

# Odlingssystemets effekt på kolinlagring i mark

Greppa, klimatkurs 19 mars 2026

**Thomas Kätterer, SLU**

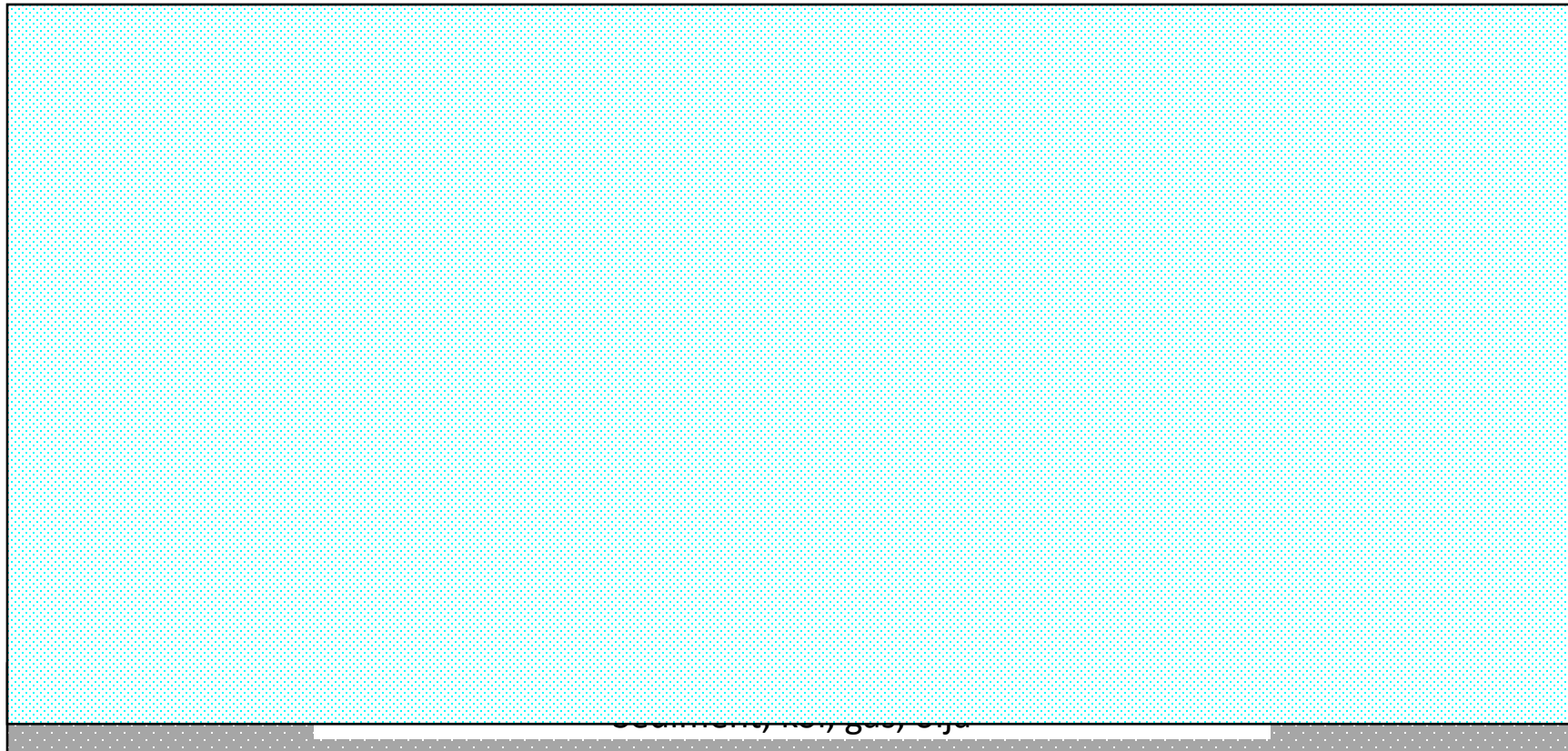
[thomas.katterer@slu.se](mailto:thomas.katterer@slu.se)



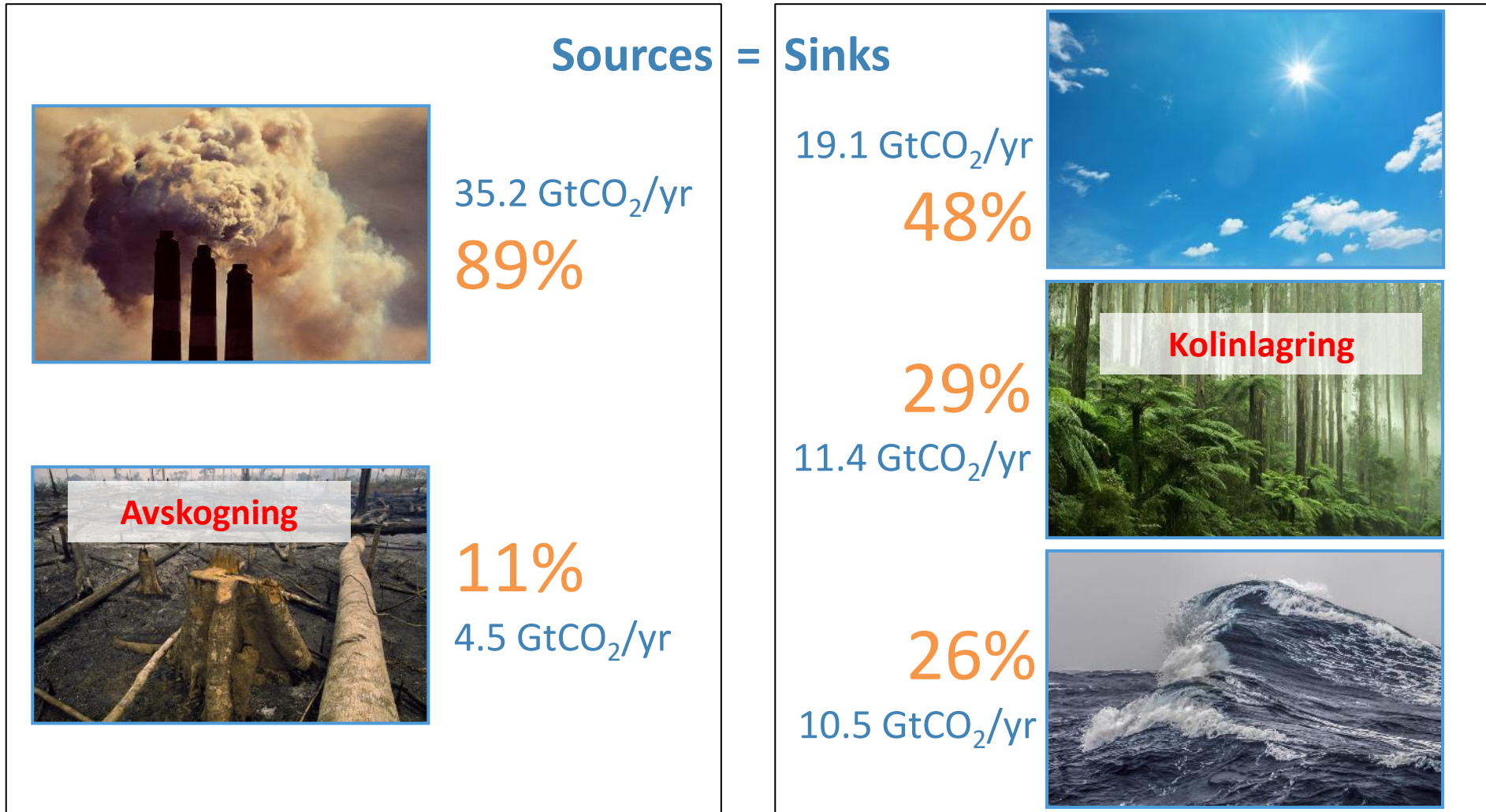
# Disposition

- Markens roll i den globala kolcykeln
- Kolbalanser i svensk jordbruksmark
- Kolbalanser i långliggande försök
- Hur påverkar landanvändning och odlingsmetoder
- Kolkrediter – carbon farming

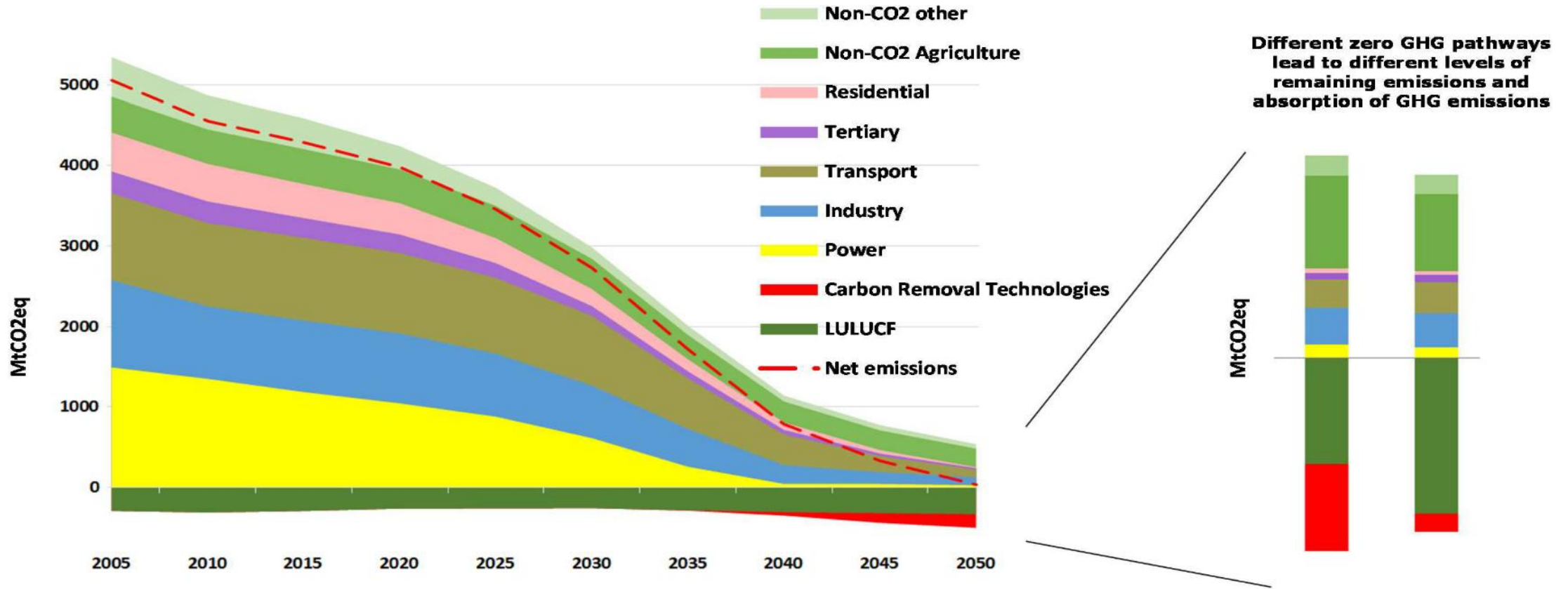
# Marken spelar en central roll i den globala kolcykeln (Pg C; miljarder ton)



# Fate of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions (2012–2021)

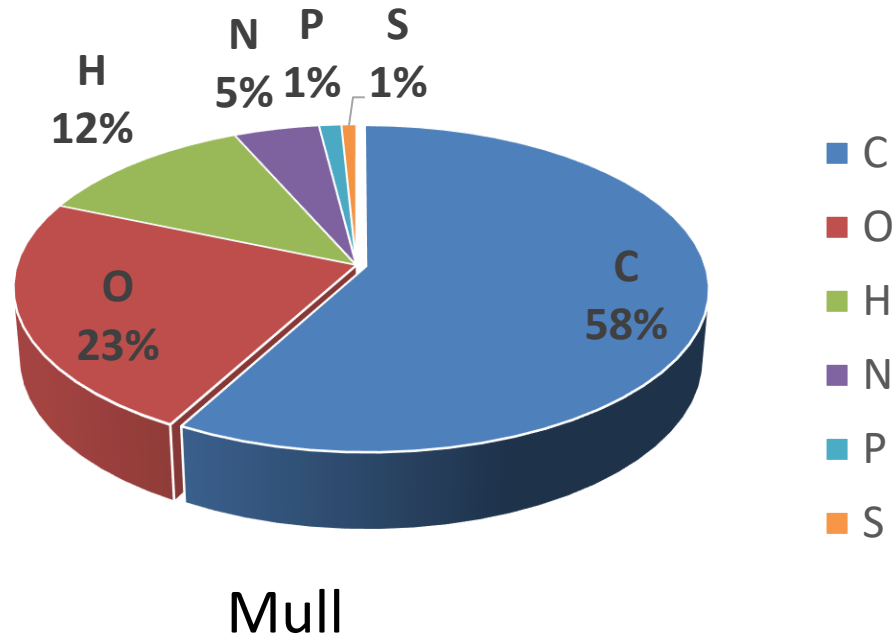


# Vision for a Clean Europe by 2050



Negativa emissioner skapas genom:  
**Kolinlagring i skog och mark**  
**Fånga in och pumpa ner CO<sub>2</sub> i berggrunden**

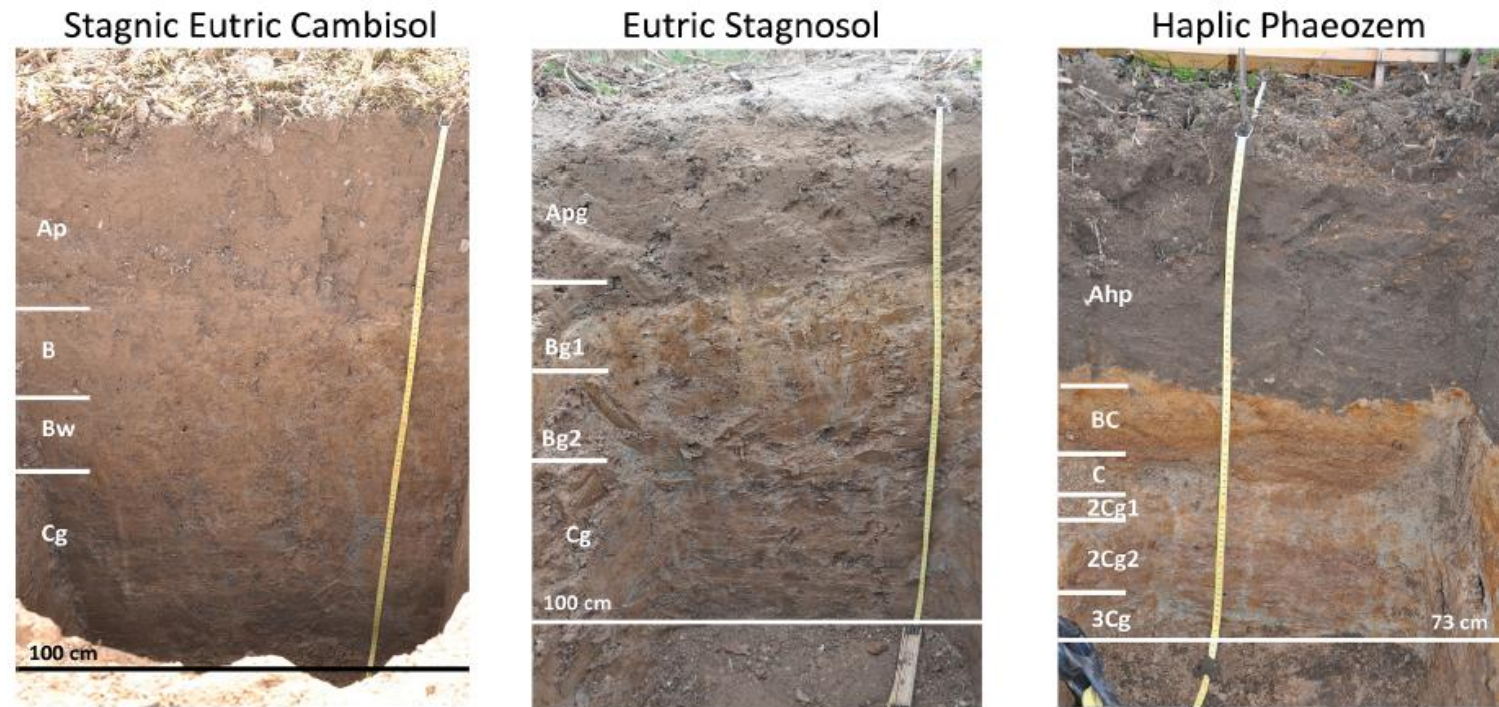
# Mull och kol



- **Mull bildas av växter, djur och mikroorganismer**
- **Kolhalten ökar under nedbrytningsprocessen, från ca 42% i växter till 58% i mull (i genomsnitt)**
- **Matjorden innehåller vanligtvis 5-10 kg C per m<sup>2</sup> (0-25 cm), som motsvara 50-100 ton/ha**
- **1 kg C motsvarar 3,67 kg CO<sub>2</sub> (molvikt av CO<sub>2</sub> dividerad med molvikten för C, dvs 44/12)**

