtgärder på gården som ger klimatnytta. Förutom åtgärder som ökar kolmängden är också åtgärder som minskar nettoförlusten av kol eller bibehåller en redan hög kolmängd värdefulla. Som utgångspunkt för ett värderingssystem av åtgärders klimatnytta på fältnivå föreslår vi att den svenska modellen för beräkning av kolbalans i åkermark, ICBM, integreras i Agrosfär. ICBM är utvecklad för svenska odlingsförhållanden och används i Sveriges klimatrapportering till EU och FN. Modellen är också inkluderad i Greppa Närings rådgivningsverktyg Odlingsperspektiv. Med ICBM som grund kan markens aktuella kolbalans och effekten av alternativa odlingsstrategier bedömas. Det innebär att åtgärder kan lokaliseras dit de ger störst klimatnytta, både inom gården och för lantbruket som helhet.

Abstract

Carbon sequestration in arable land contribute to reduced greenhouse gas emissions but the opportunities to increase soil carbon content depend on site specific characteristics and cultivation history. For evaluation on whether measures have contributed to carbon storage, data on cultivation systems, soils and climate is needed. The national data platform Agronod, owned by organisations and companies in the agricultural sector and with support from EU through the Swedish Board of Agriculture, is established to enhance sharing of agricultural data for added value for data owners. Here, we investigated the possibility to include calculation of carbon storage in the Agronod climate tool Agrosfär, and if international standards for climate reporting in the value chain from farm to consumer could be followed.

Swedish arable soils contain a large amount of organic carbon. There is an expectation in society to increase the soil carbon content but the possibilities vary greatly between farms and fields. A farm with grass-based milk production on a sandy soil may have reached its potential and more organic material can give negative effects such as increased emissions of nitrous oxides and higher nitrogen leaching. A crop production farm on a clay soil may give more opportunities to increase the soil carbon content.

For detection of trends in soil carbon at field level, ten years or more is most probably required. One uncertainty is soil sampling, which often takes place to a standardized depth. If the carbon content has increased between two sampling occasions, the carbon concentration does not increase to the same extent since the soil also lose weight. Measurement of volumetric weight could compensate for change in soil structure but is not included in normal soil mapping. The method for determining soil carbon concentration also has uncertainties. Usually an indirect method based on loss of ignition and estimation of clay content is used. The method gives a good estimation of humus content, but is less sufficient for determination of annual change in soil carbon stock at the field. However, data from many farms together constitute valuable information for describing variations and trends within Sweden. Soil sampling data is also necessary for improvement of model calculations regardless if they are based on known relationships about turnover of organic matter or remote sensing.

The Greenhouse Gas Protocol is an international standard for corporate climate reporting. Recently, a draft for calculating soil carbon storage was added, Land Sector and Removals Guidance. The draft says that carbon storage must be traceable down to farm level and only a verified increase that last over time should be reported. For Sweden, these requirements will be difficult to ensure even if an extensive sampling program is established, mainly because changes in carbon stock take time and the monitoring methods do not have sufficient accuracy in such short follow-up intervals as a few years.

Although current international standards for enterprises are not suitable for climate reporting of carbon content in Swedish soils, it is still important to value measures on the farm that provide climate benefit. Beside the measures that increase the carbon content, also those that reduce the net loss of carbon or maintains an already large carbon content are valuable. For valuation of climate benefit of field measures, we propose that the Swedish model for calculating carbon balance in arable land, ICBM, is integrated into Agrosfär. ICBM is developed for Swedish agricultural conditions and is used in Sweden's climate reporting to EU and UN, and in the *Greppa Näringen* advisory tool *Odlingsperspektiv*. With ICBM, the current soil carbon balance and the effect of alternative cultivation strategies can be assessed. This means that measures can be located where they provide the best climate benefit, both within the farm and for agriculture as a whole.

Förord

Denna rapport har tagits fram i samarbete mellan SLU och RISE på uppdrag av Agronod AB och med Vera Söderberg som beställarens projektledare.

Rapporten sammanfattar ett projekt vars övergripande mål var att undersöka möjligheten att inkludera beräkning av kolinlagring i åkermark med lantbrukets klimatberäkningsverktyg Agrosfär. Verktöget utvecklas av Agronod, den nationella dataplattformen för delning av lantbruksdata. Syftet med plattformen är att genom data-delning underlätta utvecklingen av lösningar som gynnar lantbrukare och främjar innovation inom lantbrukets värdekedja. Verktöget Agrosfär är ett sådant exempel.

I rapportens inledande del beskrivs processer för omsättning av organiskt kol i åkermark samt möjligheterna att påverka kolmängden. Metoder för beräkning av kolmängd redovisas liksom undersökningar som följer utvecklingen i svensk åkermark. Regelverk för bedömning av kolmängd i åkermark för myndigheters behov av klimatrapporteringar redovisas kortfattat. Näringslivets rapportering av klimatpåverkan från sin egen verksamhet, där lantbrukets produkter är en del, beräknas och redovisas ofta enligt standarden Greenhouse Gas Protocol. Att undersöka möjligheten att följa Greenhouse Gas Protocols kommande guide Land Sector and Removals Guidance (LSRG) krav avseende beräkning och rapportering av förändringar av åkermarkens kolförråd var ett specifikt krav från Agronod.

Utifrån den inledande sammanställningen om potential för förändring av kolmängd i åkermarken samt den föreslagna guiden LRSR inom regelverket för Greenhouse Gas Protocol redovisas ett konceptuellt förslag för hur lantbruket skulle kunna arbeta för att värdera klimatnyttan av åtgärder inom odlingen.

Fördelningen av arbetet inom gruppen har varit följande: projektledning, sammanfattning av förslag samt rapportens helhet (Katarina Kyllmar); beskrivning av kolflöden i mark-växsystemet (Thomas Kätterer); metoder för nationell klimatrapportering (Mattias Lundblad); metoder för bedömning av flöden av växthusgaser (Niclas Ericsson); metoder för provtagning, analyser av jordprover samt fjärranalys (Johanna Wetterlind); beskrivning av standarder för klimatrapportering för produkter samt beskrivning av verktyg för beräkning av kolbalanser (Danira Behaderovic). Samtliga författare har deltagit i processen att ta fram ett förslag för bedömning och uppföljning av åkermarkens kolbalans på gårdsnivå.

Innehållsförteckning

Förord	5
1. Inledning	7
2. Organiskt kol i åkermark	8
2.1 Åkermarkens kolbalans	8
2.2 Odlingsåtgärders inverkan på kolinlagring	9
2.3 Beräkning av åkermarkens kolförråd.....	10
2.3.1 Mätningar i fältförsök och miljöövervakning	11
2.3.2 Modellberäkningar och scenarier	13
2.3.3 Sensorer och fjärranalys	13
2.3.4 Databehov för beräkning av kolförråd på fältet - tillgång och tillgänglighet	14
2.4 Bieffekter av kolinlagring	16
2.5 Kolbalanser i Sverige och internationellt.....	17
2.5.1 Årlig rapportering till EU och FN.....	17
2.5.2 Rapportering av kolbalans i svensk jordbruksmark	17
2.5.3 Förändring i kolbalans i Sverige och internationellt	18
2.5.4 Potential för kolinlagring	19
3. Bedömning av klimatpåverkan	20
3.1 Värdering av åtgärders effekt på kolförrådet.....	22
3.1.1 Additionalitet	22
3.1.2 Permanens	23
4. Standarder för företag och produkter	25
4.1 Greenhouse Gas Protocol - Land Sector and Removals Guidance	25
4.1.1 Krav på redovisning av kolinlagring	26
4.1.2 Möjligheter att uppfylla kraven på gårdsnivå.....	28
4.2 Science Based Targets Initiative - FLAG	28
4.3 Certifiering för handel med kolkrediter	28
4.3.1 Stöd för kolinlagring genom EU:s jordbrukspolitik	31
4.4 Standarder för livscykelanalys (LCA) för produkter.....	31
5. Verktyg för beräkning av kolbalanser	33
5.1 The Introductory Carbon Balance Model (ICBM).....	33
5.2 Odlingsperspektiv – Greppa Näringen	35
5.3 C-TOOL – SEGES.....	35
5.4 Cool Farm Tool.....	36
5.5 COMET-Farm	36
5.6 Andra projekt och initiativ om kolinlagring.....	37
6. Förslag - Värdering av åkermarkens kolbalans på gårdsnivå med modell	38
6.1 Integrera ICBM-modellen i Agrosfär.....	38
6.1.1 Utvecklingspotential för beräkningar med ICBM.....	39
7. Slutsatser	41
Referenser	44

1. Inledning

Inom lantbruksnäringen genereras mängder av data om produktionen. För gårdens lönsamhet är god datahantering en viktig förutsättning för att rätt val ska kunna göras i produktionen. Med digitala tjänster som lagrar data och gör dem tillgängliga i den form lantbrukaren behöver dem kan planeringen av produktionen underlättas men också förenkla rapporteringar.

Dataplattformen Agronod har utvecklats för att möjliggöra enkel och säker delning av data i lantbrukets värdekedja. Med hjälp av data från plattformen kan företag och organisationer skapa lösningar som stärker svenskt lantbruk, med lantbrukarens behov i fokus. Agronod ägs gemensamt av Lantmännen, LRF, Hushållningssällskapet, Växa, HKScan Sverige och Arla Sverige, och har stöd från ett stort antal företag och organisationer inom livsmedelskedjan samt från Europeiska jordbruksfonden för landsbygdsutveckling via Jordbruksverket.

Klimatberäkningsverktyget Agrosfär är finansierat genom ett EIP-projekt. I projektet ingår ett stort antal samverkande aktörer. Målet är att skapa en heltäckande mjukvarulösning som kan beräkna och tillgängliggöra klimatavtryck för Sveriges lantbruk. Verktyget använder data från Agronod-plattformen för att beräkna klimatteffekter av produktionen. Agrosfär, som för närvarande täcker växtodling, mjölkproduktion och nötkött, planerar att inkludera fler djurslag. Idag ingår växthusgaserna koldioxid, lustgas och metan i beräkningarna, men det finns en önskan och förväntan från lantbrukare och branschen att även inkludera kolinlagring.

Syfte med denna förstudie

Att undersöka vilka metoder för att beräkna kolinlagring som kan vara tillämpbara i Agrosfär, med primärt fokus på vad som kan fungera för många lantbrukare och där företrädevis automatiserad datainsamling kan ske. Möjligheten att beräkna kolinlagring enligt internationell standard ska också bedömas.

Avgränsning

Förstudien omfattar åkermark men inte betesmark. Åkermark är jordbruksmark som mestadels användas för växtföljder till skillnad mot permanent betesmark som sällan jordbearbetas. Idag är kunskapen om kolomsättning i betesmark begränsad varför den har exkluderats i denna studie.

2. Organiskt kol i åkermark

Åkermarken innehåller en stor mängd kol men möjligheterna att öka kolförrådet beror av platsens egenskaper och odlingshistorik. Att säkerställa förändringar på enskilda fält med nuvarande metoder för jordprovtagning och laboratorieanalys är begränsade då mätmetodernas osäkerheter kan vara större än förändringen. För större områden där många provtagningar ingår ökar säkerheten i bedömningen av den samlade effekten av olika odlingsystem på kolförrådet.

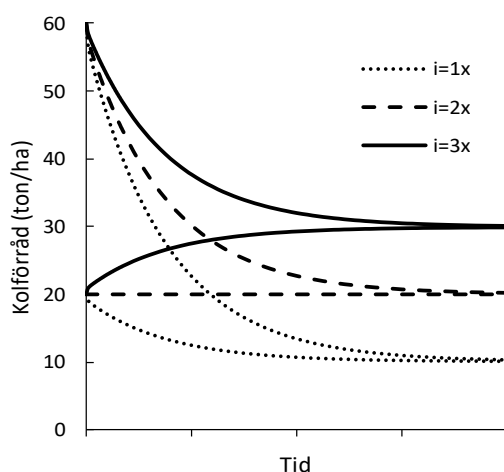
2.1 Åkermarkens kolbalans

Kol är huvudbyggstenen i allt liv på jorden. Organiskt material generellt, så även markens mull eller humus, består till drygt hälften av kol. Marken ner till en meters djup innehåller mer kol än atmosfären och alla växter tillsammans. Genom fotosynthesen tar växterna upp koldioxid och bygger in kolet i biomassan som sedan tillförs marken genom ovanjordiska växtrester, rötter och rotutsöndring direkt på växtplatsen, eller efter att växterna har passerat djur eller människor (organisk gödsel) och ibland ytterligare behandlingsprocesser såsom rötning, kompostering eller pyrolys (för framställning av s.k. biokol).

Markens kolbalans utgörs av en liten skillnad mellan två stora kolflöden: tillförseln via biomassa och bortförseln främst genom nedbrytning av organiska kolföreningar. Förlusterna av organiskt kol via erosion och löst i vatten är vanligtvis relativt små under svenska förhållanden. Om skillnaden mellan tillförsel och bortförsel är positiv så har det skett en kolinlagring. Hur länge det tillförda kolet stannar i marken beror främst på markegenskaper och klimatet. En hög halt av ler och reaktiva metaller, låga temperaturer samt låg eller hög vattenhalt förlänger kolets uppehållstid i marken. Om man slutar med en kolinlagrande åtgärd och återgår till ursprunglig skötsel så minskar med tiden kollagret. Även om åtgärden permanentas så minskar inlagringen över tid när kolförrådet närmar sig ett nytt jämviktsläge. Marken har ett högre kolinnehåll än tidigare men ökar inte ytterligare (Figur 1).

Det är lättare att öka kolhalten i jordar med låg kolhalt. Samma mängd kol tillförd till två jordar med låg respektive hög initial kolhalt kan till och med innebära att den första lagrar in kol och den andra förlorar kol. Markens odlingshistoria är därför

avgörande om en åtgärd som leder till högre koltillförsel resulterar i en nettoinlagring av kol eller om det bara dämpar minskningen av kolförrådet. Även om åtgärden i det senare fallet inte leder till kolinlagring i absoluta tal, så har den ändå en positiv inverkan på klimatet eftersom nettoförlusten av kol blir mindre jämfört med om åtgärden inte hade utförts.



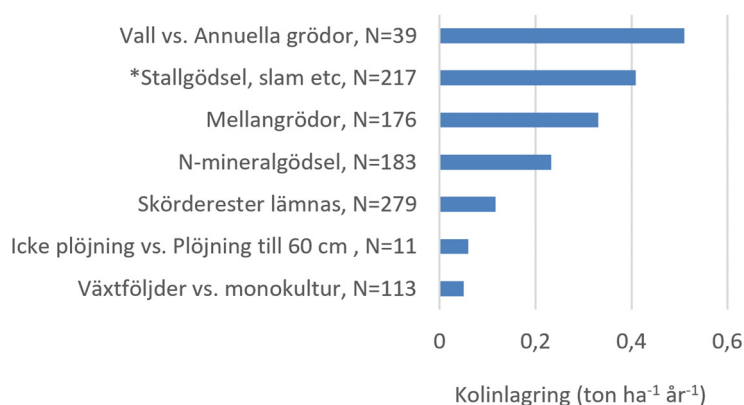
Figur 1. Ingångsvärdet av kolförrådet, som beror på fältets historik, påverkar hur det sedan utvecklas över tid. Detta visas för två fiktiva jordar med olika ingångsnivåer och tre olika nivåer av tillförsel (i) av biomassa. Enbart i jorden med lågt ingångsvärde och vid störst tillförsel ($3x$) ökar kolmängden i marken. Men den relativa kolinlagringen ökar i båda jordarna när tillförsel av biomassa ökar, dvs. tillförseln dämpar den sjunkande trenden för marken med ett högt ingångsvärde. Båda jordarna når så småningom samma jämviktsläge när tillförseln av kol är lika stor som mineraliseringen. Modifierad efter Kätterer & Bolinder (2022).

