

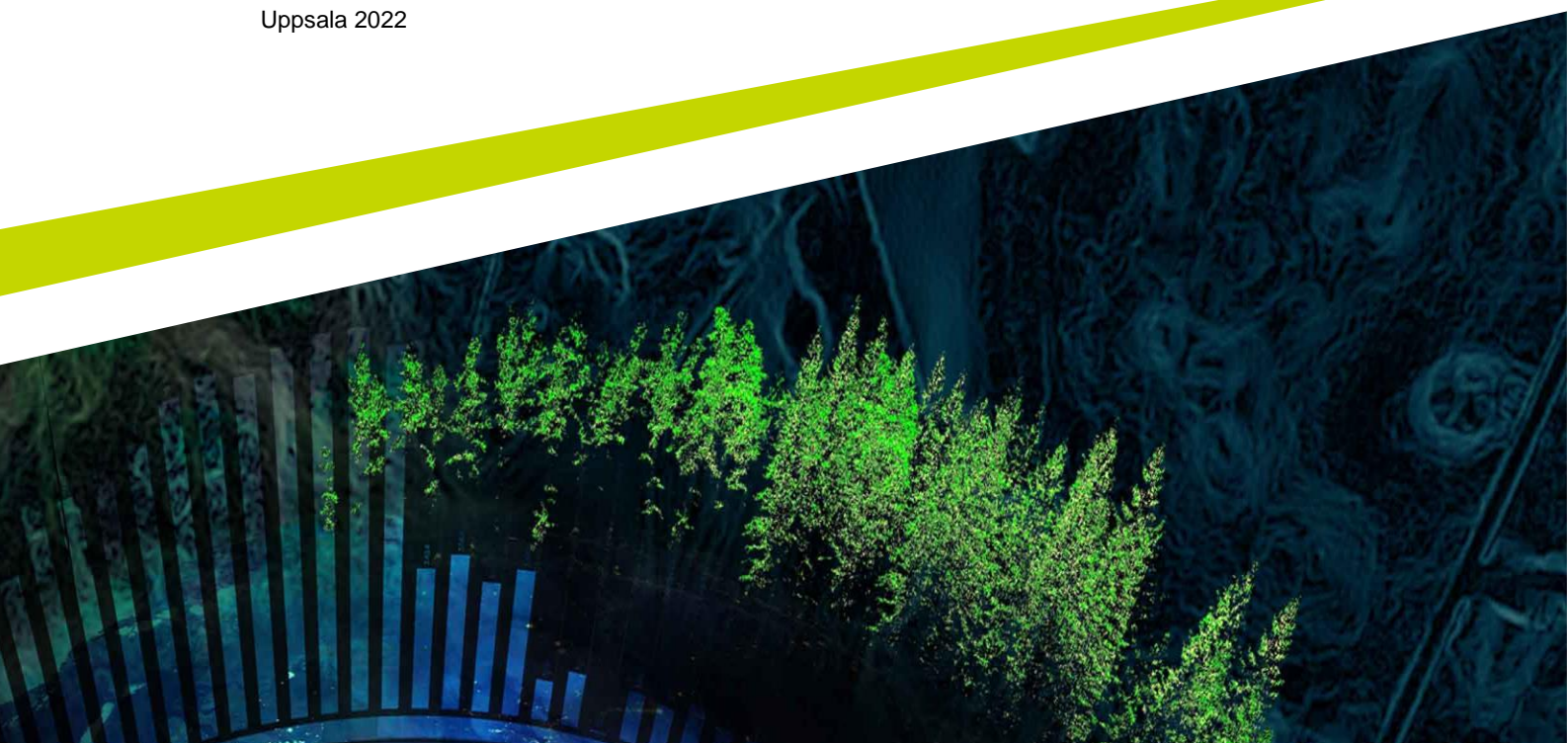


Rågens allelopatiska verkan på ogräs

Odlingstekniker av råg för ogräskontroll

Rebecka Alaton

Examensarbete/Självständigt arbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för växtproduktionsekologi
Agronomprogrammet – Mark/Växt
Uppsala 2022



Rågens allelopatiska verkan på ogräs: odlingstekniker av råg för ogräskontroll

The allelopathic effect of rye on weeds: cultivation techniques of rye for weed control

Rebecka Alaton

Handledare: Robert Glinwood, Institutionen för växtproduktionsekologi, SLU
Examinator: Göran Bergkvist, Institutionen för växtproduktionsekologi, SLU

Omfattning: 15 hp
Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E
Kurstitel: Självständigt arbete i Biologi
Kurskod: EX0894
Program/utbildning: Agronom – Mark/Växt
Kursansvarig inst.: Institutionen för Vatten & miljö
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2022
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.

Nyckelord: allelopati, råg, ogräskontroll, integrerat växtskydd, benzoxazinoider.

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för växtproduktionsekologi

Sammanfattning

Råg har god ogräskonkurrerande förmåga, som delvis kan förklaras av artens allelopatiska förmåga. Allelopati kan definieras som alla direkta eller indirekta effekter (skadliga eller fördelaktiga) en växt har på en annan växt genom produktion av kemiska föreningar som utsöndras till omgivningen. Studiens syfte var att sammanfatta vetenskaplig kunskap om råg som en tänkbart betydelsefull allelopatisk gröda och odlingstekniker av råg för ogräskontroll. Detta för att kunna undersöka om odling av råg kan vara intressant i integrerat växtskydd. Rågens fytotoxiska verkan på flera växtarter, där ibland ogräsarter, har bevisats i flera studier. De allelopatiska föreningarna påverkar rot- och skottlängd negativt och hämmar frögroning hos vissa arter. I fältförsök finns det dock svårigheter att skilja på allelopati och andra mekanismer. Flera studier har emellertid visat rågens förmåga som ogräskontroll och flera odlingstekniker som kan tillämpas.

Nyckelord: allelopati, råg, ogräskontroll, integrerat växtskydd, benzoxazinoider.

Abstract

Rye has a good weed competing ability, which can be partly explained by the species' allelopathic ability. Allelopathy can be defined as all direct or indirect effects (harmful or beneficial) a plant has on another plant through the production of chemical compounds that are excreted into the environment. The purpose of the study was to summarize scientific knowledge about rye as a potentially significant allelopathic crop and cultivation techniques of rye for weed control. This is to be able to investigate whether the cultivation of rye can be of interest in integrated weed management. The phytotoxic effect of rye on several plant species, including some weed species, has been proven in several studies. The allelopathic compounds adversely affect root and shoot length and inhibit seed germination in some species. In field experiments there are difficulties in distinguishing between allelopathy and other mechanisms. However, several studies have demonstrated the ability of rye to control weeds and have evaluated cultivation techniques that can be applied.

Keywords: allelopathy, rye, weed control, integrated weed management, benzoxazinoids.

Innehållsförteckning

Figurförteckning	5
Förkortningar	6
1. Inledning	7
1.1 Syfte	8
1.2 Metod	8
2. Resultat	9
2.1 Bakgrund om allelopati	9
2.2 Benzoxazinoider.....	10
2.3 Innehåll och sammansättning av allelopatiska föreningar i råg	11
2.3.1 Förändring av innehåll över tid	11
2.3.2 Skillnader mellan olika sorter av råg.....	11
2.4 Innehåll av benzoxazinoider i jord.....	13
2.5 Fytotoxisk verkan på ogräs	15
2.6 Odlingstekniker vid odling av råg	18
Diskussion och slutsats	21
3.1 Diskussion.....	21
3.2 Slutsats	24
Referenser	25
Tack	28

Figurförteckning

- Figur 1. Kemiska strukturer för familjen benzoxazinoider som har studerats i spannmål och andra växter. Reprinted with permission from Rice et al. 2012. Copyright 2012 American Chemical Society. 10
- Figur 2. Förändringar i DIBOA-innehåll i skottvävnader från olika rågsorter över tid. Figuren saknar felstaplar. Reprinted by permission from Springer Nature License: Springer Nature, Journal of Chemical Ecology, Changes over time in the allelochemical content of ten cultivars of rye (*Secale cereale* L.), Reberg-Horton et al. 2005, Copyright 2005. 12
- Figur 3. DIBOA-produktion per arealenhet (koncentration x biomassa) för olika rågsorter över tid. Figuren saknar felstaplar. Reprinted by permission from Springer Nature License: Springer Nature, Journal of Chemical Ecology, Changes over time in the allelochemical content of ten cultivars of rye (*Secale cereale* L.), Reberg-Horton et al. 2005, Copyright 2005. 13
- Figur 4. Koncentration av BOA, HBOA och DIBOA i jord med rågskott inblandade över tid. 1 skott per 300 g jord. Reprinted with permission from Krogh et al. 2006. Copyright 2006 American Chemical Society. 14
- Figur 5. Föreslagen väg för allelokemikalier från *S. cereale* till *A. fatua*. Reprinted with permission from Macías et al. 2014. Copyright 2014 American Chemical Society. 16
- Figur 6. En knäckvält monterad fram på en traktor (Davis 2010). 19

Förkortningar

APO	2-aminophenoxazin-3-one
BOA	benzoxazolin-2(3 <i>H</i>)-one
DIBOA	2,4dihydroxy-(2 <i>H</i>)-1,4benzoxazin-3(4 <i>H</i>)-one
HBOA	2-hydroxy-2 <i>H</i> -1,4-benzoxazin-3(4 <i>H</i>)-one
HMBOA	2-hydroxy-7-methoxy-1,4benzoxazin-3-one
HPLC	high-performance liquid chromatography

1. Inledning

Rågodlingen har minskat kraftigt i Sverige sedan 1930-talet. Från 1500-talet till 1930-talet var i stället råg (*Secale cereale* L.) det viktigaste brödsädeslaget. Arealminskningen beror framför allt på förändrande konsumtionsvanor och en lyckad växtförädling av vete *Triticum aestivum* L). Råg finns i höst- och vårformer men odlingen i Sverige består huvudsakligen av höstråg.

