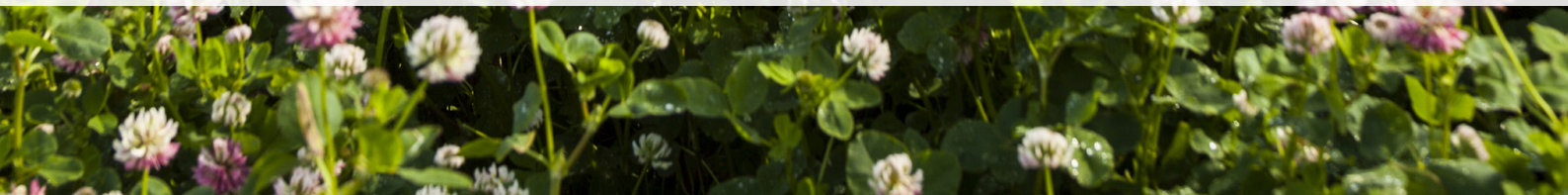




Vall i växtföljd för minskad klimat- påverkan

– avkastning och klimatpåverkan i långliggande fältförsök

Johan Nilsson, Fatima F. El Khosht, Göran Bergkvist, Ingrid Öborn och Pernilla Tidåker





Mistra Food Futures Report #2

Vall i växtföljd för minskad klimatpåverkan – avkastning och klimatpåverkan i långliggande fältförsök
Ley in crop rotations for climate change mitigation – Yield and climate impact in long term field trials

Författare: Johan Nilsson¹, Fatima F. El Khosht², Göran Bergkvist², Ingrid Öborn², Pernilla Tidåker¹

- 1) Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet
- 2) Institutionen för växtproduktionsekologi, Sveriges lantbruksuniversitet

Denna rapport är framtagen inom forskningsprogrammet Mistra Food Futures. Det övergripande målet för programmet är att skapa en vetenskapligt baserad plattform som bidrar till att det svenska livsmedelssystemet kan transformeras till ett system som är ekonomiskt, socialt och miljömässigt hållbart samt resilient och kan leverera hälsosam mat. Målet uppnås genom att utveckla ett nära samarbete mellan akademien och ett antal nyckelaktörer i det svenska livsmedelssystemet. Den här rapporten utgör en del av Mistra Food Futures arbete med att beskriva produktionssystem som minskar lantbrukets klimatpåverkan. Detta utgör en av de centrala frågeställningarna inom Mistra Food Futures.

Mistra Food Futures leds och samordnas av Sveriges lantbruksuniversitet SLU i samarbete med forskningsinstitutet RISE och Stockholm Resilience Centre vid Stockholms universitet. Övriga partners inom programmet omfattar en bred representation av aktörer från akademi, näringsliv, branschorganisationer och regioner.

www.mistrafoodfutures.se

Publikation: Mistra Food Futures Report #2
Utgivningsår: 2022
Utgivare: Sveriges lantbruksuniversitet
Omslagsbild: Thomas Adolfsén / Scandinav
Tryck: SLU Repro, Uppsala
ISBN: 978-91-576-9998-5 (elektronisk), 978-91-576-9999-2 (tryckt)

FUNDED BY



The Swedish Foundation for
Strategic Environmental Research

Sammanfattning

Vall har potential till betydande kolinlagring och gör att markens jämvikt med avseende på kolinnehåll ställer in sig på en högre nivå än när bara ettåriga växter odlas. När vallen försvinner från slättbygden innebär det därför att kolförrådet i marken minskar vilket påverkar markens bördighet och klimatpåverkan. Syftet med denna studie var att utvärdera effekten av vall i växtföljd. I studien undersöktes vallens effekt på avkastningen av efterföljande grödor samt markens kolinnehåll. Dessutom utvärderades vallens effekt på klimatpåverkan utifrån ett livscykelperspektiv. Studien baserades på data från tre av SLUs långliggande fältförsök insamlade från 1970 till 2020. I försöken jämförs tre sexåriga växtföljder vid fyra olika kvävenivåer där två av växtföljderna inkluderar två år av vall, gräsvall respektive blandvall.

Vid de två lägsta kvävegivorna var avkastningen av de ettåriga grödorna högst ibland vallväxtföljden. Detta förklarades med tillförsel av kväve genom biologisk kvävefixering. Vid högre kvävegivor fanns små eller inga skillnader i avkastning mellan växtföljderna. Mängden kol i marken minskade över tid i alla växtföljder. Dock var minskningstakten av markkol lägre i växtföljderna med vall där även en större mängd markkol observerades i sista växtföljdsomloppet än i växtföljden utan vall.

I livscykelanalysen användes spannmålsenhet som funktionell enhet för att kvantifiera klimatpåverkan från två av de fyra kvävegivorna, den högsta (N3) och den näst lägsta (N1). Resultatet visade att vallväxtföljderna hade de största totala avkastningarna, delvis till följd av att ett år med träda ingick i växtföljden utan vall. Vallväxtföljderna hade en mindre markanvändning per producerad spannmålsenhet. Vid den lägre kvävegivan hade växtföljden med blandvallen minst markanvändning och vid den högre kvävegivan hade gräsvallen minst markanvändning. Klimatpåverkan per spannmålsenhet var lägre för växtföljderna med vall jämfört med växtföljden utan vall. Lägst klimatpåverkan beräknades för växtföljden med blandvall vid den lägre kvävegivan. Detta tillskrevs den relativt stora avkastningen i kombination med mindre behov av insatsvaror, främst i form av mineralkväve. Resultaten indikerar att förlusten av markkol minskade med vall i växtföljd jämfört med utan vall, dock räckte inte två år vall i en sexårig växtföljd för att få en stabilisering eller ökning av markkol. De högre givorna av kväve reducerade minskningen av markkol oavsett växtföljd. Blandvallväxtföljden resulterade i större avkastning och ett minskat behov av kvävegödsling jämfört med växtföljderna med gräsvall och utan vall.

För att öka införandet av vall i svenska växtföljder behövs en avsättning för vallen, vilket skulle kunna skapas genom att t.ex. öka incitamenten att använda vall som substrat i biogasproduktion eller genom att öka vallandelen i foderstater.

Nyckelord: Blandvall, gräsvall, växthusgasutsläpp, LCA, markkol, avkastning, växtföljd, förfruktseffekt

Abstract

Cultivation of ley has large potential for soil carbon sequestration compared to annual crops. Therefore, when leys disappears from the plains the soil carbon stock decreases, which affects soil fertility and climate change. The aim of this study was to evaluate the effect of ley in crop rotation. We investigated the effect of ley on the yield of subsequent crops as well as the soil carbon stock. In addition, life cycle climate impact of including ley in crop rotation was compared to a crop rotation without ley. The study was based on data from three of SLU's long-term field experiments collected from 1970 to 2020. The experiments compare three six-year crop rotations at four different nitrogen rates, where two of the crop rotations include two years of ley, grass ley and mixed (grass/legume) ley.

At the two lowest nitrogen rates, the yields of the annual crops were highest in the mixed ley crop rotation. This was explained by the addition of nitrogen through biological nitrogen fixation in this rotation. At the higher nitrogen rates there were small or no differences in yields between rotations. The soil carbon content decreased in all crop rotations. However, the rate of the depletion was lower in the crop rotations with ley where also a larger amount of soil carbon was observed in the last crop rotational cycle than in the crop rotation without ley.

In the lifecycle assessment, cereal unit was used as a functional unit to quantify the climate impact of two of the four nitrogen rates, the highest (N3) and the second lowest (N1). The results showed that the highest total yield was obtained in the ley crop rotation, partly as a result of the inclusion of a year of fallow in the crop rotation without ley. The ley crop rotations had a smaller land use per cereal unit produced. The crop rotation with mixed ley at the lower nitrogen rate had the lowest climate impact per cereal unit. This was attributed to the relatively large yield combined with less need for inputs, mainly in the form of mineral nitrogen. The results indicate that the loss of soil carbon decreased with ley in the crop rotation compared to without ley, however, two years of ley in a six-year rotation was not enough to obtain a stabilisation or increase in soil carbon. More nitrogen applied reduced the losses of soil carbon irrespective of crop rotation. The mixed ley crop rotation resulted in greater yields and a reduced need for nitrogen fertilisation compared to the crop rotations with grass ley and without ley.

To increase the inclusion of ley in Swedish crop rotations, the demand for produced ley biomass must increase. This could, for example, be achieved by strengthening the incentives to use the ley biomass as substrate in biogas production or as fodder in Swedish animal husbandry.

Keywords: Mixed ley, grass ley, greenhouse gas emissions, LCA, soil carbon, yield, crop rotation, pre-crop effect

Innehållsförteckning

1. Inledning	5
1.1. Bakgrund	5
1.2. Syfte och mål	6
2. Litteraturgenomgång	7
3. Material och metod	9
3.1. Sammanställning av data från långliggande fältförsök	9
3.1.1. Beskrivning av fältförsök med olika växtföljder	9
3.1.2. Markkolsanalyser	11
3.1.3. Statistisk analys	12
3.2. Livscykelanalys	12
3.2.1. Mål och omfattning	12
3.2.2. Livscykelinventering	14
3.2.3. Bedömning av klimatpåverkan	15
4. Resultat	16
4.1. Fältförsök	16
4.1.1. Avkastning	16
4.1.2. Markkolsförändring	17
4.2. Livscykelanalys	19
4.2.1. Spannmålsenhet och markanvändning	19
4.2.2. Klimatpåverkan	20
5. Diskussion	21
5.1. Fältförsök	21
5.2. Livscykelanalys	22
5.3. Styrkor och svagheter med studien	23
6. Slutsatser	26
Referenser	28

1. Inledning

1.1. Bakgrund

En vall som odlas i växtföljd i Sverige består vanligtvis av en blandning av fleråriga arter av gräs och klöver. Den odlas normalt som foder till idisslande djur och till hästar. Specialiseringen inom svenskt jordbruk har lett till att vallarna i stor utsträckning försvunnit från slättbygden och istället kommit att nästan helt dominera växtodlingen i skogs- och mellanbygder. Vall har potential till betydande kolinlagring och gör att markens jämvikt med avseende på kolinnehåll ställer in sig på en högre nivå än när bara ettåriga grödor odlas (Börjesson m.fl. 2018). När vallen försvinner från slättbygden innebär det att kolförrådet i marken minskar och avgår till atmosfären i form av koldioxid, vilket leder till klimatpåverkan.

Förutom att fleråriga vallar bidrar till en ökad jämviktsmullhalt i marken, har de också andra fördelar för odlingssystemet. De ökar den biologiska aktiviteten i marken vid odling av andra grödor, vilket förbättrar deras växtnäringsförsörjning, håller dem friskare och ökar deras avkastning. Vallar med klöver eller andra baljväxter bidrar också med biologisk kvävefixering. Detta skapar positiva växtföljdseffekter som i tidigare utvärderingar inte gått att kompensera med ökad gödselgiva (Bergkvist & Båth 2015). Sammantaget gör detta att behovet av insatsmedel minskar markant i växtföljder med vall, vilket är en fördel både ur ekonomisk och miljömässig synvinkel (Tidåker m.fl. 2014; 2016).