2.2 Odlingsåtgärders inverkan på kolinlagring

I en syntes av studier från tempererade klimatområden kvantifierades inverkan av olika odlingssystem och odlingsåtgärder på kolinlagring (Kätterer & Bolinder, 2022). Störst positiv inverkan hade perenna grödor (t.ex. vall) istället för ettåriga (Börjesson m.fl., 2018). Tillförsel av stallgödsel är också en viktig åtgärd för kolbalansen men den positiva effekten på fält- eller gårdsnivå kan inte skalas upp till regional eller nationell nivå eftersom tillgången på stallgödsel är begränsad och tillgänglig stallgödsel redan tillförs jordarna i Sverige. En höjning av stallgödselgivan på ett fält innebär därför en minskning av givan på ett annat fält. Organiskt kol som har sitt ursprung utanför det svenska jordbruket, t.ex. sågspån eller torv som tillförs marken via stallgödsel, leder visserligen till kolinlagring där de sprids, men kan ha

negativ klimatpåverkan någon annanstans, särskilt vad det gäller torv. En ökad recirkulation av samhällets avloppsslam har en viss potential att höja kolhalten i åkermark, men den är ändå blygsam, maximalt 10 kg stabilt kol per hektar och år om slammet sprids över hela åkerarealen (Kirchmann m.fl., 2017).

I växtodlingsdominerade regioner med låg andel vall är mellangrödor ett sätt att hålla marken grön och tillföra extra kol till marken. Svenska försök med rajgräs som fånggröda visar på en kolinlagringseffekt på 0,3 ton kol per hektar och år (Poeplau m.fl., 2015). Gödsling med mineralkväve höjer också tillförseln av kol till marken eftersom växternas infångning av koldioxid via fotosyntesen stimuleras (Figur 2). Som tumregel kan man säga att varje kilo tillfört kväve höjer kolförrådet med 1 kg (Kätterer m.fl., 2012). Odling utan jordbearbetning resulterar i en omfördelning av kol i markprofilen, dvs. högre kolhalter i den översta delen av matjorden och lägre halter längre ner i profilen. I en sammanställning av de mest noggranna studierna som rapporterat kolförråden ner till 60 cm djup fann man en liten positiv men icke signifikant kolinlagringseffekt av plöjningsfritt jämfört med plöjning (Meurer m.fl., 2018).



Figur 2. Effekten av växtföljder och odlingsåtgärder på kolinlagring uttryckt som ton kol per hektar och år. *Stallgödsel avser fältnivå och kan inte skalas upp för till all åkermark då mängden stallgödsel i landet är begränsad. Data från Kätterer & Bolinder (2022).

2.3 Beräkning av åkermarkens kolförråd

Markens kolförråd är mycket stort i jämförelse med potentialen för årlig förändring. Matjorden (ner till 25 cm djup) i en svensk åker innehåller i medeltal drygt 80 ton kol per hektar (Andrén m.fl., 2008). Om exempelvis introduktionen av en mellangröda i växtföljden leder till en kolinlagring av 0,3 ton per hektar och år (Figur 2)

så tar det 27 år tills kolförrådet har ökat med 10 %. Detta motsvarar ungefär den förändring som krävs för att den ska blir mätbar i fält. Men då den rumsliga variation inom ett fält kan vara stor krävs också att provtagning och analys även kan mäta förändringen i fältet som helhet.

2.3.1 Mätningar i fältförsök och miljöövervakning

Långliggande fältförsök, där effekten av en viss försöksbehandling har ackumulerats under lång tid, är betydelsefulla för att kunna kvantifiera om kolinlagring har skett (Kätterer m.fl., 2012). Miljöövervakningsprogram med återkommande jordprovtagning över tid på samma plats är också viktiga för att följa upp förändringar över tid på regional eller nationell nivå (Poeplau m.fl., 2015).

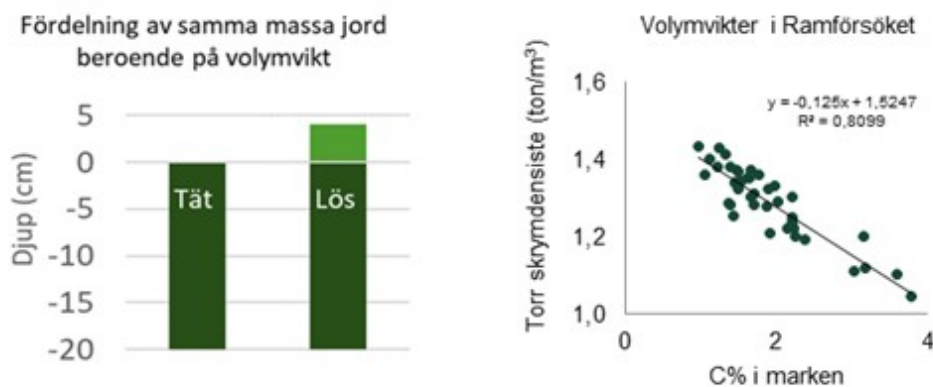
Eftersom jordprover som analyseras för kolhalt inte är volymbestämda så redovisas kolhalten i regel i procent av torr jord. Vanliga markkarteringsprov som lantbrukare lämnar in till laboratoriet analyseras i regel inte för kol utan man mäter glödförlust som räknas om till mullhalt m.h.a. en empirisk ekvation som tar hänsyn till lerhalten som i sin tur också mäts med en förenklad metod. För att räkna om mullhalt till kolhalt antar man att kolhalten i mullen är 58 %, vilket är rimligt i medeltal, men variationen är stor (Pribyl, 2010). Även om man mäter totalhalten kol genom torr-förbränning vid höga temperaturer, vilken är den säkraste metoden, återstår att urskilja oorganiskt och organiskt kol vilket är en analysteknisk utmaning. Det är särskilt ett problem i kalkhaltiga jordar som innehåller kol i oorganisk form som karbonat (t.ex. CaCO_3 eller MgCO_3), men också i jordar som nyligen har kalkats för att höja markens pH då kalken innehåller oorganiskt kol. Så det finns många felkällor beträffande analystekniken av kolhalten i ett markprov.

För att kunna beräkna kolförrådet per volym, dvs. per ytenhet (t.ex. kvadratmeter eller hektar) till ett visst djup, så behöver man också veta markens volymvikt (torr skrymdensitet). Volymviktsmätningar är arbetskrävande och därför dyra. Därför görs dessa mätningar i princip bara inom ramen för forskningsprojekt. Volymvikterna varierar under året som följd av frysning/tining, torkning/vätning samt jordbearbetning och minskar med ökad kolhalt i marken. Ofta använder man schablonvärden för volymvikter för att beräkna kolförrådet utifrån kolkoncentrationer. Det finns också s.k. pedo-transferfunktioner som skattar volymvikten utifrån markens textur och mullhalt som har utvecklats för svenska förhållanden (Kätterer m.fl., 2006). Dessa funktioner förklarar cirka hälften av variationen i volymvikt på nationell nivå, men träffsäkerheten på enskilda platser är mycket lägre.

Om man vill jämföra kolförrådet mellan två försöksbehandlingar eller mellan två tidpunkter på samma plats så måste man alltså mäta kolkoncentrationen och jordens volymvikt, helst vid samma tidpunkt under året, exempelvis strax efter skörd. Dessvärre är inte ens detta tillräckligt. Vid provtagning och analys måste man även beakta att man måste kunna jämföra en likvärdig massa jord. Om markens volymvikt sjunker med 20 % (t.ex. som följd av ökad kolhalt eller jordbearbetning) så höjs

matjorden med 4 cm (Figur 3). Kolmängden till 20 cm djup i den täta jorden (med högre volymvikt) måste då jämföras med den till 24 cm i den lösa jorden (med lägre volymvikt). Om man bara jämförde dessa två jordar genom provtagning ner till 20 cm, så skulle man komma fram till att den lösa jorden skulle ha förlorat 20 % av sitt kolförråd eftersom man inte tog hänsyn till kolförrådet på 20 till 24 cm djup.

De flesta studier om kolinlagring är begränsade till matjorden. Visserligen är kolhalten där mycket högre och mera dynamisk än i alven, men kolförrådet i många marker är ungefär lika stor i matjorden (0-20 cm) och alven (20-100 cm) och på längre sikt påverkas också alven av markanvändning, odlingssystem och skötselåtgärder. Hur mycket den påverkas, beror på platsspecifika förutsättningar. Kompakta jordar, dålig dränering eller lågt pH kan hämma rotutvecklingen och minska populationen av djupgrävande dagmaskar. Detta spelar roll för koltillförseln till djupare jordlager. Resultaten från långliggande försök på två platser med identiskt försöksupplägg under 35 år visar exempelvis att kolförrådet i alven hade påverkats av växtföljden på den ena, men inte på den andra platsen (Börjesson m.fl., 2018). Det sker också en förflyttning av jord (och därmed kol) inom eller mellan fält genom erosion, vilket leder till att matjorden blir djupare i sänkor och grundare på höjder. Visserligen är denna förflyttning av jord större på platser med varierad topografi, men förekommer även på relativt platta fält. Om man bara tar prover i matjorden och inte mäter matjordens djup på olika platser så inför man också ett mätfel.



Figur 3. Fördelning av samma massa jord i markprofilen i en kompakt jord med hög volymvikt (torr skrymdensitet) och en lucker jord med låg volymvikt. Volymvikterna varierar under året som följd av frysning/tining, torkning/vätning samt jordbearbetning och är starkt negativt korrelerade med kolhalten i marken. Data från Kätterer m.fl. (2011).

2.3.2 Modellberäkningar och scenarier

Data från långliggande fältförsök är värdefulla för att kalibrera och validera dynamiska kolbalansmodeller. Modellerna integrerar kunskap om kolomsättningsprocesser i marken med datakällor (långliggande försöksdata, klimatdata från SMHI, jordartskartor, jordbruksstatistik, satellitinformation etc.) så att bedömning av koldynamik kan göras inte bara för försöksplatserna utan också för regioner eller hela landet. Dessa modeller används också för att göra prognoser för kolförrådets utveckling framåt i tiden, såväl på enskilda gårdar som på nationell nivå, under framtidsscenarioer med ändrad markanvändning och förändrat klimat. I klimatrapporteringen inom sektorn Markanvändning, Markanvändningsförändring och Skogsbruk (LULUCF) används exempelvis sådana dynamiska modeller i ett flertal länder. I Sveriges används ICBM modellen som utvecklades under 1990-talet (Andrén & Kätterer, 1997) och som sedan dess har vidareutvecklats inom SMED¹ (Andrén m.fl., 2004, 2008). Arbetet med vidareutvecklingen av modellverktyg pågår kontinuerligt inom olika projekt.

Förenklade versioner av modeller är användbara som underlag för åtgärdsarbete på gårdsnivå (Kröbel m.fl., 2016). Inom rådgivningen i Greppa näringen används modellen ICBM i verktyget Odlingsperspektiv för att illustrera hur gårdens odlingsystem påverkar markens multhalt. Verktyget visar skillnader mellan olika scenarier, som exempelvis effekten av en förändrad växtföljd jämfört med nuvarande växtföljd.

2.3.3 Sensorer och fjärranalys

På senare tid har intresset ökat för möjligheterna att använda sensorteknik för att bestämma kolhalten i marken. Framförallt handlar det om optiska sensorer på satelliter, drönare eller jordbruksredskap som mäter reflekterat ljus i det synliga och nära infraröda våglängdsområdet. Satellitbilder gör det möjligt att täcka in stora områden och användandet av drönare eller sensorer på jordbruksredskap kan ge högre upplösning i data i både tid och rum jämfört med traditionell provtagning.

Det organiska materialet i marken har en direkt påverkan på sensormätningarna och där mätningar på torkade prover på laboratorium har visat sig fungera för att bestämma kolhalt, även om resultaten kan variera och påverkas av t.ex. jordart (Stenberg m.fl., 2010). Ska mätningarna göras direkt i fält, eller från en drönare eller satellit, tillkommer ytterligare påverkan av andra faktorer som vattenhalt, strukturen på markytan och växtrester (Vaudour m.fl., 2022). En begränsning med satellitbilder är möjligheten att få bilder då det är barmark, molnfritt och så torra förhållanden som möjligt. Ett sätt att hantera det är att använda flera bilder i en tidsserie. En annan

¹ SMED står för Svenska Miljö Emissions Data, och är ett konsortium inom vilket de fyra organisationerna IVL (Svenska Miljöinstitutet AB), SCB (Statistiska centralbyrån), SLU (Sveriges lantbruksuniversitet), och SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) samarbetar, bl.a. med att ta fram underlag för Sveriges klimatrapportering till EU och FN.

begränsning med satellitdata är att mätningarna görs på markytan och därför enbart ger information om det översta markskiktet.

Trots att fjärranalys kan verka lovande som alternativ för att mäta förändringar i kolförråd är resultaten från forskningen varierande. Framförallt för satellitdata är det svårt att få generellt tillförlitliga bestämningar med den noggrannhet som behövs för att detektera små skillnader i kolhalter. Fjärranalysdata behöver också verifieras med direkta metoder, dvs. analys av fysiska jordprover som i sin tur har stor osäkerhet.

2.3.4 Databehov för beräkning av kolförråd på fältet - tillgång och tillgänglighet

För att beräkna kolmängd i åkermarken behövs information om kolhalt och volymvikt men också om tillförsel och bortförsel av kol, samt faktorer som påverkar omsättningen av det organiska materialet och potentialen för kolinlagring i marken.

Information som finns på fältnivå eller i vissa fall på gårdsnivå ger betydligt säkrare underlag för beräkning av gårdens kolbalans än om enbart nationella databaser med myndighetsdata och s.k. öppna data används. Men om en hel region beräknas baserat på de nationella databaserna ger beräkningarna tillräckligt stabila värden för att förändringar ska kunna säkerställas.

Beräkning av markens kolmängd

Information om kolhalt på fältnivå kan finnas i lantbrukarnas egna markkarteringar. Kolhalten är då i stort sett alltid bestämd som mullhalt (glödförlust korrigerad för lerhalt) (Tabell 1). I det nationella övervakningsprogrammet Mark- och grödoinventeringen analyseras organiskt kol men även om den analysen är säkrare än mullhaltsbestämning så är den rumsliga upplösningen betydligt lägre, med ca 2000 provpunkter i Sveriges åkermark.

För volymvikt finns det sällan information. Analysen ingår inte i markkarteringen som lantbrukare bekostar och den finns bara för ett fåtal platser i den nationella övervakningen. Det betyder att volymvikten måste skattas genom att använda annan information, främst textur och mullhalt. Eftersom markkarteringar i stort sett endast undersöker matjorden är information om alven ofta begränsad.

Tabell 1. Data för beräkning av kolmängd

Data	Nivå	Källa	Ägare/tillgänglighet
Kolhalt (mullhalt)	Fält	Markkartering/VP*	Lantbrukaren/avtal?
Kolhalt	Kommun (eller större)	Mark- och grödoinventeringen	NV/SLU/öppen
Volymvikt	-	-	<i>Saknas i stort sett</i>
Volymvikt (PTF)**	Fält	Mullhalt och textur	-

* VP: Växtodlingsprogram, t.ex. CropPLAN

** PTF: Pedotransferfunktioner för skattning utifrån annan information

Odlingsåtgärder

De mest detaljerade uppgifterna om odlingsåtgärder på fältnivå finns hos lantbrukaren (Tabell 2). Det betyder att tillgången till data varierar men också att omfattningen av dokumentation av odlingsåtgärder skiljer mellan gårdar.

