

Jordbruksåtgärder för att minska kadmium i grödor



- Det finns flera jordbruksåtgärder som har potential att minska kadmiuminnehållet i ätbara delar av grödor.
- Det behövs mer forskning och fältförsök för att få fram underlag till exempelvis rådgivning eller andra typer av styrmedel.
- Områden som har potential och där mer forskning och utveckling vore önskvärt är t.ex. vidareutveckling av sorter med låg ackumulering av kadmium, samt tillförsel av biokol, selen och kisel. Det är även angeläget att utveckla och använda moderna metoder för identifiering av områden med höga kadmiumhalter för att kunna sätta in rätt åtgärder på rätt plats och anpassa till rådande odlingsförhållanden.

Jordbruksåtgärder som minskar upptaget av kadmium i ätliga delar av grödor kan vara en del i arbetet med att minska befolkningens exponering för kadmium via livsmedel. Det har funnits behov av en uppdaterad sammanställning av kunskap om den här typen av jordbruksåtgärder.

Den här kunskapssammanställningen har skrivits av forskare vid Sveriges Lantbruksuniversitet och författarna står för innehåll och slutsatser i rapporten. Kunskapssammanställningen har finansierats gemensamt av Jordbruksverket, Kemikalieinspektionen, Livsmedelsverket och Naturvårdsverket.

Författare

Therése Bengtsson

Karin Hamnér

Jan Eriksson

Foto framsida: Therése Bengtsson

Förord

För att förbättra samordningen mellan myndigheter beslutade regeringen 2016 att inrätta en samordningsgrupp för hantering av nya och framväxande kemikaliehot (SamTox). SamTox består av generaldirektörerna för åtta olika svenska myndigheter: Kemikalieinspektionen, Naturvårdsverket, Läkemedelsverket, Folkhälsomyndigheten, Livsmedelsverket, Sveriges Geologiska Undersökning (SGU), Statens geotekniska institut (SGI), Havs- och vattenmyndigheten och Arbetsmiljöverket. Syftet med SamTox är att etablera en struktur för snabb och systematisk överföring av information och kunskap mellan behöriga myndigheter och övriga aktörer, liksom för samarbete i händelse av allvarliga kemikaliehot. Toxikologiska rådet har i uppgift att stärka den systematiska övervakningen och användningen av vetenskaplig information samt att förse SamTox med uppdaterad och relevant information rörande nya potentiella kemikalierisker samt kända men otillräckligt åtgärdade kemikalierisker. Toxikologiska rådet lyfte i sin årsrapport för 2017–2018 behovet av åtgärder för att minska allmänhetens exponering för kadmium via livsmedel. SamTox beslutade därefter att utveckla en nationell kadmiumstrategi och sedan 2019 pågår arbetet med detta i en arbetsgrupp med representanter från Kemikalieinspektionen, Naturvårdsverket, Livsmedelsverket, Jordbruksverket¹ och SGU.

Kadmium är hälsoskadligt bl.a. genom att öka risken för benskörhet, nedsatt njurfunktion, hjärt- och kärlsjukdomar samt vissa typer av cancer. Befolkningens exponering för kadmium sker huvudsakligen via livsmedel, i synnerhet för icke-rökare. Nuvarande exponeringsnivå kan sannolikt påverka folkhälsan, och befolkningens exponering för kadmium via livsmedel uppvisar ingen minskande trend.

Enligt EFSA:s senaste exponeringsuppskattning ligger en stor del av befolkningen i EU och Sverige nära eller över TVI (tolerabelt veckointag). Svenska forskare har framhållit att det finns goda skäl till att TVI bör sänkas. En sådan sänkning av TVI kan göra att fler åtgärder motiveras för att minska befolkningens exponering för kadmium. Sverige har länge haft hög ambition i arbetet mot kadmium i livsmedel, och Toxikologiska rådet uppmanar till åtgärder för att minska exponeringen för kadmium.

Tillförseln av kadmium till svensk åkermark ökade fram till 1970-talet men har sedan dess minskat avsevärt, främst genom minskad tillförsel från mineralgödsel och luftdepositioner. Skatt på kadmium i gödselprodukter samt frivilliga åtgärder i jordbruket gjorde att fosforgödselmedel med lägre kadmiumhalt användes, och parallellt minskade utsläppen av kadmium till luft. De senaste decennierna har halterna i mark och gröda varit tämligen stabila. Detta kan förklaras av att tillförseln till åkermarken är ungefär lika stor som bortförseln genom skörd och läckage till omgivningen samt att de mängder kadmium som

¹ Jordbruksverket ingår ej i SamTox, men ingår i arbetsgruppen då kadmiumproblematiken är tätt sammankopplad med jordbruksfrågor.

finns i åkermarkens matjordsskikt är mycket stora i förhållande till den årliga tillförseln.

Åtgärder som riktas mot tillförseln av kadmium till åkermark är viktiga i ett längre tidsperspektiv. Snabbare effekter kan nås genom åtgärder som vidtas i jordbruket för att motverka upptag i grödor. Det finns ett flertal sådana åtgärder, men Arbetsgruppen för kadmiumstrategin bedömer att det behövs en uppdaterad kunskapssammanställning kring dem för att fortsätta arbetet med den svenska kadmiumstrategin. Kunskapssammanställningen ska identifiera kunskapsluckor för fortsatt forskning.

Innehåll

Sammanfattning.....	6
Summary	8
1 Identifiering av geografiska riskområden	10
1.1 Kadmium i olika jordar	10
1.2 Kartering av kadmium i grödor	12
1.3 Metoder för kartläggning av kadmium.....	13
1.4 Kunskapsluckor och tillämpningspotential	19
1.5 Faktaruta kapitel 1.....	22
2 Åtgärder för att minska kadmiumupptag i gröda.....	24
2.1 pH-värde och kalkning	24
2.2 Mullhalt och textur	27
2.3 Biokol	28
2.4 Kisel	30
2.5 Zink.....	31
2.6 Selen.....	32
2.7 Kväve.....	34
2.8 Klorid.....	36
2.9 Kunskapsluckor	37
2.10 Tillämpningspotential.....	37
2.11 Faktaruta kapitel 2.....	42
3 Fytoremediering.....	43
3.1 Salix.....	43
3.2 Kunskapsluckor	46
3.3 Tillämpningspotential.....	46
3.4 Faktaruta kapitel 3.....	47
4 Betydelsen av gröd- och sortval	48
4.1 Kadmium i våra grödor.....	48
4.2 Analysmetoder för detektion av kadmium i växtmaterial	51
4.3 Kunskapsluckor	51
4.4 Tillämpningspotential.....	52
4.5 Faktaruta kapitel 4.....	53
5 Växtförädling för utveckling av lågkadmiumsorter	54
5.1 Klassisk växtförädling.....	54
5.2 Nya metoder inom växtförädling	55
5.3 Nationell förädling för lågkadmiumsorter	58
5.4 Kunskapsluckor	60
5.5 Tillämpningspotential.....	60
5.6 Faktaruta kapitel 5.....	61
6 Slutord.....	62
Referenser	64

Sammanfattning

Kadmium (Cd) är ett skadligt ämne och att minska upptaget av det i våra grödor är prioriterat för att minska negativa effekter på folkhälsan och klara de gränsvärden för livsmedel som har satts upp inom EU.

Växters förmåga att ta upp Cd från marken och ackumulera det i de ätliga delarna skiljer sig mellan arter, men även mellan relativt närbesläktade arter och sorter inom samma gröda. Salix tar t.ex. upp förhållandevis stora mängder Cd från marken. Mängden Cd som en gröda tar upp och ackumulerar i de ätliga delarna styrs delvis av det genetiska arvet. Det finns således goda förutsättningar att kunna ta fram låg-Cd-sorter med hjälp av växtförädling. Kortsiktigt utgör indirekta urvalsmetoder såsom markörassisterad eller genomisk selektion lovande alternativ för att kunna effektivisera och påskynda förädlingsprocessen. Samtidigt skulle inkludering av Cd-halt som en egenskap för bedömning i svensk odlingsvärdeprovning (VCU) kunna leda till att fler låg-Cd-sorter kommer in på den nationella sortlistan och kan saluföras.

En grödas Cd-upptag påverkas även av miljön där faktorer såsom årsmånsvariation, odlingsåtgärder och odlingsplats har en stor inverkan. Kadmiumupptaget i grödan kan t.ex. minska genom aktiv förändring av markegenskaper eller tillförsel av olika ämnen. Ett ökat pH-värde eller mullhalt samt tillförsel av biokol är åtgärder som har potential att binda Cd i marken och därmed minska upptaget. Likaså har tillförsel av kisel och selen visat sig kunna minska upptaget p.g.a. interaktioner med Cd, men effekten varierar beroende på tillförd mängd och gröda och fler försök i större skala behövs för att utreda effekterna i fält. Tillförsel av kväve och klorid kan istället leda till ett ökat Cd-upptag. Inga riktlinjer för kvävegödsling bör dock ändras eftersom detta skulle få negativa konsekvenser på produktionen samt att effekten troligen är störst vid överoptimala givor. Mekanismer och effekten av klorid bör utredas vidare för att kunna ge underlag till eventuell avrådan från tillförsel av kloridhaltiga gödselmedel.

Salix har potential att användas för att rena mark från Cd genom s.k. fytoremediering. Osäkerhet kring metodens effektivitet under fältförhållanden samt minskat intresse för salixodling innebär att det är tveksamt om metoden kommer att användas i någon större utsträckning.

Det finns behov av mer detaljerad kartläggning av Cd-halter i åkermark och gröda för att på ett bättre sätt kunna identifiera riskområden. Ny teknik, som marksensorer och digital markkartering gör det lättare att genomföra. De första fungerande modellerna för att prediktera Cd-halt i mark har utvecklats och detaljerade kartor över Cd-halt i matjord i större delen av åkermarken i Sverige har tagits fram med hjälp av modellerna. Någon mer avancerad modell för att direkt kunna prediktera Cd-halt i grödor är ännu inte framtagen. En sådan är ganska svår att åstadkomma eftersom många faktorer i ett dynamiskt samspel bestämmer upptaget av Cd i växten. Jämförelser med analysdata över Cd-halt i

grödan och predikterad halt i mark har dock använts för att lokalisera områden i Sverige där sannolikheten är stor att halterna i grödor generellt är hög.

En åtgärd som bör prioriteras för att öka kunskapen om hur olika faktorer påverkar Cd-upptag och ackumulering i våra grödor är etablering av fleråriga försök där samma sorter odlas på olika platser och med olika odlingsåtgärder. Med sådana försök skulle man kunna identifiera lämpliga odlingsåtgärder samt låg-Cd-sorter som har stabilt låga Cd-halter under olika miljöförhållanden och på så vis kunna rekommendera sorter för odling på åkermark med låga till medelhöga Cd-halter. När det gäller odling av vete och potatis på åkermark med mycket höga halter av Cd, kommer sannolikt även framtida låg-Cd-sorter uppnå högre Cd-halter än vad som är lämpligt för livsmedel. Vete och potatis som odlats på sådan åkermark kan t.ex. användas som råvara för etanolproduktion och foder.

Summary

Agricultural measures that reduce the uptake of cadmium in edible parts of crops can be part of the work to reduce the population's exposure to cadmium via food. There has been a need for an updated compilation of knowledge on this type of agricultural measures.

This knowledge compilation has been written by researchers at the Swedish University of Agricultural Sciences and the authors are responsible for the content and conclusions in the report. The compilation of knowledge has been financed jointly by the Swedish Board Agriculture, the Swedish Chemicals Agency, the Swedish Food Agency and the Swedish Environmental Protection Agency.

Cadmium (Cd) is a harmful substance and reducing its uptake in our crops is a priority in order to reduce negative effects on public health and meet the threshold values for food that have been set within the EU.

The ability of plants to take up Cd from the soil and accumulate it in the edible parts differs between species, but also between relatively closely related species and varieties within the same crop. *Salix* takes e.g. up relatively large amounts of Cd from the soil. The amount of Cd that a crop takes up and accumulates in the edible parts is partly controlled by genetic inheritance. Thus, there is great potential to produce low-Cd varieties through plant breeding. In the short term, indirect selection methods such as marker-assisted or genomic selection are promising alternatives to be able to streamline and speed up the breeding process. At the same time, the inclusion of Cd content as a property for assessment in the Swedish Value for Cultivation and Use testing (VCU) could facilitate low-Cd varieties entering the national variety list and being able to be marketed.

The environment also affects a crop's Cd accumulation, where factors such as seasonal variation, cultivation measures and location have a large impact. The cadmium uptake in the crop can e.g. be reduced by actively changing soil properties or adding different substances. An increased pH value or humus content and the addition of biochar are measures that have the potential to increase binding Cd in the soil and thereby reduce uptake. Likewise, the supply of silicon and selenium has been shown to be able to reduce Cd uptake due to interactions with Cd, but the effect varies depending on the applied amount and crop and more trials on a larger scale are needed to investigate the effects in the field. Supply of nitrogen (N) and chloride (Cl) can instead lead to increased Cd uptake. However, no guidelines for N fertilization should be changed since this would have negative consequences on crop production and the effect on Cd is probably most pronounced at over-optimal N doses. Mechanisms and effects of Cl need further investigation to be able to provide a basis for possible recommendations for the use of chloride-containing fertilizers.

Salix has the potential to be used to remove soil Cd from the soil through so called phytoremediation. Uncertainty about the method's effectiveness under field conditions and reduced interest in salix cultivation mean that it is doubtful whether the method will be used to a greater extent.

There is a need for more detailed mapping of Cd levels in arable land and crops to better identify risk areas. New technologies, such as ground sensors and digital ground mapping make it easier to implement. The first working models for predicting Cd content in soil have been developed and detailed maps of Cd content in topsoil in most of the arable land in Sweden has been produced from the models. A more advanced model that can directly predict Cd content in crops has not yet been developed since such a model is quite difficult to achieve because many factors in a dynamic interaction determine the uptake of Cd in the plant. However, comparisons with analytical data on Cd content in the crop and predicted content in soil have been used to locate areas in Sweden where the probability is high that the content in crops is generally high.

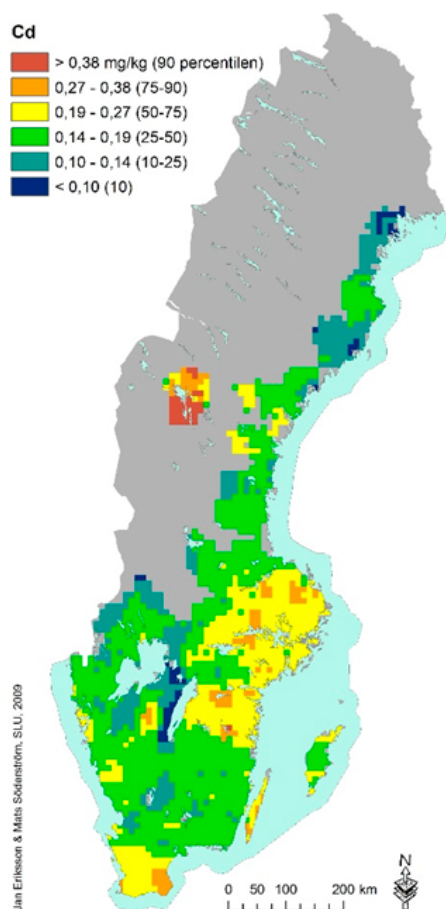
To increase knowledge on how different factors influence Cd accumulation in our crops, the establishment of multi-year trials where the same varieties are grown at different locations and with different cultivation management should be prioritized. With such trials, it would be possible to identify suitable management as well as low-Cd varieties that have stable, low Cd levels under different environmental conditions and thereby be able to recommend varieties for cultivation on arable land with low to medium Cd levels. However, when it comes to growing wheat and potatoes on arable land with very high levels of Cd, also future low-Cd varieties are likely to achieve higher Cd levels than are suitable for food. Wheat and potatoes grown on these soils can e.g. be used as raw material for ethanol or feed production.

1 Identifiering av geografiska riskområden

En översiktlig bild av den geografiska variationen i kadmiumhalt i mark och gröda finns redan från miljöövervakningsprogrammet Mark- och grödoinventeringen (Eriksson m.fl., 2010). Eftersom ett stort intag av kadmium (Cd) via maten utgör en hälsorisk fokuserar man ofta på områden med risk för höga halter i grödorna. Det är dock också intressant att identifiera områden som kan vara lämpliga för grödor som uppfyller de skärpta krav som gäller för sådant som ska användas till barnmat eller andra kvalitetscertifierade produkter.

1.1 Kadmium i olika jordar

Det som i första hand styr hur mycket Cd det finns i marken är jordmaterialets geologiska ursprung, d.v.s. vilken slags berggrund det kommer ifrån. Undantag är starkt förorenade marker kring industrier etc. Den granitiska berggrunden som dominerar i Sverige har generellt låga halter, medan mafiska (basiska) bergarter och finkorniga skiffrar kan ha högre halter (Reimann m.fl., 2003). Det är dock svårt att påvisa samband mellan halt i marken och berggrundstyp. Dels för att Cd-halten i olika bergarter inte är känd i detalj, dels för att det jordmaterial som idag täcker landet skapades vid inlandsisens avsmältning. Den tunga ismassan som rörde sig över berggrunden hade en eroderande verkan på densamma. Det bortroderade materialet har transporterats mer eller mindre långa sträckor och blandats med material från andra typer av berggrund i ismassan innan det avsattes som jordavlagringar. Detta skedde antingen när jordmaterialet smälte fram ur isen vid iskanten eller lämnade isen med avrinnande smältvatten. Tydligast koppling mellan mark och berggrund har konstaterats i några områden med påtagligt förhöjd Cd-halt i jordarna. Sådana områden med odlade moränjordar som har ett stort inslag av alunskiffer finns bland annat på Österlen i Skåne och runt Storsjön i Jämtland (Eriksson m.fl., 2010). På Österlen kan förhöjda halter i jord också kopplas till förekomst av kambrisk sandsten med inslag av Cd-rika sulfidmineral (Söderström och Eriksson, 2013). Data från miljöövervakningen på åkermark (Mark- och grödoinventeringen) visar i övrigt att Cd-halten generellt är högre än genomsnittet i områden med stort inslag av moränleror i sydvästra Skåne och i områden med stort inslag av styva leror i östra Sverige. Lägre halter än genomsnittet uppvisar åkermarken i skogs- och mellanbygder där mer grovkorniga jordar dominerar. Bortsett från områdena intill de karaktäristiska platåbergen (som innehåller alunskiffer) är halten i åkermark av okänd anledning generellt anmärkningsvärt låg i Västergötland (Eriksson m.fl., 2010) ([figur 1](#)). [Tabell 1](#) visar statistik över halter av Cd i matjord och några grödor i landet som helhet från Mark- och grödoinventeringen.



Figur 1. Karta som visar Cd-halt i åkermarkens matjord (0-20 cm) (Eriksson m.fl. 2010).

Tabell 1. Statistik över Cd halt i matjord och i kärna av höstvet, vårkorn och havre (Eriksson m. fl. 2021). Halten anges i mg/kg TS.

Variabel	Matjord	Höstvet	Vårkorn	Havre
Antal prov	2029	248	244	139
Min	0,04	0,008	<0,01	<0,01
Max	4,1	0,21	0,087	0,235
Medelvärde	0,23	0,046	0,014	0,019
Standardavvikelse	0,25	0,027	0,014	0,026
10% percentil	0,10	0,020	<0,01	<0,01
25% percentil	0,13	0,026	<0,01	<0,01
50% percentil, medianvärde	0,18	0,042	<0,01	0,012
75% percentil	0,25	0,059	0,020	0,020
90% percentil	0,37	0,079	0,031	0,042

Till den naturliga bakgrundshalten ska läggas ett tillskott av Cd från olika föroreningskällor. Andersson (1992) skattade med hjälp av olika data att Cd-halten i åkermarkens matjord ökat med i genomsnitt 33% från 1900-talets början. Den största tillförselkällan är Cd-rika fosforgödselmedel, följt av nedfall

av föroreningar från luften. Tillförseln från båda dessa källor har sedan dess minskat kraftigt, och data från miljöövervakningen visar att den genomsnittliga Cd-halten i matjorden inte förändrats nämnvärt från ungefär 1990 och framåt (Eriksson, 2021). Tilläggas bör att tillförda Cd-föroreningar inte har spridits jämt över åkermarken. Nedfall från luften har varit störst i sydvästra delen av landet och tillförseln med fosforgödselmedel förmodligen störst i slättbygder med stor andel öppen växtodling utan djurhållning.

Kartläggning av halterna av Cd och andra ämnen på lokal nivå visar på en stor variation i markens halt ända ned på fältnivå (Söderström & Eriksson, 2013). Det beror i hög grad på att landskapet ofta innehåller en mosaik av många olika typer av jordavlagringar. Detta är en följd av de komplicerade jordartsbildande processerna i samband inlandsisens avsmältning och den omlagring av jord som skedde när land steg ur havet efter istiden. Även inom enskilda fält kan det finnas flera olika slags jordavlagringar. Detta kan innebära påtagliga skillnader i Cd-halt och indirekt också påverka löslighet och upptag i växten eftersom även andra markegenskaper varierar med jordartstyp.

1.2 Kartering av kadmium i grödor

Att bestämma Cd-halten i marken ger ofta bara begränsad information om vilken halt det blir i grödorna som odlas på den. I de karteringar som gjorts i Sverige har man oftast analyserat Cd extraherbart genom uppslutning i 7M salpetersyra (HNO_3) vid högst 120 °C. Detta ger en pseudototalhalt, ett värde som ligger nära den totala halten vilket innebär att större delen av det Cd som mäts är hårt bundet och inte växttillgängligt på kort sikt. Trots detta går det att påvisa ett samband mellan Cd- HNO_3 i jord och Cd-halt i vete och andra grödor eftersom det finns en viss korrelation mellan totalhalt och lättlösligt Cd i marken. Sambandet är dock inte tillräckligt starkt för att göra det möjligt att med någon större exakthet skatta halten i en gröda på en viss plats med hjälp av markanalys. En orsak till detta är att det finns många andra faktorer som styr kadmiums löslighet och växttillgänglighet än totalhalten.

Hur stor andel som föreligger i löslig form beror på jordmaterialets bindningsgenskaper, men påverkas också av yttre faktorer. Exempelvis ökar lösligheten hos Cd generellt med sjunkande pH. Kadmiuminnehållet i växten styrs också av olika fysiologiska processer i växten som hur mycket som tas upp via roten, hur mycket som transporteras upp i växten och hur mycket som når växtens ätliga delar. Ofta är halterna högre i vegetativa delar än i frö/kärna. I rotzonen är det också ett samspel mellan rot och mark där växten ofta via utsöndrande av rotexudat och påverkan på mikroorganismer kan påverka förhållandena i rotmiljön. Det är möjligt att växten på detta sätt kan öka tillgängligheten hos Cd när den försöker mobilisera mikronäringsämnen. Det finns också skillnader mellan olika grödor i benägenhet att ta upp Cd. Exempelvis är Cd-halten i kornkärna betydligt lägre än vetekärna medan havrekärna intar en mellanposition i

upptag ([tabell 1](#)). Inom varje gröda finns ofta också en skillnad mellan sorter, se vidare [kapitel 4](#).