För att vallen åter ska få en plats i växtföljden i slättbygderna måste antingen de idisslande djuren återkomma eller att andra användningsområden för vallen utvecklas. Sådana områden kan vara som råvara i biogasframställning av biomassan som den är, eller, efter fraktionering av biomassan, för att till exempel producera proteinfoder till enkelmagade djur. Anläggningar för biofraktionering är under utveckling (Damborg m.fl. 2018).

I många fall är vallens dokumenterade fördelar baserade på en bedömning efter användning av både vall och stallgödsel, eftersom stallgödseln har betraktats som en konsekvens av vallen. Det finns få försök i världen där det går att studera vallens effekt på kolinlagring och avkastning utan stallgödsel, men i SLUs långliggande försök (R4-1103) som startades på 1960-talet, är detta möjligt. I försöket jämförs växtföljder med vall två år av sex med en växtföljd utan vall på tre platser i Sverige; Uppland, Gotland och Västergötland. Både en växtföljd med gräsvall och en växtföljd med gräs och baljväxter ingår och växtföljderna jämförs vid fyra olika nivåer av kvävegödsling. Eftersom utsläpp kopplade till framställning och användning av kvävegödselmedel står för en betydande del av jordbrukets miljöpåverkan är de olika kvävebehandlingarna i försöket en mycket viktig del

när vi vill utvärdera effekterna av vall i växtföljden. Det finns tidigare publikationer om försöken som inkluderat effekter på avkastningen (t.ex. Persson m.fl. 2008; Bergkvist & Båth 2015), men ingen som har tagit ett helhetsperspektiv och inkluderat beräkningar av effektivitet i kväveutnyttjandet och bedömningar av miljöpåverkan med livscykelanalys (LCA). Dessutom finns det idag tolv år av datainsamling angående jordens kolinnehåll som saknades vid tidigare publiceringar. Denna rapport inkluderar en 50-årsperiod, 1970–2020.

1.2. Syfte och mål

Det övergripande syftet var att utvärdera effekten av vall i växtföljd baserat på jämförelser av växtföljder med och utan vall på tre platser i Sverige. Dessutom jämfördes gräsvall och vall med gräs och baljväxter. De specifika målen var att:

- Kvantifiera effekten av vall i växtföljd på efterföljande gröders avkastning.
- Bedöma hur vall i växtföljd påverkar markens kolinnehåll.
- Utvärdera effekten på klimatpåverkan av vall i växtföljden utifrån ett livscykelperspektiv.

2. Litteraturgenomgång

Vallväxter är bland de vanligaste odlade grödorna i Sverige (Jordbruksverket 2018). Den producerade vallen skördas oftast flera gånger per år som bete, ensilage eller hö till foder, men alternativa användningsområden har fått ett större fokus under den senaste tiden. Bland annat diskuteras utvinning av proteiner genom biofraktionering eller vall som substrat i biogasproduktion (Tilman m.fl. 2006; Auburger m.fl. 2017; Carlsson m.fl. 2017; Santamaría-Fernández m.fl. 2017). Vallen odlas normalt som en blandning av olika gräsarter, oftast med inblandning av baljväxter. En fördel med att använda en kombination av arter är att de kan utnyttja olika nischer, både rumsligt och tidsmässigt. Detta innebär att en väl anpassad blandning av arter ofta ger högre avkastning än vallodlingar med enstaka arter (Nyfeler m.fl. 2011; Finn m.fl. 2013; Prieto m.fl. 2015). Till skillnad från gräsarter som är beroende av tillgängligt kväve i marken, kan baljväxter, genom symbios med kvävefixerande bakterier, utnyttja kväve från atmosfären. Förmågan till kvävefixering medför att baljväxter kan avkasta relativt bra vid låg eller ingen tillförsel av mineralgödselkväve. Gräsarter är dock generellt mer effektiva att ta upp tillgängligt kväve i marken, vilket gör dem mer konkurrenskraftiga i gödslade jordar och ger ofta något större avkastning än vad som kan förväntas av vallar med baljväxter (Finn m.fl. 2013).

Vall i växtföljd har en positiv påverkan på övriga grödor i växtföljden. Bland annat genom att ettåriga ogräs har svårt att etablera sig i vallen (Andersson & Milberg 1996) och när de ändå gör det, klipps de av innan de hinner producera frön, vilket gör att fröbanken minskar (Sjursen 2001). Flera av mer problematiska ogräsen tröttnas ut av de återkommande avslagningarna och den hårda konkurrensen från vallen. Istället uppföras ogräs som är mindre problematiska i de ettåriga grödorna (Meiss m.fl. 2010). Andra positiva effekter av att inkludera vall i växtföljden är att det blir längre mellan ettåriga grödor med specifika skadegörare som bestämmer hur ofta grödorna kan odlas (Kirkegaard m.fl. 2008). Vall i växtföljden kan även bidra till en förbättrad markstruktur (Lindén 2008). Detta medför att grödan direkt efter en blandvall kan förväntas öka avkastningen med i snitt 800 kg/ha för höstvetete och 500 kg/ha för vårsäd (Jordbruksverket 2021). Efter gräsvall är den förväntade meravkastningen 400 kg/ha för höstvetete och 200 kg/ha för vårsäd. Jordbruksverket (2021) anger däremot inte eventuell avkastningseffekt på grödorna som odlas efter den direkt efterföljande grödan. En tidigare studie av Bergkvist och Båth (2015) visade att även grödan som odlades tre år efter nedbrukning av en vall gav en meravkastning jämfört med växtföljd utan vall. I studien var meravkastningen snarlik mellan blandvall och ren gräsvall vid den högre kvävegivan. Resultaten visade däremot att en lägre kvävegiva gav högre meravkastning för havren med blandvall jämfört med gräsvallen (Bergkvist & Båth 2015).

Studien är baserad på två av de tre fältförsök som används i denna studie, men en längre tid har inkluderats i vår studie.

Tidigare studier har visat att vall i växtföljden ger ett högre markkolsförråd jämfört med växtföljder som enbart baseras på ettåriga grödor (Bolinder m.fl. 2010). Jarvis m.fl. (2017) visade att ju större vallandel som ingick i växtföljden desto större var mängden markkol. Liknande slutsatser drog Zani m.fl. (2020) som visade att en större andel vall i växtföljden hade ett positivt linjärt samband med markens kolmängd när andelen vall översteg 30–40 % i växtföljden. Dessutom har svenska nationella inventeringar av jordbruksmark visat att kolförråden ökat under de senaste tre decennierna, vilket tillskrevs en ökad vallareal (Poeplau m.fl. 2015).

Kolinlagring i mark är en balans mellan inflöde i form av rötter, skörderester, m.m. och utflöde i form av nedbrytning av organiskt material och förluster av kol. För jordar som befinner sig i jämvikt, dvs. där kolinflödet är lika stort som utflödet, kommer en ökning av kolinflödet att resultera i ett ökat kollager i marken. Kollagret kommer att fortsätta att öka tills marken når en ny dynamisk jämvikt, vilket kan ta lång tid, speciellt i det relativt kalla klimatet i Sverige (Kätterer m.fl. 2012). Vilken markkolskoncentration som den nya jämvikten stabiliseras på beror på en mängd olika parametrar som fysiska markegenskaper, klimat, typ av gröda och skötsel (Kätterer m.fl. 2012; Bolinder m.fl. 2020). Marken är således en begränsad kolsänka som kommer variera beroende på var och hur olika åtgärder tillämpas. Dessutom är kolinlagring i marken inte en permanent sänka, i och med att det bundna kolet när som helst kan avges till atmosfären igen, till exempel vid förändrad drift. Förlusten av markkol sker vanligtvis snabbare än uppbyggnaden av markens organiska material (Smith 2005).

Under de senaste åren har intresset ökat för att använda jordbruksmark som en kolsänka med syfte att motverka den pågående globala uppvärmningen. Ett exempel på detta är 4 promille-initiativet som lanserades vid COP 21 i syfte att lyfta fram kolinlagring i mark som ett verktyg att bekämpa den globala uppvärmningen. Namnet på initiativet kommer från räkneexemplet att 4 promilles ökning av markkolsinlagringen motsvarar de årliga antropogena koldioxidutsläppen (Minasny m.fl. 2017; 4per1000 2018). Bara inom EU har potentialen för markkolsinlagring uppskattats motsvara mellan 9 (Frank m.fl. 2015) och 58 miljoner ton CO₂ per år (Lugato m.fl. 2014). Att öka kolinlagringen i marken är inte bara fördelaktigt ur klimatsynpunkt, utan förbättrar också markens kvalitet, till exempel genom ökad vatten- och näringshållande förmåga, en jämnare tillförsel av näringsämnen, förbättrad markstruktur och minskad risk för markpackning (Lal 2004).

I en sammanställning av underlag för att skatta effekten av olika åtgärder för kolinlagring bedömer Bolinder m.fl. (2017) att medelpotentialen vid vallodling är 560 kg kol per hektar och år i matjorden och 85 kg i alven, d.v.s. totalt 645 kg kol per ha och år. Dessa skattningar representerar nettoeffekten av vallodling, d.v.s. jämfört mot ett referenssystem, i det här fallet odling av ettåriga grödor.

3. Material och metod

Material och metodkapitlet är uppdelat i två delar. I del 1 beskrivs fältförsöket och analyser av avkastning utifrån fyra kvävegödslingsnivåer samt markkolsförändringar utifrån två av dessa kvävegödslingsnivåer. I del 2 beskrivs hur växtföljdernas klimatpåverkan utvärderades utifrån ett livscykelperspektiv.

3.1. Sammanställning av data från långliggande fältförsök

3.1.1. Beskrivning av fältförsök med olika växtföljder

Studien baserades på resultat mellan åren 1970 - 2020 från SLUs långliggande försök i Säby i Uppland, Stenstugu på Gotland och Lanna i Västergötland som alla anlades under 1960-talet. I försöket jämförs tre sexåriga växtföljder (Tabell 1) där två av växtföljderna inkluderar två år av vall, gräsvall respektive gräs- och baljväxtvall (blandvall), och den tredje endast ettåriga grödor samt ett år träda, vid fyra olika kvävenivåer (Tabell 2). Samma gröda behandlas lika i alla växtföljder vid gödsling förutom kornet där en lägre giva ges till korn med insädd av vall för att gynna en god valletablering. Vidare ges 30 kg kväve per ha till höstraps på hösten även vid N0 för att främja etableringen av rapsen. Blandvallen gödslas beroende på baljväxtinnehåll, vid över 50 % klöver ges inget kväve alls, vid 50–25 % och < 25 % baljväxter gödslas vallen enligt Tabell 2.