Information om gröda samt mellangroda och fånggröda som odlats med stöd från Landsbygdsprogrammet/Strategisk plan finns även i Jordbruksverkets databaser för jordbruksstödet och täcker i stort sett all jordbruksmark.

Tabell 2. Exempel på källor till odlingsdata

Data	Skala	Källa	Ägare/tillgänglighet
Växtföljd, mellan-/fånggröda	Fält	Stöd-DB	SJV/avtal?
	Fält	VP*	Lantbrukaren/avtal?
Skördemängd	Produktionsområde	SCB	-
	Fält	VP*	Lantbrukaren/avtal?
Skördeuppskattning satellit	Fält	CropSAT	DataVäxt/öppen
Organisk gödsel - stallgödsel	Fält	VP*	Lantbrukaren/avtal?
	Gård	SJV	-
	Produktionsområde	SCB	-
Organisk gödsel - övrigt	Fält	VP*	Lantbrukaren/avtal?
Hantering av skörderester	Fält	VP*	Lantbrukaren/avtal?
Jordbearbetning	Fält	VP*	Lantbrukaren/avtal?

* VP: Växtodlingsprogram, t.ex. CropPLAN

Klimat och geografiska data

Förutom initial kolmängd och odlingsåtgärder påverkas omsättningen av det organiska materialet av platsens egenskaper och klimat. Yttäckande data om klimat etc. finns i olika format (Tabell 3). Information om textur (lerhalt) kan finnas i lantbrukarens egen markkartering men också yttäckande i den digitala åkermarkskartan (Piiikki & Söderström, 2019). Genom att kombinera gårdens egna data med den digitala åkermarkskartan i tjänsten CropMAP kan en fältpassad lerhaltskarta skapas.

Tabell 3. Exempel på källor till data om klimat och geologiska egenskaper

Data	Skala	Källa	Ägare
Väderdata	Ex. 2,5 km	SMHI-grid	SMHI/öppen?
	Station	LantMet	SLU/öppen
Höjddata	2 m	Nationell höjdmödel	Lantmåteriet/öppen
	2 m	Markhöjdmödel, grid1+	Lantmåteriet/ev. kostnad
Markfukt	2 m	SLU:s Markfuktighetskarta	SLU/öppen
Textur	Fält	Digitala åkermarkskartan/CropMAP	SGU/DataVäxt/öppen
	Fält	markkartering/växtodlingsprogram	Lantbrukaren/avtal?
pH	Fält	markkartering/växtodlingsprogram	Lantbrukaren/avtal?
	Kommun (eller större)	Mark- och grödoinventeringen	NV/SLU/öppen

2.4 Bieffekter av kolinlagring

Kolinlagring i marken har många positiva bieffekter. Framförallt ökar vanligtvis bördigheten med kolhalten i marken. Det finns ett starkt positivt samband mellan kolhalten, den mikrobiella biomassan och mikrobiell aktivitet (Börjesson m.fl., 2014). Detta innebär att omsättningen av näringsämnen bundna i mullen ökar med kolhalten, men också att markstrukturen förbättras (Figur 3). En ökad porositet i marken gynnar tillväxten av rötter som då kan utnyttja näring och vatten mer effektivt. Markens växttillgängliga vattenmagasin ökar också med kolhalten (Fukumasu m.fl., 2022). Om markens bördighet ökar kan vi producera samma mängd på en mindre yta och i många fall även med en mer effektiv resursanvändning. Den friställda ytan kan då beskogas eller användas för att producera livsmedel, vilket kan leda till minskad avskogning någon annanstans i världen. Grön mark under vinterhalvåret som gynnar kolinlagringen ökar också markytans albedo eftersom en grön yta reflekterar solljuset mer än en brun yta av ett plöjt fält. Detta har en direkt avkylningseffekt på atmosfären och är därför också en positiv klimatåtgärd. Effekten kan vara av samma storleksordning som kolinlagring (Sieber m.fl., 2022).

Att bygga upp kolförråd kräver tillgång på växtnäring. Näringsämnen som ingår i mullen är främst kväve, fosfor och svavel. För varje ton kol som lagras in behövs det ungefär 80 kg kväve, 20 kg fosfor och 14 kg svavel (Kirkby m.fl., 2011). Om upptaget av dessa näringsämnen ger minskad utlakning så är det en win-win strategi men om denna extranäring behöver tillföras så kräver det extraresurser vilket är förknippade med miljöpåverkan.

Den med kolhalten ökande näringsomsättningen i marken kan också ha negativ miljö- och klimatpåverkan. I ett försök i England där man hade tillförd stallgödsel i ett av försöksleden hade kolhalten i marken ungefär tredubblats efter 135 år jämfört med kontrolleret med enbart mineralgödsel (Powlson m.fl., 1989). Samtidigt hade nitrathalten ungefär tredubblats under vinterhalvåret, vilket innebär större risk för både kväveutlakning och lustgasavgång. Den ökade risken betyder inte att den verkligen realiserar, men den måste hanteras, genom exempelvis odling av fånggrödor eller perenna växter som kan ta upp näringsämnen som frigörs under vinterhalvåret. Man måste också vara försiktig med åtgärder som på kort sikt kan leda till ökade lustgasutsläpp, vilket i vissa fall kan motverka klimatvinsten av kolinlagringen. Odling av frostkänsliga mellangrödor är ett exempel på detta (Aziz, 2022; Olofsson & Ernfors, 2022). Det finns alltså en reell risk att åtgärder som syftar till att lagra in kol i jordbruksmark totalt sett kan ge en mindre positiv effekt på klimatet, om de orsakar ökade lustgasemissioner (Guenet m.fl., 2021). Markens inbindning av kol planar dessutom ut (som diskuteras ovan) ett antal decennier efter att man infört en kolinlagrande åtgärd (Figur 1). Om då lustgasemissionerna ökar med kolhalten eller vid odling av frostkänsliga mellangrödor så kan de efter ett antal decennier eventuellt överskugga climateffekten av kolinlagringen (Lugato m.fl., 2018; Haas m.fl., 2022).

2.5 Kolbalanser i Sverige och internationellt

2.5.1 Årlig rapportering till EU och FN

Enligt gällande internationella avtal måste varje industrialiserat land rapportera sina territoriella utsläpp i årliga rapporter till FN:s klimatkonvention och, för EU:s medlemsländer, till EU-kommissionen. Redovisningen baseras på metoder framtagna av FN:s Internationella klimatpanel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Utsläpp och upptag av växthusgaser redovisas i fem sektorer: Energi, Industriprocesser och produktanvändning (IPPU), Jordbruk, Markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk (Land use, Land use change and Forestry, LULUCF) och Avfall.

Rapporteringen för LULUCF omfattar förändringar i kolförråd i levande biomassa, död ved (inkluderar stubbar), förna (inkluderar förna och markens humuslager) och markkol. I LULUCF-sektorn redovisas också växthusgasutsläpp från skogsgödsling, utsläpp av växthusgaser från dränerad mark, utsläpp från torvproduktionsmark och producerad odlingstorv, utsläpp av lustgas från mineralisering, utsläpp från bränder i skog samt inlagring av kol i trä- och pappersprodukter där kolet binds en kortare (papper) eller längre tid (sågade trävaror). Förändringar i kolförråd redovisas för brukad mark, dvs. skogsmark (virkesproduktionsmark, formellt skyddad mark och improduktiv skogsmark), jordbruksmark, betesmark samt bebyggd mark.

2.5.2 Rapportering av kolbalans i svensk jordbruksmark

I klimatrapporteringen definieras Jordbruksmark som all mark som används till ettårig eller flerårig växtodling och som regelmässigt plöjs. Till Jordbruksmark hänförs också mindre angränsande områden som kan omfatta trädvegetation (t.ex. energiskogsodling). I Riksskogstaxeringen som är grunden för klimatrapporteringen motsvarar detta ägoslaget Åkermark som definieras som mark som används till växtodling eller bete och som regelmässigt plöjs eller hävdas genom slätter. Hit hänförs också angränsande markområden där uthuggning för åkermarken regelmässigt sker. Dessutom inkluderas mark som används för yrkesmässig odling av köksväxter, frukt, bär, gräsmattor, pyntegrönt, energiskog samt julgransodlingar på tidigare åkermark. Riksskogstaxeringen används också för att skatta den totala nationella arealen åkermark samt levande biomassa och död ved som kan förekomma på åkermark.

Mineraljordens årliga kolbalans beräknas för åtta produktionsområden med modellsystemet ICBM-region. För beräkningarna utnyttjas dagliga väderdata, årliga avkastningsvärden och stallgödselanvändning per region. Som utgångsläge för kolförrådet används resultat från Naturvårdsverkets riksomfattande provtagning av kolhalt, textur m.m. inom Mark- och grödoinventeringen. Den genomsnittliga förändringen per hektar beräknas genom viktning av kolinnehållet per hektar och region och det

totala kolinnehållet i mineraljorden beräknas genom att kolinnehållet per hektar multipliceras med arealskattningen för åkermark enligt Riksskogstaxeringen.

För de organogena jordarna beräknas kolbalans och växthusgasutsläpp genom att multiplicera en genomsnittlig emissionsfaktor för koldioxid respektive lustgas med den totala arealen organogen jordbruksmark. Emissionsfaktorn som används i klimatrapporeringen baseras på IPCC:s metodrapport för våtmarker. Ett stort antal studier har där använts för att skatta emissionerna. Emissionsfaktorn för koldioxid från jordbruksmark är 6,1 ton kol per hektar och år. Emissionsfaktorn för lustgas är 13 kg kväve per hektar och år men redovisas i jordbrukssektorn istället för marksektorn.

Arealen organogen jordbruksmark skattas med hjälp av SGU:s jordartsdatabas och Jordbruksverkets åkermarksblock. Den senaste skattningen resulterade i en areal om knappt 112 000 hektar år 2022 och tendensen är att arealen organogen jordbruksmark minskar över tid precis som den totala arealen jordbruksmark.

År 2022 bidrog jordbruksmark med ett nettoutsläpp på 3,4 miljoner ton CO₂-ekvivalenter varav mineraljordar utgjorde en källa på 0,4 miljoner ton, levande biomassa en sänka på 0,2 miljoner ton, dött organiskt material en källa på 0,03 miljoner ton och organogen mark en källa på 2,6 miljoner ton CO₂-ekvivalenter. Till detta tillkommer lustgasutsläpp motsvarande 0,6 miljoner ton CO₂-ekvivalenter.

2.5.3 Förändring i kolbalans i Sverige och internationellt

Kolförrådet sjunker i de flesta jordbruksområden i världen. Enligt den officiella årliga klimatrapporeringen för 2019 förlorades 11,5 miljoner ton kol från EU-ländernas åkermark (120 miljoner hektar) (EEA, 2022), varav största delen (8,7 miljoner ton) från organogena jordar trots att dessa utgör bara 1,1 % av arealen. I mineraljordar, som utgör 98,9 % av åkerarealen, minskade kolförrådet i genomsnitt med 23 kg per hektar och år. Det måste dock beaktas att underlagen till de nationella rapporterna är framtagna med olika metoder och är därför mycket heterogena och osäkra.

Svensk åkermark på mineraljordar går dock emot den nedgående trenden. Enligt Mark- och grödoinventeringen ökade kolhalten i svensk åkermark på mineraljordar under de senaste decennierna (Poeplau m.fl., 2015). Genom att kombinera markinventeringsdata med uppgifter från lantbruksregistret kunde visas att markkolhalten på mjölk- och köttgårdar är väsentligt högre i genomsnitt än på växtodlingsgårdar (Henryson m.fl., 2022). Markkolhalten ökade med andelen vall på gårdarna där mjölkgårdar och nötköttgårdar hade den största andelen vall med i genomsnitt 67 respektive 82 %. Kolhalterna ökade för alla driftsinriktningar under tioårsperioden och med störst ökning på mjölkgårdar, där kolinlagringen motsvarade 0,38 ton kol per hektar och år. På köttgårdar och växtodlingsgårdar ökade kolhalten med 0,14 respektive 0,21 ton kol per hektar och år. Mera vall och grönbräda samt mera höstsäd istället för vårsäd är en rimlig förklaring till uppgången (Poeplau m.fl., 2015). Sedan 1980-talet har andelen åkermark bevuxen med vall och grönbräda ökat från ungefär en tredjedel till nästan hälften idag.

2.5.4 Potential för kolinlagring

Globala uppskattningar av potentialen för kolinlagring i odlingsjordar på grund av förbättrade jordbruksmetoder (exklusive tillförsel av biokol) varierar mellan 0,069 och 1,85 Pg kol per år enligt en nyligen genomförd studie (Roe m.fl., 2019). Uppskattningar i den högre delen av intervallet avser den tekniskt möjliga potentialen, medan värden upp till cirka 0,5 Pg kol per år anses vara ekonomiskt genomförbara. När man överväger begränsningar för implementering, uppskattade Paustian m.fl. (2016) att 0,08–0,4 Pg kol per år kan bindas i mineraljordar, men att ytterligare teknisk utveckling under kommande decennier, såsom växtförädling för förbättrade rotfenotyper av grödor, skulle kunna addera ytterligare 0,3 Pg kol per år. Enligt FAO fanns det 2017 globalt 1 424 miljoner hektar skördad åkermark. Att dividera den uppskattade årliga inlagringspotentialen i den högre delen av intervallet som rapporterats i flera publikationer (0,3 Pg kol per år) med arealen åkermark resulterar i en genomsnittlig årlig inlagringspotential på cirka 0,2 ton kol per hektar och år, vilket motsvarar 0,4 % av genomsnittliga kolförrådet till 20 cm djup i europeisk åkermark (Lugato m.fl., 2021). Denna uppskattning uppfyller det mål som satts upp av '4 promille initiativet' för att öka kolförrådet med 0,4 % per år (Minasny m.fl., 2017). Om man begränsar urvalet till kostnadseffektiva åtgärder, exempelvis mellangrödor och fler träd i jordbrukslandskap, minskar den uppskattade inlagringspotentialen närmare till hälften (Bossio m.fl., 2020). Flera uppskattningar av potentialen för svensk åkermark ligger också i detta intervall, dvs. mellan 0,1 och 0,2 ton kol per hektar och år (Rydberg m.fl., 2019; Karlsson m.fl., 2020), men variationen mellan skattningar från olika publikationer är mycket stor och överstiger faktor 100 mellan scenarier för olika länder inom EU (Rodrigues m.fl., 2021). Mycket arbete återstår för att ta fram mera realistiska skattningar som är praktiskt genomförbara och socialt acceptabla (Rodrigues m.fl., 2021).

3. Bedömning av klimatpåverkan

För att kunna bedöma och jämföra klimateffekter orsakade av förändringar i kolpooler med andra växthusgasutsläpp, speciellt lustgas, men även metan används en viktningfaktor som anger respektive växthusgas relativa styrka i förhållande till koldioxid. Ett vanligare förekommande ord för viktningfaktor är karaktäriseringsfaktor.