Kadmiumupptaget varierar också med årsmånen, d.v.s. med temperatur- och fuktighetsförhållanden och annat som under växtsäsongen påverkar både processerna i marken och i växten och samspelet dem emellan. Exempelvis undersökte Anderson & Bingfors (1985) Cd-halten i arkivprover av en och samma vetesort insamlade under 60 år och fann en spännvidd på en faktor 2 mellan år med låga och år med höga halter. Höga halter var korrelerade med hög nederbörd under växtsäsongen. Orsaken till detta samband är oklar, men det kan handla om högre deposition av Cd eller att Cd i marken blir mer mobilt när det är fuktigare under nederbördsrika år. Under nederbördsfattiga år är också växtrötterna mer aktiva djupare ned i jorden där Cd-halten är lägre vilket kan leda till ett mindre upptag (Eriksson m.fl., 1996). Årsmånsvariationen innebär att man behöver provta grödorna under flera år om man mer exakt vill få en uppfattning om t.ex. hur sannolikt det är att halterna ligger över ett kritiskt gränsvärde. Eftersom upptaget av det Cd som finns i marken påverkas både av dess löslighet och andra markegenskaper och av växtens egen dynamik är det egentligen rimligare att kartera Cd-halter direkt i grödan istället för i marken. De olika försök som hittills gjorts för att bedöma geografisk variation i hur mycket Cd grödorna kan tänkas ta upp baseras dock i hög grad på markdata. Kartering av mark med avseende på Cd utförs ofta i olika miljöövervakningsprogram och andra projekt där markens generella status i dagsläget och långsiktiga trender är i fokus. Se vidare [avsnitt 1.3](#) om metoder för kartläggning.

1.3 Metoder för kartläggning av kadmium

1.3.1 Traditionella metoder

Den traditionella metoden att kartera jordbruksmark för att bedöma dess status när det gäller innehåll av olika ämnen, pH m.m., är att ta jordprover på ett mer eller mindre systematiskt sätt och sedan analysera proverna på laboratorium. I de större karteringar av Cd som gjorts i Sverige har som nämnts oftast en pseudototalhalt bestämts. Det finns dock även metoder där man bestämmer en förmodat mer direkt växttillgänglig fraktion med ett mindre aggressivt extraktionsmedel än 7M HNO₃ som exempelvis DTPA, CaCl₂ eller NH₄Ac (Eriksson & Ledin, 1999; Jiao, 2004). Enligt vår erfarenhet är det också med sådana metoder svårt att mer exakt prediktera upptag i grödan, även om sambandet ofta blir bättre. Detta kan bero på att det inte bara är löslighet utan, som beskrivits ovan, ett komplicerat samspel mellan växt och mark samt yttre faktorer som bestämmer hur stort upptaget blir.

En annan mer traditionell metod för att prediktera upptag i grödan är att skapa statistiska modeller (regressionsanalys, principalkomponentanalys m.m.) som förutsäger halt i grödan som funktion också av andra markegenskaper (pH,

mullhalt etc.) än Cd-halt. Med hjälp av den framtagna modellen kan man sedan försöka prediktera upptag i grödor på nya platser om man har tillgång till markdata. Även med dessa metoder är det dock svårt att mer exakt prediktera upptag i grödan på en bestämd plats eftersom det är så många plats- och årsspecifika faktorer förutom markegenskaper som bestämmer hur stort upptaget blir.

I markkarteringsprojekt kan det också ingå att provta och analysera befintlig gröda på samma punkt som ett markprov tas för att få ett direkt mått på hur mycket Cd som tas upp från jorden. Få sådana mer heltäckande och detaljerade karteringar har dock genomförts eftersom det med tanke på årsmånsvariation, och att olika grödor och sorter odlas på provplatserna m.m. krävs ett stort antal prov för att få en heltäckande bild.

1.3.2 Nyare karteringsmetoder

Traditionella karteringsmetoder som inbegriper omfattande jord- och grödprovtagning samt laboratorieanalys är kostsamma. Alternativa, mindre kostsamma metoder för att göra mer detaljerad kartering som utvecklats under de senaste decennierna bygger oftast på olika typer av datamodellering.

1.3.2.1 Portabel röntgenfluorescens – PXRf

En markspektroskopisk metod som bygger på röntgenfluorescens (XRF). När ett jordprov bestrålas med röntgenstrålning byter elektroner i atomer energi-tillstånd. När atomerna återgår till sitt grundtillstånd avges ljus vars våglängd är specifik för det aktuella grundämnet. Genom att mäta mängden ljus med för det enskilda ämnet specifika våglängder kan halten av ämnet i ett prov bestämmas. XRF har sedan länge använts som metod för analys av geokemi i jord- och bergartsprov. På 1970-talet lanserades PXRf-instrument d.v.s. en bärbar (portabel) XRF-apparat som kan användas för mätningar i fält. Den är praktisk att använda för kartering av mark starkt förorenad av kadmium och andra grundämnen.

Möjligheten att använda PXRf för snabb och billig detaljkartering av Cd i åkermark har undersökts av Söderström & Stadig (2015), Laxmar (2018) och Adler m.fl. (2020). Detektionsgränsen för Cd är dock för hög för att det ska gå att mäta de jämförelsevis låga halter som normalt förekommer i åkermark. Kadmiumhalten i ett jordprov är dock ofta korrelerad till halten av andra grundämnen som förekommer i mätbara halter i samma prov. Laxmar (2018) använde multipel linjär regressionsanalys för att ta fram sambandet mellan Cd-halt från laboratorieanalys som funktion av halterna av barium (Ba), kalcium (Ca), krom (Cr), järn (Fe), mangan (Mn), kalium (K), rubidium (Rb), strontium (Sr), titan (Ti), vanadin (V), zink (Zn) och zirkonium (Zr) uppmätt med PXRf från samma jordprov; de ämnen som i detta fall gav mätbara halter. Prov och analysdata från matjord och vetekärna, dels från 141 provplatser i Götaland och Svealand från Mark- och grödoinventeringen (Eriksson, 2021), dels från 20 provplatser

utlagda på varsitt enskilt fält på två gårdar i Skåne användes i undersökningen. Det ena fältet hade generellt högre Cd-halt och det andra lägre.

PXRF-analysvärdena kunde i regressionsmodeller framtagna med hjälp av det nationella materialet förklara 86 % ($R^2=0,86$) av variationen i uppmätt Cd-halt i matjordsprov och 43 % av variationen i uppmätt Cd-halt i höstvetekärna. De variabler i PXRF-mätningen som framförallt förklarade variationen i Cd-halt var Zn och V. Resultat från så kallad korsvalidering av modellen för matjord gav som väntat lite lägre R^2 -värden. I korsvalidering testas hur bra regressionsmodellen kan förutsäga Cd-halten i andra prov än dem som använts för att utveckla modellen. För halt i jordproverna var medelfelet 0,09 mg/kg för regressionsmodellen och 0,11 och 0,13 mg/kg vid korsvalideringen. Detta kan jämföras med medelhalten av Cd som var 0,24 mg/kg. För kärna var medelfelet 0,02 mg/kg. Tyvärr redovisas inte uppgift om medelhalt i kärna i det använda materialet, men medelfelet är av samma storleksordning som det i jordproverna.

Regressionsmodellerna för Cd-halt i matjord framtagna för de två enskilda fälten i Skåne hade R^2 -värden i nivå med dem i det nationella materialet. För kärna gav modellen framtagen för fältet med generellt hög Cd-halt ett så högt R^2 -värde som 0,80 medan det för det andra fältet var 0,25. Regressionsmodellen baserad på det nationella materialet kunde också skatta Cd-halten i proverna från de två fälten i Skåne. Detta antyder att en modell utvecklad från data från ett geografiskt område kan användas för prediktion i ett annat område med annorlunda förutsättningar.

Adler m.fl. (2020) utvecklade modeller för skattning av halt av Cd, Cu och Zn i matjord utifrån PXRF-mätning på ett större material av samma typ som det Laxmar (2018) använt. I detta fall användes och jämfördes tre modeller, dels multipel regression, dels mer avancerade modeller ("random forest" och "multivariate adaptive regression splines") baserade på så kallade maskinlärningsalgoritmer (se avsnitt om digital markkartering nedan). Materialet omfattande jord- och analysdata från 1833 provplatser i åkermarksinventeringen (Eriksson, 2021) och sammanlagt 179 provplatser utlagda på olika fält runt nio gårdar utvalda för att representera olika Cd-haltnivåer och geologi. Med några få undantag var det samma ämnen som i Laxmars undersökning som konsekvent uppvisade halter mätbara med PXRF. Två icke-linjära modeller skattade Cd-halt bäst. Precisionen i prediktionen var dock lägre vid höga koncentrationer än vid låga.

Adlers m.fl. (2020) validering på gårdsnivå med nationell modell gav bättre statistiska mått än validering av densamma på nationell nivå, trots att tre gårdars värden var svåra att prediktera. Medelfelet i avvikelserna mellan uppmätta och predikterade värden (MAE) var dock hälften av motsvarande värden för den nationella nivån. Resultaten från båda dessa undersökningar visar att det finns ett tydligt mönster i hur Cd i marken korrelerar med de grundämnen som kan mätas med PXRF, framförallt med Zn och V. Det innebär att det går att snabbt och till relativt låg kostnad med god precision skatta Cd-halten

i jord med mätning av andra grundämnen med PXRF. Laxmar fann också ett samband mellan Cd-halt i kärna och halt av grundämnen mätta med PXRF på den jord som vetet odlats på. Adler m.fl. (2020) undersökte inte kopplingen vetekärna - mark.

I både Laxmar (2018) och Adler m.fl. (2020) är höga R^2 -värden och andra motsvarande mått troligen i hög grad betingade av att Cd-halterna är snedfördelade med ett stort kluster av observationer kring medianvärdet i den nedre delen av haltintervallet och en svans med några få höga halter. De höga haltvärdena tenderar att ge höga R^2 -värden när predikterad och analyserad Cd-halt plottas mot varandra. Adler m.fl. (2020) uppmärksammade detta och validerade också sina modeller enbart mot Cd-haltintervallet 0-0,5 mg/kg inom vilket de flesta observationerna låg, vilket halverade R^2 -värden och medelfel. Detta innebär att de framtagna PXRF-modellerna kan prediktera Cd-haltens storleksordning på en enskild plats, men de ger inte ett exakt värde. Säkerheten i prediktionen är dock tillräckligt stor för att PXRF-genererade data ska kunna användas i kartering. Detta har gjorts i Adler m.fl.(2023), se vidare avsnittet om digital markkartering nedan.

1.3.2.2 Digital markkartering

Utveckling av metodik, datorkapacitet och ökad tillgång på rumsliga (spatiala) data som täcker stora områden med hög upplösning har under de senaste decennierna gjort att digital markkartering (digital soil mapping, DSM) alltmer börjat utvecklas och användas inom exempelvis precisionsodling. Några nyligen genomförda forskningsprojekt har visat att denna teknik också kan vara användbar för att detaljkartera jordbruksmarken med avseende på Cd-halt och bedöma var det finns förutsättningar för att producera grödor med lågt Cd-innehåll och var det är stor risk för oönskat höga halter.

Digital markkartering går ut på att utveckla matematiska eller statistiska modeller för att prediktera markegenskaper, t.ex. Cd-halt, utifrån rumsligt relaterade data över sådant som kan tänkas vara korrelerat med markens Cd-halt. De direkta markegenskaperna och andra omgivningsfaktorer som kan användas för att prediktera Cd-halt eller annat "målvärde" kallas hjälpvariabler (environmental covariates). För att kunna användas som hjälpvariabel ska det finnas ett tillräckligt detaljerat dataunderlag (i form av ett kartlager) för den aktuella variabeln som täcker hela det område där markens Cd-halt ska predikteras. Det behöver inte finnas ett orsakssamband där Cd-halten styrs av en hjälpvariabel utan det räcker att det finns en samvariation mellan dem. Samvariationen kan bero på att Cd och den korrelerade faktorn påverkas på samma sätt av en tredje faktor. Exempelvis har man funnit att Cd-halt i marken ofta är korrelerad till halt av uran-238 (Söderström & Eriksson, 2013). Det beror på att båda ämnena i de geologiska processerna anrikats i alunskiffer och att förekomst av detta i jordmaterialet ofta leder till förhöjd halt av båda. Eftersom uran-238 är radioaktivt kan dess förekomst enkelt kartläggas med hjälp av spektrometriska flygmätningar av markens naturliga gammastrålning. Data

med hög rumslig upplösning över förekomst av uran-238 och andra radioaktiva isotoper i marken finns tillgängliga hos SGU.

Söderström & Eriksson (2013) använde metodik som kan sägas vara en enklare variant av DSM för att försöka identifiera områden med stor risk för hög Cd-halt i mark och gröda på Österlen i Skåne. Bakgrunden var att ofta förekommande hög halt förorsakade problem med kvalitetssäkring med avseende på Cd i Sigillcertifierad odling. Ingen maskininlärningsmetod användes men en modell baserad på den typ av hjälpvariabler som används i DSM togs fram. En regional riskkarta skapades i vilken åkermarken kunde delas in i riskklasser. Kadmiumhalten i vete odlat i området visade relativt stor spridning inom riskklasserna, men det var ändå signifikanta skillnader mellan dem. Den intressantaste upptäckten i detta projekt var hur användbar flygmätning av markens gammastrålning var för att prediktera Cd-halt i mark och för att finna mark med extremt hög halt. Metoden fungerar väl när den höga Cd-halten är kopplad till förekomst av alunskifferfragment i jorden, men om en kraftigt förhöjd Cd-halt har annat ursprung, kan andra hjälpvariabler vara mer användbara.

Adler m.fl. (2023) använde digital markkarteringsmetodik för att ta fram en detaljerad Cd-karta över Skåne för att försöka identifiera områden med låga Cd-halter i marken lämpliga för odling av vete som uppfyller de stränga kraven för användning i barnmatsproduktion. Vid framtagningen av den digitala Cd-kartan över Skåne användes följande hjälpvariabler: data från flygmätningar av gammastrålning från uran-238, thorium-232 och kalium-40; höjd över havet, sluttningstopografi, fuktighetsindex härledda från data i Lantmäteriets markhöjdmodell; SGU:s biogeokemiska data d.v.s. halter av olika grundämnen i bäckvattenväxter.

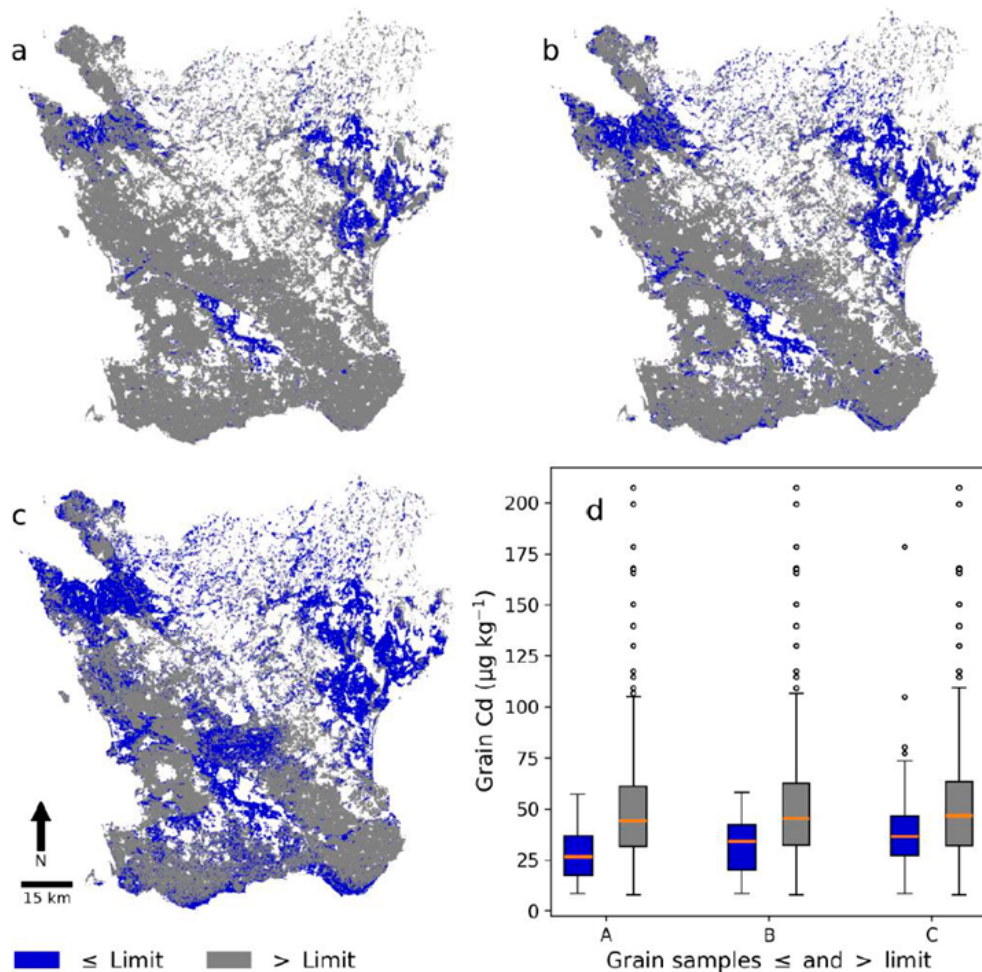
Den använda DSM-modellen baseras på maskininlärningsalgoritmen "gradient boosting regression". För att kalibrera modellen användes befintliga data från laboratorieanalys från Mark- och grödoinventeringen som utökats med Cd-halter i prov från de av Jordbruksverket insamlade matjordsproverna i den s.k. Nationella jordartskarteringen (Jordbruksverket, 2015). På prover från den Nationella jordartskarteringen bestämdes Cd-halten med PXRf-metodik enligt Adler m.fl. (2020) eftersom ingen Cd-analys gjorts. För (kors)validering av modellen användes bara laboratorieanalysdata från Mark- och grödoinventeringen. Modellen hade ett E-värde (jämförbart med R^2 -värde) på 0,69 och ett medelfel på 0,11 mg/kg vid validering. I intervallet 0-0,5 mg/kg var modellens medelfel 0,07 mg/kg. Modellen predikterade något högre halter än de bestämda med laboratorieanalys vid halter lägre än 0,4 mg/kg och lägre halter än de från analys vid halter högre än 1,0 mg/kg. De för modellen viktigaste hjälpvariablerna var gammastrålningsdata och biogeokemiska data.

Med hjälp av den framtagna modellen gjordes dels en karta över Cd i åkermark i Skåne, dels en motsvarande karta som visar bredden på det intervall inom vilket det predikterade värdet med 90 % säkerhet ligger. För att testa i vilken mån låg Cd-halt i marken också medförde lägre Cd-halt i höstveten användes data från

Mark- och grödoinventeringen över Cd-halt i höstveten från 317 platser. Första steget var att ta fram kartor som visade var predikterad Cd-halt i marken låg över eller under ett visst värde (figur 2a-c). Utifrån dessa kartor delades analyserna av Cd-halt i vetekärna upp i två grupper, de som kom från låg-Cd-områden och de som kom från hög-Cd-områden. Jämförelse av grupperna visade att Cd-halterna i vetekärna generellt var lägre i låg-Cd-områden än i hög-Cd-områden och att de riktigt höga halterna (svansen uppåt i de också i detta fall skeva fördelningarna av mätvärdena) alltid härrör från hög-Cd-områden (figur 2d). Spridningen inom de jämförda grupperna och överlappningen mellan dem var stor. Data presenteras inte så att det går att utläsa exakt, men redovisade data antyder att det mesta av det vete som odlas i de 20 % av jordbruksmarken som har lägst predikterad mark-Cd-halt kan uppfylla det nuvarande kravet på högst 0,040 mg Cd/kg i spannmålskärna avsedd för barnmatsproduktion.

Adler och Söderström (2023) har byggt vidare på konceptet i Adler m.fl. (2023) och gjort en kartläggning som täcker åkermarkens matjordar (ej mulljordar) i Sveriges jordbruksbygder från Skåne till och med större delen av Hälsingland. Liksom i Adler m.fl. (2023) predikterades markens Cd-halt i ett 50 × 50 m raster, dock med den skillnaden att i prediktionerna för varje enskild plats (pixel) var sannolikheten för att en rad tröskelvärden underskreds (från 10:e till 90:e percentilen i hela datasetet). Författarna menar att metoden ger en mer realistisk bild än en vanlig kartbild eftersom osäkerheter delvis blir inkorporerade i de värden som presenteras. Med en sådan modell går det att ta fram en rad olika kartprodukter för olika ändamål, men tolkningen av vad sannolikhetsvärdena betyder t.ex. i form av koppling till halter i gröda måste utvärderas vidare.

Jämförelser med data över Cd-halt i kärna av höstveten, vårkorn och havre från Mark- och grödoinventeringen indikerade att predikterade kadmiumhalter i matjord på ett övergripande plan kan användas för att lokalisera områden där sannolikheten är stor för att halterna i grödor generellt är låga. Höga Cd-halter i kärna var ovanliga i områden som klassats som låg-Cd-områden baserat på predikterad halt i marken. Modellen kalibrerades för att kartlägga matjordens Cd-halt i hela det aktuella området, men författarna pekar på möjligheten att öka säkerheten genom att göra regionala kalibreringar.



Figur 2 (a–c). Områden i den digitala markkartan med Cd-halt lägre än (blått) respektive högre än (grått) tre olika riktvärden samt (d) box-and-whisker-diagram som visar Cd-halt i höstvet i de avgränsade områdena. De valda riktvärdena var 0,196, 0,215 respektive 0,240 mg/kg, vilket motsvarar 30, 40, respektive 50 %-percentilerna i de värden från laboratorieanalys som använts för validering av modellen. Antalet redovisade kärnprover är 307. Prickar är avvikare, den orange linjen medianen, boxen värden mellan 25- och 75 %-percentilerna och "pinnarna" är percentilerna multiplicerade med 1,5. Adler m.fl. (2023).

1.4 Kunskapsluckor och tillämpningspotential

1.4.1 Portabel röntgenfluorescens-PXRF

Eftersom mätapparaten är bärbar (Portable XRF) är tanken att man ska kunna utföra mätningar direkt på plats i fält. Detta är dock inte helt enkelt, dels tar mätningen i varje punkt några minuter, dels är metoden känslig för variation i vattenhalt. Så det är ofta säkrare att ta jordprover, torka och finfördela dem och sedan mäta inomhus med apparaten monterad i en ställning. Detta gör att det troligen inte blir någon större vinst i provtagningssteget jämfört med mer traditionell provtagning av jordprov för analys. Däremot blir själva analyssteget enklare och billigare än att skicka in prover till ett laboratorium för Cd-analys.

Söderström och Stadig (2015) gjorde jämförelser mellan uppmätta PXRF-data på jordprover – dels (i) utförda direkt i fält, och dels på insamlade jordprover, både (ii) före och (iii) efter torkning. Det visade sig vara vanligare att PXRF-värden från otorkade (ii) prover i laboratorium hamnade under detektionsgränsen än dem från mätningar utförda i fält (i) (20 % fler värden under detektionsgränsen). Vid mätning i fält rekommenderas minst tre, men gärna upp till fem delmätningar (för att få fram ett representativt mätmedelvärde). Jordvolymen vid en PXRF-mätning är mycket liten; penetrationen är endast några millimeter och mätarean kan vara ca 1 cm² (beroende på instrument). Mätning i fält fungerar bäst om jorden är plöjd, harvad och torr (vattenhalt < 20 %). Olika PXRF-instrument kan ha olika specifikation, och därför kan troligen en kalibreringsmodell framtagen med en instrumenttyp skilja sig något åt från en annan. Mätningar med PXRF direkt i fält har visat sig ge användbara mätvärden i olika undersökningar av olika markegenskaper (inklusive tungmetaller), t.ex. Piikki m.fl. (2016) och Söderström m.fl. (2016).