# Markens kolhalt styrs av jordmånsbildande faktorer

- Modermaterial (mineralogi, textur)
- Klimat (vittring, tjäle, torka)
- Topografi/hydrologi/dränering
- Organismer (växter och markorganismer)
- Tiden

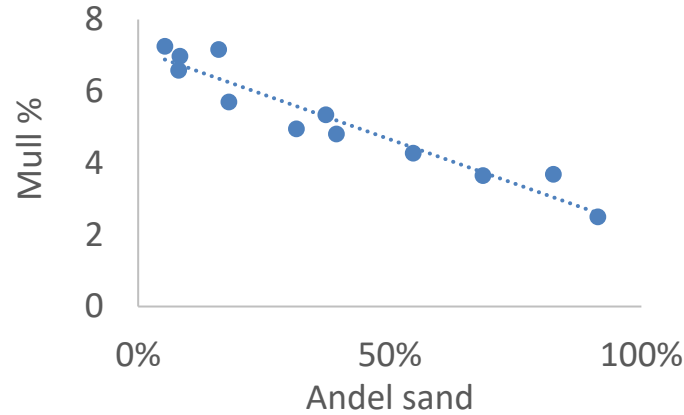
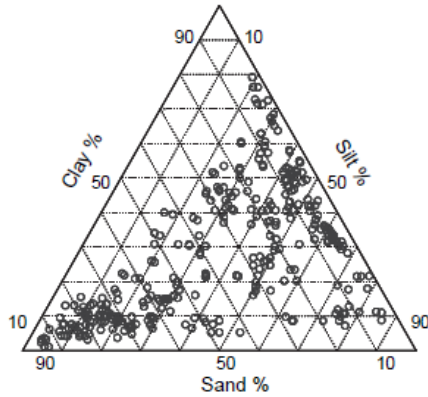


*3 olika jordmånder i samma fält på Bjertorp*

*Fukumasu et al 2021 Geoderma 402, 115345*

Fig. 1. Photos of soil profiles for three locations within the field. Elevation for Stagnic Eutric Cambisol, Eutric Stagnosol and Haplic Phaeozem are 90.6, 95.1 and 95.7 m respectively. These locations are shown in Fig. S1.

# Kol/mullhaltens beroende på textur

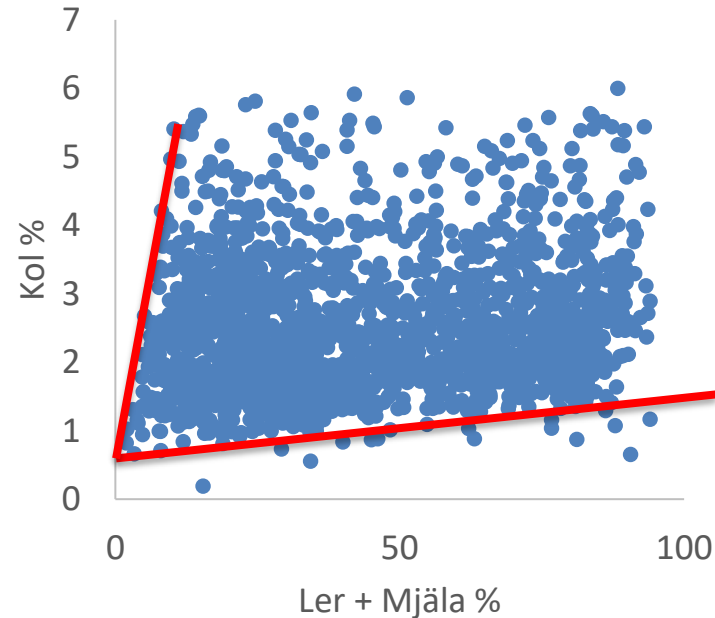
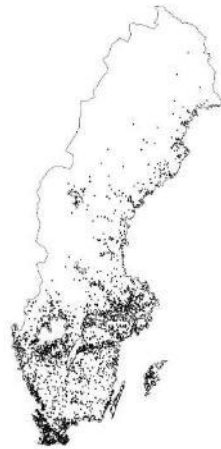


Databas – marfysikaliska egenskaper. Varje punkt representar en texturklass

*Kätterer et al. 2006 Acta Agr. Scan.*

## Mark- och grödoinventering

- I (1988-97),
- II (2001-07),
- III (2011-17)
- IV (2021-27) pågående



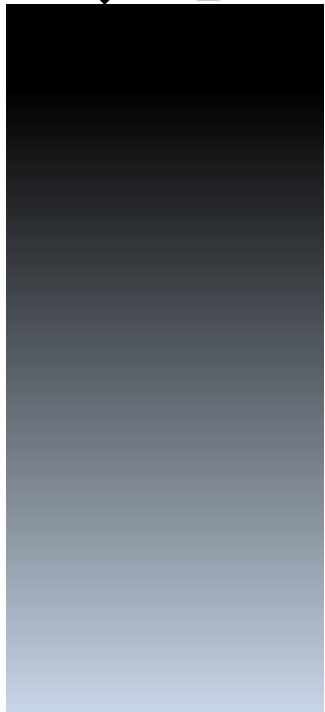
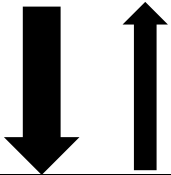
*Grova sandjordar med hög kolhalt är ovanliga*

*Lerjordar med en kolhalt <1% är ovanliga*

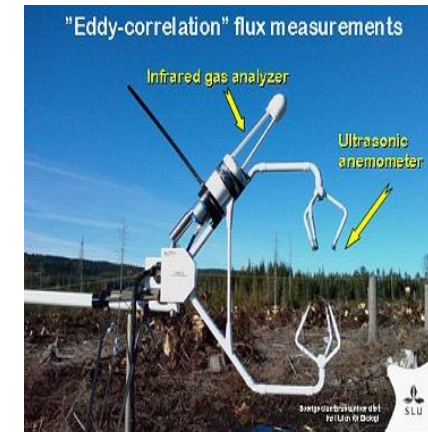
*Data från mark- och grödoinv.*

# Årliga förändringar i kolförrådet är små jämfört med det stora förrådet i marken. Hur kan vi mäta?

CO<sub>2</sub> (CH<sub>4</sub>)



1) CO<sub>2</sub>-flöden mäts med kammrar eller mikrometeorologiska metoder (eddy flux)



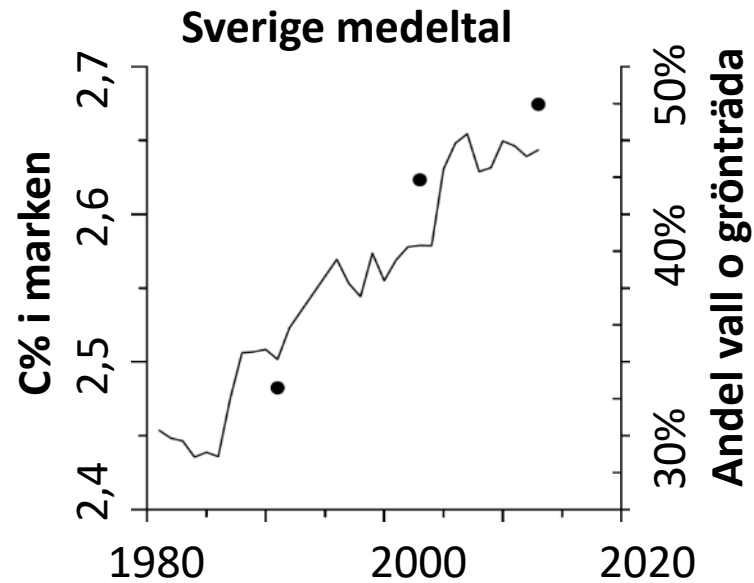
2) Förändringar i kolförrådet analyseras i långliggande försök eller återkommande markinventeringar

# Ökande kolhalter i åkermark på mineraljord



## Mark- och grödoinventering:

- I (1988-97),
- II (2001-07),
- III (2010-17),
- IV (2021-27) pågående



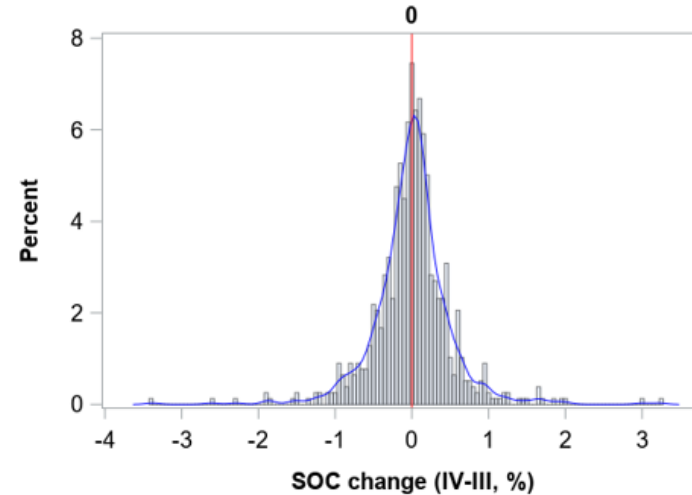
## Förklaringar till uppgången

- Mera vall
- Mera höstsäd, mindre vårsäd

Poepflau et al. 2015 Biogeosciences 12: 3241–3251

## Preliminär analys av omdrev IV:

50% av proverna är analyserade



Uppgången verkar hålla i sig, men är avtagande. Ökningen jämfört med omdrev III är inte signifikant. Median: 0,01 C% Motsvarar ca 30 kg C/ha och år.

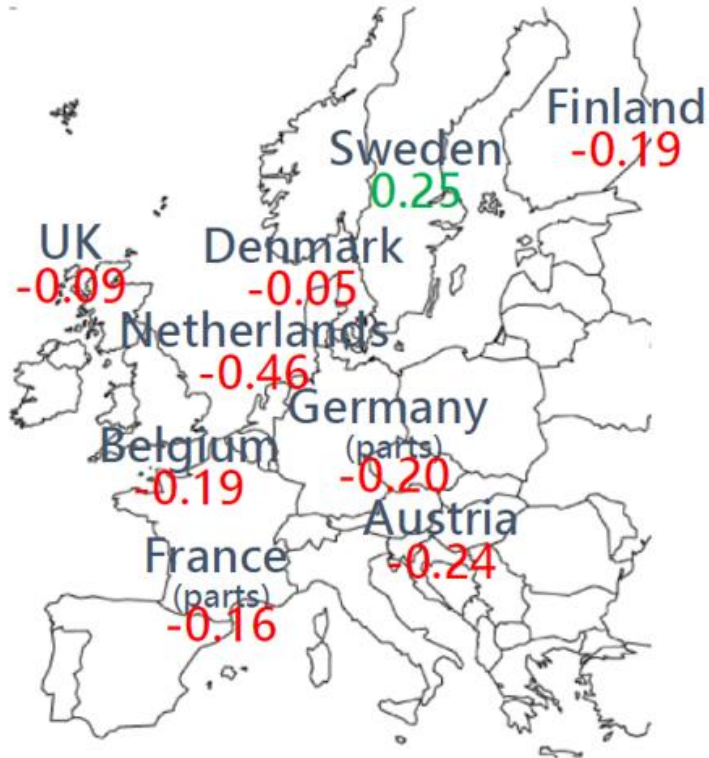
## Men:

**kolutsläppen från organogena jordar (mulljordar) är större än inlagringen i mineraljordar**

Lang et al. opublicerat

# Europa: Minskade kolförluster snarare än kolinlagring

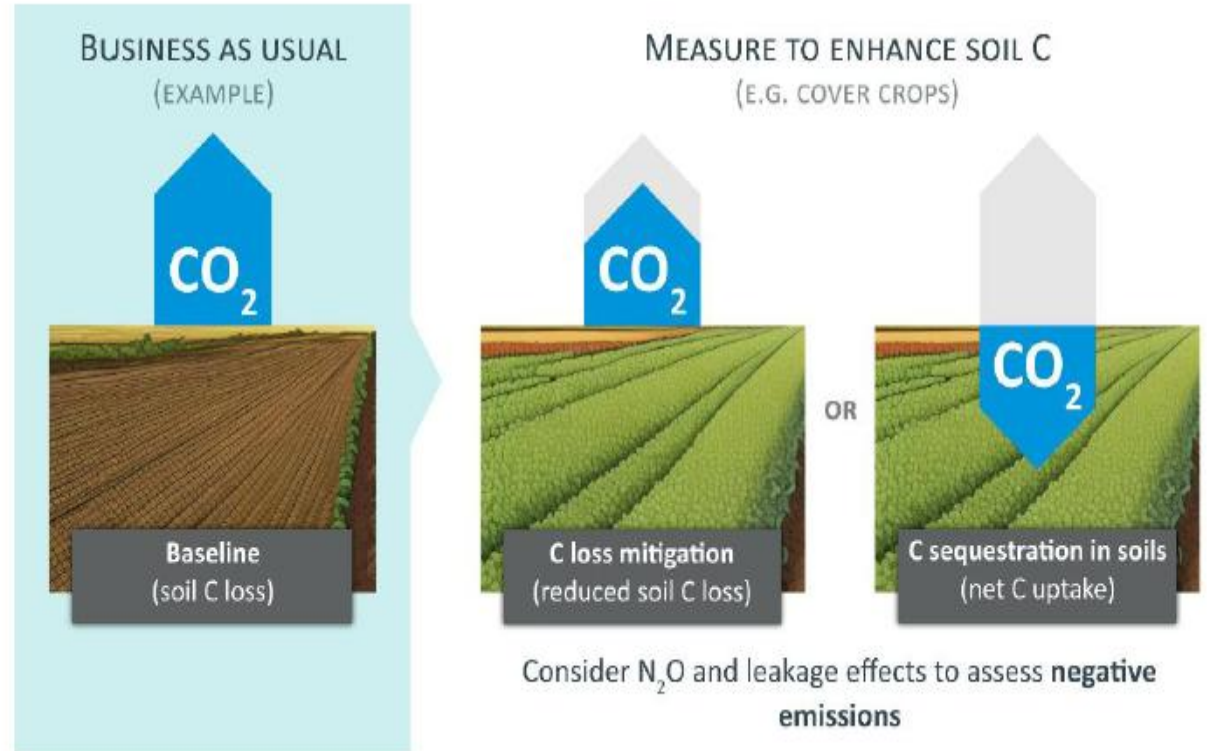
Förändring av kolförråden i åkermark (mineraljord)



In t C/ha/yr and based on repeated soil inventories

Sources: Heikkinen et al. 2013, Poeplau et al. 2015, Taghizadeh-Toosi et al. 2014, Lettens et al. 2005, Knotters et al. 2022, Dersch and Böhm 1997, Höper 2021, Antoni et al., 2008

Slide from Axel Don




Don et al., 2024 Global Change Biology

# Återkommande markinventeringar

3 fält på Kungsängens gård, Uppsala

Ökning = ej sign.



