



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för mark och miljö



Mellangrödor i växtföljden

– för kolinlagring och effektivt kväveutnyttjande

*Helena Aronsson, Maria Ernfors, Thomas Kätterer, Martin Bolinder,
Sven-Erik Svensson, David Hansson, Thomas Prade och
Göran Bergkvist*



Titel: Mellangrödor i växtföljden – för kolinlagring och effektivt kväveutnyttjande

Författare: Helena Aronsson, Maria Ernfors, Thomas Kätterer, Martin Bolinder, Sven-Erik Svensson, David Hansson, Thomas Prade, Göran Bergkvist

Kontakt: Helena.Aronsson@slu.se, 018 – 67 24 66

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2023

Omslagsbild: Peter Sylwan

Serietitel: Ekohydrologi

Delnummer i serien: 179

ISSN: 0347-9307

ISRN: SLU-VV-EKOHYD-179-SE

Elektronisk publicering: <http://pub.epsilon.slu.se>

Bibliografisk referens: Aronsson, H., Ernfors, M., Kätterer, T., Bolinder, M., Svensson, S-E., Hansson, D., Prade, T., Bergkvist, G. (2023). *Mellangrödor i växtföljden – för kolinlagring och effektivt kväveutnyttjande*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet. (Ekohydrologi, 179)

Förord

Denna rapport utfördes av SLU på uppdrag av Jordbruksverket. Syftet var att sammanställa kunskap om mellangrödors funktioner, med tyngdpunkt på kolinlagring och kväveomsättning i marken och effekter på kväveförluster till luft och vatten. Rapporten består av en kunskapsgenomgång, en inventering av data från fältförsök samt en sammanfattning av odlares erfarenheter vid en workshop. I inventeringen av data ingick både publicerade och opublicerade studier. Datasammanställningen gör inte anspråk på att vara heltäckande, och det pågår också studier där data ännu inte fanns tillgänglig våren 2023.

Helena Aronsson har ansvarat för sammanställning av resultat från studier av mellangrödor, och har med stöd av Maria Ernfors haft huvudansvaret för rapportens innehåll och utformning. Alla författare har bidragit med granskning, dataunderlag eller textbidrag inom sina expertområden. Vi riktar ett stort tack till lantbrukare och rådgivare som delgav sina erfarenheter om odling av mellangrödor vid en workshop våren 2022.

Helena Aronsson, Maria Ernfors, Thomas Kätterer, Martin Bolinder, Sven-Erik Svensson, David Hansson, Thomas Prade och Göran Bergkvist.

Uppsala april 2023

Innehåll

| | |
|--|----|
| Förord..... | 3 |
| Innehåll..... | 4 |
| Sammanfattning..... | 6 |
| Summary..... | 7 |
| 1 Inledning..... | 8 |
| 1.1 Vad är en mellangröda?..... | 8 |
| 1.2 Rapportens innehåll..... | 9 |
| 2 Kolinlagring i korthet..... | 9 |
| 2.1 Principer för kolinlagring och nettoeffekt..... | 9 |
| 2.2 Odlingsåtgärder och kolinlagring..... | 11 |
| 2.3 Mellangrödans bidrag till kolinlagring..... | 11 |
| 2.4 Mätningar och modeller för att uppskatta kolinlagring..... | 12 |
| 3 Kol- och kväveflöden i odlingssystem med mellangröda..... | 13 |
| 3.1 Tillväxt av biomassa..... | 13 |
| 3.2 Kol- och kväve mineralisering av växtmaterial..... | 18 |
| 3.3 Inlagring av kol och kväve..... | 18 |
| 3.4. Kväveläckage och balans med förfruktseffekt..... | 24 |
| 3.5 Förluster av kväve till luft – lustgas..... | 29 |
| 3.6 Förluster av kväve till luft – ammoniakavgång..... | 35 |
| 4 Fältnätningar av mellangrödors biomassa..... | 36 |
| 4.1 Sammanställning av försöksdata..... | 36 |
| 4.2 Biomassa..... | 38 |
| 4.3 Kväve- och kolhalter..... | 45 |
| 5 Mellangrödor i växtföljden..... | 46 |
| 5.1 Friskare grödor med mellangröda?..... | 46 |
| 5.2 Mellangröda för ogräskontroll..... | 48 |
| 5.3 Mellangröda för skörd..... | 50 |
| 5.4 Arter och artblandningar – funktion och odlingssäkerhet..... | 52 |
| 6 Några odlares erfarenheter av mellangrödor..... | 54 |
| 6.1 Etablering – tid, metod och jordart..... | 55 |
| 6.2 Placering i växtföljden..... | 56 |
| 6.3 Strategier för artval..... | 56 |
| 6.4 Övergång till nästa gröda..... | 57 |
| 7 Kunskapsbehov..... | 58 |
| 7.1 Odlarnas frågor..... | 58 |

| | |
|---|----|
| 7.2 Forskningsfrågor | 58 |
| 7.3 Behov för miljö- och klimatrapporeringen | 59 |
| 7.4 Certifiering, rådgivning och åtgärdsprogram | 60 |
| 7.5 Framtidens odlingsystem | 60 |
| 8 Referenser | 61 |
| Appendix..... | 74 |

Sammanfattning

Rapporten beskriver mellangrödors funktion för kolinlagring i jordbruksmark i relation till andra funktioner och miljörisker. Den består av en kunskaps-genomgång, en inventering av data från fältförsök samt en sammanfattning av odlares erfarenheter vid en workshop. Vår definition av mellangröda är: *En gröda som har sin huvudsakliga tillväxt mellan två huvudgrödor, och där syftet med att odla mellangrödan kan variera.*

Mellangrödan ger kolinlagring, särskilt rötterna

Kolinlagringen av en mellangröda har uppskattats till ca 320 kg kol i medeltal per ha och år, men variationen är stor. Vi sammanställde resultat från fältförsök med mellangrödor under 30 år. För insådda gräsfånggrödor skiljer sig biomassaproduktionen i medeltal inte så mycket åt mellan olika regioner, medan variationen är större för eftersådda mellangrödor. Det saknas kunskap för att kunna ge konkreta råd om hur artval och jordbearbetningsstrategier m.m. för mellangröda kan användas för att optimera stabiliseringsprocesserna för kol i marken. Mellangrödans rötter bidrar med ca 2,5 gånger större inlagring än den ovanjordiska grönmassan. Mätningar vi funnit visar en stor variation i viktförhållandet mellan skott och rot, som beror på arters variation, men också på osäkerheter i provtagning och metoder.

Utmaningar för odlarna

Både försök och odlares erfarenheter vittnar om utmaningar med sådd av mellangrödor efter skörd, särskilt på jordar med hög lerhalt. Det handlar om att hinna så direkt efter huvudgrödans skörd för att lyckas med etableringen och för att utnyttja hösten för tillväxt. Att ge sådd av mellangrödan lika hög prioritet som en huvudgröda var ett råd som erfarna odlare poängterade vid en workshop. Det finns olika tankesätt och strategier kring val av arter, beroende på syftet med mellangrödan. Genom artblandningar kan man också kombinera funktioner. Det finns inga tydliga råd för arter som särskilt främjar kolinlagring utan det viktigaste är stor tillväxt, hög kol-kväve-kvot (C/N-kvot), stor rotbiomassa samt baljväxtinslag.

Hushållning med kvävet

En nordisk sammanställning visade att mellangrödor i medeltal minskade kväveläckaget med drygt 40 %. Tidpunkt för nedbrukning eller kemisk avdödning är metoder för att styra återmineraliseringen och kväveverkan i nästa gröda. För frostkänsliga mellangrödor med låg C/N-kvot finns en risk att kvävet frigörs så snabbt att det hinner utlakas innan våren. Under sådana förhållanden ökar också risken för lustgasemissioner. Mer kunskap behövs om hur kväveomsättning påverkas och hur lustgasemissioner kan minimeras, för att kunna anpassa mellangrödotesystemen efter olika odlingskrav och klimatets förändring.

Summary

The report describes the function of cover crops for carbon storage in arable soils, in relation to other functions and risks. It consists of a literature review, an inventory of data from field trials and a summary of growers' experiences.

Definition of a cover crop: *A crop which has its main growth between two main crops, where the purposes of growing it can vary.*

The cover crop provides carbon storage

The carbon storage of a cover crop is on average 320 kg C per ha and year, but with large variation. We compiled results from field trials over 30 years. For undersown cover crops, biomass production on average does not differ much between different regions. The variation is greater for cover crops sown after harvest of the main crop. There is a lack of knowledge to be able to give concrete advice on how to use different species, tillage strategies, etc. in order to optimize the carbon stabilization in the soil. The roots of cover crop contribute with approx. 2.5 times greater storage than the aboveground biomass. We found large variations in the weight ratio between shoots and roots the field trials, due to variation between species, but also to uncertainties in sampling methods.

Challenges for growers

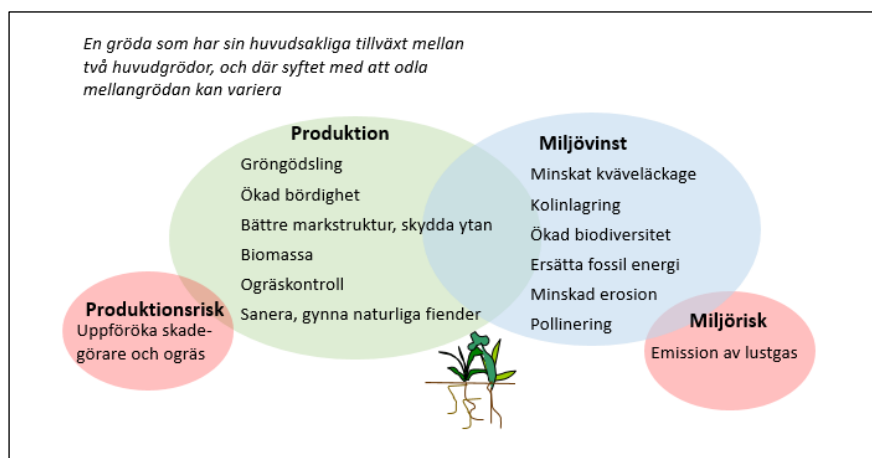
Both trials and grower experience confirm the challenges of sowing cover crops after harvest, especially on soils with a high clay content. It's a matter of being able to sow directly after the harvest of the main crop for successful germination and to use the autumn period for growth. Giving the sowing of the cover crop as high a priority as a main crop was advice that experienced growers emphasized at a workshop. There are different possible strategies regarding the choice of species, depending on the purpose of the cover crop. Through species mixtures, functions can be combined. There is no clear advice for species selection that specifically promotes carbon storage. Important characteristics of a cover crop are large growth, high C/N, large root biomass and use of legumes.

Cover crops save nitrogen but difficult to secure the system completely

Nordic studies showed an average reduction of nitrogen leaching of more than 40% with cover crops. Timing of incorporation or chemical treatment are tools to control N mineralization and fertilizer effect. For frost-sensitive cover crops with low C/N, there is a risk that nitrogen is released quickly and will contribute to leaching before spring. Under such conditions, the risk of nitrous oxide emissions also increases. More knowledge is needed about how nitrogen turnover and nitrous oxide emissions are affected by different factors, in order to adapt cover crop systems to climate change.

1 Inledning

Klimatförändringen innebär bland annat mildare och blötare höstar. Det gör att det blir allt viktigare att hålla marken bevuxen under så stor del av året som möjligt för att begränsa kväveläckaget från jordbruksmarken och skydda markytan mot erosion. Mellangrödorna är betydelsefulla för jordbrukets anpassning till ett förändrat klimat, men också för att minska påverkan på klimatet genom att bidra till kolinlagring i marken. Vårt relativt kyliga och fuktiga klimat erbjuder goda förutsättningar för kolinlagring, men innebär också utmaningar när det gäller att förlänga odlingstiden av grödor långt in på hösten. Forskning om mellangrödor för minskat kväveläckage inleddes i de nordiska länderna under 1980-talet. De benämndes då oftast fånggrödor, eftersom syftet med odlingen var att fånga kvävet innan det läckte ut till sjöar och vattendrag. De odlingskoncept som växt fram i samverkan mellan forskning, rådgivning och jordbrukare sedan dess har blivit alltmer intressanta att utvärdera och optimera för alla de funktioner som odlingsystem med mellangrödor ger (figur 1). Samtidigt krävs också en helhetssyn för att göra avvägningar gentemot eventuella risker för ökade emissioner m.m. för att optimera odlingsystem med mellangrödor i olika hänseenden (Aronsson, 2018; Rivière m.fl., 2022).



Figur 1. Mellangrödor har många potentiella funktioner i växtodlingsystemet, både vad avser produktionsaspekter och minskad miljöpåverkan, vilket figuren visar exempel på. Funktioner för produktion och miljö sammanfaller till stor del, men det finns också risk för negativa effekter i system med stora flöden av kol och växtnäring.

1.1 Vad är en mellangröda?

Att odla en gröda mellan huvudgrödorna kan ha olika syften och det används en rad olika och delvis överlappande benämningar, som mellangröda, fånggröda, täckgröda och bottengröda. På engelska används oftast cover crop men också exempelvis intermediate crop eller catch crop. Vi använder här benämningen

mellangröda som ett samlingsbegrepp för alla tänkbara syften och funktioner, med följande definition: *En gröda som har sin huvudsakliga tillväxt mellan två huvudgrödor, och där syftet med att odla mellangrödan kan variera.* Det generella syftet med att odla mellangrödor är att understödja odlingssystemet, men det specifika syftet kan skilja beroende på valda grödor och behov.

Att odla mellangrödor för minskat kväveläckage, då ofta kallade fånggrödor, är något som lantbrukare har kunnat erhålla ekonomisk ersättning för sedan 1990-talet. Miljöersättningen för fånggröda kan lantbrukare söka i nitratkänsliga områden och den har särskilda villkor för artval, så- och brytningstid. Från och med 2023 finns också en ersättning för funktionen att öka inlagringen av kol i marken, ”Mellangröda för kolinlagring”. Den ettåriga ersättningen går att söka i alla områden utom i stödområde 1-5, det vill säga ersättningen gäller söder om en ungefärlig linje mellan Karlstad och Gävle. Information om ersättningarna finns på Jordbruksverkets hemsida (jordbruksverket.se/mellangrodor).

1.2 Rapportens innehåll

I denna rapport redovisas kunskap om mellangrödor med tyngdpunkt på funktion och nyttjande i odlingssystemen för ökad kolinlagring och hög kväveeffektivitet. De tre inledande kapitlen innehåller en allmän kunskapsgenomgång av mellangrödors olika effekter på kol- och kväveflöden i mark- och växtsystemet som ett underlag att värdera nyttor gentemot de risker som finns kring oönskade emissioner som kan uppstå i system med stor omsättning av kol och kväve. I kapitel 4 presenteras data från mätningar som gjorts av mellangrödors biomassa, kol- och kväveinnehåll, även tidigare publicerat material. I kapitel 5 och 6 diskuteras odlingsaspekter med mellangrödor för kolinlagring och i kapitel 7 sammanfattas kunskapsbehov och forskningsfrågor.

2 Kolinlagring i korthet

Det är fotosyntesen, uppbyggnad av kolföreningar i växtbiomassa, som ger förutsättning för kolinlagring i marken. Bidraget kan ske direkt på växtplatsen via rotexudat, färska skörderester, biomassa från mellangrödan med mera, eller så tillförs kolet jorden efter att växtbiomassa har passerat djurhållning (stallgödsel), humankonsumtion (t.ex. rötslam) eller andra processer (t.ex. kompostering, rötning eller pyrolys).

2.1 Principer för kolinlagring och nettoeffekt

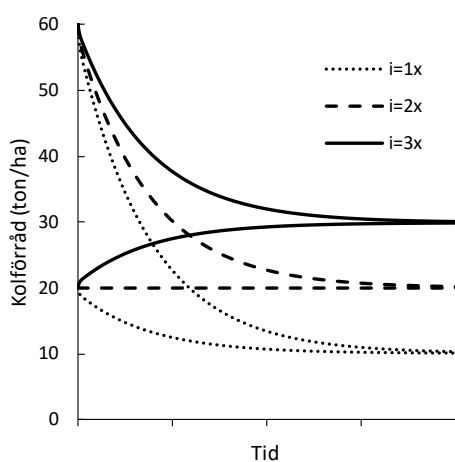
2.1.1 Kolbalans

Kolbalansen beräknas som skillnaden mellan kol tillfört med biomassa och de förluster som sker genom nedbrytning och mineralisering till koldioxid, jorderosion och läckage av vattenlösligt kol. Om balansen är positiv har det skett en kolinlagring. För jordbruksjordar i Sverige är erosion och läckage av kol till vattenmiljön inte helt obetydliga men oftast inget som man behöver ta hänsyn till i en kolbalans eftersom de andra posterna i balansen är mycket större (Linefur m.fl.,

2022). Om ett fält förlorar kol genom läckage eller erosion behöver det inte heller betyda en kolförlust sett i ett landskapsperspektiv eftersom det kolet kan fångas upp nedströms i sediment. Hur stor andel av växtbiomassans kol som mineraliseras till CO₂, och hur mycket som inlagras i marken, beror av olika odlingsfaktorer men också av klimat och jordart. I tempererat klimat tenderar kolinlagringen att vara något större per mängd tillförd biomassa än i tropiskt klimat, enligt Kätterer & Bolinder (2022) som analyserade ett stort antal studier. Det beror på långsammare nedbrytningsprocesser i svala och fuktiga klimat. Allra långsammast sker nedbrytningen i de riktigt våta miljöerna, t.ex. kärr och mossar, där växtmaterial bara delvis bryts ned och istället konserveras.

2.1.2 Historien påverkar nettoeffekten

Jordens odlingshistoria och mullhalt påverkar hur kolförrådet kommer att förändras över tid när biomassa tillförs, exempelvis med en mellangröda. Markens mullhalt avgör om man erhåller en ökande kolmängd i marken på den aktuella platsen (nettoinlagring, ”carbon sequestration”), om man bara dämpar en sjunkande trend eller om man får ett nollsummespel, det vill säga att det man tillför är i balans med det som mineraliseras. Därför kan samma åtgärd och samma mängd tillförd biomassa resultera i en upp- eller nedgång av kolförrådet på olika jordar. Oavsett om en ökad tillförsel av biomassa till marken ökar eller minskar kolmängden i marken har den en positiv inverkan på klimatet, antingen genom att den minskar pågående kolförluster eller att den leder till ökat kolförråd, vilket beskrivs av Kätterer & Bolinder (2022) i figur 2.

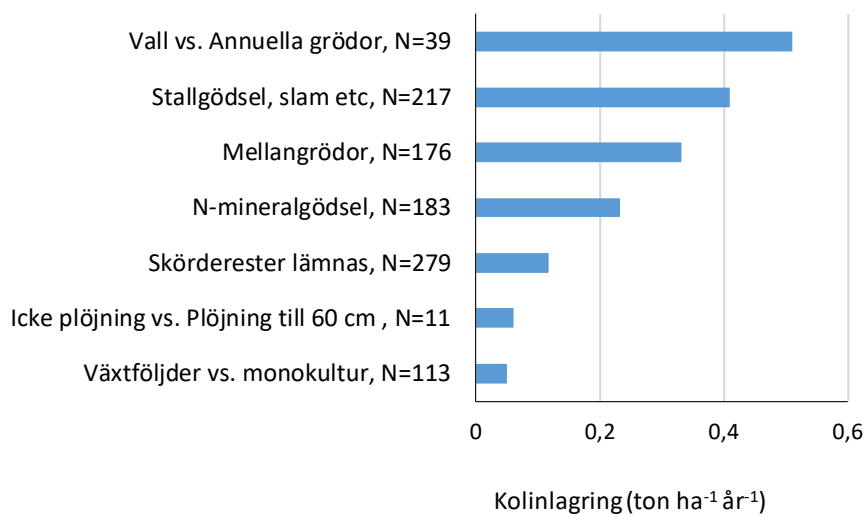


Figur 2. Ingångsvärdet för kol i marken påverkar hur det sedan utvecklas över tid, vilket visas för två fiktiva jordar med olika ingångsnivåer och olika tillförsel av biomassa (t.ex. mellangröda). Bara i jorden med lägst ingångsvärde och vid störst tillförsel (3x) ökar kolmängden i marken. Men kolinlagringen ökar i båda jordarna när tillförsel av biomassa ökar, dvs tillförseln dämpar den sjunkande trenden. Båda jordarna når så småningom samma jämviktsläge där tillförseln av kol är lika stor som mineraliseringen, från Kätterer & Bolinder (2022).

Enligt klimatrapporeringen för Sverige har skogsmarken en nettoinlagring av kol (negativa utsläpp). Jordbruksmarken som helhet uppvisar däremot nettoutsläpp av CO₂. Detta beror till stor del på en negativ kolbalans för organogena jordar, trots att dessa endast utgör några få procent av jordbruksmarken (Naturvårdsverket, 2022). Däremot har det enligt Mark- och grödoinventeringen (SLU) skett en inlagring av kol på mineraljordar, som är den mest vanliga jordtypen, under de senaste 25 åren (Poeplau m.fl., 2015a). Att lagra in kol i jordbruksmark minskar nettoutsläppen av CO₂, och i den s.k. Vägvalsutredningen framhölls fång- och mellangrödor som en av de viktigaste åtgärderna inom jordbruket för detta (SOU: 2020:4).

2.2 Odlingsåtgärder och kolinlagring

I en syntes av studier och metaanalyser från olika länder jämfördes inverkan av olika odlingsystem och odlingsåtgärder med avseende på kolinlagring (Kätterer & Bolinder, 2022). En del av studierna sammanfattas i figur 3, där det framgår att mellangrödor hör till de odlingskomponenter som har stor betydelse för kolinlagring. Störst positiv inverkan har odling av perenna grödor (t.ex. vall) istället för ettåriga samt tillförsel av organiska gödselmedel som stallgödsel och slam. Därav följer att odlingsystem med kombination av djurhållning och vallodling, t.ex. mjölkgårdar, har särskilt bra förutsättningar för kolinlagring. Detta visades bland annat i en studie av Henrysson m.fl. (2022) som jämförde miljöövervakningsdata för jordbruksmark inom olika produktionsformer. Det är dock viktigt att påpeka att den positiva effekten av stallgödsel eller andra organiska gödsel- och jordförbättringsmedel på fält- eller gårdsnivå inte direkt kan omsättas i åtgärdsprogram eftersom mängden av dessa material är begränsad och redan tillförs till jordarna. Det finns även jordar i djurhållande system som har minskande mullhalter, vilket exempelvis framgick av en internationell studie av långvarigt rotationsbete med bevattning (Whitehead, 2020). Odling utan jordbearbetning har visat sig ge större kolinlagring i matjorden än odlingsystem med jordbearbetning, men när studier där även alven ned till 60 cm djup inkluderats var skillnaderna inte längre signifikant skilda. För odlingsystem med ”bevarandjordbruk” (conservation agriculture; CA) och regenerativ odling, där både lägre jordbearbetningsintensitet och ökad marktäckning med gröda är viktiga komponenter, är det alltså vallen respektive mellangrödorna som har störst inverkan på kolinlagringen (Jordon m.fl., 2022).



Figur 3. Odlingsystem med perenna grödor ger störst bidrag till kolinlagring i marken följt av odling med stallgödseltillförsel och användning av mellangrödor, enligt en sammanställning av många studier (antal observationer anges med N=). Figuren bygger på Kätterer & Bolinder (2022).

2.3 Mellangrödans bidrag till kolinlagring

En analys av långliggande studier visade att mellangrödor bidrar med en kolinlagring av mellan 270 och 430 kg C per hektar och år (Bolinder m.fl., 2020). I

en studie där flera svenska försök med insådd gräsmellangröda ingick var kolbidraget 320 kg C per hektar och år (Poeplau & Don, 2015). I en dansk studie, också den med gräsmellangröda uppskattades bidraget till 210 kg C per hektar och år (Jensen m.fl., 2021), medan en global metaanalys gav ett medelvärde på 560 kg C per hektar och år (Jian m.fl., 2020). Det är olika faktorer som påverkar mellangrödans bidrag i varje enskilt fall, där mängden biomassa den producerar ovan och under jord är den viktigaste, se avsnitt 3.3.

2.4 Mätningar och modeller för att uppskatta kolinlagring

Att mäta mängden kol i marken är svårt av olika skäl. Markens kolförråd är mycket stort i jämförelse med kolbalansen (nettoinlagringen eller nettoförlusten av kol) under ett år. För att detektera förändringar krävs långa tidsserier, och jämförelse med en kontroll. Därför har de långliggande försöken (Kätterer m.fl., 2012) och miljöövervakningsprogram för jordbruksmarken (Poeplau m.fl., 2015a) ett unikt värde i detta sammanhang. För att inte bara kunna följa en förändring av kolhalt (%) utan även själva förrådets förändring (ton/ha) krävs också kännedom om markens skrymdensitet. Att bestämma skrymdensiteten kräver omfattande arbete med provtagning och analys, och den kan förändras över tid. Det gäller då att säkerställa att det är samma jordmassa som studeras över tid. Många studier begränsas till matjorden där den största delen av markens kol finns, men åtgärder kan även påverka marken i djupare skikt. Till exempel leder minimerad jordbearbetning till ökande kolförråd i de översta jordlagren, men kan ge utarmning av markkol längre ner i profilen Meurer et al. (2018). Djuprotade grödor kan också bygga upp ett kolförråd längre ned i marken, vilket riskerar att missas om man enbart mäter i matjorden.

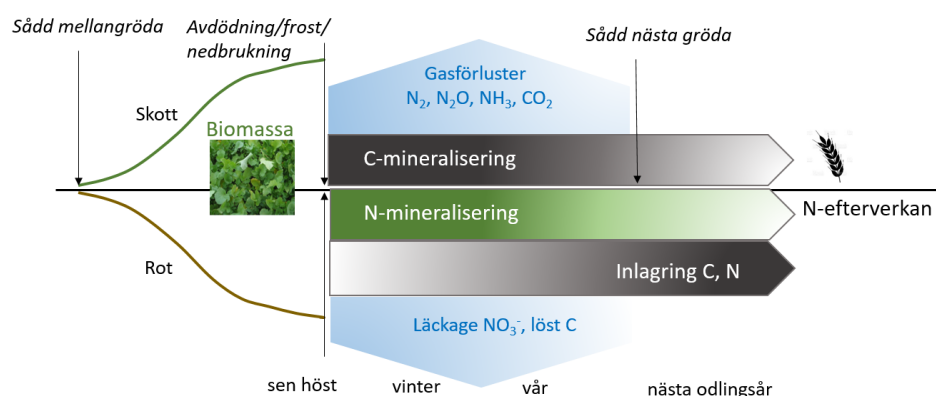
Kunskapen från de långliggande försöken har integrerats i kolbalansmodeller som är värdefulla verktyg för att tolka och bättre förstå vad som händer i marken vid olika behandlingar. De är särskilt viktiga för att göra prognoser för mullhaltens utveckling framåt i tiden, såväl på enskilda gårdar som på nationell nivå. I klimatrapporeringen inom sektorn Markanvändning, Markanvändningsförändring och Skogsbruk (LULUCF) används exempelvis modellerna C-tool (Danmark), Yasso07 (Finland) och ICBM (Sverige) för att uppskatta årliga markkolsförändringar (Blujdea m.fl., 2016). Modellen ICBM utvecklades under 1990-talet (Andrén och Kätterer, 1997) och den har en uppbyggnad som liknar flertalet av de mest använda kolbalansmodellerna, t.ex. RothC (Dechow m.fl., 2019). Modellen drivs av den tillförda mängden av växtmaterial (skott respektive rötter) och organiska gödselmedel samt en faktor som tar hänsyn till jord och klimat för platsen (Andrén m.fl., 2008). Hur tillförd biomassa fördelas mellan lättnedbrytbara och svårnedbrytbara kolpooler (humus) i marken anges av humifieringskoefficienter, och nedbrytningshastigheten styrs av nedbrytningskonstanter. Dessa parametrar kalibreras utifrån resultat från långliggande försök.

Med relativt enkla modeller kan man göra uppskattningar för att få ett underlag för åtgärdsarbete på gårdsnivå (Kröbel m.fl., 2016). Inom rådgivningen i Greppa näringen används modellen Odlingsperspektiv, ett lättanvänt verktyg som

illustrerar hur gårdens odlingssystem påverkar markens mullhalt (Greppa näringen, 2022). Modellen visar skillnader mellan olika scenarier, som exempelvis effekten av en förbättrad växtföljd jämfört med nuvarande växtföljd. Odlingsperspektiv uppdateras successivt till att bättre inkludera olika mineraliseringsförhållanden i olika regioner genom införande av komponenter från ICBM-modellen. I Odlingsperspektiv räknar man med att 12,5 % av den ovanjordiska växtbiomassans kol övergår i humus (stabil kol) när den tillförs marken. För rötter räknar man med att andelen som stabiliseras är 25 % och för organiska gödselmedel 40 %.

3 Kol- och kväveflöden i odlingssystem med mellangröda

Mellangrödans produktion av biomassa ger förutsättningarna för en rad processer i marken. De påverkar mineralisering av kväve och kol, förluster, och inlagring i marken, som i sin tur styrs av klimat- och jordartsförhållanden (figur 4).



Figur 4. Mellangrödans produktion av biomassa ovan (grön linje) och under jord (brun linje) ger förutsättningarna för en rad processer i marken som resulterar i mineralisering av kväve och kol, förluster, och inlagring i marken.

3.1 Tillväxt av biomassa

3.1.1. Såtid och tillväxtperiod är avgörande för biomassan

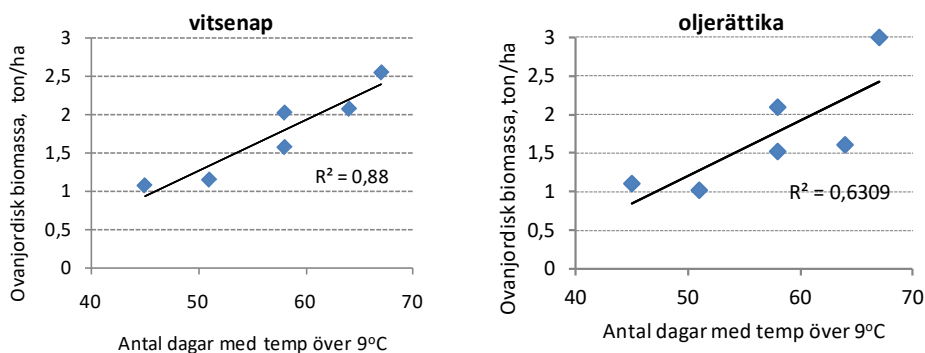
I det klimat som råder i Skandinavien är temperaturen under hösten en starkt begränsande faktor för mellangrödans tillväxt, inte minst på grund av frosttillfällena som tidigt kan avbryta tillväxten, även om det varma vädret kommer tillbaka. Därför har insådda mellangrödor av vallgräsarter och klöver varit ett framgångsrikt koncept för att få en pålitlig tillväxt av mellangröda fram till senhösten (Aronsson m.fl., 2016). Kombinationen av att mellangrödan är igång redan vid skörd av huvudgrödan och att den är frosttålig gör att hela vegetationsperioden kan utnyttjas för tillväxt, beroende på när man väljer att avdöda grödan kemiskt eller mekaniskt.