Kanske lämpar sig metoden bäst för mätning på jordprover som samlats in och torkats av annat skäl som t.ex. för markkartering. Det kan handla om att man vill ha överblick över situationen när det gäller Cd på en plats eller att som Adler m.fl. (2023) gjorde, använda data framtagna med PXRF-mätningar vid utveckling av modeller för prediktion av Cd i marken. Denna metod har samma problem som andra markkarteringsmetoder, nämligen att det är svårt att prediktera halt i grödan utifrån dessa mätningar. Vi bedömer att metoden är användbar för förenklad och detaljerad kartering på fältnivå, men att det ändå kanske inte är troligt att den får mer än marginell betydelse.

1.4.2 Digital markkartering

Eftersom vi inte själva handgripligen jobbat med utveckling av DSM-modeller för prediktion av Cd eller andra ämnen har vi svårt att med någon exakthet identifiera några kunskapsluckor. DSM-metodiken innebär ett framsteg när det gäller kartering av Cd-halt i marken, men har det gemensamt med andra karteringsmetoder som här beskrivits att det är svårt att prediktera halt i gröda. DSM är dock under snabb utveckling så vad som är möjligt i framtiden är svårt att sja om.

Fördelen med denna metodik är att man i bästa fall kan få fram en stor mängd data med stor rumslig upplösning utan intensiv och kostsam provtagning och analys. Tillgång till en viss mängd analysdata krävs dock som sagt för att först kalibrera och i ett senare skede verifiera de modeller som utvecklas. Framtagna data kan användas för att göra traditionella kartor som översiktligt visar Cd-halt i åkermarken i hela landet, en region eller på ett enskilt fält eller i någon skala däremellan. Det går också att göra speciella kartor (sannolikhetskalkyler) som kan lyfta fram var inom ett visst område det är stor risk för att halten kan bli oacceptabelt hög i matgrödor eller omvänt var chansen är stor att halten är så låg att de strängare gränsvärdena för barnmat och riktvärden för

premiumprodukter uppnås. Det går också att med kartor illustrera hur säker prediktionen är i olika pixlar eller delområden på kartan.

Även om DSM som visats av Adler m.fl. (2023) fungerar för ganska säker prediktion av Cd-halt i marken kan metoden möjligen begränsas av att det krävs stora dataset med koordinatsatta data (hjälpvariabler) som täcker det område som ska kartläggas. Sådana data finns som beskrivits tidigare i huvudsak tillgängliga för variabler som vid första påseende inte tycks ha någon uppenbar koppling till eller påverkan på markens Cd-halt. Rimligen är kopplingen mellan Cd och andra ämnen i marken och olika markegenskaper starkare, det visar det faktum att det med PXRF går att indirekt bestämma Cd-halten i marken med hjälp av mätvärden på andra ämnen som föreligger i, med denna apparat, mätbara halter. Det finns dock relativt få dataset över markegenskaper med hög upplösning och säkra koordinater att tillgå. Ett dataset som i princip uppfyller dessa krav är den markgeokemiska kartering som utförs av SGU. Den är dock i hög grad inriktad på grovkorniga moräner som inte odlas i någon högre grad och prov tas på 0,6 – 1 m djup. De prov som tas på för åkermarken mer relevant mark (finkorniga sedimentjordar) är för få.

Att få fram mer användbara dataset genom att samla in prov från åkermark och analysera en massa markvariabler är förstås knappast aktuellt av kostnadsskäl och om man mäter Cd på sådana prov blir ju kartering med DSM överflödigt. Det behövs en enklare och mindre arbetskrävande metod för att få fram information om markegenskaper. Mätning av gammastrålning är ett bra exempel på en sådan metod. Den ger data över markegenskaper som dessutom, vilket Söderström och Eriksson (2013) och Adler m.fl. (2023) visat, är starkt korrelerade till Cd-innehåll.

Med markkartering kommer man långt, men det skulle vara idealt om man kan utveckla DSM-modeller med vilken man mer direkt kan förutsäga Cd-upptag i gröda med god precision. Sådana modeller direkt riktade mot prediktion av Cd-halt i spannmålskärna har ännu inte utvecklats i någon nämnvärd utsträckning. I de svenska studierna är huvudorsaken alltför små och ofullständiga kalibreringsdataset (för få laboratorieanalyser av halter i kärna, och man saknar oftast viktig information, t.ex. om vilken sort som odlats. Särskilt om ambitionen är att göra en direkt prediktionsmodell för halter i spannmålskärna som täcker hela Sverige, krävs dels ett stort kalibreringsdataset (sannolikt minst några tusen prover), och relevanta hjälpvariabler av hög kvalitet. Man kan tänka sig att lokala och möjligen regionala modeller kan vara enklare att ta fram, och dessutom kan det vara en fördel om man kan förbättra en prediktionsmodell genom att lägga till lokala data. Sådana data kanske saknas eller är svåra att få fram som heltäckande hjälpvariabler.

En faktor att ta med i beräkningen när det gäller Cd-halt i kärna är att även om det finns en osäkerhet i en predikerad halt i en viss pixel så har det kanske inte så stor betydelse eftersom ett spannmålsparti från en viss del av ett fält slås ihop med andra partier, redan på den enskilda gården och även i kvarnarna. Så det

kanske räcker att utveckla DSM-metodik som med god säkerhet kan prediktera hur den samlade leveransen från enskilda fält, gårdar eller avgränsat odlingsområde förhåller sig till olika kvalitetskriterier när det gäller Cd-innehåll. Det bör dock påpekas att det enligt Livsmedelslagstiftningen inte är tillåtet att medvetet späda ut ett spannmålsparti med en halt som överstiger gränsvärdet genom att blanda det med ett parti med lägre halt.

Sammanfattningsvis tror vi att DSM har potential att kunna bli ett värdefullt instrument när det gäller att kartera markens Cd-halt både i stor och i liten skala. Metodiken utvecklas snabbt och det är ännu få fall där man specifikt försökt utveckla modeller för kartläggning av Cd. Det bör gå att producera användbart material för att identifiera områden med stor areal åkermark där risken för hög Cd-halt i kritiska grödor är hög lika väl som områden lämplig för produktion av produkter med stränga krav på högsta tillåtna halt. Sådant material kan användas både av dem som ska hantera frågan på övergripande nivå och i rådgivning direkt till lantbrukare. Vår erfarenhet är att frågan inte riktigt har tagits vidare av olika instanser när det kommit fram nya underlag, något som är angeläget för att driva arbetet framåt.

1.5 Faktaruta kapitel 1

Faktaruta om identifiering av geografiska riskområden

Kunskapsläge

- Stor variabilitet i markförhållanden som påverkar markens kadmium (Cd)-halt och grödornas innehåll av Cd innebär ett behov av noggrannare och mer detaljerad kartläggning för att bättre kunna identifiera riskområden.
- Nya digitala karteringsmetoder möjliggör sådan kartläggning till en betydligt lägre kostnad jämfört med den för traditionell markkartering med jordprovtagning och laboratorieanalys. Några sådana kartläggningar har under den senaste tiden genomförts i Sverige.
- PXRF (Portable X-ray fluorescence) kan användas för att prediktera Cd-halt i jordprov. Kadmiumhalten i åkermark är normalt för låg för direktmätning, men med hjälp halten av andra ämnen vars halt samvarierar med Cd-halt kan den senare skattas med en enkel modell.
- I digital markkartering (DSM) utvecklas modeller med vilka Cd-halten i marken kan predikteras med hjälp av korrelerade faktorer för vilka det finns rumsliga data som täcker stora områden. Det kan handla både om markegenskaper och om andra omgivningsfaktorer.
- Med DSM kan kartor som visar Cd-halt i mark och hur säker prediktionen är (konfidensintervall) produceras.
- Någon riktigt användbar modell för att direkt prediktera Cd-halt i grödor är inte framtagen. Jämförelser med analysdata över Cd-halt i grödan och predikerad halt i mark kan dock användas för att lokalisera områden där sannolikheten är stor för att halterna i grödor generellt är låg.

Kunskapsluckor

- Få modeller för att specifikt prediktera Cd är ännu utvecklade, men digital markkartering är en relativt ny metodik under snabb utveckling och ny kunskap produceras fortlöpande.
- Modeller som direkt kan prediktera Cd-halt i grödor är en utmaning på grund av den stora mängden faktorer som bestämmer upptag av Cd i växten.

Tillämpningspotential

- DSM är användbar metodik för att snabbt och billigt ta fram underlag som med hög upplösning kan prediktera Cd-halt i marken och förhoppningsvis i framtiden också direkt i grödor.
- Data/kartor framtagna med DSM kan användas som underlag för bedömning av på vilken nivå Cd-halten i grödor kan förväntas ligga från regional nivå ned till enskilda fält på en gård.

2 Åtgärder för att minska kadmiumupptag i gröda

Växters upptag av Cd sker från marklösningen i form av tvåvärda katjoner (Cd^{2+}). Trots att Cd inte är ett essentiellt (nödvändigt) ämne för växterna så tas ämnet ändå upp effektivt av rötterna och det finns ett tydligt samband mellan Cd-halten i marklösningen och Cd-upptaget i växten. Det finns olika mekanismer som styr hur stor andel av den totala mängden Cd i marken som föreligger i en för växterna tillgänglig form. De mest betydelsefulla i svenska jordar är adsorption till markpartiklar samt komplexbildning och interaktion med andra ämnen i marken.

Olika markegenskaper samt förekomst eller tillförsel av andra ämnen kan påverka dessa mekanismer och därmed hur stort upptaget i växten blir. I detta kapitel redogörs för markegenskaper och odlingsåtgärder som kan påverka upptaget av Cd från marken samt vilken potential det finns att använda dessa som ett sätt att minska innehållet av Cd i våra grödor, med fokus på vete och potatis. Studerade faktorer, deras verkningsmekanismer och effekt på Cd-upptag finns sammanfattat i [tabell 2](#).

Tabell 2. De i denna rapport utvärderade faktorer som har potentiell effekt på Cd-upptag i grödor, deras verkningsmekanismer och effekt i grödan.

Faktor	Verkningsmekanism	Effekt
pH-värde	Adsorption – negativ korrelation till åtminstone pH 7	Minskat upptag vid ökat pH-värde
Mullhalt	Adsorption – negativ korrelation på mineraljordar	Minskat upptag vid ökad mullhalt, men relativt svag och varierande
Biokol	Adsorption – positiv interaktion beroende av tillförd mängd och ursprungligt substrat	Variérande beroende på mängd, typ av produkt och jord
Kisel	Oklart – förmodligen i huvudsak komplexbildning/interaktion i växten som minskar transport från rot till skott	Oklar. Potential finns, men mer kunskap behövs
Zink	Konkurrens vid upptag i växten	Troligen begränsad under svenska förhållanden
Selen	Oklart, men möjligen bildande av svårösliga komplex (CdSe)	Oklar. Potential, men mer kunskap behövs
Kväve	Ökad jonkoncentration; Effekt på pH-värde (indirekt effekt)	Ökat upptag vid intensiv N-gödsling. Undvik överoptimala givor
Klorid	Troligen bildande av lättlösliga komplex (CdCl^+) som kan tas upp av grödan	Potentiellt ökat upptag vid stor giva av kloridhaltiga gödselmedel

2.1 pH-värde och kalkning

Markens pH-värde är en mycket viktig faktor som påverkar Cd-halt i marklösningen och därmed dess tillgänglighet och upptag i grödan. I sura till neutrala jordar som dominerar i Sverige är adsorption till organiskt material och seskvioxider viktigast för att reglera löslighet. I basiska jordar i nederbördsfattiga klimat kan istället utfällning i form av karbonater eller fosfater

ske. Adsorptionen ökar med stigande pH vilket främst beror på att det ökar antalet negativa laddningar på lermineral och humuspartiklar som kan binda katjoner som t.ex. Cd. Den typ av adsorption som har störst påverkan på ämnets tillgänglighet är den specifika adsorptionen som sker genom bildandet av ytkomplex med hydroxyl- och karboxylgrupper på humuspartiklar samt med hydroxylgrupper på järn- eller aluminiumoxider. När pH-värdet höjs tappas dessa grupper successivt en vätejon, blir negativt laddade och kan bilda komplex med positiva joner som då binds till markpartiklarna. Inom det pH-intervall som åkerjordarna oftast befinner sig i, pH 4-8, ökar adsorptionen ofta påtagligt när pH-värdet höjs. Även de Cd-joner som adsorberas till markpartiklar genom elektrostatisk laddning, s.k. utbytbara joner, påverkas av pH-värdet eftersom ett höjt pH-värde skapar fler negativa laddningar på ytorna och en större andel av Cd-jonerna adsorberas mot partiklarna. Vid denna typ av adsorption finns det dock en jämvikt med de joner som finns i marklösningen, vilket innebär att när grödan tar upp Cd så kommer jämvikten förskjutas och fler joner kommer då att frigöras ut till marklösningen och bli tillgängligt för upptag. Vid mycket låga pH-värden kan också ökad halt av fritt aluminium (Al^{3+}) leda till en ökad konkurrens med Cd om bindningsytorna och därmed leda till en ökad Cd-halt i marklösningen.

Ett flertal studier, både i Sverige (Eriksson, 1989; Öborn, 1995; Eriksson & Söderström, 1996; Jansson, 2002) och internationellt (bl.a. Maier m.fl., 1997; Adams m.fl., 2004; He m.fl., 2021) har undersökt hur pH-värdet inverkar på löslighet och upptag av Cd. Många av dessa har dock mer specifikt studerat vad som händer vid kalkning. Det är inte alltid som Cd-upptaget blir detsamma kort efter en kalkning som från en jord som har ett naturligt högt pH-värde eller efter att ha stabiliserat sig efter en tidigare kalkning. Orsaken kan vara att kalkningen i sig kan ha andra effekter än att enbart höja pH-värdet, t.ex. att jonbalansen i marken påverkas vid tillförelse av kalcium-(Ca)-joner som finns i kalken. I vissa studier har man ändå försökt utreda effekten av pH-värdet i sig genom att jämföra Cd-upptaget från olika jordar utan föregående kalkning. Här har man kunnat se ett negativt samband mellan pH-värde och Cd-upptag, d.v.s. att upptaget sjunker när pH-värdet ökar. Dessa resultat har rapporterats för potatis, morötter, spannmål och ris (Öborn m.fl., 1995; Adams m.fl., 2004; Eriksson m.fl., 2010; Zhu m.fl., 2016). Studien av Öborn m.fl. visade att pH-värdet i matjord och alv tillsammans med mullhalten hade en signifikant påverkan på Cd-halten i potatis och morötter och kunde förklara 26 respektive 68 % av variationen i grödornas Cd-innehåll. Även vårvede analyserades, men där fanns endast ett signifikant samband med Cd-halt i halmen, inte i vetekärna. Det fanns alltså en mycket tydlig effekt av pH-värdet i morötter och delvis också i potatis, men inte i vetekärna.

Vidare visar resultat från Mark- och grödoinventeringen, där ett stort antal parvisa jord- och grödprover undersökts, ett samband mellan pH-värde i marken och Cd-halt i höstvede- och havrekärna (Eriksson m.fl., 2010). Även Adams m.fl. (2004) kunde visa ett tydligt samband mellan Cd-halt i höstvede och pH-värdet i marken, både vid parvisa jord- och grödanalys och från långliggande försök.

I en multipel regressionsanalys med ett flertal inkluderade markfaktorer så var det endast total Cd-halt i marken och pH-värdet som visade på ett signifikant samband med Cd-halt i vetekärna. I pH-intervallet 5,2-8,3 förklarade dessa två variabler tillsammans 53 % av variationen i Cd-halt i kärna av höstvetete. För korn var sambandet också signifikant, men betydligt svagare. Det bör påpekas att i denna typ av studier har inte sambandet mellan pH-värde och Cd-upptag undersökts systematiskt där alla andra faktorer hålls konstanta, som lättare görs i t.ex. ett fältförsök. Resultaten tyder ändå på att pH-värdet i sig var en bidragande orsak till skillnaderna i upptag.

Vidare finns det ett flertal fält- och krukförsök där man har påverkat jordens pH-värde genom kalkning och ibland surgörning där liknande effekter av påvisats, d.v.s. att ett höjt pH-värde minskar upptaget i grödan (bl.a. Eriksson, 1989; Tlustos, 2006; He m.fl., 2021). Hes m.fl. undersökning utfördes som en meta-studie där jord- och gröddata från ett stort antal försök utvärderades och visade sammantaget att kalkning och därmed ett höjt pH-värde minskade Cd-upptaget. Effekten var störst i ris, men även tydlig i andra grödor. Att effekten av pH-värde är olika stor i olika grödor kan också observeras i andra studier. Bland spannmålsslagen har det visat sig att havre påverkas kraftigare än höstvetete, men där höstvetete i sin tur har visats ha en starkare korrelation med pH-värdet än vårkorn (Eriksson, 1989; Eriksson m.fl., 2010). Fältstudier av pH-värdets effekt i potatis är väldigt begränsade till antal, men en svensk studie där flera grödor utvärderats på likvärdigt sätt visar att pH-värdet verkar ha större betydelse i potatis än i spannmål (Öborn m.fl., 1995).

Kadmiumhalten i jorden och jordarten verkar också ha betydelse för hur stor inverkan en pH-förändring har på upptaget i grödor. Eriksson (1989) visade att minskningen blir kraftigare vid ett ökat pH-värde (från pH 5 till 7) när Cd-halten från början är hög. Vid mycket låga halter var effekten väldigt liten och ibland till och med omvänd. Effekten verkar också vara större på sandiga jordar än på lerjordar, vilket kan bero på en lägre total bindningskapacitet i sandjordar (Eriksson, 1988; 1989). Det finns även indikationer att effekten avtar när pH-värdet närmar sig neutrala värden vilket kan ses t.ex. i Adams m.fl. (2004). Även analyser från Mark- och grödoinventeringen indikerade att effekten av pH-värdet var större mellan pH 5 och 6 än mellan 6 och 7. I en fältstudie av Eriksson & Söderström (1996) fanns inget signifikant samband mellan pH-värdet och Cd-halten i höstvetekärna i kalkhaltiga jordar med högt pH-värde (pH >7).

Som nämnts ovan så leder kalkning förutom till en pH-ökning också till en tillförsel av Ca-joner. Eftersom även Ca är en katjon så skulle detta potentiellt kunna öka konkurrensen om bindningsplatser på markpartiklarna och därmed istället öka andelen Cd i marklösningen och därmed växtens upptag (Sparrow, 1993). Detta har dock främst noterats då den ursprungliga Cd-halten i grödan varit mycket låg och där en något ökad halt efter kalkning därför inte skulle utgöra något direkt problem (Eriksson, 1989; Sparrow, 1993; Jansson, 2002). I undantagsfall har dock ökade halter efter kalkning uppmätts i potatis även när Cd-halterna legat på en hög nivå (McLaughlin, 1994; Jansson, 2002;

Larsson Jönsson m.fl., 2010). Dessa avvikande resultat kan troligen förklaras med att grödan i det ena fallet (McLaughlin, 1994) odlades i en jord med hög salthalt (kloridhalt) och i det andra (Jönsson Larsson m.fl., 2010) i näringslösning och inte i jord. Inget av dessa förhållanden är representativa för odling på svensk åkermark och bör inte ges någon större tyngd i den sammantagna utvärderingen. I Janssons (2002) studie berodde troligen den ökade Cd-halten i grödan på en lägre skörd orsakat av Mn-brist.

Eftersom kalkningsmedel innehåller en viss mängd Cd så innebär kalkning en tillförsel av Cd till marken. På lång sikt skulle därför en omfattande kalkning kunna innebära en höjning av den totala halten i marken. Den genomsnittliga Cd-tillförseln via kalk är dock relativt begränsad och innebär en haltökning på mindre än 0,01 % per år räknat på en jord med medelhög Cd-halt och genomsnittlig tillförsel. Data visar också att tillförseln av Cd via mineralgödsel och deposition är betydligt större än tillförseln via kalk (Andersson, 1992; Knutson, 2012; McLaughlin m.fl., 2021). Det bör dock påpekas att Cd-halten hos olika kalkprodukter kan skilja sig åt relativt mycket och det är angeläget att i så hög utsträckning som möjligt använda produkter med lågt Cd-innehåll, särskilt på marker som redan har förhöjda halter.

2.2 Mullhalt och textur

Humuspartiklar har en stor yta i förhållande till sin vikt, med många negativa ytladdningar som kan adsorbera både näringsämnen och oönskade tungmetaller. Organiskt material ökar alltså det totala antalet negativa bindningsplatser i marken vilket gör att Cd-joner kan komplexbindas till partikelytorna vilket resulterar i att halten i marklösningen sänks. En ökad adsorption och minskat Cd-upptag har påvisats i ett flertal studier både i Sverige och internationellt (bl.a. Eriksson, 1988; Sauvé m.fl., 2000; Holm m.fl., 2003). Hur stor effekten av en ökad mullhalt får på Cd-upptaget i grödan beror dock på den ursprungliga mullhalten, vilken typ av jord det är och vilket pH-värde jorden har. I mineraljordar med mullhalter på endast någon eller ett par procent har man noterat en positiv effekt vid en höjning av halten organiskt material i marken (Eriksson, 1996). Om man tittar på svenska jordar och spannmålsgrödor överlag så är dock effekten av mullhalt på Cd-halt i spannmålskärnor relativt liten (Eriksson m.fl., 2010). För både höstvet och havre har pH-värdet en betydligt större påverkan än mullhalten. Även om organiskt material kan binda mycket Cd så är det ändå inte självklart att mulljordar medför låga Cd-upptag. Dessa jordar har ofta ett lägre pH-värde än mineraljordar och kan också ha relativt höga Cd-halter, vilket kan motverka den positiva effekten av det organiska materialets adsorptionsförmåga (Eriksson, 1990).

Vissa studier har visat på en omvänd effekt, d.v.s. en ökad tillgänglighet av Cd vid hög halt organiskt material, vilket då har kopplats till en hög halt av löst organiskt material (DOC). Organiskt material som finns löst i marklösningen kan bilda lättlösliga komplex med Cd och då istället öka mobiliteten i marken.

Flera olika faktorer påverkar betydelsen av DOC, men eftersom halten av DOC är relativt låg i de flesta åkerjordar finns endast en begränsad effekt och är troligtvis inte något som behöver tas i beaktande när man bedömer tillgängligheten av Cd i åkermark (Kubier m.fl., 2019; Loganathan m.fl., 2012; McLaughlin m.fl., 2021).

Även texturen, d.v.s. fördelningen av olika partikelstorlekar i jorden, kan ha en inverkan på Cd-upptaget där en viss Cd-halt i en sandjord (fler större partiklar) ofta leder till ett högre upptag jämfört med motsvarande halt i en lerjord (många mycket små partiklar). Detta beror, som det beskrivits ovan, på att sandjorden har färre specifika bindningsplatser där Cd kan komplexbinda till partikelytorna. En relativt större andel av den totala mängden Cd kommer då att befinna sig i marklösningen och vara tillgängligt för upptag. Texturen är inte något som går att påverka, men kännedom om dess effekter är ändå av betydelse eftersom det kan påverka relationen mellan Cd-halten i marken och grödan.