Tabell 1. De tre växtföljderna som jämförs i det långliggande försöket R4-1103, på Säby, Stenstugu och Lanna. Blandvallen är en gräs- och baljväxtvall

År	Blandvall	Gräsvall	Utan vall
1	Oljevaxter	Oljevaxter	Oljevaxter
2	Höstvete	Höstvete	Höstvete
3	Havre	Havre	Havre
4	Korn med insädd	Korn med insädd	Korn
5	Blandvall år 1	Gräsvall år 1	Vårvete
6	Blandvall år 2	Gräsvall år 2	Träda

På Lanna och Säby är experimentdesignen split-plot och på Stenstugu strip-plot (Figur 1). Storrutan består av växtföljderna som upprepas sex gånger på varje plats. Storrutan är i sin tur uppdelad i fyra smårutor med olika kvävegivor (N0-N3), totalt 72 smårutor. Smårutorna på Lanna är 8 m x 15 m, på Säby 4,75 m x 18,65 m och på Stenstugu 7,3 m x 16 m. Alla grödor i växtföljderna finns representerade varje år då upprepningarna av storrutorna, d.v.s. växtföljderna, är på olika år i växtföljden.

Sedan 2009 brukas all halm efter skörd ned efter att ha hackats och spridits jämt över rutorna. Dessförinnan togs kornhalmen bort från rutorna i vallväxtföljderna för att säkerställa att halmen inte skulle påverka vallarnas etablering. Vallarna skördas två till tre gånger första vallåret och en gång det andra vallåret. Den skördade vallbiomassan förs bort. Både vallen och de ettåriga grödorna skördas från en yta som är minst 24 m² och ligger minst 50 cm in från rutkanterna.

Matjordsprover har samlats in årligen sedan försökets start med undantag för åren 1993 – 2005. Matjordsproverna tas från 0–20 cm djup på hösten efter skörd av havre, och provtagningen sker i rutorna med kvävegivorna N1 och N3. Varje matjordsprov består av minst 20 delprov insamlade jämt över rutan, minst 50 cm innanför rutgränsen. Under åren 1972–1992 och 2007–2020 togs även alvprover från 40–60 cm samtidigt och i samma rutor som matjordsproverna. Varje alvprov bestod av minst fem delprov. Från åren 2010 (Lanna och Stenstugu) och 2010 och 2012 (Säby) saknas alvprover.

Tabell 2. Gödselgivor per gröda (kg/ha). Samma gröda behandlas lika i alla växtföljder förutom kornet där en lägre giva ges till korn med insådd av vall för att gynna en god valletablering. Vidare ges 30 kg kväve per ha till höstraps på hösten även vid N0 för att främja etableringen av rapsen

Gröda	Gödselgiva ¹						
	N0	N1	N2	N3	P	K	K
Höstraps							
- höst	30	30	30	30			
- vår	0	60	120	180	75	143	
Höstvete	0	45	90	135			
Havre	0	40	80	120			
Korn m. insådd	0	60	60	60	75	143	150
Korn	0	40	80	120	75	143	
Vårvete	0	45	90	135			
Blandvall							
25 - 50 % klöver, vår	0	30	60	90			
< 25 % klöver, vår	0	45	90	135			
Gräsvall							
Vår	0	45	90	135			
efter skörd	0	35	70	105			

¹ Mineralgödsel N27 (27 % N + S); PK 11–21; Kalisalt

3.1.3. Statistisk analys

Markkol och avkastning av ettåriga grödor analyserades med två linjära blandade modeller (JMP Pro 16). Markkol analyserades dels som förändring över tid för att studera hur mängden markkol förändrats i varje växtföljd sedan försökets start, dels som medelvärde över det sista växtföljdsomloppet, 2015–2020. Avkastningen av de ettåriga grödorna analyserades som medelvärde över hela tidsperioden. Modellen för förändringen av markkol över tid innehöll fixa effekter av kvävegivor och tidpunkter (år sedan försökets start), samt alla samspel mellan kvävegivor, tidpunkter och växtföljder. På detta sätt specificerade modellen specifika startpunkter för kvävegivor och specifika lutningar för kombinationer av kvävegivor och växtföljder, vilket förutsatte att det inte fanns några skillnader i mängd markkol mellan växtföljder i början av försöket. Dessutom innehöll modellen slumpmässiga effekter av platser, år och rutor (inom platser), samt tvåvägssamspelet mellan platser, kvävegivor och växtföljder. Samspelet mellan plats och växtföljd samt mellan plats och kvävegiva togs bort från modellen för att få den att konvergera. I trendanalysen för markkol analyserades skillnaden mellan den ursprungliga kolhalten i marken och den årligen observerade kolhalten (omräknat till mängd kol i Mg/ha), beräknad per plats. Den andra modellen, för medelavkastning och medelmängd av markkol, bestod av fixa effekter av växtföljder, kvävegivor och deras samspel, samt slumpmässiga effekter av platser och deras tvåvägssamspel med växtföljder och kvävegivor.

För att uppfylla antaganden om normalfördelning och homogenitet kvadratrottransformerades avkastningen av oljeväxt, havre och vårkorn. Observationer av markkol logaritmerades i medelmängdsanalysen. Endast fullständiga datamängder användes, dvs. endast år med data från alla tre platserna och från alla behandlingarna (36 observationer per år för avkastningsdata och 18 observationer per år för markdata). År då data saknades exkluderades från analyserna. När variansanalysen visade statistisk signifikans användes Tukeys HSD-test för att identifiera vilka behandlingar som skilde sig signifikant från varandra.

3.2. Livscykelanalys

3.2.1. Mål och omfattning

LCA-metodik användes för att kvantifiera och jämföra miljöpåverkan i form av klimatpåverkan för växtföljderna med blandvall, gräsvall och utan vall. I denna del av studien analyserades endast kvävegivorna N1 och N3 eftersom markkolsmätningar saknades för de övriga kvävegivorna. Livscykelinventering (LCI) utfördes för följande processer:

- produktion av gödsel och bekämpningsmedel,
- odling av utsäde,
- fältarbeten inklusive bränsleförbrukning samt produktion och underhåll av maskiner,

- torkning av grödor,
- utsläpp i form av kväveutlakning samt utsläpp till atmosfären i form av N₂O, NH₃ och NO_x,
- förändringar av markens kolmängd.

Ett viktigt begrepp i LCA-metodik är den funktionella enheten, som används som grund för kvantifiering, dvs. miljöpåverkan kvantifieras per den funktionella enheten. Den funktionella enheten bör väljas med hänsyn till och relatera till studiens mål. Ibland är det inte uppenbart vilken funktionell enhet som är mest lämplig. I sådana fall kan flera funktionella enheter inkluderas i bedömningen (Klöppfer & Grahl 2014). I jordbruks-LCAer är det vanligt att använda avkastning och area jordbruksmark, t.ex. hektar, som funktionell enhet (Notarnicola m.fl. 2017). Massa kan dock vara en missvisande funktionell enhet eftersom funktionen ofta varierar mellan grödor (Henryson m.fl. 2019). I den här studien användes därför spannmålsenhet (cereal unit, CU) som funktionell enhet. Denna enhet har utvecklats av tyska jordbruksmyndigheten för att göra jordbrukets produktivitet mer jämförbar. Enheten bygger på en metod där avkastningen omvandlas till en spannmålsenhet, vilket görs genom att bestämma fodervärdet för varje gröda och normalisera den till referensgrödan korn (Brankatschk och Finkbeiner 2014). Fodervärdet baseras på grödans protein-, lipid-, fiber- och kolhydratinnehåll och andelen foder som används för nötkreatur, svin, fjäderfä och hästar (Brankatschk och Finkbeiner 2014). Spannmålsenheten har både föreslagits att användas i LCA-studier för att fördela miljöbelastningar mellan grödor i en växtföljd (Brankatschk och Finkbeiner 2015; Goglio m.fl. 2018) och som en funktionell enhet för hela växtföljden (Prechsl m.fl. 2017; Henryson m.fl. 2019).

De skötselåtgärder som ingick baserades på fältförsökets upplägg. Enligt dessa gödslades blandvallen endast en gång per år, medan gräsvall I gödslades två gånger, före och efter den första skörden. Andraårsvallen, både bland- och ren gräsvallen, gödslades en gång. Mängden kvävegödsel på blandvallen baserades på andelen klöver, där en högre andel klöver resulterade i en lägre mängd gödsel och vid mer än 50 % klöver tillfördes inget gödsel (Tabell 2). Vallen skördades två-tre gånger första året och en gång andra året. Trädan lämnades obehandlad på hösten efter skörden av vårvete och plöjdes sedan vid samma tidpunkt som vallbrottet av vall II i de två vallväxtföljderna.

3.2.2. Livscykelinventering

Avkastningsdata, förändring av markens kolmängd, gödselgivor och utförda fältarbeten hämtades från fältförsöket.

Spannmålsenheten för respektive växtföljd bestämdes med följande ekvation:

$$CU = \sum_{i=1}^{n=6} \bar{y}_i \cdot x_i$$

där CU (kg) är den totala spannmålsenheten av växtföljden, \bar{y}_i (kg) är medelavkastningen för gröda över den studerade perioden, och x_i () är omvandlingsfaktorn för gröda i . Värdena för CU -omvandlingsfaktorerna har hämtats från det kompletterande materialet till Brankatschk och Finkbeiner (2014) och visas i (Tabell 3).

Tabell 3. Använda omvandlingsfaktorer för att räkna ut spannmålsenheten för respektive växtföljd

Gröda	Omvandlingsfaktor
Oljeväxt	1,3
Höstvete	1,04
Havre	0,84
Korn	1
Vårvete	1,04
Vall*	0,61

*Benämnt som hay i Brankatschk och Finkbeiner (2014)

Ingen miljöbelastning tilldelades halmen, eftersom den till största del lämnas kvar på fältet och brukas ned. Markanvändningen för de olika växtföljderna kvantifierades genom att beräkna den areal som krävs för att producera 1 kg CU.

NPK-tillförseln baserades på instruktionerna för fältförsöket. Eftersom kvävetillförseln baljväxtvallen (även kallad blandvall) justerades beroende på klöverinnehållet, beräknades den genomsnittliga kvävetillförseln för de två gödslingsnivåerna för blandvall I respektive blandvall II. För blandvall I beräknades den genomsnittliga kvävegivan till 32 och 92 kg N/ha i N1 respektive N3, i blandvall II var givan 35 och 103 kg N/ha i N1 respektive N3.