Utmaningarna med mellangrödorna som sås efter skörd av huvudgrödan är att få igång tillväxten så tidigt som möjligt under sommar/höst och att de är tillräckligt

frosttåliga för att vegetationsperioden ska utnyttjas så bra som möjligt. Det handlar inte enbart om tidpunkt för sådd utan även om att det finns markfukt nog för groningen, vilket är en av de vanligaste svårigheterna med att så mellangrödan efter skörd av huvudgrödan, se kapitel 6.

Tillgång till växtnäring, särskilt kväve, är också en faktor som kan begränsa tillväxten. Om det primära syftet med mellangrödan är att minska kväveläckaget så är liten kvävetillgång i marken inget problem, mellangrödan kan uppfylla önskad funktion även om tillväxten inte är stor. Om syftet är att producera stor mängd biomassa för skörd eller kolinlagring i marken kan gödsling med kväve eller att använda baljväxter komma i fråga, men gödsling är inte tillåten för mellangröda som odlas med miljöersättning för vare sig minskat kväveläckage eller ökad kolinlagring (Jordbruksverket.se/mellangrodor). Vid stora restkvävemängder i marken på hösten och vid gödsling ställs stora krav på tillväxtförmågan hos mellangrödan för att den ska ha kapacitet att ta upp utlakningsbart kväve från marken.

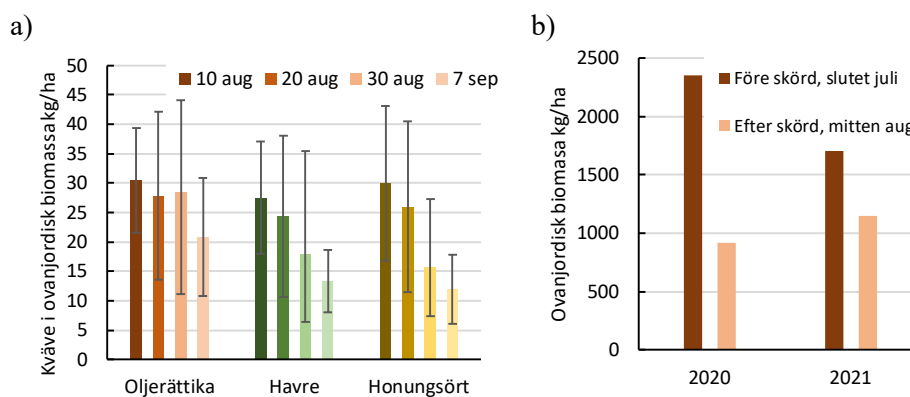
Det har gjorts en del studier av förutsättningarna för oljerättika som eftersådd mellangröda, och en tumregel är att antalet dagar med medeltemperaturer över 9°C är en indikator (Lehrke, 2000). I en svensk studie av Olsson (2009) fanns ett tydligt samband mellan antal dagar och ovanjordisk biomassa, där det krävdes ca 50 dagar för att komma över en biomassa på 1 ton/ha (figur 5).



Figur 5. En medeltemperatur över 9°C är en tumregel för att kunna räkna med god tillväxt hos arter som vitsenap och oljerättika. I en svensk studie framkom tydliga samband mellan antal dagar (>9°C) och tillväxten hos dessa mellangrödor. Bygger på Olsson (2009).

I en dansk försöksserie (2018-2021) undersöktes hur såtidpunkten för mellangröda påverkar upptaget av kväve. Serien omfattade 6 försök med oljerättika, havre och honungsört sådda efter skörd av vårkorn (figur 6, Hansen & Thomsen, 2022). Det fanns ett tydligt samband mellan såtidpunkt och kväveupptag. Kväveläckaget ökade när kväveupptaget i mellangrödan minskade. Resultaten låg till grund för ett beslut år 2022 om reduktion i tilldelning av gödselmedelskvoter för danska lantbrukare vid sådd av mellangröda senare än 20 augusti (Elly M Hansen, Århus universitet, muntl., 2022). I Danmark är mellangrödor obligatoriska och styrs av ett omfattande regelverk som bland annat kräver mellangröda för tillstånd kring kvävegödselgivor för huvudgrödorna.

Ett sätt att få igång mellangrödan tidigare är att så den före skörd av huvudgrödan. Detta har undersökts och praktiserats med varierande erfarenhet och diskuteras under avsnitt 6.1. I de danska riksförsöken (Pedersen 2020; 2021) utfördes en försöksserie på två platser där mellangrödor såddes 2-3 veckor före skörd av huvudgrödan, i jämförelse med sådd precis efter skörd. Uppkomsten var betydligt sämre vid bredsådd i växande huvudgröda, men mellangrödorna kompenserade för sämre planttäthet, och både biomassatillväxten och kväveupptaget var betydligt större vid den tidigare sådden, före skörd av huvudgrödan (figur 6).



Figur 6. I danska försök har man undersökt inverkan av såtidpunkt för mellangröda på kväveupptaget (a) respektive ovanjordisk biomassa (b) under sen höst. I a) visas resultat från 6 försök under 2018-2021, där felstaplar anger standardavvikelse för de sex försöken (bearbetade data från Hansen & Thomsen, 2022). b) visar resultat från de danska riksförsöken sammanställda utifrån Pedersen (2020 och 2021), där oljerättika såddes 2-3 veckor före skörd respektive efter skörd av huvudgrödan. Varje stapel är medelvärde av två försök som utfördes under 2020 respektive 2021.

3.1.2 Rötterna i relation till ovanjordisk biomassa

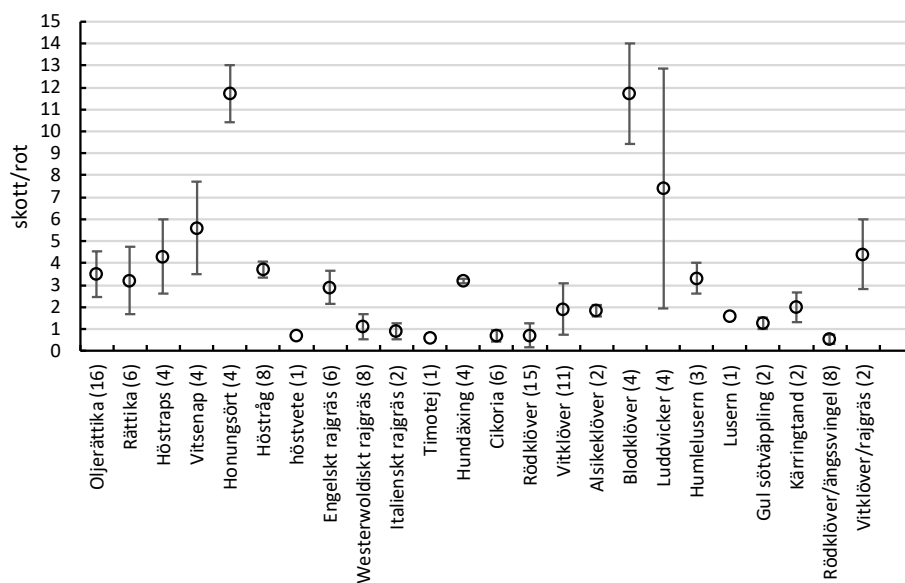
Medan ovanjordisk biomassa lätt kan uppskattas genom att klippa en gröda i fält är rotbiomassa svårare att bestämma. Oftast används destruktiva metoder som uppgrävning av enskilda plantor eller jordprovtagning till ett visst djup, där rötterna sållas eller sköljs fram (Böhm, 1979; Van Noordwijk et al., 1989). Alla rötter kommer inte att fångas upp med provtagningen, och hur stor underskattningen blir beror bland annat på hur rotfördelningen på djupet ser ut. Rent provtagningstekniskt finns också alltid en betydande risk att jord kommer med i rotproven, vilket kan få avsevärd påverkan på provens vikt. Därför bör man korrigera för det genom att mäta provens askhalt eller på annat sätt, t.ex. genom att ta hänsyn till hur koncentrationen av N eller C skiljer sig mellan rotvävnad och jorden i sig (Janzen m.fl., 2002). Förutom osäkerheten kring att få med alla rötter, och att rötter från huvudgrödan riskerar att komma med, tillkommer att en stor del av rötterna omsätts under säsongen och att rotexudat avges. Därför representerar inte den rotbiomassa man mäter vid ett visst tillfälle den totala rotbiomassan över säsongen. För att beakta rotbiomassans bidrag till kolinlagring krävs olika antaganden som komplement till eventuella mätningar. Den så kallade rhizodepositionen (tillförsel av döda rötter och rotexudat) under växtsäsongen kan motsvara 50-100 % av den rotbiomassa som provtas vid ett visst tillfälle (Bolinder m.fl., 2007; Kätterer m.fl., 2011).

Rötter studeras ibland också genom fotografering under jord, där plexiglasrör, rhizotroner, installeras i marken för kameran (Thorup-Kristensen, 2001). Rhizotronmetoden används främst för att studera rötters tillväxthastighet, rotlängd och rotjup, och kan på det sättet ge annan typ av information som är viktig för att beskriva mellangrödors rötter (figur 9). Däremot är de olika metoderna för att bestämma mängden rötter inte helt jämförbara (Wahlström m.fl., 2015).

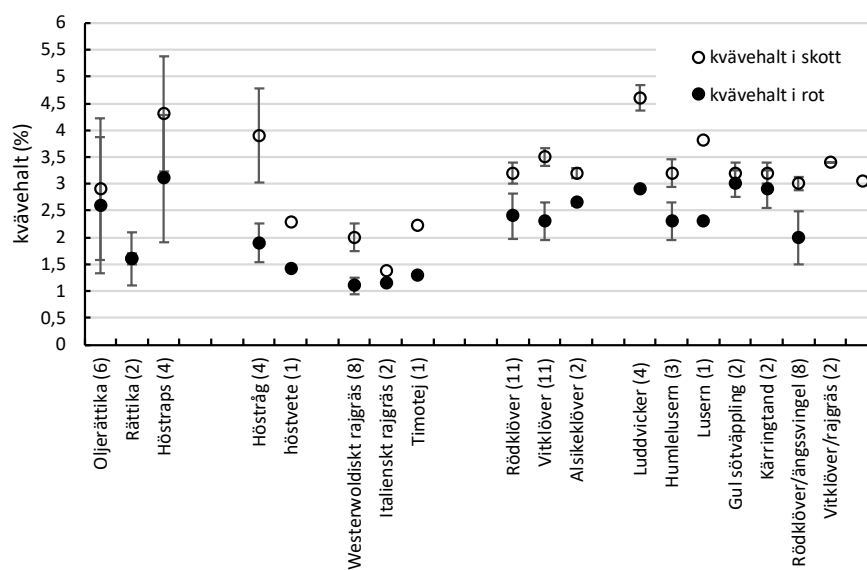
Resultat av rotmätningar i eftersådda och insådda mellangrödor i några svenska, finska och danska studier visas i figur 7. Mängden rötter är i figur 7a uttryckt som kvoten mellan skott och rot. Ett värde >1 betyder alltså att det var mer ovanjordisk biomassa än rötter vid provtagningstillfället, som i regel var på senhösten. Metoderna som användes för provtagning var uttag av en hel jordvolym där rötter tvättades fram (Sjösvärd & Svensson, 1990; Känkenen m.fl., 2003; Sørensen & Thorup-Kristensen, 2003; Känkenen & Eriksson, 2007; Larsson & Andersson, 2014; Liu m.fl., 2015) eller uppgrävning av ett antal enskilda plantor (Stenberg m.fl., 2007). En del av den stora variationen både inom och mellan arter kan bero på att grödorna vuxit olika. Intensivare gödsling kan exempelvis öka skottbiomassan mer än rotbiomassan. Chirinda m.fl. (2012) fann att mellangröderötter innehöll ca 40 % av den totala biomassan, med marginellt högre värden i ekologisk odling jämfört med konventionella, vilket skulle kunna beror på olika kvävetillgång. Variationen reflekterar dock troligen till största delen osäkerheten i hur stor andel av rötterna man fångat upp i mätningen. Provtagningsdjupet som användes i studierna var 0,2-0,45 m djup. Enligt resultaten var den ovanjordiska biomassan större än rotbiomassan på senhösten för de flesta av mellangrödorna, och för de korsblomstriga växterna i samtliga fall. Flera av gräsen hade stor andel rötter (låg skott/rot-kvot). För gräsen var det en stor variation och likaså för de olika baljväxterna. För många av arterna var det dock få observationer.

När det gäller kvävehalten i materialet var kvävehalten i rötterna som förväntat lägre än i grönmassan i samtliga fall. I medeltal för de olika grödorna var kvävehalten i den ovanjordiska biomassan 3,0 % och i rötterna 2,1 %. En tumregel för jordbruksgrödor är att stråsådesgrödornas rötter har en kvävehalt på ca 1 % och baljväxter ungefär dubbelt så hög (Janzen m.fl., 2003; IPCC, 2006: Kapitel 11). I studierna bakom figur 7 hade mellangrödor av stråsåd en kvävehalt i rötterna på 1,7 %, de korsblomstriga 2,4 %, baljväxterna 2,6 % och gräsen 1,2 %.

a)



b)



Figur 7 a) Kvoter mellan skott- och rotbiomassa enligt fältstudier (126 observationer) av mellangrödor i svenska, finska och danska försök samt b) halter av kväve i skott och rötter (73 st). Resultaten är sammanställda från studier av Sjösvärd & Svensson (1990), Känkenen m.fl. (2003), Sørensen & Thorup-Kristensen (2003), Känkenen & Eriksson (2007), Stenberg m.fl. (2007), Larsson & Andersson (2014), Liu m.fl. (2015) samt opublicerat material från projektet Klimatsmarta mellangrödor (Thomas Prade, SLU). Felstaplar anger standardavvikelser för variationer mellan olika mätvärden.

3.2 Kol- och kvävemineralisering av växtmaterial

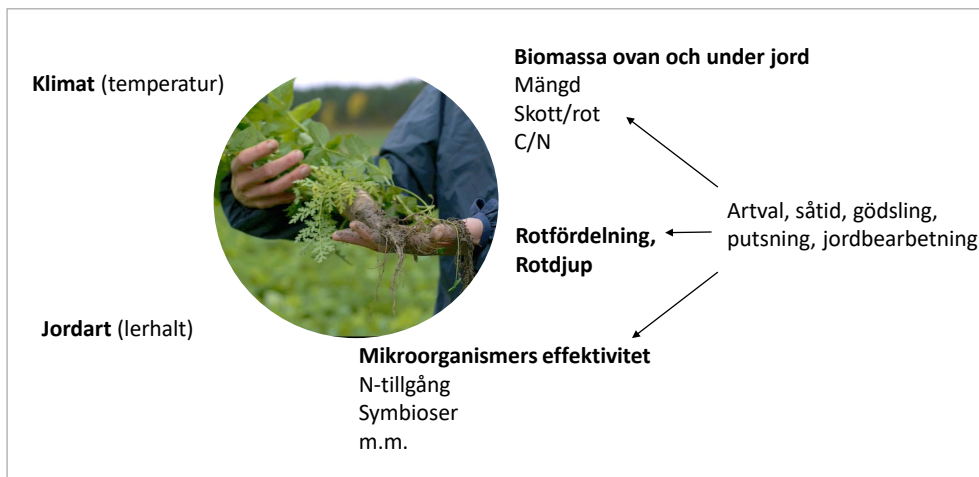
Nedbrytning av växtmaterialet påverkas bland annat av växtmaterialets kvalitet samt tidpunkten för när det dör eller brukas ned i jorden. Växtmaterialets kolföreningar avtar i nedbrytbarhet (Brady, 1984) i ordningen socker och stärkelse>protein>hemicellulosa>cellulosa>lignin, fetter, vax och tanniner. Ligninhalten är en indikator för att karaktärisera svårnedbrytbart material.

Kol- och kväveomsättningen i marken hänger nära samman med varandra. Kvoten mellan kol och kväve (C/N) i växtmaterial som tillförs jorden påverkar nedbrytningshastigheten. Låg C/N påverkar mikroorganismernas aktivitet gynnsamt i det inledande skedet av nedbrytningen (Eiland m.fl., 2001) och leder till snabb kolmineralisering. Växtmaterial med hög C/N har ofta högre ligninhalten och är därmed mer motståndskraftigt mot nedbrytning. Betydelsen av C/N, kolmineralisering och stabilisering av kol på längre sikt är dock komplex, vilket diskuteras i avsnitt 3.3. Kvoten C/N har stor betydelse för mineralkvävedynamiken i marken och ger ett mått på hur snabbt kväve frigörs i växttillgänglig form. Vid C/N runt 20 och lägre i materialet sker snabbt nettomineralisering av kväve allteftersom kolet avgår, medan kväve initialt kan immobiliseras i marken vid nedbrukning av material med C/N över 20. Eftersom kolhalten i växtmaterial är relativt stabil (ca 40 %) är det variationen i kvävehalt som främst påverkar C/N.

Det är när mellangrödan brukas ned, avdödas kemiskt eller dör av frost som nedbrytningen tar fart. Mineraliseringshastigheten påverkas, förutom av växtmaterialets sammansättning, i hög grad av temperatur och fuktighet i marken. Nedbrukning eller kemisk avdödning av en mellangroda tidigt på hösten (september) kan leda till snabb ökning av mängden mineralkväve i marken (Stenberg m.fl., 1999; Aronsson m.fl., 2011). När en mellangroda dör av frost under hösten sprängs växtcellerna sönder, vilket i minst lika hög grad som kemisk avdödning kan påverka frigörelsen av både kväve och fosfor. Det har bland annat visat sig efter frostsador på grüngödslingsvallar (Torstensson, 2003). Hur tidpunkten för avdödning påverkar mellangrodans förfruktseffekt diskuteras i avsnitt 3.4.

3.3 Inlagring av kol och kväve

Allteftersom mikroorganismerna konsumerar växtmaterialets lättomsättbara och energirika beståndsdelar mineraliseras kol och kväve. Detsamma sker med den delen av växtmaterialet som efter att ha lett till mikrobiell tillväxt återförs till den döda organiska poolen. Mängden växtbiomassa är det som främst påverkar potentialen för kolinlagring, men det är många faktorer som påverkar nedbrytning och stabilisering av kolet i marken, både kända och mindre kända (figur 8). En viktig del av kolstabiliseringen i marken är kemiskt och fysiskt skydd av det organiska materialets komponenter och rotexudat genom interaktioner med jordpartiklar och aggregat, se vidare 3.3.2.



Figur 8. Både växtmaterialens kvalitet, odlingsåtgärder, klimat och jord påverkar kolinlagring av en mellangröda. Foto: Filmsnickeriet.se

3.3.1 Mikroorganismernas roll och påverkan på kolinlagring

Mikroorganismernas nedbrytning av växtbiomassan resulterar i bildning av mer stabila kolföreningar i marken. Hur stor betydelse mikroorganismernas metaboliter har för stabilisering av kol i relation till själva växtmaterialens innehåll av svårnedbrytbara föreningar är en forskningsfråga (Whalen m.fl., 2022). Studier har visat att markens stabila kol till största delen består av molekyler med ursprung i mikrobiella processer (Basile-Doelsch m.fl., 2020).

Mikroorganismernas roll för nedbrytning och kolstabilisering är komplex, och ett område där det fortfarande saknas kunskap. Effektiviteten i mikroorganismernas utnyttjande av kolet, som handlar om hur stor andel av kolet som blir mikrobiell biomassa, brukar benämnas CUE (carbon use efficiency). Effektiviteten är inte konstant och beror av olika faktorer. Det kan också uppstå s.k. priming-effekt, det vill säga ökad mineralisering av markens mera stabila kol, när nytt material tillförs marken. Det saknas fortfarande kunskap för att identifiera alla faktorer som påverkar CUE, och framför allt vad de betyder rent kvantitativt för kolinlagringen (Kallenbach m.fl., 2019). I en sammanställning av Poirier m.fl. (2018) undersöktes mekanismer för kolstabilisering hos rotbiomasa och man lyfte fram teorin om att kväverikt material med liten andel svårnedbrytbara kolföreningar leder till större inlagring av kol i jorden på längre sikt än material med hög C/N, vilket alltså talar emot den gängse uppfattningen att hög C/N-kvot gynnar inlagring. Det kan förklaras med högre CUE under förhållanden där det finns gott om lättnedbrytbart substrat och god kvävetillgång. Det skulle delvis förklara varför mellangrödor och växtföljder med baljväxter visat sig ge större kolinlagring än de utan baljväxter (Jian m.fl., 2020; Land, 2021). Det kan också vara en delförklaring till varför tillförsel av kvävegödsel stimulerar kolinlagring (Spohn m.fl., 2016; Tiefenbacher m.fl., 2021).

Att genom olika odlingsåtgärder kunna påverka andelen kol som binds in i mikrobiell form istället för att respireras skulle ge effektivare kolinlagring. Det har bland annat att göra med markens fysikaliska och kemiska egenskaper och hur mikrobsamhällets sammansättning och aktivitet påverkas av växtföljd, baljväxter, mykorrhiza, odlingsmetoder, gödsling m.m. (Six m.fl., 2006; Chavarria m.fl.,

2016; Poirier m.fl., 2018). Enligt en sammanställning av Six m.fl. (2006) skulle odlingssystem med ekologisk odling, reducerad jordbearbetning och mellangrödor kunna leda till att mängden mikrobiell biomassa ökar och förskjuts till att bli mer svampdominerad vilket gynnar uppbyggnad av markens organiska material. Det finns andra studier som indikerar att mellangrödor och stor vegetationstäckning är kopplat till bakterier i mikrosamhället och större avkastning hos grödor (Garland m.fl., 2021).

3.3.2 Kolinlagring av mellangrödans grönmassa och rötter

Mellangrödornas färskvikt varierar mer än dess torrsubstansvikt, eftersom de har olika vattenhalt, men det är mängden torrsubstans som är viktigast för att bedöma kolinlagringen. För 3 ton färskmassa utgör torrvikten exempelvis 300 kg för oljerättika med 10 % torrsubstanshalt och 600 kg för gräsmaterial med 20 % torrsubstanshalt. Motsvarande kolinnehåll skulle då vara 120 kg C för oljerättikan och 240 kg C för gräset (ca 40 % C). I grova drag kan man räkna med att motsvarande 5-15 % av grönmassans kolinnehåll lagras in i marken över längre tid. Data från långliggande fältförsök (10-50 år) visar att rötternas bidrag är två och en halv gånger större, vilket betyder att 13-38 % av rotbiomassans kol inlagras (Bolinder m.fl., 1999; Rasse m.fl., 2005; Kätterer m.fl., 2011; 2014).

Växtmateriallets motståndskraft mot nedbrytning är en av de huvudmekanismer som anges för kolets stabilisering även om det alltså inte är entydigt. Växtmaterial med hög C/N-kvot har stor andel långa och mer svårnedbrytbara kolkedjor, t.ex. lignin, vilket gynnar kolinlagringen på kort sikt. För kolinlagring på lång sikt har sambandet mellan lignin/N samt C/N och kolinlagring visat sig vara svagt eller till och med negativt enligt en sammanställning av Jian m.fl. (2020), vilket alltså stärker teorin om att det finns andra mekanismer inblandade som har med mikrobernas effektivitet att gör (Poirier m.fl., 2018, avsnitt 3.3.1). Kvoten mellan lignin och kväve är ändå en av indikatorerna som används för att bedöma potentialen för kolinlagring (Rasse m.fl., 2005). Halten av lignin i en gröda är delvis artberoende, men beror främst på grödans utvecklingsstadium. Att rötterna har en högre ligninhalt än den ovanjordiska biomassan är en av flera orsaker till att de bidrar till kolinlagring i högre grad än grönmassa.

Förutom växtmateriallets motståndskraft mot nedbrytning finns två andra huvudmekanismer för kolets stabilisering i marken; kemiskt skydd genom bindning av kolföreningar till aktiva mineralytor i markens mineral samt fysiskt skydd mot nedbrytning genom instängning i jordaggregat. För rötterna är de två sistnämnda särskilt viktiga. Poirier m.fl. (2018) beskrev och undersökte olika rotegenskaper som har betydelse för kolets stabilisering. En slutsats var bland annat att egenskaper som främjar aggregatbildning i marken, t.ex. mykorrhiza, är gynnsamma för kolstabilisering. Här kan tilläggas att de flesta växter utom korsblomstriga har mykorrhiza. Vidare är rotdjupet en intressant egenskap eftersom nedbrytningshastigheten är lägre långt ned i marken än i matjorden. Rötter som går på djupet, och som utnyttjar en stor jordvolym, kan också tänkas få en större kontakt med ytor på markpartiklar som kan binda kolföreningar.

3.3.3 Jordart och klimat påverkar kolets stabilisering och inlagring

Bindning till markens mineral och fysiskt skydd i aggregat hänger nära samman med jordarten, främst lerhalten (Rasse m.fl., 2005). Lerpartiklar har tillsammans en stor yta som kan adsorbera kolföreningar där särskilt förekomsten av järn- och aluminiumoxider och hydroxider har stor betydelse (Rasmussen m.fl., 2018; Fukumasu m.fl., 2021). I lerhaltiga jordar bildas också aggregat som innehåller syrefria mikromiljöer där nedbrytningen går långsamt (Lacroix m.fl., 2022). Därför bevaras kolet bättre i jordar med hög lerhalt jämfört med lättare jordar. I en global metaanalys där man undersökte olika faktorer betydelse för mellangrödors bidrag till kolinlagring fann man just att jordar av finkornigt material fick större ökning av kolförrådet än de mer grovkorniga (Jian m.fl., 2020).

Jian m.fl. (2020) kunde också konstatera att tempererat klimat är mer gynnsamt för kolinlagring i jämförelse med varmare klimat. Både temperatur och vattenbalansförhållanden skiljer sig åt mellan klimatzoner, men för kolinlagringen har temperaturskillnaderna störst betydelse (Fortin m.fl., 2011). I en beräkning av kolbalansen för svenska produktionsregioner med kolmodellen ICBM, för perioden 1990-2004, fann man en ökning av kolhalten i marken i norra Sverige som främst kunde förklaras av klimatfaktorn. Klimatfaktorn baseras i modellen på markens relativa vattenhalt och temperatur, vilket i sin tur även beror på grad av jordbearbetning. Att inlagringen av kol var större i norr, trots att skördarna var lägre och efterlämnade mindre mängd skörderester än i södra Sverige, berodde på att detta kompenserades av en lägre nedbrytningshastighet (Andrén m.fl., 2008). Omvänt skulle man kunna tänka sig att kolinlagringen och markens kolhalt blir lägre i ett varmare klimat, men slutsatsen i studien av Andrén m.fl. (2008) blev att kolinlagringen trots allt inte kommer att minska, eftersom upptaget i växtbiomassa förväntas öka mer än nedbrytningen.

3.3.4 Inlagring av kväve och fosfor

Inlagring av kol betyder även inlagring av kväve och andra ämnen i marken. Vid en inlagring av 100 kg kol inlagras samtidigt ca 7-10 kg kväve, och 0,5-2 kg fosfor (Cleveland & Liptzin, 2007; Coonan m.fl., 2020). Kolinlagring betyder att växtnäringsinnehållet i marken ökar, vilket är en del av markens bördighet och långsiktiga förmåga att leverera växtnäring. Även om vi benämner dem stabila kolföreningar (humus), så sker även av dessa en långsam nedbrytning där kväve, fosfor, svavel och andra näringsämnen frigörs. Den drivs starkt av klimatet, och man brukar räkna med att 0,5-2 % av markens humusförråd mineraliseras årligen, där sandiga jordar ligger högre än lerjordar, som ger ett bättre skydd mot nedbrytning.

3.3.5 Kolinlagring i relation till växtföljd och jordbearbetningssystem

För att bedöma mellangrödans bidrag till kolinlagringen behöver den sättas i ett växtföljdssammanhang. Om mellangrödan riskerar att sänka skörden av huvudgrödan eller bidrar till att öka skördarna genom en förfruktseffekt kommer det att påverka även huvudgrödans kolbidrag på grund av olika mängder växtrester. Det kan få genomslag när man ser över hela växtföljden. Studier av insådda gräsfånggrödor har visat att de kan ge en viss negativ påverkan på huvudgrödan under insåningsåret. Engelskt rajgräs gav en skördereduktion på i medeltal 2-3 %

enligt en sammanställning av Bøe (2019). Förfrukteffekten av gräs är oftast låg, men mellangrödor med baljväxter ger ofta positiva förfruktseffekter (Dabney m.fl., 2010). På lång sikt är mellangrödor positivt för både skördar och kolinlagring genom att de gynnar jorden som växtplats på olika sätt, inte minst genom att gynna markstrukturen (Xiaoxiao m.fl., 2022; Piccolo m.fl., 2022) och växtnäringsleveransen (Rietra m.fl., 2022).

En mellangröda påverkar kolinlagringen framförallt om alternativet hade varit att marken legat bar. Om en höstsådd gröda ersätts med en mellangröda följt av vårsådd gröda är det inte säkert att kolinlagringen blir större. Det handlar till stor del om den totala mängden biomassa som produceras ovan och under jord totalt sett i växtföljden. I en metaanalys av växtföljders betydelse för kolinlagring (Land, 2021) var en av slutsatserna att varierande växtföljder, växtföljder med fleråriga växter och växtföljder med baljväxter är positivt för kolinlagring. Förklaringarna finns till stor del i mängden biomassa som produceras men troligen också i faktorer som har att göra med mikroorganismers utnyttjande av kolet och hur stabiliseringsmekanismer för kolet påverkas, se avsnitt 3.3.1.

I odlingskoncept som conservation agriculture (CA) och regenerativ odling bearbetas jorden så lite och så ytligt som möjligt i kombination med en varierad växtföljd. Samtidigt är marken täckt med en gröda så stor del av året som möjligt. Förändrad fördelning av kol i marken, mer konstant växttäckning, ostörda rötter och svampmycel, mer maskar, förändrad mikrobiell sammansättning m.m. är möjliga faktorer som på olika sätt påverkar kol- och kväveomsättningen i marken i ett komplext samspel. Om man renodlar faktorn jordbearbetning så visar de flesta studier på att reducerad jordbearbetning och direktsådd har ganska liten effekt på kolinlagringen i sig, i jämförelse med effekten av mellangröda (figur 3). Om ett ändrat jordbearbetningssystem påverkar skörden negativt så kommer också det att påverka kolinlagringen eftersom det påverkar mängden växtrester (Virto et al., 2012). I en metaanalys av Pittelkow m.fl. (2015) jämfördes skördar i CA-system med konventionella jordbearbetade system och man separerade ut faktorerna direktsådd, växtrester, mellangrödor samt växtföljd. Enligt resultaten gav direktsådd tillsammans med övriga delar av CA-konceptet skördar liknande de i konventionella system, och under torra förhållanden ibland högre. Enbart direktsådd gav däremot lägre skördar.