2.3 Biokol

Biokol är förkolnat material från biomassa som tas fram genom pyrolys, d.v.s. förbränning i syrefri miljö. Ursprungsmaterialet kan t.ex. bestå av ved, grönmassa från olika växter eller stallgödsel. Tillförsel av biokol till mark kan påverka tillgängligheten av olika spårelement på flera sätt. I likhet med organiskt material leder tillförsel av biokol till ett ökat antal negativt laddade bindningsplatser, vilket potentiellt kan öka adsorptionen av katjoner såsom Cd. Globalt har relativt många studier genomförts där man utvärderat effekten av biokol på upptaget av spårelement i olika grödor. I flera fall har man också kunnat se att biokol har medfört lägre Cd-upptag i vete och andra grödor (bl.a. Yousaf m.fl., 2018; Sigua m.fl., 2019). En sammanställning från 21 olika studier med olika typer av biokol, jordar och grödor visade i medeltal en minskning av Cd-upptaget med 40 % (Natsha, 2022). Skillnaden i effekt mellan olika studier är dock stor och vissa försök har visat på omvänd effekt, d.v.s. att Cd-upptaget ökat efter tillförsel av biokol (Lahori m.fl., 2017; Sigua, 2019).

Biokol är en komplex grupp av produkter där bl.a. materialets ursprung och förhållandena under pyrolysen påverkar produktens egenskaper och därmed dess effekt. Fördelningen mellan kol och aska i biokolet är viktiga parametrar som påverkar produktens egenskaper. En hög andel kol ger ett material som är stabilt mot nedbrytning medan en hög askhalt bidrar till ett ökat pH-värde, många bindningsplatser för metaller samt utfällningar av metallföreningar (speciellt vid förekomst av fosfor och karbonater i askan) (He m.fl., 2019; Natsha m.fl., 2022). Ursprungsmaterialet och temperaturen i pyrolysen styr till stor del biokolets sammansättning. En hög andel lignin i materialet, som i t.ex. träbaserad biokol, ger en stor andel kol. Eftersom cellulosa avger relativt mycket syre och enkla kolföreningar i pyrolysen ger material rika på cellulosa, som t.ex. spannmåls- eller örtbaserade växtmaterial och stallgödsel en större askandel (Enell m.fl., 2020; Wang & Zhongyang, 2016). En hög pyrolystemperatur medför

att både kol- och askhalt samt antalet mikroporer ökar. Om temperaturen är alltför hög förloras dock många funktionella grupper (innehållande O, H och N) som har förmåga att binda till sig metaller (Feng m.fl., 2018). En hög askhalt är positivt eftersom det leder till ett höjt pH-värde i jorden och därmed större adsorptionsförmåga efter tillförsel till marken. Sammanfattningsvis bör biokol med stor potential att adsorbera Cd och andra metaller ha hög askhalt och en koltyp med många funktionella grupper, t.ex. karboxylgrupper (Enell m.fl., 2020). För att uppnå detta gäller det alltså att ta hänsyn till materialets ursprung, men också att hitta en rätt avvägd temperatur i pyrolysen som ger en hög askhalt och stor total yta med många mikroporer, men där en stor del av de funktionella grupperna ändå finns kvar.

Samtidigt som det finns potential för biokol att adsorbera Cd så innebär en tillförsel till åkermark att även Cd tillförs eftersom ursprungsmaterialet kan innehålla Cd i olika omfattning. Att dokumentera och räkna på hur stor mängd som tillförs genom olika produkter är angeläget för att se till att inte Cd-halten i marken på sikt ökar. Cd-halten i biokolet beror framförallt på halten i ursprungsmaterialet men också på förutsättningarna under pyrolysen. Om andelen aska är hög i produkten innebär det potentiellt en högre Cd-halt eftersom en större andel N, O och H har försvunnit. Som nämnts ovan så innebär också en hög andel aska i biokolet att slutprodukten inte är lika beständig mot nedbrytning. Detta kan innebära att tillförsel behöver ske oftare för att bibehålla en effekt jämfört med en mer kolrik produkt.

Även om det finns ett flertal försök som har visat på kraftig minskning av löslighet och upptag av Cd efter tillförsel av biokol till mark så har de flesta av dessa genomförts under förutsättningar som är ganska annorlunda jämfört med svenska förhållanden. Ofta studeras effekten på jordar som är starkt kontaminerade med Cd, d.v.s. där halten är långt över den som normalt förekommer i svensk åkermark. Även markegenskaper och jordmåner ser många gånger helt annorlunda ut. Många jordar i t.ex. tropikerna har en mycket låg bindningskapacitet och där kan den reducerande effekten på Cd-upptag bli betydligt större än under svenska förhållanden. Många försök har också använt sig av mycket stora givor biokol för att studera effekterna. Mängderna varierar mycket, men vanligt är att 2-6 vikts-% tillförs vilket innebär givor på cirka 50-150 ton per hektar om inblandning görs i de översta 20 cm av jorden.

Försök där effekten av biokol på Cd-upptag har undersökts under svenska förhållanden är mycket begränsad. I ett forskningsprojekt genomfört av SGI studerades effekten av olika sorters biokol med syfte att utveckla en behandlings-teknik för att stabilisera föroreningar i jord och bidra till en mer resurseffektiv avfallshantering (Enell m.fl., 2020). Försök inom projektet kunde bl.a. visa att Cd-upptaget i gräs minskade med ca 6-35% efter tillförsel av 3-6 viktprocent biokol till marken, men med stor spridning inom behandlingarna. Samtidigt visade resultaten att både skörd och klorofyllhalt minskade jämfört med kontrollen. En möjlig förklaring var att kväve immobiliserades, d.v.s. lagrades in i markmikrobernas biomassa i samband med nedbrytning av

kolföreningar i biokolet. Detta resulterade i en kvävebegränsning för gräset med minskad skörd som följd. Även om tillsats av biokol hade positiva effekter i detta försök så skiljer sig förutsättningarna från dem i åkermark. Så vitt vi vet har inga studier genomförts på svensk åkermark för att undersöka effekten av tillförsel av biokol på Cd-upptag i jordbruksgrödor.

2.4 Kisel

En fråga som fått alltmer uppmärksamhet på senare tid är att ett tillskott av lösligt kisel (Si) till marken kan påverka växter/grödor på många olika sätt. Tillskott av Si kan öka motståndskraft mot insektsangrepp och växtsjukdomar, öka tolerans mot förhöjd salthalt i marken och torra, öka upptaget av en del näringsämnen och minska upptaget av några skadliga ämnen inklusive Cd, mildra stresseffekt på växter från giftiga spårelement och öka biomassa-produktion (bl.a. Rizwan m.fl., 2016; Greger m.fl., 2018; Greger & Landberg, 2019). När det gäller Cd finns många studier som handlar om att med hjälp av Si-tillskott minska upptag och därmed Cd-stress i olika grödor som ris, majs och vete (Riwan m.fl., 2016; Hou m.fl., 2023). Eftersom det oftast krävs en ganska hög Cd-halt för att få skadliga effekter på växter är problemställningen kopplad till odling på mark med halter som är högre än de som normalt föreligger i svensk åkermark.

Några av studierna visar att ett tillskott av lösligt kisel till mark eller applicerat direkt på bladen kan minska upptaget av kadmium i grödor. Det verkar finnas få studier som utförts under fältförhållanden. En sådan har dock utförts av Greger & Landberg (2019) som studerade effekt av Si-tillförsel på Cd-upptag i ätbara delar av vårvete, potatis, morot och gul lök i småskaliga fältförsök (behandlingsrutor på 3 m²) utlagda på jordar med pH runt 7,8 och en total Cd-halt runt 0,70 mg/kg. Motsvarande 500 kg Si/ha i form av flytande kaliumsilikat (K₂SiO₃), mikrosilica (amorf SiO₂) respektive en blandning av kalciumsilikater (CaSiO₃ och Ca₃Si₂O₇) och kalciumoxid (CaO) med kalkeffekt tillfördes försöksrutorna en månad efter sådd. Kiseltillsatsen minskade Cd-koncentration med som mest 6,6 % i vårvete, 8,2 % i potatis, 12 % i morot och 21,3 % i gul lök jämfört med kontrollen utan tillsats. Tillsats av blandningen med kalciumsilikater hade generellt något mindre effekt än tillsats av de andra silikaterna. Koncentrationen av lösligt Cd i marken tenderade att öka efter tillsats, men ingen förändring var statistiskt signifikant.

I övrigt finns det några studier utförda i odlingskärl. Naeem m.fl. (2015) tillsatte 50, 100 och 150 mg Si (CaSiO₃) per kg jord (motsvarar ca 175-525 kg/ha under fältförhållanden) i ett kärlförsök där jorden tillförts 10 mg Cd per kg. Tillskott av Si reducerade halterna av Cd i både halm och kärna i fyra olika vetesorter. I kärna var haltminskningen upp till ca 15 % (svårt att avläsa exakt i stapeldiagram) när ledet med störst Si-tillsats jämfördes med kontrolleret. Författarna fann att Si-tillsatsen minskade ”växttillgängligt” Cd (bestämt efter extraktion med

ammonium-bikarbonat + DTPA) och drog slutsatsen att halten i kärna berodde både på detta och på minskad translokering från rot till skott.

Hussain m.fl. (2015) utförde ett liknande försök, också i vete, där upp till 7,5 mg Cd per kg jord tillsattes. Tillsatsen av Si tycks motsvara en giva på ca 150 kg/ha, men det är oklart om angiven siffra avser bara Si eller Na_2SiO_3 . I ledet med den största tillsatsen av Cd reducerade tillskottet av Si Cd-halten i kärna med 30-40 % jämfört med kontrolledet. I den ena vetesorten som beskrivs som Cd-känslig ökade dock upptaget efter Si-tillsats i led där mindre mängd Cd tillförts jorden.

Treder & Cieslinski (2006) studerade effekt av Si-tillsats på Cd-halten i bladskäft, blad och bär av jordgubbe i ett krukförsök i växthus. Kisel i form av kalium-silikat tillfördes i två behandlingar, antingen tillförsel till jord med en giva av 16 mM Si/kg (motsvarar ca 1000 kg/ha) eller tillförsel i form av bladgödsling (16 mM Si per planta). Ett tredje led där dessa mängder tillfördes både jord och planta, liksom led där Cd tillsattes i koncentrationer upp till 17 $\mu\text{M}/\text{kg}$ (ca 2 mg/kg), till jorden ingick också. I led med tillsatt Cd minskade halten oftast, men inte alltid, i de undersökta växtdelarna efter tillsats av Si till jorden.

Både i Treder & Cieslinski (2006) och Hussain m.fl. (2015) fanns data från behandlingar utan tillsats av Cd till jorden. Dessa led är nog mest intressanta när det gäller svensk åkermark. Staplarna i diagram avseende led utan tillsatt Cd till jorden var dock så små att det tyvärr inte gick att utläsa hur stor effekten blev av olika stora tillskott av Si. Orsaken till detta är att diagram som visade Cd-halt i växtdelar från "normal" jord utan tillsats av Cd hade samma skala som diagram för jordar med ganska stor tillsatt Cd-mängd.

Förmodligen beror minskat upptag av Cd efter Si-tillsats i hög grad på processer inne i växten (Hou m.fl., 2023). Greger m. fl (2016) visade att Si-tillsats minskar transporten av Cd från rot till skott i ett försök där groddplantor av durumvete och vårvete odlades i näringslösning.

På ett möte i kadmiumforum 2022-10-24 presenterade Maria Greger ännu ej publicerade data från försök där effekten av kiseltillskott på vete och några andra grödor undersöktes. Försöksrutornas storlek var 2 m² och givan av amorft SiO_2 (mikrosilica) var 40 kg/ha i det nya försök där vete ingick. Cd-halten i dessa grödor minskade med knappt 10 % efter tillsats av Si. Minskningen i Cd-halt var mer än dubbelt så stor i andra växtarter som klöver, timotej och i ett annat försök sallat.

2.5 Zink

Zink (Zn) förekommer, i likhet med Cd, som tvåvärd katjon i marklösningen och de två grundämnena är kemiskt närbesläktade. Detta gör att deras joner konkurrerar med varandra om bindningsplatser på markpartiklarna, men även vid växtupptag eftersom växten har svårt att skilja dem åt. Dessa två parametrar

verkar åt varsitt håll, där konkurrens om bindningsplatser potentiellt skulle kunna öka lösligheten av Cd vid ökad Zn-halt, medan konkurrens vid upptag istället skulle kunna resultera i minskat upptag vid hög Zn-halt. Det sammantagna utfallet är alltså inte givet utan påverkas troligen av utgångsläget i marken, såsom halterna av de två ämnena samt kvoten mellan dem. Antalet genomförda försök där man studerat effekten av tillsats av Zn är relativt begränsat och flera är utförda på jordar med låga Zn-halter i Australien (Oliver m.fl., 1994; McLaughlin, 1995) eller på Cd-kontaminerade jordar, d.v.s. med mycket höga Cd-halter (bl.a. Wu & Zhang, 2002). I de australiensiska studierna resulterade tillförsel av Zn i ett tydligt minskat Cd-upptag i vete respektive potatis. Minskningen var ca 25-50%, beroende på utgångsläge och mängd Zn som tillfördes. Zinkbrist hade uppmärksammats på dessa jordar. Även i en annan studie med durumvete kunde man se en betydande minskning av Cd-halterna i kärna vid Zn-tillförsel (20 mg Zn/kg jord) och ett tydligt negativt samband mellan Zn- och Cd-halt i kärna efter olika givror av Zn-gödsling (Jiao, 2004). Vidare visade Choudhary m.fl. (1994) att Zn-tillförsel till en kanadensisk jord med låg Zn-halt minskade Cd-upptaget med 15-30% i kärna av två olika sorter av durumvete. Däremot uppnåddes ingen effekt när Zn tillfördes som bladgödsling vilket förstärker teorin att interaktionen mellan Zn och Cd sker i marken i samband med växtupptag snarare än inne i växten. Verkningsmekanismerna är dock inte helt klarlagda vilket indikeras i studien av Saifullah m.fl. (2014) som uppnådde effekt på Cd-halten i grödan även när Zn tillfördes i form av bladgödsling och i Jiao (2004) där man såg effekt av Zn på Cd-transport i växten.

Situationen i svenska åkerjordar skiljer sig från den i ovan nämnda studier genom att Zn-halterna här generellt är högre och Zn-brist anses inte vara något utbrett problem. Samtidigt är Cd-halterna ofta lägre vilket gör att kvoten mellan Zn och Cd troligen är för hög för att en Zn-gödsling skulle få avsevärd effekt. En svensk studie där man granskat och utvärderat ett stort antal jord- och grödprover från kommersiellt odlade fält visade också att Zn-halten i marken endast hade mycket begränsad effekt på Cd-upptaget i höstvete och potatis (Eriksson m.fl., 1996).

2.6 Selen

Selen (Se) är ett essentiellt spårämne för djur (och människor), men inte för växter. Eftersom växter ändå ackumulerar Se från marken så innebär det att den tillgängliga halten av Se påverkar kvaliteten när slutprodukten används till livsmedel eller foder. Svensk åkermark har generellt låga Se-halter vilket till stor del är kopplat till modernmaterialalets egenskaper. Det resulterar i att svenska jordbruksprodukter som t.ex. vete också har låga halter, vilket kan orsaka problem med Se-brist i delar av befolkningen. Samtidigt har det i forskningsstudier visat sig att det finns ett samspel mellan Se och Cd och som indikerar att Se har potential att minska Cd-upptaget. En metastudie genomförd av Affholder

m.fl. (2019) inkluderade 33 olika försök med 16 olika grödor. Resultatet visade att tillförsel med Se i genomsnitt minskade Cd-upptaget med 10-50% beroende på vilken mängd som tillfördes. Den största sänkningen krävde dock mycket stora givor (142 mg Se per kg odlingssubstrat). Vidare indikerar resultaten från denna och andra studier att formen av tillfört Se har betydelse för effektens storlek, där selen tillfört som selenit (SeO_3) verkar ha en betydligt större potential att påverka Cd-upptaget än när det tillförs i form av selenat (SeO_4) (Shanker m.fl., 1995, 1996; Zhou m.fl., 2017; Yu m.fl., 2018). I vissa fall har effekten helt uteblivit vid tillförsel av selenat, t.ex. i Grant m.fl. (2007) där en tillförsel av 10-40g Se/ha ökade Se-upptaget men inte hade någon effekt på Cd-halten i vetekärna. I Affholder m.fl. (2019) studie finns också en sammanställning över situationen i svensk åkermark via data från Mark- och grödoinventeringen. Man kan utifrån dessa data se att det finns en positiv korrelation mellan Se- och Cd-halten i marken, något som troligen beror på att halterna av båda ämnena är tydligt kopplade till modermaterialet på platsen. Vidare kan man också se att kvoten mellan de två ämnena har betydelse. En hög Se/Cd-kvot, d.v.s. relativt hög Se-halt i förhållande till Cd-halten, verkar leda till ett mindre Cd-upptag än om kvoten är låg.

De bakomliggande orsakerna till selens påverkan på Cd-upptaget är i dagsläget inte klarlagda, men det finns några tänkbara teorier. En av dessa är att kadmium bildar ett svårslösligt komplex med selenid (CdSe). Selenid är dock en form av selen som endast uppstår vid mycket reducerande (syrefattiga) förhållanden i marken som vid t.ex. vattenmättnad. Selenit eller selenat behöver då omvandlas först till elementärt Se och därefter vidare till selenid. De förhållanden som krävs för att skapa stabila Cd-Se-komplex av denna typ förekommer normalt endast vid odlingar där marken översvämmas, som i risodlingar (Gustafsson, 2013; Husson, 2013). Det finns dock en möjlighet att omvandlingen till selenid också kan ske på biologisk väg med hjälp av bakterier (Nancharaiah & Lens, 2015), men detta behöver bekräftas med fler studier. Andra möjliga orsaker till att Se minskar Cd-upptaget i grödan är att Cd och Se bildar svårslösliga föreningar inne i växten eller att ökad Se-halt i växten ger tjockare cellväggar och därmed verkar dämpande på upptaget (Ojeda, 2013; Cui m.fl., 2018). Att resultat från flera studier visar att halterna i rötterna verkar påverkas i lika hög grad som i skott eller kärna tyder på att interaktionen uppstår i marken och inte vid transport eller omlagring i växten (Affholder, 2019). Resultaten från olika studier är dock inte entydiga utan det finns även resultat som istället visar på en effekt av Se på transport av Cd i växten (Wang m.fl., 2014; Ciu m.fl., 2018).

I Finland tillförs sedan 1980-talet Se genom ett supplement i mineralgödsel och Se-halterna har efter införandet av denna åtgärd ökat i både vegetabiliska och animaliska livsmedel, liksom i befolkningen. Det finns, så vitt vi känner till, inga systematiska studier utförda för att studera hur Se-tillförseln till grödorna har påverkat Cd-halterna, men vissa jämförelser har ändå gjorts före och efter åtgärdens införande. En studie av Ekholm m.fl. (2007) analyserade Cd-halten i 28 olika vegetabilier år 2003 och jämförde med motsvarande analyser utförda på 1970-talet. Resultaten visade att Cd-halterna hade sjunkit signifikant, men

det är oklart om anledningen till minskningen var tillförsel av Se eller om det istället fanns andra bakomliggande orsaker. En skillnad mellan åren var också att analyser gjordes på varor i handeln och år 2003 var en större andel av t.ex. spannmål importerad, något som självklart kan ha påverkat resultatet. Liknande resultat kan ses i Kantola m.fl. (2001) där man har undersökt Cd-halt i bröstmjök och jämfört perioden 1993-1995 med 1987 (strax efter införandet av Se-gödsling). Även här såg man en signifikant minskning av Cd-halten i den senare perioden, men författarna gör ingen direkt koppling till ökad Se-halt.

2.7 Kväve

Kväve (N) är ett av de näringsämnen som våra grödor behöver i störst omfattning. Det är också det ämne som tillförs i störst kvantiteter till jordbruket, p.g.a. dess starkt skördehöjande effekt i våra odlingssystem. Kväve har också visat sig ha en betydelsefull inverkan på Cd-upptaget i olika växter. De bakomliggande orsakerna till detta är inte helt klarlagt, men flera mekanismer verkar vara inblandade.

Växter ackumulerar kväve huvudsakligen i form av ammonium (NH_4^+) och nitrat (NO_3^-) från marklösningen. I vilken form N tillförs kan påverka Cd-upptaget i grödan. Studier genomförda i hydroponiska försök (odling i näringslösning) eller kontrollerade krukförsök i helt buffrande system visar oftast att Cd-upptaget blir högre om N tillförs i form av nitrat än om det tillförs som ammonium, vilket har visats i bl.a. potatis (Maier m.fl., 2002; Larsson & Asp, 2013). Detta har troligen att göra med den positiva respektive negativa laddningen hos jonerna. Upptaget av NH_4^+ sker som positivt laddad jon (katjon) och minskar upptaget av andra katjoner p.g.a. konkurrens, medan den negativt laddade (anjon) NO_3^- -jonen istället underlättar upptag av katjoner som t.ex. Cd p.g.a. fördelaktig laddningsbalans. Eftersom N tillförs i betydligt större kvantiteter än många andra näringsämnen så finns det här en stor potential att påverka joner av andra ämnen. I åkermark är situationen trots allt annorlunda och mer komplex än i ett hydroponiskt system. Många kruk- och fältförsök med åkerjord visar istället att upptaget av Cd blir högre vid tillförsel av ammoniumbaserade gödselmedel jämfört med nitratbaserade (bl.a. Eriksson, 1990; Florijn, 1992; Gao m.fl., 2010; Larsson Jönsson, 2010). Den viktigaste förklaringen till detta är troligen att tillförsel av ammoniumjoner till marken leder till en pH-sänkning som i sin tur kan öka tillgängligheten och därmed upptaget av Cd (se [avsnitt 2.1](#)). Anledningen till pH-sänkningen är att tillfört ammonium, under förhållanden som är vanliga i svensk åkermark, relativt snabbt kommer att omvandlas till nitrat vilket är en försurande process.

Det finns dock exempel på studier som genomförts i åkerjord där man istället har noterat ett högre upptag vid tillförsel av nitrat jämfört med ammonium. En möjlig förklaring är att dessa gödselmedel samtidigt tillför kalcium till marken ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Kalcium är, liksom Cd, en tvåvärd katjon och om koncentrationen av Ca-joner ökar i marken så kan de "trycka undan" en del av Cd-jonerna som finns

adsorberade på partikelytorna vilket resulterar i en ökad halt av Cd-joner i marklösningen och därmed ökad tillgänglighet. Detta är troligen mest betydelsefullt vid höga pH-värden (Grant & Bailey, 1998).

Under svenska förhållanden visar trots allt en majoritet av studierna ett högre upptag vid tillförsel av ammoniumbaserade gödselmedel vilket kan härledas till den indirekta effekten av ett sänkt pH-värde. Under vissa förhållanden, t.ex. där marken har en hög buffertkapacitet, d.v.s. är motståndskraftig mot pH-sänkningar, kan man tänka sig att skillnaderna i Cd-upptag mellan gödselslagen blir mindre eller till och med omvända. Även det ursprungliga pH-värdet kan påverka effekten eftersom det relativa vätejonstillskottet när ammonium omvandlas till nitrat blir mindre i en jord som redan från början har ett lågt pH-värde. Man kan alltså tänka sig att skillnaderna i Cd-upptag vid olika N-gödslingsformer blir mindre i en jord med lågt pH-värde.