Den karaktäriseringsfaktor som brukar användas kallas för Global Warming Potential (GWP) (Houghton m.fl., 1991) och beskriver ett växthusgasutsläpps relativa effekt på strålningsbalansen under ett specifikt antal år efter utsläpp. Indikatorn för effekten på klimatet är gasens inverkan på jordens strålningsbalans. Strålningsbalansen avgör om mängden energi i klimatsystemet ökar eller minskar, vilket i sin tur leder till temperatur- och andra klimatförändringar.

Det är vanligast att man jämför effekten på klimatet upp till hundra år efter utsläpp (tidshorisont). Måttet kallas då för GWP_{100} . GWP -värden med 20, 100 och 500 års tidshorisont finns också publicerade och uppdateras i varje ny bedömningsrapport från IPCC. Den sjätte och senaste kallas för IPCC AR6 (IPCC, 2021). GWP_{100} har dock kommit att bli standard i de flesta sammanhang. Mycket tack vare att GWP_{100} användes i Kyotoprotokollet och används för rapportering av territoriella utsläpp i enlighet med FN:s klimatkonvention (UNFCCC, 1992; United Nations, 1997; IPCC, 2019)

GWP är enkelt att använda för att jämföra och bokföra olika utsläpp. Det används bland annat i sammanhang som handel med utsläppsrätter och beräkning av kostnadseffektiva åtgärder för att reducera klimatpåverkan.

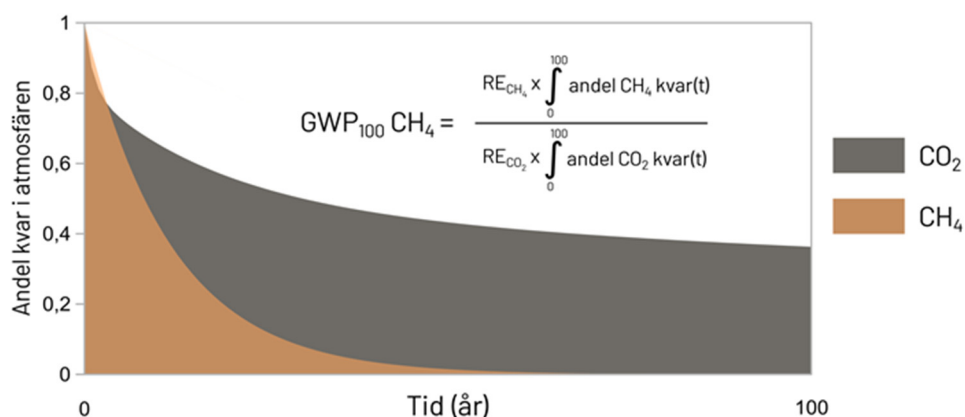
Beräkningen av GWP_{100} för en växthusgas är relativt enkel då varje gas har en specifik effekt på strålningsbalansen per kg gas. Denna multipliceras med mängden gas som finns kvar i atmosfären för alla tidpunkter från det att gasen släpps ut fram till 100 år efter utsläpp. Detsamma görs för koldioxid, vilket används för att normalisera värdet av andra växthusgaser (Figur 4). Det beräknade värdet kallas därför för koldioxidekvivalent (CO_2 -ekvivalent), vilket är ett dimensionslöst tal som per definition alltid är 1 för fossil CO_2 . Biogena koldioxidutsläpp antas ofta ha värdet 0 inom livscykelanalyser eftersom den mängd koldioxid som binds in under en organisms livstid är lika stor som den som avges när den bryts ned eller förbränns.

Det kan vara lättare att relatera till och förstå klimatpåverkan med hjälp av andra indikatorer än effekten på strålningsbalansen. En rad andra karaktäriseringsfaktorer har därför tagits fram baserade på andra indikatorer. Två exempel är GTP som jämför

effekten på jordens medeltemperatur (Shine m.fl., 2005), och GSP som använder sig av effekten på havsytan (Sterner m.fl., 2014). Utöver att de är lättare att förstå kan de också ge upphov till en annan tolkning och viktning mellan olika växthusgasers effekt på klimatet eftersom de beskriver olika klimataffekter som inte alla manifesterar sig samtidigt eller på samma sätt.

Det går också att modellera och visualisera den absoluta effekten på klimatet från kolflöden utspridda över tid genom att inte vikta med koldioxid och summera effekten från alla tidigare utsläpp vid varje enskild tidpunkt. Absolut GTP (AGTP) (IPCC, 2014) är en indikator som kan användas på detta sätt. Den visar då temperaturresponsen från ett eller en serie utsläpp över tiden.

Global Warming Potential (GWP) för metan 100 år efter utsläpp



Figur 4. Beräkning av GWP för metan (CH₄) sker genom att beräkna den kumulativa effekten på strålningsbalansen från utsläppet av ett kilo metan och dividera med motsvarande effekt från utsläpp av ett kilo koldioxid (CO₂). För GWP₁₀₀ beräknas den kumulativa strålningsbalansen för en gas genom att integrera mängden kvarvarande gas i atmosfären från tidpunkten för utsläpp (år 0) fram till 100 år efter utsläpp. Metan illustreras av den ljusbruna ytan och koldioxid av den gråa ytan i figuren. Varje gas måste även multipliceras med värdet för dess relativa effektivitet som växthusgas (RE), eftersom alla gaser är olika starka mätt i momentan effekt på strålningsbalansen [W/m²/kg gas]. Med de parametrar som används i IPCC AR 6 (Smith m.fl., 2021) är metan 29 gånger effektivare som växthusgas jämfört med koldioxid över en tidsperiod på 100 år.

3.1 Värdering av åtgärders effekt på kolförrådet

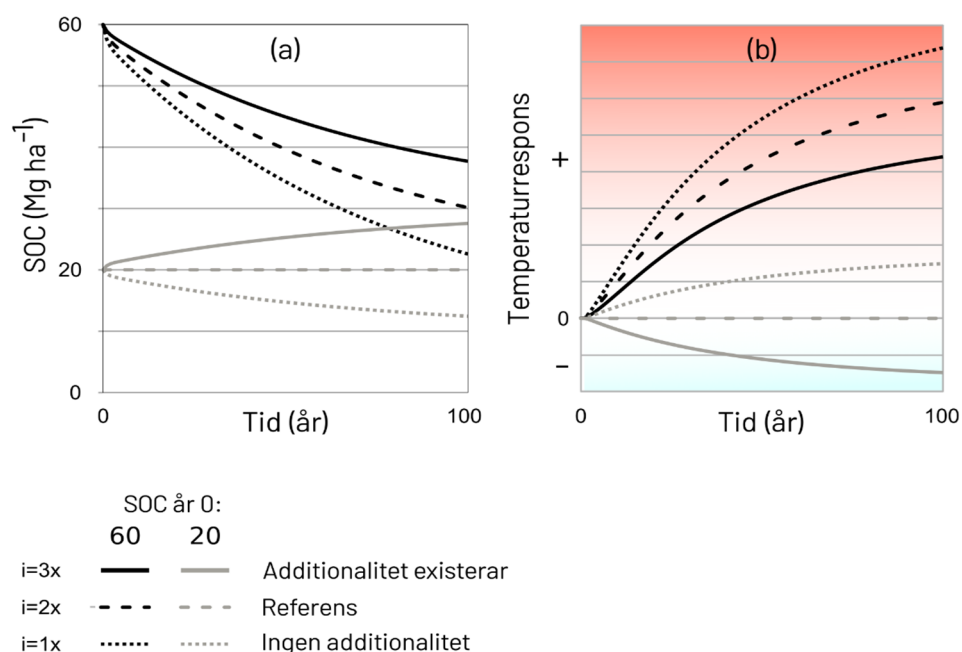
Additionalitet och permanens är två koncept som används i sammanhang där olika åtgärders effekt på markens kolförråd behöver värderas och monetariseras för att skapa incitament till att introducera åtgärder som minskar den globala uppvärmningen. Exempel på sådana incitament är kolkrediter och andra stöd till kolinlagrande jordbruk (COWI m.fl., 2021) samt de olika certifieringar som existerar på marknaden för att säkerställa att den önskade klimateffekten faktiskt uppnås.

3.1.1 Additionalitet

Grundtanken med additionalitet är att säkerställa klimatnyttan hos ett projekt, eller en åtgärd så att ekonomiska incitament endast riktas mot de projekt och åtgärder som inte skulle genomföras utan tillgång till dessa. Additionalitet beskrivs av the Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (Integrity Council, 2022) med ”The greenhouse gas (GHG) emission reductions or removals from the mitigation activity shall be additional, i.e., they would not have occurred in the absence of the incentive created by carbon credit revenues”.

Additionalitet är nära förknippat med ett referensscenario (baseline). Att ett projekt eller en åtgärd är additionell innebär inte nödvändigtvis att det motverkar global uppvärmning. Additionalitet appliceras också på projekt och åtgärder som syftar till att minska de totala utsläppen. Referensscenariot kan i det fallet vara en jord med högt markkol där kol förloras snabbt på grund av rådande teknik och odlingsinriktning. Åtgärder som leder till ökad tillförsel av kol till marken kan i det fallet minska klimatpåverkan, men fortfarande bidra till global uppvärmning (Figur 5). Om marken i referensscenariot istället har ett lågt markkolinnehåll är det möjligt att samma åtgärd bidrar till att motverka global uppvärmning i absoluta tal, det vill säga lägre medeltemperatur. I båda fall existerar additionalitet, och åtgärden är kvalificerad för ekonomiska incitament, förutsatt att den annars inte skulle genomföras.

Additionalitet är ett multidimensionellt begrepp. Åtgärder ska vara både miljömässigt, finansiellt och tekniskt additionella, vilket innebär att de måste leda till lägre utsläpp än vid ’business-as-usual’, ha högre kostnader eller lägre lönsamhet än om de inte får stöd, samt leda till en snabbare introduktion av teknologi än vad som skulle vara fallet utan stödet (COWI m.fl., 2021). Det får dessutom inte finnas lagkrav på att åtgärden skall genomföras (juridisk additionalitet).



Figur 5. Referensfallet (streckad linje) avgör ifall en åtgärd som påverkar markens kolförråd (a) är additionell (heldragen linje) eller ej (prickad linje). Additionalitet innebär dock enbart att det råder en klimatnytta jämfört med referensfallet, ej att åtgärden leder till negativa utsläpp och motverkar global uppvärmning (b). Figuren är baserad på samma scenarier som i Figur 1, med temperaturrespons beräknad enligt metodologi i Ericsson m.fl. (2013).

3.1.2 Permanens

Konceptet permanens är relevant för åtgärder och projekt som syftar till att öka markens kolinnehåll. Eftersom det kol som tillförs marken omsätts relativt snabbt krävs det kontinuerlig tillförsel och underhåll av densamma för att klimatnyttan ska säkerställas under en längre tid.

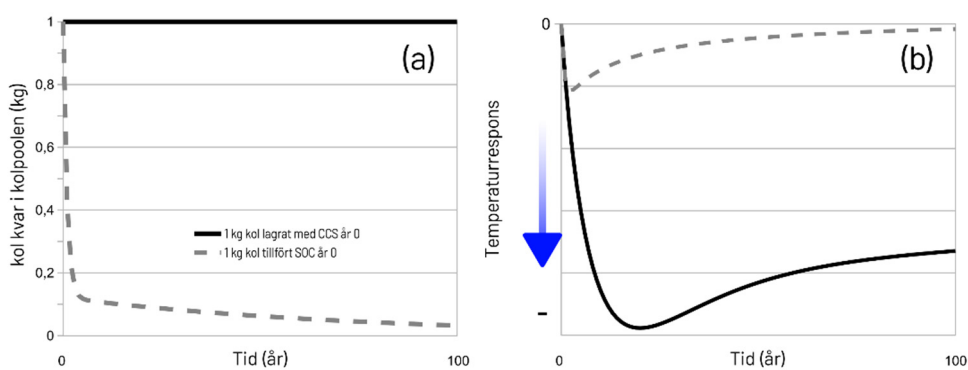
Projekt och åtgärder där koldioxid tas bort från atmosfären och lagringen av densamma kan trovärdigt garanteras i över hundra år betraktas ofta som permanenta. Ett exempel på detta är koldioxidinfångning med geologisk lagring (CCS). Den uppskattade effekten på klimatet av att lagra ett kilo koldioxid via CCS respektive att tillföra samma mängd kol till en jord visas i Figur 6. I och med att kolet i marken snabbt omsätts av mikroorganismer och återförs till atmosfären blir effekten på klimatet endast en bråkdel jämfört med den som uppnås med hjälp av CCS.

Svårigheten för projekt och åtgärder som har som mål att bygga upp markens kolförråd är att det krävs långsiktiga åtaganden för att garantera att kolförrådet inte

minskar på sikt. Det finns många risker för läckage. Bland annat naturliga (oundvikliga) faktorer, som extrema väderhändelser och naturliga fluktuationer i kolflöden. Det kan också uppstå situationer i framtiden där projekt-, eller markägaren har ett ekonomiskt intresse av att utföra åtgärder som minskar markens kolförråd (Integrity Council, 2022).

För att skapa trovärdighet måste därför kolkreditprogram och certifieringar som inriktar sig på markkolsprojekt och de åtgärder som utförs innehålla mekanismer som tar hänsyn till dessa risker, vilket kan ske på olika sätt. Målet är att skapa en så effektiv allokering av ekonomiska resurser som möjligt genom att värderingen av åtgärdens effekter reflekterar den klimatnytta som skapas jämfört med fossila utsläpp så väl som möjligt. Det kan ske via mätning och uppföljning av markens kol-innehåll, eller via utfärdandet av tillfälliga krediter. Hur detta görs i praktiken ligger dock utanför omfattningen för denna rapport.

Långsiktig effekt av kolinlagring i markens organiska material (SOC) jämfört med i berggrund (CCS)



Figur 6. Kvarvarande kol efter infångning och lagring av 1 kg kol år 0, med geologisk inlagring, CCS (heldragen linje) respektive i markens organiska material, SOC (streckad linje) (a) samt dess effekt på den globala medeltemperaturen (b). Eftersom markolet är ett dynamiskt system där kolet används som energikälla av mikroorganismer bryts det ned relativt snabbt och återförs till atmosfären. Det är inte fallet då kol fångas in och lagras geologiskt, med minimalt läckage. Det leder till två helt olika effekter på klimatet, vilket här illustreras med hjälp av temperaturresponsen, beräknad enligt Ericsson m.fl. (2013), baserat på samma modell som i Figur 1.

4. Standarder för företag och produkter

Det finns en rad standarder som ger vägledning för hur kolinlagring kan inkluderas i olika slags klimatberäkningar. Standarderna kan kategoriseras som produkt-, projekt eller företagsstandarder. Vilken standard som är lämplig att följa beror på syftet med beräkningen och inte sällan behöver flera standarder beaktas parallellt. Olika syften kan vara att ta fram ett klimatavtryck för en produkt, ett företags klimatrapportering eller att sälja kolkrediter. Nedan beskrivs några av dessa standarder.

4.1 Greenhouse Gas Protocol - Land Sector and Removals Guidance

Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) är en serie standarder ofta använda av företag vid klimatrapportering (WRI & WBCSD, u.å.). Enligt GHG Protocol ska emissioner av växthusgaser redovisas enligt tre s.k. Scope, där Scope 1 är emissioner från verksamheter eller mark som ägs eller kontrolleras av det rapporterade företaget. Scope 2 är emissioner från produktion av inköpt el, ånga, värme eller kyla och Scope 3 är alla övriga emissioner som sker uppströms eller nedströms det rapporterade företaget, så som produktion av insatsmedel eller användningen av produkter som det rapporterade företaget säljer.