3.3.6 Arters betydelse för kolinlagring

Det finns ingen generell guide till hur olika arter påverkar kolinlagring, men några viktiga egenskaper listas nedan, där produktion av biomassa är den mest betydelsefulla:

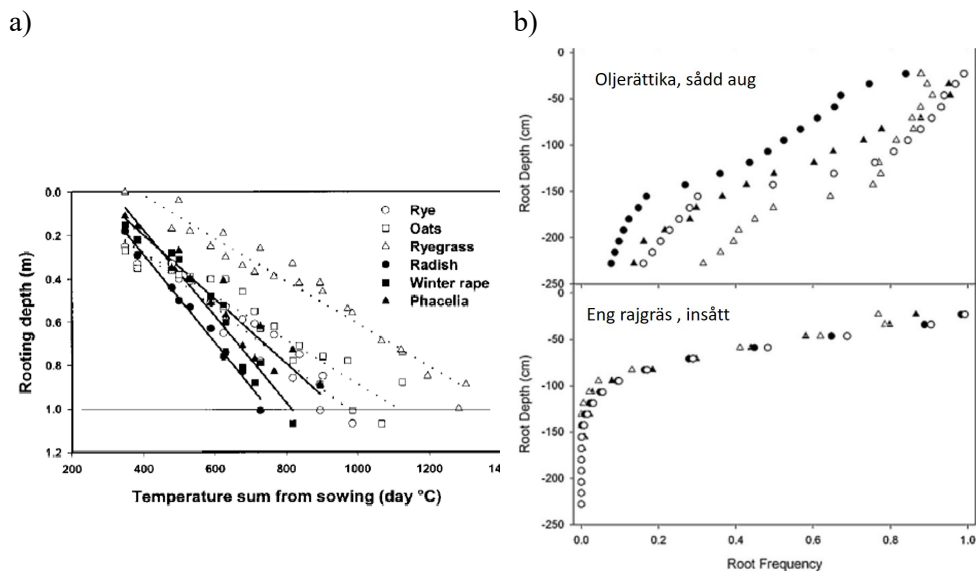
1. Stor produktion av biomassa, med en stor andel rötter
2. Hög C/N-kvot hos biomassan
3. Rötter som går på djupet
4. Baljväxter i renbestånd eller i samodling med icke-kvävefixerare

För dessa faktorer är det endast effekten av biomassa ovan och under jord som kunnat kvantifieras, medan det saknas kunskap för att kvantifiera de övriga.

Hög C/N-kvot och hög halt av lignin och andra svårnedbrytbara kolföreningar används indirekt som en parameter i kolmodeller, även om det finns forskning som visar på att den långsiktiga kolinlagringen inte har så självklart samband med C/N som man ofta antagit (avsnitt 3.3.1 och 3.3.2). En mellangrödans C/N-kvot är inte enbart artberoende utan i hög grad beroende på i vilket utvecklingsstadium den befinner sig. En mellangröda som sås tidigt och får växa länge kan få mer vedartade och ligninrika vävnader. Genom putsning eller skörd under hösten kan man exempelvis undvika övergång till blomning och mognad, och det innebär samtidigt att växtmaterialet i återväxten får högre kvävehalt och lägre C/N. Alla mellangrödor ger dock inte återväxt, t.ex. bovete och honungsört (Willert, 2019).

Rötterna har i genomsnitt 2,5 ggr högre värde för kolinlagringen och är därför viktiga (Bolinder et al. 1999; Rasse et al. 2005; Kätterer et al. 2011; 2014). I studien av Poeplau m.fl. (2015b) fann man exempelvis att det relativt sett stora bidraget med stabilt kol från insådd gräsmellangröda till stor del verkar bero på en stor biomassa av rötter, vilket bidrog till att andelen av mellangrödan som humifierades uppskattades vara så hög som 33 %. Enligt figur 7 är gräsen de arter som har lägst N-halt i rötterna (hög C/N-kvot), vilket också bidrar genom motståndskraft mot nedbrytning. Rötters utbredning i marken har också betydelse. När rötterna går på djupet fördelas biomassan till områden i marken där nedbrytningen går långsammare. Rötternas nära kontakt med markens partikel- och aggregatytor främjar också verkan av jordens skyddande mekanismer. Olika arter har olika strategier för rottillväxt, vilket verkar vara en orsak till att vissa arter lämpar sig särskilt som eftersådda mellangrödor, som behöver växa snabbt för att producera biomassa. Arter med pålrot, t.ex. korsblomstriga växter, honungsört, klöver och cikoria, växer snabbt på djupet, medan gräsarter har ett rotsystem med fina rötter främst i matjorden. En fältstudie av Thorup-Kristensen (2001) visar att mellangrödor som honungsört och oljerättika snabbt går på djupet i marken, särskilt i jämförelse med italienskt rajgräs (figur 9a), vilket visar betydelsen av att så in gräsmellangrödor och därmed ge dem mer tid. Oljerättika har också visat stor förekomst av rötter långt ned i marken (Sapkota m.fl., 2012; Wahlström m.fl., 2015) (figur 9b).

Att baljväxter ger särskilt positiva effekter på kolinlagring (Land, 2021) har troligen flera orsaker, där mängden biomassa är en av dem. Artblandningar där baljväxter ingår kan exempelvis vara effektivt för att få en stor biomassa. I en studie av Blanco-Canqui m.fl. (2015) konstaterades att baljväxter i mellangrödeblandningar gav goda förutsättningar för kolinlagring, vilket till största delen verkar ha att göra med att blandningen gynnade den totala biomassaproduktionen. Det finns också studier som framhåller att artblandningar av mellangröda, särskilt med inslag av baljväxter ger en större mikrobiell diversitet i marken och därmed kolstabilisering (Chavarria m.fl., 2016; Poirier m.fl., 2018). Effektiviteten i kolutnyttjandet gynnas också av en god kvävetillgång i systemet, vilket baljväxter bidrar till.



Figur 9 a). En undersökning olika mellangrödors rötter visade att honungsört (Phacelia), oljerättika (radish) och raps (winter rape) växte snabbare på djupet än mellangrödor av havre (oats), råg (rye) och rajgräs (ryegrass), hämtad från Thorup-Kristensen (2001). Av figur 9 b) framgår att oljerättika hade en större förekomst av rötter på djupet än engelskt rajgräs, hämtad från Sapkota m.fl. (2012).

3.4. Kväveläckage och balans med förfruktseffekt

Mellangrödor fyller ut glappen mellan huvudgrödorna. Det är perioder då möjligheterna för tillväxt och näringsupptag annars inte skulle utnyttjas fullt ut, och då mineralkväve skulle ansamlas i marken under hösten och riskera att förloras till luft eller vatten. Det är viktigt att förfruktseffekten av mellangrödor utnyttjas så bra som möjligt för att få nytta av den andel av kvävet som inte lagras in med kol i marken, utan mineraliserar när mellangrödor dör eller brukas ned.

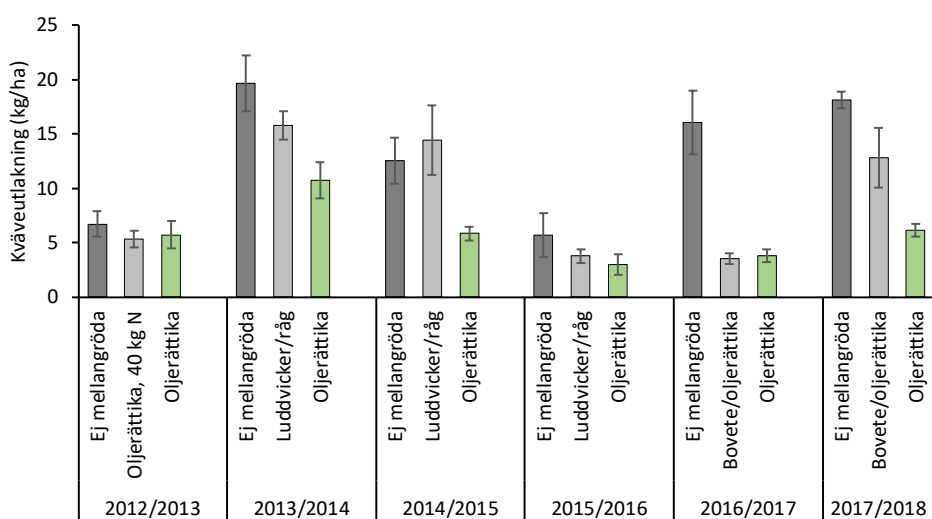
3.4.1 Direkta och indirekta mätmetoder av läckage

För att studera olika odlingsåtgärders inverkan på växtnäringsläckaget används bland annat specialbyggda fält där försöksrutorna har separata dräneringssystem med utlakningsmätningar. De första fältstudierna i Sverige av mellangrödor för minskat kväveläckage inleddes under 1980-talet på ett sådant fält i Halland (Torstensson m.fl., 1992), och där odlas fortfarande insådda gräsmellangrödor inom SLU:s program för långliggande försök. För sandjordar och jordar med låg lerhalt används också ofta sugceller som sätts ned i jorden för provtagning av markvattnet, där läckaget sedan beräknas med hjälp av modellerad avrinning (Stenberg m.fl., 1999). Att använda jordkolonner där man mäter avrinnande vatten i botten (lysimetrar) är en annan vanlig metod för att uppskatta läckage (Bergström & Jokela, 2001). Att mäta utlakning är relativt kostsamt och inte alltid möjligt. Därför används ofta mätningar av mängden mineralkväve i marken på hösten som ett mått på risken för utlakning. Genom att jämföra med kontroll kan man få en bra indikation på hur kväve ansamlas och förflyttas nedåt i marken för att sedan riskera att utlakas (Myrbeck, 2014), (figur 13). Det kväve som lämnar matjorden, till stor del lättlösligt nitratkväve, och som förs vidare nedåt i marken är till stor del onåbart för en efterföljande vårsådd gröda. Det kväve som ligger kvar i matjorden

på senhösten riskerar inte bara att förloras nedåt utan kan även förloras till luften som kvävgas eller lustgas genom dentitrifikation.

3.4.2 Mellangrödor minskar kväveläckaget men inte fosforläckaget

Resultat från fältförsök med utlakningsmätningar som bedrivits i Sverige, Finland, Norge och Danmark sammanställdes av Aronsson m.fl. (2016). Studierna omfattade 11 platser med ett flertal olika försök under många år, de flesta i Sverige och Danmark. De mellangrödor som ingick i försöken med utlakningsmätningar var främst insådda gräs samt några studier av oljerättika. Resultaten visar att mellangrödor minskat kväveläckaget med i genomsnitt 43 %. Variationen i effekt var stor, från ingen effekt alls upp till 90 % reduktion av kväveutlakningen. Variationen i effekt har ofta att göra med hur bra mellangrödan lyckats tömma marken på kväve, det vill säga hur bra den vuxit i förhållande till kvävetillgången. I ett fall var läckaget större vid odling av rödklöver som mellangröda på en svensk lerjord (Lindén m.fl., 1993). I en studie där man sammanställde resultat från USA och Europa fann man att mellangrödor av gräs och korsblomstriga arter minskade kväveläckaget med 20-80 % med ett medelvärde på 70 %. För mellangrödor med baljväxter i renbestånd var läckagereduktionen 23 % (Meisinger m.fl., 1991). Att baljväxter inte tömmer markprofilen på utlakningsbart kväve särskilt effektivt har konstaterats i olika studier (t.ex. Breland, 1996; Ranells & Wagner, 1997; Möller & Reents, 2009). Blandningar av baljväxter och icke-kvävefixerare, som vanliga vallblandningar, kan däremot ge en bra effekt på kväveläckaget (Torstensson m.fl., 2006).

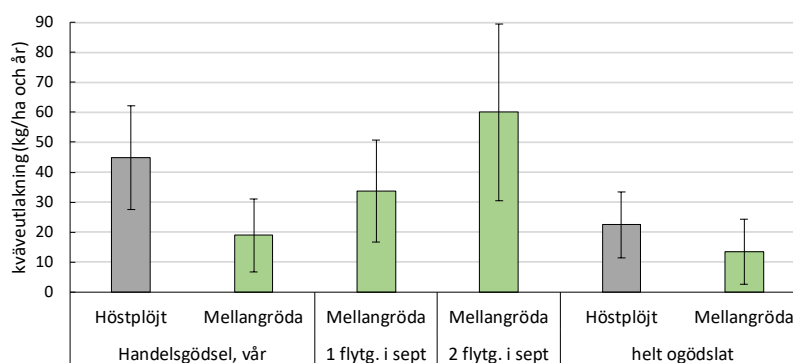


Figur 10. Kväveutlakning under höst och vinter efter mellangrödor av oljerättika samt blandningar av luddvicker och råg och bovete och oljerättika i jämförelse med mark utan mellangröda, i SLU:s långliggande utlakningsförsök på Lönnstorp. Både mark med och utan mellangröda plöjdes i slutet av november. Efter Norberg & Aronsson (2020).

Störst effekt har mellangrödor på jordar med stor risk för kväveläckage. På lätta jordar under nederbördsrika förhållanden i södra Sverige och Danmark kan en insådd gräsmellangröda minska läckaget med 30-50 kg kväve per ha och år jämfört med mark utan mellangröda (t.ex. Eriksen m.fl., 2008). På lätta jordar finns dock risk för vissa mellangrödor att kvävet snabbt kan återmineraliseras och bidra till

läckage på senvintern, se avsnitt 3.4.4. För lerjordar, där kväveläckaget ofta är mindre, är effekten lägre i absoluta tal. Erfarenheterna från försöken med mätningar av växtnärläckage är störst för insådda gräsmellangrödor och råg, men också för annan typ av höstbevuxen mark som höstvet, höstraps och vallinsådd. Under senare år har även oljerättika, luddvicker, honungsort m.m. ingått i ett utlakningsförsök i Skåne (figur 10).

För effekten på utlakning är mellangrödans syfte inte primärt att ge en stor biomassa utan att hålla mängden mineralkväve i marken på en låg nivå. Gödsling av mellangrödan kan riskera denna funktion om den inte växer enligt plan. I en dansk utredning avråddes från gödsling av mellangrödor med hänvisning till risken för motsatt effekt av mellangrödan på läckaget om någon annan faktor begränsar dess tillväxt (Møller Hansen m.fl., 2000). De insådda mellangrödorna av engelskt rajgräs vid det långliggande försöket på mojord i Halland har visat sig vara robusta i sin funktion. I försöket jämförs mellangröda som brukas ned på våren med mark utan mellangröda som plöjs på hösten. Under perioden 1989-2005 ingick försöksled med flytgödselgivor på hösten. Det engelska rajgräset visade sig då ha en tillväxtkapacitet som klarade att minska läckaget jämfört med höstbearbetad mark vid en måttlig giva flytgödsel i september (Aronsson m.fl., 2003, figur 11).



Figur 11. I SLU:s långliggande försök ingick under åren 1989-2005 försöksled med tillförsel av svinflytgödsel på mellangröda av engelskt rajgräs (vårinsått) i september (1 flytg. = ca 100 kg total-N). Förutom i de helt ogödslade leden gödslades huvudgrödan (vårsäd) med handelsgödsel. I jämförelse med höstplöjd mark var utlakningen lägre även då mellangrödan fått en giva flytgödsel på hösten, men inte vid två givor. Felstaplarna visar standardavvikelse för variationen mellan åren.

Det finns färre studier av mellangrödors påverkan på fosforerosion och fosforläckage än av kväveläckage, men de som finns är relativt samstämmiga (Liu m.fl., 2019). En mellangröda kan skydda jorden mot erosion på sluttande fält, ungefär på samma sätt som en obearbetad stubbåker gör (Bechmann, 2012). När det gäller effekter på läckage finns åtskilliga observationer kring hur nedbrukning eller sönderfrysning av mellangröda periodvis ökar koncentrationerna av löst fosfor i både yt- och dräneringsvatten (Bechmann m.fl., 2005; Aronsson m.fl., 2014), vilket beror på att växtmaterialet snabbt ger ifrån sig fosfor (Liu m.fl., 2014). Det är ofta ingen stor påverkan, men mellangröda ses alltså inte som en generell åtgärd för att minska läckaget av fosfor (Aronsson m.fl., 2019a).

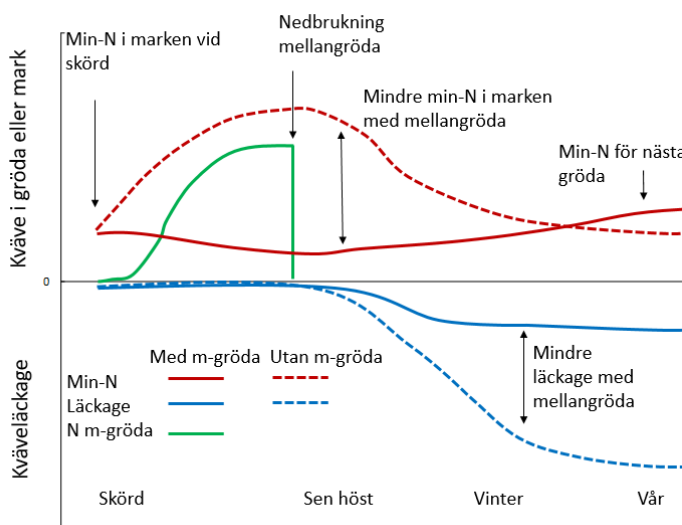
3.4.3 Effekter av ökad kväveinlagring på kväveläckaget

I odlingsystem där mellangrödor odlas frekvent kommer också kväve att lagras in i marken tillsammans med kol, vilket ökar markens kvävelevererande förmåga på sikt, inte bara som en direkt förfruktseffekt av årets mellangröda. Då ökar också behovet av att hålla marken bevuxen under hösten för att inte markens ökade bördighet ska öka risken för kväveläckage till luft och vatten.

3.4.4 Att balansera upptag med återmineralisering och förfruktseffekt

Mellangrödor som består av rent gräs ger sällan en förfruktseffekt för den efterföljande huvudgrödan. Även om det sker en mineralisering av kväve på våren kan mellangrödan ha tömt marken på kväve effektivt under vintern, och därför blir nettoeffekten på kvävetillgången inte så stor (Thorup-Kristensen m.fl., 2003). Däremot ger baljväxter ofta en kväveeffekt till efterföljande gröda. En kombination av gräs och klöver kan både effektivt ta upp mineralkväve ur marken på hösten och minska kväveläckaget, och samtidigt ge en grüngödslingsseffekt motsvarande ca 15 kg N per ha (Wallgren & Lindén, 1994; Bergkvist m.fl., 2011). Enligt en sammanställning av ett flertal danska försök gav mellangrödor av oljerättika samt oljerättika och honungsört en kväveeffekt på 10 kg och oljerättika i blandning med luddvicker 25 kg (Tidningen Arvensis 1-2023).

Tidpunkt för nedbrukning eller avdödning (naturlig eller kemisk) av en mellangröda påverkar både effekten av mellangrödan på läckaget under höst och vinter och förfruktseffekten för den efterföljande grödan. För bästa effekt på läckaget ska mellangrödan avslutas så sent som möjligt på hösten eller helst på våren, men om mineraliseringen efter en kväverik mellangröda inte överensstämmer med den efterföljande grödans behov är risken att läckaget delvis bara förskjuts i tiden. Det gäller både för mellangrödor av baljväxter och icke baljväxter. Figur 12 illustrerar balansen mellan kväveupptag i mellangröda, mineralkvävedynamiken i marken och kväveläckaget över vintern.

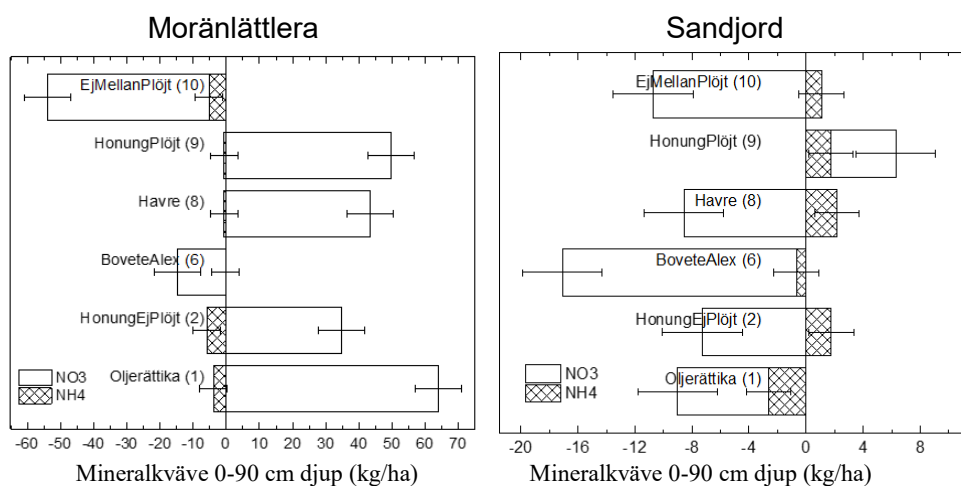


Figur 12. Dynamiken hos mineralkväve i marken och läckage med och utan mellangröda. Fritt efter Justes m.fl. (2012).

Optimal tidpunkt för nedbrukning av mellangröda med avseende på minskat läckage och bästa förfruktseffekt undersöktes metodiskt av Thorup-Kristensen & Dressbøll (2010) för en rågfånggröda. Man tog hänsyn till C/N-kvot, jordart och mängd nederbörd för att ge rekommendationer för brytningstidpunkt under olika förhållanden. En slutsats var att för mellangröda med låg C/N-kvot är det funktionellt att bruka ned mellangrödan sent på hösten eller på våren, kvävet frigörs snabbt för nästa gröda. För en lätt jord i nederbördsrikt område är det till och med viktigt att vänta så länge som möjligt för att undvika risk att mellangrödans kväve förloras genom läckage innan nästa grödas upptag börjar, se även Aronsson m.fl. (2012).

För mellangrödor med låg C/N-kvot och stor biomassa kan kväveminaliseringen alltså ske snabbt och vara stor, därför är det av extra stort intresse att kvävet kommer till nytta. Sådana mellangrödor är t.ex. bovete och oljerättika som kan dö relativt tidigt av frost. Här finns risk att kväve frigörs för tidigt och hinner lakas ut redan under vintern, vilket bland annat visade sig vara fallet i en studie av Storr m.fl. (2021) som undersökte nitratkvävedynamiken i marken under en mellangröda av oljerättika som delvis frös under vintern. Att risken är särskilt stor på lätt jord om senhösten är regnig illustreras i figur 13 från ett försök i Skåne. Där mättes mängden mineralkväve i marken i december under olika mellangrödor som såtts i augusti på två jordtyper, med uppföljning på våren (figur 13). En minskning av mineralkväve över vintern visade på att kväve förlorats genom utlakning, medan en ökning visade på att kväve som mineraliserats fanns kvar för den efterföljande grödan, förutsatt att det låg kvar i matjorden. I moränlätteren hade mineralkvävemängden i jorden ökat över vintern för alla mellangrödor utom för bovete, där kväve som fanns mineraliserat redan i december gått förlorat. Dock var det bara under oljerättika som det mesta fortfarande låg kvar i matjorden (visas inte i figuren). På sandjorden förlorades nitratkväve under vintern under alla mellangrödor utom honungsört. Under bovete var förlusten till och med större än i kontrollet utan mellangröda. Skörd av mellangrödorna på sandjorden hade detta år förmodligen kunnat minska kväveläckaget och ge förutsättningar för bättre kvävehushållning, se avsnitt 5.3.

Det är inte bara kväve som snabbt avges ur sönderfruset växtmaterial utan även fosfat (Riddle & Bergström, 2013), och kol, vilket ger en gynnsam miljö för denitrifikation, med ökad risk för lustgasbildning som följd (se avsnitt 3.5). En gröngödslingsvall som putsades och fick ligga kvar i fält förlorade 16 % av kvävet, 40 % av fosfor och 14 % av kolet när den utsattes för regn (Malgeryd & Torstensson, 2005). I de danska riksförsöken undersöktes brytningstidpunkter för mellangröda av bland annat oljerättika, råg och honungsört under 2019-2020. Avdödning med glyfosat på våren gav både bättre efterverkan och mindre läckage efter den nederbördsrika vintern 2019 (Pedersen, 2020).



Figur 13. Förändring av mineralkväve (kg/ha) i marken under mellangröda respektive för plöjd mark mellan 1 december 2020 och tidig vår 2021 för en moränlättlera och en sandjord. Dominerar stapeln till vänster om 0 (negativa värden) så minskade mineralkvävet i marken under perioden. Dominerar stapeln till höger om 0 (positiva värden) så ökade mineralkvävet i marken. Förutom i ett led med honungsört (HonungPlöjt) som plöjdes i december fick mellangrödorna vissna ned under vintern. På moränlätteren bevarade och ökade mängden mineralkväve för de flesta mellangrödorna i marken på våren inför nästa gröda i hela markprofilen 0-90 cm. På sandjorden förlorades istället mineraliserat kväve i marken, inte bara i plöjd jord utan i de flesta av mellangrödorna. Källa: Hansson m.fl. (2021).

3.5 Förluster av kväve till luft – lustgas

De tre växthusgaser som i någon större omfattning avges och tas upp av markväxsystemet är koldioxid (CO₂), lustgas (N₂O) och metan (CH₄). Metan produceras under vattenmättade förhållanden som vid risodling och har liten betydelse i svensk jordbruksmark, även om det vanligtvis förekommer ett litet upptag (Hadden & Grelle, 2017). Lustgasen är en stark växthusgas, 273 gånger starkare än koldioxid räknat över en hundraårsperiod (GWP₁₀₀ = 273) (Forster m.fl., 2021), och utsläppen från jordbruksmark kan vara stora. Som vi tidigare nämnt kan en mellangröda binda in i storleksordningen 300 kg kol per hektar och år, men om den samtidigt orsakar en ökning av lustgasemissionerna på ca 2,5 kg N₂O-N per ha och år eller mer blir nettoklimateffekten lika med noll eller negativ. Ökade lustgasemissioner av den storleksordningen har uppmätts vid odling av mellangrödor (Aziz m.fl., 2022; Olofsson & Ernfors 2022) och det finns alltså en reell risk att åtgärder som syftar till att lagra in kol i jordbruksmarken totalt sett kan ge en negativ effekt, om de orsakar ökade lustgasemissioner (Guenet m.fl., 2020). Markens inbindning av kol planar dessutom ut över tid efter att man infört en kolinlagrande åtgärd, som att odla mellangrödor, i och med att marken så småningom uppnår en ny jämvikt mellan kol in (fotosyntes) och kol ut (respiration) (figur 2) (Poulton m.fl., 2018). Lustgasemissionerna, å andra sidan, minskar inte över tid så länge skötsel och odlingsförhållanden förblir desamma, vilket gör att lustgasemissionerna kan komma att dominera på lång sikt (Haas m.fl., 2022; Lugato m.fl., 2018). Användningen av mellangrödor har visat sig kunna antingen

öka eller minska lustgasemissionerna (Aziz, 2022; Basche m.fl., 2014; Foltz m.fl., 2021; Li m.fl., 2015; Muhammad m.fl., 2019; Olofsson & Ernfors, 2022; Petersen m.fl., 2011; Taghizadeh-Toosi m.fl., 2022).

3.5.1 Mätmetoder för lustgas

Lustgasemissioner varierar mycket med väderförhållanden, till exempel med nederbörden och med hur ofta och mycket marken fryser och tinar under vintern (Ejack & Whalen, 2021; Wagner-Riddle m.fl., 2017). De varierar dessutom mycket över enskilda fält (Barton m.fl., 2015; Groffman m.fl., 2009). Detta gör att täta mätningar över tid, många upprepningar över ett fält (eller mätning över stora ytor) och långa mätserier behövs för att få säkra resultat (Lammirato m.fl., 2021). De vanligaste typerna av mätningar är (1) mikrometeorologiska metoder, då man mäter över en stor yta från en mast (t.ex. så kallad eddy-covariance), eller (2) kammarmätningar (manuella eller automatiska) (Butterbach-Bahl m.fl., 2013; Talleg m.fl., 2019; Waldo m.fl., 2019). Mikrometeorologiska mätningar kräver stora ytor och är därför svåra att använda i replikerade fältförsök. Därför kommer mycket av den kunskap vi har om lustgasemissioner i relation till skötselåtgärder och utformning av odlingssystem från kammarmätningar. Manuella kammarmätningar är tidskrävande och görs oftast inte tätare än en gång i veckan, trots att lustgasemissionerna kan variera mycket över dagar eller till och med timmar. Automatiska kammare, som mäter flera gånger per dag, ger kvalitetsmässigt överlägsen data jämfört med veckovisa manuella mätningar (Lammirato m.fl. 2021), men kräver å andra sidan dyra analysatorer och en hel del tekniskt underhåll.

3.5.2 Kunskapsläget för lustgasemissioner vid odling av mellangrödor

I nuläget har vi fortfarande begränsat med data på lustgasemissioner vid odling av mellangrödor. För att få en tydlig bild av den totala påverkan av mellangrödor på lustgasemissionerna skulle det behövas fler dataset för hela år och helst för hela växtföljder, men de resurskrävande mätningarna innebär att man ofta mäter över en säsong eller över en kort period. När emissionerna mätts över perioder kortare än ett år och under olika perioder i olika studier blir det svårt att jämföra resultaten. I väntan på bättre data kan vi försöka identifiera faktorer och situationer som ger hög risk för stor lustgasavgång och ta fram potentiella åtgärder. Vi måste efterhand verifiera att vi minskar de totala emissionerna, så att inte exempelvis en åtgärd mot vinteremissioner ger ökade våremissioner eller tvärtom (Li m.fl., 2015). Eftersom kunskapsläget fortfarande är oklart används ofta enkla uppskalningsfaktorer i exempelvis livscykelanalyser och man bör vara medveten om att dessa har begränsningar.

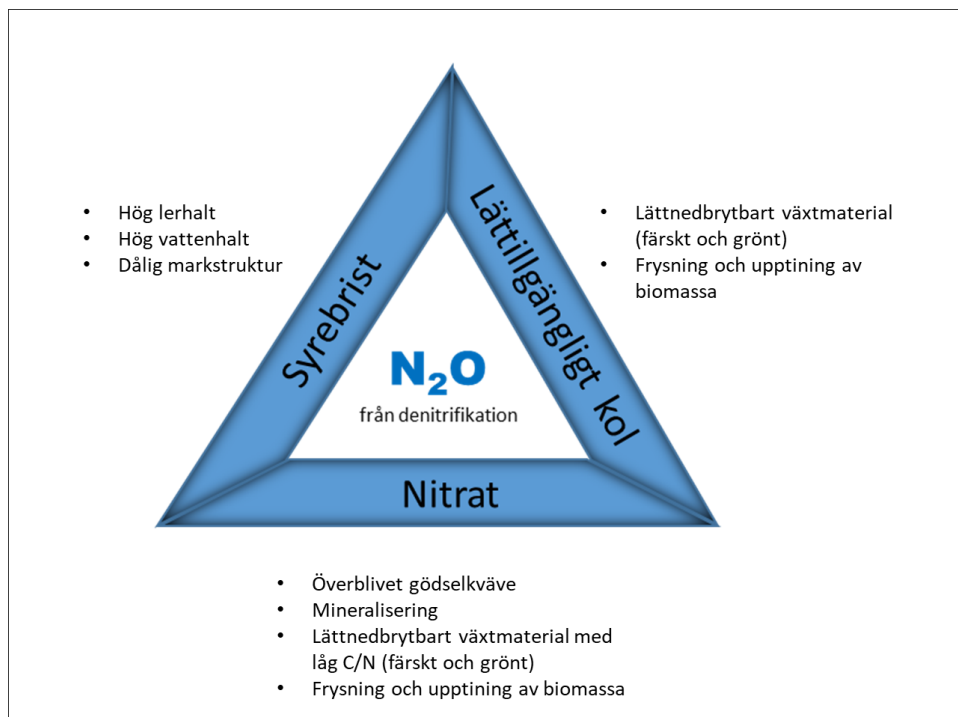
I borealt eller fuktigt tempererat klimat, som i Sverige, produceras ofta huvuddelen av lustgasemissionerna utanför växtsäsongen (Aziz, 2022; Li m.fl., 2015; Wagner-Riddle m.fl., 2017; Wallman m.fl., 2022), det vill säga under den period då vi använder mellangrödor. Det mesta tyder på att denitrifikation är den dominerande processen för lustgasproduktionen under vintern, i och med att denna är starkt kopplad till blöta förhållanden och till när marken omväxlande fryser och tinar (Groffman m.fl., 2009). Även emissionstoppar vid regn efter en längre torrperiod, vilket kan förekomma under sommarhalvåret, kopplas till denitrifikation

(Butterbach-Bahl m.fl., 2013). De speciella förhållanden som leder till stora lustgasemissioner från denitrifikation erbjuder troligen den bästa angreppspunkten för åtgärder i nuläget, även om andra processer, exempelvis nitrifikation, också producerar lustgas i marken (Butterbach-Bahl m.fl., 2013). Nitrifikation bidrar till lustgasemissioner framför allt under torrare förhållanden (<60-70% vattenfyllda porer) (Ruser m.fl., 2006).