Förutom att formen av tillfört gödselkväve kan påverka Cd-upptaget så verkar det också finnas en tydlig positiv korrelation mellan N-giva och Cd-upptag (Li m.fl., 2011; Wångstrand m.fl., 2007; Yang m.fl., 2020). Studien av Wångstrand indikerade att en ökning av givan med 10 kg N per hektar i form av kalksalpeter (merparten av N föreligger som kalciumnitrat) ökade Cd-halten i höstvete med 1-3 µg/kg ts. Detta kan sättas i relation till N-gödslingsnivåer som ligger på 150-200 kg/ha för normalstora höstveteskördar och medianhalten av Cd i höstvetekärna på 42 µg/kg ts. Det är alltså relativt små effekter och underlaget till denna kvantifiering är också ganska begränsad. En tänkbar bidragande faktor till att hög N-gödsling leder till ett ökat Cd-upptag är förhöjd salthalt (jonkoncentration) i marklösningen. Detta leder till en ökad konkurrens om bindningsytorna på markpartiklarna och en större andel av Cd-jonerna frigörs därmed och blir tillgängliga för upptag. Att en ökad jonkoncentration kan minska Cd-adsorptionen i mark har kunnat visas i ett flertal studier (bl.a. Loganathan m.fl., 2012). Även andra näringsämnen som tillförs i relativt stora kvantiteter kan ge denna effekt, t.ex. kalium i potatisodlingar. Som nämnts ovan så kan även tillförsel av Ca ha en liknande effekt. Resultaten är dock inte entydiga och i vissa studier har det inte gått att påvisa ett ökat Cd-upptag vid tillförsel av Ca-joner (Dahlin m.fl., 2016).

Även om en stor majoritet av genomförda studier visar på ett positivt samband mellan N-gödsling och Cd-upptag, så förekommer även motsatta resultat, d.v.s. att en ökad N-gödsling leder till ett minskat Cd-upptag (Landberg & Greger, 2003; Jönsson Larsson m.fl., 2010). I dessa fall har det handlat om jordar med mycket låga Cd-halter i marken, vilket troligen gjort att endast mycket små mängder Cd har kunnat frigöras till marklösningen. Den ökade N-gödslingen har samtidigt resulterat i en ökad biomassa i grödan och det sammanlagda resultatet har då istället blivit en lägre koncentration av Cd i växten, en s.k. utspädningseffekt. I jordar med så lågt Cd-innehåll har effekten av N-gödsling ingen stor betydelse i praktiken eftersom Cd-halten i grödan ändå blir låg.

Eftersom N-tillförsel ofta verkar ha en signifikant påverkan på Cd-upptaget så har det också undersökts om en uppdelning av N-gödslingen i flera mindre givor under säsongen skulle kunna leda till en dämpad effekt på Cd-frigörelsen och upptaget. Teorin bakom detta är att en mindre N-giva medför att jon-koncentrationen i marklösningen inte ökar lika kraftigt efter varje gödslingstillfälle samt att pH-minskningen vid tillförsel av ammoniumjoner inte blir lika stor på kort sikt. De försök som har genomförts för att utvärdera denna åtgärd har dock visat att en uppdelning av gödslingen till flera mindre givor inte har någon direkt effekt på Cd-upptaget. Detta har påvisats både i potatis av Larsson Jönsson (2010) och i spannmål (Wångstrand, 2007).

2.8 Klorid

Hög kloridhalt i marken eller tillförsel av klorhaltiga gödselmedel, t.ex. kaliumklorid, har visats öka löslighet och upptag av Cd (McLaughlin, 1994; Smolders & McLaughlin, 1996; Kamewada & Nakayama, 2011). Detta kan förklaras genom att Cl-jonen kan bilda lättlösliga komplex med Cd, som kan tas upp i växten i likhet med Cd^{2+} (Wegglar m.fl., 2004; Kubier m.fl., 2019). Det finns flera olika former av dessa komplex, men den envärt positivt laddade formen, $CdCl^+$, är den dominerande i åkermark och andelen Cd som föreligger i denna form ökar med ökad kloridhalt. De två jonerna (Cd^{2+} och $CdCl^+$) har sina egna jämvikter mellan marklösning och adsorption vilket gör att mängden Cd i marklösningen totalt sett ökar. Cd-Cl-komplexen har också en lägre benägenhet till adsorption vilket gör att mobiliteten och växtupptaget av Cd potentiellt kan öka med ökad halt $CdCl^+$ (Loganathan m.fl., 2012; Wegglar m.fl., 2004).

Dahlin m.fl. (2016) undersökte, i kruk- och fältförsök genomförda under svenska förhållanden, effekten av jordförbättrande restprodukter på jordegenskaper, skörd och Cd-upptag i vårvede. De fann att tillförsel av klorid var en viktig faktor som i hög grad påverkade Cd-halten i kärna där ett stort innehåll av Cl i restprodukterna resulterade i ett ökat upptag. Effekten av klorid varierade dock stort mellan de jordar och platser som ingick i studien. Forskning från Australien indikerar också att en övergång från kaliumklorid till kaliumsulfat kan minska Cd-upptaget i potatis samt att upptaget i samma gröda ökade med ökad kloridhalt i bevattningsvattnet (Warne m.fl., 2007). Liknande resultat kan ses i Ischikawa m.fl. (2015) där gödsling med ammoniumklorid gav högre Cd-halt i vetekärna än vid gödsling med ammoniumsulfat. Detta kunde endast påvisas vid tidiga gödslingar i samband med sådd och inte när gödsling skedde senare under växtsäsongen. Resultat från olika studier är dock inte entydiga. Data från ett par andra fältförsök visade inte på någon skillnad i Cd-upptag mellan sulfat- och kloridgödsel i höstvede (Söderström & Eriksson, 2018). I försöken som genomfördes i Skåne 2017 på en plats med relativt hög Cd-halt i både mark och gröda tillfördes kaliumklorid respektive kaliumsulfat i mängder som motsvarande 30-60 kg kalium/ha vilket är normala nivåer inom svensk växtproduktion.

2.9 Kunskapsluckor

Även om forskningsunderlaget inom vissa delar av detta ämnesområde är relativt omfattande så finns det ändå ganska stora kunskapsluckor kring hur olika markegenskaper och odlingsåtgärder påverkar Cd-upptaget i våra grödor. Effekter av de åtgärder som belysts i avsnitt 2.1-2.8 har visserligen ofta kunnat påvisas, men det finns alltför få studier i fältskala under olika förutsättningar för att man ska få bra kunskap om vilka åtgärder som har effekt i olika situationer och för att kunna kvantifiera effekterna. Effekt av pH-värde och kalkning har undersökts i ett stort antal studier och även om undantag finns så finns det ett relativt gediget stöd för att ett ökat pH-värde på sura jordar medför ett minskat Cd-upptag. Att kvantifiera effekterna är svårare, vilket till stor del beror på att pH-värdet samvarierar med andra markfaktorer och att förhållandena skiljer sig mellan olika jordar.

När det gäller tillförsel av olika substanser eller ämnen såsom Si, Se, Zn och biokol så är underlaget bristfälligt och studier som genomförts i fältskala under svenska odlingsförhållanden saknas ofta helt. Inom dessa områden behövs fler försök på olika typer av jordar och förutsättningar för att kunna belägga att det faktiskt finns en effekt och i så fall hur stor denna är. För biokol finns det många frågetecken och området är komplext eftersom det finns många olika varianter av biokol med olika egenskaper. Det är därför viktigt att få bättre kunskap kring hur olika typer av biokol verkar på just Cd-upptaget och vilka andra konsekvenser en tillförsel skulle kunna få.

Det finns också ett kunskapsbehov kring hur långvariga effekter som man kan förvänta sig av en viss åtgärd. Hur ofta en insats behöver upprepas är av stor vikt både för att åtgärden ska vara effektiv, men också för att kunna bedöma hur realistisk och kostnadseffektiv åtgärden är. Det är av stor vikt att inte resurser läggs på åtgärder där det är ett bristfälligt underlag kring eventuella effekter. Förutom att det kan medföra onödiga kostnader så finns det också risk att man skapar andra problem. En åtgärd skulle t.ex. kunna leda till obalanser eller brist av olika näringsämnen, vilket kan vara negativt för skörden eller omgivande miljö. När det gäller kvävegödsling så behöver effekten utredas vidare så att man bättre förstår hur stor del som hänger samman med ämnet i sig och vad som är en pH-effekt. Detta kan ha betydelse för framtida riktlinjer.

2.10 Tillämpningspotential

Den samlade bedömningen är att potentialen för att minska upptaget av Cd från marken med hjälp av olika åtgärder är relativt begränsad utifrån dagens kunskapsläge. Åtgärder som även ur andra aspekter ger positiva effekter i lanterbruken bör ändå uppmuntras och implementeras i så hög grad som möjligt på marker med risk för förhöjda Cd-halter i våra grödor. Det handlar då främst om att hålla pH-värdet på rekommenderade nivåer samt bibehålla eller öka mullhalten. Att tillföra ämnen eller substanser som t.ex. Si, Se eller biokol

är ofta förenade med en relativt stor kostnad och effekterna är i dagsläget tveksamma. Även om åtgärderna skulle kunna ha potential att minska Cd-halterna, så behövs fler försök för att kunna utvärdera effekterna under olika förutsättningar. För insatser som är förenade med en hög kostnad så gäller det också att undersöka hur kostnadseffektiv insatsen är, något som vi inte har kunnat bedöma i denna rapport. Vare sig man tänker sig att lantbruket ska stå för kostnaden själv eller om någon typ av bidrag ska utgå för att genomföra åtgärden så behövs mer kunskap och utvärdering av de olika metoderna innan resurser används för att implementera en viss åtgärd i större skala. Förutom att se till att insatsen blir kostnadseffektiv gäller det också att säkerställa att åtgärden inte skapar några negativa effekter i växtproduktionen.

Flera av de beskrivna åtgärderna ovan handlar om att öka adsorptionen av Cd till markpartiklarna genom att öka antalet negativt laddade bindningsplatser och därmed minska andelen växttillgängligt Cd i marklösningen. Här har troligen pH-värdet enskilt störst inverkan och att se till att det inte blir alltför lågt i marker med förhöjd risk för högt Cd-upptag får anses vara en prioriterad åtgärd. Samtidigt som detta har en dämpande effekt på tillgängligheten av Cd så har ett gott kalktillstånd även andra positiva effekter som ökad tillgänglighet av fosfor och andra näringsämnen, förenklad jordbearbetning och förbättrad rottillväxt (Jordbruksverket, 2022). Tillförseln av kadmium via olika kalkmedel behöver samtidigt hållas under uppsikt för att inte skapa problem med ökande halter i marken. Dagens generella rekommendationer för mål-pH i åkermark ligger på 6,0-6,5 för mineraljordar där den lägre delen av intervallet gäller lättare jordar, d.v.s. sandjordar och den övre delen lerjordar. När det gäller effekt på Cd-upptag är det svårt att säga exakt vilket pH-värde man bör sträva efter, men det finns tecken på en avtagande effekt när värdena närmar sig pH 7. Att höja pH-värdet över de generella rekommendationerna är därför tveksamt eftersom det dels är förenat med en stor kostnad, men också för att det kan ge negativa konsekvenser som t.ex. låg tillgänglighet av vissa mikronäringsämnen. I Australien rekommenderar man ett pH-värde på mellan 6,2 och 6,7 för att begränsa Cd-upptaget, något som stämmer väl överens med de generella pH-rekommendationer som i dagsläget finns inom svenskt jordbruk (Warne m.fl., 2007).

Att kalka åkermark innebär en relativt stor kostnad för lantbrukaren, men så länge rekommendationen för att hålla nere Cd-upptaget inte går längre än det generella målet för pH så innebär inte åtgärden någon ytterligare kostnad. Frågan är ändå hur stor skillnad som är möjlig att åstadkomma jämfört med dagens situation eftersom en stor del av de marker där livsmedel produceras redan idag har ett gott kalktillstånd. Detta bör undersökas vidare där man tittar på hur stor del av markerna med risk för förhöjda Cd-halter som ligger på underoptimala pH-värden. På så vis skulle man kunna göra en bättre uppskattning kring hur stor effekt en ökad kalkning skulle ha på nationell nivå. Vilka grödor som odlas på en viss plats behöver också tas i beaktande. Studier har t.ex. visat att Cd-halterna i vetekärna inte påverkas i lika hög grad av ett förändrat

pH-värde som för vissa andra grödor. Underlaget är mycket begränsat, men indikerar en något större effekt av pH på Cd i potatis än i spannmål.

Att höja mullhalten på mineraljordar kan troligen ha en viss effekt på Cd-upptaget och då främst på lätta sandjordar. Olika studier visar dock på olika resultat och det är svårt att bedöma potentialen av en ökad mullhalt på en viss plats. Eftersom effekterna är ganska osäkra och olika beroende på jordens egenskaper i övrigt så är det troligen inte så effektivt att lägga alltför stora resurser på denna åtgärd. Att bibehålla eller öka mullhalten har dock andra positiva effekter och man bör i detta sammanhang ta med Cd som en del av det sammanlagda värdet av åtgärden.

Biokol fyller en liknande funktion som organiskt material i marken genom att andelen adsorberat Cd ökar. I dagsläget finns endast en småskalig produktion och användning av biokol i Sverige och det som produceras används bland annat som en komponent i anläggningsjordar och som jordförbättringsmedel i trädgårdar. Marknaden för användning i lantbruket är än så länge mycket begränsad, men kostnaden på världsmarknaden för högkvalitativt biokol uppskattas till ca 5000-6000 kr per ton (Söderkvist m.fl., 2021). Tillsammans med de stora givor (ca 20 ton/ha) som verkar krävas för en nämnvärd effekt, så innebär detta en mycket stor kostnad för lantbrukaren. I kombination med den osäkra effekten på Cd-halterna så är det inte något som i dagsläget är realistiskt att rekommendera. Genomförandet skulle också kräva tillgång på mycket stora mängder biokol som inte finns tillgängliga i dagsläget. Ett troligt scenario är ändå att både produktionen och marknaden för biokol kommer att växa i framtiden och att priset därmed kommer att sjunka. Detta skulle kunna leda till en ökad potential för att tillämpa denna åtgärd, men det krävs då ett betydligt bättre underlag som visar på en påtaglig effekt på Cd-upptaget. Med tanke på de stora kvantiteter som krävs så är det också tveksamt om det är realistiskt att genomföra åtgärden mer än på en begränsad del av åkermarken. Man bör också komma ihåg att det finns olika typer av biokol med olika egenskaper som passar olika syften. Det gäller alltså att se till att rätt typ används för att åtgärden ska bli så effektiv som möjligt. Tillförsel av biokol riskerar även att få oönskade konsekvenser. Olika biokolprodukter innehåller olika halter av Cd, beroende på ursprung och hur tillverkningen skett och det är viktigt att se till att de mängder av Cd som tillförs inte blir för stora och därmed motverkar sitt syfte. Vidare kan också biokolets förmåga att adsorbera olika katjoner potentiellt leda till problem med brist av olika näringsämnen t.ex. orsakat av en alltför kraftig pH-ökning eller immobilisering av N. Den negativa effekt på skörden som uppvisades i t.ex. Enell m.fl., 2020 är givetvis inte önskvärd i en jordbruksproduktion och denna och eventuella andra negativa konsekvenser bör tas i beaktande vid en utvärdering av biokolets användning. Det ofta höga pH-värdet hos askan i biokolet kan också bidra till ökade ammoniakförluster om tillförsel t.ex. sker tillsammans med stallgödsel eller andra kväverika material. Vid genomförandet av nya försök med biokol bör Cd tas med som en faktor att utvärdera så att underlaget kan förbättras.

Att tillföra ett annat ämne till marken som på något sätt interagerar med Cd i marken eller växten har visat sig ha en dämpande effekt på Cd-innehållet i vissa studier, men det gäller här att förstå under vilka förutsättningar en åtgärd fungerar och inte. Tillsats av kisel till mark har i fältförsök visat på viss potential att minska Cd-upptaget i grödan, men underlaget är begränsat. I de svenska studier som genomförts har visserligen måttliga effekter i vete och potatis uppmätts och detta behöver vägas mot kostnaden för tillförseln. I andra studier var effekterna tveksamma och delvis motsägelsefulla. Det finns ingen marknad för kiselprodukter som gödselmedel till lantbruket utan de små kvantiteter som säljs riktar sig främst till hobby- och trädgårdsodlare. Det är därför svårt att veta vad kostnaden för denna åtgärd skulle vara om det började tillämpas. Fler storskaliga försök i olika grödor behövs för att förbättra förståelsen, bedöma effektens varaktighet och därefter kunna utvärdera åtgärdens potential och kostnadseffektivitet.

Zinktilförsel har visat sig vara relativt effektiv i andra delar av världen, men då främst på väldigt zinkfattiga jordar. Effekten av att tillföra zink till svenska åkerjordar som redan har relativt höga zinkhalter som en åtgärd för minskat Cd-upptag skulle troligen vara begränsad. En generell tillförsel av Zn skulle troligen inte påverka konkurrensen mellan Zn och Cd i upptaget i växtroten i någon större utsträckning. Det är däremot viktigt att undvika alltför låga zinkhalter i marken eftersom det då både kan orsaka brist i växten samt resultera i ett ökat Cd-upptag.

Tillförsel av selen till åkermark verkar ha potential att minska Cd-upptaget i våra grödor. Vidare är selen ett essentiellt spårelement för djur och människa och eftersom svenska åkerjordar generellt är fattiga på selen så skulle ett tillskott potentiellt även vara positivt genom att öka selenhalten i både marken och grödan. Finlands långvariga Se-berikning av gödselmedel har gett goda resultat och man bör kunna uppnå liknande effekter om detta skulle införas även i Sverige. I Finland har man efter införandet av Se-gödsling noterat minskade Cd-halter i grödor. Detta har inte kunnat kopplas direkt till den ökade Se-halten, vilket åtminstone delvis kan bero på att studierna inte har lagts upp för att specifikt studera effekterna av Se. Det är ett intressant utvecklingsområde, men mer kunskap om verkningsmekanismerna behövs för att kunna utvärdera och optimera användningen.

Två ämnen som istället potentiellt kan öka Cd-upptaget är kväve och klorid. Det är från litteraturen ganska tydligt att en ökad N-gödsling resulterar i ett ökat Cd-upptag. Åtminstone delvis är nog detta en indirekt effekt av att gödslingen sänker pH-värdet i marken. Att dra ner på N-givor för att minska upptaget av Cd är varken önskvärt eller en realistisk åtgärd eftersom det skulle få stora konsekvenser för skördenivåerna. Det är däremot viktigt att inte gödsla över den optimala N-givan kopplad till den förväntade skörden eftersom detta kan leda till onödigt höga Cd-upptag. I Sverige har vi kommit långt i detta arbete och det finns tydliga rekommendationer och verktyg för att gödslingen ska hållas på en så optimal nivå som möjligt inom växtproduktionen. I vilken form N tillförs

verkar främst ha betydelse genom att pH-värdet kan påverkas. På jordar med risk för höga Cd-halter bör försurande gödselmedel som ammoniumsulfat och urea undvikas. I fallet med klorid bildas lösliga komplex som potentiellt kan öka mängden Cd som är löst i markvätskan och därmed också öka upptaget. Även om vissa studier har visat att stor tillförsel av klorid genom klorhaltiga gödselmedel kan öka Cd-upptaget så är underlaget inte tillräckligt för att avråda från användning av denna typ av gödselmedel. Mer kunskap behövs för att förstå vilka mekanismer som ligger bakom och vilka faktorer som påverkar den eventuella effekten.

2.11 Faktaruta kapitel 2

Faktaruta om identifiering av geografiska riskområden

Kunskapsläge

- Mekanismer som styr hur stor andel av den totala kadmium (Cd) -mängden som finns tillgängligt i marken är främst adsorption till markpartiklar samt komplexbildning och interaktion med andra ämnen. Dessa påverkas av markegenskaper samt förekomst eller tillförsel av andra ämnen.
- Ett höjt pH-värde, ökad mullhalt och tillförsel av biokol kan potentiellt leda till en ökad adsorption av Cd i marken. Att kalkning leder till ett minskat Cd-upptag finns belagt från ett stort antal studier, men effekter av mullhalt och biokol är mer osäkra och variabla.
- Tillförsel av kisel (Si) och selen (Se) har i ett flertal studier visats kunna minska Cd-upptaget. Effekten är varierande beroende på mängd och form som tillförts samt gröda och verkningsmekanismer inte helt klarlagda. Tillförsel av Se kan potentiellt både minska Cd-halterna och öka de i Sverige låga Se-halterna.
- Zink (Zn) kan potentiellt minska upptaget av Cd, p.g.a. konkurrens vid upptag, men troligen begränsad effekt av Zn-gödsling under svenska förhållanden.
- Gödsling med höga nivåer av kväve (N) eller klorid (Cl) kan öka upptaget av Cd. För N troligen störst effekt vid överoptimala givor. Effekten av Cl är inte klarlagt och olika studier har gett varierande resultat.

Kunskapsluckor

- Kunskapsluckorna är generellt relativt stora, men varierar mellan områden där det i vissa fall behövs mer kunskap om verkningsmekanismer och för att fastställa en effekt, medan det i andra fall handlar mer om att kvantifiera en redan påvisad effekt under olika förutsättningar i praktiskt svensk växtodling.
- pH-värdets effekt på olika jordar och för olika grödor är delvis oklar samt vilken pH-nivå som det är relevant att sträva efter för att uppnå fullgod effekt. Här behövs försök på fältnivå där detta undersöks närmare. Befintliga och nya kalkförsök bör kunna nyttjas till detta.
- Effekten av ökad mullhalt är osäker och även om ett flertal studier pekar på att en ökad mullhalt är positiv för att minska Cd-upptaget så spretar resultaten och det är svårt att på ett tydligt sätt kvantifiera effekten.
- Biokol är en variabel grupp av produkter och inom detta område behövs fler studier för att optimera produkten för Cd-adsorption. Även mer kunskap kring vilka mängder som krävs och effektens varaktighet behövs för att kunna bedöma åtgärdens kostnadseffektivitet och genomförbarhet.
- För Si och Se så behöver i första hand orsakerna till ett eventuellt samspel med Cd vidare utredas för att utreda åtgärdens potential och hur detta i så fall skulle kunna utformas. Även försök i större skala behövs för att titta på effekter i praktisk odling.
- Betydelsen av Cl-gödsling behöver utredas vidare genom att försöka kartlägga under vilka förutsättningar som detta kan ha betydelse och kvantifiera effekterna. I dagsläget saknas underlag för att ge rekommendationer kring tillförsel med Cl-haltiga gödselmedel.