Kemiska bekämpningsmedel mot ogräs används i stor utsträckning i konventionell växtodling. Behandlad areal uppgår till 90 % i stråsäd och baljväxter (SCB 2010 se Fogelfors 2015). Kemiska bekämpningsmedel står dock inför svåra utmaningar utifrån ett hållbarhetsperspektiv. De största svårigheterna är resistensutvecklingen i ogräs samt herbiciders påverkan på miljön samt människors och djurs hälsa. Ett ogräs som är resistent överlever bekämpning som normalt sett skulle kontrollera arten. Inom arten kan det naturligt finnas enstaka individer som har lägre känslighet mot herbicider och dessa kan därmed gynnas och öka i antal i populationen. Resistensmekanismer kan också utvecklas vid genförändringar i ogräset. Vid target site resistens kan en enda genförändring vara tillräcklig för att ändra herbicidens verkningsställe i växten. Denna resistensmekanism innebär att herbiciden inte längre kan göra skada och ogräsets resistens blir fullständig. En gradvis försämring kan i stället ske när metabolisk resistens utvecklas. Det orsakas oftast av flera genförändringar som ger ogräset förmågan att bryta ner bekämpningsmedlet i högre takt (Jordbruksverket 2016). Mekanisk ogräskontroll är ett alternativ till kemisk ogräskontroll, men kräver upprepade behandlingar för att effektivt kontrollera ogräs. Det utgör en ekonomisk kostnad och påverkar jordstrukturen negativt. Flera av problemen med nuvarande ogräsbekämpningsmetoder kan mildras genom att skapa en större mångfald i tillämpbara metoder (Jabran et al. 2015). På så vis kan kemiska bekämpningsmedel användas i mindre utsträckning vilket sänker trycket på resistensutveckling (Jordbruksverket 2016).

Råg har god ogräskonkurrerande förmåga, som delvis kan förklaras av artens allelopatiska förmåga (Fogelfors 2015). Den mest erkända definitionen av allelopati har Rice (1984a) skrivit; allelopati kan definieras som alla direkta eller indirekta effekter (skadliga eller fördelaktiga) en växt har på en annan växt genom produktion av kemiska föreningar som utsöndras till omgivningen.

Allelopati har observerats och föreslagits av lantbrukare och botanister sedan 2000 år tillbaka. Vetenskapliga experiment har dock endast utförts inom ämnet sedan 1900-talet. Allelopatiska föreningar har påträffats i flera av våra kulturgrödor och i många ogräs (Rice 1984b).

Det finns ett behov av att undersöka potentiella växtskyddsåtgärder som kan ingå i ett hållbart system. I den här uppsatsen studeras den allelopatiska grödan råg med avseende på tänkbar ogräskontrollerande förmåga.

1.1 Syfte

Studiens syfte är att sammanfatta vetenskaplig kunskap om råg som en tänkbar betydelsefull allelopatisk gröda och odlingstekniker av råg för ogräskontroll. Detta för att kunna undersöka om odling av råg kan vara intressant i integrerat växtskydd. Studien är avgränsad till rågens innehåll av de allelopatiska föreningarna benzoxazinoider, som majoriteten av de påfunna föreningarna i råg tillhör. Studiens frågeställningar är följande:

- Går det att särskilja allelopati från andra mekanismer när det gäller effekt på ogräs?
- Vad är betydelsen av rågens allelopatiska förmåga som ogräskontroll?
- Kan råg odlas för att tillämpa ogräskontroll och i så fall hur?

1.2 Metod

Arbetet är en litteraturstudie som till största del grundar sig på vetenskapligt granskade artiklar och enstaka litteraturöversikter samt kurslitteratur. Vetenskapligt publicerade texter i vetenskapliga tidskrifter har prioriterats eftersom dessa är granskade av andra forskare, samt är primärkällor med ny forskning. Litteratursökningen har mestadels gjorts på databaserna PubMed, ScienceDirect, Web of Science och söktjänsten Google Scholar. Även SLU-bibliotekets söktjänst Primo har använts.

Följande sökord har använts och kombinerats i litteratursökandet; allelopathy, rye, cover-crop, allelochemical, benzoxazinoids, roller-crimp, cultivar differences, age differences, hydroxamic acids, DIBOA, BOA, rye residue, weed control.

2. Resultat

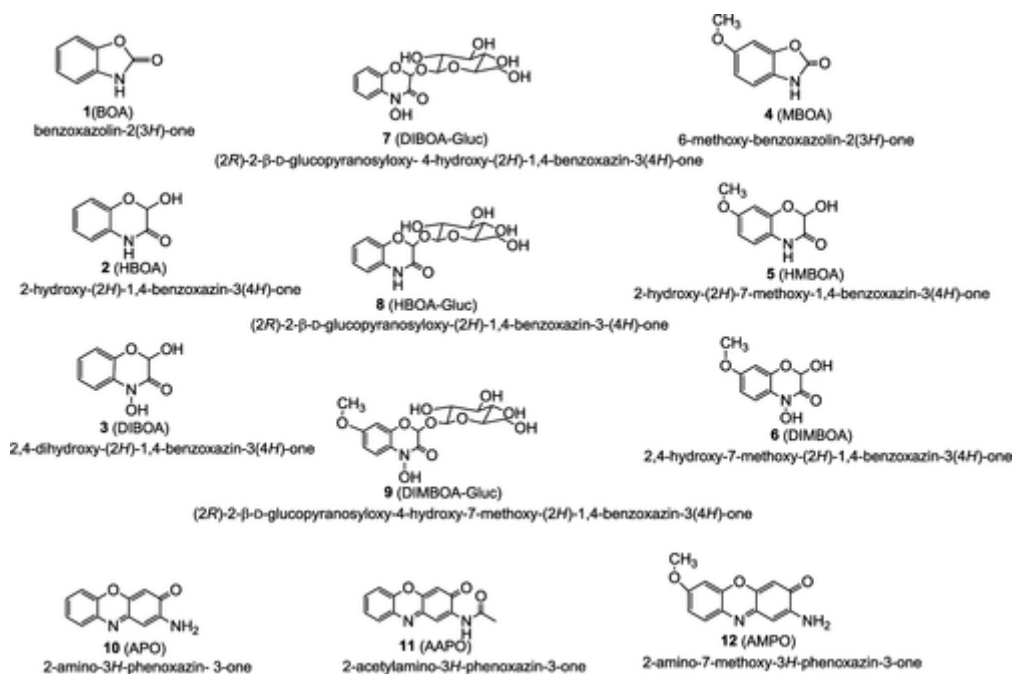
2.1 Bakgrund om allelopati

Allelopati innebär att en växt producerar och utsöndrar kemiska föreningar till omgivningen som har en indirekt eller direkt effekt (skadlig eller fördelaktig) på en annan växt. På grund av den kemiska produkten ska allelopati däremot särskiljas från konkurrens, som innebär avlägsning eller minskning av någon resurs som någon annan växt i samma habitat har behov av. Resurserna är huvudsakligen vatten, näring och ljus. Ett ord som innefattar både allelopati och konkurrens är interferens (Rice 1984a). Mängden allelopatiska föreningar som en växt producerar kan variera och många faktorer som representerar stress (till exempel näringsbrist) har visat sig öka produktionen (Rice 1984c). De flesta allelopatiska föreningarna är sekundära metaboliter, som har bildats från primära metaboliska processer (Rizvi 1992). Allelokemikalierna kan transporteras från växten till omgivningen genom blad, rötter och växtrester (Zimdahl 2018). De mest förekommande synliga effekterna av allelopati på målväxter är förändringar i groningen eller tillväxt. De synliga effekterna är ett resultat av många möjliga förändringar i växten som sker på molekylär nivå. Allelopati har ett brett spektrum för verkningsätt. Exempel på mål är membran, respiration, näringsupptag, proteinsyntes, fotosyntes och växthormoner (Winter 1961 se Rizvi 1992).

Råg har rapporterats allelopatisk flera gånger och en del i förståelsen för rågens allelopati är att kartlägga rågens sammansättning av allelopatiska föreningar. Råg innehåller till största del DIBOA (2,4dihydroxy-(2*H*)-1,4benzoxazin-3(4*H*)-one) (genomsnittligen 58 % av de totala innehållet av allelopatiska föreningar), därefter BOA (benzoxazolin-2(3*H*)-one) (14 %) och resterande andel består av föreningar som var och en utgör under 10 % av rågens totala innehåll av allelopatiska föreningar. DIBOA, BOA och flera av de andra funna föreningarna tillhör familjen benzoxazinoider (Rice et al. 2012).