Denitrifikation är en process där mikroorganismer använder nitrat istället för syre i sin ämnesomsättning, för att få ut energi ur organiskt material. Nitratet omvandlas i flera steg och i det sista steget bildas kvävgas (vanligt luftkväve), men i det näst sista steget bildas lustgas som kan avges innan den hunnit omvandlas vidare. Avgörande förutsättningar för lustgasavgång från denitrifikation är därför tillgång på lättillgängligt kol, tillgång på nitrat och samtidigt begränsad syretillgång (Mitchell m.fl., 2013), (figur 14). Hög markvattenhalt ger låg syretillgång, men maximal lustgasemission från denitrifikation inträffar inte när marken är helt vattenmättad, eftersom det då framför allt produceras kvävgas, utan snarare kring fältkapacitet (Castellano m.fl., 2010). Mängden lättillgängligt kol i marken bidrar också till att styra syretillgången, i och med att syre konsumeras vid nedbrytningen. När koltillgång, nitratillgång och syrebrist sammanfaller finns risk för så kallade ”hot moments”, med stora lustgasemissioner (Groffman m.fl., 2009). Att undvika sådana situationer genom att ta bort eller minska på någon av faktorerna, eller förskjuta dem i tid, bör minska risken för stora lustgasemissioner (figur 14).

Det går att identifiera olika perioder under året då lustgasavgången kan påverkas på olika sätt av en mellangröda:

1. Under hösten fram till första frosten minskar mellangrödor oftast lustgasemissionerna (Han m.fl., 2017), vilket är den förväntade effekten när mellangrödans kväveupptag minskar mängden nitrat i marken.
2. Omväxlande frysning och tining under vintern kan ge lustgasemissioner genom att lättillgängligt kol och kväve blir tillgängligt för denitrifikation när växtmaterial och mikroorganismer fryser sönder (Goodroad Keeney, 1984; Groffman m.fl., 2009; Butterbach-Bahl m.fl., 2013). Mellangrödor i växtfamiljen korsblomstriga växter, som rättika och senap, har gett anmärkningsvärt höga lustgasemissioner när de frusit och sedan tinat igen (Olofsson & Ernfors, 2022; Aziz, 2022).
3. När tjälen går ur marken efter en kall vinter uppstår blöta förhållanden som främjar lustgasproduktion genom denitrifikation. Samtidigt kan lustgas som samlats i den frusna marken eller under tjälen frigöras och lustgas löst i markvattnet kan avgå eftersom lösligheten minskar med ökad temperatur (Risk m.fl., 2013).
4. Efter vårbruket, med eventuell nedmyllning av en levande eller död mellangröda, såbäddsberedning och eventuell kvävegödsling, har man i flera danska studier sett högre lustgasemissioner där man haft mellangröda över vintern (Duan m.fl., 2018; Petersen m.fl., 2011; Taghizadeh-Toosi m.fl., 2022). Effekten skulle kunna bero på större tillgång på kväve, kol eller både kväve och kol, för mikroorganismerna.

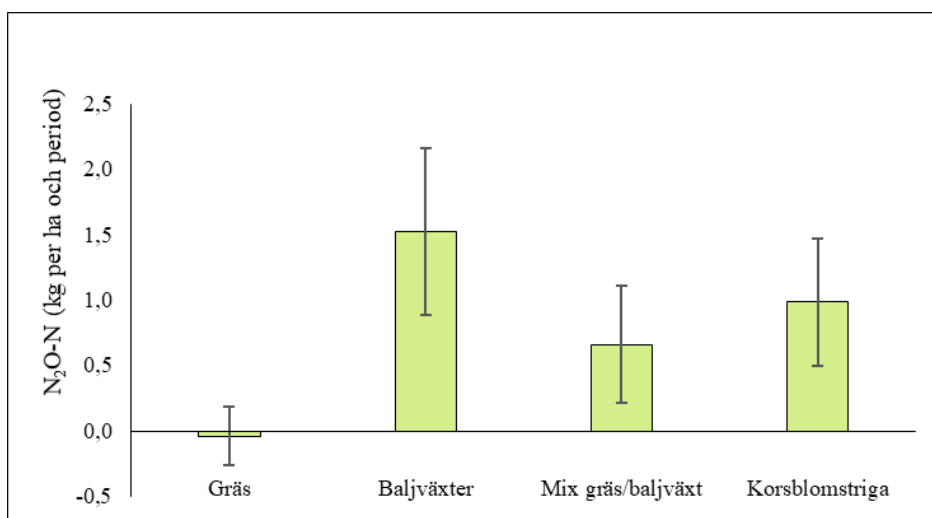


Figur 14. Denitrifikation kan förväntas stå för en stor del av lustgasemissionerna från jordbruksmark i nordiskt klimat. Triangeln visar de tre grundläggande förutsättningarna för denitrifikation och faktorer som gör att dessa förutsättningar kan uppkomma. När alla tre förutsättningarna är uppfyllda är risken stor för lustgasemissioner.

3.5.3 Val av mellangröda, ur ett lustgasperspektiv

I sammanställningar av litteraturen används ofta kategorierna ”baljväxt” och ”icke baljväxt” och i vissa sammanställningar har det rapporterats skillnader i lustgasavgång mellan dessa (Muhammad m.fl., 2019) men i andra inte (Abdalla m.fl., 2019). Om dataunderlaget i de studier som använts i Abdalla m.fl. (2019) istället sorteras upp i ”gräs” (rajgräs, råg, vete, korn, havre eller blandningar av dessa), ”baljväxter” ”korsblomstriga” och ”gräs-baljväxtblandningar” skiljer gräskategorin ut sig med liten lustgasemission medan övriga kategorier tydligt ökat emissionerna (figur 15). Studierna har pågått under olika perioder och under olika långa perioder, men mönstret blir liknande även om man exkluderar studier kortare än 1 år. I försök i Danmark har oljerättika som mellangröda gett ökande emissioner av lustgas, mätt antingen från höst till sen vår eller under hela året (Li m.fl., 2015; Petersen m.fl., 2011; Taghizadeh-Toosi m.fl., 2022). Studier i Sverige (Olofsson and Ernfors, 2022) och i Norge (Aziz, 2022) bekräftar mönstret med låga emissioner från gräs och höga från korsblomstriga mellangrödor. Mellangrödor och kategorier av mellangrödor kan skilja sig åt på flera sätt, exempelvis genom ”kvaliteten” på växtmaterialet när det tillförs marken (C/N-kvot, halt lättlösligt kol m. m.), effektiviteten i kväveupptaget och förmåga att övervintra. Växtmaterialets ”kvalitet” har ofta bedömts utifrån dess C/N-kvot, med en lägre kvot som en indikator på högre kvalitet, i bemärkelsen att det snabbt släpper ifrån sig mineralkväve till marken. Ett bredare begrepp har lanserats, där man skiljer mellan färskt, grönt material (”immature residues”) och ”moget” material som exempelvis halm från spannmål (”mature residues”) och där fler biokemiska aspekter vägs in

(Abalos m.fl., 2022a; Lashermes m.fl., 2021). Mellangrödor kan ses som ett specialfall inom kategorin ”färskt och grönt”, där hela växten utgör materialet, istället för bara en rest. De generellt låga lustgasemissioner som observerats med gräsmellangrödor beror sannolikt inte enbart på växtmaterialets kvalitet utan också på att de ofta är vinterhårdiga och därför används som övervintrande mellangrödor, som varken avdödas på hösten eller självdör under vintern. En övervintrande mellangröda kan ge låga emissioner av lustgas under vintern, men riskerar å andra sidan att ge höga emissioner efter nedmyllning på våren (Li m.fl., 2015; Duan m.fl., 2018; Petersen m.fl., 2011; Taghizadeh-Toosi m.fl., 2022), vilket visar på betydelsen av att mäta över hela året. I odlingsystem, med direktsådd i avdödad mellangröda, t.ex. som inom ”bevarandjordbruk” (CA), sker ingen nermyllning av mellangrödan före den nya huvudgrödan etableras.



Figur 15. Medelvärden av lustgasemissioner uppmätta i mellangrödeförsök för perioder på mellan 19 dagar och 1 år, från sammanställningen av Abdalla m.fl. (2019). Felstaplarna visar standardfelet.

3.5.4 Skötselåtgärder för att minska lustgasemissioner från mellangrödor

En mellangröda påverkar förutsättningarna för lustgasemissioner både genom att den tar upp mineralkväve ur marken på hösten och genom att växtmaterial tillförs när mellangrödan avdödas eller fryser sönder (figur 12). Riskerna för lustgasemissioner uppkommer framför allt genom tillförseln av växtmaterial och åtgärder som föreslagits för lustgasemissioner kopplade till skörderester är alltså relevanta för mellangrödor. Generellt har vi otillräcklig kunskap om interaktionerna mellan skötselåtgärder, klimatfaktorer, markförhållanden och skörderesternas kvalitet för att kunna ge bestämda skötselråd (Abalos m.fl., 2022b).

I en metaanalys som gjordes av Abalos m.fl. (2022b) sågs ingen skillnad i lustgasemissioner mellan grund och djup bearbetning eller mellan nedmyllning och att låta skörderesterna ligga kvar på markytan, men det fanns stora variationer i dataunderlaget. Det är sannolikt att interaktioner mellan myllningsvarianterna och jordens textur (eventuellt även struktur), klimatfaktorer och/eller typen av skörderester döljer mönster i emissionerna. Exempelvis får det olika effekt på syretillgången vid nedbrytning om man lämnar skörderester på markytan när jorden

är väl-dränerad och vädret torrt jämfört med när jorden är tät, på grund av dålig struktur eller frusna lager, och vädret blött. Muhammad m.fl. (2019) såg ett tydligt samband mellan jordens textur och mellangrödors påverkan på lustgasemissionerna, där mellangrödan minskade emissionerna mer när texturen var grövre. Det pågår studier i bland annat Danmark för att utreda hur nedbrukningsdjupet kan tänkas påverka lustgasemissionerna under olika omständigheter (Søren O. Petersen, Århus universitet, muntl., 2023).

En möjlig åtgärd för att hantera lustgasemissioner kopplade till mellangrödor är att föra bort biomassan sent på hösten. På det viset skulle ansamlingen av både nitrat och lättnedbrytbart kol i marken kunna minskas och biomassan kan användas som råvara i biogasproduktion eller som foder. Det mesta av kvävet och en del av kolet kan sedan återföras till åkern i form av rötrest eller stallgödsel. Alternativa användningsområden för biomassan är att framställa proteinprodukter för livsmedelsindustrin, eller biokol som kan användas som jordförbättringsmedel. Bortförel av skörderester har visat sig fungera väl för att minska lustgasemissioner, under förutsättning att det rör sig om ”färska och gröna” skörderester (”immature residues”) (Abalos m.fl. 2022a; Essich m.fl., 2020), medan effekten av återföring av rötrest fortfarande kräver mer forskning (Abalos m.fl. 2022b). Metaanalysen som utfördes av Abalos m.fl. (2022b) visade på 50 % högre lustgasemissionerna när mellangrödor lämnas kvar och myllas ned jämfört med när de förs bort. Bortförel av biomassa som metod för att minska lustgasemissioner från oljerättika prövades i ett fältförsök i Skåne under vintern 2020-2021, i ett försök där ingen bearbetning gjordes förrän på våren. Oljerättika som fick stå kvar utan avdödning jämfördes med behandlingar där oljerättika (1) klipptes på 2-3 cm höjd och bortfördes eller (2) drogs upp med roten och bortfördes, och en ytterligare behandling (3) där oljerättikan fick stå kvar men där sågspån (motsvarande 5 ton per ha) ströddes på marken under för att främja immobilisering av mineralkväve. Behandlingarna utfördes i mitten av december och lustgasemissioner mättes sedan under 79 dagar, fram till början av mars. Att dra upp oljerättikan med roten minskade de totala lustgasemissionerna över perioden med 65 %, från 770 till 270 g per ha, medan de övriga behandlingarna inte gav någon statistiskt säkerställd effekt (Lövgren, 2022). Skörd av mellangrödor behandlas närmare i kapitel 5.3.

Nitrifikationshämmare, som saktar ned omvandlingen av ammonium till nitrat i marken, kan minska lustgasemissioner i samband med gödsling (Ruser m.fl. 2015). Ekwunife m.fl. (2021) uppskattade att lustgasemissioner utanför växtsäsongen, i kalltempererat klimat, skulle kunna minskas med 31 % genom användning av nitrifikationshämmare och ureashämmare. Hur nitrifikationshämmare skulle kunna användas tillsammans med skörderester för att minska lustgasemissioner, utan samtidig gödsling, finns det i nuläget inte mycket kunskap om. Två inkubationsexperiment, en fältstudie och en lysimeterstudie har gjorts i Danmark för att undersöka effekter på lustgasemissioner av nitrifikationshämmaren DMPP vid nedmyllning av vall. Ibland har man sett minskade lustgasemissioner och ibland har man inte fått någon statistiskt säkerställd effekt (Duan m.fl., 2017; Kong m.fl., 2017; Kong m.fl., 2018; Nair m.fl., 2020). För mellangröda, specifikt, har vi

inte hittat några publicerade studier, men minst två försök pågår i Danmark (Søren O. Petersen, Århus universitet, muntl., 2023).

3.5.5 Mellangrödorna och lustgasen under nya klimatförhållanden

En av de viktigaste förändringarna vad gäller mellangrödor under de närmaste decennierna kan bli att vi kommer att kunna odla dem på en större del av den svenska åkermarken, allteftersom klimatzonerna flyttar längre norrut. En förlängd växtsäsong, med tidigare sådd och skörd av vissa huvudgrödor, kan ge mellangrödorna längre tid på sig att utvecklas, med högre biomassaproduktion och därmed större kolinlagring som trolig följd (De Notaris m.fl., 2018). Inverkan på lustgasemissionerna är svårare att förutse, men potentialen för större arealer av mellangrödor gör det ännu viktigare att vi väljer och hanterar dem på rätt sätt så att vi minskar, inte ökar, emissionerna.

3.6 Förluster av kväve till luft – ammoniakavgång

Ammoniakavgång som ett problem diskuteras främst i samband med djurhållning och spridning av stallgödsel, där den utgör en betydande förlustväg för kväve. Ammoniakutsläpp orsakar försurande kvävenedfall, och att begränsa ammoniakavgången är alltså inte bara en fråga om att hushålla med kvävet utan också om att minska miljöpåverkan. Växande grödor är ingen källa till utsläpp, utan absorberar till och med en del ammoniak (Farquhar m.fl., 1980). Från nedvissnade växter och växtrester sker däremot en avgång av ammoniak. De Ruijter & Huijsmans (2019) menade på att detta är ett förbisett område och tog fram en modell för att beräkna ammoniakavgång från vallskörd och växtrester av olika slag på nationell nivå i Nederländerna.

Det finns ett tydligt samband mellan kvävehalt i växten och den ammoniakavgång som kan ske från växtresterna efter skörd, avdödning eller frost. Växtdelar med hög kvävehalt (låg C/N-kvot) riskerar att förlora mer ammoniak än de med låg kvävehalt. Det är troligen kväve som tagits upp av mikroorganismer under nedbrytningen som utsöndras i ammoniumform och förgasas (De Ruijter m.fl., 2010). Precis som för stallgödsel styrs förlusterna till luften av om man myllar växtresterna, hur blåsig det är och hur hög temperaturen är. Olika växtrester (kvävehalter 2-5 %) som lämnades på markytan på hösten i ett experiment i Nederländerna började avge ammoniak efter ca 4 dagar (de Ruijter m.fl., 2010). Efter 4 månader hade 5-16 % av kvävet förlorats i form av ammoniak. Av färsk foderrättika (kvävehalt 3 %) förlorades 11 % av kvävet och för frostdödad 7 %. Inget kväve förlorades när växtresterna av olika grödor brukades ned.

Kväverika mellangrödor som lämnas på markytan kan alltså tänkas ge en viss ammoniakavgång. I bomullsodling med insådda mellangrödor som plöjdes ned som grüngödsling före nästa gröda på våren fann man emellertid att ammoniakförlusterna var lägre än utan samodling (Zhang m.fl., 2022). I en studie visade det sig att mellangrödor påverkade effekten av ureashämmare negativt. I odling med mellangrödor fick ureashämmaren som tillsats i samband med spridning av urea på markyta med växtrester sämre effekt, med ökad ammoniakavgång som följd (Kulesza m.fl., 2022).

4 Fältmätningar av mellangrödors biomassa

4.1 Sammanställning av försöksdata

Data insamlad i svenska försök samt några studier från andra nordiska länder angående mellangrödor inventerades (Appendix 1). I inventeringen ingick både publicerade och opublicerade studier. Försök som bedrivits med mellangrödor har haft syfte att studera etableringsmetoder, effekt på mineralkväve i marken och läckage, ogräskonkurrens, biomassa för skörd samt grüngödsling.

Datasammanställningen gör inte anspråk på att vara heltäckande, och det pågår också studier där data ännu inte finns tillgänglig (hösten 2022).

I de flesta fall fanns mätningar enbart av ovanjordisk biomassa. I en del fall fanns också mätningar av dess kväveinnehåll och i några fall även av kolhalt, vilket gjorde det möjligt att beräkna materialens C/N-kvoter. Några studier innehöll mätningar av rotbiomassa, vilket redovisas i kapitel 3 (figur 7) i form av skott/rotkvoter och kvävehalter i rot och skott. I tabell 1 redovisas medelvärden av de observationer som samlats in för olika mellangrödearter, vallinsåder samt en del vanliga höstgrödor. En minoritet av det totala antalet observationer representerar mellangrödor som gödslats, men för några arter är det ganska många tillfällen med gödsling. I dessa fall har jämförelser gjorts av gödslade och ogödslade mellangrödor. Som framgår av tabell 1 är antalet observationer väldigt varierande för olika mellangrödor och inte jämnt fördelade geografiskt. De absolut flesta observationerna har gjorts i Skåne följt av Halland och Västra Götaland. En del studier har också gjorts i Uppland och Västmanland. Även en del resultat från Norge, Danmark och Finland ingår. För de mellangrödor där det finns många observationer visas diagram för att exempelvis illustrera såtidpunktens eller det geografiska lägets inverkan på biomassaproduktionen. Datamaterialet är inte så omfattande att det går att systematiskt undersöka olika enskilda faktorerers inverkan på mellangrödornas biomassaproduktion.

En observation betyder i de allra flesta fall att det är ett medelvärde av flera replikat i ett försök, där det även finns information om plats, jordart, så- och provtagningstidpunkt, förfrukt m.m. En del observationer är medelvärden för flera platser under samma år, eller av flera år på samma plats (hämtat från rapporter). Provtagning har oftast skett på senhösten, i oktober-november, i några fall redan i mitten-slutet av september. Provtagningen har ofta gjorts genom klippning, t.ex. av $3 * 0,25 \text{ m}^2$ fördelat över en parcell, med så låg stubbhöjd som möjligt utan att jord kommer med i provet, vilket annars riskerar att påverka resultatet. Biomassan inkluderar ofta också ogräs som funnits i mellangrödan, men inte alltid, och ofta saknas information om detta. Många av figurerna presenteras i form av box-plot-diagram, som sammanfattar materialet med fem värden. Själva boxen representerar intervallet där 50 % av värdena ingår och som begränsas nedåt av gränsen för de första (lägsta) 25 % av värdena (nedre kvartilen) och uppåt av gränsen för de sista 75 % av värdena (övre kvartilen). Medianvärdet anges i boxen som en linje och medelvärdet som ett kryss. Max- och minimum-värden anges som staplar uppåt

och nedåt från boxen. Eventuella extremvärden anges separat. Generellt finns en stor variation i materialet, som säkerligen inte bara har med mellangrödornas tillväxtkapacitet att göra. Låg markfuktighet vid sådd kan till exempel försena groningen även om sådden sker tidigt, och i fall när det är få observationer kan enskilda förhållanden få stort genomslag.

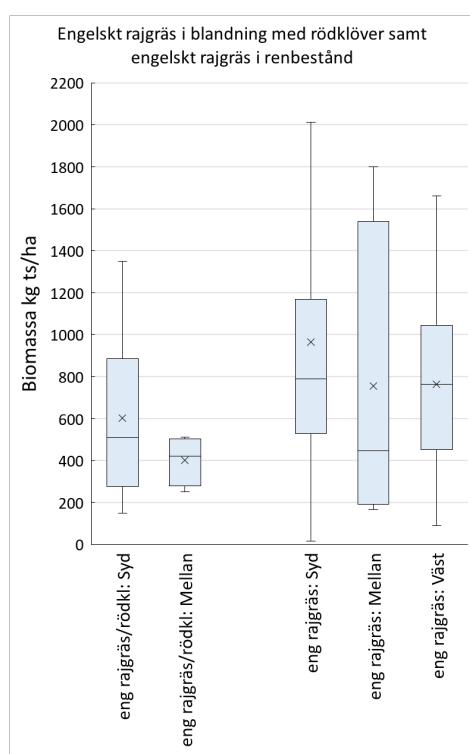
Tabell 1. Fältstudier med mätningar av biomassa (kg ts/ha), kväve-och kolhalter och C/N, se metadata i tabell 1. Inom parenteser anges standardavvikelse och antal observationer. Tomma celler betyder att inga mätningar gjorts

| Mellangröda | N, % | C, % | C/N | Biomassa | Kommentar |
|------------------------------|----------------|--------------|---------------|------------------|---|
| Engelskt rajgräs | 2.1 (0.63; 62) | 43 (1.7; 62) | 22 (6.4; 62) | 871 (559; 121) | Insådd på våren. Skåne, Halland, V. Götaland, Uppland |
| Engelskt rajgräs + rödklöver | 2.1/3.8 | | | 582 (437; 42) | Insådd på våren (10 sådda i juli) |
| Eng. rajgräs | 2.1 (0.48; 42) | | | | Skåne, Halland, Uppland (2 med vitklöver) |
| Rödklöver | 3.8 (0.34; 42) | | | | |
| Rödsvingel+rödklöver | | | | 560 (363; 12) | Insådd på våren (2 insådd i höstvetete på hösten, 2 i renbestånd rödsvingel) Skåne, Halland |
| Rödsvingel | 2.2 (0.31; 10) | | | | |
| Rödklöver | 3.8 (0.33; 6) | | | | |
| Westerw. rajgr. | 2.1 (0.44; 10) | | | 760 (373; 10) | Insådd på våren |
| Italienskt rajgr. | 3.4 (0; 2) | | | 1750 (955;8) | Insådd på våren |
| Hundäxing | | | | 830 (360; 5) | Insådd på våren eller på hösten i höstvetete, Skåne |
| Vallinsådd | 2.1 (0.51; 30) | 42 (2.6; 21) | 20 (4.4; 21) | 1640 (919; 30) | Gräs/klöver; Halland, V Götaland |
| Luddvicker | 4.6 (0.21; 4) | | | 1680 (1120; 21) | Insådd på våren; Skåne, Norge |
| Rödklöver | 2.9 (0.6; 15) | | | 885 (786; 29) | Insådd på våren; Skåne, Uppland, Danmark, Finland |
| Vitklöver | 3.5 (0.16; 11) | | | 1310 (804; 13) | Insådd på våren; Skåne, Danmark, Finland |
| Humleusern | | | | | |
| insådd | 3.2 (0.27; 3) | | | 1830 (1250; 3) | Finland, Danmark |
| sådd i augusti | | | | 205 (232; 5) | Norge |
| Grävkloöver (subklöver) | | | | 128 (107;7) | Sådd i augusti, Norge |
| Blodklöver (Crimsonklöver) | | | | 217 (231; 4) | Sådd i augusti, Norge |
| Vitsenap | 3.2 (0.51;29) | 42 (0; 11) | 11 (0; 2) | 1972 (1342; 53) | Sådd i juli-augusti; Skåne, Halland |
| Oljerättika | 2.9 (1.0; 45) | 41 (3.3; 30) | 18 (10; 30) | 1846 (1485; 167) | Sådd i juni-augusti; Skåne, Halland, Uppland, V. Götaland (8 rättika) |
| Bovete | | | | 2620 (1410; 27) | Sådd juni-aug; Skåne |
| Hampa | | | | 3320 (1740; 31) | |
| Honungsört | 3.5 (0.7; 2) | | | 2780 (1710; 31) | Sådd i juni-aug; Skåne, Halland, V. Götaland, Uppland, Danmark |
| Cikoria | | | | 440 (580; 9) | Insådd på våren; Skåne, V. Götaland, Uppland |
| Havre (korn) | 2.1 (0.36; 3) | | | 818 (545; 16) | Sådd i augusti. Havre, purrhavre, vårkorn (2); Skåne, Halland, Danmark |
| Höstråg/rågvetete | 4.6 (0.69; 26) | 43 (2.6; 7) | 9 (1.5; 7) | 448 (769; 26) | Sådd i augusti-september; Skåne, Halland, V. Götaland |
| Höstraps | 4.0 (0.71; 38) | 42 (1.2; 5) | 12 (2.4; 5) | 1030 (765; 38) | Sådd i augusti; Skåne, V. Götaland |
| Höstvetete | 4.6 (0.41; 34) | 42 (4.2; 4) | 9.0 (0.70; 4) | 198 (173; 34) | Sådd i september; Skåne, V, Götaland |

4.2 Biomassa

4.2.1 Mellangrödor av gräs och gräs/klöverblandningar

Engelskt rajgräs är den art av mellangröda som har flest observationer i svenska försök främst på grund av att den ingår, eller har ingått, i SLU:s långliggande försöksserier i Skåne, Halland och Västra Götaland. För blandning av engelskt rajgräs och rödklöver finns bland annat en försöksserie som utfördes inom Skåneförsöken. Även omfattande mätningar i vanlig insådd av gräs- och klövervall har gjorts i ekologiska utlagningsförsök i Halland och Västra Götaland. Engelskt rajgräs insått i vårstråsäd har i medeltal haft liknade mängd biomassa på senhösten i södra Sverige (Skåne, Halland) och i Mellansverige (Uppland, Västmanland) samt i Västsverige (Västra Götaland) (figur 16). De insådda mellangrödorna av engelskt rajgräs, westerwoldiskt rajgräs och hundäxing låg alla i medelbiomassa 800-900 kg ts/ha, medan insått italienskt rajgräs hade dubbelt så stor biomassa (tabell 1). Dock var observationerna bara 5-10 st för de tre sistnämnda jämfört med 121 av engelskt rajgräs. Vallinsådderna i ekologiska försök (n=30) hade större biomassa än både engelskt rajgräs i renbestånd och engelskt rajgräs i blandning med rödklöver (medel ca 1600 kg ts/ha, tabell 1). De såddes in med vanlig vallfröblandning på våren i vårstråsäd, men med större utsädesmängder än mellangrödorna för att säkerställa en god valletablering.



Figur 16. Biomassa (kg ts/ha) av insått engelskt rajgräs och klöver (Syd: n=38; Mellan: n=4) samt av engelskt rajgräs i renbestånd (Syd: n=66; Mellan: n=7; Väst: n=49) under tidsperioden 1990-2021. Syd= Skåne och Halland, Mellan= Uppland och Västmanland och Väst= Västra Götaland.. Medelvärden för samtliga observationer anges i tabell 2.

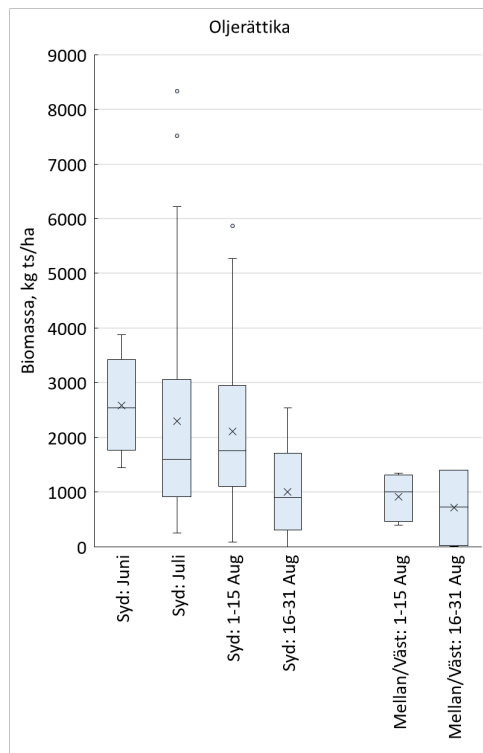
4.2.2 Oljerättika och vitsenap

För oljerättika finns relativt många observationer (några observationer av rättika ingår). Flest är från Skåne, men även i Halland, Västra Götaland och Uppland finns representerade. Mätningarna indikerar att biomassaproduktionen var störst vid sådd i juni, juli och början av augusti, men lägre vid sådd i andra halvan av augusti (figur 17). Sådd i juni och juli är i praktiken ovanligt och fungerar bara för tidigt

skördade grödor som färskpotatis och grönsaker. Medelvärdet för ovanjordisk biomassa i Skåne och Halland var 2300 kg ts per ha vid sådd i juli, 2220 kg ts vid sådd 1-15 augusti och 970 kg ts vid sådd 16-31 augusti. I Mellan- och Västsverige var det ingen stor skillnad i medelvärde mellan sådd i början eller slutet av augusti, men det var osäkrare utfall vid sen sådd (värden ned mot noll), men det var ganska få mätpunkter. Medelvärdet för 1-15 augusti var 910 kg ts per ha och vid sådd 16-31 augusti 720 kg. När materialet delades upp på ogödslat och gödslat, syntes en tydlig effekt av gödsling (figur 18).

Vitsenap gav i medeltal något större biomassamängder än oljerättika i försök i Skåne och Halland, i medeltal 2200 kg ts per ha för vitsenap och 1800 kg ts för oljerättika (tabell 1).

En dansk studie har visat tydlig inverkan av såtidpunkten på kväveupptaget i flera mellangrödor (figur 6a, Hansen & Thomsen, 2022). Eftersom den danska studien inte innehöll redovisning av biomassa ingår den inte i materialet som redovisas här.



Figur 17. Biomassa (kg ts/ha) av oljerättika uppdelat på Syd (Skåne, Halland), Mellan (Uppland och Västmanland,) och Väst (V. Götaland), sådd vid olika tidpunkter (juni, juli, augusti) under tidsperioden 2004-2021. Syd: Juni (n=6), Syd: Juli (n=36), Syd 1-15 Aug (n=63), Syd: 16-31 Aug (n=15), Mellan/Väst: 1-15 Aug (n=8), Mellan/Väst: 16-31 Aug (n=4). Medelvärden för samtliga observationer anges i tabell 2.