Utsläppen och energianvändningen från produktion av gödselmedel och bekämpningsmedel samt för produktion, underhåll och användning av maskiner beräknades med hjälp av uppgifter från Ecoinvent (Tabell 4). Insatser av bekämpningsmedel i form av herbicider, fungicider och insekticider baserades på nationell statistik för de specifika regionerna (SCB 2010). Spannmålen i växtföljderna antogs skördas vid 20 % TS och torkas sedan till 14 %, och oljeväxterna antogs skördas vid 15 % och torkas till 9 %. Behovet av eldningsolja antogs vara 5,4 MJ per kg torkat vatten och elanvändningen för processen antogs vara 17 kWh per kg (Edström m.fl. 2005). Ingen torkning av vallen ingick i beräkningen. Odling av utsäde inkluderades genom att subtrahera utsädesmängden från avkastningen, närmare bestämt 6 kg utsäde per hektar för oljeväxter, 210 kg för höstvete, 205 kg för havre, 170 kg för korn och 230 kg för vårvete (Ahlgren m.fl. 2011). Mängden utsäde för vallgrödorna baserades på fältförsökets anvisningar till 24 kg per ha, både för bland- och gräsvall. Dieselförbrukningen för att tillhandahålla vallfrön fastställdes till 19,4 MJ per kg (Gissén m.fl. 2014).

Tabell 4. Använd LCI-data från LCA-databasen Ecoinvent, v 3.8 med "cut-off by classification", som användes i studien. RER och CH indikerar data som representera förhållanden i Europa respektive Schweiz

Input	LCI dataset
N-gödsel	Ammonium nitrate productio, RER
P-gödsel	Triple superphosphate production, RER
K-gödsel	Potassium chloride production, RER,
Bekämpningsmedel	Pesticide production, unspecified, RER
Plöjning	Tillage, ploughing, CH
Harvning	Tillage, harrowing, by spring tine harrow, CH
Gödsling	Fertilising, by broadcaster, CH
Sådd	Sowing, CH
Spridning av bekämpningsmedel	Application of plant protection product, by field sprayer, CH
Skörd	Combine harvesting, CH
Stubbearbetning	Tillage, cultivating, chiselling, CH
Klippning	Mowing, by rotary mower, CH
Eldningsolja	Heavy fuel oil, burned in refinery furnace, Europe without Switzerland
Elektricitet	Market for electricity, high voltage, SE
Diesel produktion	Market for diesel, Europe without Switzerland
Diesel användning	Diesel, burned in agricultural machinery, GLO

För att uppskatta den genomsnittliga förändringen av markens kollager per växtföljd användes medelförändringen för respektive växtföljd och kvävegiva. Den genomsnittliga förändringen per växtföljd användes sedan i LCA-modellen, och omvandlas till koldioxid baserat på förhållandet mellan kolets och koldioxidens molmassa.

Direkta N₂O-utsläpp från marken uppskattades med hjälp av IPCC:s Tier-I-metod (IPCC 2019). Dessutom beräknades de indirekta N₂O-utsläppen med hjälp av IPCC:s Tier-I-metod, där både N₂O från kväveavgång till atmosfären och utlakning inkluderades. Kväveutlakningen bedömdes med hjälp av verktyget VERA som utvecklats av Jordbruksverket. De emissionsfaktorer som användes för kväveavgång till luft på fältnivå var 0,033 kg NH₃ respektive 0,04 kg NO_x per kg tillfört kvävegödselmedel (EMEP/EEA 2016).

3.2.3. Bedömning av klimatpåverkan

Klimatpåverkan bedömdes med hjälp av karaktäriseringsmetoden GWP₁₀₀, med beskrivna emissionsfaktorerna i Myhre m.fl. (2013) för växthusgaserna CO₂, CH₄ och N₂O (Tabell 5). Metoden går ut på att klimateffekten som orsakas av ett utsläpp jämförs med klimateffekten av ett utsläpp av samma mängd CO₂ över 100 år. Klimatpåverkan relateras därmed till CO₂ och anges därför som CO₂-ekvivalenter, härmed förkortat CO₂-ekv.

Tabell 5. Emissionsfaktorer använda för att beräkna klimatpåverkan enligt metoden Global Warming Potential (GWP) över 100 år

Växthusgas	Växthuseffekt (kg CO ₂ ekv/kg)
CO ₂	1
CH ₄	34
N ₂ O	298

4. Resultat

Avsnitten inleds med resultat från dataanalysen av de långliggande fältförsöken, där fokus ligger på effekten av de olika växtföljderna och kvävegivorna på avkastning och markens kollager. I den efterföljande delen presenteras resultaten från livscykelanalysen.

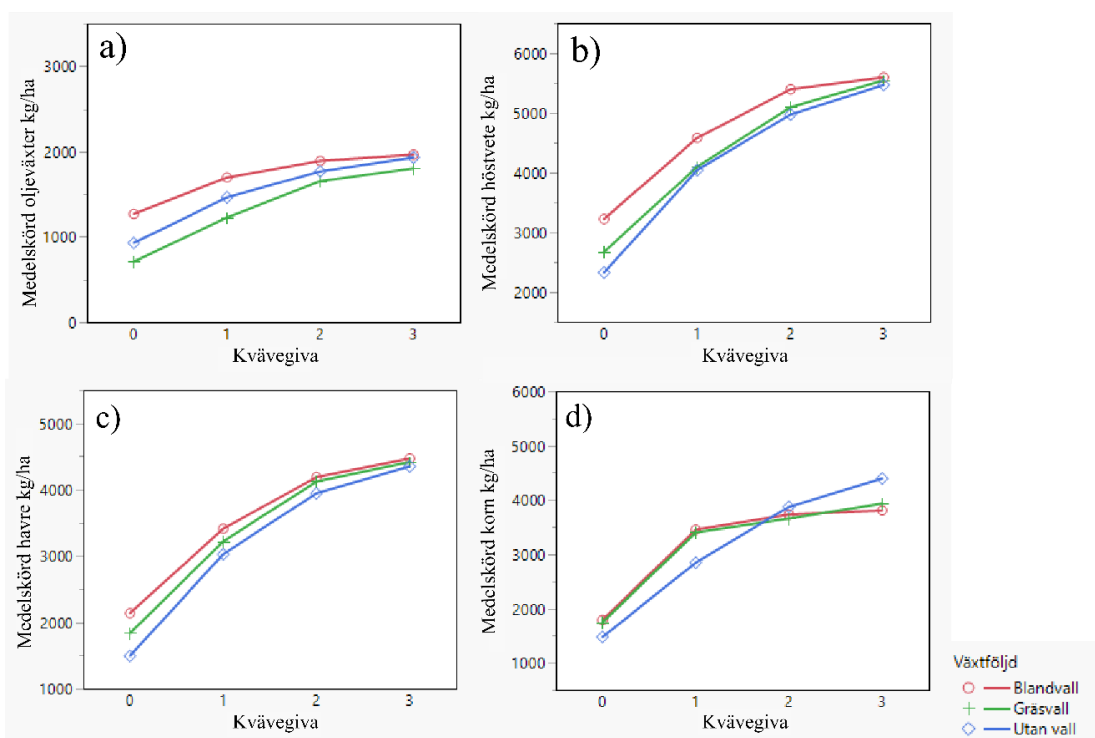
4.1. Fältförsök

4.1.1. Avkastning

I medeltal över hela perioden 1970-2020 skilde sig avkastningen signifikant för alla de ettåriga grödorna utom korn när de fyra kvävegivorna kombinerades (Tabell 6). Skillnader i avkastning mellan växtföljder var störst vid kvävegivorna N0 och N1 (Figur 2). Vid dessa kvävegivor erhöles den högsta avkastningen i blandvallväxtföljden och den lägsta i växtföljden utan vall. Vid N2 var avkastningsskillnaden mellan växtföljderna liten och vid N3 var avkastningen likvärdig. Ökningen av kvävegödslingen från N2 till N3 påverkade inte avkastningen signifikant i blandvallväxtföljden, men för de övriga växtföljderna innebar denna ökning i kvävegödsling en signifikant högre avkastning. Vallarna såddes in i kornet i de två växtföljderna med vall och det påverkade gödslingsgivorna i alla led utom N0. Utan tillfört kväve avkastade kornet bättre i leden med vall än utan.

Tabell 6. Statistisk analys av effekten av behandlingarna växtföljd, kvävegiva (N0-N3) och deras samspel på medelavkastningen av ettåriga grödor i växtföljderna över tid. DF står för degrees of freedom (frihetsgrader) och DFDen för denominator degrees of freedom (nämnarfrihetsgrader)

Behandling	Oljev. DF	Oljev. DFDen	Oljev. Prob > F	H.vete DF	H.vete DFDen	H.vete Prob > F	Havre DF	Havre DFDen	Havre Prob > F	Korn DF	Korn DFDen	Korn Prob > F
Växtföljd	2	4	0,0121	2	4	0,0014	2	6	<,0001	2	4	0,3779
Kvävegiva	3	6	0,0008	3	6	<,0001	3	4	0,0015	3	6	<,0001
Växtföljd*kvävegiva	6	12	<,0001	6	12	<,0001	6	12	<,0001	6	12	<,0001

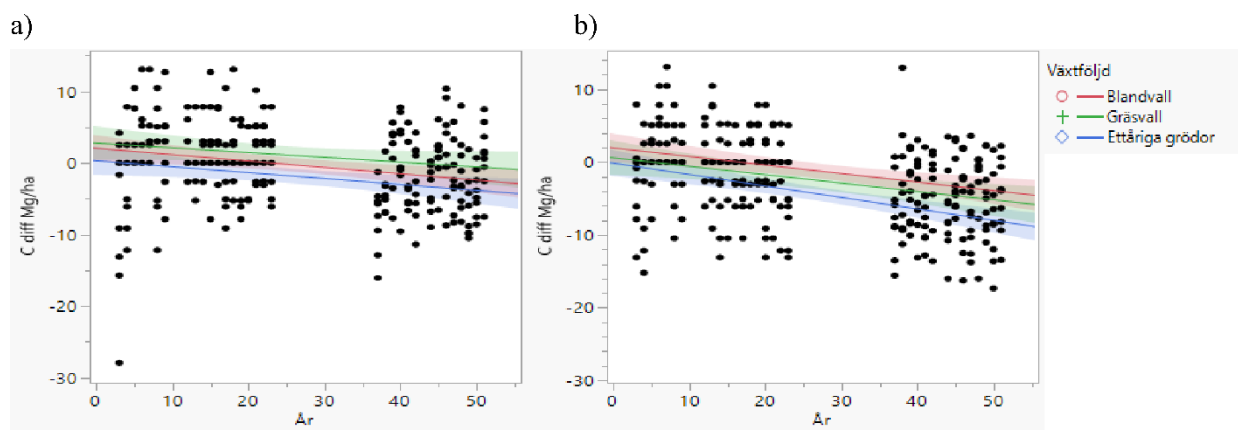


Figur 2. Medelavkastning per gröda och kvävegiva a) Oljeväxter, b) höstvetete, c) havre och d) korn.