2.2 Benzoxazinoider

Benzoxazinoider är sekundära metaboliter som medverkar i allelopatiska interaktioner mellan växter. Benzoxazinoider har upptäckts i flera arter i familjen Poaceae, såsom råg, vete och majs (*Zea mays* L.) (Reimann & Byerrum 1964; Krogh et al. 2006). I familjen benzoxazinoider ingår flera olika föreningar, se figur 1 (Rice et al. 2012). De allelopatiska föreningarna finns som stabila glykokonjugat (bundna till lipider eller proteiner) i växtens vakuoler tills växten skadas eller blandas ner i jord, därefter frisläpps föreningarna (Sicker et al. 2000). Levande växter kan utsöndra allelopatiska föreningar via rotexudat (Belz & Hurle 2005). Föreningarna som utsöndras kan lätt brytas ner till andra strukturelliknande produkter. DIBOA kan till exempel brytas ner till APO (2-aminophenoxazin-3-one) som har högre fytotoxicitet än DIBOA (Macías et al. 2005).



Figur 1. Kemiska strukturer för familjen benzoxazinoider som har studerats i spannmål och andra växter. Reprinted with permission from Rice et al. 2012. Copyright 2012 American Chemical Society.

2.3 Innehåll och sammansättning av allelopatiska föreningar i råg

2.3.1 Förändring av innehåll över tid

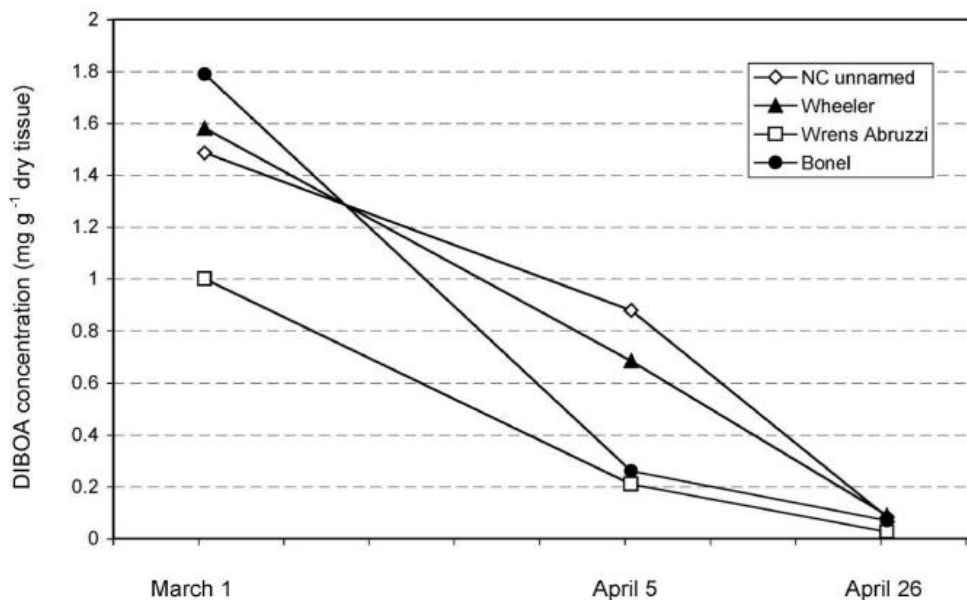
Rågens innehåll av allelopatiska föreningar varierar över tid och utvecklingsstadiet är en viktig faktor som påverkar benzoxazinoidproduktionen (Burgos et al. 1999). Den totala koncentrationen av DIBOA och BOA i ovanjordisk biomassa har observerats öka från 30 dagar efter sådd fram tills 60 dagar efter sådd, för att sedan minska (Burgos et al. 1999). La Hovarys (2011) studier bekräftar att koncentrationen av allelopatiska föreningar i råg är högst i yngre vävnader. Högst koncentration uppmättes dag 65, därefter minskade koncentrationen. För alla sorter som undersöktes sammanföll minskningen med växtens övergång från vegetativ till reproduktiv tillväxt. Trots denna minskning av koncentrationen över säsongen så observeras rågens högsta innehåll i slutet av tillväxtfasen, till följd av störst mängd ovanjordisk biomassa vid denna tidpunkt.

2.3.2 Skillnader mellan olika sorter av råg

Variation i innehåll av allelopatiska föreningar mellan rågplantor kan bero på sortskillnader. Burgos et al. (1999) rapporterade signifikant skillnad mellan olika rågsorters innehåll av allelopatiska föreningar. I ett fältexperiment såddes åtta olika sorter av råg i oktober och skotten skördades vid marknivå i april, i stadiet axets vidgning. Den totala produktionen av DIBOA och BOA i sorterna varierade mellan 137 och 1469 $\mu\text{g g}^{-1}$ torrt växtmaterial. Sorten Bonel innehöll mest allelokemikalier, i medeltal 6,5 gånger mer än alla andra sorter. Även sorternas produktion av biomassa i fält studerades. De med högst innehåll av allelokemikalier, Bonel och Aroostok (1469 $\mu\text{g g}^{-1}$ respektive 443 $\mu\text{g g}^{-1}$ torrt växtmaterial), producerade inte mest biomassa. Sorten Maton var en av de som producerade mest biomassa och innehöll dessutom nästan lika mycket DIBOA och BOA som Aroostok (Burgos et al. 1999). Sortskillnader har identifierats i fler studier. Brooks et al. (2012) analyserade DIBOA-produktionen i flera rågsorter. De kunde identifiera flera genotyper med ”hög” och ”låg” produktion av DIBOA. Dessa egenskaper vara konstanta över flera år samt i varierande miljöer och bör därför vara genetiskt styrda (Brooks et al. 2012). Kombinationen av högt innehåll av allelokemikalier och stor biomassa kan vara viktigt vid val av täckgröda eftersom de också hindrar ogräs genom beskuggning. Kännedom om sorter med extra stort innehåll av DIBOA och BOA kan vara värdefullt vid växtförädling med syfte att ta fram sorter med hög allelopatisk potential.

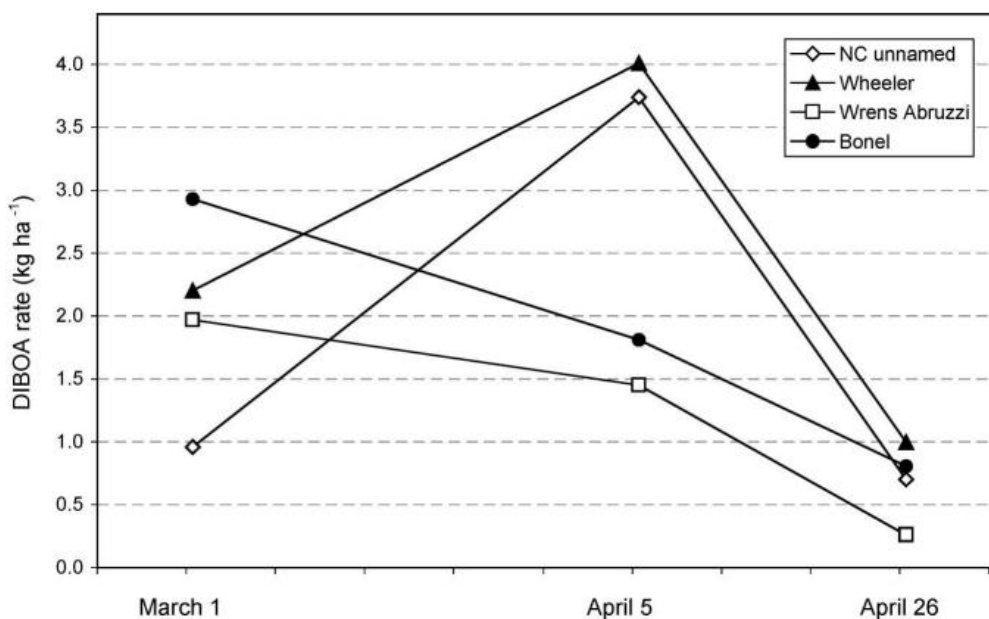
Råg finns som höstsorter, fakultativa sorter (som kan sås både på hösten och på våren) och vårsorter. Höstsådda och fakultativa sorter skiljer sig i innehåll av

allelokemikalier, framför allt deras förändring av innehåll över tid. När Reberg-Horton et al. (2005) jämförde sorter av de två olika typerna under en period (1 mars till 26 april) minskade halten över tid hos alla sorter (genom att använda upprepande mätningar analys i ANOVA, $P < 0,001$), men minskningen skedde långsammare hos höstsorterna än hos de fakultativa ($P < 0,001$), se figur 2. Alla sorter innehöll samma låga mängd DIBOA vid sista mättillfället. Högre nivåer i hösttyperna vid en viss tidpunkt spekuleras vara kopplat till utvecklingsstadium. Hösttyperna utvecklades långsammare vilket tyder på att den relativa mognadsgraden för de olika sorterna spelar roll för DIBOA innehållet (Reberg-Horton et al. 2005). Resultat från en annan studie som också undersöker innehållet i tre av de sorter som Reberg-Horton et al. använde visade däremot inga skillnader mellan höstsorter och fakultativa sorter (La Hovery, 2011). Innehållet i växtmaterialet förtäljer dock inte hur mycket allelopatiska föreningar som produceras och utsöndras till omgivningen.