I en tidigare kunskapsgenomgång om mellangrödor (Aronsson m.fl., 2012) undersöktes förutsättningarna för oljerättika i olika regioner för en längre tidsperiod. Vid ett antagande att mellangrödan såddes 20 augusti uppskattades antalet dagar med minst 9 °C och före första frost för olika regioner (tabell 3). För de regioner som har haft försök med mellangröda verkade det för 20-årsperioden 1984-2003 i medeltal finnas tillräckligt med dagar (50 dagar) för att ge en biomassa på minst 1000 kg ts/ha enligt sambandet av Olsson (2009), avsnitt 3.1 (figur 5). Det stämmer relativt väl med försöksresultaten som sammanställts här. Däremot är odlingssäkerheten enligt tabell 2 betydligt lägre för regioner norr om Skåne, Halland (Öland och Gotland undantaget) om man ser till antalet år som tillväxtperioden begränsas av frost eller låga temperaturer i och med klimatförändringen går utvecklingen mot en ökning av hösttemperaturen.

Tabell 2. Klimatförutsättningar (1984-2003) för mellangrödors tillväxt i några olika regioner i södra Sverige med utgångspunkten att sådden sker 20 augusti och att dagsmedeltemperaturen är minst 9°C, hämtad från Aronsson m.fl. (2012)

| Område | Skåne | Halland | Öland-Gotland | Sydsv höglandet v | Sydsv höglandet ö | Östgöta-slätten | Väner-slätten | Mälaren-Hjälaren |
|---|----------|----------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------|------------------|
| Väderstation | Barkåkra | Halmstad | Hoburg | Fröslida m fl | Målilla | Malmislätt | Såtenäs | Stockholm |
| Medelantal dagar med minst 9°C under 20 aug till frost | 57 | 54 | 57 | 46 | 44 | 45 | 48 | 50 |
| Andel år med mindre än 50 dagar över 9°C | 20% | 30% | 20% | 80% | 80% | 75% | 60% | 50% |
| Ytterligare dagar som krävs för att 80% av åren ska klara 50 dagar över 9°C | | 6 dagar | | 10 dagar | 12 dagar | 11 dagar | 9 dagar | 5 dagar |

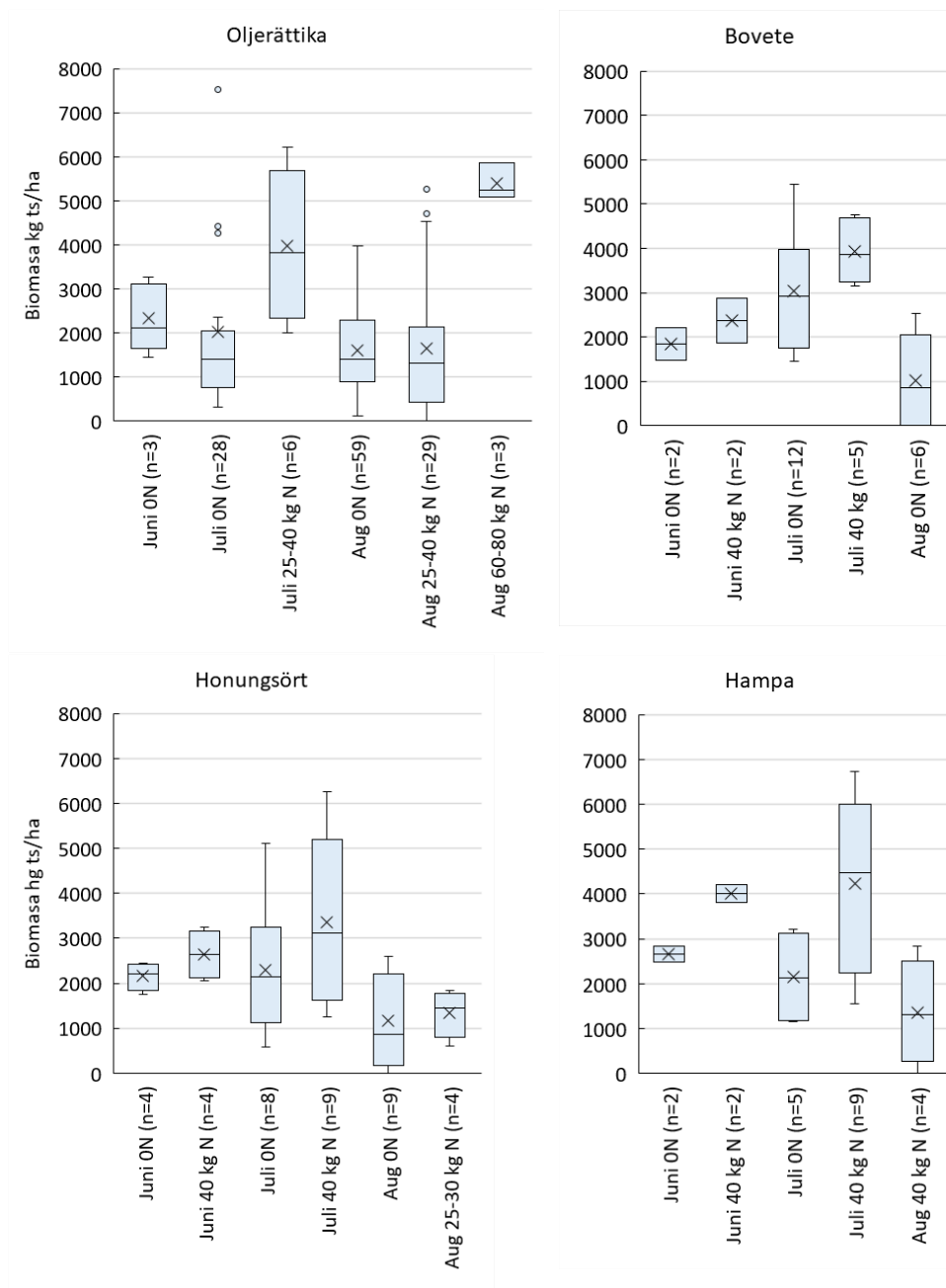
4.2.3 Baljväxter i renbestånd

För flera av de ettåriga klöverarterna som ofta används som mellangrödor har vi bara funnit ett fåtal mätningar, men för insädd vitklöver och rödklöver finns det betydligt fler under en lång period av år (1991-2019). För rödklöver var medelbiomassan av alla observationer 890 kg ts per ha (tabell 2), men separerat för Skåne och Danmark (n=6) var medelvärdet 1620 kg ts per ha och för andra delar av Sverige, Norge och Finland (n=23) var det 630 kg ts per ha. Även för luddvicker finns det en stor variation med medelbiomassa 2640 kg ts/ha i skånska försök (n=11) och 617 kg i försök i Norge och V Götaland (n=10). Luddvicker har rönt intresse som kombinerad mellan- och grüngödslingsgröda. Den kan sås på hösten och övervintrar, och kan växa som en grüngödslingsgröda året efter. Luddvicker har ingått i blandningar i försök, t.ex. med råg, vilket är något som rekommenderats för att kombinera den kvävefixerande funktionen med något som kan tömma marken på kväve.

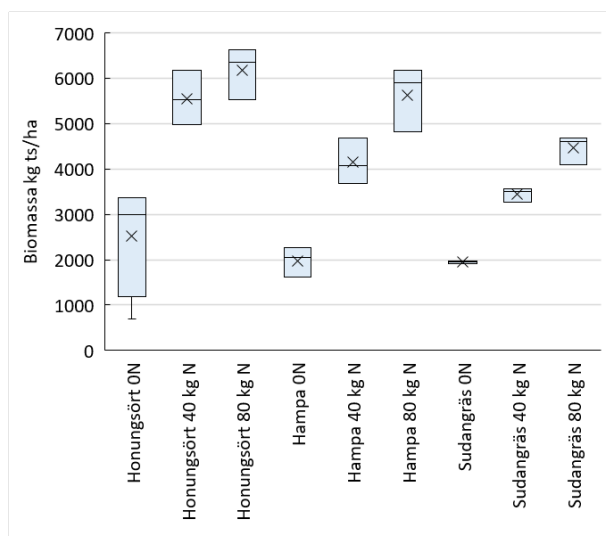
4.2.4 Eftersådda mellangrödor med och utan gödsling

Några försök i Skåne har, förutom oljerättika, undersökt andra eftersådda mellangrödor, som bovete, honungsört, hampa och sudangräs. Olika tidpunkter och olika kvävegödselgivor har ingått i försöksplaner. För vissa av fallen finns endast få observationer och för andra betydligt fler. För oljerättika finns relativt många observationer för vissa kombinationer. Flera mellangrödor har även undersökts i blandningar med olika baljväxter.

I figur 18 delas observationerna för oljerättika, bovete, honungsört och hampa in efter olika såtidpunkter (juni, juli och augusti) och nivåer för kvävegödsling. Vid sådd i augusti, som är absolut vanligast, gav gödsling dåligt utslag på tillväxten för oljerättika och honungsört, utom i ett försök med stora kvävegivor i oljerättika. För hampa fanns inga ogödslade försök med sådd i augusti, men biomassatillväxten var liten vid sådd i augusti med en kvävegiva. Vid sådd i juli var responsen i tillväxt efter kvävegödsling genomgående positiv. Sådd i juli av mellangrödor är dock mindre vanligt. Sådd i juni gav inte större biomassa än sådd i juli för någon av arterna, trots längre tillväxtperiod, som annars är en viktig faktor för biomassaproduktionen. Detta visar att andra faktorer har haft inverkan. Markfukt och dess påverkan på groningen kan vara en sådan faktor. Figur 19 beskriver ett försök i Skåne med två olika gödslingsnivåer för några mellangrödor, men där såtidpunkten inte angetts i rapporten. .



Figur 18. Biomassa hos fyra olika mellangrödor sådda under juni, juli och augusti med olika givror av kväve vid sådd (2004-2021). För oljerättika ingår några observationer av rättika. De flesta försöken genomfördes i Skåne men det ingår även observationer från Halland, Danmark, Västra Götaland och Uppland.

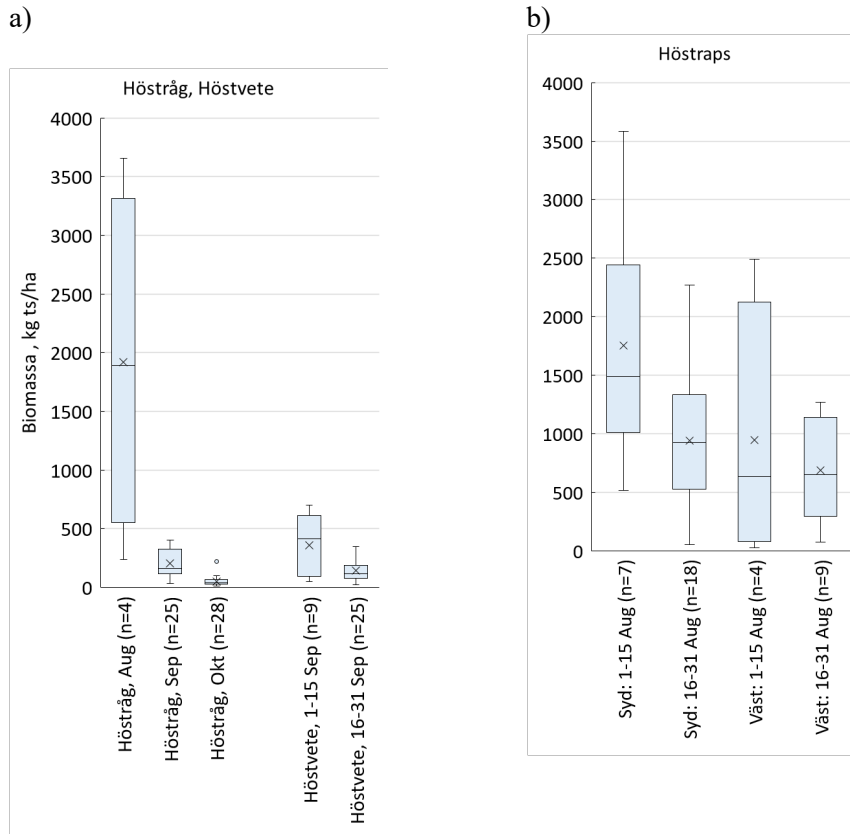


Figur 19. Biomassa vid olika kvävegivor till mellangrödor av honungsvört, hampa och sudangräs i ett försök i Skåne under 2014 (n=3). Sätidpunkt för mellangrödorna ej tillgänglig (Ahlberg & Nilsson, 2015).

4.2.5 Höstraps, höstvetete, höstråg

I flera försök har ordinarie höstgrödor provtagits och det syns en skillnad vid olika tidpunkter för sådd (figur 20). Höstraps behöver exempelvis enligt resultaten sås i början av augusti i Västra Götaland för att nå samma biomassa som vid sådd i slutet av augusti i södra Sverige (Skåne, Halland), men observationerna för början av augusti var få med stor variation. Vid sådd under juli fram till början av augusti har höstrapsen en stor potential för tillväxt och kväveupptag enligt ett 10-tal försök i olika delar av Mellansverige (Engström m.fl., 2000). Där uppmättes kväveinnehåll i grönmassan på i medeltal 83 kg N per ha i gödslad raps och 155 kg i gödslad raps. Med en antagen kvävehalt på 4,6 % (tabell 1) skulle det motsvara 1800-3400 kg ts per ha. Samtidigt var mineralkvävemängderna i marken lika låga under gödslad höstraps som under ogödslad.

De få observationer som fanns för höstråg som såddes i augusti visade att det finns en stor potential för tillväxt hos rågen (figur 20), men variationen var stor. Höstvetete såddes först i september i försöken och hade en betydligt mindre biomassa än rågen och rapsen. När det gäller såtidpunktens inverkan på höstvetegrödors tillväxt och kväveupptag gjordes en studie av Lindén m.fl. (2000). Där framgår att sådd i månadsskiftet augusti-september kan ge ett kväveupptag enligt vad man kan förvänta av en måttlig mellangröda, dvs 20 kg N per ha i Götaland. Vid sådd senast 15 september i Götaland fick man fortfarande en bestockning hos höstsäden, och ett kväveupptag på ca 12 kg per ha i ovanjordisk biomassa. Sådd i början av oktober resulterade endast i några få kilo.

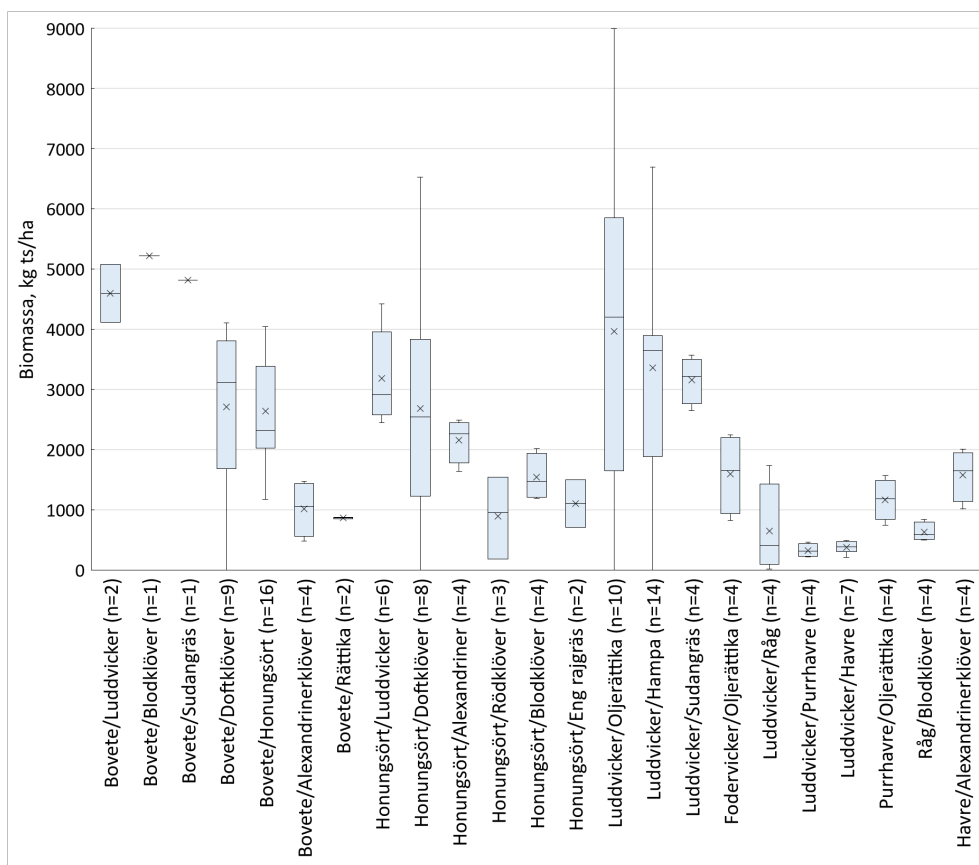


Figur 20a). Biomassa (kg ts/ha) hos höstråg sådd i augusti-oktober och höstvetete sådd början eller slutet av september. Höstrågen sådd i augusti hade svartträda som förfrukt. b) Biomassa hos höstråps sådd i början eller slutet av augusti i Skåne (Syd) samt Västra Götaland (Väst). Observationerna (antal= n) gjordes under perioden 1993-2016. Av de 38 observationerna för höstråps var det 10 st som gödslades på hösten med 30-77 kg N/ha.

4.2.6 Blandningar av mellangrödor

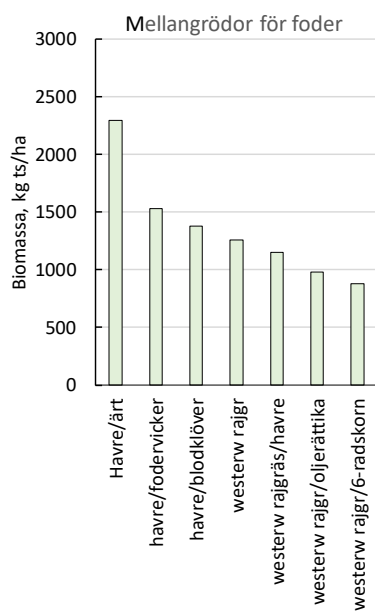
Mellangrödor i olika kombinationer har framför allt provats i skånska försök med bland annat studier av deras ogräskonkurrerande förmåga. I figur 21 presenteras biomassa hos olika blandningar med två olika arter i olika kombinationer, exempelvis bovete och honungsrört i kombination med olika baljväxter, och luddvicker i blandning med stråsäd. Mellangrödorna såddes i augusti och provtogs i oktober-november.

I ett försök i Halland 2019 undersöktes mellangrödor med utgångspunkt att skördas för foder under 2019 (figur 22a). Under 2019 genomfördes också ett försök med blandningar av ett flertal arter i västra Skåne (figur 22b).

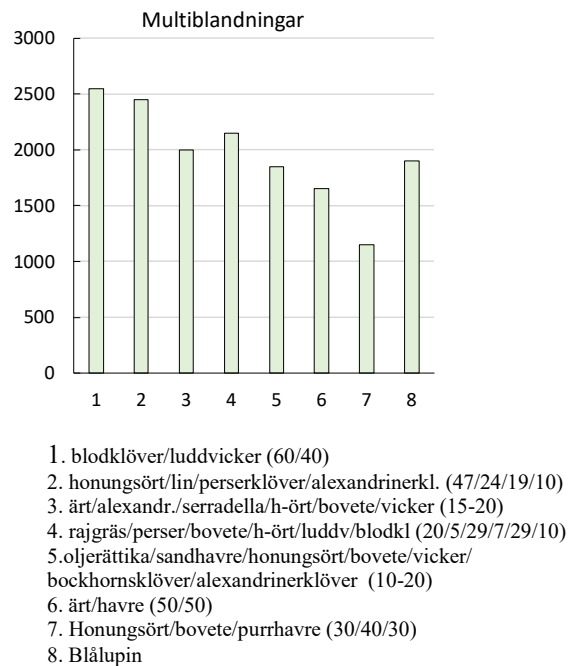


Figur 21. Olika parkombinationer av baljväxt och icke baljväxt från försök i Skåne samt några observationer från Danmark (Fodervicker oljerättika), under åren 2013-2021. Felstaplarna anger standardavvikelser.

a)



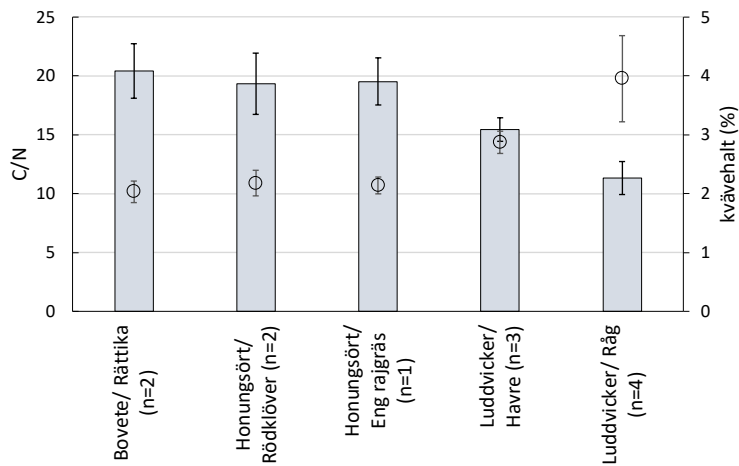
b)



Figur 22a). Resultat från ett försök med skörd av mellangrödor för foder i Halland (Aurell, A. Växa, Halland) och b) och ett försök på Krokstorps gård med olika blandningar av mellangrödearter, medelvärde av biomassa vid direktsådd respektive plöjning före sådd av mellangrödor i augusti (Sverigeförsöken, 2020).

4.3 Kväve- och kolhalter

De svenska försöken har främst varit inriktade på bestämningar av biomassa, medan halter av kol och kväve inte undersökts. Ett undantag är de långliggande utlagningsförsöken vid SLU där framför allt analys av kvävehalter har ingått. Mätningar av kolhalter bekräftar att de var relativt stabila (41-43 %), och variationen i materialens C/N-kvot berodde följaktligen främst på kvävehalternas variation. Kvoten av C och N bestämmer bland annat om man kan förvänta en nettomineralisering eller fastläggning av kväve efter avdödning eller nedbrukning av mellangrödan. Av de mätningar som gjorts i mellangrödorna låg gräsmellangrödor och vallinsådd på kvävehalter kring 2 % (C/N=20-22), med undantag av italienskt rajgräs som hade medelkvävehalt 3,4 % (endast 2 observationer). Mellangrödor av klöver och humlelusern låg i intervallet 2,8 till 3,8 % N. Högst halter av kväve (4,6 %) uppmättes i luddvicker och höststråsådd, vilket resulterade i C/N-kvot under 10. Oljerättika hade kvävehalter på i medeltal 2,8 % (C/N=19), men variationen var stor. Medelkvävehalten i honungsört var 3,5 %. Luddvicker, honungsört och bovete har ingått i blandningar i några försök i Skåne. I figur 23 redovisas C/N-kvoter och kvävehalter i biomassan från några kombinationer av olika grödor. Högst kvävehalt och lägst C/N hade blandning av luddvicker och råg.



Figur 23. Halter av kväve (rund symbol) och C/N-kvoter (staplar) för några blandningar av mellangrödor i försök i Skåne under 2013-2021. Siffror inom parentes anger antal observationer och felstaplar anger standardavvikelser.

5 Mellangrödor i växtföljden

5.1 Friskare grödor med mellangröda?

En mellangröda kan påverka odlingsystemet både direkt och indirekt när det gäller grödornas motståndskraft mot sjukdomar och skadegörare. Indirekt påverkan kan vara att markens funktioner, såväl fysikaliska egenskaper som mikroliv, påverkas positivt och därigenom stärker grödorna och hämmar skadegörare (Xiaoxiao m.fl., 2020). Direkta effekter kan vara att mellangrödan i sig har en sanerande eller hämmande effekt på skadegörare. En mellangröda kan också bli en brygga för att överföra sjukdomar, till exempel om den delar värdskap för skadegörare med andra grödor i växtföljden,

5.1.1 Indirekt påverkan på markfunktioner av mellangröda

Att utnyttja artrikedom som ett verktyg för ökad effektivitet, biologisk mångfald och resiliens hos odlingsystemen är genomgående för olika odlingskoncept som t.ex. agroekologi och regenerativt jordbruk (Weisser m.fl., 2017; Wezel m.fl., 2020; Ekofakta, 2022). Samodling av grödor kan minska trycket av växtskadegörare både ovan och under jord enligt Vukicevich m.fl. (2016) som genom en litteraturstudie undersökte samband mellan mellangrödor, markmikrobers diversitet och växtskadegörare. Mekanismerna är flera, och att blanda arter från olika funktionella grupper, som baljväxter, gräs och korsblomstriga arter, kan särskilt främja den mikrobiella diversiteten enligt studien. Andra studier bekräftar att artblandningar av mellangröda, särskilt med inslag av baljväxter ger en ytterligare ökad mikrobiell diversitet i marken (Chavarria m.fl., 2016). Drost m.fl. (2020) fann att enzymaktiviteten i marken påverkades positivt av biomassa från mellangrödor, vilket är ett av de mått som används för att avläsa markens mikrobiella funktionalitet

Romdhane m.fl. (2019) fann att även hur mellangrödor hanterades i samband med avdödning (frost, mekaniskt, kemiskt) hade påverkan på markmikrobiologin, där exempel mellangröda som avdödats med glyfosat hade mindre förekomst av denitrifikationsbakterier.

Keesing m.fl. (2010) visar att det finns mycket som tyder på att diversitet i ekosystem och motståndskraft mot skadegörare hänger ihop, men man påpekar också att många arter också potentiellt kan innebära att det finns värdar närvarande för att sprida sjukdomar. Viktigt i sammanhanget är också att även om kvaliteten hos det material som tillförs har stor betydelse, så har också de redan existerande mikrosamhällena i en jord betydelse för omsättningen i marken (Fanin m.fl., 2016).

5.1.2 Mellangrödor och växtskadegörare

I odlingsystem med mellangrödor minskar tiden då marken ligger bar mellan grödorna, i system med reducerad jordbearbetning kanske ingen tid alls.

Mellangrödorna kan på så vis bli gröna bryggor mellan huvudgrödorna.

Mellangrödor kan också påverka beståndsklimatet i huvudgrödor genom att öka fuktigheten nära marken, vilket kan gynna stråbassjukdomar och sporproduktion nere i beståndet.

Att använda artrikedom som ett mål med mellangrödor, för att öka markens funktionalitet och resiliens har en potentiell baksida om man inte anpassar artblandningen efter huvudgrödorna i växtföljden, se avsnitt 5.4. Om mellangrödor innehåller samma arter som ingår i växtföljden i övrigt finns risk att arts specifika jordburna svamp- och bakteriesjukdomar, som annars hanteras genom uppehåll mellan värdgrödorna kan få fäste. Grödor som man vill hålla avstånd mellan av dessa skäl är exempelvis rödklöver, bönor, ärter och raps för att undvika rottrötter och klumprotsjuka på oljeväxter. Det är också tänkbart att gräsen, som är släkt med stråsådesgrödorna, kan överföra rostsvampar. Klumprotsjukan kan uppföras genom odling av senap och oljerättika, vilket innebär en risk vid odling i växtföljder med raps eller andra kålväxter. Man bör därför ha minst 4 år mellan kål- och rapsgrödor. Bland de s.k. brassica-fånggrödorna är det främst vitsenap (och sareptasenap) som visat stor benägenhet att infekteras och uppföras sjukdomen (Wallenhammar, 2007). Detta har starkt bidrar till att intresset för senap som fånggröda har minskat. Angrepp på oljerättika är mindre vanligt, men mottagligheten varierar mellan sorter. I flera länder avråds från att använda oljerättika i växtföljder som har raps (Olsson & Persson, 2017).

Mellangrödans bidrag till att skapa goda odlingsförutsättningar i marken, kan också undertrycka skadegörare, som jordburna patogener och nematoder (Abawi & Widmer, 2000). Mellangrödor kan producera ämnen som hämmar skadegörare (allelopati) eller fungera som ett fysiskt skydd för olika skadegörarens predatorer eller konkurrenter. I vissa fall har mellangrödor en direkt sanerande verkan på skadegörare. Inför sockerbetor är exempelvis odling av nematodresistenta mellangrödor året före ett sätt att sanera jorden från betcystnematoder, genom att provocera fram en kläckning och svälta ut nematoderna (Olsson & Persson, 2019). Positiv effekt av sanerande mellangrödor och grön gödsling grödor för att hämma angrepp av jordburna svampsjukdomar har visats för ett flertal sjukdomar i olika

grödor t.ex. rottdödare (vete), ärtrottröta (ärt) och vissnesjuka (potatis). Det är framförallt Brassica-växter, som vitsenap och sareptasenap, som visat goda sanerande effekter på jordbundna svampsjukdomar (Kirkegaard och Sarwar, 1999; Vukicevich m.fl., 2016), men också på nematoder och nematodburna virus. Även exempelvis purrhavre (*Avena strigosa*) verkar ha en hämmande effekt på ett par typer av nematoder (Lundborg, 2019). Brassica-växterna innehåller glukosinolater (GSL) som vid nedbrytning i bildar isothiocyanater vilka kan vara toxiska för markorganismer (Gardiner et al. 1999) i samband med att biomassa brukas ned i marken. Mekanismerna bakom fenomenet, som kallas biofumigation, är inte helt klarlagda (Mathiessen & Kirkegaard, 2006). Däremot har studier visat att det krävs stor utsädesmängd och lång tillväxttid för att få en så stor biomassa att det får effekt på patogenerna (Soldevilla Martinez, 2009; Persson, 2010). Hur lustgasemissionerna ser ut i samband med den här typen av åtgärd har inte undersökts, men det finns risk att de kan vara omfattande, se avsnitt 3.5.

5.2 Mellangröda för ogräskontroll

Mellangrödans nedtryckande effekt på ogräs är en av anledningarna till att lantbrukare väljer att så in en mellangröda i eller efter huvudgrödan. Särskilt i odlingssystem med minimerad jordbearbetning och i ekologisk odling kan mellangrödan vara ett redskap för ogräskontroll.

5.2.1 Mellangröda i konkurrens med ogräsen

En mellangröda som bildar ett jämnt och tätt bestånd trycker ned ogräsen genom ökad konkurrens om vatten, ljus och näring, både genom att hindra groningen och hämma tillväxt. Biomassa av mellangröda som får ligga kvar på markytan kan också hämma ogräsen rent fysiskt eller genom allelopatiske påverkan, enligt Teasdale & Daughtry (1993). Några studier har visat att konkurrensen om näring är den viktigaste faktorn (Bergkvist m.fl., 2011; Sjursen m.fl., 2011). I studien av Sjursen m.fl. (2011) gav en klövermellangröda ingen effekt på ogräs, medan gräs och gräs/klöver-blandning hämmade ogräsens tillväxt. Gödslingseffekten av klöver sågs som en förklaring till utebliven konkurrens. Inte heller i ett norskt 4-årigt fältförsök kunde man påvisa effekt på ogräs av klövermellangröda (Brandsæter m.fl., 2012). I detta fall studerade man effekt på åkertistel och kvickrot.

5.2.2 Mellangrödor som sås efter skörd av huvudgrödan

Mellangrödor som såts i augusti efter stärkelsevete eller trädgårdsgrödor har studerats i flera försök i Skåne med avseende på bland ogräseffekt, och man har funnit tydliga samband mellan mellangrödans marktäckningsgrad och minskad förekomst av ogräs (Hansson 2021 och 2022). I dessa försök, med ekologisk grönsaksproduktion, studerades effekt av eftersådda mellangrödor på ogräs på tre försöksplatser. Mellangrödor i renbestånd eller blandningar av oljerättika, honungsort, bovete och alexandrinerklöver såddes i slutet av augusti och fick sedan utvintra. Mellangrödornas procentuella reduktion av fröogräsen var i medeltal 67-86 %, med bäst resultat för honungsort (upp till 90 %) och sämst för bovete (upp till 58 %).