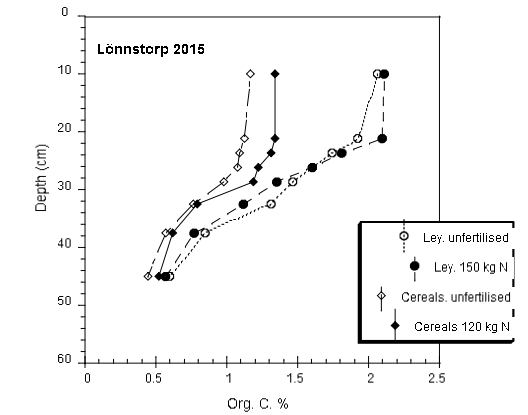
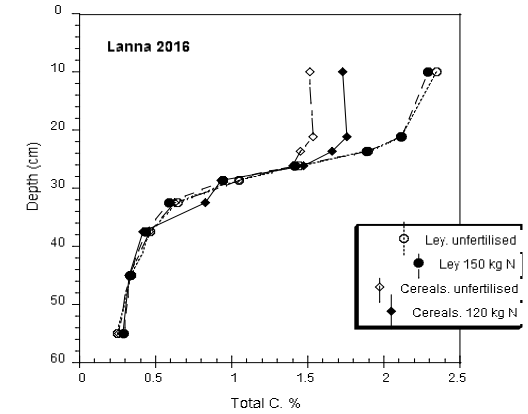
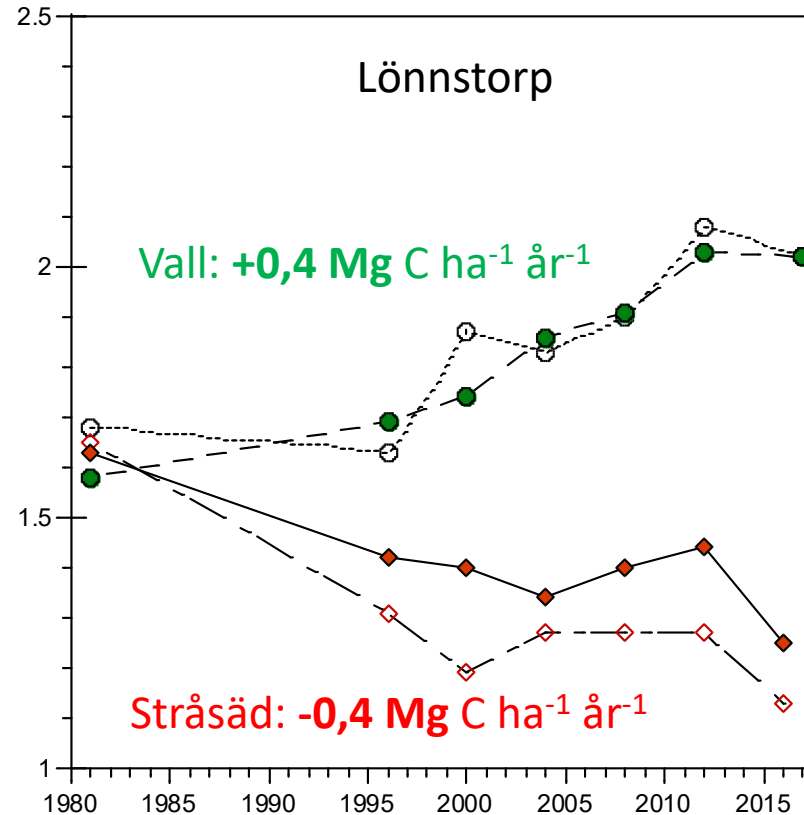
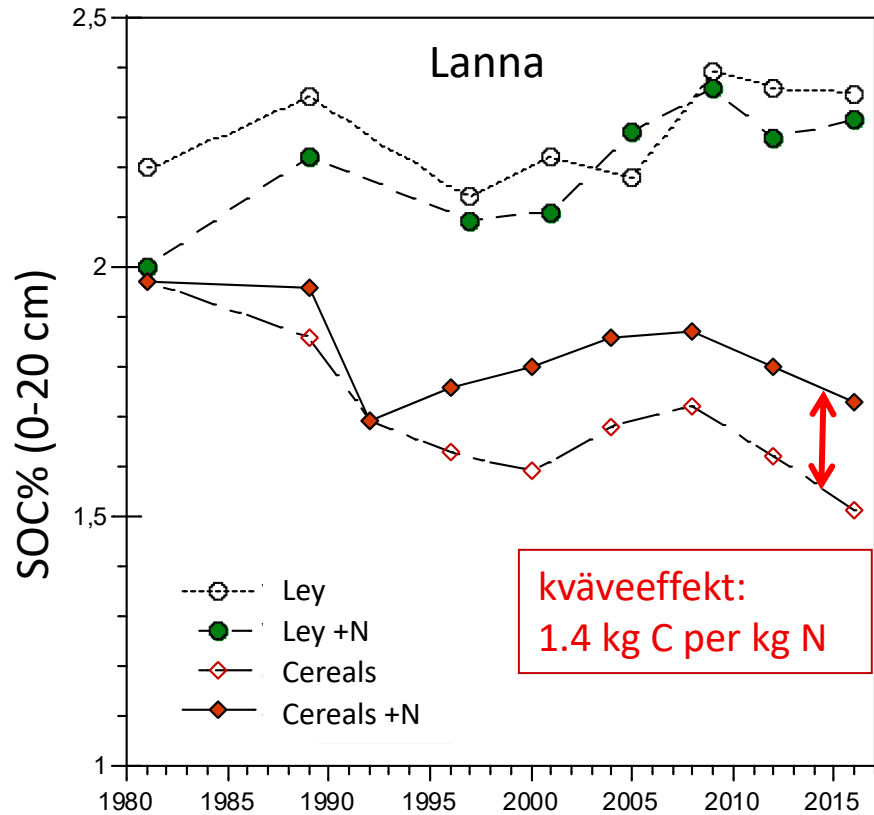
$\Delta C=30\%$

Ökning = 0.4 ton C /ha och år

Ökning = ej sign.

# Långliggande försök:

## Vall-dominerad växtföljd jämfört med kontinuerlig stråsäd med och utan mineralkväve



Effekten i alven skiljer sig mellan försöksplatserna

*Kolinlagringen (särskilt i alven) skiljer sig mellan platserna (Börjesson et al. 2018 Biol Fert Soils)*

# Varför ökar kolinlagringen i vallar?

Kernza (vetegräs)

vete



*Photo by Jim Richardson, Land Institute, Salina, Kansas; Glover et al., 2010 AGEE*

# Majs

Väl-dränerad Majs

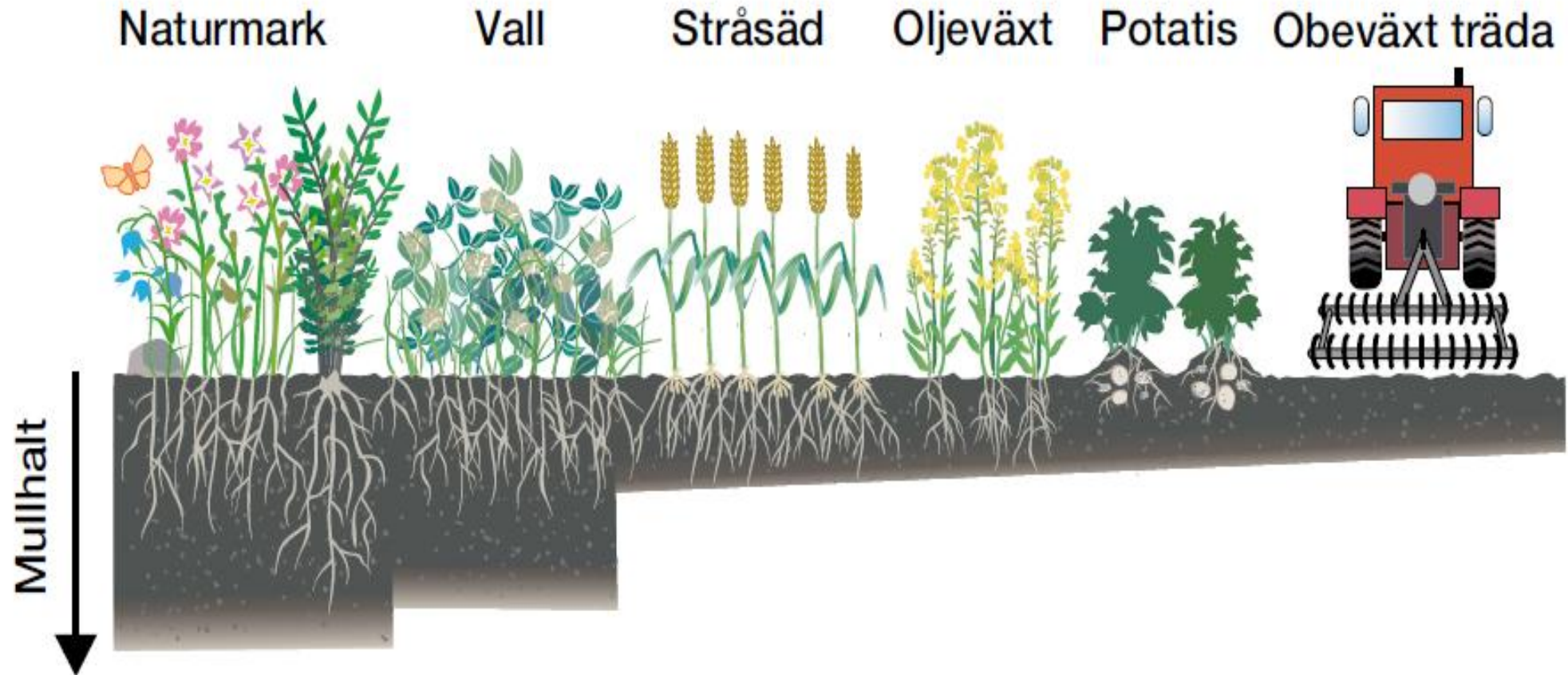
Vattensjuk



Rotsystemets arkitektur styrs av genetiken och miljön (vatten, näring, temperatur, markpackning m.m.)

*Rich & Watt 2013 J Exp Bot 64*

# Växtrötter är viktiga för markens kolbalans



*Permanent bevuxen mark (naturmark) innehåller mer mull än odlad mark. Mark som hålls obeväxt och som dessutom kanske ogräsharvas (trädas) tär på mullhalten.*

# Undvik bar mark



# Mellangrödor påverkar markhälsan och produktiviteten

Meta-analys av 281 studier (främst från Nordamerika)



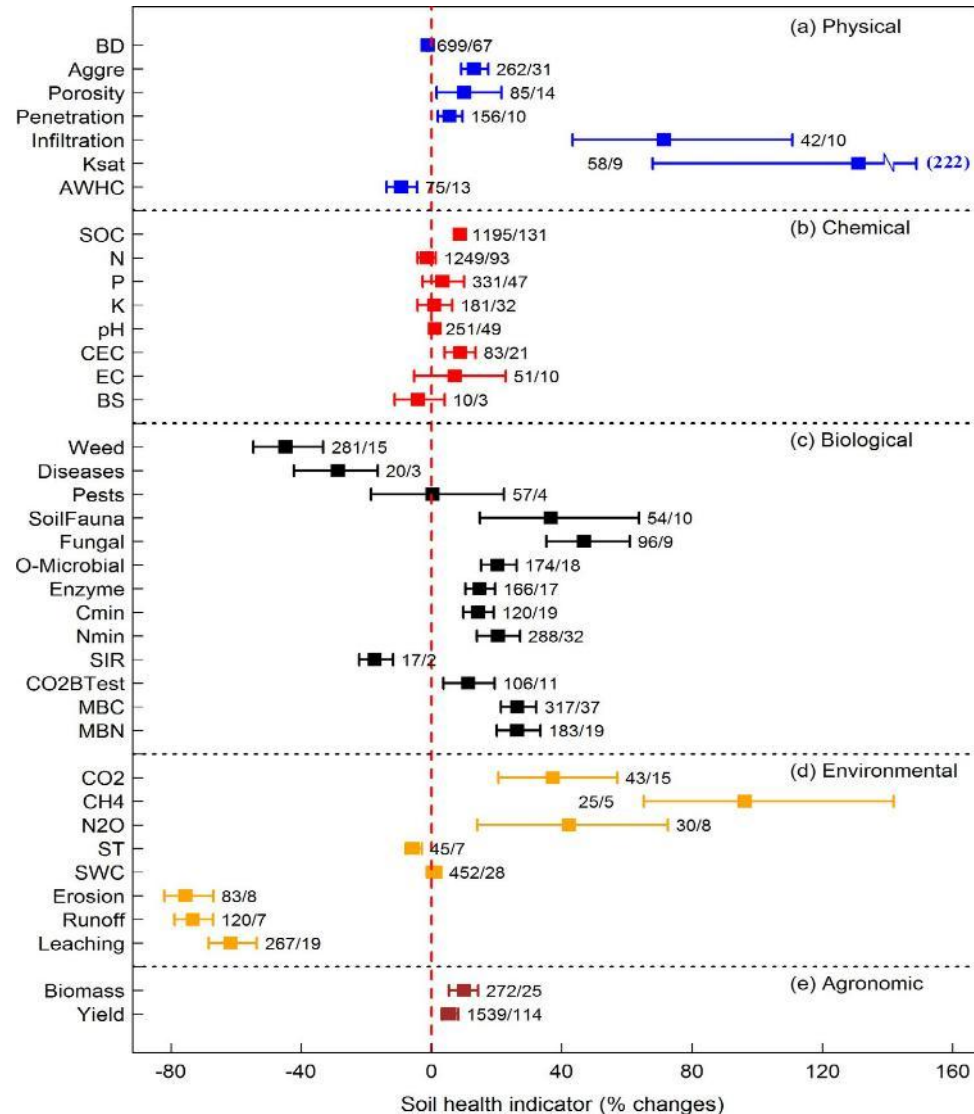
G. Klarin



M. Krokstorp



M. Krokstorp



- Bättre markstruktur och infiltration

- Kolinlagring (0.56 Mg C/ha/år; 543 studier, Jian et al. 2020 SBB 143,107735)