Figur 2. Förändringar i DIBOA-innehåll i skottvävnader från olika rågsorter över tid. Figuren saknar felstaplar samt signifikansnivå. Reprinted by permission from Springer Nature License: Springer Nature, *Journal of Chemical Ecology*, Changes over time in the allelochemical content of ten cultivars of rye (*Secale cereale* L.), Reberg-Horton et al. 2005, Copyright 2005.

Produktion av DIBOA per arealenhet varierar också mellan höstsorter och fakultativa sorter. Mellan 1 mars och 5 april, i Reberg-Hortons et al. (2005) försök, ökade produktionen för hösttyperna men sjönk för de fakultativa ($P < 0,001$), se figur 3. Efter att ha nått maximal nivå minskade DIBOA-produktionen för hösttyperna och vid sista mättillfället var skillnaderna små mellan sorterna (Reberg-Horton et al. 2005). Under en viss period är skillnaden i produktion tydlig vilket innebär att vilken typ av råg som väljs att odla bör ha betydelse.



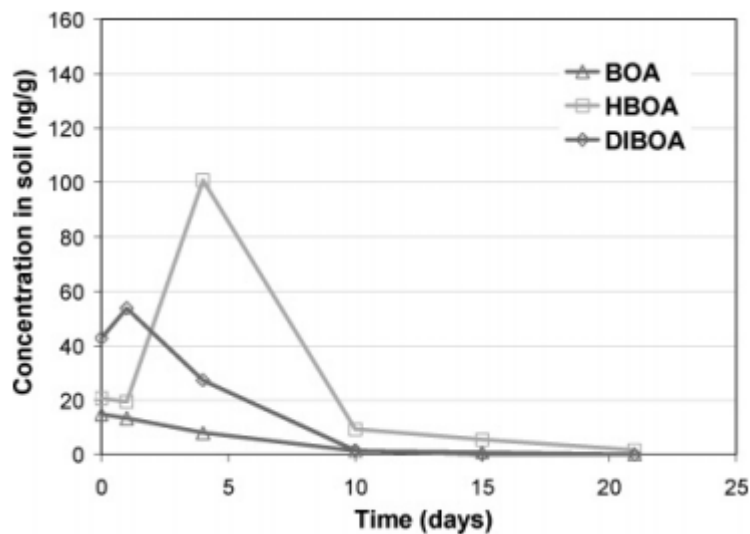
Figur 3. DIBOA-produktion per arealenhet (koncentration \times biomassa) för olika rågsorter över tid. Figuren saknar felstaplar samt signifikansnivå. Reprinted by permission from Springer Nature License: Springer Nature, *Journal of Chemical Ecology*, Changes over time in the allelochemical content of ten cultivars of rye (*Secale cereale* L.), Reberg-Horton et al. 2005, Copyright 2005.

2.4 Innehåll av benzoxazinoider i jord

En möjlig väg för allelopatiska föreningar att förflytta sig från en utsöndrande växt till en målväxt är genom jord (Macías et al. 2014). Förekomst och varaktighet av benzoxazinoider i jord, utsöndrade från råg, är komplext. När skott av råg blandades ner i jord, för att efterlikna praktiska jordbrukstekniker, var MBOA och DIBOA de mest förekommande föreningarna de två första dagarna (Krogh et al. 2006). I nedstigande ordning med avseende på koncentration upptäcktes även HBOA (2-hydroxy-2H-1,4-benzoxazin-3(4H)-one), HMBOA (2-hydroxy-7-methoxy-1,4benzoxazin-3-one) och BOA. Efter en tid kunde en liten mängd APO upptäckas och mängden HBOA ökade kraftigt för att sedan sjunka. Ökningen av HBOA tros bero på nedbrytning av DIBOA. Metaboliternas förekomst var dynamisk och tidsberoende. De högsta koncentrationerna av de flesta föreningarna uppmättes dag 1 men för ett par av föreningarna uppmättes högsta halten dag 4. Efter 15 dagar hade mängden av de flesta föreningarna närmast sig noll, se figur 4 (Krogh et al. 2006).

Nedbrytningsprocesserna kan utveckla föreningar med modifierade biologiska egenskaper, som kan påverka den producerande växtens totala allelopati. Jordlevande mikroorganismer har visat sig vara delaktiga i nedbrytningsprocesserna av allelopatiska föreningar. Experiment med steril jord

visar att vid frånvaro av mikroorganismer kan allelopatiska föreningar vara stabila och upprätthålla samma koncentration i flera dagar (Macías et al. 2004).



Figur 4. Koncentration av BOA, HBOA och DIBOA i jord med rågskott inblandade över tid. 1 skott per 300 g jord. Reprinted with permission from Krogh et al. 2006. Copyright 2006 American Chemical Society.

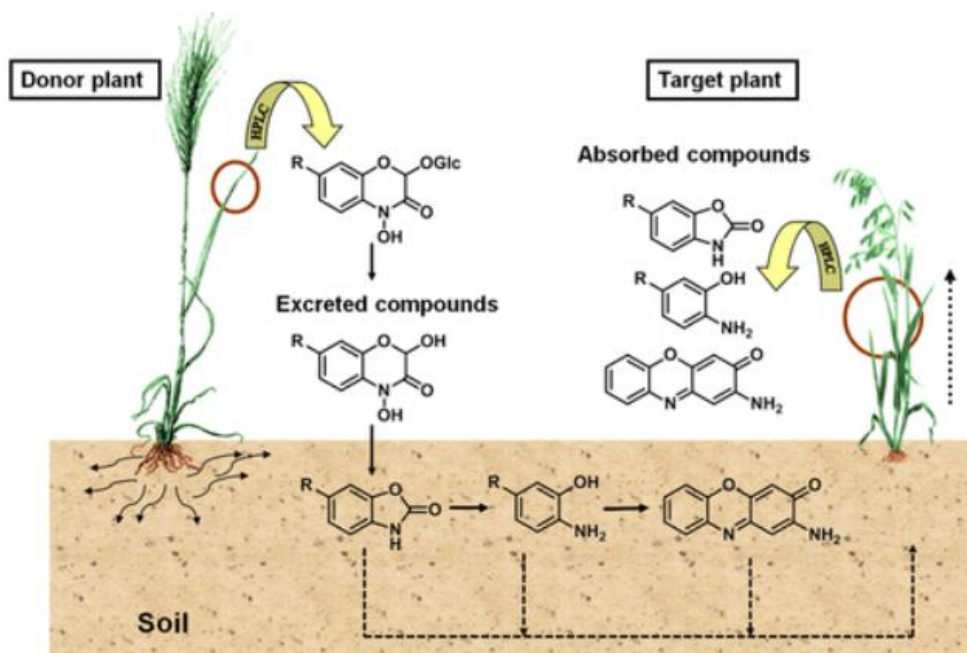
Mineralisering av organiskt material kan frigöra benzoxazinoider i jorden. I kontroll har bakgrunds nivåer uppmätts efter plöjning, som tros komma från tidigare spannmålsodling och täckodling. Totala benzoxazinoidkoncentrationen var ett år 15-30 ng g⁻¹ och året efter 5-15 ng g⁻¹ (Rice et al. 2012). Låga bakgrunds nivåer av allelopatiska föreningar kan alltså detekteras även en tid efter rågodling.

Allelopatiska föreningars varaktighet och tidpunkt för högsta nivå beror på hur jorden behandlas. När Rice et al. (2012) jämförde plöjningsfri jord och jordbearbetad jord nådde generellt den plöjningsfria jorden maximal halt av allelopatiska föreningar senare och behöll högre koncentrationer längre än det jordbearbetade ledet. Den observerade skillnaden i frigörande av föreningar mellan behandlingarna var förväntad. Den jordbearbetade rågen förväntades brytas ner och frigöra sina allelopatiska föreningar snabbare än plöjningsfri råg, eftersom nedbrytningen av råg på ytan påverkas av ojämn fuktillgång. Inför fältexperimentet fick råg växa tills stadiet axets vidgning för att sedan avdödas. Rågen som ingick i det plöjningsfria ledet strimlades av en maskin men förblev på ytan. I det andra ledet bearbetades växtresterna ner till ungefär 15 cm. Jordprover togs ner till 10 cm djup. Generellt höjdes nivåerna av allelopatiska föreningar efter rågskörd jämfört med kontroll, och höjningen varade i ungefär 2 veckor. De högsta värdena var 80 och 136 ng g⁻¹ (Rice et al. 2012).