I ett försök på Söderslätt under 2018 eftersåddes mellangrödor med och utan startgiva av kväve på 30 kg per ha efter skörd av stärkelsevete (Svensson m.fl.,

2020). Sådden skedde 12 augusti efter jordbearbetning till 5 cm djup med tallrikskultivator. Ogräsförekomsten bestod främst av spillraps och täckningsgraden minskade från 16 % på mark utan mellangröda till 1-2 % på mark med mellangröda. De mellangrödor som gav reducerande effekt var oljerättika, honungsört, honungsört + blodklöver, purrhavre samt purrhavre + fodervicker. Bäst fungerade oljerättika och honungsört. Bovete i renbestånd eller blandning, samt blodklöver gav ingen ogräsreduktion. Bovetets tillväxt avtar när temperaturen sjunker under hösten, vilket verkade vara en orsak till svagare effekt mot ogräsen. Kvävegödsling av mellangrödorna, med 30 kg per ha, resulterade inte i något fall i en bättre ogräskonkurrerande förmåga hos mellangrödorna.

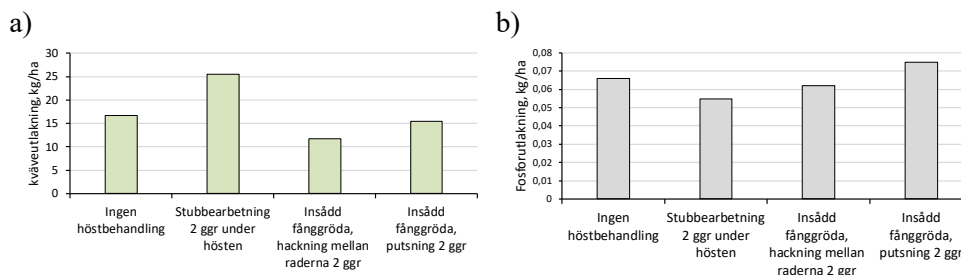
I fortsatta försök med mellangrödor efter skörd av stärkelsevete, efter 2018, har tallrikskultivering ersatts med ultragrund halmharvning. Halmharven gör en bearbetning, på ca 1 cm djup, före sådden av mellangrödorna. Detta förfarande har minskat mängden spillraps i mellangrödorna väsentligt enligt en lantbrukare i projektet (Jeppa Olanders, muntl., 2023). Ett annat sätt att kraftigt minska risken för spillraps skulle, enligt Marcus Willert (HIR Skåne, muntl., 2023), vara att etablera mellangrödorna genom insådd i det växande vetet.

5.2.3 Insådda mellangrödor för ogräskontroll

I svenska studier har insådda gräsfånggrödor visat tydliga effekter genom minskad förekomst av ogräs. Höstinsådda gräsfånggrödor i höstvete gav i flera försök mycket god effekt mot fröogräs (90 %) och även mot kvickrot (40 %) enligt Bergkvist m.fl. (2010). Vårsinsådda fånggrödor visade inte samma hämmande effekt på kvickrot enligt Hjellström (2001), som hade ett väldigt tätt bestånd av kvickrot i sitt försök. Stenberg m.fl. (1999) visade emellertid mycket god effekt jämfört med mark utan fånggröda och sen höstplöjning. Även brassica-fånggrödor har en nedtryckande effekt på ogräs (Adholm, 2005), förutsatt att ett jämnt bestånd bildas.

Strategier för att kombinera mellangröda med putsning eller mekanisk jordbearbetning har studerats som medel för att hantera fleråriga ogräs. Kombinationen av fånggröda och putsning för bekämpning av kvickrot visade lovande resultat i äldre studier (Courtney, 1980) och följdes upp av undersökningar i ett svenskt projekt (Ringselle, 2015). Målet med studierna, som utfördes på flera platser, var att utveckla hållbara strategier för kvickrotsbekämpning utan användning av kemiska bekämpningsmedel och där samtidigt kväveläckage och energiåtgång minskas genom reducerad jordbearbetning. Grundtanken att en mellangröda stället för intensiv jordbearbetning kan utnyttjas för att konkurrera ut kvickroten testades, bland annat i ett försök med utlakningsmätningar på sandjord i Halland (Aronsson m.fl., 2015a). Behandlingar i utlakningsförsöket var bland annat mellangröda av engelskt rajgräs och rödklöver som såddes in på våren och där sedan höstbehandlingen efter skörden bestod av ogräshackning med gåsfotskultivator mellan mellangröderna vid skörd, och efter ytterligare 4-5 veckor. Ett annat försöksled var insådd mellangröda som putsades två gånger på hösten för att försvaga ogräset. Detta jämfördes med olika grad av jordbearbetning. Slutsatsen var att odlingssystem med mellangrödor som kombinerades med putsning eller radhackning gav ganska svag effekt på kvickroten men att metoderna

har utvecklingspotential. De kan därmed bli betydelsefulla för utveckling av odlingssystem med minskat beroende av kemiska bekämpningsmedel. Försöket i Halland visade att mellangröda möjliggör jordbearbetning i form av radhackning utan att man riskerar ökat kväveläckaget (figur 24b). Detta är särskilt intressant för ekologisk odling där system med radhackning är vanliga, och där mellangrödan kan minska läckagerisken för kväve avsevärt jämfört med när hela ytan bearbetas. Även mellangröda som putsades minskade kväveläckaget, men däremot ökade fosforläckaget något (figur 24b).



Figur 24 a). Ett utlakningsförsök i Halland visade att mekanisk behandling av kvickrot genom två stubbearbetningar ökade kväveläckaget jämfört med när ingen höstbehandling gjordes. Med en mellangröda fungerade det att ogräshacka med gåsfotskär mellan raderna och samtidigt minska kväveläckaget, b) Vid upprepad putsning av mellangrödan ökade däremot läckaget av fosfor något. Figurerna visar medelvärden för två försöksår. Efter Aronsson m.fl. (2015a).

5.3 Mellangröda för skörd

Mellangrödans bidrag till kolinlagring är störst när hela biomassan tillförs jorden, men ett syfte med att odla mellangrödan kan också vara att kunna använda den som en foderreserv som kan skördas vid behov. Även användning som råvara för energiutvinning, via biogasproduktion, eller för produktion av växtprotein som fodermedel eller livsmedel är tänkbart (Muneer m.fl., 2021). För en mellangröda som växer kraftigt kan bortförsel av biomassan också minska risken för bildning av stora mängder nitratkväve i marken efter mellangrödan som kan orsaka ökade emissioner av lustgas. En mellangröda som skördas bör logiskt övergå till att definieras som en huvudgröda, men inom miljöersättningen för mellangröda är det möjligt att ta en skörd av mellangrödan efter det tidigaste datum för brytning (jordbruksverket.se/mellangrodor).

Kolbalanser och systemanalyser kan åskådliggöra vad det betyder för klimatpåverkan i sin helhet med olika system för att hantera mellangrödors biomassa, utöver själva kolinlagringens betydelse. I ett par studier av Prade m.fl. (2022) och Hansson m.fl. (2021) studerades mellangrödor som såddes tidigt, i slutet av juli, i Skåne (tabell 3). Scenarier undersöktes där mellangrödorna antingen tillfördes marken i sin helhet eller där den ovanjordiska biomassans skörd avsågs användas för biogasproduktion, med återförsel av biogödseln som gödselmedel. Kolbalansen (inlagrat kol + minskade utsläpp av kol) för en ogödslad mellangröda av bovete talade till det skördade systemets fördel, med drygt 3 ggr mindre klimatpåverkan (uttryckt i form av kol). De bakomliggande orsakerna skulle vara att biogasen som produceras ersätter fossil energi, att biogödsel har ett

högre kvävegödselvärde än nedplöjd mellangröda samt att marken är en mycket osäker lagringsplats för kväve över vintern. Nyttjandegraden av den växtnäring som finns i mellangrödornas biomassa kan alltså öka om dess biomassa skördas på hösten och därefter rötas för att ge biogödsel med stor andel växttillgängligt kväve (Launay m.fl., 2022).

Tabell 3. Kolbalansberäkning (kg C per ha) över ogödslat bovete när sådden gjordes i slutet av juli för två scenarier; antingen nedmyllning av hela biomassan eller skörd under september-oktober för biogasproduktion (Prade m.fl., 2022). Kväve och stabilt kol förs tillbaka med biogödseln och kan då ersätta mineralgödsel (fossilbaserad framställning)

| Bovete ogödslat | Nedmyllning av hela biomassan | Skörd av ovanjordisk biomassa |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| Ovanjordisk biomassa [kg ts/ha] | 1231 | 1231 |
| Biometanpotential [m ³ /ha] | 0 | 365 |
| Kolbalansberäkning | | |
| Markkolsbidrag från skördbar biomassa | 63 | 0 |
| Återfört stabilt kol med biogödseln ^{a)} | 0 | 31 |
| Markkolsbidrag från rötter och stubb | 23 | 23 |
| Undviken fossil kol via växttillgängligt kväve till nästa gröda ^{b)} | 13 | 38 |
| Kol till atmosfären - gödsling 0 kg N | 0 | 0 |
| Biometan som ersätter fossil diesel ^{c)} | 0 | 227 |
| Summa klimateffekt [kg C per ha] | 98 | 319 |
| Klimateffektskvot skördat / myllat ^{d)} | | 3,25 ^{d)} |

^{a)} Hälften av det stabila kolet i mellangrödan återförs med biogödseln: 50 % * 63 kg C = 31 kg C/ha.

^{b)} 1,8 kg C per kg tillverkat N är beräknad via faktorn 12/44 (andelen C i CO₂) från 6.6 kg CO₂-eq per kg N (Börjesson m.fl. 2010). 7 kg N/ha * 1,8 kg C/kg N = 13 kg C/ha. 20 kg N/ha * 1,8 kg C/kg N = 38 kg C/ha.

^{c)} 1 liter diesel MK1 = 2,69 kg CO₂-eq enligt Energimyndigheten (2021) "Växthusgasutsläpp".

365 m³ CH₄ * (100 % - 15 %) = 310 m³ CH₄ = 310 l diesel * 2,69 kg CO₂ per l diesel = 835 kg CO₂ * 12/44 = 227 kg C/ha. (15 % av energin i producerad metan till skörd och transport av grödan)

^{d)} Klimateffektskvoten för de två systemen, myllad respektive skördad mellangröda till biogas, beräknas som:

$$319 \text{ (kg C per ha)} / 98 \text{ (kg C per ha)} = \text{ca } 3,25$$

Biogödseln bidrar också med stabilt kol till marken efter det att de lättnedbrytbara delarna överförs till metan i biogasprocessen. Den mängd organiskt material som blir kvar i stubb och rötter när en mellangröda skördas med ca 10 cm stubbhöjd kommer i sig att bidra till att bevara markens bördighet enligt Blanco-Canqui m.fl. (2015 och 2020) som menar att mellangrödor för skörd är exempel på att utnyttja nya ekosystemtjänster på ett sätt som är förenligt med begreppet hållbar intensifiering av odlingsystemen. En studie av Levvasseur m.fl. (2022) visade att gödslade mellangrödor för skörd kan ge större kolinlagring än mellangrödor utan skörd. En utmaning med att skörda mellangrödor sent på hösten är dock att körning med tunga maskiner under blöta förhållanden ökar risken för packningsskador på många jordar.

5.4 Arter och artblandningar – funktion och odlingssäkerhet

Det finns olika tänkesätt och strategier kring val av mellangrödor. Att odla en art i renbestånd kan göra det lättare att så och etablera grödan genom att alla frön är jämnstora. Det kan också göra det lättare att undvika att få in mellangrödor som delar samma växtföljdssjukdomar som huvudgrödorna. En del lantbrukare väljer att odla artblandningar med några eller många arter för att gynna flera funktioner. Motivet för att odla många arter (upp till ett 10-tal) istället för några få kan vara att man upplever mindre behov av kemisk bekämpning av insekter och sjukdomar. Det kan bero på att mikrolivet och nyttodjuret i marken gynnas, vilket togs upp i avsnitt 5.1. Det är komplexa samband det handlar om och det är svårt att generellt kvantifiera hur olika artblandningar påverkar marken och grödorna. Chapagain m.fl. (2020) framhöll hur få studier som faktiskt har gjorts för att bekräfta att multiblandningar i sig har betydelse och fokuserade istället på att ta fram kriterier för att sätta samman blandningar utifrån funktioner. Det är naturligt att flera arter tillsammans stärker både mellangrödans funktioner och dess odlingssäkerhet. Med en blandning av arter med olika nischer finns potential att också kombinera olika arters egenskaper för bättre funktion totalt sett:

- Arter med olika rotsystem och rottdjup kan tillsammans utnyttja vatten och växnäring effektivare och fördela kolinlagringen i marken.
- En artblandning minskar risken att odlingen misslyckas om en art inte tar sig
- Arter som är frostkänsliga kan kombineras med köldtåliga arter för att få en levande växtlighet över vintern.
- Olika typer av bladverk kan tillsammans täcka marken bättre och därmed hålla undan ogräs effektivare.
- Baljväxter i artblandningen kan öka biomassaproduktionen och kväveinlagring för bättre förfruktseffekt.
- Icke-baljväxter i en blandning tar upp kväve effektivt ur marken och minskar risken för läckage.
- Inslag av mellangrödor som hinner blomma under sensommar och höst kan gynna pollinatörer.

Det finns guider för val av arter för mellangrödeblandningar och förslag till färdiga kombinationer, både från försäljare av utsäde och från olika projekt. Det finns också verktyg tillgängliga på webplatser för att sätta samman sin egen blandning utifrån specifika önskemål och förutsättningar, vad gäller såtidpunkt, grüngödslingsfunktion, överlevnad m.m. I Sverige har vi inte kommit så långt med den här typen av verktyg, men det pågår bland annat ett utvecklingsprojekt under 2022-2023 inom Landsbygdsnätverket som drivs av HIR Skåne (2023). Förutom att kombinera arter för att nå önskvärda funktioner gäller det alltså också att undvika arter som kan uppföröka skadegörare. Helhetsgrepp för att anpassa artsammansättningen i mellangrödeblandningar efter växtföljdens grödsammansättning undersöks exempelvis i ett tyskt innovationsprojekt (www.bonares.de/catchy) i samverkan mellan forskning och företag och i Tyskland finns också exempel på företag med program för växtföljdsanpassade artblandningar P.H. Petersen (2023) i Tyskland. I projektet Best4Soil (www.best4soil.eu/database) togs databaser fram som beslutstöd för

grödkombinationer i växtföljden, med fokus på att undvika jordburna sjukdomar och nematoder.

I tabell 4 listas arter som har ingått i de studier som presenterades i kapitel 4, arter som presenteras för svenska marknaden av Scandinavian Seed (2021) och råd som togs upp i ett material för finska lantbrukare i projektet Carbon Action (Eliisa, M. 2020). Dessa guider innehåller också artbeskrivningar, råd om utsädesmängder, sådjup m.m.

För insådda mellangrödor som förväntas leva långt in på hösten och över vintern är röd- eller vitklöver i kombination med vallgräs typiska blandningar, för att både fånga kväve effektivt från marken och få en förfruktseffekt från klöver. I vårsäd sås mellangrödan lämpligen in samtidigt som, eller strax efter, huvudgrödan (Ohlander m.fl., 1996). I höstsäd kan insädd göras redan på hösten så länge man använder relativt konkurrenssvaga arter, t.ex. rödsvingel och hundäxing. För insädd i höstvetete på våren behövs arter med större konkurrenskraft, t.ex. engelskt rajgräs (Bergkvist m.fl., 2002). Mellangrödor som sås efter skörd av huvudgrödan ska växa snabbt, och där har t.ex. oljerättika, bovete och honungsört goda egenskaper. I försök där man velat ha mellangrödor som är frostkänsliga för att kunna direktså våren efter (Hansson m.fl., 2022) har blandningar exempelvis varit: bovetehonungsört, honungsört-alexandrinerklöver, samt havre-alexandrinerklöver. Bovete är dock känsligt redan vid temperaturer över noll vilket begränsar dess användbarhet och funktion. I utlakningsförsök har bland annat rödklöver-engelskt rajgräs, råg-luddvicker, samt honungsört-engelskt rajgräs förekommit som potentiellt bra kombinationer för minskad utlakning.

I andra skånska försök med studier av effekter på ogräs har man kombinerat exempelvis honungsört eller bovete med olika ettåriga klöverarter, blandningar av ärt och havre, samt bovete och sudangräs. Hampa och luddvicker är ytterligare en kombination av mellangröda för sådd i juli som testats. För pollinationsfrämjande mellangrödor rekommenderas ofta inblandning av till exempel honungsört, blodklöver och doftklöver. Hampa och solros är exempel på arter som främjar fåglar förutsatt att de får tid att utveckla frö, och är därför mest tillämpligt på kantzoner och liknande (Odling i balans, 2022). I försök som gjorts ute på gårdar har man ofta haft många arter i blandningarna. I ett försök i Helsingborg (Sverigeförsöken, 2020) var två blandningar som provades: rajgräs-perserklöver-bovete-honungsört-luddvicker-blodklöver samt ärt-alexandrinerklöver-serradella-honungsört-bovete-vicker.

Tabell 4. Arter av mellangrödor som använts i försök eller föreslås i utbud på svenska marknaden

| Svenskt namn | Latinskt namn | Ettårig/flerårig |
|--------------|-------------------------------|------------------|
| Örter | | |
| Oljerättika | <i>Raphanus sativus</i> | Ettårig |
| Raps | <i>Brassica napus</i> | Ettårig |
| Fodermärgkål | <i>Brassica oleracea</i> | Ettårig |
| Vitsenap | <i>Sinapis alba</i> | Ettårig |
| Honungsört | <i>Phacelia tanacetifolia</i> | Ettårig |
| Bovete | <i>Fagopyrum esculentum</i> | Ettårig |

| | | |
|-----------------------------|---|--------------|
| Cikoria | <i>Cichorium intybus</i> | Flerårig |
| Lin | <i>Linum usitatissimum</i> | Ettårig |
| Solros | <i>Helianthus annuus</i> | Ettårig |
| Hampa | <i>Cannabis sativa</i> | Ettårig |
| Kummin | <i>Carum carvi</i> | Flerårig |
| Svartkämpar | <i>Plantago lanceolata</i> | Flerårig |
| Stråsäd | | |
| Råg | <i>Secale Cereale</i> | Ettårig |
| Havre | <i>Avena sativa</i> | Ettårig |
| Purrhavre | <i>Avena strigosa</i> | Ettårig |
| Gräs | | |
| Engelskt rajgräs | <i>Lolium perenne</i> | Flerårig |
| Italienskt rajgräs | <i>Lolium multiflorum</i> | Ett/flerårig |
| Westerwoldiskt rajgräs | <i>Lolium multifi. var westerwoldicum</i> | Ettårig |
| Sudangräs | <i>Sorghum sudanense</i> | Ettårig |
| Rödsvingel | <i>Festuca rubra</i> | Flerårig |
| Timotej | <i>Phleum pratense</i> | Flerårig |
| Hundäxing | <i>Dactylus glomerata</i> | Flerårig |
| Baljväxter | | |
| Rödklöver | <i>Trifolium</i> | Flerårig |
| Vitklöver | <i>Trifolium repens</i> | Flerårig |
| Alsikeklöver | <i>Trifolium hybridum</i> | Flerårig |
| Blålusern | <i>Medicago sativa</i> | Flerårig |
| Ärt | <i>Pisum sativum</i> | Ettårig |
| Humlelusern | <i>Medicago lupulina</i> | Ettårig |
| Blodklöver (Crimsonklöver) | <i>Trifolium incarnatum</i> | Ettårig |
| Grävkloöver (Subklöver) | <i>Trifolium subterraneum</i> | Ettårig |
| Doftklöver (Persisk klöver) | <i>Trifolium resipunatum</i> | Ettårig |
| Alexandrinerklöver | <i>Trifolium alexandrinum</i> | Ettårig |
| Serradella | <i>Ornithopus sativus</i> | Ettårig |
| Luddvicker | <i>Vicia villosa</i> | Ettårig |
| Fodervicker | <i>Vicia sativa</i> | Ettårig |
| Käringtand | <i>Lotus corniculatus</i> | Flerårig |
| Blålupin | <i>Lupinus angustifolius</i> | Ettårig |
| Gul sötväppling | <i>Melilotus officinalis</i> | Ett/tvåårig |

6 Några odlares erfarenheter av mellangrödor

Det finns olika strategier och odlingskoncept för mellangrödor (Marcus Willert och Olof Pålsson, HIR Skåne, muntl., 2023). Vanligast är att mellangrödan växer enbart under hösten, men den kan också övervintra och brytas före en efterföljande vårgröda. Mellangrödan kan även nyttjas en bit in på nästa odlingssäsong som en så kallad ”companion crop” i den efterföljande vårgrödan, eller rentav få utvecklas till en flerårig eller permanent bottengröda.

Mellangrödan sås antingen in i huvudgrödan eller efter huvudgrödans skörd. Insådda mellangrödor av gräs och baljväxter i stråsäd följer ofta samma koncept som vallinsådd. Insådd av mellangröda i höstsäd görs ibland på hösten och ibland på våren, då i växande gröda. Eftersådda mellangrödor sås efter skörd av huvudgrödan. Ibland sås mellangrödan genom bredsådd ett par veckor innan skörd.

Utmaningar med etablering, placering av mellangrödan i växtföljden, artval m.m. var frågor som diskuterades av odlare, rådgivare och forskare vid en workshop

våren 2022, inför uppstart av uppdraget var denna rapport ingick. Målet var att täcka in olika delar av södra Sverige, och det fanns deltagare från Skåne, Halland, Västergötland, Östergötland och Mälardalen. Texten i följande avsnitt baseras till stor del på de deltagande lantbrukarnas och rådgivarnas erfarenheter och synpunkter. De skäl som de medverkande uppgav som motivation att odla mellangrödor var bland annat:

- Kortsiktiga ekonomiska skäl
- Viltfoder för att skydda omgivande fält
- Mellangrödor som biologisk jordbearbetning i conservation agriculture
- Multiresistent oljerättika mot nematoder
- Ogräskonkurrens
- Skydda markytan mot erosion och igenslamning

6.1 Etablering – tid, metod och jordart

Lyckad etablering i rätt tid är den i särklass överskuggande utmaningen för mellangrödor som sås efter skörd av huvudgrödan, men även för insådda. Att ge sådd av mellangrödan lika hög prioritet som en huvudgröda var ett råd som erfarna odlare poängterade. Just problemet att kunna prioritera mellangrödan var något som kom upp i diskussionerna under workshopen. Efter skörd av huvudgrödan är det bråttom att få igång mellangrödan för att utnyttja maximal tid för tillväxt. Det sammanfaller dessutom med en arbetsintensiv tidsperiod. Det handlar inte bara om tidpunkten utan om att det ska finnas fukt i marken så att fröna kan gro. Bevattning kan rädda situationen, men med undantag för grönsaksodling finns det sällan att tillgå. Jordarten en begränsande faktor. Lerjordar är ofta torra i ytan under sensommaren, medan lätta jordar går bättre att hantera för sådd. Enligt deltagarna på workshopen ger styva leror en tydligt ökad svårighet med sådd av mellangröda efter skörd. På frågan hur ofta man lyckas med etableringen av mellangröda blev svaret att det kan variera mellan 20-80 % av fallen, med lägre siffror ju längre norrut man kommer.

Att mellangrödan bör sås senast i mitten av augusti var man överens om från Skåne till Mälardalen. Erfarenheter från Västergötland var att sådd av oljerättika i september inte fungerar alls.

En lantbrukare med goda erfarenheter av att odla mellangrödor beskriver att han sår mellangrödan med en bearbetande såmaskin inom någon dag efter skörd och att han har lyckats med det under de senaste fem åren på en jord med 50 procent ler. Ogräsharvning, eller vältning efter insådd i huvudgröda på våren är också något som rekommenderas för att mylla fröna om de har breddspridits.

Sådd av mellangrödan direkt på marken innan skörden av huvudgrödan är en möjlighet att få igång den tidigt, och samtidigt minska arbetsanhopningen i samband med skörd. Ibland är marken då också något fuktigare. Halmen efter huvudgrödan riskerar att hämma mellangrödan, men den kan också bevara fuktigheten och gynna groningen (Stenberg m.fl., 2007). Även om uppkomsten blir sämre och det blir glesare mellan plantorna kan de kompensera med större tillväxt, vilket bland annat visades i danska försök (Pedersen 2020, 2021) (figur 6b). I de

danska försöken användes samma utsädesmängder vid de två tidpunkterna, men annars rekommenderas att öka utsädesmängden med 30-50 %, att använda rampspridare hellre än centrifugalspridare, och vara noga med att hacka och sprida halmen väl.

6.2 Placering i växtföljden

I växtföljder med stor andel höstgrödor finns inte så många tillfällen att odla mellangröda. I områden med stor och ökande andel höstveteodling, som i Östergötland, kan därför användningen av mellangrödor bli begränsad, eftersom den givna platsen för mellangrödor är före vårsådda grödor. För eftersådda mellangrödor, som behöver sås i början-mitten av augusti, är en naturlig placering efter höstvete. Att lägga in mellangrödor efter höstvete före sockerbetor eller potatis togs upp som exempel från Skåne, liksom att ha mellangröda efter tidig potatis, morot m.m. I Halland finns en lång tradition av insådda gräsmellangrödor och en vana att få in dem i växtföljden. På senare år har också odlingen av eftersådda mellangrödor ökat i Halland. För områden med relativt sen tröskning och svala höstar är insådda mellangrödor intressant. I Mälardalen poängterade man att det är svårt att hinna odla eftersått, och därför är insådd i många fall en förutsättning för att odla en mellangröda över huvud taget, enligt rådgivare. I Västergötland fanns goda erfarenheter representerade på workshopen av att så in mellangröda (engelskt rajgräs och klöver) i höstvete på våren.

6.3 Strategier för artval

Under workshopen framkom olika strategier vad gällde artval. Att så det man har fått över av havreutsäde eller liknande är en strategi som gör det billigt och funktionellt att odla mellangröda. För de som använder sortblandningar finns det en mer uttalad strategi och tanke att prioritera olika funktioner som de vill uppnå med sin odling. En strategi för val av arter illustreras av följande citat från en film om mellangrödor (jordbruksverket.se/mellangrodor), där lantbrukaren berättar vilka funktioner man är ute efter med sin mellangrödeblandning:

”Vi vill suga upp allt kväve i jorden, allt restkväve och så från föregående gröda. Vi vill också dra ner nytt kväve i jorden från luften med baljväxter. Och så vill vi ha en gröda som klarar sig hela säsongen med ett stort rotsystem, alltså en gräsväxt, en spannmålsväxt, t.ex. råg”

Blandningar av många arter kan ingå i strategin för att främja jordens funktioner och för att få sanerande effekt mot sjukdomar. En tumregel som togs upp är att en artblandning där alla arter har en lägre andel än 20 % är att eftersträva i detta avseende, men varifrån detta råd kommer har vi inte hittat. Figur 22b visar resultat av biomassamätningar i några artrika blandningar av mellangrödor som utfördes på Krokstorps gård utanför Helsingborg.

Det viktigaste för valet av mellangröda är att den växer tillräckligt snabbt och tillräckligt länge utan att dödas av frost. Sådd av något som inte ger påtaglig biomassa är otillfredsställande enligt lantbrukarna. Gödsling av en mellangröda för att få igång tillväxten ordentligt var en fråga som lyftes på workshopen, men det är inte möjligt om man vill ha söka miljöersättningen för fånggröda eller

mellangröda. Oljerättika eller rajgräs med klöver är vanliga arter i alla områden. I Halland har odlingen av eftersådd honungsort, rörsvingel, westerwoldiskt rajgräs och olika klöverarter ökat, men frostkänsligheten upplevs som ett problem. En av lantbrukarna i Skåne som tillämpar direktsådd vill ha lågväxande övervintrande mellangrödor utan gräs, t.ex. vitklöver och humlelusern, som skyddar marken mot erosion och igenslamning under vårvintern. Dessa avdödas sedan med glyfosat på våren.

I diskussionen om arter återkommer ofta, liksom i denna workshop, farhågor hos lantbrukare för växtföljdssjukdomar och att utsäde för med sig ogräs. Risker för växtföljdssjukdomar är också något som rådgivare och experter försöker hitta metoder att hantera genom rekommendationer kring artval, se avsnitt 5.4.

6.4 Övergång till nästa gröda

För mellangrödor som inte dör av frost används på många gårdar ofta avdödning med glyfosat på hösten eller på våren inför sådd av nästa gröda, följt av nedbrukning genom stubbearbetning och/eller plöjning. Vid avdödning med glyfosat på hösten kan det ibland vara svårt att förena det på ett funktionellt sätt med stöd villkoren eftersom det blir så sent att avdödningen fungerar dåligt. Likaså kan kemisk avdödning på våren vara svårt att hinna med innan vårbruket, och många lantbrukare vill avsluta mellangrödan på hösten. Detta var bakgrunden till en undersökning av olika kombinationer av kemisk avdödning och nedplöjning på ett par försöksplatser, inför sådd av vårsäd. Motivet var att studera om nedplöjning av rajgräsmellangröda i slutet av oktober eller på våren kan kombineras med kemisk behandling redan i slutet av september eller början av oktober, och ändå få god effekt på kväveläckaget. Det visade sig att tiden som mellangrödan fick växa under hösten var viktig för att ge god effekt på utlakningen, och att ha en död mellangröda liggande som brukas ned senare blir en fråga om att kompromissa om effekten på läckaget. En snabb ansamling av mineralkväve i marken observerades efter kemisk behandling i september och början av oktober trots att nedbrukningen fördröjdes (Aronsson m.fl., 2011), och effekten på läckaget blev sämre.

Avdödning av mellangrödan på våren tillämpas på många gårdar. För de lantbrukare som använder direktsådd eller reducerad jordbearbetning är glyfosat ett särskilt viktigt redskap för att bryta mellangrödan, såvida den inte frusit bort under vintern, och ogräsvegetation. Det finns också lantbrukare som använder olika redskap för att fräsa, sönderdela eller välta mellangrödans biomassa på våren inför direktsådd. Direktsåmetoderna innebär olika grad av jordbearbetning, men har gemensamt att jordbearbetningen är minimal, det vill säga så ytlig som möjligt och/eller så liten del av markytan som möjligt. Vid exempelvis strimsådd (strip tillage) sker jordbearbetning enbart i själva raden där grödan ska sås. För grödor som sås relativt sent på våren, t.ex. majs eller rödbetor, kan vårbrytning av mellangröda vara funktionellt. En mellangröda av exempelvis råg och luddvicker kan då växa ända fram till mitten av maj månad. Den frosttåligen luddvickern växer länge på hösten och med en period för tillväxt även under våren kan man till och med hinna ta en skörd av mellangrödan innan majsens (Marcus Willert, HIR Skåne, 2023, muntl.). Det finns också de lantbrukare som låter mellangrödan leva kvar i nästa gröda och på så sätt håller marken ständigt bevuxen. Ofta används då en

mellangröda av lågväxta baljväxter med exempelvis 25 cm radavstånd som blir en s.k. ”companion crop” nästa år. Ibland görs en glyfosatbehandling i låg dos på våren för att hålla nere den något.