Det senaste tillskottet till GHG Protocol är ett utkast till standard som beskriver hur kolinlagring kan beräknas och redovisas, Land Sector and Removals Guidance (LSRG) (WRI & WBCSD, 2022). Enligt standarden ska kolinlagring beräknas som nettoförändringen av markens kolförråd, detta kan antingen göras genom 'stock difference method' där skillnaden i markens kolförråd mellan två år utgör nettoförändringen, eller genom 'gain-loss method', där nettoförändringen beräknas som skillnaden mellan tillförd och bortförd koldioxid under en given period.

Kraven för att rapportera kolinlagring som negativa utsläpp (nettoupptag av CO₂-ekvivalenter av växthusgaser från atmosfären) i klimatrapporteringen är omfattande, då risken för att inlagrat kol återgår till atmosfären är konstant. Det är därmed frivilligt att rapportera kolinlagring, medan det är krav på att rapportera alla växthusgas-emissioner kopplade till markanvändning.

För att rapportera kolinlagring som ett negativt utsläpp ska bland annat kontinuerlig övervakning av kolförråd ske (genom exempelvis jordprover, fjärranalys eller modellering som bygger på gårdsspecifika data), spårbarhet till det enskilda fältet ska finnas, primärdata ska användas vid modellering och endast statistiskt signifikanta resultat ska redovisas. Om förlust av tidigare inlagrat kol sker ska detta redovisas som en emission. Om kolförrådets storlek uppskattas genom processbaserade modeller eller fjärranalys, ska dessa verifieras med jordprover med högst fem års intervall (samtidigt som det öppnas upp för att femårsintervallet kan justeras baserat på kunskap om hur lång tid det tar innan det är möjligt att detektera förändringar av markens kolförråd givet geografiska förutsättningar).

4.1.1 Krav på redovisning av kolinlagring

För företag och organisationer som omfattas av Greenhouse Gas Protocol - Land Sector and Removals Guidance (GHG Protocol - LRS) är redovisning och rapportering av kolinlagring (som i standarden benämns Removals) frivilligt, medan det är obligatoriskt att rapportera växthusgasemissioner. Ett företag som inte önskar rapportera kolinlagring kan använda IPCC:s inventeringsmetod för att identifiera markanvändning och kolförråd där årlig rapportering inte är nödvändig.

De företag som önskar redovisa och rapportera kolinlagring ska redovisa kolinlagring separat från växthusgasemissioner samt rapportera separat för Scope 1 (direkta emissioner från källor som företaget kontrollerar) och Scope 3 (emissioner som sker i samband med aktiviteter uppströms eller nedströms företaget). Följande krav ska uppfyllas vid redovisning av kolinlagring.

- **Pågående övervakning:** Företag får endast rapportera kolinlagring om det finns en övervakningsplan som säkerställer att kolet förblir kvar i marken och att förluster av kol registreras. Företag ska använda årliga data om kolförrådsförändringar alternativt kan årliga data tas fram genom att använda data från längre övervakningsperioder om högst fem år. Följande data kan användas: kolförrådsförändringsdata från partners i värdekedjan (jordbrukare), jordprover, fjärranalys, statistiska data genom insamlande av relevanta data gällande brukningsmetoder alternativt kolförrådsdata från certifieringsprogram. Om en modell- eller fjärranalysbaserad metod tillämpas för övervakning bör modellen verifieras med primära data åtminstone vart femte år.
- **Spårbarhet:** Om ett företag rapporterar kolinlagring i Scope 3 behöver företaget ha spårbarhet åtminstone till gårdsnivå men helst ner till fältnivå.
- **Primära data:** Kolinlagring ska beräknas genom användning av empiriska data specifika för kolsänkan och kolförrådet i fråga. Om en modellbaserad metod används innebär primära data att leverantörsspecifika indata till modellen appliceras, samt att modellen kalibreras med jordprover från inköpsregionen. Som sekundära data räknas nationell statistik för brukningsmetoder

eller kalibrering med regionala eller globala genomsnittliga värden/mätningar. Sekundära data får användas för att stödja beräkningar och kan baseras på vetenskapliga publikationer eller myndighetsstatistik. Alla sekundära data som används för att stödja beräkningar bör vara tekniskt, temporärt och geografiskt representativa.

- **Metod för att kvantifiera nettoförändring av markens kolförråd:** Om antagande görs om ingen kolförrådsförändring kan IPCC:s rekommendationer för nationella GHG inventeringar följas (Tier 1). Om ett ökat kolförråd ska rapporteras behöver någon av följande kvantifieringsmetoder tillämpas: jordprovsbaserad metod, modell- eller fjärranalysbaserade metoder (kalibrerade med jordprover), aktivitetsbaserad metod (emissionsfaktorerna ska i detta fall bygga på jordprover och modellberäkningar specifika för inköpsregionen) eller en hybridmetod som bygger på flera av ovanstående metoder. Enligt standarden ska kolinlagring beräknas som nettoförändringen av markens kolförråd 'stock change accounting', detta kan antingen göras genom 'stock difference method' där skillnaden i markens kolförråd mellan två år utgör nettoförändringen, eller genom 'gain-loss method', där nettoförändringen beräknas som skillnaden mellan tillförd och bortförd koldioxid under en given period.
- **Jordprover:** Oavsett kvantifieringsmetod ska företag inkludera mätningar (jordprover) representativa för relevanta marktyper för basåret i inventeringen samt ta förnyade prover vart 5:e år antingen för att kalibrera modell- eller fjärranalysberäkningar eller om en jordprovsbaserad modell tillämpas. Det exakta intervallet för hur ofta nya jordprover ska tas kan motiveras baserat på vetenskapliga publikationer för hur lång tid det tar innan skillnader i kolförrådet kan upptäckas genom jordprover i regionen.
- **Osäkerhet:** Företag ska endast redovisa och rapportera kolinlagring om förändringen är statistiskt signifikant och företaget ska då redovisa kvantifierade osäkerhetsuppskattningar för kolinlagringsvärdet samt motivering till varför kolinlagringen inte är överskattad.
- **Redovisning av kolförluster:** Förluster av tidigare rapporterad kolinlagring ska redovisas, det år som förluster sker.

Enligt GHG Protocol ska företag också redogöra för följande kolpooler:

- **Biomassa:** ovan- och underjordisk biomassa, omfattar bland annat vedartade stjälkar och rötter med en rot diameter >2 cm.
- **Dött organiskt material:** omfattar bland annat skörderester, aktuellt på åkermark om odlingsåtgärder avsevärt påverkar skörderester.
- **Markens kolförråd:** inkluderar markens organiska kolförråd.

4.1.2 Möjligheter att uppfylla kraven på gårdsnivå

En generell bedömning har här gjorts av möjligheterna att uppfylla kraven i det nuvarande förslaget av GHG Protocol - LSRG. Bedömningen visar att flera av kraven inte kan uppfyllas (Tabell 4) vilket förklaras med att potentialen att öka kolförrådet i svensk åkermark är begränsad och att det är svårigheter att säkerställa förändringar med tillgängliga mätmetoder.

Bedömningen baseras på dagens kunskap om organiskt kol i marken och de processer som påverkar markens kolbalans, samt tillgängliga metoder för att kvantifiera och följa upp markens kolförråd och förändringar av dessa. Bedömningen avser inte en specifik metod, utan generella möjligheter att uppfylla kraven. I slutversionen av standarden som förväntas till slutet av 2024 kan kraven komma att uppdateras.

4.2 Science Based Targets Initiative - FLAG

Allt fler företag väljer även att ansluta sig till Science Based Targets Initiativ (SBTi), ett initiativ som syftar till att sätta klimatmål som är i linje med vad vetenskapen beskriver krävs för att begränsa den globala uppvärmningen till högst 1,5 graders ökning av medeltemperaturen jämfört med förindustriell tid (Science Based Targets Initiative, u.å.). Numera finns även mål för landsektorn (Forest, Land and Agriculture, FLAG), där mål för alla markanvändningsbaserade emissioner inkluderas samt mål för ökad kolinlagring i mark (Science Based Targets Initiative, 2022).

För att kunna sätta FLAG-mål behöver en klimatrapporering göras enligt alla relevanta delar i GHG Protocol, inklusive LRSR. FLAG-mål är inte obligatoriska för små- och medelstora företag (SME), där finns istället en generisk målsättningsmetod som endast inkluderar mål för utsläppsminskningar och inte kolinlagring. Ur ett gårdsperspektiv innebär detta att det inte är ett krav att sätta egna FLAG-mål om gården klassas som ett SME, däremot kan det vara så att företag nedströms gården och som köper in produkter från gården, kommer vilja sätta FLAG-mål då gården inkluderas i företagets Scope 3.

4.3 Certifiering för handel med kolkrediter

Carbon farming (kolinlagrande jordbruk på svenska) anses ha en viktig roll att spela i att nå EU:s nettonollmål till 2050 och även de reduktionsmål om 55 % till 2030 enligt EU:s klimatlag. Kolinlagrande jordbruk lyftes fram i kommissionens kommunikation om hållbara kolcykler till europeiska rådet 2021 och definieras enligt EU-kommissionen som ”en grön affärsmodell som belönar markförvaltare som introducerar förbättrade odlingsåtgärder vilka resulterar i ökad kolinlagring i levande biomassa, dött organiskt material och mark genom att förstärka koluttag eller minska

Tabell 4. Föreslagna krav på data och metoder för uppföljning enligt GHG Protocol - LSRG (se utförligare beskrivning i kapitel 4.1.1) samt möjligheter att uppfylla dessa krav för att kunna rapportera kolinlagring för svensk åkermark

Krav på data och metoder	Möjlighet att uppfylla krav	Kommentar
Pågående övervakning	Ja	Förutsatt att årlig uppföljning görs med Agrosfär, som baseras på primära data från gårdarna, bör förlust av kol upptäckas och därmed uppfylla övervakningskrav
Spårbarhet	Ja	Spårbarhet till enskild gård och fältnivå finns
Primära data	Ja, troligtvis (standarden är inte tillräckligt specifik med vad som räknas som primära data och när det räcker med sekundära data)	Indata/aktivitetsdata från gård och fältnivå används, modell kalibreras med jordprover från inköpsregion
Metod för att uppskatta förändringar i markens kolförråd	Ja	Modellering med ICBM uppfyller Tier 3 krav enligt IPCC
Jordprover	Nej, en provtagningsplan behöver upprättas för att samla in data om kolhalt och dessutom behövs information om jordens volymvikt	För att rapportera negativa utsläpp ställs krav på mätningar av kolförråd för basåret och med fem års intervall. Det exakta intervallet för provtagning kan motiveras baserat på vetenskapliga publikationer för hur lång tid det tar innan skillnader i kolförrådet kan upptäckas genom jordprover.
Beräkningsmetod	Ja	'Stock change accounting' metod ska tillämpas, antingen genom 'stock difference method' (nettoförändring som skillnad i markens kolförråd mellan två år), eller genom 'gain-loss method' (nettoförändring som skillnad mellan tillförd och bortförd koldioxid under en given period). Om en inlagring inte kan säkerställas sker ingen rapportering
Osäkerhet	Nej, men sannolikt möjligt att ta fram	Redovisade negativa utsläpp behöver kompletteras med redovisning av osäkerheter för: 1) kolinlagringsvärdet, 2) osäkerhetsintervall för kolinlagringsvärdet utifrån ett givet konfidensintervall, samt 3) motivering till varför kolinlagringen inte är överskattad
Redovisning av kolförlust	Ja	Det är möjligt att enligt föreslagen metod både kvantifiera ökning och minskning av kolförrådet, men en rutin behöver sättas upp
Kolförråd som ska rapporteras	Delvis, samtliga kolförråd är möjliga att ta hänsyn till i ICBM men oklart vilka kolförråd som är aktuella att redovisa för åkermark	Följande kolförråd ska redovisas enligt GHG Protocol: biomassa, dött organiskt material, markens organiska kolförråd

förlusten av kol till atmosfären med hänsyn tagen till ekologiska principer som främjar biodiversitet och naturkapital” (COM (2021) 800 final, u.å.).

Med anledning av IPCC:s senaste rapport, där sannolikheten för att klara målet 1,5 grader minskar om inte omfattande minskningar av växthusgasemissioner sker inom en snar framtid (Pathak et al., 2022), samt för att kunna uppfylla EU:s mål om klimatneutralitet senast 2050 i enlighet med den europeiska klimatlagen har EU-kommissionen (EC) tagit fram ett förslag till förordning om ett certifieringsramverk för upptag och infångning av koldioxid (COM (2022) 672 final, u.å.). Kolinlagrande jordbruk lyfts här fram som en viktig pusselbit för att öka kolinlagringen i terrestra ekosystem och målsättningen är att ramverket ska implementeras 2025.

I förslaget lyfts vikten av affärsmodeller som belönar markförvaltare som bidrar till kolinlagring samt vikten av att skapa en inre EU-marknad för bland annat koldioxidupptag genom innovativ teknik. En framtida utveckling av koldioxidupptag anses stå inför tre huvudproblem. Det första ligger i svårigheten att bedöma och jämföra koldioxidupptag mellan och inom olika verksamheter. För att hantera detta problem föreslås att ramverket ska utgå från fyra kvalitetskriterier (KV.A.L.it.ET): KVantifiering, Additionalitet, Långsiktig lagring och hållbarhET.

Det andra och det tredje problemet utgörs av att många aktörer har låg tillit till certifieringar för koldioxidupptag medan aktörer som står för koldioxidupptag har svårt att finansiera sina tjänster. För att hantera dessa svårigheter måste certifieringsystemet ställa höga krav på transparens genom ett transparant och trovärdigt tillvägagångssätt, oberoende verifiering, fri och tillgänglig information samt spårbarhet i öppna eller offentliga register.

Nettovinsten av upptaget av koldioxid föreslås beräknas i två steg. Först ska det additionella koldioxidupptaget beräknas i förhållande till ett referensscenario. Referensscenariot ska återspegla prestandan för jämförbara verksamheter med liknande sociala, ekonomiska, miljömässiga och tekniska förutsättningar och geografiska läge. Syftet är att minimera administrativa kostnader, förenkla efterlevnad och säkerställa objektivitet, samtidigt som lantbrukare som tidigt implementerat åtgärder får ett erkännande. Man förespråkar användandet av elektroniska databaser, fjärranalys, geografiska informationssystem och elektroniska kartor för att minimera kostnader för övervakning och framtagande av referensscenarier.

I det andra steget ska alla emissioner som uppstår i samband med den koldioxidupptagande aktiviteten eller verksamheten subtraheras från upptaget för att säkerställa att själva implementationen av den koldioxidupptagande åtgärden inte orsakar emissioner som är större än kolinlagringen. Dessa emissioner kan uppstå vid exempelvis ökad användning av mineralgödsel, drivmedel eller energi samt andra emissioner kopplade till förändrad markanvändning.

En kolinlagringsaktivitet måste bidra till en nettonytta, som ska kvantifieras enligt följande formel (där koluupptag betecknas med ett negativt tal):

$$\text{Nettopupptaget av kol} = \text{CR}_{\text{baseline}} - \text{CR}_{\text{total}} - \text{GHG}_{\text{increase}} > 0$$

Där:

- $\text{CR}_{\text{baseline}}$ är kolupptag under basscenariot,
- CR_{total} är totala kolupptaget av kolinlagringsåtgärden,
- $\text{GHG}_{\text{increase}}$ är ökningen av direkta och indirekta växthusgasemissioner som sker till följd av implementeringen av den kolinlagrande åtgärden.