När råg odlas i öppna system, till exempel på åkermark, är det rimligt att anta att de utsöndrande föreningarna har möjlighet att transporteras i flera olika riktningar i jorden, bort från den utsöndrande växten. Rörligheten för allelopatiska föreningar har dock visat sig vara begränsad (Rice et al. 2012). När BOA och MBOA applicerades som lösningar på ytan av fuktig jord blev majoriteten av det tillsatta föreningarna kvar i det övre jordlagret (0-1cm) (Rice et al. 2012). Brist på rörlighet kan resultera i att allelopatiska föreningar koncentreras nära markytan om växtrester inte blandas ner i jorden, vilket kan leda till potentiellt högre effektiva koncentrationer i denna zon. I experimentet av Rice et al. (2012) observerades även att koncentrationen av BOA minskades snabbt när det blandades in i jord. Tillgängligheten blev direkt 50 % av vad som förväntades. Efter 24 timmar var halten nära 0. Dessa laborativa observationer stödjer fältobservationer gjorda av Rice et al. (2012), där koncentrationerna mättes relativt lägre än vad som förutspåts utifrån växtmaterialet. De låga nivåer som uppmättes i fält kvarstod i flera dagar under rågens nedbrytning, men försvann abrupt efter 2 veckor. Resultaten kan förklaras av kontinuerlig frisläppning av allelopatiska föreningar under rågens nedbrytning under en 2 veckors period, följt av snabbt försvinnande och eventuellt immobilisering av benzoxazinoider när det släpps ut i miljön (Rice et al. 2012).

2.5 Fytotoxisk verkan på ogräs

Den schematiskt sista delen i allelopati är upptag av de kemiska föreningarna i en målväxt. I målväxten kan föreningarna verka fytotoxiskt och skada växten (Rice 1984a). Allelokemikaliers väg från en utsöndrande växt, genom substrat (jord), till en målväxt har undersökts av Macías et al. (2014), se figur 5. Den producerande växten var i studien råg och målväxten för de fytotoxiska ämnena var flyghavre. Studien mätte koncentrationerna av allelokemikalier i växterna och i jorden, samt utsöndringsdynamiken och fytotoxicitet hos målväxten. Densiteten, det vill säga antalet rågplantor per kärl, påverkade den fytotoxiska aktiviteten på flyghavren, som alltid var fyra plantor per kärl. Inhibering av skott och rötters tillväxt ökade vid ökad densitet av rågplantor, om än i varierande grad. Fjorton rågplantor orsakade 50 % inhibering av flyghavrens rotlängd och 35 plantor krävdes för att ge minskad skottlängd. Rågens DIBOA-produktion minskade dock när andelen flyghavreplantor minskade. Resultatet överensstämmer med att produktionen av försvarsmetaboliter triggas vid närvaro av målväxter (Macías et al. 2014). Liknande resultat har bekräftats vid konkurrens. När en konkurrerande växt odlas vid en allelopatisk växt utsöndrar denna mer allelopatiska föreningar (Kong et al. 2002). I experimentet med flyghavre observerades större fytotoxisk effekt när mängden allelokemikalier i målväxtens vävnader ökade. Det fanns en korrelation mellan koncentrationen av DIBOA, BOA och APO och fytotoxisk effekt (Macías et al. 2014).



Figur 5. Föreslagen väg för allelokemikalier från *S. cereale* L. till *A. fatua* L. Reprinted with permission from Macías et al. 2014. Copyright 2014 American Chemical Society.

Känsligheten för rågens allelopatiska föreningar har studerats för flera olika arter, både monokotyledoner (enhjärtbladiga) och dikotyledoner (tvåhjärtbladiga). Dikotyledoner har visat sig vara känsligare mot DIBOA och BOA än monokotyledoner. När sallad, tomat och svinamarant testades var de 30 % känsligare än de monokotyledoner som testades (Barnes & Putnam 1987). Upptäckterna stämmer överens med Gavazzis et al (2010) resultat, där växtrester av råg minskade mängden gräs med 61 % och mängden tvåhjärtbladiga ogräs med 96 % (Gavazzi et al. 2010). De allelopatiska föreningarna kan både påverka frögroning och plantans tillväxt negativt. Rötternas tillväxt hos gräsarter var känsligare än skottens tillväxt. BOA var så toxiskt mot sallad att rotmeristemet blev svart av nekros (Barnes & Putnam 1987).

Upptag av allelopatiska föreningar kan ske genom direktkontakt med vävnader eller genom jord. En faktor som påverkar fytotoxiciteten är koncentrationen av allelokemikalier i jorden. När BOA och DIBOA applicerades till jord inhiberades uppkomst av sallad och smörgåskrasse fullständigt vid alla nivåer (25, 50 och 100 kg/ha) av DIBOA och vid de högre nivåerna (50 och 100 kg/ha) av BOA (Barnes & Putnam 1987). Hönshirs påverkades mindre, men vid högre nivåer inhiberades arten signifikant. Dessa mätningar gjordes fyra dagar efter applicering, 14 dagar efter applicering gjordes nya mätningar. Sallad och smörgåskrasse inhiberades fortfarande fullständigt vid de högre appliceringsnivåerna. Vid låga nivåer av

DIBOA grodde ett fåtal plantor. Uppkomst av hönshirs efter 14 dagar var i samma nivåer som efter fyra dagar (Barnes & Putnam 1987). Även den lägsta nivån i experimentet, 25 kg/ha, är högre än vad som förväntas vara realistiskt i fält. Potential för utsöndring av 13,5 kg/ha har uppmätts (Barnes 1981 se Barnes & Putnam 1987).

Växtrester av råg har observerats minska flera vanliga ogräsarter i odling, som svinmålla (*Chenopodium album* L.) och lomme (*Capsella bursa-pastoris* L.) (Jelonkiewicz & Borowy 2005; Gavazzi et al. 2010). Även växande råg har god ogräskonkurrerande förmåga och kan hämma ogräsets tillväxt. I fältförsök (Barnes & Putnam 1983) har råg som skyddsgröda studerats med avseende på ogräskonkurrens. Vårsådd råg reducerade ogräsbiomassan med 94 % jämfört med oplanterad yta. Den markanta påverkan tros bero på direkt konkurrens om vatten, ljus och näring i kombination med allelopatiska kemikalier från rötter och skott. För att skilja på allelopati och fysikalisk ogräshämning jämfördes rågrester (avdödad odlad råg) och poppelhyvelspån. Poppelhyvelspånet skulle simulera de fysikaliska egenskaperna avdödad råg har. Den totala ogräsbiomassan var reducerad med 73 % mer i försöksleden med växtrester av råg jämfört med poppelhyvelspån, men totala ogrästätheten förblev densamma. Rågrester verkade reducera den totala ogrästtillväxten, men inte groning av ogräs. Det påverkade inte heller groning, tillväxt eller skörd hos ärtorna som odlades i försöket (Barnes & Putnam 1983).

Förutom toxicitet från växtrester, kan allelopati orsakad av levande rågplantors rötter vara en komponent i den totala påverkan på ogräs som noteras i fält (Barnes & Putnam 1983). För att få större förståelse för rötternas allelopatiska effekter tillsattes lakvatten från levande rågrötter till krukor med tomat och sallad. I ett led fick krukor med sallad respektive tomat lakvatten från en rågkruka. I det andra ledet fick tomat och sallad lakvatten från två krukor med råg. Rötter, skott och total biomassa hos sallad och tomat förblev opåverkade av en kruka råg, men vid två krukor reducerades salladens totala biomassa med 25 %. Tomatens totala biomassa minskade med 18 %. Det tyder på att det finns en koncentrationseffekt av rågrötters toxin. Studien visar att lakvatten från rågrötter är mer inhiberande mot tomat och sallad än lakvatten från andra tomat- och salladsplantor. Studien föreslår att inhiberande föreningar från rågrötter kan frigöras och tas upp av andra växter. (Barnes & Putnam 1983).

En relevant fråga i sammanhanget är om råg påverkar kulturgrödors tillväxt eller groning negativt. Ämnet är inte väl studerat och endast ett fåtal studier har undersökt hur allelopatiska mellangrödor påverkar grödor i fält som odlas till skörd (Koehler-Cole et al. 2020). En möjlig anledning till att våra kulturgrödor är mindre

benägna att påverkas negativt av allelokemikalier är deras större fröstorlek. Studier har visat att lättare frön påverkas mer (Liebman & Sundberg 2006; Tabaglio et al. 2008). Ett vetekorn väger i storleksordningen 30 mg medan ett åkersenapsfrö kan väga 1,8 mg (Liebman & Sundberg 2006).