7 Kunskapsbehov

Det finns fortfarande mycket vi inte känner till om mellangrödors påverkan på odlingssystem, mark och klimat. Det gäller allt ifrån verkningsmekanismer för olika funktioner till hur effekterna av stöd för kolinlagring och minskat läckage kan kvantifieras för klimat- och miljömålsuppföljningar. Också lantbrukare har många frågor kring mellangrödor, både kring praktisk odling och kring hur användningen av mellangrödor kan förbättra produktivitet, markens funktion och minska behovet av olika insatser.

7.1 Odlarnas frågor

Etableringen av mellangrödor som sås efter spannmålsskörd är en stor utmaning som kräver både kunskap, erfarenhet och prioritering när det ska genomföras för ett så säkert resultat som möjligt. Rådgivare och lantbrukare ser att det finns ett behov av mer erfarenhetsutbyte och beprövade råd för olika typer av jordar och områden. I alla stödområden, men särskilt i de nordligare områdena finns ett behov av att prova arter och sorter av mellangrödor, både eftersådda och insådda. Det finns också många funderingar kring arter, sorter och kanske framför allt om blandningars effekter, till exempel följande som framkom under en workshop våren 2022, se kapitel 6:

- Blandningar och deras funktion att sanera mot sjukdomar kontra risker att patogener uppförkas genom att mellangrödor utgör gröna bryggor
- Mellangröda som avbrottsgröda för att motverka växtsjukdomar
- Synergieffekter av blandningar
- Mellangrödors allelopatiska effekter
- Mellangröda som ”living mulch” och dess effekter för att minska renkavle och andra ogräs

7.2 Forskningsfrågor

Det finns ett behov av mer kunskap på en grundläggande nivå, särskilt om mekanismerna för inlagring och stabilisering av kol i marken, och om mekanismer och processer som styr emissioner av lustgas. Det finns också ett behov av fältmätningar för att undersöka kopplingen mellan mekanismer, odlingsfaktorer och ”management” av mellangrödor, med syfte att förbättra metoder och modeller. Det handlar i förlängningen om att kunna ge praktiska odlingsråd för optimerad kolinlagring med mellangrödor för att samtidigt uppnå minskade risker för växtnäringsläckage och lustgasbildning. Att verifiera nyttor för produktion och

odlingssäkerhet samt eventuella risker utifrån andra aspekter är också viktiga forskningsområden, men i prioriteringslistan nedan har vi lagt fokus på kolinlagring och kväveomsättning (mineralisering, läckage och lustgas):

-Identifiering och kvantifiering av styrande faktorer för lustgasbildning från mellangrödor (grödans egenskaper, jordart, väderförhållanden, jordbearbetningsinsatser m.m.)

-Nitratbildning, läckage och lustgasbildning i samband med olika avdödningsmetoder (kemisk, mekanisk, frost) av mellangrödor på hösten och våren, särskilt för arter med låg C/N-kvot och hög frostkänslighet.

-Nitratbildning, läckage och lustgasbildning i samband med skörd och bortförsl som foder eller råvara i den biobaserade ekonomin ”Energy cover crops” av mellangrödor.

-Effekten av att undvika jordbearbetning, och effekten av odlingskoncept inom det som brukar kallas regenerativt jordbruk, för markorganismssamhället och funktion med avseende på kolinlagring

-Mellangrödearters påverkan på mikrosamhällets funktion och kolutnyttjande, exempelvis, med prioritet att närmare undersöka mekanismer bakom baljväxters gynnsamma inverkan på kolinlagringen, inklusive effekter på efterföljande huvudgröda och kväveläckage.

-Kvantitativ betydelse av olika mekanismer för rötters bidrag till stabilisering av kol i marken (kemiska, biologiska, fysiska) jämfört med olika fraktioner eller delar av ovanjordiska skörderester (stubb etc)

-Förväntad tillväxtökning och kolinlagring av kvävegödning, och balansen gentemot risker för ökat kväveläckage och lustgasproduktion. Även med koppling till skörd av mellangrödor, t.ex. så kallad ”Energy cover crop”

-Rotdjup och rotfördelning i marken för olika arter och artblandningar i olika jordtyper, med fokus på att även inkludera kolinlagring i alven.

-Utveckla metoder för att inkludera kolomsättning och inlagring under matjordsdjup i kolbalansberäkningar

-Forskning om odlares attityder och perspektiv på mellangrödor. Varför odlas inte större arealer i Sverige?

7.3 Behov för miljö- och klimatrapporteringen

Inom miljö- och klimatrapporteringen används modellsystem för att beräkna åkermarkens kolinlagring (ICBM) och näringsläckage (NLeCCS, Johnsson m.fl., 2019). Förutom behovet av kunskap för att förbättra modellerna i sig finns behov av säkra indata för uppföljning och för scenarier.

-Behov av fältmätningar av mellangrödor för att ta fram funktioner som beskriver tillväxten av olika mellangrödor utifrån etableringsmetod, etableringstidpunkt väder, klimat, jordart m.m. i olika regioner.

-Kontinuerliga och högupplösta övervakningsprogram för lustgasemissioner i olika typer av odlingsystem

-Systemanalyser av olika mellangrödesystem för helhetsbedömning av effekter på kol, kväveflöden, klimat, växthusgasdynamiken och andra ekosystemtjänster.

-Tillgång till nationella data över mellangrödearealer, arter och biomassa och deras geografiska fördelning för nationella beräkningar, med en upplösningssgrad minst per produktionsområde. Det kan handla om bättre statistikunderlag och utveckling av övervakningssystem med fjärranalys.

7.4 Certifiering, rådgivning och åtgärdsprogram

Att på ett tillförlitligt sätt uppskatta i vilken grad mellangrödans kol kan kompensera för utsläpp av CO₂ från fossila källor är svårt. Det finns stora osäkerheter vad gäller ”det gröna kolets” beständighet, inlagringspotentialen i relation till utgångsläget och möjligheterna att verifiera kolinlagringen med mätningar. Negativa bieffekter, i synnerhet inverkan på lustgasemissioner från marken, kan vara stora och är inte tillräckligt utredda. Detta gör att betalningssystem och certifieringsprogram för att premiera kolinlagring har ifrågasatts som verktyg för att minska klimatpåverkan (Paul m.fl., 2023).

Likaså finns risken att ett införande av åtgärder baserat på rådgivning, miljöersättningar eller regelverk skulle slå tillbaka på trovärdigheten om åtgärderna visar sig vara ineffektiva, eller till och med kontraproduktiva. Bedömningen av när kunskapsläget kan anses tillräckligt säkert för att införa åtgärdsprogram som uppfyller förväntningarna kräver riskanalys och samhällsekonomisk avvägning

7.5 Framtidens odlingsystem

Mellangrödor bör ha en given plats i framtidens odlingsystem. Med höstar och vintrar som blir allt varmare kommer behovet av att hålla marken bevuxen för att fånga kväve och kol att bli allt viktigare, för att bibehålla markens bördighet och för att minska jorderosion och växtnäringsläckage. Potentialen för att odla mellangrödor kommer också att öka genom att växtsäsongen blir längre och odlingsgränsen för när det är relevant att odla mellangröda förskjuts norrut. Det finns dock en osäkerhet inför mellangrödors framtid, och det gäller den kemiska avdödningen. Om glyfosat förbjuds eller när resistensen hos ogräsarter mot glyfosat ökar finns det inget alternativt preparat i många fall. Risk är då att odlingssystemen återgår till hur de såg ut tidigare, med mer jordbearbetning och mindre mellangrödor. Följden blir att kolhalten sjunker och CO₂ avges, samtidigt som lustgasen finns kvar i atmosfären. Viktiga forskningsfrågor inför framtiden är:

-En ökad nedbrytningshastighet för organiskt material kommer troligtvis att åtminstone delvis kompenseras för genom förlängd växtsäsong och ökade skördar som ger ökad koltillförsel till marken. Det finns ett stort behov av att utforska vad en ökad produktion av växtmaterial och omsättningshastighet kommer att betyda för kolinlagring och kväveflöden, bland annat för att kunna anpassa parameterisering av kolbalans- och läckagemodeller.

-Klimatförändringen innebär bland annat förändrade nederbördsmonster och temperaturfluktuationer. Lustgasemissioner påverkas starkt av snabba fluktuationer i markens temperatur och fuktighetsförhållanden, särskilt vid frysning, tjälbildning och upptining. Hur torrperioder påverkar lustgasemissionerna när marken återväts är ännu inte så väl undersökt. Mer kunskap behövs om processerna i sig för att sedan kunna koppla effekter till hur mellangrödors egenskaper kan utnyttjas för att kunna påverka risken för emissioner.

-Mer kunskap behövs för optimering av mellangrödesystemen inför framtiden. Odlingsfaktorer som bör prioriteras är exempelvis artval av mellangröda (inklusive artblandningar), tidpunkt och djup för nedbrukning kontra kemisk avdödning, effekten av att skörda mellangröda och nitrifikationsinhibitorer. Mer kunskap behövs också för att anpassa mellangrödesystemen till minskat beroende av kemisk avdödning, bland annat för att glyfosat kan komma att fasas ut.

8 Referenser

- Abalos D, Rittl TF, Recous S, Thiebeau P, Topp CFE, van Groenigen KJ, Butterbach-Bahl K, Thorman RE, Smith KE, Ahuja I, Olesen JE, Bleken MA, Rees RM, Hansen S. 2022a. Predicting field N₂O emissions from crop residues based on their biochemical composition: A meta-analytical approach. *Sci Total Environ.* 812: 152532.
- Abalos D, Recous S, Butterbach-Bahl K, De Notaris C, Rittl TF, Topp CFE, Petersen SO, Hansen S, Bleken MA, Rees RM, Olesen JE. 2022b. A review and meta-analysis of mitigation measures for nitrous oxide emissions from crop residues. *Sci Total Environ* 828, 154388.
- Abawi, G.S., & Widmer, T.L. 2000. Impact of soil health management practices on soilborne pathogens nematodes and root diseases of vegetable crops. *Applied Soil Ecology* 15, 37–47.
- Abdalla M, Hastings A, Cheng K, Yue Q, Chadwick D, Espenberg M, Truu J, Rees RM, Smith P. 2019. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Glob Chang Biol* 25, 2530-2543.
- Adholm A. 2005. Vårsådd av fånggrödor i höstvetete. Skåneförsöken 2005. <http://www.skaneforsoken.nu/dokument/L3-2259-2005.pdf>
- Ahlberg I & Nilsson T. 2015. Investigation on the use of intermediate crops for anaerobic digestion as a renewable source of energy. Master thesis, Lund university, Sweden
- Ahlqvist A. 2019. Summer cover crops after harvest of early potatoes control seed weeds. Degree Project, SLU, Alnarp.
- Andrén O & Kätterer T. 1997. ICBM - the Introductory Carbon Balance Model for exploration of soil carbon balances, *Ecol. Appl.* 7(4): 1226–1236.
- Andrén O, Kätterer T, Karlsson T, Eriksson J. 2008. Soil C balances in Swedish agricultural soils 1990–2004, with preliminary projections. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81:129–144. DOI 10.1007/s10705-008-9177-z
- Aronsson H, Torstensson G, Lindén B. 2003. Långliggande utlakningsförsök på lätt jord i Halland och Västergötland. Effekter av flytgödseltillförsel, insådda fånggrödor och olika jordbearbetningstidpunkter på kvävedynamiken i marken och kväveutlakningen. Resultat från perioden 1998-2002. *Ekohydrologi* nr 74, Inst f. mark och miljö, SLU, Uppsala

- Aronsson H, Stenberg M, Ulén B. 2011. Leaching of N, P and glyphosate from two soils after herbicide treatment and incorporation of a ryegrass catch crop. *Soil Use and management* 27, 54-68. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00277.x>
- Aronsson H, Bergkvist G, Stenberg M, Wallenhammar A-C. 2012. Gröda mellan grödorna -samlad kunskap om fånggrödor. Rapport 2012:21, Jordbruksverket, Jönköping.
- Aronsson H, Liu J, Ekre E, Torstensson G, Salomon E. 2014. Effects of pig and dairy slurry application on N and P leaching from crop rotations with spring cereals and forage leys. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 98: 281-293. DOI:10.1007/s10705-014-9611-3.
- Aronsson H, Ringselle B, Andersson L, Bergkvist G. 2015a. Combining mechanical control of couch grass (*Elymus repens* L.) with reduced tillage in early autumn and cover crops to decrease nitrogen and phosphorus leaching. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 102:383–396.
- Aronsson H, Torstensson T, Ekre E. 2015b. Eftersådda fånggrödor på sandjord i Halland. Slutrapport i Jordbruksverkets databas (fou.jordbruksverket.se)
- Aronsson H, Hansen E M, Thomsen I K, Liu, J, Øgaard A F, Känkänen H, Ulén B. 2016. The ability of cover crops to reduce nitrogen and phosphorus losses from arable land in southern Scandinavia and Finland – a review. *Journal of Soil and water Conservation* 71 (1): 41-55.
- Aronsson, H. 2018. The role of cover crops in agriculture and their environmental significance. In *Oxford Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press. DOI:10.1093/acrefore/9780199389414.013.312
- Aronsson H, Norberg L, Blomberg M, Torstensson G. 2018. Utlakningsförsök med vintergrön mark 1993-2017. *Ekohydrologi* 151, Inst f mark och miljö, SLU, Uppsala.
- Aronsson H, Berglund K, Djodjic F, Etana A, Geranmayeh P, Johnsson H, Wesström I. 2019a. Effekter av åtgärder mot fosforförluster från jordbruksmark och åtgärdsutrymme. *Ekohydrologi* 160, Inst f mark och miljö, SLU, Uppsala.
- Aronsson H, Ernfors M, Hansson D, Nilsson A, Svensson S-E, Tufvesson L. 2019b. Använd fånggrödor som mellangrödor för ökad produktivitet och minskade förluster av N och P. Slutrapport projekt O-15-23-569, Stiftelsen lantbruksforskning (www.lantbruksforskning.se)
- Aziz, K. 2022. Effects of cover crops on nitrous oxide (N₂O) emissions in cereal cropping. Master thesis, Department of Ecology, SLU, Uppsala.
- Barton L, Wolf B, Rowlings D, Scheer C, Kiese R, Grace P, Stefanova K, Butterbach-Bahl K. 2015. Sampling frequency affects estimates of annual nitrous oxide fluxes. *Sci Rep* 5, 15912.
- Basche AD, Miguez FE, Kaspar TC, Castellano MJ. 2014. Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation* 69, 471-482.
- Basile-Doelsch I, Balesdent J, Pellerin S. 2020. Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. *Biogeosciences*, 17:5223–5242. DOI: 10.5194/bg-17-5223-2020
- Bechmann M. 2012. Effect of tillage on sediment and phosphorus losses from a field and a catchment in south eastern Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B*, 62 (Suppl. 2), 206–216.
- Bechmann ME, Kleinman PJA, Sharpley AN, Saporito LS. 2005. Freeze-thaw effects on phosphorus loss in run-off from manures and catch-cropped soils. *Journal of Environmental Quality*, 34, 2301.
- Bergkvist G, Ohlander L, Rydberg T. 2002. Insådd av mellangrödor i höstsäd. Rapport 4. Institutionen för ekologi och växtproduktionslära, SLU, Uppsala
- Bergkvist G, Adler A & Weih M. 2010. Red fescue undersown in winter wheat suppresses *Elytrigia repens*. *Weed Research* 50, 447-455.

- Bergkvist G, Stenberg M, Wetterlind J, Båth B, Elfstrand S. 2011. Clover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley –Effect of N dose and companion grass. *Field Crops Research* 120, 292-298.
- Bergström L & Jokela B. 2001. Ryegrass cover crop effects on nitrate leaching in spring barley fertilized with 15NH₄ 15NO₃. *Journal of Environmental Quality*, 30:1659-1667.
- Blanco-Canqui H, Shaver TM, Lindquist JL, Shapiro CA, Elmore RW, Francis CA, Hergert GW. 2015. Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. *Agronomy Journal* 107(6): 2449-2474.
- Blanco-Canqui H, Ruis SJ, Proctor CA, Creech CF, Drewnoski ME, Redfearn DD. 2020. Harvesting cover crops for biofuel and livestock production: Another ecosystem service? *Agronomy Journal* 112(4): 2373-2400.
- Blujdea V, Viñas, RA, Federici S, Grassi, G. 2016. The EU greenhouse gas inventory for the LULUCF sector: I. Overview and comparative analysis of methods used by EU member states. <http://dx.doi.org/10.1080/17583004.2016.1151504>
- Bolinder MA, Angers DA, Giroux M, Laverdière MR. 1999. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea Mays* L.). *Plant and Soil*. 215: 85-91.
- Bolinder MA, Janzen HH, Gregorich EG, Angers DA, Vanden Bygaart AJ. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agr. Ecosyst. Environ.* 118, 29–42.
- Bolinder M, Crotty F, Elsen A, Frac M, Kismanyoky T, Lipiec J, Tits M, Toth Z, Kätterer T. 2020. The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes: A synthesis of reviews. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 25: 929-952. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09916-3>
- Brady, N.C. 1984. *The Nature and Properties of Soils*. 9th Edition. Macmillan Publishing Company. New York. 750 p.
- Brandsæter LO & Netland J. 1999. Winter annual legumes for use as cover crops in row crops in Northern regions: 1. Field experiments. *Crop Science* 39:1369-1379
- Brandsæter LO, Goul Thomsen M, Wærnhus K, Fykse H. 2012. Effects of repeated clover undersowing in spring cereals and stubble treatment in autumn on *Elymus repens*, *Sonchus arvensis* and *Cirsium arvense*. *Crop protection*, 32: 104-110. DOI:10.1016/j.cropro.2011.09.022
- Breland TA. 1996. Green manuring with clover and ryegrass catch crops undersown in small grains: Effects on soil mineral nitrogen in field and laboratory experiments. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B*, 46, 178–185.
- Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S. 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 368: 20130122.
- Bøe F, Bechmann M, Falk Øgaard A, Sturite L, Brandsæter LO. 2019 Fangvekstenes økosystemtjenester, kunnskapsstatus om effekten av fangvekster .NIBIO rapport vol. 5, nr 9, 2019
- Böhm W. 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 188 pp.
- Börjesson P, Tufvesson L, Lantz M. 2010. Livscykelanalys av svenska biodrivmedel. Environmental and Energy System Studies report no. 70; Vol. 70. Environmental and Energy Systems Studies, Lund university.
- Castellano MJ, Schmidt JP, Kaye JP, Walker C, Graham CB, Lin H, Dell CJ. 2010. Hydrological and biogeochemical controls on the timing and magnitude of nitrous oxide flux across an agricultural landscape. *Global Change Biology* 16: 2711-2720.
- Chapagain T, Lee E A, Raizada MN. 2020. The potential of multi-species mixtures to diversify cover crop benefits. *Sustainability*, 12: 2058. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/2058>
- Chavarría DN, Verdenelli, RA, Muñoz EJ, Conforto C, Restovich SB, Andriulo AE, Meriles JM, Vargas-Gil S. 2016. Soil microbial functionality in response to the

- inclusion of cover crop mixtures in agricultural systems. 2016. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(2): 2171-9292. DOI:10.5424/sjar/2016142-8395
- Chirinda N, Olesen JE, Porter JR. 2012. Root carbon input in organic and inorganic fertilizer-based systems. *Plant and Soil*, 359:321-333. DOI 10.1007/s11104-012-1208-5
- Cleveland CC & Liptzin D. 2007. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass. *Biogeochemistry*, 85: 235-252. DOI 10.007/s10533-007-9132-0
- Coonan EC, Kirkby CA, Kirkegaard JA, Amidy MR, Strong CL, Richardson AE. 2020. Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117:273–298. DOI:10.1007/s10705-020-10076-8
- Courtney AD. 1980. Proc. British Crop Protection Conference – Weeds, Brighton, UK, Dabney SM, Delgado JA, Meisinger JJ, Schomberg HH, Liebig MA, Kaspar T, . . . Reeves, W. 2010. Using Cover crops and cropping systems for nitrogen management. In JA Delgado & RF Follett (Eds.), *Advances in Nitrogen Management for Water Quality* (pp. 230–281). Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.
- Dechow R, Franko U, Kätterer T, Kolbe H. 2019. Evaluation of the RothC model as a prognostic tool for the prediction of SOC trends in response to management practices on arable land. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.10.001
- De Notaris C, Rasmussen J, Sorensen P, Olesen JE. 2018. Nitrogen leaching: A crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture Ecosystems & Environment* 255: 1-11.
- De Ruijter FJ, Huijsmans JFM, Rutgers B. 2010. Ammonia volatilization from crop residues and frozen green manure crops. *Atmospheric Environment* 44: 3362-3368. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.06.019
- De Ruijter FJ & Huijsmans JFM. 2019. A methodology for estimating the ammonia emission from crop residues at a national scale. *Atmospheric Environment X* 2 100028. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2019.100028.
- Drost SM, Rutgers M, Wouters M, de Boer, W, Bodelier PLE. 2020. Decomposition of mixtures of cover crop residues increases microbial functional diversity. *Geoderma* 361, 114060. DOI:10.1016/j.geoderma.2019.114060
- Duan YF, Kong XW, Schramm A, Labouriau R, Eriksen J, Petersen SO. 2017. Microbial N Transformations and N₂O Emission after Simulated Grassland Cultivation: Effects of the Nitrification Inhibitor 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP). *Appl Environ Microbiol*. 83.
- Duan YF, Hallin S, Jones CM, Prieme A, Labouriau R, Petersen SO. 2018. Catch Crop Residues Stimulate N₂O Emissions During Spring, Without Affecting the Genetic Potential for Nitrite and N₂O Reduction. *Front Microbiol* 9, 2629.
- Eiland M, Klamer A-M, Lind M, Leth E. 2001. Influence of Initial C/N Ratio on Chemical and Microbial Composition during Long Term Composting of Straw F. *Microbial Ecology*, 41(3): 272-280.
- Ejack L, Whalen JK. 2021. Freeze-thaw cycles release nitrous oxide produced in frozen agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils* 57, 389-398.
- Ekofakta 2022. Ekologiskt, regenerativt, agroekologi... -vad är skillnaden? <https://ekofakta.se/vad-saeger-forskningen-om-ekologiskt-lantbruk/markboerdighet-och-ekologisk-produktion> (2022-12-29)
- Ejack L, Whalen JK. Freeze-thaw cycles release nitrous oxide produced in frozen agricultural soils. 2021. *Biology and Fertility of Soils*. 57: 389-398.
- Ekwunife KC, Madramootoo CA, Abbasi NA. 2021. Assessing the impacts of tillage, cover crops, nitrification, and urease inhibitors on nitrous oxide emissions over winter and early spring. *Biology and Fertility of Soils*.

- Eliisa M. 2020. Guide om fånggrödor – Praktiska råd för utnyttjande av fånggrödor i Finland. Carbon Action https://carbonaction.org/wp-content/uploads/2020/10/Ker%C3%A4%C3%A4j%C3%A4kasviopas_ruotsi_web.pdf (2022-11.-24)
- Engström L, Lindén B, Roland J. 2000. Höstraps i Mellansverige – inverkan av såtid och ogräsbekämpning på övervintring, skörd och kvävehushållning. Institutionen för jordbruksvetenskap, rapport 7, serie B Mark och växter, SLU, Skara
- Eriksen J, Askegaard M, Søgaard K. 2008. Residual effect and nitrate leaching in grass-arable rotations: Effect of grassland proportion, sward type and fertilizer history. *Soil Use and Management* 24:373-382.
- Essich L, Nkebiwe PM, Schneider M, Ruser R. 2020. Is Crop Residue Removal to Reduce N₂O Emissions Driven by Quality or Quantity? A Field Study and Meta-Analysis. *Agriculture* 10.
- Fanin N, Fromin N, Bertrand I. 2016. Functional breadth and home-field advantage generate functional differences among soil microbial decomposers. *Ecology* 97:1023–1037. DOI:10.1890/15-1263.1
- Farquhar GD, Firth PM, Wetselaar R, Weir B. 1980. On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment - determination of the ammonia compensation point. *Plant Physiol.* 66, 710–714.
- Foltz ME, Kent AD, Koloutsou-Vakakis S, Zilles JL. 2021. Influence of rye cover cropping on denitrification potential and year-round field N₂O emissions. *Sci Total Environ.* 765: 144295.
- Forster P, Storelvmo T, Armour K..... Zhang H. 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: Masson-Delmotte V, P Zhai, A Pirani.....B Zhou (Ed.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054.
- Fortin JG, Bolinder MA, Anctil F, Kätterer T, Andrén O, Parent LE. 2011. Effects of climatic data low-pass filtering on the ICBM temperature- and moisture-based soil biological activity factors in a cool and humid climate. *Ecological modelling*, 222:3050-3060
- Fukumasu J, Poeplau C, Coucheney E.....Larsbo M. 2021. Oxalate-extractable aluminum alongside carbon inputs may be a major determinant for organic carbon content in agricultural topsoils in humid continental climate. *Geoderma* 402 (2021) 115345. DOI:10.1016/j.geoderma.2021.115345
- Gardiner J, Morra MJ, Eberlein CV, Brown PD and Borek V, 1999. Allelochemicals released in soil following incorporation of rapeseed (*Brassica napus*) green manures. *J. Agric. Food Chem.* 47, 3837-3842
- Garland G, Edlinger A, Banerjee S.....van der Heijden MGA. 2021. Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature* 2: 28-37. DOI:10.1038/s43016-020-00210-8
- Goodroad LL, Keeney DR. 1984. Nitrous-oxide emissions from soils during thawing. *Canadian Journal of Soil Science.* 64: 187-194.
- Greppa näringen, 2022.
<https://adm.greppa.nu/radgivning/mullhaltochbordighet/underbesoket12b.4.1bc5b83316258284bb31e57.html>
- Groffman PM, Butterbach-Bahl K, Fulweiler RW, Gold AJ, Morse JL, Stander EK, Tague C, Tonitto C, Vidon P. 2009. Challenges to incorporating spatially and temporally explicit phenomena (hotspots and hot moments) in denitrification models. *Biogeochemistry* 93, 49-77.

- Guenet B, Gabrielle B, Chenu C.... Zhou F. 2021. Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Glob Chang Biol.* 27: 237-256.
- Gunnarsson M. 2014. Gödslade eller ogödslade mellangrödor som biogassubstrat. Självständigt arbete-trädgårdsingenjör, SLU, Alnarp.
- Hadden D, Grelle A. 2017. The impact of cultivation on CO₂ and CH₄ fluxes over organic soils in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 15;243:1-8.
- Haas E, Carozzi M, Massad RS, Butterbach-Bahl K, Scheer C. 2022. Long term impact of residue management on soil organic carbon stocks and nitrous oxide emissions from European croplands. *Sci Total Environ* 836, 154932.
- Han Z, Walter MT, Drinkwater LE. 2017. N₂O emissions from grain cropping systems: a meta-analysis of the impacts of fertilizer-based and ecologically-based nutrient management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 107:335–355. DOI 10.1007/s10705-017-9836-z
- Hansen EM & Thomsen I. 2022. Beregning af kvotereduktion ved sen etablering af efterafgrøder. Aarhus universitet, DCA-Nationalt center for fødevarer og jordbrug.
- Hansson D, Svensson S-E, Prade T. 2021. Etableringstidpunktens inverkan på sommarmellangrödors markkolsbidrag och ogräsbekämpande egenskaper – fältförsök på Norra Åsum 2018. SLU Alnarp, Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap. Rapportserie 2021:1
- Hansson D, Prade T, Svensson S-E. 2022. Strimsådd av ekologiska specialgrödor i utvintrande mellangrödor – delrapport 2022. Sveriges lantbruksuniversitet, SLU Alnarp, Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap, Institutionen för biosystem och teknologi.
- Henrysson K, Meurer KHE, Bolinder M, 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*, 13:1: 266-278. DOI:10.1080/17583004.2022.2074315.
- HIR Skåne. 2023. Webbaserat verktyg för val av mellangroda. <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/find-connect/projects/webbaserat-verktyg-f%C3%B6r-val-av-mellangr%C3%B6da> (2023-04-20)
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories (ed Eggleston S et al.). Institute for global environmental strategies (IGES). <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (2022-11-30)
- Janzen HH, Entz T, Ellert BH. 2002. Correcting mathematically for soil adhering to root samples. *Soil Biology & Biochemistry* 34 (2002) 1965–1968
- Jensen JL, Eriksen J, Thomsen IK, Munkholm LJ, Christensen BT. 2021. Cereal straw incorporation and ryegrass cover crops: The path to equilibrium in soil carbon storage is short. *European Journal of Soil Science*, 2021;1–10. DOI: 10.1111/ejss.13173
- Jian J, Du X, Reiter M & Stewart RD. 2020. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biology and Biochemistry*, 143, 107735. DOI:10.1016/j.soilbio.2020.107735.
- Johnsson H, Mårtensson K, Lindsjö A, Persson K, Blombäck K. 2019. NLeCCS – ett system för beräkning av läckage av näringsämnen från åkermark. *Ekohydrologi* 159, SLU, Uppsala.
- Jordon MW, Smith P, Long PR, Bürkner PC, Petrokovsky G, Willis KJ. 2022. Science of the Total Environment, 825, 153955. Can regenerative agriculture increase national soil carbon stocks? Simulated country-scale adoption of reduced tillage, cover cropping, and ley-arable integration using RothC. *Science of the Total Environment* 825, 153955. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153955

- Justes EE, Rechauchère O, Chemineau, P. 2012 The use of cover crops to reduce nitrate leaching: Effect on the water and nitrogen balance and other ecosystem services. [0] INRA. 2012, 8p. fffhal-03231464f
- Kallenbach CM, Wallenstein MD, Schipanski ME and Grandy AS. 2019. Managing agroecosystems for soil microbial carbon use efficiency: Ecological unknowns, potential outcomes, and path forward. *Frontiers in Microbiology* 10: 1146. doi: 10.3389/fmicb.2019.01146
- Keesing F, Belden LK, Daszak P, Dobson A, Harvell CD, Holt RD, Hudson P, Jolles A, Jones KE, Mitchell CE, Myers SS, Bogich T, Ostfeld RS. 2010. Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature* 468:647–652. doi:10.1038/nature09575
- Kirkegaard JA & Sarwar M. 1999. Glucosinolate profiles of Australian canola (*Brassica napus annua* L) and indian mustard (*Brassica juncea* L) cultivars: implications for biofumigation. *Australian Journal of Agricultural Research*. 50: 315-24
- Kong X, Duan Y, Schramm A, Eriksen J, Holmstrup M, Larsen T, et al. Mitigating N₂O emissions from clover residues by 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) without adverse effects on the earthworm *Lumbricus terrestris*. *Soil Biology and Biochemistry* 2017; 104: 95-107.
- Kong X, Eriksen J, Petersen SO. 2018. Evaluation of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) for mitigating soil N₂O emissions after grassland cultivation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 259: 174-183. DOI:10.1016/j.agee.2018.02.029
- Kröbel R, Bolinder MA, Janzen HH, Little SM, Vandenbygaart AJ, Kätterer T. 2016. Canadian farm-level soil carbon change assessment by merging the greenhouse gas model Holos with the Introductory Carbon Balance Model (ICBM). *Agricultural Systems*, 143:76-85. DOI: 10.1016/j.agry.2015.12.010.
- Kulesza SB, Woodley AL, Heather K, Kilroy G. 2022. Cover crops can increase ammonia volatilization and reduce the efficacy of urease inhibitors. *Soil Science society of America Journal*, 86:398–406. DOI: 10.1002/saj2.20367
- Känkänen H, Eriksson C, Rökköläinen M, Vuorinen M. 2003. Soil nitrate N as influenced by annually undersown cover crops in spring cereals. *Agricultural and Food Science in Finland* 12, 165-176
- Känkänen H & Eriksson C. 2007. Effects of undersown crops on soil mineral N and grain yield of spring barley. *European Journal of agronomy* 27:25-40
- Kätterer T, Bolinder MA, Andrén O, Kirchmann H, Menichetti L. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than aboveground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 141, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.029>
- Kätterer T, Bolinder M, Berglund K, Kirchmann K. 2012. Strategies for carbon sequestration in agricultural soils in northern Europe. *Acta Agriculturae Scand Section A*, 2012 Vol. 62, No. 4, 181_198, <http://dx.doi.org/10.1080/09064702.2013.779316>
- Kätterer T, Börjesson G, Kirchmann H. 2014. Changes in organic carbon in topsoil and subsoil and microbial community composition caused by repeated additions of organic amendments and N fertilization in a long-term field experiment in Sweden. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 189: 110-118.
- Kätterer T & Bolinder M. 2022. Agriculture practices to improve soil carbon storage in upland soil. *Burleigh Dodds series in Agricultural Science*. Burleigh Dodds Science Publishing, DOI:10.19103/AS.2022.0106.15
- Lacroix EM, Mendillo J, Gomes A, Dekas A, Fendorf S. 2022. Contributions of anoxic microsites to soil carbon protection across soil textures. *Geoderma* 425, 116050. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116050