- Färre ogräs och sjukdomar

- Fler markdjur och biologisk aktivitet

- Mer lustgas o metan**

- Mindre erosion

- Mindre ytavrinning

- Mindre läckage

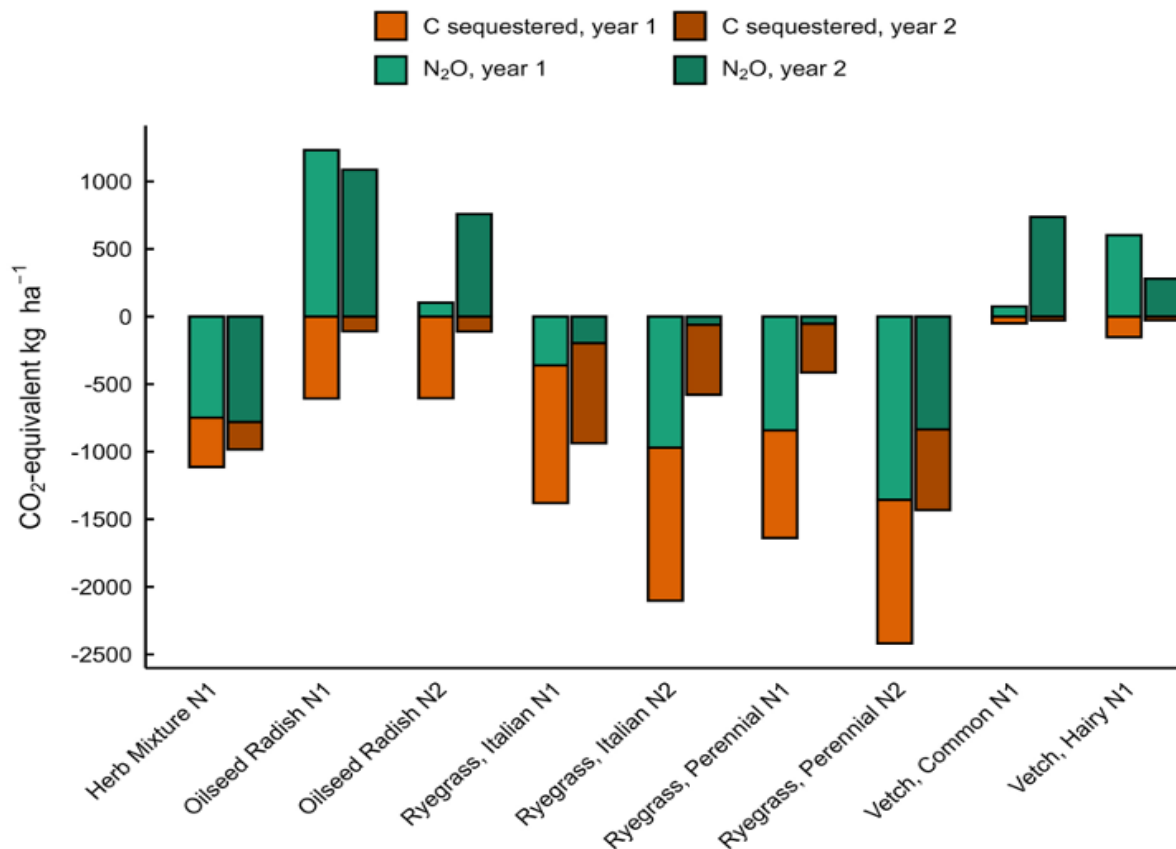
- Högre skörd i huvudgrödan

- Dessutom: Ökad albedo motsvarande 0,1 ton CO2/ha/år, Desmet et al. 2025

# Mellangrödor kan öka lustgasavgången

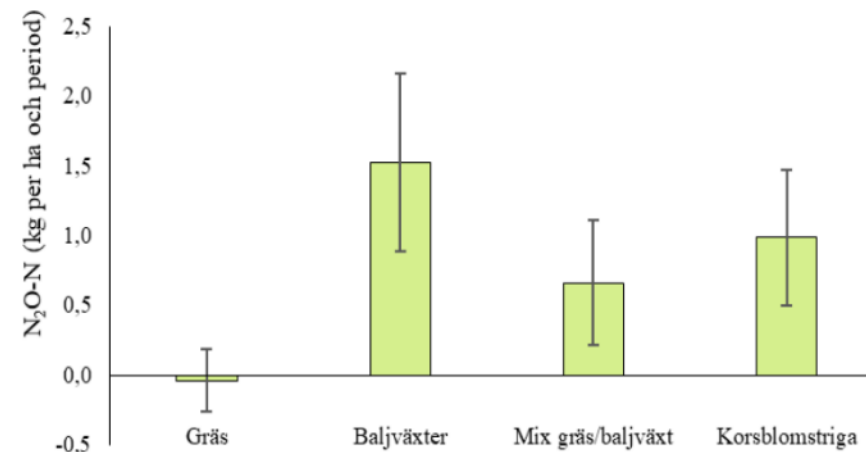
Klimatpåverkan av lustgas och beräknad kolinlagring i ett tvåårigt fältförsök i Norge (Kjær et al., 2026 AGEE 397)

*Agriculture, Ecosystems and Environment 397 (2026) 110061*



**För oljerättiga och vicker kunde den negativa klimatpåverkan av lustgas inte kompenseras av kolinlagring**

Global studie baserad på 374 fältförsök  
*Abdalla et al. GCB 2019*



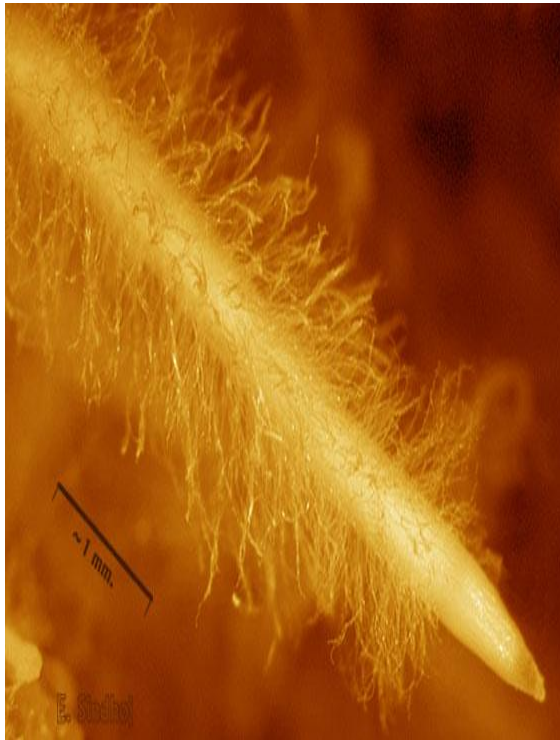
Liknande resultat från svenska försök  
*Olofsson & Ernfors 2022 STOTEN*

Höga lustgasemissioner även från klöverrika vallar under vintern  
*Sturite et al. 2021 SBB 163*

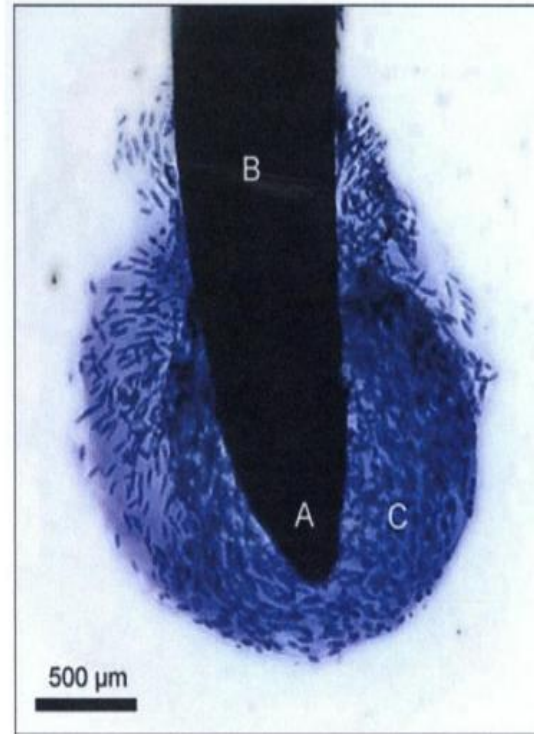
**Korsblommiga arter och baljväxter kan vara problematiska**

# Rötter och rhizodeposition är viktiga för mullbildning

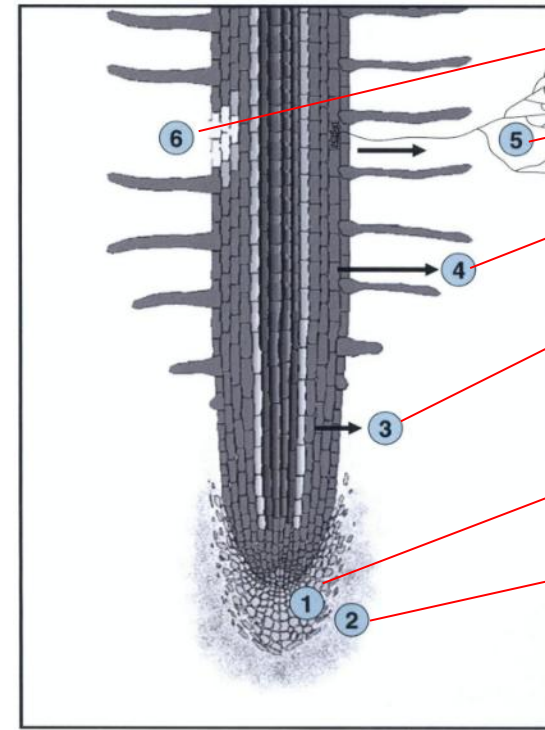
Rhizodeposition: organiska substanser som tillförs marken via rötter under växtperioden



Vårkorn rotspets, Erik Sindhøj



Jones et al. 2009, Plant Soil 321



- Döda rotceller
- Mycorrhiza
- Gaser
- Vattenlösliga föreningar
- Avslitna celler
- Olösliga utsädringar

# Växtförädling kan bidra till ökad produktivitet och kolinlagring

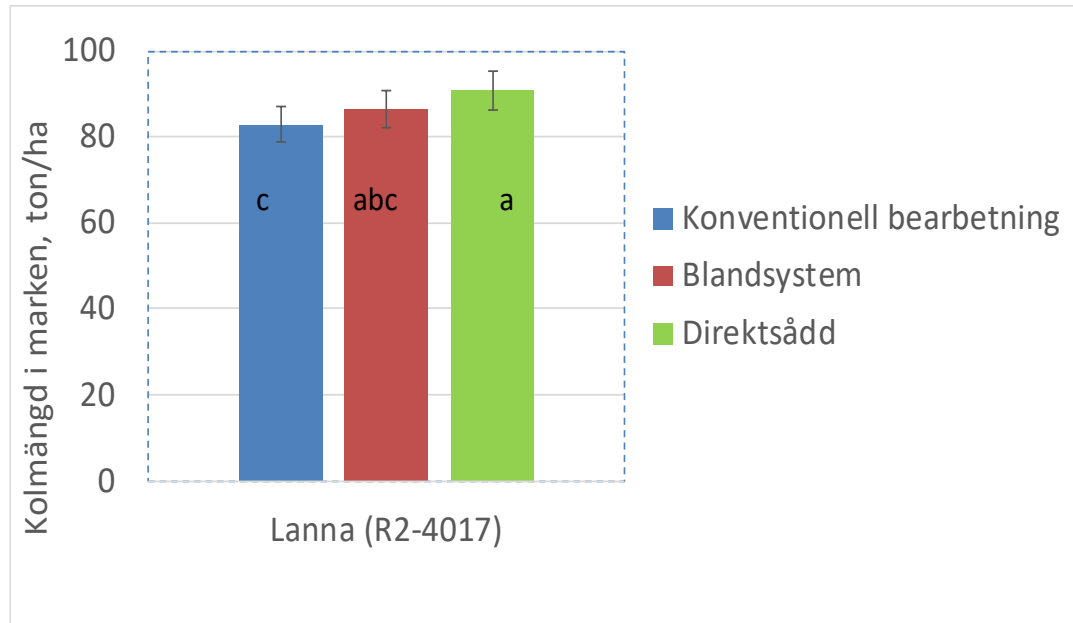


- Effektivare och tåligare grödor
- Fleråriga grödor och bottengrödor
- Platsanpassade mellangrödor
- Djupa, effektiva rotsystem
- Modifierad rhizodeposition som gynnar t.ex. rekryteringen av mycorrhiza och andra gynnsamma mikroorganismer, minskar lustgas och metanutsläp
- Etc.

# Hur påverkas markkolet av jordbearbetning?

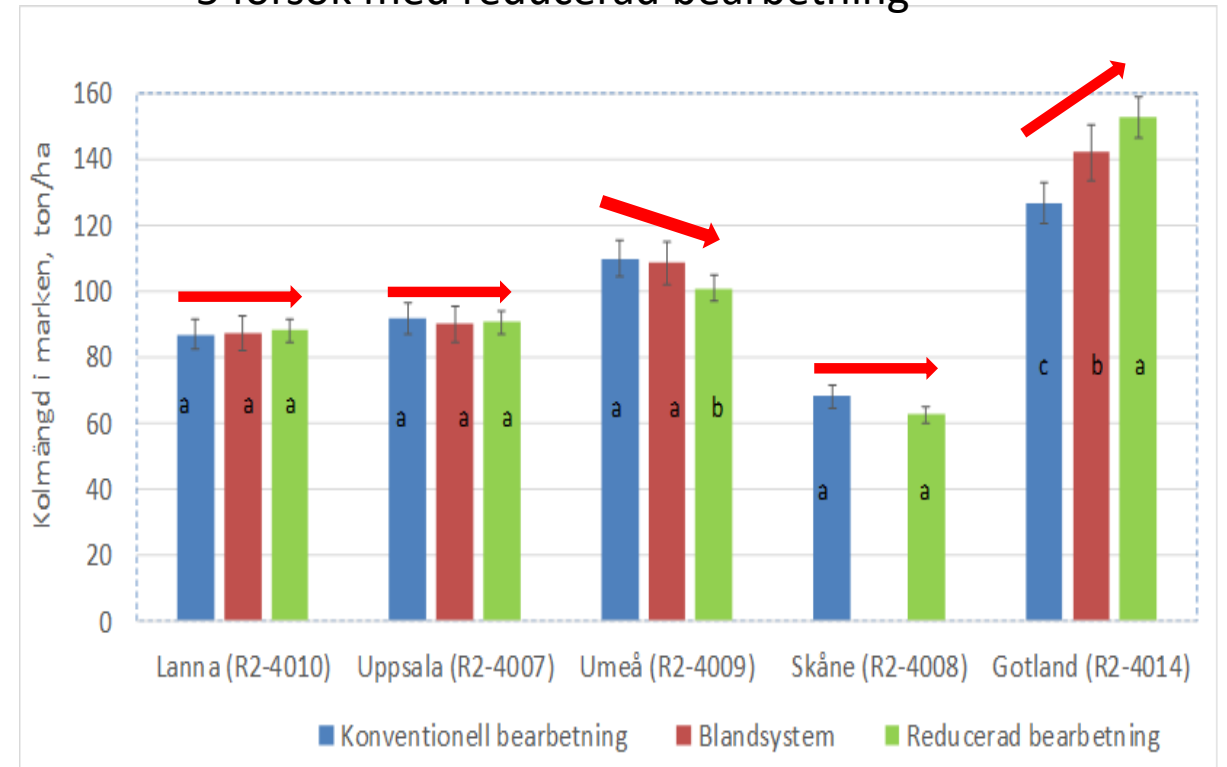
## Kolförrådet (0-50 cm) i sex långliggande jordbearbetningsförsök i Sverige

Direktsådd, Lanna, Västergötland



Positiv effekt av direktsådd, motsvarande 0,2 ton kol per hektar och år

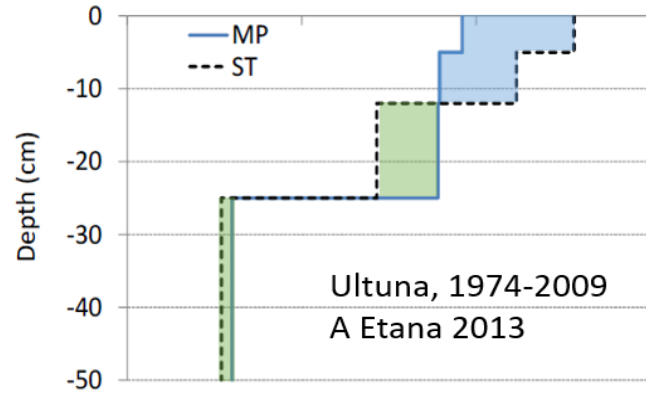
5 försök med reducerad bearbetning



Plats-specifika effekter av reducerad bearbetning

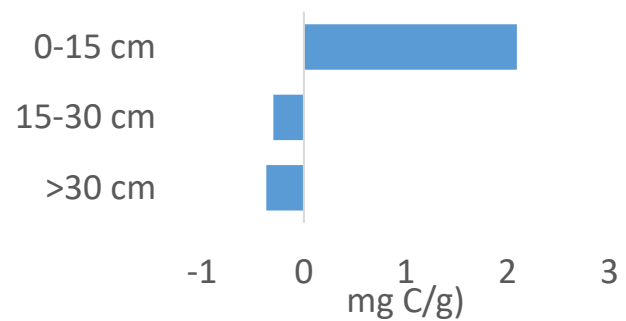
# Reducerad jordbearbetning leder till omfördelning av kol i marken

Typiskt mönster vid reducerad bearbetning – anrikning 0-12 cm, utarmning längre ner



Meta-analys, 351 försök, plöjningsfritt jämfört med plöjning

*Haddaway et al. 2017 Environ. Evid. 30*



Reducerad bearbetning har andra fördelar:

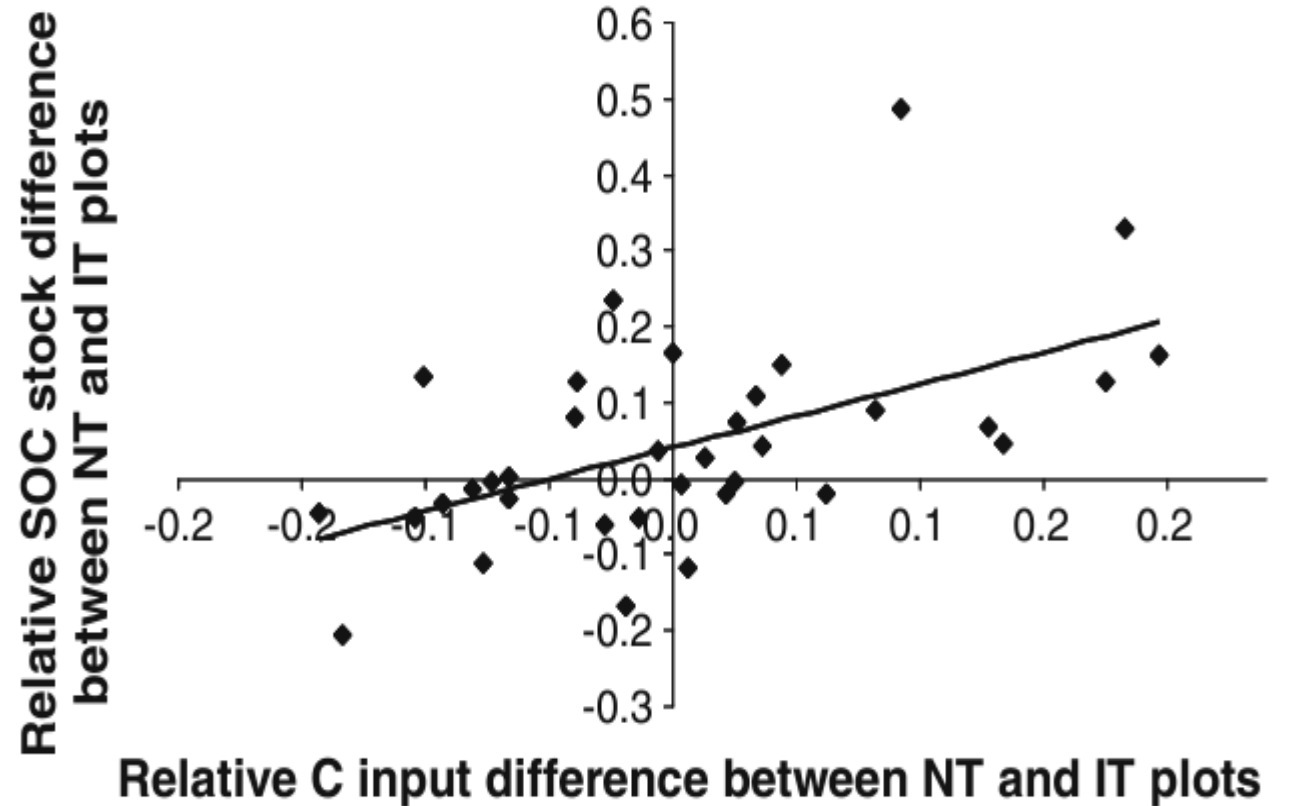
- Högre albedo (0.1 Mg CO<sub>2</sub>/ha/år; Desmet et al. 2025)
- Mindre erosion
- Lägre dieselbehov
- Färre arbetstimmar
- Fler dagmaskar, svampar etc.

Nettoeffekten är mindre när man beaktar förändringar i volymvikt, 101 försök

*Meurer et al 2018. Earth Sci Rev 177*

# Hur påverkas skörden och kolförrådet av plöjningsfritt?

- Om skörden ökar med plöjningsfritt, så ökar också kolförret och tvärtom (*Virto et al. 2012 Biogeochem 108*)
- Den positive effekten är större i torra jämfört med fuktiga regioner (*Anger 2025 Soil Sci Plant Nutr*)
- Betydelsen av jordbrukarens skicklighet – timing – saknas i traditionella försök

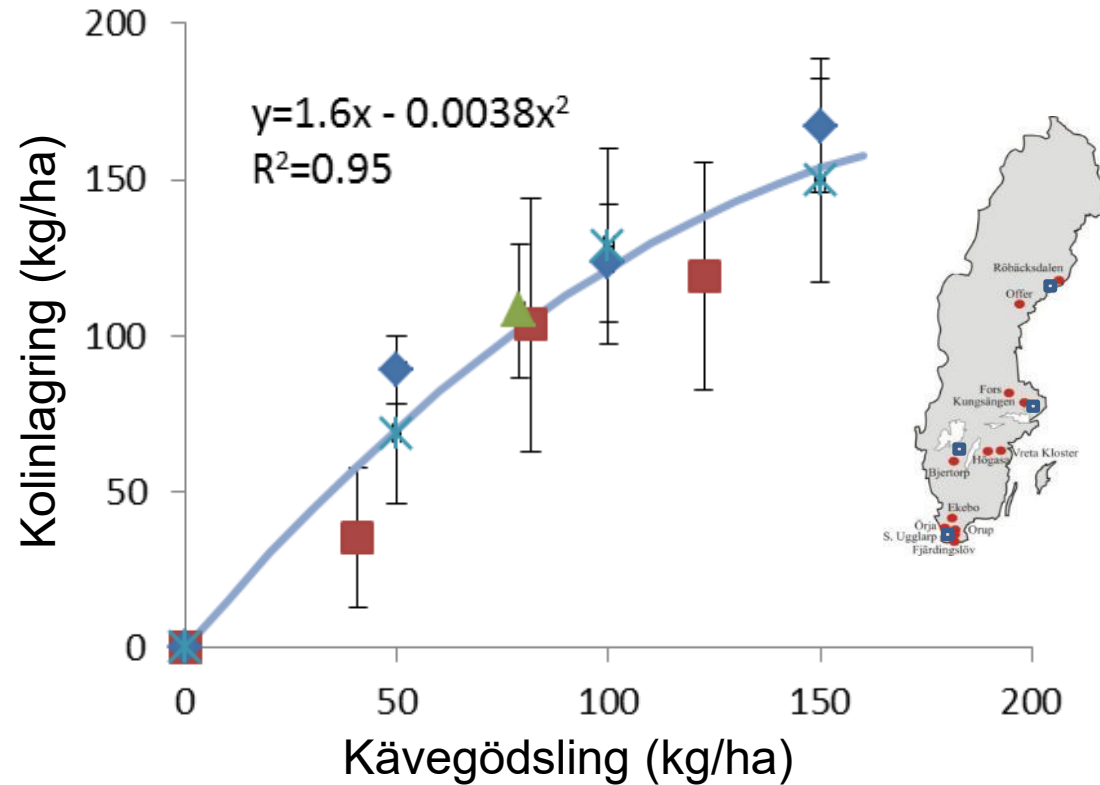


IT=inversion tillage (plöjning)

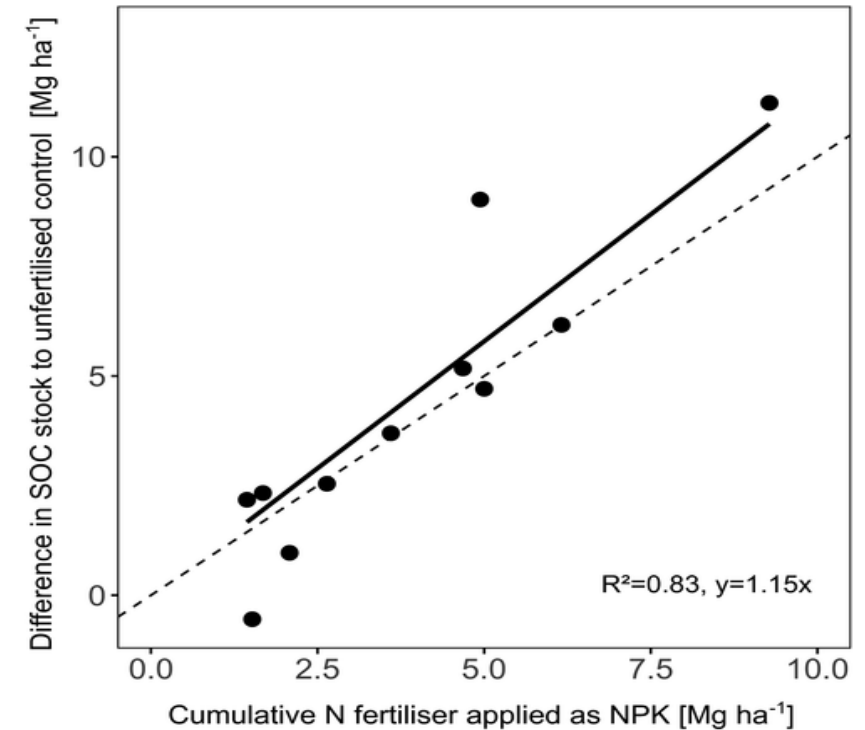
NT=no till (plöjningsfri)

# Kolinlagring gynnas av hög produktion

Resultat från 16 långliggande försök med ettåriga växter  
*Kätterer et al., 2012 Acta Agric. Scand.*

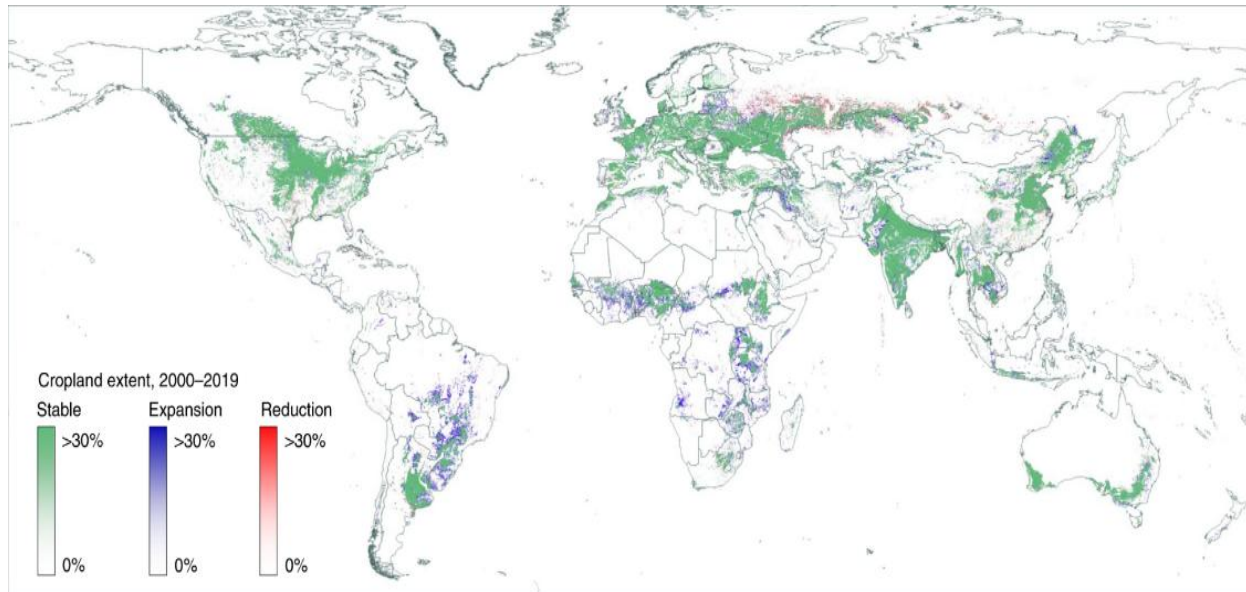


Europeiska gäsmarker  
*Poeplau 2021 Grass and Forage Science 76, 186-195*



**Tumregel: Varje kilo N höjer kolförrådet i marken med ca 1 kg C i matjorden (0-20 cm) i både ettåriga och fleråriga grödor**

# Extensiv produktion leder till låga kolförråd lokalt och ökat arealbehov vilket driver på avskogningen – dvs ”läckage”

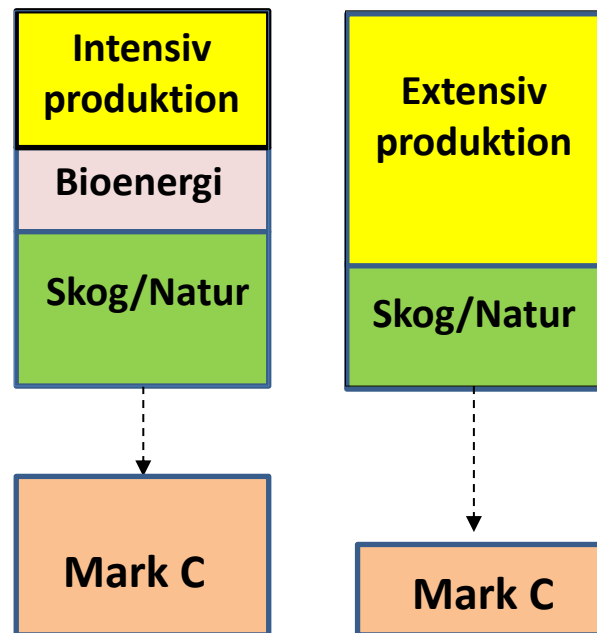


7 Mha/år nettoökning över åkerarealen globalt 2003-19

*Potapov et al 2022 Nature Food 3, 19–28*

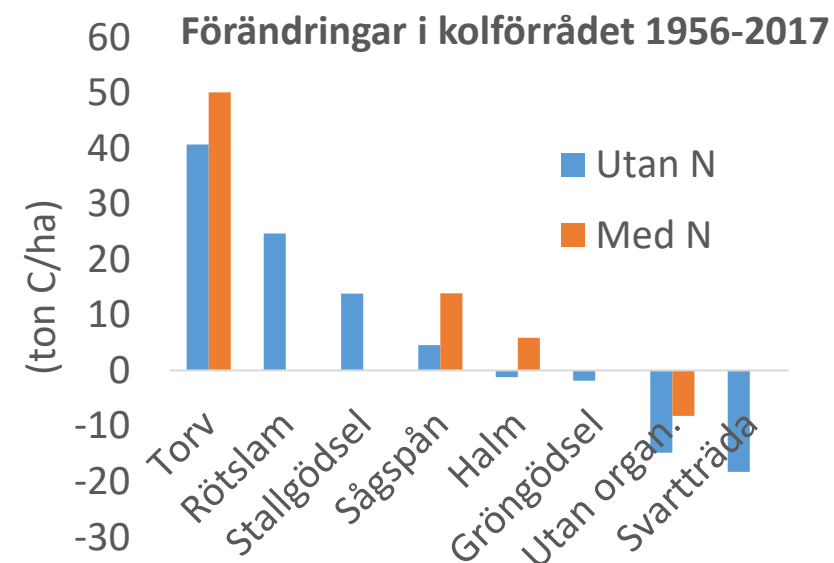
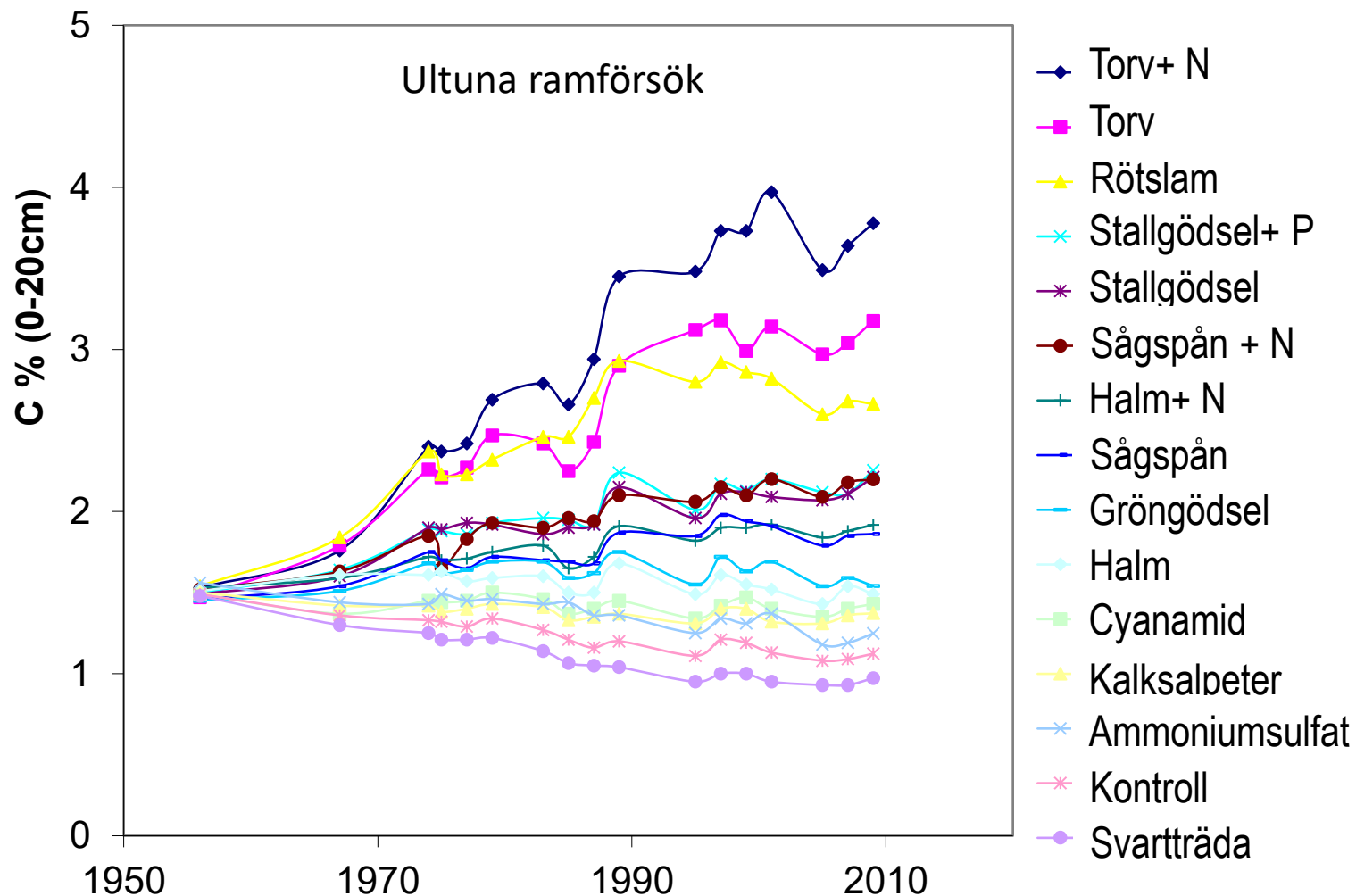
OBS betesarealen har också ökat kraftigt!