2.6 Odlingstekniker vid odling av råg

Råg kan odlas som huvudgröda till skörd. Höstråg är en bättre ogräskonkurrerande gröda än alla övriga höstsådda sädesslag (Fogelfors 2015), vilket gör den till en lämplig gröda i ekologiska växtföljder. Förutom odling av råg till kärnskörd kan råg odlas för att konkurrera mot ogräs inför en annan gröda. När jorden inte är bevuxen, till exempel mellan skörd och etablering av ny gröda, kan råg odlas som en mellangröda (cover-crop). Under 6 år gjordes ett flertal fältexperiment (Putnam et al. 1983) med följande slutsats: för att lyckas bäst med råg som en ogräskontrollerande mellangröda bör beståndet växa till höjden 40 – 50cm för att sedan avdödas av kyla eller herbicid. Växtresterna ska sedan förbli på jordytan. Med denna metod kunde upp till 95 % av ogräarterna kontrolleras under en period som varade mellan 30 – 60 dagar efter avdödning (Putnam et al. 1983). När växtresternas placering jämförs av Kruidhof et al. (2009) blir slutsatsen liknande. När växtmaterialet förblir på ytan blir inhiberingen större samt mer långvarig i jämförelse med växtmaterial av råg som blandas ner i jorden. Ogräsbekämpningen utgörs både av växtresternas fysiska och kemiska egenskaper. Rågväxtrester jämfördes med poppelhyvelspån, som ska ge samma fysikaliska ogräskontroll som rågväxtrester. Råg reducerade kraftigt biomassan av ogräs. (Putnam et al. 1983).

En annan odlingsteknik är att odla råg tillsammans med en huvudgröda. Rågen fungerar då som en bottengröda (living mulch). Vårsådd höstråg kan som icke-värmekrävande växt konkurrera med tidiga ogräs på våren. Vid odling av sojaböna (*Glycine max* (L.) Merr.) i nordliga klimat kan snabbväxande ogräs vara ett problem i början av säsongen. I ett fältexperiment såddes höstråg mellan raderna av huvudgrödan sojaböna, för att utvärdera hur råg fungerar som en bottengröda (Geddes & Gulden 2021). Skördenivån av sojaböna påverkades inte av rågen. Raps (*Brassica napus* L.) användes som representativ modellogräs. I ett led avdödades bottengrödan kemiskt när rågen hade ett sidoskott. Rågen påverkade inte rapsens täthet eller rapsens överlevnad till mognad. Däremot påverkades rapsens fröproduktion negativt, den reducerades med en tredjedel. Även rapsens biomassa reducerades, 50 % jämfört med odling utan bottengröda. Effekten minskade när rågen avdödades mitt i säsongen, men fröproduktion förblev nedsatt. Det indikerar att rapsen har möjlighet att kompensera med ökad vegetativ tillväxt men inte reproduktiv tillväxt. Metoden är inte tillräcklig för att utarma fröförrådet av ogräs

men kan kombineras med andra metoder i ett integrerat växtskydd (Geddes & Gulden 2021). En tidigare studie genomförde liknande fältexperiment med råg som bottengröda i sojaböna under tre år. Rågen hämmade groningen och tillväxt av ogräsen med 90, 82 och 60 % vid respektive år. Tekniken fungerade väl vid goda förhållanden avseende nederbörd, rågens utsädesmängd och ogrästryck (Ateh & Doll 1996).

Ekologisk odling är idag starkt beroende av jordbearbetning som en bekämpningsmetod mot ogräs. Konventionell jordbearbetning innebär generellt ökade kostnader och högre utsläpp av växthusgaser jämfört med plöjningsfri odling (Holka & Bienkowski 2020). Nya odlingsmetoder som inte vänder jorden är ett eftersökt alternativ i plöjningsfri odling. Knäckvältning av råg är en metod som innebär att rågen trycks ner mot markytan och skärs sönder utan att blandas ner i jorden, se redskapet i figur 6. I ett fältförsök avdödades höstsådd råg med en knäckvält (roller-crimper) inför sådd av sojaböna (Smith et al. 2011). Metoden fungerade väl som ogräsbekämpning, och ökad mängd biomassa av råg korrelerade med ökad ogräsbekämpning. Vid höga biomassanivåer, över 9000 kg ha⁻¹ TS, var täckningsgraden av ogräs nära noll (Smith et al. 2011). Ogräshämningen tros orsakas av flera komponenter som missgynnar ogräs, delvis fysikaliskt genom att hindra solljuset att nå markytan och kemikaliskt genom allelopatiska föreningar (Putnam & DeFrank 1983).



Figur 6. En knäckvält monterad fram på en traktor (Davis 2010).

Förutom att ogräshämningen kan bero på allelopati och beskuggning tros även kväveimmobilisering vara en betydande orsak. Wells et al. (2013) visade att knäckvältad råg orsakade extremt låga nivåer av växttillgängligt kväve vilket påverkade kväveinnehållet i både ogräsarten som studerades och sojabönan som såddes i den avdödade rågen. När dessa låga nivåer uppmättes i sojaböna var inte de kvävefixerande nodulerna på sojabönans rötter utvecklade än. När nodulerna blev aktiva kunde sojabönan återhämta sig väl, jämfört med ogräset. Studien föreslår att kvävebristen har en betydande del i ogräshämningen när en täckgröda av spannmål paras ihop med en baljväxt som huvudgröda (Wells et al. 2013).

Råg som odlas som mellangröda kan kombineras med andra arter, till exempel baljväxter. Olika arter kan komplettera varandra med olika tillväxtegenskaper. Vårsådd råg kombinerad med ärt (*Pisum sativum* L.) har studerats som mellangröda med avseende på ogräskontroll. Mellangrödan läts växa i drygt 2 månader. Vid avdödning var ärtarna i full blom och 45–60 cm höga medan rågen fortfarande var i vegetativt stadiet och 30–45 cm hög. Mellangrödor med endast råg och råg-ärt blandningar hämmade generellt ogräs bättre än mellangröda med endast ärt. Ogräsets täckningsgrad varierade från 2 % (råg-ärt blandningar) till 73 % (endast ärt). Fröblandningar med 50 % eller mer råg gav bäst ogräskontroll (Akemo et al. 2000)

3. Diskussion och slutsats

3.1 Diskussion

Odling av råg för dess allelopatiska förmåga kan vara en indirekt ogräskontrollerande metod. Utnyttjande av allelopati kan vara en del i integrerat växtskydd (IPM) för att minska behovet av kemiska växtskyddsmedel. Allelopatiska föreningar har beskrivits som naturliga herbicider (Dayan et al. 2009), för deras förmåga att negativt påverka andra arter. Att välja en allelopatisk gröda i växtföljden förebygger en ogräsproblematik och på så vis kan bekämpningsåtgärder minska. Alla som yrkesmässigt använder växtskyddsmedel ska enligt IPM minska användningen av kemiska bekämpningsmedel genom förebyggande och alternativa åtgärder. Målet är att tillämpa ett hållbart växtskydd för att minska miljöpåverkan och resistensproblem. I Sverige har resistens uppmärksammats i flera ogräsarter, bland annat våtarv, åkertistel och renkavle (Fogelfors 2015). Användandet av kemiska växtskyddsprodukter medför även hälsorisker för människor som hanterar produkterna, utsatta riskgrupper är till exempel produktionsarbetare, transportörer och växtodlare (Buckwell et al. 2020).

Innehållet av allelopatiska föreningar i råg varierar mycket vilket delvis beror på det genetiska materialet, utvecklingsstadium och ålder. Dessa faktorer, och eventuellt fler som inte har studerats, kan förklara varför nivåerna varierar kraftigt vid olika mätningar. Vid odling kan kännedomen om att nivån sjunker efter ca 60 dagar efter sådd vara intressant och även kännedom om sort- och typskillnader (Burgos et al. 1999; Reberg-Horton et al. 2005). Höstsorter av råg särskiljer sig med långsammare utveckling vilket innebär att nivån av allelopatiska föreningar är högre en längre tid. Denna försening i mognad kanske odlaren kan påverka genom att tillämpa senare sådd, putsning av grödan, tillväxtinhibering eller välja en sort som har egenskapen sen mognad. Sortens utvecklingstid kan tänkas vara en mer lättillgänglig information jämfört med sortens innehåll av allelopatiska föreningar. Det kan verka motsägelsefullt att eftersträva höga halter allelopatiska föreningar inuti råg när föreningarna ska utsöndras för att ge allelopatisk effekt på andra växter. Växtvävnadens fytotoxicitet sjunker över tid (Reberg-Horton et al. 2005),

men om det kan betyda att allelopatiska föreningar utsöndras i högre grad behöver studeras mer ingående.

Litteraturen visar att jordbearbetning och plöjning av jord med rågväxtrester, så att dessa hamnar ca 15 cm under ytan, påskyndar nedbrytningen av allelopatiska föreningar (Rice et al. 2012). Detta, samt föreningarnas svaga rörlighet i jord (Rice et al. 2012), talar för ett plöjningsfritt system där växtresterna bevaras nära markytan. Majoriteten av de allelopatiska föreningarna rör sig mindre än 1 cm i jord och dessa potentiellt högre koncentrationer bör lämpligast vara i zonen där många fröogräs gror. Många ogräs gror bäst nära markytan (Benvenuti & Mazzoncini 2019).