4.1.2. Markkolsförändring

En minskning av markkol observerades i samtliga växtföljder och kvävegivor över den studerade tidsperioden (Tabell 7). En signifikant skillnad i markkolsförändring mellan växtföljderna observerades då alla data inkluderades (utan hänsyn till kvävegiva) (Tabell 7), där vallväxtföljderna visade en lägre minskningstakt av markkol trots stor variation mellan de olika upprepningarna (replikerade rutorna) (Figur 3). Då kvävegivorna analyserades separat fanns ingen signifikant skillnad mellan växtföljderna även om medelförändringarna för respektive växtföljd och kvävegiva visade en antydning till större förlust av markkol i växtföljden utan vall jämfört med växtföljderna med vall (Figur 3). Vidare var minskningen mindre i kvävegiva N3 jämfört med N1. För kvävegiva N3 var medelförändringen för växtföljden med blandvall $-0,09$ Mg kol per ha och år, $-0,06$ för gräsvall och $-0,10$ i växtföljden utan vall. Motsvarande markkolsförändring med kvävegiva N1 var $-0,11$ Mg kol per ha och år i blandvalls- och gräsvallsväxtföljderna, och $-0,16$ i växtföljden utan vall. Den beräknade medelförändringen användes i LCA-beräkningen för att bedöma bidraget av markkolsförlusten till den totala klimatpåverkan för respektive växtföljd och kvävegiva.

Medelkolmängden i matjorden vid det sista växtföljdsomloppet var högre för växtföljder med vall än utan och högre vid N3 än N1 i alla växtföljder. Resultatet visade på en signifikant skillnad mellan växtföljderna med och utan vall för de olika kvävegivorna där mängden markkol var större i växtföljderna med vall (Tabell 8). Mängden markkol i alven påverkades inte av växtföljd eller kvävegiva utan förblev oförändrad.



Figur 3. Illustration av markkolsförändringen på hösten efter skörd av havre över tid per växtföljd och kvävegiva där skillnaden mellan initial kolmängd och årligt observerat kolmängd (C diff Mg/ha) använts a) Trend för kolmängd i matjorden i N3 per växtföljd, och b) trend för kolmängd i matjorden i N1 per växtföljd

Tabell 7. Analys av förändringen av mängd markkol (JMP Pro 16)

Behandling	DF	DFDen	F Ratio	Pr > F
Kvävegiva	1	20,76	61.3212	0.2635
Tid	1	27,67	19.9631	0.0001
Växtföljd*tid	2	137,5	3.4203	0.0355
Kvävegiva*tid	1	455,2	7.7056	0.0057
Växtföljd*kvävegiva*tid	2	117,4	0.7270	0.4855

Tabell 8. Medelkolmängd i matjorden sista växtföljdsomloppet, uppdelat på växtföljd och kvävegiva. Då variansen antogs vara densamma för alla behandlingar var medelfelet lika i alla led; 4,5 Mg/ha

Växtföljd, kvävegiva	Kolmängd Mg/ha
Gräsvall, N3	49,7 ^A
Blandvall, N3	48,9 ^A
Blandvall, N1	46,6 ^{AB}
Gräsvall, N1	45,9 ^{AB}
Utan vall, N3	44,3 ^{BC}
Utan vall, N1	41,7 ^C

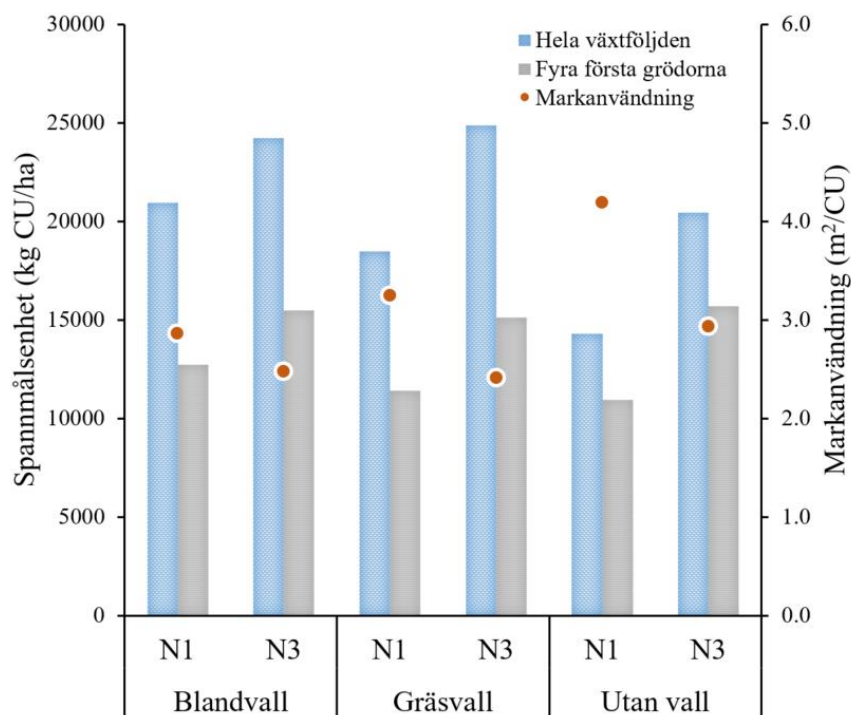
Kolmängder med olika upphöjda bokstäver skiljer sig signifikant från varandra, (Tukey HSD).

4.2. Livscykelanalys

4.2.1. Spannmålsenhet och markanvändning

Den totala avkastningen för respektive växtföljd och kvävegiva analyserades baserat på den framräknade spannmålsenheten. Resultatet visade att vid den lägre kvävegivan gav växtföljden med blandvall störst avkastning uttryckt som spannmålsenhet, därefter gräsvall och minst avkastning beräknades för växtföljden utan vall (Figur 4). För den högre kvävegivan gav växtföljden med gräsvall störst total avkastning och därefter kom växtföljden med blandvall. Skillnaden mellan de två växtföljderna med vall var dock mindre än vid den lägre kvävegivan. Minst total avkastning beräknades för växtföljden utan vall. Den högre kvävegivan gav större total avkastning i alla växtföljder.

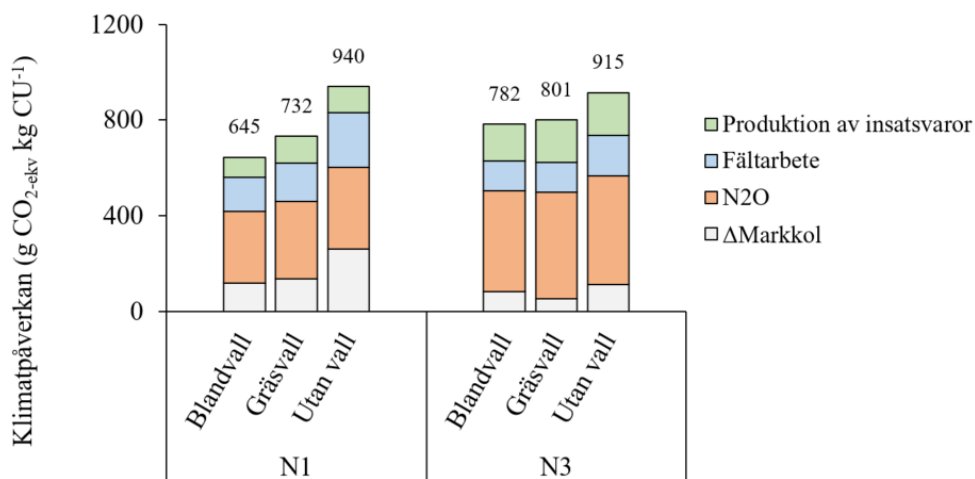
Den beräknade totala avkastningen uttryckt i spannmålsenhet för de ettåriga grödorna skilde inte mycket mellan växtföljderna vid den högre kvävegivan. Vid den lägre kvävegivan gav de fyra första grödorna större avkastning för växtföljden med blandvall och mindre avkastning beräknades för den växtföljden utan vall. Analysen av växtföljdernas markanvändning visade det omvända förhållandet, d.v.s. att låg avkastning gav större markanvändning. Vid den lägre kvävegivan hade växtföljderna med vall en markanvändning på 2,9 och 3,2 m² per spannmålsenhet för blandvalls- respektive gräsvallsväxtföljderna. Vid den högre kvävegivan var markanvändningen 2,5 och 2,4 m² per spannmålsenhet för växtföljderna med blandvall respektive gräsvall. Växtföljden utan vall resulterade i en markanvändning på 4,2 och 2,9 m² per spannmålsenhet för kvävegiva N1 och N3.



Figur 4. Avkastning uttryckt i kg spannmålsenhet (CU) för respektive växtföljd och kvävegiva för den totala växtföljden (dvs. 6 år) och för de fyra första ettåriga grödorna samt markanvändning för respektive växtföljd och kvävegiva uttryckt i kvadratmeter åkermark per kg spannmålsenhet.

4.2.2. Klimatpåverkan

Klimatpåverkansbedömningen visade att den lägsta klimatpåverkan per producerad spannmålsenhet hade växtföljden med blandvall i den låga kvävegivan (Figur 5). Även växtföljden med gräsvall i den lägre kvävegivan visade relativt låg klimatpåverkan. Med den högre kvävegivan var skillnaden mellan vallväxtföljderna mindre, men även här bedömdes växtföljden med blandvall ha lägst klimatpåverkan per spannmålsenhet. Högst klimatpåverkan hade växtföljderna utan vall. Lustgasemissioner från marken var den process som bidrog mest till klimatpåverkan i alla växtföljder, både direkta och indirekta utsläpp, men högst påverkan kom från de direkta emissionerna. Klimatpåverkan från markkolsförändringarna gav även ett betydande bidrag till den totala klimatpåverkan, denna effekt var störst vid den låga kvävegivan. Utsläppen från produktion av insatsvaror omfattar produktionen av gödsel (NPK) och bekämpningsmedel. Merparten av utsläppen från denna kategori, mellan 78 – 92 %, kom från tillverkningen av N gödsel.



Figur 5. Klimatpåverkan för respektive växtföljd och kvävegiva i g CO_{2-ekv} per kg spannmålsenhet (CU) uppdelat i utsläpp från produktion av insatsvaror (produktion av gödsel och bekämpningsmedel), fältarbeten, N₂O-utsläpp och förändring av mängd markkol.

5. Diskussion

Rapportens diskussionsavsnitt inleds med att diskutera resultaten från analysen av data från fältförsöken utifrån effekt på avkastning och markens kollager. Därefter diskuteras LCA-resultaten av den bedömda klimatpåverkan från respektive växtföljd och kvävegiva.