## Arealbehov för att producera en viss mängd



# Långliggande försök är viktiga för att kvantifiera effekten av olika skötselåtgärder

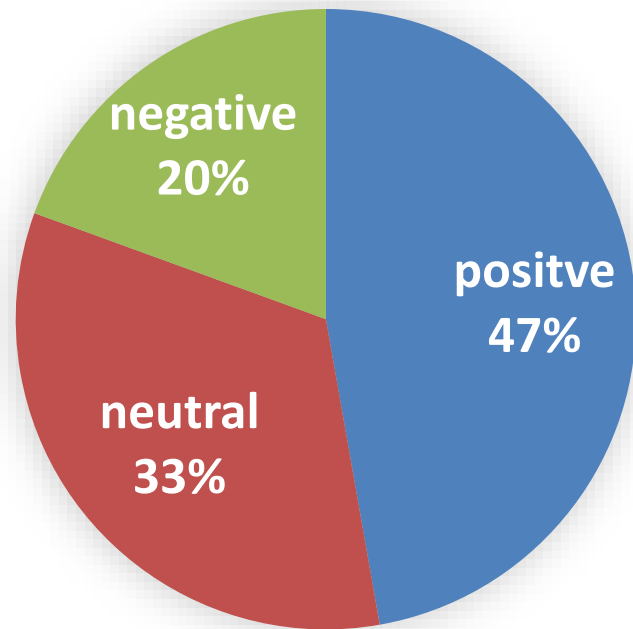
Samma mängd kol (4 ton C/ha vartannat år) tillförs i Ramförsöket i olika former



# Ökar bördigheten med kolhalten?

Moinet et al. 2023 GCB

36 meta-analyser från 4 kontinenter



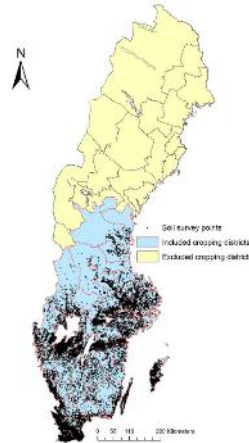
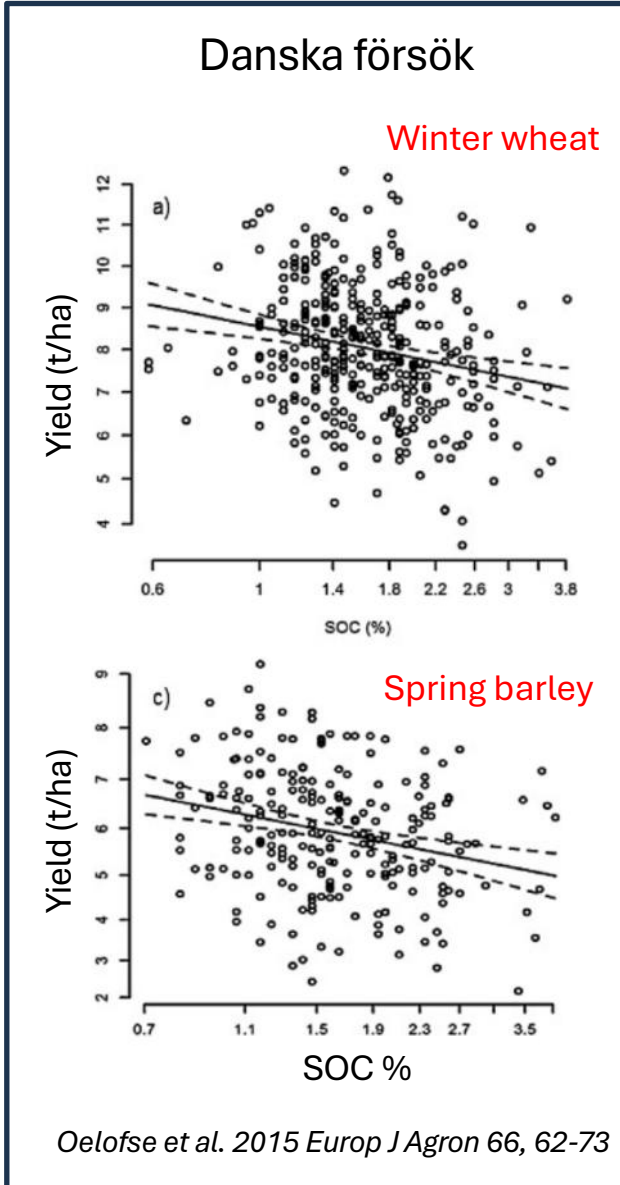
■ positve ■ neutral ■ negative

Resultaten från vetenskapliga studier är inte entydiga

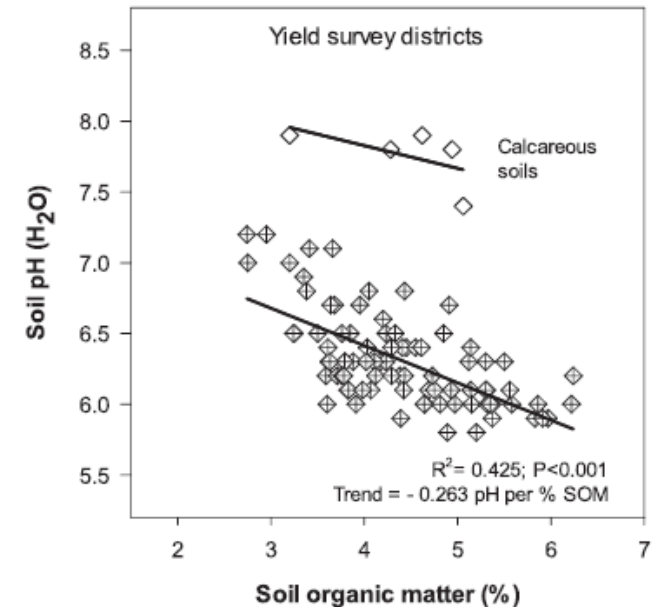
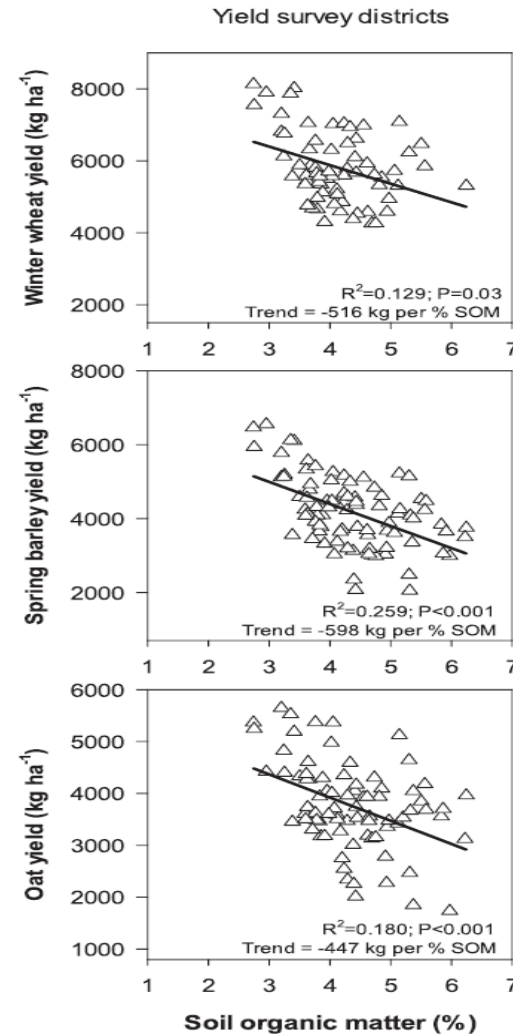
- Mekanismerna är komplexa
- Resultaten är platsspecifika
- Störfaktorer i analysen

# Negativa korrelationer mellan kolhalt och skörd på nationell nivå

Sverige: Genomsnittlig skörd i 90 skördeområden (2000-2015)

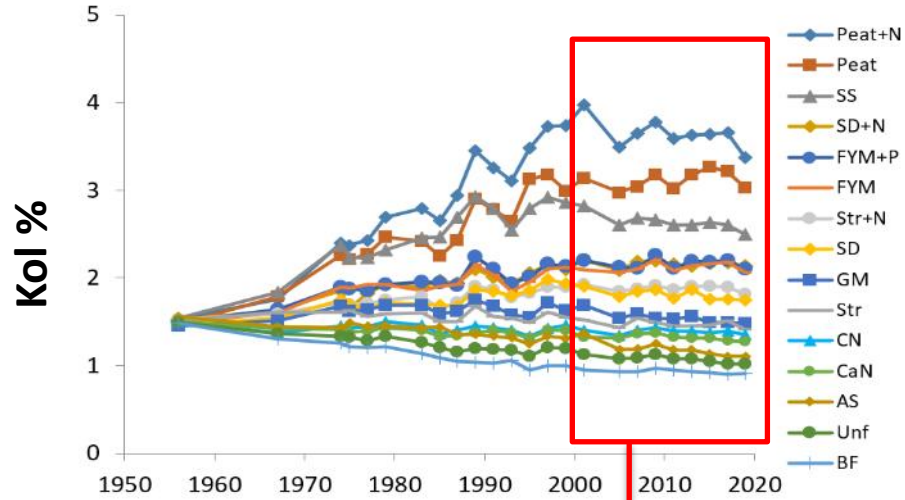


Markinventering  
11,419 prover

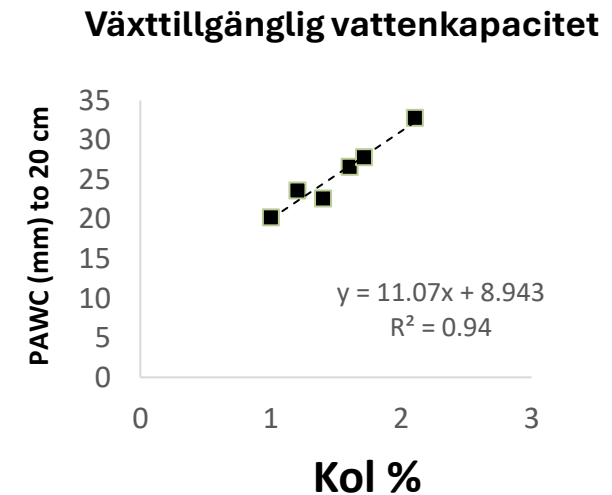
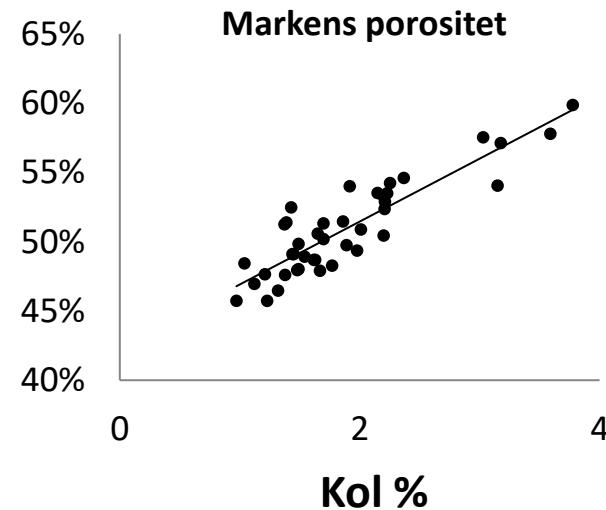
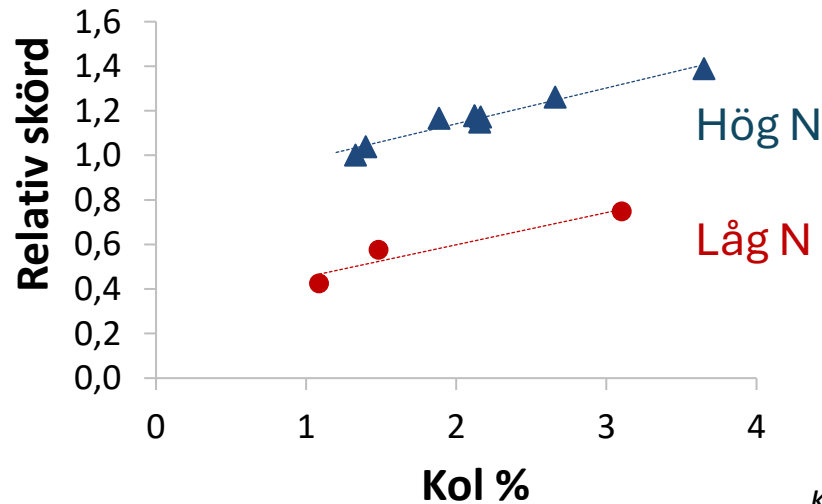


Korrelationer behöver inte vara kausala. Det finns underliggande faktorer som styr (pH, driftinriktning, dränering, fältet historic etc.).

# Bördigheten ökar med kolhalten i ramförsöket på Ultuna



- Skörden av majs (2000-2019) ökade med kolhalten
- Skördestabiliteten ökade också med kolhalten
- 95% av variationen förklarades av N-tillgång, pH och markstruktur
- 2/3 av effekten förklarades av markfysikaliska egenskaper som påverkar grödan vattentillgång



# Kolkrediter/Carbon Farming



Carbon Farming: Multiple Approaches for Carbon Offsets \*...



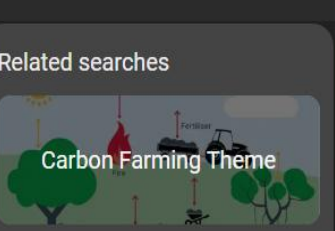
Carbon Farming: Benefits, Technologies And Smart Solutions



Agricultural Carbon Credits and Carbon Farming Guide



Carbon Farming: Harnessing Agricultural Practices for Carbon...



Farming Practices



Carbon Farming in India, Challenges, Global Initiatives



New series of webinars coming: Farming in a low carbon econom...



Carbon Credits and Audits



The Benefits of Lower Carbon Intensity (CI) Corn Farming |...