- Lammirato C, Wallman M, Weslien P, Klemedtsson L, Rütting T. 2021. Measuring frequency and accuracy of annual nitrous oxide emission estimates. *Agricultural and Forest Meteorology* 310.
- Land M. 2021. Växtföljders påverkan på inlagring av organiskt kol i jordbruksmark. En systematisk översikt och samhällsekonomisk analys. Formas, Stockholm.
- Larsson R & Andersson F. 2014. C & N upptag i nya mellangrödor. Kandidatarbete, lantmästarprogrammet, SLU, Alnarp Larsson & Andersson. 2014
- Lashermes G, Recous S, Alavoine G, Janz B, Butterbach-Bahl K, Ernfors M, Laville P. 2022. N₂O emissions from decomposing crop residues are strongly linked to their initial soluble fraction and early C mineralization. *Sci Total Environ.* 806: 150883.
- Launay C, Houot S, Frédéric S, Girault R, Levvasseur F, Marsac S, Constantin J. 2022. Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42: 57. DOI: 10.1007/s13593-022-00790-8
- Lehrke U. 2000. Frühe Ernte schafft optimale Voraussetzungen für den Zwischenfruchtanbau. *Zuckerrübe*, 49,204-207.
- Levvasseur F, Kouakou PK, Constantin J, Cresson R, Ferchaud F, Girault R, Jean-Baptiste V, Lagrange H, Marsac S, Pellerin S, Houot S. 2022. Energy cover crops for biogas production increase soil organic carbon stocks: A modeling approach. *GCB Bioenergy*, 2022;00:1–15. DOI: 10.1111/gcbb.13018
- Li X, Petersen SO, Sørensen P, Olesen JE. 2015. Effects of contrasting catch crops on nitrogen availability and nitrous oxide emissions in an organic cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 199, 382-393.
- Lindén B, Aronsson H, Gustafson A, Torstensson G. 1993. Fånggrödor, direktsådd och delad kvävegiva -studier av kväveverkan och utlakning i olika odlingsystem i ett lerjordsförsök i Västergötland. *Ekohydrologi* nr. 33, Inst f mark och miljö, SLU, Uppsala.
- Lindén B, Roland J & Tunared R. 2000. Höstsäds kväveupptag under hösten. Institutionen för jordbruksvetenskap rapport 5 (serie B mark och växter), SLU, Skara.
- Lindén B, Aronsson H, Engström L, Torstensson G, Rydberg T. 2006. Kvävemineralisering och utlakning av kväve och fosfor på en lerjord vid Lanna i Västergötland. *Ekohydrologi* nr 91, Avdelningen för vattenvårdslära, SLU, Uppsala
- Linefur H, Norberg L, Kyllmar K, Andersson, S, Blomberg M. 2022. Växtnäringsförluster i små jordbruksdominerade avrinningsområden 2020/2021 – Årsredovisning för miljöövervakningsprogrammet Typområden på jordbruksmark. *Ekohydrologi* 175, Institutionen för mark och miljö, SLU, Uppsala
- Liu J, Khalaf R, Ulén B, Bergkvist G. 2013. Potential phosphorus release from catch crop shoots and roots after freezing–thawing. *Plant Soil* 371:543–557. DOI 10.1007/s11104-013-1716-y
- Liu J, Ulén B, Bergkvist G, Aronsson H. 2014. Phosphorus leaching from soil lysimeters with catch crops after freezing–thawing. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 99: 17–30.
- Liu J, Bergkvist G, Ulén B. 2015. Biomass production and phosphorus retention by catch crops on clayey soils in southern and central Sweden. *Field Crops Research* 171: 130-137.
- Liu J, Macrae ML, Elliott JA, Baulch HM, Wilson HF, Kleinman PJA. 2019. Impacts of Cover Crops and Crop Residues on Phosphorus Losses in Cold Climates: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 48:850–868. DOI:10.2134/jeq2019.03.0119.
- Lugato E, Leip A, Jones A. 2018. Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N₂O emissions. *Nature Climate Change* 8, 219-223.

- Lundborg I. 2019. Mellangrödor i motverkande och förebyggande syfte mot klumprotsjuka och nematoder vid odling av olika huvudgrödor inom familjen Brassicaceae. Självständigt arbete. Institutionen för biosystem och teknologi, SLU, Alnarp.
- Lövgren E. 2022. Complete removal of biomass from oilseed radish as a cover crop decreased nitrous oxide emissions. Dept. of Biosystems and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Malgeryd J & Torstensson G. 2005. Kvävehushållning och miljöpåverkan vid olika strategier för skötsel av gröngödslingsvallar. JTI-rapport Lantbruk & Industri 335. JTI-Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.
- Mathiessen JN & Kirkegaard JA. 2006. Biofumigation and Enhanced Biodegradation: Opportunity and Challenge in Soilborne Pest and Disease Management. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25, 235-265.
- Meisinger JJ, Hargrove RB, Mikkelsen RB, Williams JR, Benson VW. 1991. Effect of cover crops on groundwater quality. In W. L. Hargrove (Ed.), *Cover crops for clean water* (pp. 57–68). Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.
- Meurer KHE, Haddaway NR, Bolinder MA, 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.
- Mitchell DC, Castellano MJ, Sawyer JE, Pantoja J. 2013. Cover Crop Effects on Nitrous Oxide Emissions: Role of Mineralizable Carbon. *Soil Science Society of America Journal* 77: 1765-1773.
- Muhammad I, Sainju UM, Zhao F, Khan A, Ghimire R, Fu X, Wang J. 2019. Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 192, 103-112.
- Muneer F, Hovmalm HP, Svensson S-E, Newson WR, Johansson E, Prade T. 2021. Economic viability of protein concentrate production from green biomass of intermediate crops: A pre-feasibility study. *Journal of Cleaner Production* (294): 126304. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126304>
- Myrbeck Å, Stenberg M, Arvidsson J, Rydberg T. 2012. Effects of autumn tillage of clay soil on mineral N content, spring cereal yield and soil structure over time. *European Journal of Agronomy*, 34:1, 96-104
- Myrbeck Å. 2014. Soil Tillage Influences on Soil Mineral Nitrogen and Nitrate Leaching in Swedish Arable Soils. Doctoral Thesis. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* 2014:71
- Möller K & Reents HJ. 2009. Effects of various cover crops after peas on nitrate leaching and nitrogen supply to succeeding winter wheat or potato crops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 277–287.
- Møller Hansen E, Thomsen IK, Djurhuus J, Kyllingsbaek A, Jørgensen V, Thorup-Kristensen K. 2000. Efteraftrøder. DJF rapport Markbrug nr 37. Danmarks jordbrugsforskning
- Nair D, Baral KR, Abalos D, Strobel BW, Petersen SO. 2020. Nitrate leaching and nitrous oxide emissions from maize after grass-clover on a coarse sandy soil: Mitigation potentials of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *J Environ Manage.* 260: 110165.
- Naturvårdsverket. 2022. Nettoutsläpp och nettoupptag av växthusgaser från markanvändning (LULUCF). <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-nettoutslopp-och-nettoupptag-fran-markanvandning/>.
- Norberg L & Aronsson H. 2020. Effects of cover crops sown in autumn on N and P leaching. *Soil Use and management* 36(2): 200-211. DOI: 10.1111/sum.12565
- Odling i balans. 2022. Projektet samzon. <https://www.odlingibalans.com/projekt/samzon-37709980>
- Ohlander L, Bergkvist G, Stendahl F, Kvist M. 1996. Yield of catch crops and spring barley as affected by time of undersowing. *Acta Agriculturae Scandinavica* 46:161-168.

- Olofsson F & Ernfors M. 2022. Frost killed cover crops induced high emissions of nitrous oxide. *Sci Total Environ* 837, 155634.
- Olsson Å. 2009. Sanering av betcystnematoder med resistent mellangrödor. Nordic Beet Research slutrapport 409-2006-2009.
- Olsson, Å & Persson L. 2017. Oljerättika i växtföljden – vän eller fiende? *Betodlaren* 2-2017.
- Olsson, Å & Persson L. 2019. Mellangrödor för att bekämpa nematoder och öka bördigheten. *Betodlaren* 1-2019.
- Paul C, Bartkowski B, Dönmez C.....Helming K. 2023. Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *Journal of Environmental Management* 330 (2023) 117142. DOI:10.1016/j.jenvman.2022.117142
- Pedersen JB. 2020. *Oversigt over landsforsogene 2020* (ed. JB Pedersen) SEGES, Århus, Danmark.
- Pedersen JB. 2021. *Oversigt over landsforsogene 2021* (ed. JB Pedersen) SEGES, Århus, Danmark.
- Persson P. 2010. Slutrapport till det SLU EkoForsk finansierade projektet "Oljerättika och senap - sjukdomssanerare med stor potential" 2008-2010, inst för växtproduktionsekologi, SLU.
- Petersen SO, Mutegi JK, Hansen EM, Munkholm LJ. 2011. Tillage effects on N₂O emissions as influenced by a winter cover crop. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1509-1517.
- P.H. Petersen. 2023. Achieve more with cover crops – programme overview. https://www.phpetersen.com/fileadmin/user_upload/Katalog/en/Cover_crop_programme_2021_Pro_ZF_21_GB-online.pdf (2023-04-220)
- Piccolo I, Seehusen T, Bussell J,.....Bolinder MA. 2022. Opportunities for Mitigating Soil Compaction in Europe—Case Studies from the SoilCare Project Using Soil-Improving Cropping Systems. *Land* 2022, 11, 223. DOI:10.3390/land11020223
- Pittelkow CM, Liang X, Linnquist BA, van Groeningen KJ, Lee J, Lundy ME, van Gestel N, Six J, Ventereau RT, van Kessel C. 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature* vol. 517, 365. DOI: 10.1038/nature13809
- Poepflau C & Don A. 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33–41.
- Poepflau C, Bolinder MA, Eriksson J, Lundblad M, Kätker T. 2015a. Positive trends in organic carbon storage in Swedish agricultural soils due to unexpected socio-economic drivers. *Biogeosciences* 12: 3241–3251. www.biogeosciences.net/12/3241/2015/
- Poepflau, C., Aronsson, H., Myrbeck, Å. and Kätker T. 2015b. Effect of perennial ryegrass cover crop on soil organic carbon stocks in southern Sweden. *Geoderma Regional* 4: 126-133.
- Poirier V, Roumet C, Munson AD. 2018. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 246-259.
- Poulton P, Johnston J, Macdonald A, White R, Powlson D. 2018. Major limitations to achieving "4 per 1000" increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Glob Chang Biol* 24, 2563-2584.
- Prade T, Hansson D & Svensson S-E. 2022. Etableringstidpunktens inverkan på sommarmellangrödors markkolsbidrag och ogräsbekämpande egenskaper – fältförsök på Helgegården 2019. Sveriges lantbruksuniversitet, SLU Alnarp, Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap. Rapportserie 2022:1
- Ranells NN & Wagger MG. 1997. Grass-legume bicultures as winter annual cover crops. *Agronomy Journal*, 89, 659–665.

- Rasmussen C, Heckman K, Wieder WR, Keiluweit M.....2018. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry*, 137:297–306. DOI:10.1007/s10533-018-0424-3
- Rasse DP, Rumpel C, Dignac M-F. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant and Soil*. 269: 341-356.
- Rietra R, Heinen M & Oenema O. 2022. A review of crop husbandry and soil management practices using meta-analysis studies: Towards soil-improving cropping systems. *Land*, 11, 255. DOI: 10.3390/land1102055
- Riddle MU & Bergström L. 2013. Phosphorus leaching from two soils with catch crops exposed to freeze-thaw cycles. *Agronomy Journal* 105:803-811.
- Ringselle B. 2015. Resource efficient control of *Elymus repens*. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* 2015:36. Doctoral thesis
- Ringselle B, Bergkvist G, Aronsson H, Andersson L. 2015. Under-sown cover crops and post-harvest mowing as measures to control *Elymus repens*. *Weed Research* 55(3):309-319.
- Risk N, Snider D, Wagner-Riddle C. 2013. Mechanisms leading to enhanced soil nitrous oxide fluxes induced by freeze–thaw cycles. *Canadian Journal of Soil Science* 93: 401-414.
- Rivière C, Béthinger A, Bergez J-E. 2022. The Effects of Cover Crops on Multiple Environmental Sustainability Indicators—A Review. *Agronomy* 2022, 12, 2011. DOI: 10.3390/agronomy12092011
- Romdhane S, Spor A, Busset H, Falchetto L..... 2019. Cover Crop Management Practices Rather Than Composition of Cover Crop Mixtures Affect Bacterial Communities in No-Till Agroecosystems. *Frontiers in Microbiology*. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01618
- Ruser R, Flessa H, Russow R, Schmidt G, Buegger F, Munch JC. 2006. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 263-274.
- Ruser R, Schulz R. 2015. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils—a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178: 171-188.
- Sapkota T, Askegaard M, Lægdsmand M & Olesen JE. 2012. Effects of catch crop type and root depth on nitrogen leaching and yield of spring barley. *Field Crops Research* 125:129-138
- Scandinavian Seed. 2021. Mellangrödor 2021. <https://7b970788.flowpaper.com/Mellangrdor2021/#page=1> (2022-11-24).
- Six J, Frey SD, Thiet RK, Batten KM. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70:555-569.
- Sjursen H, Brandsaeter LO & Netland J. 2011. Effects of repeated clover undersowing, green manure ley and weed harrowing on weeds and yields in organic cereals. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B _ Soil and Plant Science*, 1-1.
- Sjösvärd L & Svensson K. 1990. Kväveomvandlingar i mark med och utan italienskt rajgräs efter korn. Report 43, Department of microbiology, SLU, Uppsala.
- Soldevilla Martinez M. 2009. Influence of Cover Crops on the Development of some Soil-borne Plant Pathogens. Examensarbete, Institutionen för växtproduktionsekologi, SLU, Uppsala.
- SOU. 2020. Vägen till en klimatpositiv framtid. Statens offentliga utredningar, SOU: 2020:4, Miljödepartementet. <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/statens-offentliga-utredningar/2020/01/sou-20204/>
- Spohn M, Pötsch EM, Eichorst SA, Woebken D, Wanek W, Richter A. 2016. Soil microbial carbon use efficiency and biomass turnover in a longterm fertilization experiment in a temperate grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 97: 168-175. DOI:10.1016/j.soilbio.2016.03.008

- Stenberg M, Etana A, Bergkvist G, Wetterlind J, Myrbeck Å, Aronsson H, Rydberg T, Lindén B. 2007. Uthålliga täck- och fånggrödesystem. Avd för precisionsodling rapport 11, SLU, Skara
- Stenberg M, Aronsson H, Lindén B, Rydberg T, Gustafson A. 1999. Soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses in soil tillage systems combined with a catch crop. *Soil and Tillage Research*, 50:115-125.
- Storr TR, Simmons W, Hannam JA. 2021. Using frost-sensitive cover crops for timely nitrogen mineralization and soil moisture management. *Soil Use and Management* 37(3): 427-435
- Svensson S-E, Hansson D, Prade T, Olsson Nyström Å, Olanders J. 2020. Mellangrödor efter stärkelsevete som förfrukt till sockerbetor – resultat från fältförsök på Kronoslätts gård 2018 - 2019. Meddelande från södra jordbruksförsöksdistriktet nr 73. C.-O. Swartz. SLU, Partnerskap Alnarp:25:21-25:25.
- Sverigeförsöken. 2020. Hansson G: Efterverkan av mellangrödor s. 50 (<https://sverigeforsoken.se/trialbook>)
- Sørensen JN & Thorup-Kristensen K. 2003. Undersowing legume crops for green manuring lettuce. *Biological Agriculture and Horticulture*, 21, 399-414
- Taghizadeh-Toosi A, Hansen EM, Olesen JE, Baral KR, Petersen SO. 2022. Interactive effects of straw management, tillage, and a cover crop on nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a sandy loam soil. *Sci Total Environ* 828, 154316.
- Talleg T, Brut A, Joly L, Dumelié N, Serça D, Mordelet P, Claverie N, Legain D, Barrié J, Decarpenterie T, Cousin J, Zawilski B, Ceschia E, Guérin F, Le Dantec V. 2019. N₂O flux measurements over an irrigated maize crop: A comparison of three methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 264: 56-72.
- Teasdale JR & Daughtry CST. 1993. Weed suppression by live and desiccated hairy vetch. *Weed Science* 41, 207-212.
- Thorup-Kristensen K. 2001. Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured. *Plant and Soil* 230: 185-195
- Thorup-Kristensen K, Magid J, Stoumann Jensen L. 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* 79.
- Thorup-Kristensen K & Dresbøll DB. 2010. Incorporation time of nitrogen catch crops influences the N effect for the succeeding crop. *Soil Use and Management* 26, 27-35.
- Tiefenbacher A, Sandén T, Haslmayr H-P, Miloczki J, Wenzel W, Spiegel H. 2021. Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: A Synthesis. *Agronomy* 2021, 11, 882. DOI: 10.3390/agronomy11050882
- Torstensson G, Gustafson A, Lindén B, Skyggesson G. 1992. Mineralkvävedynamik och växtnäringsutlakning på en grovmjord med handels- och stallgödslade odlingssystem i södra Halland. *Ekohydrologi* 28, Inst f. mark och miljö, SLU, Uppsala.
- Torstensson G. 1998. Nitrogen delivery and utilization by subsequent crops after incorporation of leys with different plant composition. *Biological Agriculture and Horticulture* 16, 129-143.
- Torstensson G. 2003. Ekologisk odling – utlakningsrisker och kväveomsättning. *Ekohydrologi* nr 72, Inst f mark och miljö, SLU, Uppsala.
- Torstensson G, Aronsson H & Bergström, L. 2006. Nutrient Use Efficiencies and Leaching of Organic and Conventional Cropping Systems in Sweden. *Agronomy journal*, 98: 603-615. DOI: 10.2134/agronj2005.0224
- Torstensson G, Aronsson H & Ekre E. 2011. Kväve- och fosforutlakning efter olika potatistyper. *Ekohydrologi* 127, SLU, Uppsala.
- Van Noordwijk M, Floris J, De Jager A. 1985. Sampling schemes for estimating root density distribution in cropped fields. *Neth. J. Agric. Sci.* 33, 241–262.

- Virto I, Barré P, Burlot A, Chenu C. 2012. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. *Biogeochemistry*, 108:17–26. DOI: 10.1007/s10533-011-9600-4
- Vukicevich E, Lowery T, Bowen P, Úrbez-Torres RJ, Hart M. 2016. Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36: 48. DOI 10.1007/s13593-016-0385-7
- Wagner-Riddle C, Congreves KA, Abalos D, Berg AA, Brown SE, Ambadan JT, Gao X, Tenuta M. 2017. Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze–thaw cycles. *Nature Geoscience* 10, 279-283.
- Wahlström M, Moller Hansen E, Mandel A, Garbout A, Lakkenberg H, Kristensen L, Munkholm J. 2015. Root development of fodder radish and winter wheat before winter in relation to uptake of nitrogen. *European Journal of Agronomy*, 71: 1-9
- Waldo S, Russell ES, Kostyanovsky K, Pressley SN, O'Keeffe PT, Huggins DR, Stockle CO, Pan WL, Lamb BK. 2019. N₂O Emissions From Two Agroecosystems: High Spatial Variability and Long Pulses Observed Using Static Chambers and the Flux-Gradient Technique. *J Geophys Res Biogeosci.* 124: 1887-1904.
- Wallenhammar A-C. 2007. Fångrödor kan skada oljeväxterna. I *Svensk frötidning* 3/2007, s.18-21.
- Wallgren B & Lindén B. 1994. Effects of catch crops and ploughing times on soil mineral nitrogen. *Swedish Journal of Agricultural research* 24 (2), 67-75.
- Wallman M, Lammirato C, Delin S, Klemmedtsson L, Weslien P, Rütting T. 2022. Nitrous oxide emissions from five fertilizer treatments during one year – High-frequency measurements on a Swedish Cambisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 337.
- Weisser WW, Roscher C, Meyer ST.....Eisenhauer N. 2017. Biodiversity effects on ecosystem functioning in a 15-year grassland experiment: Patterns, mechanisms, and open questions. *Basic and Applied Ecology*, 23:1-73. DOI:10.1016/j.baae.2017.06.002
- Wezel A, Herren BG, Bezner Kerr R, Barrio E, Gonçalves ALR, Sinclair F. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40:40. DOI:10.1007/s13593-020-00646-z
- Whalen ED, Grandy AS, Sokol NW, Keiluweit M, Ernakovich J, Smith RG, Frey SD. 2022. Clarifying the evidence for microbial- and plant-derived soil organic matter, and the path toward a more quantitative understanding. *Global Change Biology*, <https://doi.org/10.1111/gcb.16413>
- Whitehead D.2020. Management of Grazed Landscapes to Increase Soil Carbon Stocks in Temperate, Dryland Grasslands. *Front. Sustain. Food Syst.*585913. DOI: 10.3389/fsufs.2020.585913.
- Willert M. 2019. *Tidningen Arvensis* 2019-6
- Xiaoxiao H, Najm MA, Steenwerth KL, Nocco MA, Basset C, Daccache. A. 2022. Are there universal soil responses to cover cropping? A systematic review. *Science of the Total Environment*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160600>
- Zhang Z, Wang J, Huang W.....Wang Z. 2022. Cover crops and N fertilization affect soil ammonia volatilization and N₂O emission by regulating the soil labile carbon and nitrogen fractions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 340 (2022) 108188. DOI:10.1016/j.agee.2022.108188

Appendix 1. Metadata för de försök varifrån data hämtats för sammanställning i figurer och tabell 1

| Del av landet | Tidsperiod | Beskrivning av försök | Typ av mellangröda | Mätningar | Källa |
|---------------|------------|---|------------------------|---|---|
| Skåne | 1993-2011 | Utlakningsförsök för växtföljder med vintergrön mark | insådda, höstgrödor | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, läckage | Helena.Aronsson@slu.se. Aronsson m fl (2018); Norberg & Aronsson (2020) |
| Skåne | 1998-2000 | Insådd av mellangrödor i höstsäd, vår respektive höst | insådda | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, läckage | Bergkvist m fl (2002) |
| Skåne | 2002-2004 | Mellangrödor för insådd vår-sommar i höstvet | eftersådda | Biomassa (skott), N | Adholm, A. Skåneförsöken, L3-2259 |
| Skåne | 2003-2004 | Etableringsmetod för mellangrödor på hösten och upptag av kväve från marken | eftersådda | Biomassa (skott/rot), N, C, min-N i jord | Stenberg m fl (2007) |
| Skåne | 2006-2008 | Mellangrödor före sockerbeter (sanering) | eftersådda | Biomassa, min-N | Olsson (2009) |
| Skåne | 2011-2013 | Mellangrödor och putsningsstrategier för kvickrotskontroll | insådda | Biomassa (skott) | Ringselle m fl (2015) |
| Skåne | 2013 | Skott och rot-undersökning | eftersådda | Biomassa (skott/rot), N, C | Larsson & Andersson (2014) |
| Skåne | 2013-2014 | Gödslade mellangrödor som biogassubstrat | eftersådda | Biomassa | Gunnarsson (2014); Ahlberg I & Nilsson (2015) |
| Skåne | 2012- | Eftersådda mellangrödor för minskat läckage | eftersådda | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, läckage | Pågående försök, kontakt Helena.Aronsson@slu.se. Norberg & |
| Skåne | 2016-2017 | Sommarsådda mellangrödor för ogräskontroll | eftersådda | Biomassa (skott) | Kontakt David Hansson@slu.se |
| Skåne | 2018, 2019 | Etableringstidpunkter för mellangrödor, ogräskontroll och markkol, biogassubstrat | eftersådda | Biomassa (skott/rot), marktäckning ogräs | Hansson m fl (2021); Prade m fl (2022) |
| Skåne | 2018 | Sommarsådda mellangrödor för ogräskontroll | eftersådda | Biomassa (skott) | Ahlqvist (2019) |
| Skåne | 2018-2019 | Eftersådda mellangrödor efter plöjning respektive direktsådd | eftersådda | Biomassa (skott) | Sverigeförsöken 2020 (Sverigeforsoken.se) |
| Skåne | 2020-2021 | Mellangrödor för ogräskontroll, grönsaksodling | eftersådda | Biomassa (skott/rot), min-N jord | Hansson D m fl (2022) |
| Skåne | 2021-2022 | Mellangrödor med och utan gödsling i klimatperspektiv | eftersådda | Biomassa (skott/rot), N, C | Pågående projekt: Klimatsmarta mellangrödor (Å Olsson). Kontakt Thomas.Prade@slu.se |
| Halland | 1984- | Insådda fånggrödor med och utan flytgödsetillförsel | insådda, eftersådd | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, utlakning | SLU långliggande försök, kontakt Helena.aronsson@slu.se. Aronsson m fl |
| Halland | 1988 | Kvävemineralisering i mark med mellangröda | insådd | Biomassa (skott/rot) | Sjösvärd & Svensson K (1990) |
| Halland | 1993-1996 | Jordbearbetningstidpunkter med och utan mellangröda | insådda | Biomassa (skott), N | Stenberg m fl (1999) |
| Halland | 1997-2007 | Ekologiska växtföljder med och utan djur | höstgrödor, vallinsådd | Biomassa (skott), N, min-N jord, utlakning | Pågående SLU långliggande försök, kontakt Helena.aronsson@slu.se |
| Halland | 1999-2000 | Insådd av mellangrödor i höstsäd, vår respektive höst | insådda | Biomassa (skott) | Bergkvist m fl (2002) |
| Halland | 2005-2007 | Brytningsstrategier får insådda gräsfånggrödor | insådda | Biomassa (skott), N, min-N jord, utlakning | Aronsson m fl (2011) |

| | | | | | |
|-------------------|-----------|---|------------------------|---|--|
| Halland | 2007-2010 | Eftersådd mellangöda efter potatis | eftersådda | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, utlakning | Torstensson m fl (2011) |
| Halland | 2011-2012 | Strategier för att kombinera mellangröda och mekaniska metoder för kontroll av kvickrot | | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, utlakning | Aronsson m fl (2015) |
| Halland | 2013-2014 | Eftersådda mellangrödor | | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, utlakning | Aronsson m fl (2015b) |
| Halland | 2016-2017 | Mellangröda efter konservärt | | Biomassa (skott), N, C, min-N jord, utlakning | Aronsson m fl (2019b) |
| Halland | 2019 | Eftersådd mellangrödor för för foder | eftersådda | Biomassa (skott), N, energi | Aurell, A. Mellangrödor/Eftergrödor som foder, Växa Halland. |
| Västergötland | 1993- | Mellangröda och jordbearbetningstidpunkt | insådda, eftersådd | Biomassa (skott), N, C, utlakning | SLU långliggande försök, kontakt Helena.aronsson@slu.se. Aronsson m fl |
| Västergötland | 1997-2006 | Ekologiska växtföljder med och utan djur | höstgrödor, vallinsådd | Biomassa (skott), N, min-N jord, utlakning | Pågående SLU långliggande försök, kontakt Helena.aronsson@slu.se |
| Västergötland | 1989-1992 | Mellangröda med olika gödselgivor till huvudgröda | insådda | Biomassa (skott), N, min-N jord, utlakning | Lindén m fl (2006) |
| Västergötland | 1998-2004 | Jordbearbetningssystem och mellangröda | insådda | N i skott, min-N jord | Myrbeck m fl (2012) |
| Västergötland | 2004-2005 | Etableringsmetod för mellangrödor på hösten och kväve i marken | eftersådda | Biomassa (skott/rot), N, C, min-N i jord | Stenberg m fl (2007) |
| Västergötland | 2005-2006 | Brytningsstrategier får insådda gräsfånggrödor | insådda | Biomassa (skott), N, min-N jord, utlakning | Aronsson m fl (2011) |
| Västergötland | 2009-2011 | Biomassa ovan och under jord | insådda, eftersådda | Biomassa (skott/rot) | Liu m fl (2013) |
| Västmanland | 2009 | Biomassa ovan och under jord | insådda, eftersådda | Biomassa (skott/rot) | Liu m fl (2013) |
| Uppland | 2010-2011 | Biomassa ovan och under jord | insådda, eftersådda | Biomassa (skott/rot) | Liu m fl (2013) |
| Uppland | 2011-2013 | Mellangrödor och putsningsstrategier för kvickrotskontroll | insådda | Biomassa (skott) | Ringselle m fl (2015) |
| Mellansverige | 2021-2022 | Eftersådda mellangrödor i Mellansverige, försöksserie L4-4045 | eftersådda | Biomassa (skott) | Pågående försök, kontakt Sofie.eriksson@hushallningssallskapet.se |
| Götaland | 2022 | Ekologiska försök i Skåne, Halland, Västergötland | insådda och eftersådda | Biomassa (skott) | Pågående försök, kontakt Kerstin.andersson@hushallningssallskapet.se |
| Götaland-Svealand | 2022 | Projekt med nära-fjärranalys av mellangrödors biomassa | insådda, eftersådda | Biomassa (skott), N | Pågående försök, kontakt Lena.engstrom@slu.se |
| Finland | 1991-1996 | Insådda mellangrödor med rotmätningar | insådda | Biomassa (skott/rot), N, | Känkänen m fl (2003) |
| Finland | 1997-1999 | Insådda mellangrödor med rotmätningar | insådda | Biomassa (skott/rot), C, N | Känkänen & Eriksson (2007) |
| Norge | 1994-1995 | Höst- och sommarsådda baljväxter | eftersådda | Biomassa | Brandsaeter & Netland (1999) |
| Danmark | 2018-2021 | Såtidpunkt för mellangrödor och dess effekt på upptag och läckage | eftersådda, insådda | N i skott, läckage | Hansen & Thomsen (2022) |
| Danmark | 2019-2021 | Danska landsförsöken, olika platser, sådd före skörd m.m. | eftersådda | Biomassa (skott) | Pederssen 2020; 2021 |
| Danmark | 1995-1996 | Skott-rotstudier av insådda baljväxter | insådda | Biomassa (skott/rot), N | Sorensen & Thorup-Kristensen (2003) |