Faktaruta om identifiering av geografiska riskområden

Tillämpningspotential

- Även om det finns en potential inom flera områden, så är det i många fall svårt att bedöma tillämpbarhet och effektivitet eftersom tillräcklig kunskap saknas.
- Att se till att åkermarken håller ett pH-värde som minskar upptaget av Cd har en relativt stor tillämpningspotential eftersom det till stor del sammanfaller med optimala pH-värden för växtproduktionen. Den totala potentiella effekten av åtgärden behöver utredas vidare.
- Att upprätthålla eller öka mullhalten i åkermark har flera positiva effekter, såsom ökad vattenhållande förmåga och inlagring av kol. Att sätta in stora resurser för att försöka öka mullhalten för att minska Cd-upptaget är däremot tveksamt eftersom effekten är relativt begränsad och osäker.
- Biokol kan, beroende på typ av produkt, ha potential att minska Cd-upptag i grödan, men stora kvantiteter krävs liksom förbättrad kunskap kring hur produkten ska optimeras. I dagsläget en dyr åtgärd där bättre kunskap om effekterna behövs för att kunna bedöma kostnadseffektivitet. Tillförseln av Cd med biokol behöver tas i beaktande.
- Kisel och Se är produkter som har potential att minska Cd-upptaget där Se också skulle kunna höja de låga Se-halterna. Effekterna måste verifieras genom fler försök innan det går att säga om det kan tillämpas och få effekt i praktisk odling. Tillförsel av Zn har troligen en ganska begränsad effekt på Cd-upptaget under svenska förhållanden.

3 Fytoremediering

En möjlig metod att sanera mark från Cd och andra potentiellt skadliga spår-element är så kallad fytoremediering. Det handlar om att odla växter, s.k. hyperackumulerare med stor förmåga att via sina rötter ta upp de oönskade ämnena från den mark man vill sanera. Om man bortför biomassan med dess ackumulerade Cd kan man påtagligt minska mängden av det oönskade ämnet förutsatt att koncentrationen i de skördade växtdelarna och/eller att biomassa-produktionen är tillräckligt hög. Metoden utvecklades ursprungligen för att sanera starkt förorenad mark på gamla industriområden etc. Det finns ett antal växter som är extrema hyperackumulerare som backskärvfrö och silverstenört, men en nackdel med många är att de producerar ganska liten biomassa (Baker m.fl., 1994).

3.1 Salix

Olika arter av släktet Salix tar upp mer Cd (och Zn) än de flesta växter, men koncentrationen i biomassan är inte i nivå med den hos de mer extrema hyperackumulerarna. Reningseffekten kan ändå bli ganska god eftersom detta kompenseras av en potentiellt stor biomassaproduktion. Eftersom Cd-halten är tillräckligt hög för att få en reningseffekt också vid odling på åkermark som normalt är ganska måttligt förorenad är salixodling en intressant metod för att försöka rena marken och därmed åstadkomma ett minskat upptag i efterföljande grödor. Fördelen gentemot hyperackumulerare är också att salixodling ingår i ett system för produktion av biobränsle och att den producerade biomassan har ett kommersiellt värde. En given förutsättning för att salixodling ska ha en markrenande effekt är att förbränningsanläggningen har en effektiv rökgasrening så att det mesta av det Cd som avgår i gasform hamnar i askan och att den producerade askan inte återförs till marken.

Litteratursökning visar att salix som markrenare undersöks på många olika håll i världen. Fokus är oftast på hantering av ganska starkt förorenad mark och det finns få fältförsök som kan ge en uppfattning om hur stor effekten kan tänkas vara på svensk åkermark med vanligtvis måttligt höga halter.

Hur mycket Cd som tas upp i en salixodling beror på vilken klon som odlas men också på platsfaktorer som pH i marken och vilken Cd-halt marken har. Screening av olika kloner med avseende på Cd-upptag visar på en stor variation (Landberg and Greger, 1994; 1996)

Teoretiska beräkningar baserade på Cd-halt i mer högackumulerande kloner och produktionsnivåer som är realistiska i välskötta odlingar visar att det borde vara möjligt att på ett eller ett par decennier ta bort en mängd Cd motsvarande den som enligt Anderssons (1992) beräkningar tillförts åkermarkens matjord under 1900-talet. Greger & Landberg (1999) redovisar baserat på data från en

kommersiell salixodling som skördades vartannat till vart tredje år ett beräknat möjligt uttag som motsvarar 36 g Cd/ha och år via stamskörd och ytterligare 25 g/ha och år om också blad årligen förs bort (tabell 3). Klang och Eriksson (2003) gjorde liknande beräkningar baserat på data från tio kommersiella odlingar på styv lera i Enköpingstrakten. I sju av odlingarna skördades 4-åriga skott, i en 3-åriga odling och i en odling 2-årig. Det beräknade uttaget via stam varierade mellan 4,2 och 17 g Cd/ha och år och motsvarande siffror för uttag via blad var 2,2 till 9,3 g/ha och år (tabell 3). Bestånd som odlades på kalkhaltiga jordar producerade generellt större biomassa samtidigt som de uppvisade lägre Cd-halt i ovanjordiska växtdelar. Lägst uttag av Cd via skörd uppmättes i de två bestånd som växte på jordar som var kalkhaltiga ända upp i matjorden.

Tabell 3. Beräkningar av hur mycket Cd som kan föras bort med biomassa från kommersiella salixodlingar. Vid beräkningen av hur lång tid det tar att tömma en fjärdedel av matjordens Cd-innehåll antogs att den innehöll 800 g Cd per ha. Data från Greger & Landberg (1999) och Klang och Eriksson (2003).

Variabel	Greger och Landberg	Klang och Eriksson
Halt i mark, mg/kg	Ca 0,6	0,17 – 0,45 ¹
Halt i stam, mg/kg	2,2	0,6 – 4,1
Halt i blad, mg/kg	5	1,0 – 7,3
Stambiomassa, ton/ha	12	2,1 – 8,7
Bladbiomassa, ton/ha	5	2,0 – 8,8 ²
Bortförsel stam, g/ha och år	36	4,2 – 17
Bortförsel blad, g/ha och år	25	2,2 – 9,3
Bortförsel stam + blad, g/ha och år	51	6,4 – 25
Tid att tömma 1/4 av matjordens förråd, år	5,5	47 – 12

¹ Gäller matjord.

² Beräknat värde.

Att påvisa att en påtaglig minskning av markens Cd-innehåll verkligen uppnås är svårt eftersom det inte finns några långliggande försök med syfte att undersöka just detta. Ännu mindre finns det särskilt många undersökningar av hur upptaget i grödan påverkas under fältförhållanden och många av dem som utförts avser relativt starkt förorenad mark. Kubatova m.fl. (2018) undersökte reningseffekt av två salixkloner i ett fältförsök på kontaminerad åkermark (7,3 mg/kg) under totalt 8 år. De fick större totalt uttag av Cd om beståndet skördades vart fjärde år jämfört med vartannat år. Den effektivaste klonen tog upp 6,4 % av beräknad Cd-mängd till 20 cm jorddjup vid det andra skördetillfället i led med 4 år mellan skördar. Vid skörd efter de första fyra åren var uttaget litet för båda klonerna, p.g.a. låg skörd. Mayerova m.fl. (2017) undersökte reningseffekt av många olika växtarter i ett fältförsök (Cd-halt i mark 2,8 mg/kg). Salix tog ut 95 g Cd/ha på tre år (att jämföras med siffror i tabell 3). Delplanque m.fl. (2013) lade ut ett fältförsök på en yta med muddermassor från en flod och beräknade utifrån analys av 4-åriga salixplantor att det skulle ta 19 år att minska Cd-halten i mark från 2,35 till 2,0 mg/kg om både stam och blad skördades och 33 år om bara stam skördades.

Det finns en undersökning som indikerar att salixodling på mycket kort tid påtagligt kan minska både halt i marken (0-40 cm) och i en efterföljande gröda inom 4 år. Greger och Landberg (2015) utförde fältförsök på två platser där de i olika behandlingsled först odlade salix i 1, 2, 3 eller 4 år och därefter först höstvetete och sedan vårvete resterande tid under en femårsperiod. De fann redan efter ett år en effekt både på pseudototalhalt (extraktion med 7M HNO₃) och på en lättlösligt Cd-fraktion i marken samt på halten i kärna av vete som odlades efter salixgrödan. Efter 4 år med salixodling hade halten HNO₃-lösligt Cd minskat med mellan 12 och 27 % i de fyra behandlingsleden (2 platser x 2 planttätheter). Den lättlösliga fraktionen minskade med mellan 22 och 27 %. Upptaget i kärna av vårvete odlad året efter 4 års salixodling var mellan 24 och 33% lägre än i kontrolleret. Data från led där salix bara odlats i 1 eller 2 år visade att Cd-halten i vårvetekärna fortfarande var lägre än i kontrolleret utan salixodling 2 och 3 år efter att salixodlingen upphört. Detta antyder att effekten av bortförsl av Cd vid salixodling på Cd-upptaget i vetet består över en längre tid.

Eftersom det kan förväntas att det i många fall tar ett visst antal år att föra bort en större mängd Cd från marken och att det inte finns några långliggande försök har några studier gjorts där man jämfört halten i mark där salix odlats under en längre tid, med intilliggande jämförbar mark utan salixodling (Eriksson & Ledin, 1999; Dimitriou m.fl., 2012). Eriksson & Ledins studie omfattade åtta stycken 8-30 åriga salixodlingar. Salixodlingen hade en viss effekt på lättlösligt Cd (CaCl₂-lösligt) men effekten på markens totala Cd-halt var försumbar, förmodligen till stor del för att många av odlingarna inte var särskilt välskötta och biomassauttaget därför litet. Dimitriou m.fl. gjorde en liknande studie på 14 olika platser med 10-20 år gamla salixodlingar. I detta fall var odlingarna mer välskötta och Cd-halten var genomsnittligt 12 % lägre i Salixodlingarna än i referensytorna. Denna metodik har sina brister eftersom det inte går att fastställa hur stor skillnaden mellan odling och referensyta var från början. Å andra sidan borde detta kunna slå åt båda håll. Om referensytan från början hade högre halt än den med salix odlade ytan överskattas uttaget av Cd och tvärtom ifall utgångsläget är det omvända. Så kanske borde slutsatsen vara att det är väldigt viktigt att få till en stor biomassaproduktion om Cd-reningseffekten ska bli tillräckligt snabb.

En annan tänkbar bidragande orsak till att effekten på halten i marken inte blir så stor som förväntat när man utgår från hur stort Cd-uttaget via biomassa är, kan vara att det som ofta analyseras är halten i matjorden. Även teoretiska beräkningar avser ofta matjorden. Om en stor del av upptaget sker i djupare jordlager överskattas effekten på matjordens halt om man utgår från Cd-mängd i biomassan. Algreen m.fl. (2014) fann i fältförsök att salixodling tog bort knappt 1 % av det totala Cd-förrådet i en hel markprofil ned till 70 cm djup. Så länge en efterföljande gröda också tar upp Cd från djupare lager kan dock renings-effekten ändå vara god även om effekten på matjordens halt inte är så stor.

3.2 Kunskapsluckor

Att salix generellt och speciellt vissa kloner har stor förmåga att ta upp Cd är väl belagt. Det behövs dock fler fältförsök utförda under svenska förhållanden och på olika jordar för att utreda om effekten är tillräckligt stor. Detta vidimeras i en kunskapssammanställning om åtgärder för att återställa mark som är måttligt förorenad med spårelement (gentle remediation) av Kidd m.fl. (2015). Författarna konstaterar att det finns ganska få fältstudier av hur reningseffekten påverkas av olika odlingsåtgärder och hur dessa kan optimeras för att uppnå ett lyckat resultat.

För att utreda om det fungerar i stor skala i svenskt jordbruk behöver följande frågor besvaras: Hur kan man maximera effekten genom val av kloner, odlingsåtgärder för att maximera biomassauttaget, m.m.? Hur påverkar olika markegenskaper hur stor effekten blir? Hur lång tid tar det att uppnå en påtaglig minskning av halterna i marken och av upptag i grödorna? Fungerar det i stor skala?

3.3 Tillämpningspotential

Vi bedömer att salixodling definitivt har potential som metod att rena marken från Cd. Frågan är dock hur snabbt det kan gå. Greger & Landbergs (2015) indikerar en snabb effekt, medan andra undersökningar och beräkningar tyder på en långsam effekt. Det kan dock delvis bero på att man i dessa inte använt de kloner som har störst kapacitet att ta upp Cd och att skötseln av odlingarna inte varit tillräckligt intensiv för att åstadkomma den biomassaproduktion som krävs för effektiv rening.

En fördel med att använda salixodling som markrenare för Cd är att det är en gröda som har ett kommersiellt värde som biobränsle. Det skiljer den från de hyperackumulerande växterna. På senare år har dock prisbilden varit så att intresset för salixodling avsevärt minskat. Odlingsarealen för vilken lantbrukare sökt stöd minskade från ca 13 300 ha år 2005 till ca 7 900 ha år 2017 (Jordbruksverket, 2017). År 2022 var odlingsarealen enligt Jordbruksverkets officiella statistik 4 900 ha (Jordbruksverket, 2022). Även intresset för biobränsle som sådant har minskat till förmån för andra energikällor. Salixodling drogs ju igång med statsunderstöd på 1980-talet som en alternativ energikälla när beslutet att på sikt avveckla kärnkraften togs. Nu är intentionerna andra och det har tillkommit andra energikällor som t.ex. vindkraft och solceller och produktion av el är prioriterad.

En stor del av det Cd som salix tar upp hamnar i bladen, vilket innebär att det går att öka reningseffekten om dessa också förs bort. Detta kräver dock årlig insamling av blad vilket blir kostsamt att genomföra och kräver speciell teknik/maskiner. Bladen kommer rimligtvis inte heller att vara torra när de samlas

in vilket minskar deras bränslevärde. Bladinsamling ser vi därför inte som realistiskt av kostnadsskäl.

Sammanfattningsvis, även om det med fler jämförande försök skulle gå att visa att det går att optimera odlingen av salix så att det blir en så god markreningseffekt för Cd, som de teoretiska beräkningarna antyder, så är utsikterna att tillämpa åtgärden brett på en stor areal osäkra. Det krävs nog antingen att lantbrukaren får bättre betalt för producerad biomassa eller extra betalt för en matgröda som har låg Cd-halt vilket i nuläget inte verkar så sannolikt. För att det senare ensamt ska vara ett incitament krävs nog också att det går att uppnå lika effektiv rening som i Greger & Landbergs (2015) försök så det inte tar alltför många år innan man kan börja odla låg-Cd-grödor

Möjligen skulle Cd-sanering med salixodling, om det visar sig att det med stor säkerhet går att uppnå en god effekt på relativt kort sikt, kunna vara en intressant åtgärd på en mark som har de högsta Cd-halterna där det idag är svårt att odla matgrödor med acceptabel Cd-halt.

3.4 Faktaruta kapitel 3

Faktaruta om identifiering av geografiska riskområden

Kunskapsläge

- Salix tar lätt upp kadmium (Cd) från marken och detta i kombination med kapacitet att producera biomassa gör att salixodling kan vara en metod att rena marken från kadmium.
- En viktig förutsättning för markrening med salix är att odlingen sköts väl så att biomassaproduktionen och därmed Cd-uttaget maximeras och att askan från förbränningen av salixbiomassan inte återförs till åkermarken.
- Markrening med salix är troligen mindre effektiv på kalkrika jordar p.g.a. lågt upptag av Cd.
- Markrening med salix är sannolik en relativt långsam metod för att minska kadmiumhalten.
- Intresset för salixodling har minskat på senare år eftersom den är mindre lönsam än odling av andra mer traditionella grödor.

Kunskapsluckor

- Att salix har stor potential som markrenare är väl utrett, men det finns få fältförsök som visar att detta kan realiseras under storskaliga fältförhållanden på marker med måttligt hög Cd-halt.
- Motsägande uppgifter hur snabbt minskning av upptaget i efterföljande gröda kan uppnås och lite undersökt hur man kan optimera odlingsåtgärder m.m. för att uppnå en snabb reningseffekt.

Tillämpningspotential

- Salixodling har potential som metod att rena marken från Cd.
- Osäkerhet om hur effektiv metoden är i kombination med dålig lönsamhet gör att det inte är så sannolikt att man mer aktivt satsar på salixodling som metod att rena åkermark från Cd.

4 Betydelsen av gröd- och sortval

4.1 Kadmium i våra grödor

Åtskilliga faktorer (nämnda i [kapitel 1](#) och [2](#)) såsom odling i riskområden, mullhalt, pH och Cd-tillförsel i form av gödsling och föroreningar påverkar upptaget av Cd. Upptagningsförmågan varierar även mellan grödor. Generellt har Cd-ackumulering visat sig minska i ordningen bladgrönsaker > rotfrukter > spannmålsgrödor (He & Singh, 1994). Även mellan relativt närbesläktade arter kan det finnas avsevärda skillnader i förmågan att ackumulera Cd. Inom till exempel spannmål är Cd-ackumuleringen högst i ris och durumvete, lite lägre i vete och lägst i havre, korn och råg (Eriksson m.fl., 2000). I Sverige utgör stapelgrödor som vete, majs och potatis en betydande del av vår föda och kan därför leda till ett högre Cd-intag bland barn och vuxna än t.ex. spenat, solrosfrön, linfrön, alger, tång/sjögräs och kakaoböner som ofta innehåller höga halter av Cd, men som konsumeras i en mindre omfattning (Kristersson, 2017). I länder där ris utgör en stapelgröda, t.ex. Bangladesh och Sri Lanka, har man sett att den höga riskonsumtionen kan leda till veckointag av Cd högre än världshälsoorganisationens (WHOs) tolerabla veckointag (TWI, 7 µg Cd/kg kroppsvikt) med följder för folkhälsan (Meharg m.fl., 2013).

Enligt Livsmedelsverkets matkorgsundersökning 2015, beräknas det dagliga intaget av Cd vid en genomsnittlig traditionell svensk kost vara 14 µg per person, där spannmåls-, potatis- och grönsaksprodukter utgör de livsmedelsgrupper som bidrar mest (cirka 40%, 22% respektive 14% av det totala intaget) (Kristersson, 2017; Kollander m.fl., 2023). Samtidigt är dessa tre livsmedelsgrupper väsentliga källor till flera av våra viktiga näringsämnen. Livsmedelsverket startade under december 2022 en ny matkorgsundersökning, där cirka 800 livsmedelsprodukter kommer att ingå (Livsmedelsverket 2022). Resultatet från undersökningen kommer att redovisas under 2024. Sedan 2014 utför Livsmedelsverket även årliga kontroller av tungmetaller i livsmedel där man nyligen har utökat provtagningen med 100 livsmedelsprover per år för att bättre kunna följa utvecklingen av halten Cd i spannmålsprodukter, potatis och rotfrukter (Livsmedelsverket, 2023).

4.1.1 Kadmium i potatis

Gränsvärdet för mängden Cd som är tillåten i skalad potatis är 0,10 mg/kg våtvikt (vv) (EG-förordning F2023/915), vilket motsvarar ett gränsvärde på 0,5 mg/kg torrsvikt. I Livsmedelsverkets rapport från 2015, där Cd-halten hos 34 potatisorter analyserades inom det samordnade kontrollprojektet 'Glykoalkaloider, kadmium och bly i potatis' (Elvingsson & Norlin, 2015) hade ingen av sorterna en Cd-halt som översteg det tillåtna gränsvärdet. Dock ska det tilläggas att

dessa gränsvärden bestäms enligt ALARA-principen ("så låg som rimligen är möjlig"), där gränsvärdet sätts så lågt som det är praktiskt möjligt genom god jordbruks- och tillverkningssed och med hänsyn till den risk som konsumtion av livsmedlet medför (EG-förordning F2023/915). Med stor sannolikhet skulle därför gränsvärdet vara lägre om enbart livsmedlets toxikologiska effekt hade beaktats.

Flera studier har visat att förmågan att ta upp och ackumulera Cd i knölen varierar mellan olika potatissorter (McLaughlin m.fl., 1994; Olsson 1998, Grawé, 2001; Jansson, 2002; Dunbar m.fl., 2003; Fan m.fl., 2009; Öztürk m.fl., 2011; Ashrafzadeh m.fl., 2017; Mengist m.fl., 2017; Mengist m.fl., 2017; Gray m.fl., 2019; Ye m.fl., 2020; Brengi m.fl., 2021). I en rapport från Livsmedelsverket, där Cd-halten analyserats i flera potatissorter uppdelat på län och årtal (Jorhem m.fl., 2016) hade ingen sort värden som översteg gränsvärdet för skalad potatis. De sorter som hade högst uppmätta Cd-halter hade värden kring 0,05 mg/kg vv. Bintje är en potatissort som har beskrivits som en så kallad hög-Cd-sort, med andra ord en sort som i jämförelse med andra sorter odlade under samma förhållanden, plats och år har större upptag av Cd. Även i Livsmedelsverkets analys låg Bintje bland de sorter som hade högst Cd-halt, men halten varierade mellan de 17 Bintjeprover som ingick i studien (0,004-0,046 mg/kg vv). Betydligt högre halter av Cd har uppmätts i potatissorter som har odlats i fält i Turkiet respektive Australien där koncentrationer så höga som 0,32 mg/kg vv respektive 0,23 mg/kg vv har rapporterats (McLaughlin m.fl., 1997; Öztürk m.fl., 2011).

Även om det finns en genetisk variation som ger upphov till skillnader i Cd-upptag och ackumulering mellan potatissorter så kan flera faktorer (nämnda i [kapitel 2](#)) leda till att låg-Cd-sorter ändå kan ackumulera höga halter av Cd i knölna. I en studie av Ye m.fl., (2020) jämförde man Cd-halterna i knöl, blad och stjälk hos 28 kommersiella potatissorter i Kina som odlats parallellt på två fält med olika Cd-halt. Hos nio av de 28 sorterna låg Cd-halterna i knölna över det tillåtna gränsvärdet på 0,10 mg/kg vv när de hade odlats på fält med hög Cd-koncentration och lågt pH (1,0 mg kg⁻¹, pH = 5,85). Ingen av de 28 sorterna hade Cd-halter som översteg gränsvärdet i knölna när de odlats på fält med lägre Cd-koncentration och högre pH (0,44 mg kg⁻¹, pH = 7,04). Högst koncentration av Cd fann de i potatisplantans stjälk, följt av bladen och därefter knölen som innehöll cirka 10-15% av den totala Cd-mängden i växten. Studier har visat att skalet hos vissa potatissorter kan ta upp Cd och att Cd-halten i knölen kan reduceras med cirka 10% om potatisen skalas (Olsson 1998; Corguinha m.fl., 2012; Šrek m.fl., 2012; Norton m.fl., 2015; Gray m.fl., 2019; Kollander m.fl., 2023). Det största Cd-upptaget sker ej via knölen utan via de basala rötterna för vidare transport via ledningskärl (xylem) till stjälk och blad och därefter via andra ledningskärl (floem) till knölen (Reid m.fl., 2003). Sortskillnader avseende Cd-halt i potatisknölen kan således bero på skillnader både i sorters benägenhet att ta upp Cd från marken och dels hur de transporterar och omfördelar Cd inom växten (Dunbar m.fl., 2003, Mengist m.fl., 2017). En potatissort kan med andra ord ha höga Cd-halter i stjälk och blad, men trots detta ha låga Cd-halter i knölen.