Vidare ska koldioxidupptaget vara additionellt och ske som en följd av certifieringens incitament. Det föreslagna ramverket ska också ta hänsyn till att kolinlagring är en reversibel process och certifieringens giltighet ska därför kopplas till ett utgångsdatum som stämmer överens med slutet på den relevanta övervakningsperioden.

4.3.1 Stöd för kolinlagring genom EU:s jordbrukspolitik

I EU:s gemensamma jordbrukspolitik (Common Agricultural Policy, CAP) för perioden 2023–2027 finns numera möjlighet att få ersättning för kolinlagrande åtgärder på jordbruksmark, vilket är en ny ersättning jämfört med tidigare programperioder (Jordbruksverket, 2023). Ersättningen är ettårig och går att söka för odling av mellangröda. Syftet med ersättningen är att lagra in kol i marken och därmed minska klimatpåverkan. En mellangröda har sin huvudsakliga tillväxt mellan två huvudgrödor och ska odlas just i syfte att öka kolinlagringen och bidra till bördigare mark. Mellangrödan ska sås in i eller efter skörd av huvudgröda, men på ett sådant sätt att grödan utvecklas väl under hösten och då kan lagra in kol. Ersättningsnivån är satt till 128 euro per hektar men kan variera mellan 113–141 euro per hektar beroende på hur många lantbrukare som söker ersättningen. Denna ersättning är viktig att beakta då en lantbrukare inte kan erhålla miljöersättning för att odla mellangröda och samtidigt sälja kolkrediter för samma mark. För att en kolkredit ska anses vara additionell ska den generera högre inlagring än vad som skulle ha skett utan incitamenten som kolkrediten medför.

4.4 Standarder för livscykelanalys (LCA) för produkter

När kolinlagring ska beräknas på produktnivå ger ISO 14067 (International Organization for Standardization, 2018) viss vägledning, exempelvis ska effekten av kolinlagring redovisas som en separat kategori och kolinlagring karaktäriseras som -1 kg CO₂-ekvivalenter/kg CO₂. Kolinlagring får bara inkluderas när åtgärder som garanterar inlagringens permanens finns på plats. Däremot saknas tydliga rekommendationer för hur effekten av kolinlagring ska fördelas över tid, förutom att inlagringen

vanligtvis fördelas linjärt under en given tidsperiod som kan motsvara tidshorisonten 20 år för markanvändningsförändring (Land Use Change, LUC), produktens eller projektets livslängd. Referensvärdet kan utgöras av naturlig vegetation, en historisk baslinje, 'business as usual', policymål för markanvändning eller en prognostiserad framtid.

Den internationella mjölkfederationen har publicerat riktlinjer för hur kolinlagring kan inkluderas i livscykelbaserade klimatavtrycksbedömningar (International Dairy Federation, 2022). Bidraget från kolinlagring ska redovisas separat om det inkluderas och det finns inga krav på att mäta kolförråd, utan det går bra att använda IPCC:s Tier I metod som innebär en enkel empirisk modell, där markanvändningsfaktorer som tar hänsyn till klimatzon, jordart, vegetation, jordbearbetning och tillförsel av organiskt material appliceras på en given areal (IPCC, 2019). En viktig aspekt av metoden är att ett 20 årigt tidsfönster för ansvarsåtagande tillämpas, dels för att harmonisera med hur LUC beräknas, dels för att 20 år anses vara en realistisk tidsperiod för en markägare att kunna överblicka. Det innebär att LCA-utövaren ska blicka 20 år bakåt i tiden för att finna ett referensvärde för kolförrådet, samt att markägaren bär ansvar för permanensen för varje enskilt års kolinlagring 20 år framåt i tiden. Det innebär att det inlagrade kolet under ett år, ska fördelas jämnt över efterföljande 20 år. Effekten av kolinlagring karaktäriseras då som $-0,05 \text{ kg CO}_2\text{-ekvivalenter/kg CO}_2$, enligt en så kallad justerad karaktäriseringsfaktor (CF_{justerad}). Detta resonemang grundar sig på argumentet att ur ett GWP_{100} perspektiv behöver 1 kg koldioxid lagras in under 100 år för att erhålla dess fulla klimatnytta, om i stället ett 20 årigt ansvarsfönster tillämpas erhålls i stället följande justerade karaktäriseringsfaktor:

$$CF_{\text{justerad}} = (CF_{\text{tidshorisont} = 100 \text{ år}}) / (\text{Ansvarsfönster} = 20 \text{ år}) = CF_{\text{årlig}} \times (100/20)$$

5. Verktyg för beräkning av kolbalanser

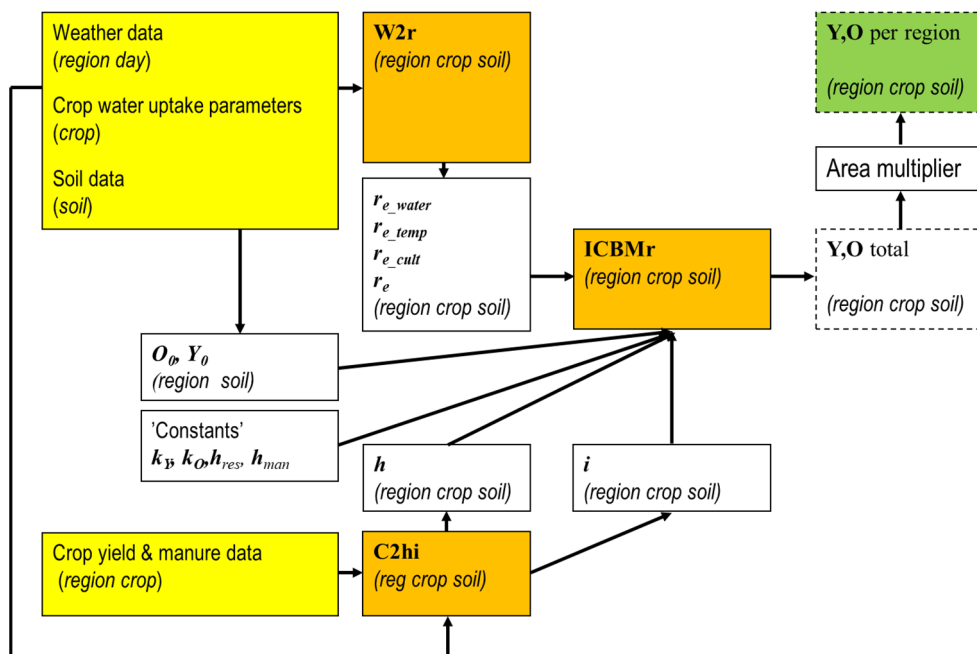
För rapportering av kolbalanser och skattningar av potential till förändring behövs modeller som kan integrera information om klimat, jordar och grödor med kända samband om kolflöden i mark-vatten-växt-luft systemet. Modellerna ger oftast mer tillförlitliga resultat för regioner där tillgången till data är större jämfört med för ett enskilt fält. Här ges exempel på modeller och metoder som används i Sverige och internationellt.

5.1 The Introductory Carbon Balance Model (ICBM)

ICBM är en markkolsmodell som bland annat används i den svenska klimatrapporteringen för att beräkna en årlig markkolbalans (ICBM-region) och finns beskriven i den svenska klimatrapporteringen (Naturvårdsverket, 2022). Beräkningen baseras på nationella skördenivåer och stallgödselstatistik, samt använder allometrisk funktioner för att uppskatta den årliga koltillförseln till marken från skörderester. I klimatrapporteringen beräknas kolbalansen för de åtta produktionsområdena i landet. ICBM har utvecklats och kalibrerats med hjälp av data från långliggande försök och utvecklas kontinuerligt med de senaste observationerna från långliggande försök och data från Mark- och grödoinventeringen. I den senaste versionen kan den även leverera ett osäkerhetsmått för beräkningen (Menichetti et al., 2024). Modellen byggs på fem parametrar redovisade i Tabell 5.

Tabell 5. Parametrar i ICBM

Parameter	Symbol	Enhet	Effekt på kolförråd vid ökning av värde
Input	i	kg år ⁻¹	Positiv
Nedbrytningshastighet för Y	k_y	år ⁻¹	Negativ
Humifieringskoefficient	h	dimensionslös	Positiv
Nedbrytningshastighet för O	k_o	år ⁻¹	Negativ
Extern påverkan på k_y och k_o	r_e	dimensionslös	Negativ



Figur 7. ICBM-reg konceptet (Andrén et al., 2004). Gröd-, väder- och jordartsdata för varje region används i väder-till- r_e modulen (W2r), som beräknar r_e -faktorn för varje region, gröda och jordart. Initialt kolförråd (O_0 och Y_0) hämtas från markinventeringar. Parametrarna k_y , k_o , h_{res} , h_{man} , antas vara konstanta och där res betecknar skörderester (residues), och man betecknar stallgödsel (manure). Data om skördenivå och stallgödsetillförsel ligger till grund för att beräkna koltillförsel till marken (i), liksom ett viktat h , uppskattat genom de allometrisk funktionerna i C2hi modulen. De två initiala värdena O_0 och Y_0 och de fem parametrarna k_y , k_o , h och i används för att beräkna totala unga (Y) och gamla (O) kolpoolen (kg ha⁻¹). Dessa värden multipliceras med den faktiska arealen för att erhålla totalen, för exempelvis, en region.

Modellen utgörs av två kolpooler, en ung kolpool med hög omsättning av kol och en äldre och mer stabil kolpool. Den årliga tillförseln av kol via växtrester och stallgödsel är en av de drivande variablerna i modellen. Kolet från dessa källor transporteras via den unga kolpoolen till den äldre poolen. Tillförseln av kol (i) delas upp i ovanjordisk- och underjordisk biomassa, där humifieringskoefficienten för den underjordiska biomassan är 2,6 högre än för den ovanjordiska biomassan.

Data om klimat, gröda och jordart används för att beräkna en årlig jordarts/klimat parameter (r_e) som påverkar den årliga nedbrytningshastigheten i varje region. Modellupplägget innefattar 14 jordarter och 9 grödtyper, vilket ger 126 möjliga parameteruppsättningar per region och år, där varje parameteruppsättning representerar en andel av regionens areal. För varje region, år, gröda och jordart beräknar ICBM-region förändringen av markens organiska kol per hektar. Ett viktat värde beräknas per hektar och år, baserat på markanvändningsdata från Riksskogstaxeringen och kan summeras till ett nationellt värde.

Den årliga totala kolförrådsförändringen för tidsserierna beräknade med ICBM varierar mellan 20 till 140 kg kol per hektar och år och representerar typiska värden för kolförrådsförändringar för olika odlingsmetoder på mineraljordar. De mest dynamiska bidragande faktorerna till årliga variationer är gröda, skördenivå och väderförhållanden.

5.2 Odlingsperspektiv – Greppa Näringen

Inom rådgivningen i Greppa näringen används verktyget Odlingsperspektiv som illustrerar hur gårdens odlingssystem påverkar markens mullhalt på mineraljordar. Verktyget visar skillnader mellan olika scenarier, som exempelvis effekten av en förändrad växtföljd jämfört med nuvarande växtföljd. Verktyget bygger på den dynamiska markkols-modellen ICBM (se kapitel 5.1 och Andrén & Kätterer, 1997) där förändringen i markens mullhalt beräknas som skillnaden i tillförsel av organiskt material och bortförsel av organiskt material genom nedbrytning eller skörd (Greppa Näringen, 2022).

5.3 C-TOOL – SEGES

I Danmark har ett nationellt klimatberäkningsverktyg för gårdsnivå, ESGreen Tool, tagits fram av SEGES Innovationscenter, i samarbete med Organic Denmark (SEGES Innovation, 2022). Verktyget inkluderar kolinlagring genom en förenklad kolbalansmodell där tillförsel av kol beräknas och ett standardvärde dras bort för kol som bryts ned på kort sikt. Modellen ger ett relativt resultat, och säger inget om faktiskt kolförråd eller specifik information utifrån fältets förutsättningar.

På sikt ska modellen C-TOOL integreras i verktyget men först när bättre kolförrådskartor tillgängliggörs, då modellen kräver initiala kolförrådsvärden. C-TOOL är en förenklad modell som är utvecklad för väldränerade mineraljordar i nordvästra Europa, med syfte att bedöma långvariga trender för jordbruksmarkens organiska kolinnehåll (Taghizadeh-Toosi m.fl., 2014). C-TOOL används för uppskattning av förändringar i markens kolförråd till ett visst djup. Tre olika kolpooler modelleras: färskt organiskt material, nedbrutet organiskt material och resistent kol samt hur kol transporteras mellan dessa pooler. Transporten mellan poolerna bestäms av det organiska materialets nedbrytningshastighet och humifieringskoefficient (som beskriver andel av kolet i det organiska materialet som har bearbetats av mikrober och förblir stabilt i marken). De drivande variablerna för nedbrytningsprocesserna som användaren behöver ange är lerhalt, marktemperatur (genomsnittlig månadstemperatur), markens kol:kväve kvot och tillförsel av organiskt material (stallgödsel och växtrester).

5.4 Cool Farm Tool

Företaget Cool Farm Alliance har tagit fram verktyget Cool Farm Tool, som kan användas gratis av lantbrukare men mot en viss kostnad av andra organisationer för att beräkna gårdens växthusgasemissioner och kolinlagring (Cool Farm Alliance, 2019). Ledningsgruppen består av deltagare från PepsiCo, University of Edinburgh, Syngenta, Fertilizers Europe och Unilever. I verktyget beräknas förrådsförändringar i markens matjordsskikt (ner till 30 cm djup) över en 20-årig period. Det nuvarande värdet för markens kolförråd (SOC_t) beräknas genom att användaren av verktyget uppger en uppskattning av jordens torra skrymdensitet (g cm^{-3}) och mullhalt (%), genom att välja mellan tre alternativ för skrymdensitet och mullhalt. 1 g cm^{-3} och 1 % SOC antas motsvara 1,72 % mullhalt.

För att beräkna referensvärdet för markens kolförråd (SOC_{t-20}) används markanvändningsfaktorer från IPCC baserade på nuvarande markanvändning, jordbearbetning och tillförsel av organiskt material. Här har några tillägg gjorts för att även kunna ta hänsyn till effekten av stallgödsel och halm. Den årliga förändringen beräknas därefter som skillnaden mellan SOC_t och SOC_{t-20} dividerat med 20.

5.5 COMET-Farm

COMET-Farm är ett amerikanskt klimatberäkningsverktyg som kan användas för att beräkna växthusgasemissioner på både fält- och gårdsnivå (Paustian m.fl., 2018). Verktyget följer det amerikanska jordbruksdepartementets (USDA) rekommenderade metoder för beräkning av emissioner och upptag av växthusgaser i jordbruksmark. Metoden innefattar både empiriska emissionsfaktorer och den processbaserade simuleringsmodellen DayCent, som simulerar dynamik av kol och kväve i mark. Verktyget utgörs av en kombination av aktivitetsdata och olika typer av utsläppsmodeller. Data från nationella jordartsdatabaser, övervakningsprogram för markanvändning och klimatdata kombineras med gårds- och fältspecifika data. Användare väljer på vilken detaljeringsgrad gårdsdata anges, antingen genom generella alternativ som representerar regionala odlingsmetoder eller fältspecifika data.