Farming and the carbon economy - Irrigation Today



Carbon Farming - Vajirao IAS



Low Carbon Agriculture



Carbon Farming - UPSCprep.com



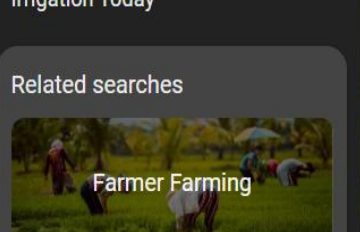
Reports - Carbon Market Institute



Carbon Farming: Agriculture's Role in Carbon Credits



Carbon Farming Permaculture for Farmers 201



Carbon Farm



New series of webinars coming: Farming in a low carbon econom...



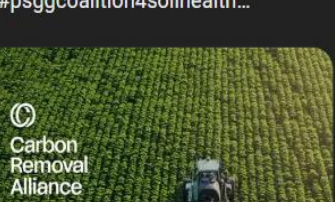
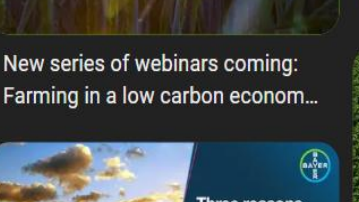
Flonja Drenofci on LinkedIn: #psggcoalition4soilhealth...



Understanding Carbon Farming - YouTube

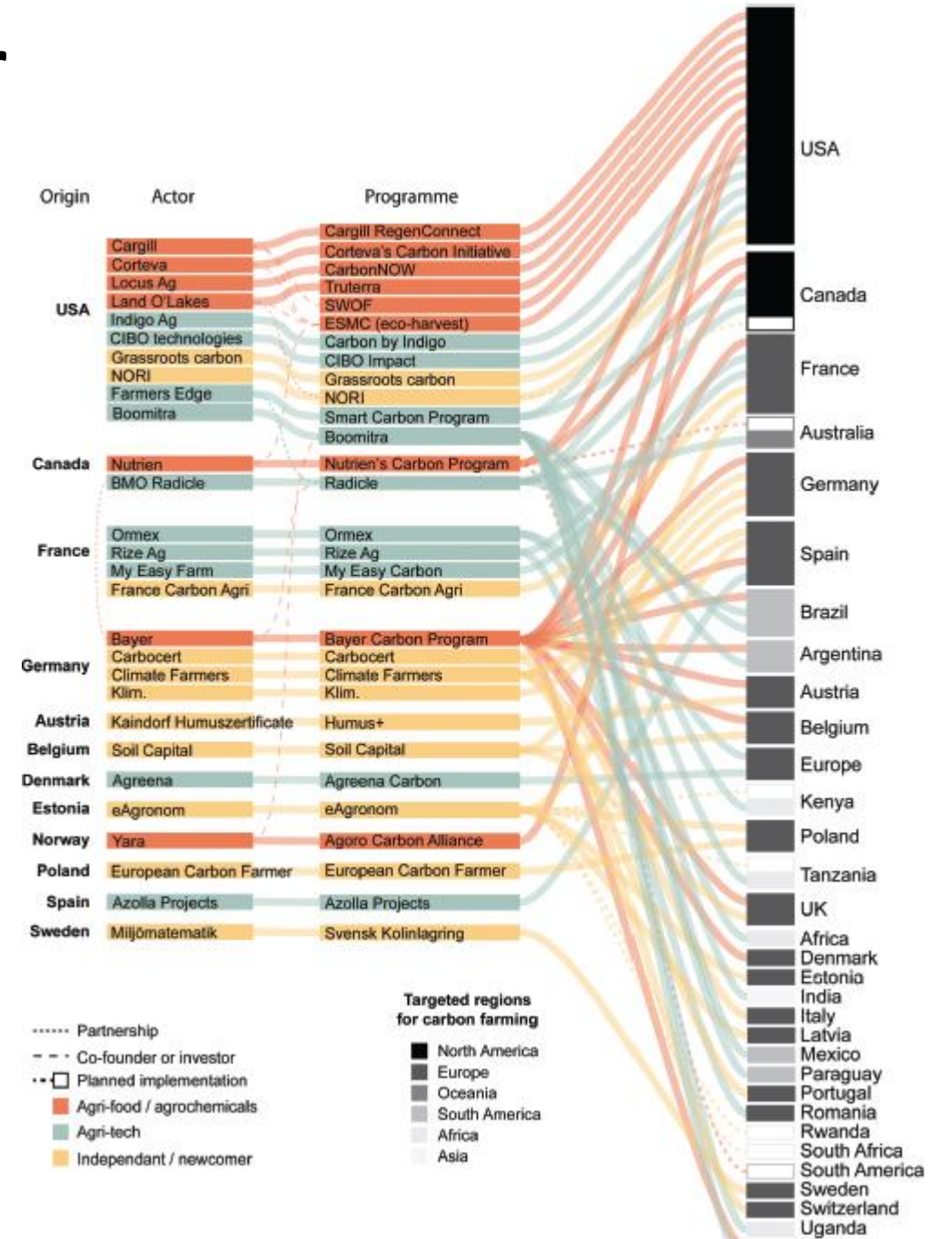


Reports - Carbon Market Institute



# Carbon farming – många aktörer

Carbon farming programme	Reduced till	Cover crops	Nutrient management	Crop rotation	Grazing management	Agroforestry and hedges	Incorporation of compost and plant residues	Reduced fuel use
Bayer Carbon Program								
Agoro carbon alliance								
RegenConnect (Cargill)								
Corteva's Carbon Initiative								
Nutrien's Carbon Program								
CarbonNOW (LocusAg)								
Truterra								
SWOF								
ESMC								
Carbon by Indigo								
AgreenaCarbon								
Farmers edge								
CIBO								
ORMEX								
Rize ag								
My Easy Carbon								
Azolla								
Radicle								
Boomitra								
Nori								
Svensk Kolinlagring								
Soil Capital								
Carbocert								
Humus+								



Johansson et al., 2025

<https://doi.org/10.1080/13504509.2025.2561262>

## Många utmaningar

- **Verifiering** – dyrt och problematiskt på fält/gårdsnivå
- **Permanens** – vem garanterar att kolet stannar i marken efter åttagendeperioden?
- **Negativa bieffekter** - lustgasutsläpp, produktivitet, biologisk mångfald etc.)
- **Additionalitet** – återgärder skulle ha utförts ändå
- **Läckage** - åtgärden kan leda till ökade utsläpp någon annanstans.
- **Definition av baslinjen**

Många aktörer på marknaden



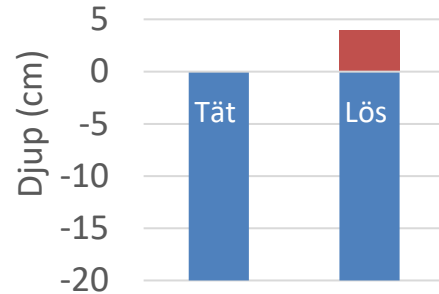
Join companies & farmers leading the way



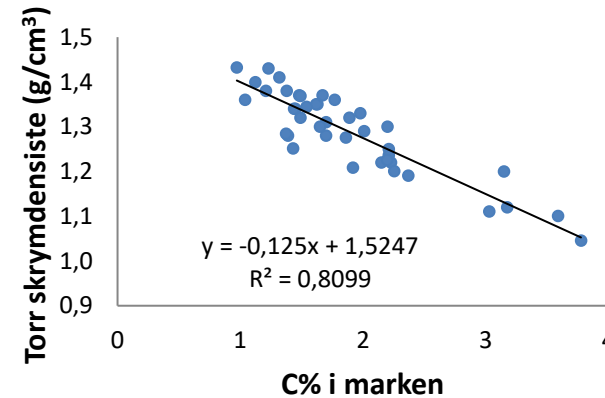
# Markens kolförråd bestäms av 3 osäkra variabler:

$$\text{Kolförrådet} = C\% \times \text{volymvikt} \times \text{djup}$$

Fördelning av samma massa jord beroende på volymvikt



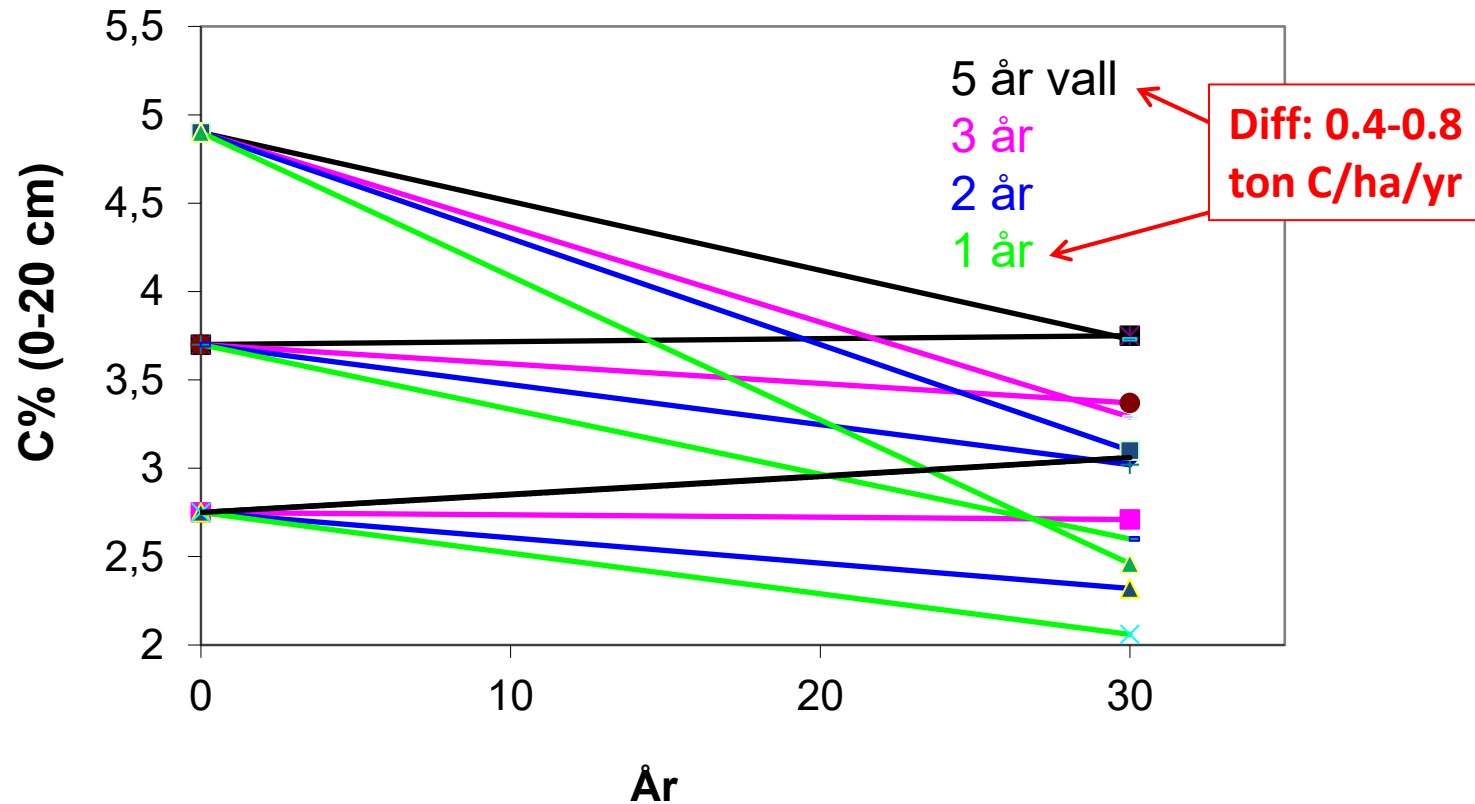
Volymvikter, Ramförsök



- Att bara analysera förändringar i kolhalt är inte tillräckligt för att beräkna kolförråden.
- Man måste beakta volymvikterna som ändras med kolhalten, jordbearbetning och markpackning.
- Om markens volymvikt sjunker med 20% så höjs matjorden med 4 cm.
- Kolförrådet till 20 cm djup i den täta jorden måste då jämföras med den till 24 cm i den lösa jorden.
- Årsdynamiken av volymvikter måste beaktas
- Vid markkarteringar i praktiken mäts oftast mullhalt (glödförlust) – inte kolhalt. Man antar att mull innehåller 58% kol. Kolhalten i mull varierar dock runt medelvärdet (58%).

# Fältets historik är avgörande

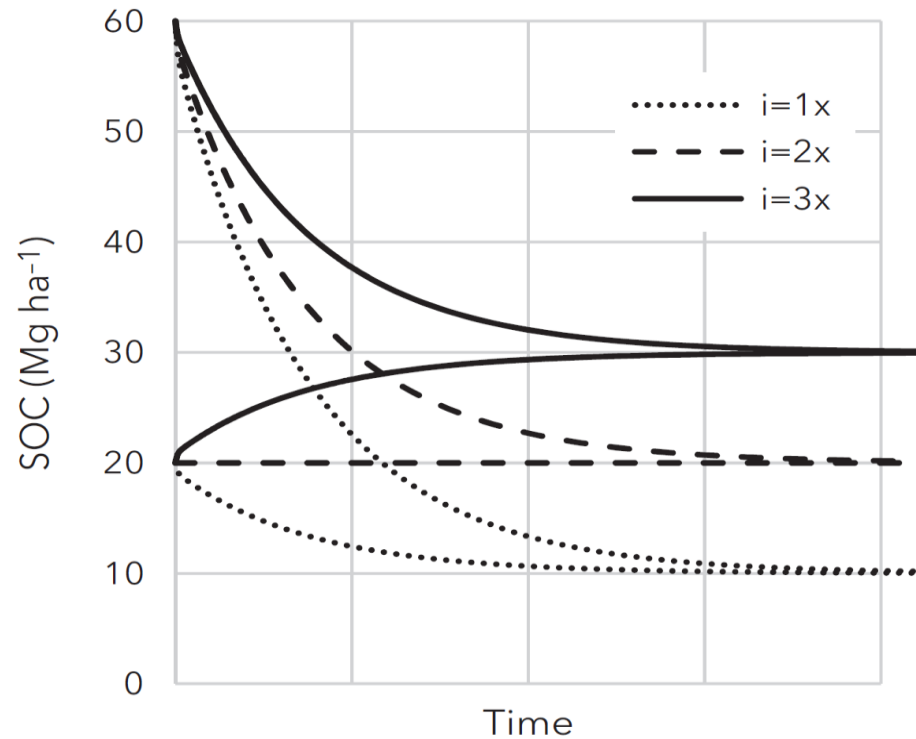
6-åriga växtföljder med olika andelar vall på 3 platser i Norrland



# Permanens

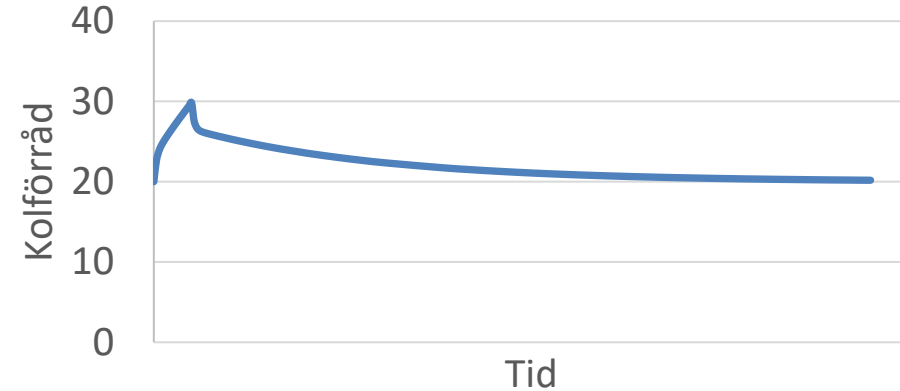
Fältets historik är avgörande.  
Inlagringseffekten avtar med tiden