5.1. Fältförsök

Vid de lägre kvävegivorna observerades störst avkastning av de tre första grödorna, dvs. oljeväxt, höstvetete och havre, i växtföljden med blandvall (Figur 2). Denna effekt tillskrivs den kvävefixerande förmågan hos blandvallen. Ett minskat behov av gödselmedel kan i sin tur minska utlakning och kväveförluster till luft från växtodling (Gregorich m.fl. 2005; Johnson m.fl. 2007). Den högre genomsnittliga avkastningen av höstvetete i kvävegiva N2 i blandvallväxtföljden jämfört med gräsvallväxtföljden visar på en avkastningsfördel (förfruktseffekt) med baljväxter i vallen. Detta förklaras av den förbättrade kvävetillgängligheten som baljväxter medför till efterföljande gröda (Peoples m.fl. 2009). Däremot skiljde sig medelavkastningen av de fyra första (ettåriga) grödorna vid den högsta kvävegivan inte åt signifikant mellan växtföljderna (Figur 2). Resultatet indikerar att andra effekter av vallen än kväveleverans i sig inte bidrog med en positiv långsiktig avkastningseffekt vid hög N-giva.

Kornavkastningen i vallväxtföljderna där kornet var insått med gräs eller gräs och baljväxter var större vid de två lägsta N-givorna och mindre vid de två högsta (Figur 2). Kornavkastningen utan tillfört kväve var alltså större med insådd vall trots konkurrensen från det insådda gräset och klöver, vilket visar att vallen påverkade avkastningen positivt även fyra år efter att den brukades ner. Den mindre avkastningen i leden med vall vid de två högsta N-givorna beror sannolikt på att mindre kväve tillfördes i leden med vall vid dessa kvävenivåer för att gynna insådden och den större avkastningen med vall i N1 beror förmodligen på en kombination av positiv efterverkan av vallen fyra år tidigare och att mer kväve tillfördes än i ledet utan vall.

Mängden markkol i det sista växtföljdsomloppet var större i vallväxtföljderna än i växtföljden utan vall (Tabell 8). Vidare observerades en lägre minskningstakt av markkol i vallväxtföljderna. Detta stöder tidigare forskning som visar att växtföljder med vall har mer makkol (Bleken m.fl. 2016; Börjesson m.fl. 2018) vilket kan förklaras av en längre period av aktiv tillväxt under de två vallåren samt en större rotbiomassa från vallgrödor jämfört med de ettåriga grödorna, vilket i sin tur ger mer organiskt material till marken (Bolinder m.fl.

2007; Börjesson m.fl. 2018). Anledningen till att mängden kol minskar även i led med vall i dessa försök kan vara att de startade från en situation med både vall och djur i växtföljden och att jämviktsväxtföljden därför är lägre i nuvarande system än i det ursprungliga systemet. Trädan i växtföljden utan vall kan även ha bidragit till den lägre kolmängden till följd av mindre biomassatillväxt med följande lägre tillskott av organiskt material. Minskning av markkol över tid var förväntad då en förändring ('modernisering') av växtproduktionen med till exempel bättre dränering (genomförd före experimentets start), mer intensiv jordbearbetning, färre år av perenna grödor (vall i växtföljden) och minskad (här ingen) tillförsel av stallgödsel är ett skifte i brukningsmetoder jämfört med för 50 år sedan) vilket är förknippat med en sjunkande mängd markkol (Huggins m.fl. 2007; Capriel 2013; Meurer m.fl. 2018; Castellano m.fl. 2019; Tang m.fl. 2019). Minskningen av markkol var mindre vid den högre kvävegivan (N3) i alla växtföljder (Figur 3). I en studie av Kätterer m.fl. (2012) observerades att ett kg kol lagrades i marken per kg applicerad mineralkväve i Skåne och något mindre i längre norr ut i Sverige. Detta kan förklaras av en ökad växtbiomassa under högre kvävegivor vilket ökar tillförseln av organiskt material till marken. Den förhöjda tillförseln av organiskt material tros till större del komma från växtdelar ovan mark då rotbiomassan inte ökar lika mycket som växtdelar ovan mark med ökade N givor (Hirte m.fl. 2018; Cong m.fl. 2019) dock bidrar rötter mer till markkol än ovanjordiska delar (Kätterer m.fl. 2011). En längre varaktighet av vällen har större inverkan på markens kolinlagring (Martin m.fl. 2020) vilket förmodligen behövs för att nå en ökning eller stabilisering. Ett sätt att motverka kolförluster i jordbruksmark är att återföra delar av biomassan, t.ex. i form av gödsel, rötrest eller avloppsslam, vilka har uppvisat hög motståndskraft mot nedbrytning och kan därför vara viktigt för att lagra in kol i jordbruksmark (Kätterer m.fl. 2011).

5.2. Livscykelanalys

Resultatet från livscykelanalysen visade på större avkastning uttryckt som spannmålsenheter i växtföljderna med vall jämfört med växtföljden utan vall (Figur 4). Detta kan delvis förklaras av att växtföljden utan vall inkluderade ett år träda helt utan avkastning. Större skillnad i avkastning observerades mellan de olika kvävegivorna, där den högre kvävegivan resulterade i tydligt större avkastning för samtliga växtföljder. Spannmålsenheten beräknades även för de första fyra grödorna i växtföljden. Resultatet stämmer överens med tidigare observation, dvs. en liten skillnad i avkastning mellan de olika växtföljderna vid den högre kvävegivan medan resultatet för den lägre kvävegivan visade större avkastning i växtföljden med blandvall. Detta beror troligen på att kvävebehovet delvis har kunnat tillgodoses genom kvävefixering i blandvällen. Denna effekt påverkade även avkastningen av de övriga grödorna i växtföljden. En högre produktion medför en lägre markanvändning per producerad spannmålsenhet (Figur 4). Markanvändning är en viktig aspekt vid bedömning av jordbrukssystemens miljöpåverkan, eftersom utökning av åkermarksarealen globalt är en av de viktigaste faktorerna bakom jordbrukets påverkan på klimatet (Foley m.fl. 2011).

Vagga-till-grind-analysen visade att den lägsta klimatpåverkan hade växtföljden med blandvall med kvävegiva N1 (Figur 5). Den lägre klimatpåverkan berodde på den relativt stora totala avkastningen per hektar och behovet av en mindre mängd insatsvaror, främst kvävegödsel. Det minskade beroendet av mineralgödsel resulterade i både lägre utsläpp uppströms från gödselproduktionen och lägre N₂O-utsläpp från marken per skördad spannmålsenhet. Resultaten tyder på att om man inkluderar kvävefixerande vall i växtföljden minskar inte bara beroendet av insatsvaror utan också klimatpåverkan från odlings-systemet. Den lägre biomassaproduktionen i systemet med låg kvävetillförsel innebär dock att det behövs mer mark för att producera samma mängd avkastning (Figur 4). Detta innebär att denna typ av jordbrukssystem medför en större efterfrågan på jordbruksmark, vilket kan leda till att ny mark måste tas i anspråk, som i sin tur leder till betydande ytterligare miljöbelastningar. I dag används dock cirka 40 % av världens åkermark för produktion av foder, och mer av det spannmål som produceras i Sverige används som foder än för humankonsumtion (Eklöf 2014; Mottet m.fl. 2017). Det finns dessutom mycket jordbruksmark som idag är dåligt nyttjad (Nilsson m.fl. 2020).

Vidare visar LCA-resultaten att klimatpåverkan ökade per spannmålsenhet med ökad kvävegiva. Detta berodde främst på ökade N₂O-utsläpp, som är en potent växthusgas, 298 gånger starkare än koldioxid. Minskningen av markens kollager var dock lägre för den högre gödslingsgraden, vilket till viss del motverkade skillnaden mellan kvävegivorna.

Medelförändringen av markkol visade på minskade kolmängder i alla behandlingar, såväl i växtföljder med och utan inblandning av 2-åriga vallar (Figur 3). Minskningen i markkol kan ha flera förklaringar, se avsnittet ovan. Andra studier har visat att ju mer vall som inkluderas i växtföljden desto större blir mängden markkol (Jarvis m.fl. 2017; Zani m.fl. 2020; Henryson m.fl. 2022). Att mängden markkol minskat även i växtföljderna med vall kan alltså bero på att andelen vall var för låg för att vara i jämvikt med den ursprungliga mängden markkol. Vid en högre andel vall bör man kunna förvänta sig att kolförrådet bevaras över tid, eller till och med byggs upp. Förändringar av markanvändningen som leder till att en minskad förlust av markkol brukar ofta anses bidra till att mildra den globala uppvärmningen (Kätterer m.fl. 2012). Resultaten från denna studie visar att växtföljderna med vall förlorade mindre kol än växtföljden utan vall. Utifrån resultatet i denna studie visas att införande av vall i en växtföljd med endast ettåriga grödor kan minska koldioxidutsläppen från jordbruksmarken. Vidare kan inkludering av baljväxter i vallen bidra till en hög produktivitet redan vid lägre kvävegivor för efterföljande grödor upp till tre år efter vallbrott. De genomsnittliga förändringarna i markens kolförråd uppvisade dock en stor variation, detta gör att resultaten är osäkra vilket diskuteras ytterligare i efterföljande avsnitt.

5.3. Styrkor och svagheter med studien

Den genomförda studien baserades på data från det långsiktiga fältförsök som beskrivs i avsnitt 2.1. Dessa data är värdefulla och begränsar resultatens beroende av inneboende

osäkerheter som ofta är förknippade med modellering av odlingsystem. Användningen av insamlade mätdata medför dock andra osäkerheter i bedömningen, t.ex. skördebortfall på grund av skadedjur och extrema väderförhållanden. När det gäller förändringarna av markens kolinnehåll finns osäkerheter kopplat till metodval vid analys och behandling av jordproverna.

Vidare har produktionsmetoderna i svenskt jordbruk förändrats sedan starten av det långliggande fältförsöket. Särskilt när det gäller kvävegödselgivor där de sorter av de olika grödorna som odlades under försökens tidigaste år inte alls kunde svara på de högsta givorna, men att dessa givor under senare år inte alls kan uppfattas som extremt höga. Vad gäller höstvetete är den högsta givan till och med att betrakta som ganska blygsam. Träda var vanligt förekommande i svenska jordbrukssystem när fältförsöket etablerades eftersom dessa var nödvändiga för att kunna hantera ogräs och för de ettåriga grödorna på den tiden inte hann mogna i tid för optimal såtid för höstoljeväxter. Den uteblivna eller blygsamma (ogräs) produktionen av biomassa från trädan innebär att detta alternativ inte är en rättvis jämförelse med växtföljden med vallväxter när det finns kemiska alternativ för ogräskontroll och sorter av spannmål som mognar i tid för att kunna så höstoljeväxter efter dem. Växtföljden utan vall innehöll dock ett extra år med en ettårig gröda, vårvetete, med en relativt hög omvandlingsfaktor till spannmålsenhet (Tabell 3). Ett tillägg av ytterligare en gröda i denna växtföljd skulle ha förbättrat resultatet för markanvändningen och förmodligen också växtföljdens miljöpåverkan under hela livscykeln.