Många odlings- och växtskyddsåtgärder måste göras vid väl valda tidpunkter för att ge bästa möjliga effekt. För en odlare är det relevant att veta hur länge en potentiellt allelopatisk effekt varar och när den är som starkast. När rågskott avdödas och blandas ner i jord är koncentrationen av föreningar starkast dag 1 och nästintill noll efter två veckor (Krogh et al. 2006). Samtidigt visar fältexperiment att en mellangröda av råg som avdödas och lämnas på markytan, kan ge ogräskontroll 30 – 60 dagar (Putnam et al. 1983). Den allelopatiska effekten är således av relevans från några dagar till några veckor efter avdödning, beroende på hur snabbt de kemiska föreningarna bryts ner. Utifrån den slutsatsen bör etablering av ny gröda ske snabbt för att utnyttja den allelopatiska effekten mot ogräs.

Avdödning av en mellangröda kan göras med herbicider, mekaniskt eller med kyla under vintern. I Sverige odlas huvudsakligen höstråg (Fogelfors 2015), men icke-köldtålig vårråg skulle kunna sås på hösten som mellangröda och avdödas naturligt under vintern. Odlaren skulle därmed kunna undgå en herbicidanvändning. Detta skulle dock innebära ett stort tidsspänn mellan avdödning och sådd av vårröda. Visserligen går nedbrytningen av organiskt material långsammare i frusen mark men det avstannar inte helt (Segura et al. 2017), och frågan är hur de allelopatiska föreningarna förändras under svenska vinterförhållanden. Vidare forskning behövs för att förstå hur allelopati fungerar under svenska förhållanden.

I fältexperiment är det svårt att avgöra vad lyckad ogräshämning beror på. I många fall tros det bero på flera saker men att allelopati kan vara en påverkande faktor. Råg som växer konkurrerar med ogräs om ljus, näring och vatten. När dessa mekanismer finns behöver kanske inte råg utsöndra så mycket allelopatiska föreningar för att i sin helhet ändå påverka ogräs kraftigt. Även avdödad råg kan hämma ogräs på flera sätt. Metoden när råg avdödas med en knäckvält (roller-crimper) inför sådd av en huvudgröda är ett exempel på en ogräshämmande odlingsteknik som forskning menar beror på flera saker (Wells et al. 2013). Vidare

har diskuterats hur betydelsefull allelopatin är i sammanhanget. När rågrester har blandats in i jord varierade inhiberingen mellan två sorter (Kruidhof et al. 2009). Däremot upptäcktes inga sortskillnader när växtresterna bevarades på ytan. Detta stödjer Kruidhof et al. (2009) hypotes, att innehållet av allelopatiska föreningar är viktigare när växtresterna blandas in i jord, som grundar sig i hypotesen att täckgrödan hämmar ogräs till största del fysikaliskt, oberoende sort. De två sorterna som jämfördes var en välkänd sort som flera gånger använts i allelopatiska försök och en inhemsk, holländsk, sort. Emellertid kunde inte bioanalyser på laboratorium bekräfta sortskillnader med avseende på allelokemikalieinnehåll i extrakt. Det är därför inte säkert att sortskillnaden i fält beror på allelopatisk effekt i detta fall (Kruidhof et al. 2009). De här svårigheterna, att förstå alla inverkanse faktorer, försvårar arbetet att dra konkreta slutsatser kring allelopatins betydelse i odlingsystem.

Förutom allelopati och beskuggning tros även kväveimmobilisering vara en viktig del i ogräsinhiberingen (Wells et al. 2013). De två förstnämnda faktorerna är positivt korrelerade med ökad biomassa. Mängden biomassa som produceras beror till stor del på mängden växttillgängligt kväve (Fogelfors 2015). Det är därför troligt att det kan uppstå svårigheter att nå önskad mängd biomassa utan att riskera den tänkta kvävebristen som ska uppstå i ett senare skede. Möjligtvis kan rågen mineralgödslas med en giva som är anpassad efter förväntat upptag, för att inte riskera att kväve finns i överflöd och tillgängligt för ogräsen i huvudgrödan. Odlingstekniken är dock av intresse för ekologiska odlare som använder organiska gödselmedel. Studierna om knäckväldad råg, som har använts i denna litteraturstudie, är gjorda på sandjordar (Smith et al. 2011; Wells et al. 2013). Fortsatta studier på odlingstekniken på kväveleverande jordar med hög mullhalt kan vara av intresse.

Litteraturstudien visar att det är svårt att uppskatta rågens innehåll av allelopatiska föreningar, som varierar över tid och mellan sorter (Reberg-Horton et al. 2005; Burgos et al. 1999). Säkerligen finns det även andra faktorer, till exempel tillgången på resurser, som påverkar produktionen av allelokemikalier. Det kan därför tänkas vara svårt för en odlare att optimera allelopati i sin växtodling. Ett tänkbart enklare alternativ hade varit en biologisk herbicid som innehåller allelopatiska föreningar. Som växtodlaren kan applicera som ett växtskydd. Vattenextrakt från råg har tagits fram och verkat toxiskt på utvalda ogräsarter (Ercoli et al. 2007). Det är dock en utmaning att ta fram en väl fungerande produkt som är selektiv mellan gröda och ogräs. Dessutom ska produkten vara ekonomiskt försvarbar att använda för växtodlaren. Risker, såsom resistensutveckling, måste också beaktas.

3.2 Slutsats

Denna litteraturstudie har genomförts för att undersöka om det går att särskilja allelopati från andra mekanismer när det gäller ogräskontroll, vad betydelsen är av rågens allelopatiska förmåga och om råg kan odlas för att tillämpa ogräskontroll. Studien visar att det finns svårigheter att skilja allelopati från andra mekanismer, endast ett fåtal experiment har särskilt allelopati och beskuggning. Rågens innehåll av allelopatiska föreningar har studerats och även fytotoxiciteten av dessa. Råg innehåller de allelopatiska föreningarna DIBOA och BOA samt flera andra föreningar av mindre mängd. De allelopatiska föreningarna påverkar rot- och skottlängd negativt och hämmar frögroning hos vissa arter. Dikotyledoner har visat sig känsligare mot föreningarna än monokotyledoner.

Många studier visar att föreningarna är starkt inhiberande mot flera ogräsarter. Men hur mycket allelopatiska föreningar som råg utsöndrar och betydelsen av dessa för ogräskontroll har denna studie inte lyckats besvara fullständigt. Levande rågens konkurrens om ljus, näring och vatten bör bidra till den totala påverkan på ogräs där allelopati är en del. Om det finns en stark konkurrens till andra arter så kan mindre mängder allelopatiska substanser ändå ha en signifikant effekt. Därmed behöver inte rågens allelopatiska förmåga vara fullständigt inhiberande för att råg ska kunna motiveras som metod för att kontrollera ogräs.

Flera studier har visat rågens förmåga som ogräskontroll och uppmärksammat flera odlingstekniker som kan tillämpas. Förutom odling av råg i renbestånd till kärnskörd kan råg odlas som en mellangröda och samodlas med kvävefixerande baljväxter. Ytterligare en möjlig odlingsteknik är råg som knäckvältas inför sådd av baljväxter, som dock kräver att det maskinella redskapet finns tillgängligt. Dessa förslag ges utifrån rågens generella ogräskonkurrerande förmåga, för att förstå rågens allelopatiska potential i praktisk odling krävs mer forskning. Dessutom finns kunskapsluckor för hur allelopati fungerar under svenska förhållande. Vidare forskning som studerar exempelvis hur svensk vinter påverkar föreningarna skulle öppna dörrar för att utveckla en odlingsteknik som är anpassad till Sveriges klimat.

Referenser

- Akemo, M.C., Regnier, E.E. & Bennett, M.A. (2000). Weed Suppression in Spring-Sown Rye (*Secale cereale*): Pea (*Pisum sativum*) Cover Crop Mixes. *Weed Technology*, 14 (3), 545–549
- Ateh, C.M. & Doll, J.D. (1996). Spring-Planted Winter Rye (*Secale cereale*) as a Living Mulch to Control Weeds in Soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*, 10 (2), 347–353
- Barnes, J.P. & Putnam, A.R. (1983). Rye residues contribute weed suppression in no-tillage cropping systems. *Journal of Chemical Ecology*, 9 (8), 1045–1057. <https://doi.org/10.1007/BF00982210>
- Barnes, J.P. & Putnam, A.R. (1987). Role of benzoxazinones in allelopathy by rye (*Secale cereale* L.). *Journal of Chemical Ecology*, 13 (4), 889–906. <https://doi.org/10.1007/BF01020168>
- Belz, R.G. & Hurle, K. (2005). Differential Exudation of Two Benzoxazinoids One of the Determining Factors for Seedling Allelopathy of Triticeae Species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (2), 250–261. <https://doi.org/10.1021/jf048434r>
- Benvenuti, S. & Mazzoncini, M. (2019). Soil Physics Involvement in the Germination Ecology of Buried Weed Seeds. *Plants*, 8 (1), 7. <https://doi.org/10.3390/plants8010007>
- Brooks, A.M., Danehower, D.A., Murphy, J.P., Reberg-Horton, S.C. & Burton, J.D. (2012). Estimation of heritability of benzoxazinoid production in rye (*Secale cereale*) using gas chromatographic analysis. *Plant Breeding*, 131 (1), 104–109. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2011.01885.x>
- Buckwell, A., De Wachter, E., Nadeu, E. & Williams, A. (2020). *Crop Protection & the EU Food System: Where are they going?*
- Burgos, N.R., Talbert, R.E. & Mattice, J.D. (1999). Cultivar and age differences in the production of allelochemicals by *Secale cereale*. *Weed Science*, 47 (5), 481–485. <https://doi.org/10.1017/S0043174500092146>
- Davis, A.S. (2010). Cover-Crop Roller–Crimper Contributes to Weed Management in No-Till Soybean. *Weed Science*, 58 (3), 300–309. <https://doi.org/10.1614/WS-D-09-00040.1>
- Dayan, F.E., Cantrell, C.L. & Duke, S.O. (2009). Natural products in crop protection. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 17 (12), 4022–4034. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2009.01.046>
- Ercoli, L., Masoni, A., Pampana, S. & Arduini, I. (2007). Allelopathic effects of rye, brown mustard and hairy vetch on redroot pigweed, common lambsquarter and knotweed. *Allelopathy Journal*, 19, 249–256
- Fogelfors, H. (2015). *Vår mat : odling av åker- och trädgårdsgrödor : biologi, förutsättningar och historia*. Lund: Studentlitteratur.
- Gavazzi, C., Schulz, M., Marocco, A. & Tabaglio, V. (2010). Sustainable weed control by allelochemicals from rye cover crops: From the greenhouse to field evidence. *Allelopathy Journal*, 25, 259–273
- Geddes, C.M. & Gulden, R.H. (2021). Wheat and Cereal Rye Inter-Row Living Mulches Interfere with Early Season Weeds in Soybean. *Plants*, 10 (11), 2276. <https://doi.org/10.3390/plants10112276>