4.1.2 Kadmium i vete

Gränsvärdet för tillåten Cd-halt i vetekärna (0,10 mg/kg vv) är lägre än den tillåtna halten i durumvete (0,18 mg/kg vv), vetekli och vetegluten (0,15 mg/kg vv) samt vetegroddar (0,20 mg/kg vv), men högre än för korn och råg (0,050 mg/kg vv) samt spannmålsprodukter avsedda för barnmat (0,04 mg/kg vv) (EG-förordning F2023/915). Kadmiumhalterna i fullkornsprodukter är generellt högre än för produkter baserat på siktat vete (Kollander m.fl., 2023), men enligt en undersökning utförd av livsmedelsverket överväger trots allt hälsofördelarna kopplade till konsumtion av fullkornsprodukter risken som Cd utgör för njurarna (Livsmedelsverket, 2022). Detta gäller även i ris där Cd-koncentrationen i polerat ris beräknas vara cirka 20-40% lägre än i opolerat råris (Meharg m.fl., 2013).

Förmågan att ta upp och omfördela Cd till kärna varierar mellan vetesorter (Greger & Löfstedt, 2004; Stolt m.fl., 2006; Wiebe m.fl., 2010; Ci m.fl., 2011; Gao m.fl., 2011; Guttieri m.fl., 2015; Liu W m.fl., 2015; Liang m.fl., 2017). Precis som för andra grödor så inverkar flera andra faktorer (nämnda i [kapitel 2](#)) när det gäller hur mycket Cd som ackumuleras hos en vetesort och halten i de ätliga delarna kan variera beroende på årsmån, odlingsåtgärder och odlingsplats, också inom relativt korta avstånd. Till exempel låg Cd-halten mellan 0,061 och 0,114 mg/kg vv för prover av höstvetesorten 'Brons' som odlats i olika försöksrutor inom samma fält under 2020 (Tina Henriksson, Lantmännen Lantbruk, pers. medd.). I Lantmännens förädlingsprogram för höstvete, analyseras varje år Cd-halten hos cirka 200 förädlingslinjer och sorter som ingår i deras avkastningsförsök. Samma material utvärderas i fält under två efterföljande år. I en jämförelse av Cd-halten för de marknadssorter som ingick i avkastningsförsöket under 2021 och 2022 så var sorterna med lägst Cd-halt under 2021 även bland de sorter som hade lägst Cd-halt 2022. Likadant så fann man att de sorter som hade högst Cd-halt 2021 även hade högst Cd-halt 2022. Det går alltså att med förädling ta fram så kallade låg-Cd-sorter, sorter som i jämförelse med andra sorter alltid har lägre Cd-halt på en viss odlingsplats och år, då även en låg-Cd-sort, påverkas halten av årsmånsvariation, odlingsåtgärder och odlingsplats. Till exempel så var 'Madicken' en av sorterna med lägst Cd-halt under båda åren, men på grund av årsmånsvariation hade 'Madicken' en högre Cd-halt 2021 (0,064) jämfört med 2022 (0,029 mg/kg vv) vilket även avspeglas i sorten som hade högst Cd-halt båda åren (2021:0,111 respektive 2022:0,055 mg/kg vv). Linjer som har höga Cd-halter (0,08 mg/kg vv och högre) sorteras bort i Lantmännens förädlingsprogram (Tina Henriksson, Lantmännen Lantbruk, pers. medd.).

4.2 Analyismetoder för detektion av kadmium i växtmaterial

4.2.1 Kvantitativ bestämning

Den vanligaste analysmetoden som idag används för kvantitativ bestämning av Cd i livsmedel är induktivt kopplad plasma-masspektrometri (ICP-MS). Med ICP-MS kan man mäta många olika element samtidigt och högupplöst ICP-masspektrometri (ICP-MS) kan t.ex. detektera så låga koncentrationer som 0,1 och 0,2 µg/kg för färska/våta respektive fasta prover (Kollander m.fl., 2023). För att kunna genomföra korrekta exponeringsbedömningar är det viktigt att analyserna utförs på ett korrekt och standardiserat vis och med en metod som möjliggör detektion ner till ultraspårkoncentrationer (10–3 mg/kg) eller lägre (Kollander m.fl., 2023). EU har utsett Livsmedelsverkets SWEDAC-ackrediterade laboratorium till Sveriges referenslaboratorium när det gäller analys av grundämnen och kvävehaltiga föreningar för livsmedel och foder. Andra nationella laboratorium som kan utföra SWEDAC-ackrediterade Cd-analyser i livsmedel är ALS Scandinavia AB i Luleå och Eurofins Food & Feed Testing i Lidköping.

4.2.2 Kvalitativ bestämning

Mikro-röntgenfluorescens (µXRF) och laserablation-ICP-MS (LC-ICP-MS) är tekniker som har använts för att studera fördelningen av flera tungmetaller och näringsämnen i frön av brödvete (Lombi m.fl., 2009; Wu B m.fl., 2013; Van Malderen 2017), solros (Pessoa m.fl., 2017), majs (Imran m.fl., 2017) och kakaoböner (Thyssen m.fl., 2018). Exakta visuella kartläggningar av Cd-fördelningen i de ätliga delarna av grödor har dock varit få, vilket kan bero på att Cd-halten är så låg att det blir svårt att skilja Cd-signalen från den allmänna bakgrundsnivån (Van Malderen 2017). Några exempel finns dock där man med hjälp av µXRF- och vätskekromatografi-ICP-MS-tekniker (LC-ICP-MS) har lyckats kartlägga fördelningen av Cd i frön hos grödor såsom ris (Basnet m.fl., 2014; Yan H m.fl., 2019), durumvete (Yan B m.fl., 2020) och solros (Pessoa m.fl., 2017). I ris fann man Cd jämnt fördelat i frövitån, i solros ackumulerades Cd framför allt i hjärtbladen och i durumvete i frövitån, framförallt i fröveckets och innanför fröveckets pigmentsträngen.

4.3 Kunskapsluckor

För att kunna identifiera låg-Cd-sorter som har stabilt låga Cd-halter i de ätliga delarna, oavsett faktorer såsom odlingsplats och odlingsåtgärder, krävs omfattande försök över tid och där dessa faktorer tas i beaktande. När det gäller potatis har några mindre sortutvärderingsförsök avseende Cd utförts i Sverige (Olsson, 1998; Grawé, 2001; Jansson 2002), men ingen är av sådan omfattning

att man med säkerhet kan rekommendera låg-Cd-sorter för odling i fält med höga Cd-halter. Det saknas även studier av aktuella marknadssorter.

I jämförelse med potatis så har flera sortförsök i olika omfattning utförts i vete, men inget försök som omfattar aktuella marknadssorter och där man samtidigt kontrollerar för flera av de faktorer som påverkar Cd-upptag i vete. Då upptag och transport av Cd många gånger regleras av samma gener som styr upptag och transport av mineraler såsom Zn, Ca, koppar (Cu), Fe och Mn (Shiyu m.fl., 2020), är det viktigt att låg-Cd-sorter samtidigt vidhåller önskad nivå av essentiella näringsämnen. I många av de Cd-studier som hittills har publicerats saknas ofta information om vilka halter av de essentiella näringsämnena som de identifierade låg-Cd-sorterna har.

Sammanfattningsvis utförs inga offentliga försök avseende Cd i vete eller potatis och därmed går det inte att finna information kring vilka av dagens potatis- och vetesorter som är låg-Cd-sorter eller ge rekommendationer kring huruvida en sort, oavsett odlingsmiljö och odlingsåtgärder, kan odlas på högriskjordar utan att riskera höga Cd-halter i de ätliga delarna.

4.4 Tillämpningspotential

Forskning visar tydligt att det finns en skillnad mellan grödor, men även mellan sorter av samma gröda, avseende hur mycket Cd de kan ta upp, omfördela och lagra i de ätliga delarna. Även om variationen i denna egenskap delvis kan förklaras av genetiska skillnader mellan individer så finns det en tydlig interaktion mellan arv och miljö där flera faktorer samverkar med varandra (se [kapitel 1](#) och [2](#)). En åtgärd som bör prioriteras för att få bättre kunskap om hur olika faktorer påverkar Cd-upptag och ackumulering i olika grödor är etablering av fleråriga försök där samma sorter odlas på både hög- och lågriskjordar, under olika odlingsförhållanden och där man analyserar inte bara Cd-halten men även halten av de essentiella näringsämnena. En möjlighet att snabbt komma igång och reducera kostnaden för sådana försök skulle kunna vara att använda redan befintliga nationella sortförsök (t.ex. sortprovningen vid SLU). Med storskaliga försök av den här omfattningen skulle man kunna identifiera låg-Cd-sorter som har stabilt låga Cd-halter och högt näringsinnehåll under olika miljöförhållanden och på så vis kunna rekommendera sorter för odling på åkermark med låga till medelhöga Cd-halter. Det är även viktigt att sådana försök utförs i offentlig regi och inkluderar marknadssorter så att resultaten når ut till rådgivare och lantbrukare. Analys av Cd och mineraler är både dyrt och tidskrävande och en sådan åtgärd skulle innebära ökade kostnader för sortprovningen. När det gäller odling av vete och potatis på åkermark med mycket höga halter av Cd, kommer sannolikt även framtida låg-Cd-sorter uppnå högre Cd-halter än vad som är tillåtet för livsmedel och grödor som odlas på dessa marker får istället användas till andra ändamål, t.ex. etanolproduktion eller foder.

4.5 Faktaruta kapitel 4

Faktaruta om identifiering av geografiska riskområden

Kunskapsläge

- Förmågan att ta upp kadmium (Cd) från marken och ackumulera det i de ätliga delarna skiljer sig mellan arter, men även mellan relativt närbesläktade arter och sorter inom samma art.
- Mängden Cd en gröda tar upp från marken eller ackumulerar i de ätliga delarna styrs av det genetiska arvet men påverkas av faktorer såsom årsmånsvariation, odlingsåtgärder och odlingsplats.
- Det dagliga intaget av Cd vid en genomsnittlig traditionell svensk kost beräknas vara 14 µg per person, där spannmåls-, potatis- och grönsaksprodukter utgör de livsmedelsgrupper som bidrar mest.
- Den vanligaste analysmetoden för kvantitativ bestämning av Cd i livsmedel är induktivt kopplad plasma-atomemissions-masspektrometri (ICP-MS).

Kunskapsluckor

- Det saknas nationella studier av marknadssorter av vete och potatis där faktorer som påverkar Cd-ackumulering i de ätliga delarna såsom odlingsplats, odlingsåtgärder och årsmånsvariation tas i beaktande.
- I studier där låg-Cd-sorter identifierats ingår sällan analys av de essentiella näringsämnen trots att upptag av Cd och dessa ämnen ofta regleras av samma gener.

Tillämpningspotential

- Etablering av fleråriga försök som inkluderar både hög- och lågriskjordar, olika odlingsförhållanden och bestämning av de essentiella näringsämnen krävs för att kunna identifiera låg-Cd-sorter med vidhållen kvalitet för odling på högriskjordar. För en snabb uppstart skulle man kunna utnyttja redan befintliga nationella sortförsök.
- Vete och potatis som odlas på åkermark med mycket höga halter av Cd kan användas till t.ex. etanolproduktion.

5 Växtförädling för utveckling av lågkadmiumsorter

5.1 Klassisk växtförädling

Det finns bra förutsättningar för att ta fram så kallade låg-Cd-sorter genom växtförädling, då det finns genetisk variation inom grödor som kan ge upphov till sortskillnader avseende mängden Cd som ackumuleras i växtens ätliga delar. Klassisk växtförädling innebär att man korsar en individ som innehar önskad egenskap med en sort som saknar egenskapen, men som innehåller andra önskvärda egenskaper. Den första korsningen följs inte sällan av fler korsningar för introduktion av andra egenskaper eller återkorsningar för att få bort oönskade egenskaper som t.ex. har donerats av en vild släkting. Efter att en korsning har utförts följer selektion då de linjer (avkommor) som har den introducerade egenskapen väljs ut. Den här processen återupprepas tills man har fått fram en homogen sort som har alla för grödan viktiga egenskaper. Beroende på gröda tar det cirka tio år från första korsning till färdig sort. Om korsningsmaterialet är mer primitivt (t.ex. vilda släktingar) kan det ta betydligt längre tid.

För att ta fram sorter som över tid har stabilt låga halter av Cd, behöver man utvärdera linjer i fält under olika klimatförhållanden och på jordar med olika Cd-halter och egenskaper. Kadmium fyller inte någon biologisk funktion hos växten, utan plockas indirekt upp av samma transportörer som transporterar flera av våra viktiga näringsämnen såsom Mn, Zn, Cu eller Fe (Clemens m.fl., 2002; Nevo & Nelson 2006). Därför behöver man även försäkra sig om att man inte får lägre halter av dessa essentiella näringsämnen vid selektion av låg-Cd-sorter. Då metoderna som används för kvantitativ bestämning av dessa ämnen är arbetsintensiva och kostsamma sker Cd-utvärderingen oftast i ett senare skede i förädlingsprocessen när antalet linjer som ska utvärderas är färre (Tina Henriksson, Lantmännen Lantbruk, pers. medd.).

5.2 Nya metoder inom växtförädling

5.2.1 Markörassisterad selektion (MAS)

Markörassisterad selektion (MAS) omfattar flertalet indirekta urvalsmetoder där man använder sig av en morfologisk, biokemisk eller molekylär markör som man tidigare verifierat är kopplad till en egenskap (t.ex. låg Cd-ackumulering i de ätliga delarna) istället för att selektera baserat på egenskapen i sig (t.ex. genom att med kemiska metoder bestämma Cd-koncentrationen i den ätliga växt delen).

Inom växtförädling använder man sig framförallt av DNA-markörer, d.v.s. DNA-sekvenser som är kopplade till önskad egenskap(er), för att effektivisera förädlingen. En av fördelarna med DNA-baserade marköranalyser är att flera marköranalyser för olika egenskaper kan utföras från ett och samma prov, vilket reducerar både tidsåtgång och kostnad för provtagning och bearbetning. Genom att ta ett bladprov av en linje redan i groddstadiet och analysera dess DNA, kan man se vilka markörer och därmed vilka önskade egenskaper en linje har innan de är synliga eller kan bestämmas med hjälp av andra metoder. Exempelvis möjliggör MAS utvärdering av fler linjer och urval både tidigare i förädlingsprocessen och växtens utvecklingsstadium än vad som är möjligt med traditionella analysmetoder (se [avsnitt 4.2](#)).

Det senaste decenniet har kostnaden för genetiska analyser kraftigt reducerats samtidigt som vi har sett en snabb utveckling i datakapacitet och statistiska metoder. Detta har lett till att det nu går att studera sambandet mellan olika egenskaper och genetiska markörer som nedärvs tillsammans med egenskapen. För kartläggning av genetiska områden kopplade till en egenskap studerar man vanligtvis linjer från en korsning mellan två föräldrar som skiljer sig mycket åt avseende egenskapen man vill undersöka (kvantitativa egenskapslokus (QTL)-kartering) eller en panel bestående av hundratals sorter med stor variation för egenskapen (associationskartering). För de identifierade områdena designar man sedan DNA-markörer som till en låg kostnad kan användas för MAS.

Kadmiumackumulering är en kvantitativ egenskap, d.v.s. växtens förmåga att ackumulera Cd i en specifik del av växten regleras av flera gener. Flera genetiska områden, så kallade QTL:er har identifierats som är kopplade till Cd-ackumulering i jordbruksgrödor såsom:

- korn (Wu D m.fl., 2015; Wang m.fl., 2019; Lei m.fl., 2020),
- majs (Zdunić m.fl., 2014; Zhao X m.fl., 2018; Baseggio m.fl., 2021; Tang m.fl., 2021; Zhao F m.fl., 2022; Yan H m.fl., 2023),
- durumvete (Knox m.fl., 2009; Wiebe m.fl., 2010; AbuHammad m.fl., 2016; Oladzaad-Abbasabadi m.fl., 2018; Maccaferri m.fl., 2019),
- vete (Ci m.fl., 2011; Guttieri m.fl., 2015; Ban m.fl., 2020; Hussain m.fl., 2020; Safdar m.fl., 2020; Qiao m.fl., 2021),
- raps (Chen L m.fl., 2018),
- potatis (Mengist m.fl., 2018),
- havre (Tanhuanpää m.fl., 2007),
- sojaböna (Jegadeesan m.fl., 2010; Benitez m.fl., 2012; Nissan m.fl., 2022),
- ris (Ishikawa m.fl., 2005; Kashiwagi m.fl., 2009; Ishikawa m.fl., 2010; Ueno m.fl., 2010; Abe m.fl., 2011; Sato m.fl., 2011; Zhang X m.fl., 2011; Yan Y-F m.fl., 2013; Huang m.fl., 2015; Yan H m.fl., 2019; Liu C m.fl., 2020).

I en amerikansk studie av vårvetelinjer från en korsning mellan två vårvetesorter "UI Platinum" (UIP) och "LCS Star" (LCS), identifierade man totalt tio QTL. Tre av dessa QTL-områden låg på kromosom 5B, 7B och 7D (Qiao m.fl.,

2021). Inom dessa genetiska områden finns tre gener (TaHMA3, TaHMA2, TaMSRMK3) vars motsvarande gener (ortologer) i ris och durumvete har en roll i Cd-upptag och transport (Agrawal m.fl., 2003; Miyadate m.fl., 2011; Satoh-Nagasawa m.fl., 2012; Takahashi m.fl., 2012; Sasaki m.fl., 2014; Maccaferri m.fl., 2019; Liu C m.fl., 2020).

Ett annat exempel i vete är en studie för kartläggning av QTL kopplade till Cd- och Zn-ackumulering i höstvete (Guttieri m.fl., 2015). I studien fann de en QTL på den långa armen av kromosom 5A som var kopplad till låg Cd-ackumulering, men inte till Zn-ackumulering, i kärna. Man fann dock tecken på interaktioner mellan alleler inom QTL:en, då kombinationen av en av de identifierade hög-Cd-allelerna i kombination med en specifik låg-Cd-allel ledde till signifikant högre Cd-halter i vetekärna.

Fram till idag så finns det endast några få studier på potatis där man har försökt koppla genetiska områden till låg Cd-ackumulering i knölen (Mengist m.fl., 2018). Mengist m.fl. (2018) fann fyra QTL fördelade på kromosom 3, 5, 6 och 7 som förklarade 5-33% av den genetiska variationen för Cd-ackumulering i knölen. Samtidigt fann man fem QTL kopplade till Zn-ackumulering i knölen som förklarade 5-38% av den genetiska variationen och där tre av dem låg inom samma genetiska position på kromosom 3, 5 och 6 som de QTL man fann kopplade till Cd-ackumulering. Av dessa hade QTL:en på kromosom 5 högst effekt och låg nära en QTL för mognadstid där de tidiga sorterna visade sig ha högre koncentration av både Cd och Zn. Ingen av de andra QTL:erna visade något samband med mognadstid.

5.2.2 Genomisk selektion (GS)

Genomisk selektion är en vidareutveckling av markörassisterad selektion där man istället för att basera urvalet på några få markörer kan göra urval baserat på hundra- till tusentals markörer (Meuwissen m.fl., 2001). Genom att bygga upp en samling av individuella markörprofiler från tusentals individer inom en så kallad träningspopulation och koppla dessa markörprofiler till önskade egenskaper hos individerna i träningspopulationen kan man ta fram statistiska och matematiska modeller som kan förutse en individs förädlingsvärde. Med andra ord, hur lovande en individ är att använda som förälder i vidare korsningsarbete. Den framtagna modellen kan sedan användas tillsammans med andra individers markörprofiler för att välja ut lovande individer utan att först behöva utvärdera individen för den önskade egenskapen. Genomisk selektion har haft en snabb utveckling delvis på grund av att kostnaderna för marköranalyser har blivit mycket lägre, men även p.g.a. att metoden har visat sig effektivisera och påskynda förädlingsprocessen. Fälttester kan då hoppas över och generationsintervallet kortas ner vilket bidrar till en högre förädlingsvinst.

Antalet publicerade studier där man har använt genomisk selektion för att förutsäga en individs förädlingsvärde avseende dess Cd-innehåll är än så länge få. Detta kan delvis bero på att genomisk selektion framför allt används inom kommersiella förädlingsprogram och att resultaten därmed sällan publiceras. I en nyligen publicerad studie från en forskargrupp i Kina fann man att man med hjälp av statistiska modeller baserat på markörprofiler med hög noggrannhet kunde förutsäga Cd-halten hos 100 majslinjer (Yan H m.fl., 2023). I vete och ris har man jämfört olika statistiska modeller för att förutsäga kärninnehåll av Cd, men även Zn, Fe, Cu och Mn (El-Soda & Aljabri, 2022; Muvunyi m.fl., 2022) baserat på markörprofiler. I vetestudien ingick även Ni. Flera faktorer, t.ex. storleken på träningspopulationen, antalet markörer och deras fördelning över genomet, den undersökta egenskapens ärftlighet, precisionen i metoden som använts för att kvantifiera egenskapen, antal försöksplatser man använt för träningspopulationen, släktskap mellan träningspopulationen och testpopulationen påverkar modellens precision (Bernardo 2020, Montesinos López m.fl., 2022). Det finns därmed ingen ”gyllene modell”, utan det är viktigt att jämföra olika modeller för att identifiera den som ger störst noggrannhet för just den egenskap och population man vill utveckla.

5.2.3 Genteknik

Genomredigering, även kallat genomeditering, möjliggör till skillnad från traditionell växtförädling en exakt modifiering av enstaka gener (Debernardi m.fl., 2020; Wada m.fl., 2020; Molla m.fl., 2021). Ett av de idag mest använda genomredigeringsverktygen kallas populärt för gensaxen (CRISPR-Cas9), och med den kan man efterlikna spontana eller inducerade mutationer. Med hög precision kan man finjustera önskvärda egenskaper i redan befintliga sorter eller förädlingslinjer genom ned- eller uppreglering av nyckelgener och på så vis förhindra t.ex. upptag och transport av Cd eller lägga till konkurrerande signalvägar för att binda eller minska mängden Cd i en grödas ätbara delar. Utvecklingen av genomredigeringstekniker går fort framåt och forskning visar nu på möjligheter att även kunna ändra uttrycksnivåerna och modifiera protein-egenskaper (Anzalone m.fl., 2020).

Att öka genuttrycket genom genomredigering är ännu inte särskilt vanligt, utan hitintills är det framför allt transgenteknologi som har använts för det ändamålet. Transgenteknologin skiljer sig från genredigering genom att man istället för att modifiera befintliga gener för in en DNA-sekvens från en icke korsningsbar art (transgen) i arvsmassan. *OsHMA3* är en gen som reglerar Cd-transporten och lagringen av Cd i vakuolerna hos ris (Ueno m.fl., 2010). Med hjälp av transgenteknologi har man visat att överuttryck av *OsHMA3*-promotorn resulterade i ökade halter av Cd i rotvakuolerna och därmed en minskning av Cd-halten i riskornen (Shao m.fl., 2018; Lu m.fl., 2019). Dessutom visade genomförda fältförsök att överuttryck av *OsHMA3* inte ledde till någon minskad avkastning eller minskning i halter av essentiella mikronäringsämnen såsom Zn, Fe,

Cu eller Mn (Lu m.fl., 2019). Liknande resultat har uppnåtts i transgent vete där överuttryck av en funktionell *OsHMA3*-gen ledde till en tiofaldig minskning av Cd-transporten från rot till skott och 96% lägre Cd-ackumulering i vetekärnorna (Zhang L m.fl., 2020). I ris känner man idag till cirka 30 gener som är involverade i antingen upptag, transport eller ackumulering av Cd (Ai m.fl., 2022). Genomredigering med CRISPR/Cas9 har använts i ris för att modifiera flera av dessa nyckelgener såsom *OsNramp1* (Chang m.fl., 2020), *OsNramp5* (Songmei m.fl., 2019), *OsLCT1* (Songmei m.fl., 2019) and *OsLCD* (Chen H m.fl., 2023), med målet att uppnå låga halter av Cd i de ätliga delarna. Gener med motsvarande funktion utgör lovande mål för genomredigering i andra grödor.