För att kunna jämföra avkastningen mellan de olika växtföljderna användes en spannmålsenhet som funktionell enhet. En nackdel med denna funktionella enhet är att den baseras på avkastningens fodervärde, trots att all skördad biomassa troligen inte kommer att användas som foder. Eftersom den vanligaste användningen av vall är foder (Cederberg och Henriksson, 2020) och mer spannmål i Sverige används till djurfoder än till människoföda (Eklöf 2014), anser vi dock att detta är en rimlig approximation att göra. Dessutom är djurslagen i Tyskland och Sverige liknande (FAO 2016), vilket gör det motiverat att använda samma omräkningsfaktorer till spannmålsenhet. Den biomassa som produceras vid vallodling används vanligtvis som foder, men alternativa användningsområden diskuteras ofta, till exempel vid proteinutvinning eller som råvara vid produktion av biobränslen, t.ex. biogas (Tilman m.fl. 2006; Auburger m.fl. 2017; Carlsson m.fl. 2017; Santamaría-Fernández m.fl. 2017). Biobränsle kan till exempel användas för att ersätta fossila alternativ, vilket skulle ha påverkat växthusgasbalansen avsevärt, vilket har visats i andra studier (Tidåker m.fl. 2016). Vidare var den största bidragande faktorn till växthusgasutsläppen N_2O -utsläppen från marken. Dessa utsläpp är mycket platsspecifika och kan variera över tid och under olika skötselformer. Mätningar av N_2O -utsläpp från marken är sällsynta, vilket ofta leder till att LCA-utövare använder IPCC:s grova Tier I-modell, vilket också var fallet i den här studien.

Både våra resultat och tidigare studier visar att vall i växtföljden ger en större mängd av kol i mark än växtföljder med endast ettåriga grödor. Att bibehålla vall i växtföljder där den nu odlas och att införa vall eller öka andelen vall där den förekommer sparsamt är alltså

en viktig åtgärd för att motverka klimatförändringar och öka bördigheten. En ökning av vall i svenska växtföljder kräver dock att det finns en avsättning för vallen. Inledningsvis tog vi upp möjligheten att använda vall som biogassubstrat och i framtida bioraffinaderier för att extrahera ut protein. I synnerhet utvecklingen av bioraffinaderier är dock något som fortfarande är i sin linda i Norden och en snabb utbyggnad i närtid är därför inte trolig. Ett sätt att öka efterfrågan på vall är att öka vallfoderandelen i foderstater för nötkreatur och andra idisslare, att sprida produktion av idisslande djur till områden där vall inte odlats under en längre tid, men också att låta grisar äta vall. En utvärdering av klimatnyttan av gräsklövervall till gris visar på en betydande potential att minska grisproduktionens klimatpåverkan (Röös m.fl., kommande). För att detta ska ske måste dock incitamenten för (ökad) vall i foderstater öka.

Utvärderingen av det långliggande fältförsöket visade även på större vinster med vall, i synnerhet blandvall, i växtföljd vid lägre kvävegivor än vid högre. Över tid har rekommenderade kvävegivor för en given skördenivå fluktuerat beroende på spannmålspris och priset på handelsgödselkväve. Rysslands invasion av Ukraina och den efterföljande kraftigt minskade tillgången på rysk naturgas i Europa har lett till historiskt höga kvävepriser. Detta i kombination med möjliga skatter pålagda för att minska användningen av fossil energi av klimatskäl, innebär att blandvallens förmåga till kvävefixering kan bli ett än mer ekonomiskt intressant alternativ för kvävetillförsel, Jordbruksverket (2021) anger att ett fördubblat pris på kvävet, jämfört med ett genomsnitt av de senaste fem åren, kan motivera en minskning av gödslingen till höstvete med cirka 10-25 kg kväve per hektar. I skrivande stund (september 2022) ligger kvävepriserna än högre än så. Att föra in mer blandvall i växtföljder kan därför både ge en miljövinst och också – om avsättning finns – bli alltmer ekonomiskt intressant.

6. Slutsatser

Effekten av att inkludera vall i växtföljden analyserades i denna studie. Vi utvärderade vallens betydelse för avkastningsnivå för övriga grödor i växtföljden, mängden markkol och klimatpåverkan.

Blandvall (gräs- och baljväxtvall) bidrar till högre avkastning av ettåriga grödor i växtföljden vid låg kvävegödning.

Skillnader i avkastning för de fyra ettåriga grödorna som ingick i samtliga växtföljder observerades för de lägre kvävegivorna. Vid de högre kvävegivorna var skillnaden mindre, och för den högsta kvävegivan observerades ingen signifikant skillnad mellan växtföljderna. Eftersom skillnaden i avkastning kunde gödslas bort ansågs vällen i sig inte vara anledningen till skillnaden i avkastning. Däremot ansågs blandvallen bidra till ökad avkastning vid de låga kvävegivorna till följd av kvävefixeringen i denna växtföljd.

Vall i växtföljden bidrar till mer markkol än växtföljder med bara ettåriga grödor.

Markkolsanalysen visade att markkolet minskat i alla behandlingar. Detta kan exempelvis bero på skillnader i det nuvarande odlingssystemet jämfört med de odlingssystem som funnits innan det långliggande försöket etablerades för mer än 50-år sedan, till exempel lägre andel flerårig vall, avsaknad av stallgödsel och förbättrad dränering. Analysen av markkolsförändringen över tid visade en signifikant skillnad mellan växtföljderna där minskningen av markkol reducerades i växtföljderna med vall. Minskning var även lägre i den högre kvävegivan i alla växtföljder. Effekten av kvävegiva förklarades delvis av en ökad växtbiomassa vid högre kvävetillförsel vilket medförde en ökad tillförsel av organiskt material. Mängden markkol var signifikant högre i vallväxtföljderna vid det sista växtföljdsomloppet vilket sannolikt förklaras av större tillförsel av organiskt material under vallåren samt större mängd rotbiomassa där rötter har visats ha en större motståndskraft mot nedbrytning. Även trädan i växtföljden utan vall kan ha bidragit till mindre mängd markkol i denna växtföljd.

Lägst klimatpåverkan för växtföljden med blandvall vid låg kvävegiva och störst totalavkastning för växtföljderna med vall.

Resultatet från livscykelanalysen visade en lägre klimatpåverkan per avkastning för växtföljderna med vall jämfört med växtföljden utan vall. Den lägsta klimatpåverkan beräknades för blandvallen vid den lägre kvävegivan. Detta berodde på en relativt stor total

avkastning och lägre behov av insatsvaror främst i form av kvävegödsel, vilket minskade utsläppen uppströms från produktionen av mineralgödsel men också utsläppen av N₂O från marken. Dessutom medförde växtföljderna med vall en mindre förlust av markkol, vilket bidrog till lägre klimatpåverkan i jämförelse med växtföljden utan vall. Den högsta klimatpåverkan beräknades för växtföljden utan vall vid den lägre kvävegivan. Analysen av avkastningen från respektive växtföljd, omräknat till spannmålsenhet, visade på större avkastning i växtföljderna med vall vilket delvis berodde på trädesåret med avsaknad av avkastningen i växtföljden utan vall. Markanvändning per producerad spannmålsenhet var mindre i vallväxtföljderna, där blandvallen i jämförelse hade minst markanvändning vid den lägre kvävegivan och gräsvallen i den högre.

För att öka andelen vall i svenska odlingsystem krävs att incitamenten för vallodling stärks.

Resultatet från vår studie samt tidigare studier visar att vall i växtföljden bidrar till en större mängd kol i marken jämfört med växtföljder utan vall. Dessutom kan inkludering av vall, främst blandvall, innebära ett minskat beroende av insatsvaror. Detta innebär att vall i växtföljden kan vara ett verktyg för att motverka klimatförändringar. För att öka vall i svenska växtföljder krävs dock att det finns en avsättning för vallen. Det kan exempelvis realiseras genom att öka incitamenten att använda vall som substrat i biogasproduktion eller att öka andelen vall i foderstater i svensk djurhållning.

Referenser

- 4per1000 (2018). What is the "4 per 1000" Initiative. Welcome to the "4 per 1000" Initiative | 4p1000. <https://www.4p1000.org/> [2018-06-01]
- Ahlgren, S., Hansson, P.-A., Kimming, M., Aronsson, P. & Lundkvist, H. (2011). Greenhouse gas emissions from cultivation of agricultural crops for biofuels and production of biogas from manure – Implementation of the Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (Revised edition according to new interpretations of the directive regarding reference land use and crop drying). (12-4067/08). Swedish University of Agricultural Sciences (SLU).
- Andersson, T.N. & Milberg, P. (1996). Weed performance in crop rotations with and without leys and at different nitrogen levels. *Annals of Applied Biology*, 128 (3), 505–518. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1996.tb07110.x>
- Auburger, S., Petig, E. & Bahrs, E. (2017). Assessment of grassland as biogas feedstock in terms of production costs and greenhouse gas emissions in exemplary federal states of Germany. *Biomass and Bioenergy*, 101: 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.008>
- Bergkvist, G. & Båth, B. (2015). Nitrogen fertiliser dose influence the effect of two year rotational leys with grass or clover/grass on other crops in the rotation. *Aspects of Applied Biology* 128: 133–139
- Bleken, M.A. (2016). Contribution to C-sequestration by leys in arable rotation during a 60 year long-term trial in southeast Norway. *Grassland Science in Europe* 21: 874 – 876.
- Bolinder, M.A., Crotty, F., Elsen, A., Frac, M., Kismányoky, T., Lipiec, J., Tits, M., Tóth, Z. & Kätterer, T. (2020). The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: a synthesis of reviews. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25: 929–952. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09916-3>
- Bolinder, M.A., Freeman, M. & Kätterer, T. (2017). *Sammanställning av underlag för skattning av effekter på kolinlagring genom insatser i Landsbygdsprogrammet*. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Bolinder, M.A., Kätterer, T., Andrén, O., Ericson, L., Parent, L.-E. & Kirchmann, H. (2010). Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics in forage-based crop rotations in Northern Sweden (63–64°N). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138: 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.06.009>
- Bolinder, M.A., Janzen, H.H., Gregorich, E.G., Angers, D.A. & VandenBygaart, A.J. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: 29 – 42.
- Brankatschk, G. & Finkbeiner, M. (2014). Application of the Cereal Unit in a new allocation procedure for agricultural life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 73: 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.005>