- Holka, M. & Bieńkowski, J. (2020). Carbon Footprint and Life-Cycle Costs of Maize Production in Conventional and Non-Inversion Tillage Systems. *Agronomy*, 10 (12), 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121877>
- Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V. & Chauhan, B.S. (2015). Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection*, 72, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.03.004>
- Jelonkiewicz, M. & Borowy, A. (2005). Effect of rye mulch on growth of weeds under no-tillage cultivation. *Allelopathy Journal*, 16, 113-120+149
- Jordbruksverket (2016). Resistens, Herbicidresistens, Fungicidresistens, Insekticidresistens. [Faktablad]. Stockholm: Svenskt Växtskydd. http://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_ovrigt/ovr292v2.pdf [2022-09-10]
- Koehler-Cole, K., Everhart, S.E., Gu, Y., Proctor, C.A., Marroquin-Guzman, M., Redfearn, D.D. & Elmore, R.W. (2020). Is allelopathy from winter cover crops affecting row crops? *Agricultural & Environmental Letters*, 5 (1), e20015. <https://doi.org/10.1002/ael2.20015>
- Kong, C., Hu, F. & Xu, X. (2002). ALLELOPATHIC POTENTIAL AND CHEMICAL. *Journal of Chemical Ecology*, 10
- Krogh, S.S., Mensz, S.J.M., Nielsen, S.T., Mortensen, A.G., Christophersen, C. & Fomsgaard, I.S. (2006). Fate of Benzoxazinone Allelochemicals in Soil after Incorporation of Wheat and Rye Sprouts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (4), 1064–1074. <https://doi.org/10.1021/jf051147i>
- Kruidhof, M., Bastiaans, L. & Kropff, M. (2009). Cover crop residue management for optimizing weed control. *Plant and Soil*, 318, 169–184. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9827-6>
- Liebman, M. & Sundberg, D.N. (2006). Seed Mass Affects the Susceptibility of Weed and Crop Species to Phytotoxins Extracted from Red Clover Shoots. *Weed Science*, 54 (2), 340–345
- Macías, F.A., Marín, D., Oliveros-Bastidas, A., Castellano, D., Simonet, A.M. & Molinillo, J.M.G. (2005). Structure–Activity Relationships (SAR) Studies of Benzoxazinones, Their Degradation Products and Analogues. Phytotoxicity on Standard Target Species (STS). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (3), 538–548. <https://doi.org/10.1021/jf0484071>
- Macías, F.A., Oliveros-Bastidas, A., Marín, D., Castellano, D., Simonet, A.M. & Molinillo, J.M.G. (2004). Degradation Studies on Benzoxazinoids. Soil Degradation Dynamics of 2,4-Dihydroxy-7-methoxy-(2 H)-1,4-benzoxazin-3(4 H)-one (DIMBOA) and Its Degradation Products, Phytotoxic Allelochemicals from Gramineae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52 (21), 6402–6413. <https://doi.org/10.1021/jf0488514>
- Macías, F.A., Oliveros-Bastidas, A., Marín, D., Chinchilla, N., Castellano, D. & Molinillo, J.M.G. (2014). Evidence for an Allelopathic Interaction Between Rye and Wild Oats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62 (39), 9450–9457. <https://doi.org/10.1021/jf503840d>
- Putnam, A.R. & DeFrank, J. (1983). Use of phytotoxic plant residues for selective weed control. *Crop Protection*, 2 (2), 173–181. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(83\)90042-X](https://doi.org/10.1016/0261-2194(83)90042-X)
- Putnam, A.R., Defrank, J. & Barnes, J.P. (1983). Exploitation of allelopathy for weed control in annual and perennial cropping systems. *Journal of Chemical Ecology*, 9 (8), 1001–1010. <https://doi.org/10.1007/BF00982207>
- Reberg-Horton, S.C., Burton, J.D., Daneshwar, D.A., Ma, G., Monks, D.W., Murphy, J.P., Ranells, N.N., Williamson, J.D. & Creamer, N.G. (2005). CHANGES OVER TIME IN THE ALLELOCHEMICAL CONTENT OF TEN CULTIVARS OF RYE (*Secale cereale* L.). *Journal of Chemical Ecology*, 31 (1), 179–193. <https://doi.org/10.1007/s10886-005-0983-3>

- Reimann, J.E. & Byerrum, R.U. (1964). Studies on the Biosynthesis of 2,4-Dihydroxy-7-methoxy-2H-1,4-benzoxazin-3-one*. *Biochemistry*, 3 (6), 847–851. <https://doi.org/10.1021/bi00894a021>
- Rice, C.P., Cai, G. & Teasdale, J.R. (2012). Concentrations and Allelopathic Effects of Benzoxazinoid Compounds in Soil Treated with Rye (*Secale cereale*) Cover Crop. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (18), 4471–4479. <https://doi.org/10.1021/jf300431r>
- Rice, E.L. (1984a). 1 - Introduction. I: Rice, E.L. (red.) *Allelopathy (Second Edition)*. San Diego: Academic Press. 1–7. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092539-4.50005-8>
- Rice, E.L. (1984b). 2 - Manipulated Ecosystems: Roles of Allelopathy in Agriculture. I: Rice, E.L. (red.) *Allelopathy (Second Edition)*. San Diego: Academic Press. 8–73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092539-4.50006-X>
- Rice, E.L. (1984c). 11 - Factors Affecting Amounts of Allelopathic Compounds Produced by Plants. I: Rice, E.L. (red.) *Allelopathy (Second Edition)*. San Diego: Academic Press. 292–308. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092539-4.50015-0>
- Rizvi, S.J. (2012). *Allelopathy: Basic and applied aspects*. Springer Science & Business Media.
- Segura, J.H., Nilsson, M.B., Haei, M., Sparrman, T., Mikkola, J.-P., Gräsvik, J., Schleucher, J. & Öquist, M.G. (2017). Microbial mineralization of cellulose in frozen soils. *Nature Communications*, 8 (1), 1154. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01230-y>
- Sicker, D., Frey, M., Schulz, M. & Gierl, A. (2000). Role of natural benzoxazinones in the survival strategy of plants. I: *International Review of Cytology*. Academic Press. 319–346. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(00\)98008-2](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(00)98008-2)
- Smith, A.N., Reberg-Horton, S.C., Place, G.T., Meijer, A.D., Arellano, C. & Mueller, J.P. (2011). Rolled Rye Mulch for Weed Suppression in Organic No-Tillage Soybeans. *Weed Science*, 59 (2), 224–231. <https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00112.1>
- Tabaglio, V., Gavazzi, C., Schulz, M. & Marocco, A. (2008). Alternative weed control using the allelopathic effect of natural benzoxazinoids from rye mulch. *Agronomy for Sustainable Development*, 28 (3), 397–401. <https://doi.org/10.1051/agro:2008004>
- Wells, M.S., Reberg-Horton, S.C., Smith, A.N. & Grossman, J.M. (2013). The Reduction of Plant-Available Nitrogen by Cover Crop Mulches and Subsequent Effects on Soybean Performance and Weed Interference. *Agronomy Journal*, 105 (2), 539–545. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0396>
- Zimdahl, R.L. (2018). Chapter 9 - Allelopathy. I: Zimdahl, R.L. (red.) *Fundamentals of Weed Science (Fifth Edition)*. Academic Press. 253–270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811143-7.00009-3>

Tack

Ett stort tack till min handledare Robert Glinwood som har hjälpt till under hela arbetsprocessen med vägledning och kunskap.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal här:

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.