För att få fram fältdata anger användaren fältets lokalisering som då kopplas mot markdatabaser (Web Soil Survey, WSS). Unika parceller skapas då med information om jordart och odlingsmetoder. Jordartsdata i WSS är bland annat markttextur, pH och rotdjup. Utifrån dessa data kan andra jordartsegenskaper beräknas genom pedotransfer-funktioner, som vattenhållande förmåga och jordens skrymdensitet.

I verktyget ingår en funktion för att ta hänsyn till historisk markanvändning eftersom historiska händelser kan ha långsiktig påverkan på markens kolförråd och därmed påverka nuvarande markkolsberäkningar. Den tidigare markanvändningen delas upp i tre olika tidsperioder. Perioden 1950–1980 klassas som historisk period, där användaren får välja mellan ett fåtal markanvändningskategorier ur en rullista,

för att fånga upp stora förändringar så som upplöjning av en betesmark. Perioden 1980–2000 benämns som modern period och även här får användaren välja lämplig markanvändning utifrån en rullista med olika regionala men generella markanvändningsalternativ vilka baseras på nationella jordbruks- och markanvändningsinventeringar. De valda uppgifterna används sedan som startvärden för DayCent-modellen.

Perioden 2000 till nuläge, representerar nuvarande period med nutida odlingsmetoder. För att beräkna kolförrådets förändring över tid anges växtföljd och odlingsmetoder för hela den nuvarande perioden. Användaren väljer antingen generella odlingsmetoder baserade på USDA:s datakällor eller ange fältspecifik information om gröda, såtidpunkt, jordbearbetning, gödsling, bevattning, kalkning etc.

DayCent modellen kräver daglig input av min- och maxtemperatur samt nederbörd, vilket hämtas från den amerikanska motsvarigheten till SMHI.

Modellen körs i flera steg, först simuleras ett jämviktsläge under naturlig vegetation, i nästa steg simuleras perioden 1800-1980 utifrån uppgifter om den historiska markanvändningen i den aktuella regionen. Resultatet utgör startvärdet i COMET-Farm, och modellen körs därefter med användarens data för modern period och nuvarande period. Nuvarande odlingsmetoder simuleras 10 år fram i tiden och utgör ett referensvärde för att kunna simulera förändringar i odlingsmetod. Förändringen i markens kolförråd mellan dessa två scenarier utgör resultatet för kolförrådsberäkningen, och resulterar i antingen nettoemissioner eller nettoupptag av koldioxid.

5.6 Andra projekt och initiativ om kolinlagring

Svensk kolinlagring

Det svenska initiativet Svensk kolinlagring har bland annat tagit fram en plattform för handel med kolkrediter i Sverige. Plattformen har knutit ca 40 pilotgårdar till sig som arbetar med olika kolinlagrande odlingsåtgärder på gårdsnivå. Plattformen utvecklar metoder för verifiering och kvantifiering av kolinlagring, men utgår i dagsläget från schablonvärden (Svensk kolinlagring, 2022).

Carbon Action - Finland

En samverkansplattform i Finland som är en del av Baltic Sea Action Group. Testar kolinlagrande jordbruksmetoder på ett 100-tal pilotgårdar. Noggrann datainsamling gällande väder, skörd, odlingsmetoder samlas in, samt jordprover för att utvärdera de olika metoderna. På sikt ska en kolmarknad utvecklas, bland annat genom att utveckla heltäckande verifieringssystem som kan modellera och förutse kolinlagring även när få datapunkter finns tillgängliga. Plattformen erbjuder även ett utbildningsmaterial genom onlinekurser för jordbrukare i regenerativt jordbruk (Antman & Wickman, 2022).

6. Förslag - Värdering av åkermarkens kolbalans på gårdsnivå med modell

Att bestämma den totala kolmängden i åkermarken och förändringar mellan åren på fälten på en enskild gård med de metoder för jordprovtagning och analys som används idag är förknippat med stora osäkerheter. Även om ett omfattande provtagningsprogram etableras för att bestämma markens status så kommer förändringar vara svåra att detektera inom så korta tidsintervall som några år. Med det nuvarande förslaget på standard för företags klimatrapportering Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) - Land Sector and Removals Guidance (LSRG), är det därför små möjligheter att kunna rapportera säkerställda öknings av kolmängd på ett enskilt fält, se utförlig redovisning i kapitel 4.1.

Men även om förändringar är svåra att säkerställa så har de betydelse för svensk åkermark som helhet. För att klimatarbetet ska vara effektivt behövs därför en återkoppling om hur gårdens odlingssystem inverkar på mängden kol i marken, både för lantbrukaren och för samhället. Lantbrukaren kan enklare förändra sin odling med kunskap om vad som påverkar kolmängden. Samhället kan reglera styrsystemen så att åtgärder som gynnar kolinlagringen värderas högre. Det är också viktigt att gårdens historik varken ger fördelar eller nackdelar utan att värderingarna istället utgår från nuläget på gården och möjligheterna att bidra till den kollektiva klimatnyttan.

6.1 Integrera ICBM-modellen i Agrosfär

För att öka möjligheterna att värdera och följa upp årliga odlingsåtgärders effekt på markens kolförråd oavsett gårdens odlingshistorik föreslår vi att modellen ICBM (Introductory Carbon Balance Model) etableras som en modul i Agrosfär.

ICBM-modellen uppskattar den årliga nettoförändringen i kolförrådet på fältnivå. Tillförsel av organiskt material via ovan- och underjordisk biomassa samt gödselmedel är basen i beräkningarna. ICBM är anpassad för svenska förhållanden och tillämpas i den svenska klimatrapporteringen (ICBM-region) och i Greppa Näringsens rådgivningsverktyg Odlingsperspektiv.

För integrering av ICBM i Agrosfär bör en kombination av Odlingsperspektiv och ICBM-region vara en utgångspunkt. Det innebär att beräkningar kan göras med

olika upplösning beroende på tillgången på data för det enskilda fältet. Med data från gårdens växtodlingsprogram och markkarteringar kan detaljerade beräkningar göras med Odlingsperspektiv. Den mer generella informationen i ICBM-region ger möjligheter att bedöma hur kolförrådet och potential till förändring varierar beroende på odlingsystem, jordar och klimat.

För att konkret föreslå hur Odlingsperspektiv/ICBM-region ska anpassas till Agrosfär behöver det kartläggas vilka behov som modellberäkningarna kan och ska tillgodose och hur de kompletterar varandra. Det kan vara att koppla rådgivningsverktyget Odlingsperspektiv direkt till fältdata men också att skapa underlag för kvalitetsuppföljning på gården, miljömärkning av livsmedel, värdebaserad ersättning genom strategisk plan (CAP) eller förbättrade beräkningar för nationella sammanställningar. Att förbereda för att följa Greenhouse Gas Protocol - LSRG även om krav på intervall för jordprovtagning och redovisning av osäkerheter inte är klargjorda kan också ingå i valet av hur ICBM kan integreras i Agrosfär.

6.1.1 Utvecklingspotential för beräkningar med ICBM

ICBM-modellen har genom åren utvecklats och förbättrats vartefter kunskapen om mark-växt systemet har ökat och dataunderlagen om jordars egenskaper och olika odlingsystem har blivit bättre. I Agrosfär skulle modellen kunna utvecklas ytterligare för att möta näringens behov om rapportering och uppföljning.

Grödor, bruksmetoder och markanvändning

Djurgårdar med grovfoderproduktion, speciellt långliggande vallar, ger inte lika säkra resultat i beräkningarna jämfört med växtodlingsgårdar där information om tillförd och bortförd näring ofta är detaljerad. Tillgång till data från gårdar med djurproduktion skulle bidra till att förbättra modellen men det förutsätter också att det finns tillräcklig information i SLU:s långliggande försök om odlingsystem med stallgödsel och grovfoder.

Modellen omfattar idag inte permanenta betesmarker men kan utvecklas för att beräkna kolbalans i betesmark under förutsättning att den finns data om närings- och kolflöden i olika typer av betesmarker. Att känna till kolförrådet i betesmarker är värdefullt men möjligheterna att öka förrådet utan att påverka den hävdade artsammansättningen kan vara begränsad.

Nya grödor och bruksmetoder, trädjordbruk etc. behöver sannolikt också inkluderas i modellen på sikt. Förändring av odlingsystemen kommer vara ett sätt öka jordbrukets motståndskraft mot klimatförändringarna vilket också kommer att påverka kolförråden. Andra sätt att öka biomassan i landskapet som trädriddåer längs vattendrag, alléer, dammar och våtmarker bör också inkluderas i beräkningarna.

Inkludera fältdata om mark, växtodling och stallgödsel i Agronod

Med data från fältet ökar förutsättningarna för trovärdiga beräkningar om fältets koldynamik. Fältdata bidrar också till att förbättra ICBM i stort, exempelvis i beräkningarna för vallar och stallgödsel. Om det även finns information på gården om näringsinnehåll i stallgödsel och skörd är det särskilt värdefullt.

Gårdar som utför klimatberäkningar i Agrosfär bör också genomföra en detaljerad markkartering. Förutom kolhalt bör om möjligt även volymvikt, textur och näringsinnehåll analyseras. Karteringen ger information till lantbrukaren om gårdens status och möjligheter till förändring. En kartering ger också underlag till att ta fram högupplösta kartor över kolinnehållet i svensk åkermark för klimatberäkningar och förbättring av ICBM-modellens beräkningar. För uppföljning av provtagningen är rumslig täthet att föredra framför kortare tidsintervall.

Utöka SLU:s långliggande fältförsök

Verifiera ICBM-modellens beräkning av kolförråd genom att SLU:s långliggande fältförsök kompletteras med mätning av volymvikt. Mätningen ingår inte i ordinarie provtagningsprogram men skulle ge värdefull information för att kunna öka noggrannheten i bestämningen av kolmängd för olika odlingsåtgärder. Det behövs även ökad kunskap om nya odlingsystem och om funktionen i vallar med och utan stallgödsel, på kort och lång sikt, och för olika jordar och klimat. De långliggande försöken skulle med fördel kunna kompletteras med undersökningar på gårdar som delar data med Agronod men former för finansiering och omfattning behöver utredas.

Undersök möjligheten att ta fram en svensk affärsmodell för värdering av åtgärders klimatnytta

Det behövs ett sätt att värdera åtgärder som ger klimatnytta även om åtgärderna inte ökar kolmängden utan enbart minskar nettoförlusten av kol eller bibehåller en redan hög kolmängd. En affärsmodell som värderar klimatnytta istället för säkerställd ökning av kolmängd skulle ge incitament till åtgärder oberoende av odlingshistorik och naturgivna förutsättningar. Det ger också möjlighet att värdera kolbalanser under svenska förhållanden jämfört med system som kräver säkerställande av ökning av kolmängder som GHG Protocol och handel med kolkrediter.

7. Slutsatser

Fältets odlingshistorik bestämmer potentialen för förändring av markens kolförråd

Åkermarkens odlingshistorik, jordarter och klimatet påverkar hur mycket kol som redan finns i marken. Det innebär exempelvis att en mjölkko gård i Småland på sandjord med en stor andel vall i växtföljden och betydande tillförsel av stallgödsel sannolikt redan har ett för platsen stort markförråd av kol som är svårt att öka. Mer kol kan istället öka utsläppen av lustgas och kväveläckaget. En spannmåls gård i Mälardalen på lerjord och utan tillförsel av stallgödsel kan däremot ha en högre potential att öka den totala mängden kol i marken.

Om begrepp som årlig nettoförändring eller kolbalans används istället för kolinlagring kan klimatarbetet på gården värderas så att aktiviteterna i nuläget bestämmer värdet och inte odlingshistoriken.

Regelverk för certifieringar behöver värdera inte bara kolinlagring utan också åtgärder som bromsar kolförluster

Kolbalansen i svensk åkermark rapporteras årligen till EU och FN. Inom producentkedjan, från gård till konsument, finns det ambitioner att inkludera beräkning av kolinlagring i produkternas klimateffekt. GHG Protocol - LSRG är ett förslag på standard där kolinlagring ska kunna spåras ned till gårds- eller fältnivå. Det ska också kunna säkerställas att kolmängden har ökat och att kolet blir kvar i marken över tid. Enbart åtgärder som ger verifierbar ökad kolmängd i marken får inkluderas i beräkningarna av klimateffekt.

Internationella standarder är generella för att beräkningar och rapporter ska kunna jämföras mellan länder. På samma sätt som det skiljer mellan gårdar i Sverige skiljer det också mellan länder vilken potential det finns för att öka mängden kol i marken. Eftersom det övergripande syftet med regelverken är att bromsa och vända den globala temperaturökningen är alla åtgärder som bidrar till att hålla kol kvar i marken värdefulla och bör premieras, inte bara de som ökar mängden kol, utan också de som bibehåller eller minskar takten i nedbrytning av det organiskt bundna kolet.

Jordprovtagning och analys av kolmängd har en stor mätosäkerhet som kan överskugga effekter av en förändring på ett enskilt fält

Att bestämma den årliga förändringen av mängden kol på fältnivå är med dagens metoder för jordprovtagning och laboratorieanalys inte realistiskt då mätmetodernas osäkerhet kan vara större än den faktiska förändringen. Förändringarna i kolförråd är långsamma vilket tillsammans med mätosäkerheten medför att det kan behövas 10 år eller mer mellan mättillfällena för att säkerställa en förändring. Det behövs också ett flertal prov per hektar för att täcka fältets variation.

Eftersom det i klimatarbetet behövs en snabb återkoppling om odlingsåtgärderna har gett önskad effekt på markens kolinnehåll är inte jordanalyser effektiva i det korta perspektivet. Analys av kolmängden på fältnivå ger däremot lantbrukaren information om var på gården det kan finnas möjlighet att öka markens kolförråd. Med data på fältnivå ökar också möjligheterna att ta fram högupplösta kartor över kolmängden i svensk åkermark vilket också skulle öka noggrannheten i modeller som beräknar kolbalanser.

Att bestämma volymvikt av jordprover förbättrar säkerheten i analysen av kolmängd. Det bör göras vid provtagning inom långliggande försök för att därmed kunna förbättra hur modeller beskriver olika åtgärder. För vanlig markkartering som görs inom lantbruket är det önskvärt men möjligen inte realistiskt.

Modellberäkning av odlingsåtgärdernas effekt på markens kolbalans skapar återkoppling till lantbrukare, företagare och myndigheter

En markkolmodell är en förenklad beskrivning av verkligheten utifrån befintlig kunskap om hur odlingssystem, jordar och klimat fungerar. ICBM-modellen har tagits fram för svenska förhållanden och används bland annat för nationell rapportering av kolförrådet i svensk jordbruksmark. Modellen har också byggts in i Greppa Näringsens rådgivningsverktyg Odlingsperspektiv för att visa hur markens kolhalt beror av odlingsstrategi och skörd men också av jordart, klimat och odlingshistorik. ICBM-modellen förbättras kontinuerligt genom att kalibreras och testas mot mätdata från bland annat långliggande fältförsök och i den senaste versionen inkluderas även ett osäkerhetsmått.

För att värdera effekten av olika odlingssystem föreslår vi att ICBM-modellen, och dess tillämpningar Odlingsperspektiv och ICBM-region, vidareutvecklas för att kunna redovisa den årliga nettoförändringen av kolmängden i marken på ett enskilt fält. Modellberäkningen ger lantbrukaren en direkt återkoppling på det aktuella odlingssystemets effekt på kolförrådet och därmed en indikation på om något kan förändras ytterligare i odlingssystemet.