- Brankatschk, G. & Finkbeiner, M. (2015). Modeling crop rotation in agricultural LCAs — Challenges and potential solutions. *Agricultural Systems*, 138: 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.05.008>
- Börjesson, G., Bolinder, M.A., Kirchmann, H. & Kätterer, T. (2018). Organic carbon stocks in topsoil and subsoil in long-term ley and cereal monoculture rotations. *Biology and Fertility of Soils*, 54: 549–558. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1281-x>
- Carlsson, G., Mårtensson, L.-M., Prade, T., Svensson, S.-E. & Jensen, E.S. (2017). Perennial species mixtures for multifunctional production of biomass on marginal land. *GCB Bioenergy*, 9: 191–201. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12373>
- Capriel, P. (2013). Trends in organic carbon and nitrogen contents in agricultural soils in Bavaria (south Germany) between 1986 and 2007. *European Journal of Soil Science* 64: 445 – 454.
- Castellano, M.J., Archontoulis, S.V., Helmers, M.J., Poffenbarger, H.J. & Six, J. (2019). Sustainable intensification of agricultural drainage. *Nature Sustainability* 2: 914–921.
- Cong, W.F., Christensen, B. T. & Eriksen, J. (2019). Soil nutrient levels define herbage yield but not root biomass in a multispecies grass-legume ley. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 276: 47–54.
- Damborg, V.K., Stødkilde, L., Jensen, S.K. & Weisbjerg, M.R. (2018). Protein value and degradation characteristics of pulp fibre fractions from screw pressed grass, clover, and lucerne. *Animal Feed Science and Technology*, 244: 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.08.004>
- Edström, M., Pettersson, O., Nilsson, L. & Hörndahl, T. (2005). *Jordbrukssektorns energianvändning*. (342). JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik.
- Eklöf, P. (2014). Marknadsöversikt – Spannmål. (2014:08). Swedish Board of Agriculture. <https://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/marknadsoversikter-spannmal.html>
- EMEP/EEA (2016). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016: technical guidance to prepare national emission inventories*. LU: Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/247535> [2022-05-27]
- Finn, J.A., Kirwan, L., Connolly, J. m.fl. (2013) Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: a 3-year continental-scale field experiment. *Journal of Applied Ecology* 50: 365–375. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12041>
- Fogelfors, H. (2015). *Vår mat: odling av åker- och trädgårdsgrödor : biologi, försättningar och historia*. Lund: Studentlitteratur.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O’Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. & Zaks, D.P.M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478: 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Frank, S., Schmid, E., Havlík, P., Schneider, U.A., Böttcher, H., Balkovič, J. & Obersteiner, M. (2015). The dynamic soil organic carbon mitigation potential of European cropland. *Global Environmental Change*, 35: 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.004>
- Gissén, C., Prade, T., Kreuger, E., Nges, I.A., Rosenqvist, H., Svensson, S.-E., Lantz, M., Mattsson, J.E., Börjesson, P. & Björnsson, L. (2014). Comparing energy crops for biogas production – Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. *Biomass and Bioenergy*, 64: 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.061>

- Goglio, P., Brankatschk, G., Knudsen, M.T., Williams, A.G. & Nemecek, T. (2018). Addressing crop interactions within cropping systems in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23: 1735–1743.
<https://doi.org/10.1007/s11367-017-1393-9>
- Gregorich, E.G., Rochette, P., VandenBygaart, A.J. & Angers, D.A. (2005). Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil & Tillage Research* 83: 53–72
- Henryson, K., Hansson, P.-A., Kätterer, T., Tidåker, P. & Sundberg, C. (2019). Environmental performance of crop cultivation at different sites and nitrogen rates in Sweden. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 114: 139–155.
<https://doi.org/10.1007/s10705-019-09997-w>
- 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>
- Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S. & Mayer, J. (2018). Maize and wheat root biomass, vertical distribution, and size class as affected by fertilization intensity in two long-term field trials. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 216: 197 – 208.
- Huggins, D.R., Allmaras, R.R., Clapp, C.E., Lamb, J.A. & Randall, G.W. (2007). Corn-soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Science Society of America Journal* 71: 145 – 154.
- IPCC (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC.
- Jarvis, N., Forkman, J., Koestel, J., Kätterer, T., Larsbo, M. & Taylor, A. (2017). Long-term effects of grass-clover leys on the structure of a silt loam soil in a cold climate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247: 319–328.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.042>
- Johnson, J. M.F., Franzluebbers, A. J., Weyers Lachnicht, S. and Reicosky, D. C. (2007). Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental Pollution* 150: 107 – 124.
- Jordbruksverket (2021). *Rekommendationer för gödsling och kalkning 2022*. (Jordbruksinformation, 9)
- Jordbruksverket (2018). *Skörd av spannmål, trindsäd, oljeväxter, potatis och slåttervall 2017. Slutlig statistik. Skörd av spannmål, trindsäd, oljeväxter, potatis och slåttervall 2017. Slutlig statistik*. (Hektarskördar och totalskördar, definitiva resultat, JO16). Swedish Board of Agriculture.
- Kirkegaard, J., Christen, O., Krupinsky, J., Layzell, D., 2008. Break crop benefits in temperate wheat production. *Field Crops Res.* 107, 185–195.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.02.010>
- Klöpffer, W. & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): a guide to best practice*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- 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 — Soil & Plant Science*, 56: 263–276.
<https://doi.org/10.1080/09064710500310170>
- Kätterer, T., Bolinder, M.T., 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 and Environment* 141: 184 – 192.

- 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: 181–198.
<https://doi.org/10.1080/09064702.2013.779316>
- Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304: 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C.A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R.I., Mellado-Vázquez, P.G., Malik, A.A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B.C., Trumbore, S.E. & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6, 6707,
<https://doi.org/10.1038/ncomms7707>
- Lindén, B. (2008). *Efterverkan av olika förfrukter: inverkan på stråsådesgrödors avkastning och kvävetillgång : en litteraturöversikt*. Skara: Avdelningen för precisionsodling, Sveriges lantbruksuniversitet.
- Lugato, E., Bampa, F., Panagos, P., Montanarella, L. & Jones, A. (2014). Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Global Change Biology*, 20: 3557–3567. <https://doi.org/10.1111/gcb.12551>
- Martin, G., Durand, J.-L., Duru, M., Gastal, F., Julier, B., Litrico, I., Louarn, G., Médiène, S., Moreau, D., Valentin-Morison, M., Novak, S., Parnaudeau, V., Paschalidou, F., Vertès, F., Voisin, A.-S., Cellier, P. & Jeuffroy, M.-H. (2020). Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40: 17
- Meiss, H., Médiène, S., Waldhardt, R., Caneill, J., Bretagnolle, V., Reboud, X. & Munier-Jolain, N. (2010). Perennial lucerne affects weed community trajectories in grain crop rotations. *Weed Research* 50: 331–340.
- 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.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., 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.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B. & Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292: 59–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C. & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>
- Myhre, G., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. I: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Nilsson, J., Sundberg, C., Tidåker, P. & Hansson, P.-A. (2020). Regional variation in climate impact of grass-based biogas production: A Swedish case study. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122778.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122778>

- Notarnicola, B., Sala, S., Anton, A., McLaren, S.J., Saouter, E. & Sonesson, U. (2017). The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *Journal of Cleaner Production*, 140: 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.071>
- Nyfelner, D., Huguenin-Elie, O., Suter, M., Frossard, E. & Lüscher, A. (2011) Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140: 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.022>
- Peoples, M.B., Brockwell, J., Herridge, D.F., Rochester, I.J., Alves, B.I.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Dakora, F.D., Bhattarai, S., Maskey, S.L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khans, D.F., Hauggaard-Nielsen, H. & Jensen, B.S. (2009). The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48: 1-17.
- Persson, T., Bergkvist, G. & Kätterer, T. (2008). Long-term effects of crop rotations with and without perennial leys on soil carbon stocks and grain yields of winter wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81: 193–202. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9144-0>
- Poeplau, C., Aronsson, H., Myrbeck, Å. & Kätterer, T. (2015). Effect of perennial ryegrass cover crop on soil organic carbon stocks in southern Sweden. *Geoderma Regional*, 4: 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.01.004>
- Prechsl, U.E., Wittwer, R., van der Heijden, M.G.A., Lüscher, G., Jeanneret, P. & Nemecek, T. (2017). Assessing the environmental impacts of cropping systems and cover crops: Life cycle assessment of FAST, a long-term arable farming field experiment. *Agricultural Systems*, 157: 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.011>
- Prieto, I., Violle, C., Barre, P., Durand, J.L., Ghesquiere, M. & Litrico, I. (2015) Complementary effects of species and genetic diversity on productivity and stability of sown grasslands. *Nature Plants* 1:15033. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.33>
- Röös, E., Zira, S., Åkerfeldt, M. (kommande). Minskad klimatpåverkan med vallfoder till gris - beräkning av klimatavtrycket ur ett livscykelperspektiv. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Santamaría-Fernández, M., Molinuevo-Salces, B., Kiel, P., Steinfeldt, S., Uellendahl, H. & Lübeck, M. (2017). Lactic acid fermentation for refining proteins from green crops and obtaining a high quality feed product for monogastric animals. *Journal of Cleaner Production*, 162: 875–881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.115>
- SCB (2010). *Plant protection products in agriculture and horticulture - Use in crops*. (MI 31 SM 1101). Statistics Sweden.
- Smith, P. (2005). An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: influence of direct human-induced, indirect and natural effects. *European Journal of Soil Science*, 56: 673–680. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00708.x>
- Sjursen, H. (2001). Change of the Weed Seed Bank during the First Complete Six-Course Crop Rotation after Conversion from Conventional to Organic Farming, *Biological Agriculture & Horticulture* 19:1 71-90.
- Tang, S. Guo, J., Li, S., Li, J., Xie, S., Zhai, X., Wang, C., Zhang, Y. & Wang, K. (2019). Synthesis of soil carbon losses in response to conversion of grassland to agriculture land. *Soil & Tillage Research* 185: 29 – 35.

- Tidåker, P., Rosenqvist, H. & Bergkvist, G. (2016). *Räkna med vall. Hur påverkas ekonomi och miljö när vall införs i spannmålsdominerade växtföljder?* (445). Uppsala: JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik.
- Tidåker, P., Sundberg, C., Öborn, I., Kätterer, T. & Bergkvist, G. (2014). Rotational grass/clover for biogas integrated with grain production – A life cycle perspective. *Agricultural Systems*, 129: 133–141.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.015>
- Tilman, D., Hill, J. & Lehman, C. (2006). Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. *Science*, 314: 1598–1600.
<https://doi.org/10.1126/science.1133306>
- Zani, C.F., Gowing, J., Abbott, G.D., Taylor, J.A., Lopez-Capel, E. & Cooper, J. (2020). Grazed temporary grass-clover leys in crop rotations can have a positive impact on soil quality under both conventional and organic agricultural systems. *European Journal of Soil Science*, 72: 1513–1529.
<https://doi.org/10.1111/ejss.13002>