$i = \text{årlig kolinput till marken}$

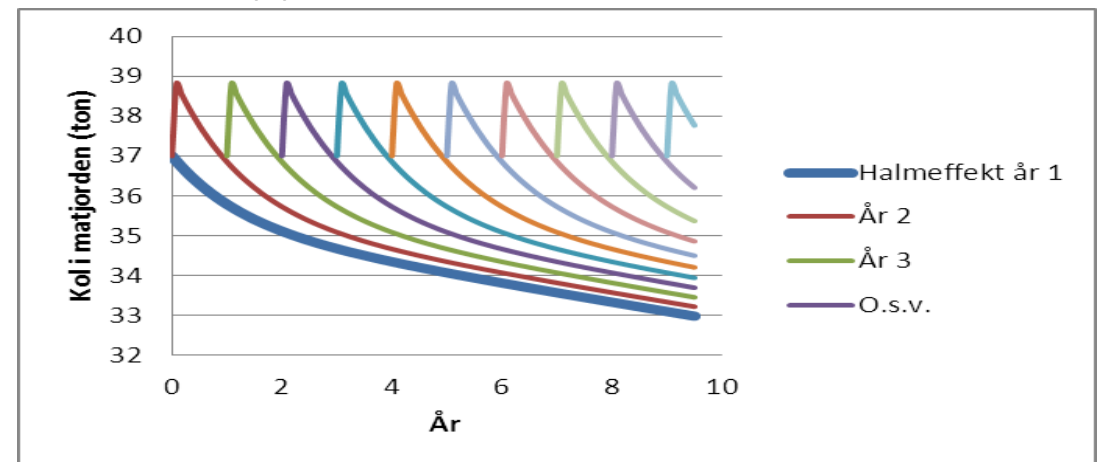


Kätterer and Bolinder, 2022, Burleigh Dodds Science Publishing

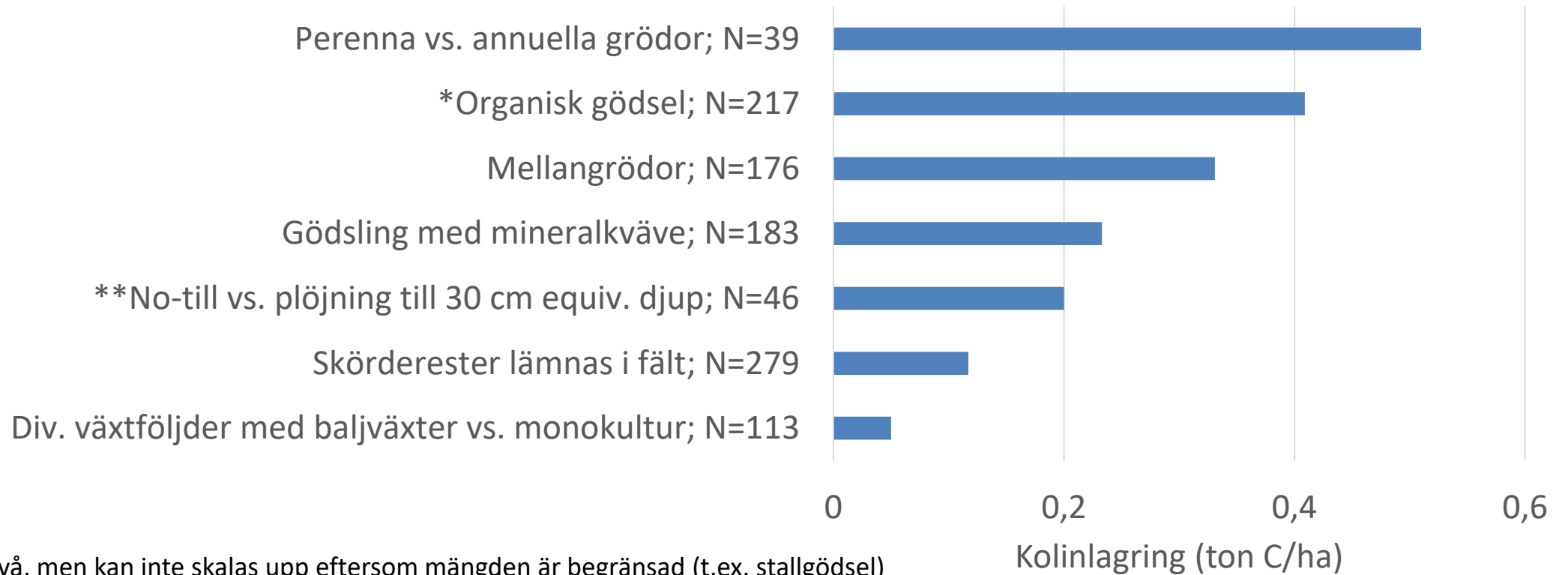
När man slutar med en viss åtgärd, så minskar kolförrådet till utgångsläget.



Kolförrådet måste fyllas på varje år för att upprätthålla en viss kolhalt i marken



## Kolinlagring – medeltal – global litteraturgenomgång



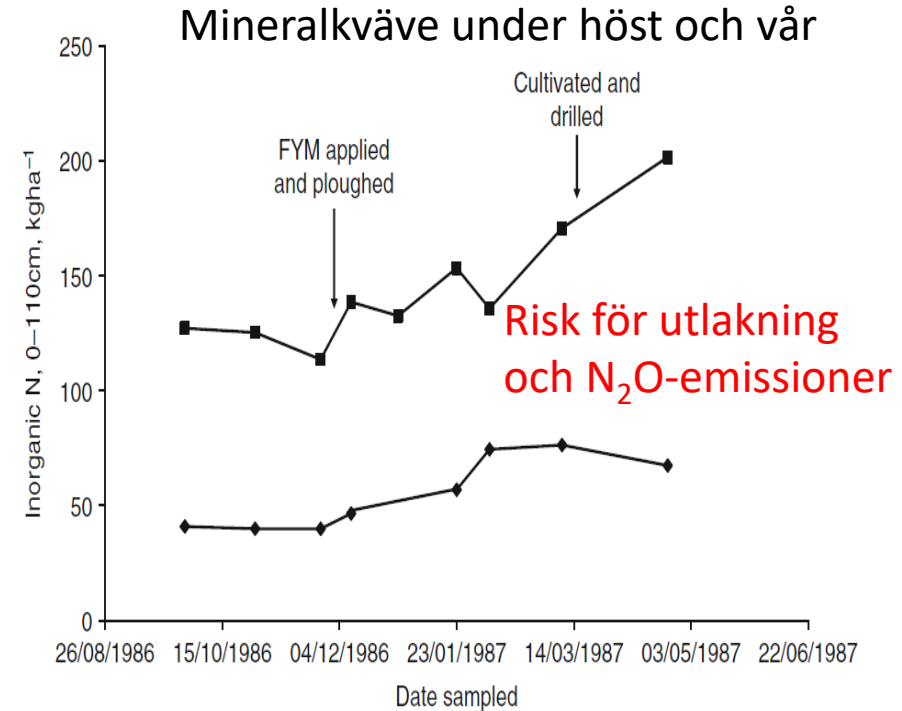
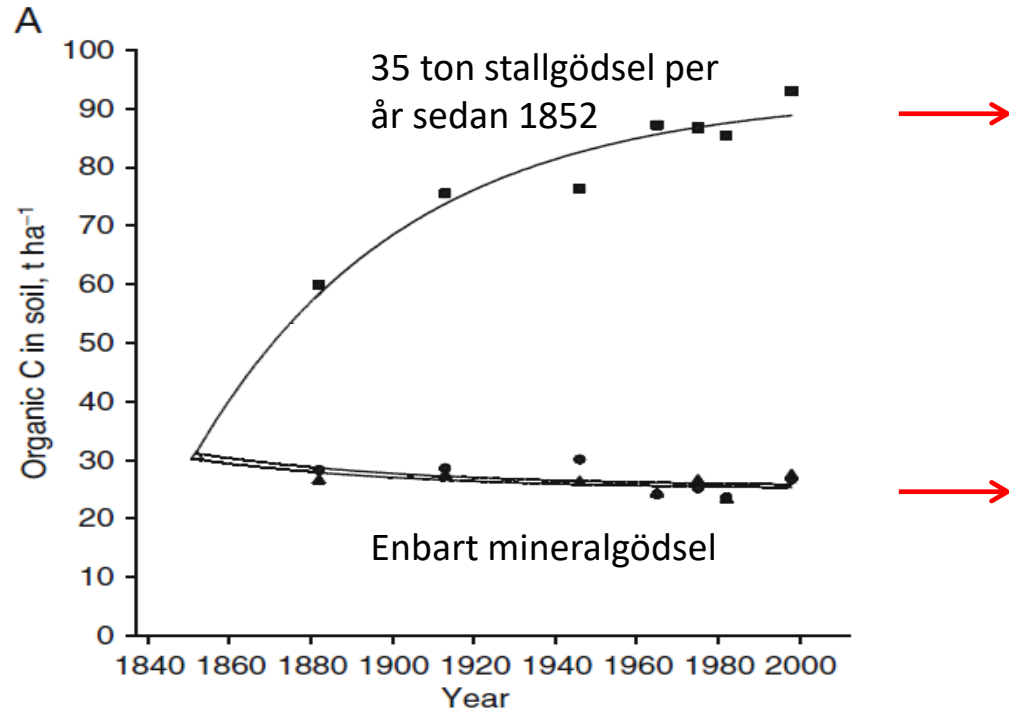
\*gäller fältnivå, men kan inte skalas upp eftersom mängden är begränsad (t.ex. stallgödsel)

\*\*Effekten är lägre (0,06 ton/ha) i studier med provtagning till 60 cm djup eftersom reducerad bearbetning verkar leda till lägre kolförråd i alven.

**Stor variation mellan enskilda studier**

# Kolinlagringen avtar med tiden och ökar risken för N förluster

Hoosfield Continuous Barley, Rothamsted



- Jämvikt nås efter mera än 150 år
- Höga mullhalter ökar risken för kväveläckage och lustgasemissioner
- Risken måste hanteras t.ex. med fånggrödor

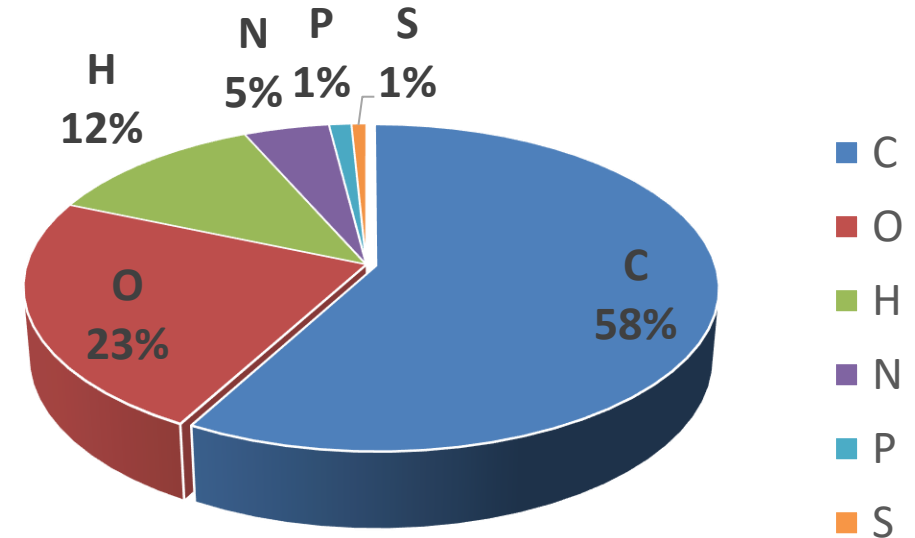
# Kolinlagring kostar växtnäring

För att lagra in 1 ton kol i mull krävs det\*

80 kg N

20 kg P

14 kg S

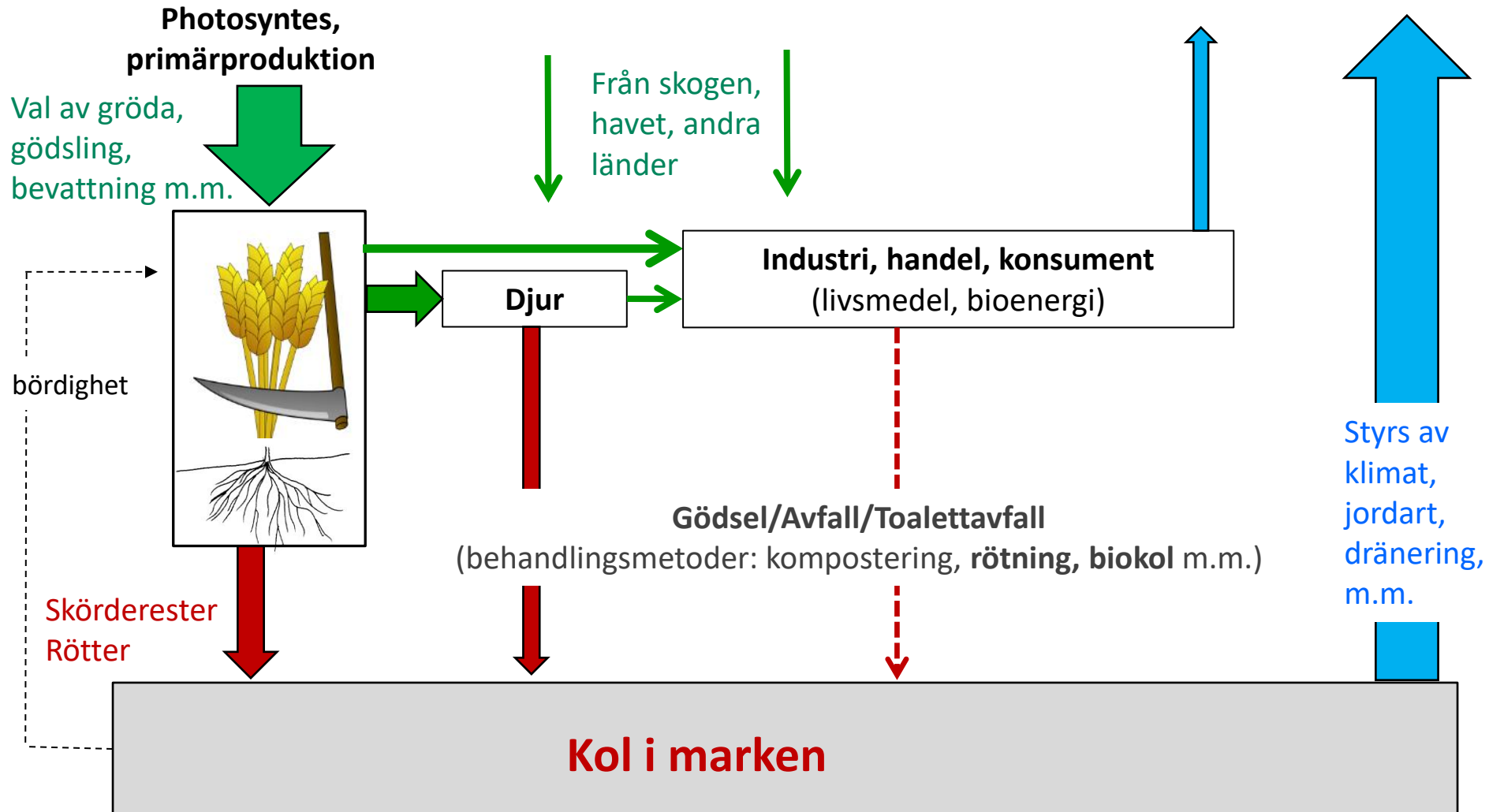


Knäckfrågan är hur stor andel av N, P och S kan fångas in via bättre effektivitet (minskad utlakning, gasförluster av kväve)?

\*Global genomsnitt

(Kirby et al. 2011 *Geoderma*, [163](#), 197-208)

# Markens kolbalans kan påverkas, främst genom primärproduktion



# Sammanfattning

- Kolinlagring pågår i svenska mineraljordar
- Mulljordar släpper ut CO<sub>2</sub> och lustgas
- Permanent grön mark är bra för bördigheten och klimatet
- Rötter och rhizodeposition är viktiga för markens kolbalans – växtförädling kan bidra
- Verifiering av kolinlagring är dyr och orealistisk på fältnivå
- Forskning, teknikutveckling, rådgivning och utbildning behövs för att utveckla uthålliga, klimatsmarta och plats-specifika system i praktiken

# Tack för uppmärksamheten!

Tack till mina kollegor som har bidragit

Tack till våra finansiärer, främst EU, Formas och SLF



SCIENCE AND  
EDUCATION  
**FOR**  
**SUSTAINABLE**  
**LIFE**