Att använda samma modellsystem i hela skalan från gård till nationellt och för olika behov hos lantbrukaren, i producentkedjan och hos myndigheterna medför att satsning på utveckling av systemet gynnar samtliga användare och är kostnadseffektivt och hållbart för samhället som helhet.

Värdering av klimatnytta kan skapa incitament till åtgärder

Åtgärder inom odlingen som ger en klimatnytta ur ett helhetsperspektiv men som inte ökar kolmängden på det egna fältet behöver också värderas. Det kan vara fält som redan har stora kolförråd men där bibehållande av odlingsstrategin behövs för att inte kolförrådet ska minska. I system för kolkrediter eller uppföljning enligt GHG Protocol - LSRG krävs att en varaktig kolinlagring kan säkerställas. Det innebär att många åtgärder inte kan inkluderas och därmed riskerar att inte utföras om kraven för tillgodoräknande inte är relevanta. Ett alternativt system för värdering av åtgärders klimatnytta som är anpassat för Sveriges jordar, klimat och odlingsystem bör ha beräkningar med ICBM-modellen som utgångspunkt.

Referenser

- Andrén, O. & Kätterer, T. (1997). ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances. *Ecological Applications*, 7 (4), 1226–1236. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[1226:ITICBM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[1226:ITICBM]2.0.CO;2)
- Andrén, O., Kätterer, T. & Karlsson, T. (2004). ICBM regional model for estimations of dynamics of agricultural soil carbon pools. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70 (2), 231–239. <https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000048471.59164.ff>
- Andrén, O., Kätterer, T., Karlsson, T. & Eriksson, J. (2008). Soil C balances in Swedish agricultural soils 1990–2004, with preliminary projections. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81 (2), 129–144. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9177-z>
- Antman, A. & Wickman, E. (2022). Försäljning av kolkrediter - en ny, realistisk inkomstkälla för jordbrukaren? Carbon Action. <https://carbonaction.org/sv/kolkrediter-inkomstkalla-for-jordbrukaren/> [2022-11-17]
- Aziz, K. (2022). Effects of cover crops on nitrous oxide (N₂O) emissions in cereal cropping. Master thesis, Department of Ecology, SLU, Uppsala.
- Bossio, D.A., Cook-Patton, S. C., Ellis, P. W., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P., Wood, S., Zomer, R. J., von Unger, M., Emmer, I. M. & Griscom, B. W. (2020). The role of soil carbon in natural climate solutions, *Nat. Sustain.* 3 (5), 391–398.
- 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 (4), 549–558. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1281-x>
- Börjesson, G., Kirchmann, H. & Kätterer, T. (2014). Four Swedish long-term field experiments with sewage sludge reveal a limited effect on soil microbes and on metal uptake by crops. *Journal of Soils and Sediments*, 14 (1), 164–177. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0800-5>
- COM (2021) 800 final (u.å.). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL Sustainable Carbon Cycles. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-12/com_2021_800_en_0.pdf
- COM (2022) 672 final (u.å.). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a Union certification framework for carbon removals. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2022/0672/COM_COM\(2022\)0672_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2022/0672/COM_COM(2022)0672_EN.pdf)
- Cool Farm Alliance (2019). Frequently Asked Questions. [coolfarmtool.org. https://coolfarmtool.org/coolfarmtool/frequently-asked-questions/](https://coolfarmtool.org/coolfarmtool/frequently-asked-questions/) [2023-03-06]
- COWI, Ecologic Institute & IEEP (2021). Technical Guidance Handbook - setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU. (Report to the European Commission, DG Climate Action, under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007.). Kongens Lyngby: COWI.
- EEA (2022). Briefing no. 14/2022 Soil carbon, EN PDF: TH-AM-22-015-EN-N - ISBN: 978-92-9480-493-8 - ISSN: 2467-3196 - doi: 10.2800/822511
- Ericsson, N., Porsö, C., Ahlgren, S., Nordberg, Å., Sundberg, C. & Hansson, P.-A. (2013). Time-dependent climate impact of a bioenergy system - methodology development and application to Swedish conditions. *GCB Bioenergy*, 5 (5), 580–590. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12031>

- Fukumasu, J., Jarvis, N., Koestel, J., Kätterer, T. & Larsbo, M. (2022). Relations between soil organic carbon content and the pore size distribution for an arable topsoil with large variations in soil properties. *European Journal of Soil Science*, 73 (1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13212>
- Greppa Näringen (2022). Mullhalt och bördighet. <https://adm.greppa.nu/>. <https://adm.greppa.nu/radgivning/mullhaltochbordighet.4.1bc5b83316258284bb31e27.html> [2023-03-06]
- Guenet, B., Gabrielle, B., Chenu, C., Arrouays, D., Balesdent, J., Bernoux, M., Bruni, E., Caliman, J., Cardinael, R., Chen, S., Ciais, P., Desbois, D., Fouche, J., Frank, S., Henault, C., Lugato, E., Naipal, V., Nesme, T., Obersteiner, M., Pellerin, S., Powlson, D.S., Rasse, D.P., Rees, F., Soussana, J., Su, Y., Tian, H., Valin, H. & Zhou, F. (2021). Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Global Change Biology*, 27 (2), 237–256. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>
- Haas, E., Carozzi, M., Massad, R.S., Butterbach-Bahl, K. & Scheer, C. (2022). Long term impact of residue management on soil organic carbon stocks and nitrous oxide emissions from European croplands. *Science of The Total Environment*, 836, 154932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154932>
- Henryson, K., Meurer, K.H.E., Bolinder, M.A., Kätterer, T. & Tidåker, P. (2022). Higher carbon sequestration on Swedish dairy farms compared with other farm types as revealed by national soil inventories. *Carbon Management* 13:266-278. <https://doi.org/10.1080/17583004.2022.2074315>
- Houghton, John.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. & Intergovernmental Panel on Climate Change. (1991). 1990 IPCC FAR WG1. Repr. Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press.
- Integrity Council (2022). Part 4: Assessment Framework. I: Core Carbon Principles, Assessment Framework and Assessment Procedure - Draft for public consultation. The Integrity Council for the Voluntary Carbon Market.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (red.) (2014). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. I: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis. 1. uppl.* Cambridge University Press. 659–740. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- International Dairy Federation (2022). Life cycle assessment guidelines for calculating carbon sequestration in cattle production systems. (In: Bulletin of the IDF No. 519/2022). Brussels: Int. Dairy Federation (ed.).
- International Organization for Standardization (2018). *Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. (ISO 14067:2018)*
- IPCC (red.) (2014). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. I: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis. 1. uppl.* Cambridge University Press. 659–740. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Switzerland: IPCC.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021 The Physical Science Basis- Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 6).* International Panel on Climate Change.
- Jordbruksverket (2023). Ersättning för kolinlagring och minskat kväveläckage. [jordbruksverket.se](https://jordbruksverket.se/stod/jordbrukarstoden-fran-2023/1-ariga-miljo--och-klimatersattningar-2023-2027/kolinlagring-och-minskat-kvavelackage). <https://jordbruksverket.se/stod/jordbrukarstoden-fran-2023/1-ariga-miljo--och-klimatersattningar-2023-2027/kolinlagring-och-minskat-kvavelackage> [2023-03-06]
- Karlsson, A.B., Boström, B., Jernbäcker, E., Lundblad, M. & Mjureke, D. (2020). *Vägen till en klimatpositiv framtid. SOU 2020: Betänkande från Klimatpolitiska vägvalsutredningen (M 2018:07).* Elanders Sverige AB. ISBN 978-91-38-25019-8.
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Kätterer, T. & Cohen, Y. (2017). From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. *Ambio*, 46 (2), 143–154. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0816-3>
- 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 (3–4), 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.010>
- Kröbel, R., Bolinder, M.A., Janzen, H.H., Little, S.M., Vandenbygaart, A.J. & Kätterer, T. (2016). Canadian farm-level soil carbon change assessment by merging the greenhouse gas model Holos with the Introductory Carbon Balance Model (ICBM). *Agricultural Systems*, 143, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.12.010>
- Kätterer, T., Andrén, O. & Jansson, P.-E. (2006). Pedotransfer functions for estimating plant available water and bulk density in Swedish agricultural soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science*, 56 (4), 263–276. <https://doi.org/10.1080/09064710500310170>

- Kätterer, T. & Bolinder, M.A. (2022). Agriculture practices to improve soil carbon storage in upland soil. Chapter 15. I. Rumpel C. (Ed.) Understanding and fostering soil carbon sequestration. Burleigh Dodds Scientific Publishing. https://bdspublishing.com/_webedit/uploaded-files/All%20Files/Open%20Access/9781801463119.pdf
- Kätterer, T., Bolinder, M.A., Andrén, O., Kirchmann, H. & Menichetti, L. (2011). Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141 (1–2), 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.029>
- Kätterer, T., Bolinder, M.A., Berglund, K. & Kirchmann, H. (2012). Strategies for carbon sequestration in agricultural soils in northern Europe. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science*, 62 (4), 181–198. <https://doi.org/10.1080/09064702.2013.779316>
- Lugato, E., Leip, A. & Jones, A. (2018). Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N₂O emissions. *Nature Climate Change*, 8 (3), 219–223. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0087-z>
- Lugato, E., Lavallee, J. M., Haddix, M. L., Panagos, P. & Cotrufo, M. F. (2021). Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter, *Nat. Geosci.*, 14 (5), 295–300.
- Menichetti, L., Kätterer, T. & Bolinder, M.A. (2024). Bayesian calibration of the ICBM/3 soil organic carbon model constrained by data from long-term experiments and uncertainties of C inputs. *Carbon Management*, 15:1. <https://doi.org/10.1080/17583004.2024.2304749>
- Meurer, K.H.E., Haddaway, N.R., Bolinder, M.A. & Kätterer, T. (2018). Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil—A systematic review using an ESM approach. *Earth-Science Reviews*, 177, 613–622. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.015>
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C., Vågen, T., van Wesemael, B. and Winowicki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 292, 59–86.
- Naturvårdsverket (2022). National Inventory Report Sweden 2022: Annexes Greenhouse Gas Emission Inventories 1990-2020 Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Stockholm: Naturvårdsverket.
- Olofsson, F. & Ernfors, M. (2022). Frost killed cover crops induced high emissions of nitrous oxide. *Science of The Total Environment*, 837, 155634. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155634>
- Pathak, M., Slade, R., Shukla, P.R., Skea, J., Pichs-Madruga, R. & Ürge-Vorsatz, D. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. ([P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Paustian, K., Easter, M., Brown, K., Chambers, A., Eve, M., Huber, A., Marx, E., Layer, M., Stermer, M., Sutton, B., Swan, A., Toureene, C., Verlayudhan, S. & Williams, S. (2018). Field- and farm-scale assessment of soil greenhouse gas mitigation using COMET-Farm. 341–359. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr59.c16>
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P. & Smith, P. (2016). Climate-smart soils, *Nature*, 532 (7597), 49–57.
- Piikki, K. & Söderström, M. (2019). Digital soil mapping of arable land in Sweden - Validation of performance at multiple scales. *Geoderma*, 352, 342-350. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.049>
- Poelau, C., Bolinder, M.A., Eriksson, J., Lundblad, M. & Kätterer, T. (2015). Positive trends in organic carbon storage in Swedish agricultural soils due to unexpected socio-economic drivers. *Biogeosciences*, 12 (11), 3241–3251. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3241-2015>
- Powlson, D.S., Poulton, P.R., Addiscott, T.M. & McCANN, D.S. (1989). Leaching of Nitrate from Soils Receiving Organic or Inorganic Fertilizers Continuously for 135 Years. I: Nitrogen in Organic Wastes. Elsevier. 334–345. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-323440-7.50031-7>
- Pribyl, D.W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156 (3–4), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Rodrigues, L., Hardy, B., Huyghebaert, B., Fohrafellner, J., Barančíková, G., Bárcena, T., De Boever, M., Di Bene, C., Feiziene, D., Fornara, D., Kätterer, T., Laszlo, P., O'Sullivan, L., Seitz, D., Leifeld, J. (2021).

- Achievable agricultural soil carbon sequestration across Europe from country-specific estimates. *Global Change Biology* 27, 6363–6380. <https://doi.org/10.1111/gcb.15897> ; <https://pub.epslu.se/id/eprint/26185>
- Roe, S., Streck, C., Obersteiner, M., Frank, S., Griscorn, B., Drouet, L., Fricko, O., Gusti, M., Harris, N., Hasegawa, T., Hausfather, Z., Havlík, P., House, J., Nabuurs, G., Popp, A., Sánchez, M. J. S., Sanderman, J., Smith, P., Stehfest, E. & Lawrence, D. (2019). Contribution of the land sector to a 1.5 °C world, *Nat. Clim. Change*, 9 (11), 817–828.
- Rydberg, I., Wikström, L., Segerborg-Fick, A., Rundqvist, J., Kätterer, T., Bodin, P. (2019). Så klarar det svenska jordbruket klimatmålen. En delrapport från IVA-projektet Vägval för klimatet. Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien, IVA, Stockholm, ISBN: 978-91-7082-990-1.
- Science Based Targets Initiative (2022). Forest, Land and Agriculture Science Based Target-Setting Guidance. <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTiFLAGGuidance.pdf>
- Science Based Targets Initiative (u.å.). How It Works. Science Based Targets. <https://sciencebasedtargets.org/how-it-works> [2023-03-06]
- SEGES Innovation (2022). LANDBRUGETS DIGITALE KLIMAVÆRKTØJ. [seges.dk. https://www.seges.dk/software/esgreen-tool](https://www.seges.dk/software/esgreen-tool) [2023-03-07]
- Shine, K.P., Fuglestvedt, J.S., Hailemariam, K. & Stuber, N. (2005). Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. *Climatic Change*, 68 (3), 281–302. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-1146-9>
- Sieber, P., Böhme, S., Ericsson, N. & Hansson, P.-A. (2022). Albedo on cropland: Field-scale effects of current agricultural practices in Northern Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108978>
- Smith, C., Nichols, Z.R.J., Armour, K., Collins, W., Forster, P., Meinshausen, M., Palmer, M.D. & Watanabe, M. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material. I: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. IPCC. <https://www.ipcc.ch/>
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M. & Wetterlind, J. (2010). Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. I: *Advances in Agronomy*. Elsevier. 163–215. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
- Sternier, E., Johansson, D.J.A. & Azar, C. (2014). Emission metrics and sea level rise. *Climatic Change*, 127 (2), 335–351. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1258-1>
- Svensk kolinlagring (2022). Svensk Kolinlagrings program för verifierad kolinlagring 2023. (Version 1.0). Malmö, Sverige.
- Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B.T., Hutchings, N.J., Vejlin, J., Kätterer, T., Glendining, M. & Olesen, J.E. (2014). C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecological Modelling*, 292, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.016>
- UNFCCC (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. (1771, 107). New York., <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- United Nations (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto, Japan. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- Vaudour, E., Gholizadeh, A., Castaldi, F., Saberioon, M., Borůvka, L., Urbina-Salazar, D., Fouad, Y., Arrouays, D., Richer-de-Forges, A.C., Biney, J., Wetterlind, J. & Van Wesemael, B. (2022). Satellite Imagery to Map Topsoil Organic Carbon Content over Cultivated Areas: An Overview. *Remote Sensing*, 14 (12), 2917. <https://doi.org/10.3390/rs14122917>
- WRI & WBCSD (2022). Greenhouse Gas Protocol Land Setor and Reomvals Guidance (Draft for pilot Testing and Review, September 2022)
- WRI & WBCSD (u.å.). Standards. Greenhouse gas protocol. <https://ghgprotocol.org/standards> [2023-03-06]