5.3 Nationell förädling för lågkadmiumsorter

5.3.1 Potatis

Sedan 2006 bedrivs potatisförädling med fokus på matpotatis i Sverige vid Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) i Alnarp, hädanefter kallat Svensk potatisförädling. En del av programmet finansieras av statliga medel och resterande medel kommer från forskningsanslag. Fokus för Svensk potatisförädling ligger på sjukdomsresistens, klimatanpassning, kokkvalitet, motståndskraft mot mekaniska skador, låga halter av glykoalkaloider samt enhetlighet gällande storlek och form. Då Svensk potatisförädling är ett litet program har man idag, med rådande finansiering, ingen möjlighet att utföra storskalig selektion för låg Cd-halt i knölen.

5.3.2 Vete

Idag bedrivs en aktiv förädling hos Lantmännen för att minska Cd-halterna i vetekärna. I förädlingsprogrammet prioriteras egenskaper som hög avkastning och motståndskraft mot sjukdomar, men för de linjer som når ända fram till avkastningsförsöken, analyseras Cd-koncentrationen i kärna under två efterföljande fältsäsonger i fält med måttligt till medelhöga Cd-halter. För att kontrollera för årsmånsvariationen inkluderas några sorter som är med i försök under flera år s.k. referenssorter. Vid val av korsningsföräldrar undviker man linjer som under upprepade försök har Cd-halter över genomsnittet och linjer som har höga halter ($\geq 0,08$ mg/kg vv) sorteras bort (Tina Henriksson, Lantmännen Lantbruk, pers. medd.).

I ett samverkansprojekt mellan SLU och Lantmännen finansierat av SLU Grogrund, ska cirka 200 vetelinjer från avkastningsförsöken utlagda på tre olika platser (Bollerup, Kölbäck och Svalöv), analyseras avseende Cd-halten i kärna varje år mellan 2022-2024 (Apuli 2022). Därutöver kommer Cd-halten inom varje fält att kartläggas ner på parcellnivå med hjälp av en markbaserad

gammastrålningsmätare (Söderström & Eriksson 2010) och röntgenfluorescens (PXRF) (Adler m.fl., 2020). Ett av målen är att kunna identifiera genetiska markörer som är kopplade till stabilt låga Cd-halter i kärna oavsett år, jordmån, Cd-halten i åkermarken och pH-värdet. Tillgång till genetiska markörer som är kopplade till låga halter av Cd skulle möjliggöra urval för låg-Cd-linjer redan i ett tidigt stadiet av förädlingen och bland tusentals linjer (se markörassisterad selektion [avsnitt 5.2.1](#)). Ytterligare mål är att med hjälp av den samlade genetiska informationen kunna förutsäga vilka av linjerna som har ett högt förädlingsvärde och därmed med fördel kan användas som föräldrar för att ta fram nya låg-Cd-vetesorter (se genomisk selektion [avsnitt 5.2.2](#)).

Ett annat SLU Grogrundfinansierat samverkansprojekt mellan SLU och Lantmännen syftar till att bygga upp ett nätverk för genomredigering av livsmedelsgrödor samt att demonstrera teknikens användbarhet inom växtförädling (SLU Grogrund, 2021). Ett av målen är att förbättra genomredigering i vete genom att med olika tekniker rikta mutationer mot olika gener i vete, däribland gener involverade i upptag och transport av Cd. Projektet kommer att kunna ge viktiga ledtrådar till hur dessa gener påverkar Cd-upptag och transport, men även hur de samspelar med andra viktiga agronomiska egenskaper hos vete.

5.4 Kunskapsluckor

Att det finns en genetisk variation i Cd-upptag mellan sorter inom en gröda är väldokumenterat. Åtskilliga studier finns även publicerade där man studerat vilka gener som är involverade i upptag och transport av Cd. Studierna omfattar framför allt ris och vete, medan endast ett fåtal har inkluderat potatis. Många gener med en roll i Cd-upptag och transport har identifierats och skulle kunna utgöra mål för genomredigering, men det finns lite kunskap om funktionerna hos många av dem, inklusive hur de interagerar sinsemellan. Likaså saknas det ännu tillräcklig kunskap om hur växten styr upptaget och hur upptaget påverkas av miljöfaktorer såväl ovan som under mark.

När det gäller potatis så finns det i nuläget inget förädlingsprogram som gör urval för låg-Cd-sorter anpassade för svenska odlingsförhållanden.

5.5 Tillämpningspotential

Implementering av markörassisterad (MAS) eller genomisk selektion (GS) för låg-Cd-ackumulering i förädlingsprogrammen för vete och potatis har en stor potential att kunna leda till lägre Cd-halter i dessa grödor. Både det nationella förädlingsprogrammet för vete och potatis använder sig av MAS och har börjat implementera GS i förädlingen, men ännu inte med avseende på Cd-ackumulering. För vete finns det som tidigare nämnts ett nystartat MAS/GS projekt för Cd. En liknande satsning skulle kunna upprättas för Svensk Potatisförädling. För att identifiera markörer kopplade till Cd-upptag samt bygga upp

en bra modell för GS krävs att man har solid data från storskaliga och fleråriga försök som inkluderar förädlingsmaterial som odlats i fält med olika Cd-halt och markegenskaper. För att kunna saluföra låg-Cd-sorter behöver man dock se över bedömningskriterierna i den nationella odlingsvärdeprovnings (VCU), då man i nuläget inte kan få in en låg-Cd-sort på sortlistan ifall den inte bedöms överträffa befintliga sorter gällande nuvarande kriterier.

När det gäller CRISPR-Cas9-medierade tillvägagångssätt är det för närvarande mest effektivt vid nedreglering av gener. Fortsatt forskning kommer kunna öppna för nya möjligheter när det gäller mer specifik och partiell reglering av gener. Genomredigering är ur forskningssynpunkt ett bra komplement till MAS och GS då tekniken ger en insikt i olika geners funktion. En ökad kunskap kring vilka gener som styr upptag och transport av Cd i olika grödor och hur de regleras kommer att möjliggöra genomredigering av gener som minskar Cd-upptaget och transporten samtidigt som upptaget av viktiga element som Mn och Zn bibehålls.

För tillfället håller man inom EU på att modernisera regelverket för reglering av genomredigerade grödor. I juli 2023 kom EU-kommissionen med ett lagförslag där växter förädlade med genomredigering, efter en verifieringsprocess, skall regleras som konventionellt förädlade växter. Detta gäller de fall där utfallet hade kunnat uppstå naturligt (spontana mutationer) eller via traditionella metoder (slumpmässigt inducerade mutationer eller överföring av gener från korsningsbara grödor). Om förslaget realiserats kommer genomredigering kunna läggas till listan av förädlingsverktyg för att ta fram nya sorter med lågt Cd-upptag.

5.6 Faktaruta kapitel 5

Faktaruta om identifiering av geografiska riskområden

Kunskapsläge

- Det finns bra förutsättningar för att ta fram låg-kadmium (Cd)-sorter genom växtförädling, då det finns genetisk variation som ger upphov till sortskillnader avseende mängden Cd som ackumuleras i växtens ätliga delar.
- Kadmium (Cd) tas upp och transporteras av samma transportörer som mangan (Mn), zink (Zn), koppar (Cu) eller järn (Fe). Därför behöver man försäkra sig om att man inte förlorar några essentiella näringsämnen vid selektion av låg-Cd-sorter.
- Med traditionell förädling tar det, beroende på gröda, cirka tio år från första korsning till färdig sort. Markörassisterad selektion och genomisk selektion kan effektivisera förädlingsprocessen, då man slipper den tidskrävande och kostsamma fenotypningen och därmed kan korta ner generationsintervall med flera år samt öka antalet linjer som kan testas.
- I ris känner man idag till cirka 30 gener med en roll i antingen upptag, transport eller omlagring av Cd. Dessa geners motsvarighet i andra grödor utgör lovande mål för genomredigering.
- Idag bedrivs nationell förädling för låg-Cd-sorter av vete vid Lantmännen Lantbruk.

Kunskapsluckor

- Många gener med en roll i Cd-upptag och transport har identifierats, men ännu saknas tillräcklig kunskap kring deras funktion i växten och särskilt om hur dessa gener interagerar med varandra och andra gener.
- Det finns få kartläggingsstudier för identifiering av genetiska områden kopplade till låga Cd-halter i vete, och nästan inga i potatis.
- Det saknas ännu kunskap kring hur olika miljöfaktorer ovan och under mark interagerar och påverkar Cd-upptag och transport i växten.
- Nationell förädling för låg-Cd-sorter av potatis anpassade för svenska odlingsförhållanden saknas.

Tillämpningspotential

- Implementering av markörassisterad och genomisk selektion för låg-Cd-ackumulering i förädlingsprogrammen för vete och potatis har en stor potential att kunna leda till lägre Cd-halter i dessa grödor.
- Implementering av Cd-halt som ett kriterium för bedömning i svensk odlingsvärdeprovning (VCU) skulle kunna leda till att fler låg-Cd-sorter kommer in på sortlistan och får saluföras.
- På längre sikt, och beroende på om det av EU-kommissionens föreslagna regelverk kring genomredigering kommer att träda i kraft, kan CRISPR-Cas9-medierade metoder öppna nya möjligheter för mer precis reglering av gener som styr Cd-upptag och transport.

6 Slutord

Under de senaste decennierna har tillförseln av kadmium till svensk åkermark minskat, men trots detta ligger nuvarande exponeringsnivå via vår kost på nivåer som medför risk för folkhälsan. I Sverige utgör stapelgrödor som vete och potatis (med en måttlig halt av Cd) en betydande del av vår föda och är därmed de främsta kadmiumkällorna i vår kost. Det finns därför goda skäl till att nivån för TVI (tolerabelt veckointag) bör sänkas i vete och potatis. Potentialen för att minska Cd-halten finns, men det kommer att krävas åtgärder i flera led i livsmedelskedjan för att det ska kunna uppnås. Upptag och ackumulation av Cd i våra grödor styrs genetiskt, men påverkas av flera faktorer såsom sortval, årsmånsvariation, odlingsåtgärder och odlingsplats.

I vår rapport har vi försökt att lyfta åtgärder med potential att kunna minska vår Cd-exponering via kosten samt de områden vi anser behöver vidare forskning och utveckling. Rapporten innehåller däremot inte några beräkningar av olika åtgärders kostnadseffektivitet. Detta bör genomföras i ett senare skede för de åtgärder som anses ha potential att få genomslag på Cd-halterna i svenska grödor.

Att peka ut enskilda åtgärder som bör sättas in är svårt utifrån dagens kunskapsläge, men det finns ett flertal områden som har potential och där mer forskning och utveckling vore önskvärt. Det handlar t.ex. om vidareutveckling av sorter med låg ackumulering av Cd eller tillförsel av biokol, selen och kisel.

Vidare är det angeläget att utveckla och använda moderna metoder för identifiering av riskområden för att kunna sätta in rätt åtgärder på rätt plats och anpassa till rådande odlingsförhållanden. Platser i riskområden med höga Cd-halter i åkermarken kan behöva mer intensiva insatser medan det på den stora majoriteten av odlingsarealen kanske räcker att t.ex. hålla ett fullgott pH-värde och optimal mullhalt. Att brett jobba vidare med Cd-frågan inom växtförädlingen ses också som mycket angeläget eftersom en låg-Cd-sort har stor potential att kunna odlas även i riskområden på åkermark med medelhöga Cd-halter. Dock kommer låg-Cd-sorter som odlas på åkermark med mycket höga Cd-halter troligtvis uppnå högre Cd-halter än lämpligt för livsmedelsproduktion även om andra åtgärder sätts in. Vete och potatis som odlas på sådan åkermark kan istället användas för t.ex. etanolproduktion.

Vidare behövs styrmedel för att öka lantbrukarnas incitament att genomföra åtgärder som kan bli kostsamma. I de fall där det finns stor risk att Cd-halten i slutprodukterna hamnar över gränsvärdena så kan det finnas en ekonomisk fördel för lantbrukaren att sätta in åtgärder. Om inte så ses det oftast bara som en onödig kostnad om det inte finns någon merbetalning vid avsalu av produkter med lågt Cd-innehåll. Likaså behövs utökad finansiering inom växtförädlingen för att utveckla effektivare och lönsammare metoder för selektion för låg-Cd-sorter samt översyn av bedömningskriterierna i svensk odlingsvärdeprovning för att underlätta saluföring av låg-Cd-sorter. Idag utförs

förädling för låg-Cd-sorter i begränsad omfattning i vete men inte i potatis då det inte ryms inom rådande finansiering för Svensk Potatisförädling.

För att fortsätta arbetet med att få ner halterna i våra grödor behövs en god samverkan mellan olika aktörer, att medel avsätts till mer forskning och utveckling inom området och att resurser sätts in för att stötta lantbrukare och andra aktörer vid genomförandet av de åtgärder som behövs för att nå framgång.

Vi som har arbetat med rapporten är mycket tacksamma för det stora engagemang och värdefulla konstruktiva dialog som arbetsgruppen för den nationella kadmiumstrategin har bidragit med. Vi vill även tacka Per Hofvander, Mariette Andersson, Magnus Göransson, Rami-Petteri Apuli, Mats Söderström, Tina Henriksson, Barbro Kollander, Magnus Simonsson, Carin Sjöstedt och Jon Petter Gustafsson för granskning av utvalda delar av rapporten och värdefulla synpunkter till texten.

Referenser

- Abe T., Taguchi-Shiobara F., Kojima Y., Ebitani T., Kuramata M., Yamamoto T., Yano M., Ishikawa S. 2011. *Detection of a QTL for accumulating Cd in rice that enables efficient Cd phytoextraction from soil*. *Breeding Science*, 61, 43–51.
- AbuHammad W.A., Mamidi S., Kumar A., Pirseyedi S., Manthey F.A., Kianian S.F., Alamri M.S., Mergoum M., Elias E.M. 2016. *Identification and validation of a major cadmium accumulation locus and closely associated SNP markers in North Dakota durum wheat cultivars*. *Molecular Breeding*, 36, 1–15.
- Adams M.L., Zhao F.J., McGrath S.P, Nicholson F.A., Chambers B.J. 2004. *Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties*. *Journal of Environmental Quality*, 33, 532-541.
- Adler, K., Persson, K., Söderström, M., Eriksson, J, Pettersson C.G. 2023. *Digital soil mapping of cadmium: identifying arable land for producing winter wheat with low concentrations of cadmium*. *Agronomy* 2023, 13, 317.
- Adler, K., Piikki, K., Söderström, M., Eriksson, J., Alshihabi, O. 2020. *Predictions of Cu, Zn, and Cd concentrations in soil using portable X-ray fluorescence measurements*. *Sensors*, 20, 474.
- Adler, K., Söderström, M., 2023. *Digital kartläggning av kadmiuminnehåll i svensk jordbruksmark för riskbedömning av halter i spannmål*. Projektredovisning till Jordbruksverket, 2023-04-28.
- Affholder M.C., Flohr A. Kirchmann H. 2019. *Can Cd content in crops be controlled by Se fertilization? A meta-analysis and outline of Cd sequestration*. *Plant and Soil*, 440, 369-380.
- Agrawal G.K., Agrawal S.K., Shibato J., Iwahashi H., Rakwal R. 2003. *Novel rice MAP kinases OsMSRMK3 and OsWJUMK1 involved in encountering diverse environmental stresses and developmental regulation*. *Biochemical and biophysical research communications*, 300, 775–783.
- Ai H., Wu D., Li C., Hou M. 2022. *Advances in molecular mechanisms underlying cadmium uptake and translocation in rice*. *Frontiers in Plant Science* 13: 1003953.
- Algreen M., Trapp S., Rein A. 2014. *Phytoscreening and phytoextraction of heavy metals at Danish polluted sites using willow and poplar trees*, *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 8992–9001
- Andersson, A. 1992. *Trace elements in agricultural soils - fluxes, balances and background values*. Swedish Environmental Protection Agency, report 4077.
- Andersson, A. Bingefors, S. 1985. *Trends and annual variations in Cd concentration in grain of winter wheat*. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Sciences*, 35, 339-344.

- Anzalone A.V., Koblan L.W., Liu D.R. 2020. *Genome editing with CRISPR–Cas nucleases, base editors, transposases and prime editors*. Nature Biotechnology, 38, 824–844.
- Apuli R. 2022. *Cadmium, the hidden danger on your plate*. Journal of the Swedish Seed Association, 137, 15–20.
- Ashrafzadeh S., Gaw S., Genet R., Glover C.N., Leung D.W.M. 2017. *Natural variation in correlations between cadmium and micronutrients in potato tubers*. Journal of Food Composition and Analysis, 59, 55–60.
- Baker A.J.M., McGrath S.P., Sidoli C.M.D., Reeves R.D. 1994. *The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metalaccumulating plants*. Resources, Conservation and Recycling, 11, 41-49.
- Ban Y., Ishikawa G., Ueda H., Ishikawa N., Kato K., Takata K., Matsuyama M., Handa H., Nakamura T., Yanaka M. 2020. *Novel quantitative trait loci for low grain cadmium concentration in common wheat (Triticum aestivum L.)*. Breeding Science, 70, 331–341.
- Baseggio M., Murray M., Wu D., Ziegler G., Kaczmar N., Chamness J., Hamilton J.P., Buell C.R., Vatamaniuk O.K., Buckler E.S. 2021. *Genome-wide association study suggests an independent genetic basis of zinc and cadmium concentrations in fresh sweet corn kernels*. G3 11.8: jkab186.
- Basnet P., Amarasiriwardena D., Wu F., Fu Z., Zhang T. 2014. *Elemental bioimaging of tissue level trace metal distributions in rice seeds (Oryza sativa L.) from a mining area in China*. Environmental Pollution, 195, 148–156.
- Benitez E.R., Hajika M., Takahashi R. 2012. *Single-base substitution in P1B-ATPase gene is associated with a major QTL for seed cadmium concentration in soybean*. Journal of Heredity, 103, 278–286.
- Bernardo R. 2020. *Breeding for quantitative traits in plants*. Vol. 1. Woodbury: Stemma press, 2002.
- Brengi S.H., El-Gindy A-G.M., El-Sharkawy I., Abouelsaad I.A. 2021. *Variation in cadmium accumulation among potato cultivars grown on different agricultural sites: A potential tool for reducing cadmium in tubers*. Horticulturae, 7, 377.
- Chang J., Huang S., Yamaji N., Zhang W., Ma J.F., Zhao F. 2020. *OsNRAMP1 transporter contributes to cadmium and manganese uptake in rice*. Plant, Cell & Environment, 43, 2476–2491.
- Chen H., Ye R., Liang Y., Zhang S., Liu X., Sun C., Li F., Yi J. 2023. *Generation of low-cadmium rice germplasms via knockout of OsLCD using CRISPR/Cas9*. Journal of Environmental Sciences, 126, 138–152.
- Chen L., Wan H., Qian J., Guo J., Sun C., Wen J., Yi B., Ma C., Tu J., Song L. 2018. *Genome-wide association study of cadmium accumulation at the seedling stage in rapeseed (Brassica napus L.)*. Frontiers in Plant Science, 9, 375.

- Chen M.X., Cao L., Song X.Z., Wang X.Y., Qian Q.P., Liu W. 2014. *Effect of iron plaque and selenium on cadmium uptake and translocation in rice seedlings (Oryza sativa) grown in solution culture*. International Journal of Agriculture and Biology, 16, 1159-1164.
- Choudhary, M., Bailey L.D., Grant C.A. 1994. *Effect of zinc on cadmium concentration in the tissue of durum-wheat*. Canadian Journal of Plant Science, 74, 549-552.
- Ci D., Jiang D., Dai T., Jing Q., Cao W. 2011. *Variation in cadmium tolerance and accumulation and their relationship in wheat recombinant inbred lines at seedling stage*. Biological Trace Element Research, 142, 807–818.
- Clemens S., Palmgren M.G., Krämer U. 2002. *A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation*. Trends in Plant Science, 7, 309–315.
- Corguinha A.P.B., Gonçalves V.C., de Souza G.A., de Lima W.E.A., Penido E.S., Pinto C.A.B.P., Francisco E.A.B., Guilherme L.R.G. 2012. *Cadmium in potato and soybeans: do phosphate fertilization and soil management systems play a role?* Journal of Food Composition and Analysis, 27, 32–37.
- Dahlin A.S., Eriksson J., Campbell C.D., Öborn I. 2016. *Soil amendment affects Cd uptake by wheat – are we underestimating the risks from chloride inputs?* Science of the Total Environment, 554, 349-357.
- Debernardi J.M., Tricoli D.M., Ercoli M.F., Hayta S., Ronald P., Palatnik J.F., Dubcovsky J. 2020. *A GRF–GIF chimeric protein improves the regeneration efficiency of transgenic plants*. Nature Biotechnology, 38, 1274–1279.
- Delplanque M., Collet S., Del Gratta F., Schnuriger B., Gaucher R., Robinson B., Bert V. 2013. *Biomass and Bioenergy*, 49, 160-170.
- Dimitriou , I., Mola-Yudego, B., Aronsson, P., Eriksson, J. 2012. *Changes in organic carbon and trace elements in the soil of willow short-rotation coppice plantations*. BioEnergy Research, 5, 563–572.
- Dunbar K.R., McLaughlin M.J., Reid R.J. 2003. *The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (Solanum tuberosum L.)*. Journal of Experimental Botany, 54, 349–354.
- Ekholm P., Reinivuo H., Mattila P., Pakkala H., Koponen J., Happonen A., Hellström J., Ovaskainen M.L. 2007. *Changes in the mineral and trace element contents of cereals, fruits and vegetables in Finland*. Journal of Food Composition and Analysis, 20, 487-495.
- El-Soda M., Aljabri M. 2022. *Genome-wide association mapping of grain metal accumulation in wheat*. Genes, 13, 1052.
- Elvingsson P., Norlin R. 2015. *Samordnade kontrollprojekt 2015 Glykoalkaloider, kadmium och bly i potatis*. Livsmedelsverkets rapportserie nr 23, 2016.

- Enell A., Azzi E.E., Berggren Kleja D., Dahlin S., Ekblad A., Flyhammar P., Fröberg M., Hallin S., Hermansson S., Jones C., Landen L., Larsson M., Leroy P., Ohlsson Y., Papageorgiou A., Rijk I., Sorelius A., Sundberg C., Tiberg C. 2020. *Biokol – från organiskt avfall till resurs för nyttiggörande av jordavfall, Syntesrapport*. Statens geotekniska institut, SGI, Linköping, 2020-11-09.
- Eriksson J.E. 1988. *The effects of clay, organic matter and time on adsorption and plant uptake of cadmium added to the soil*. Water, Air and Soil Pollution, 40, 359-373.
- Eriksson J.E. 1989. *The influence of pH, soil type and time on adsorption and uptake by plants of Cd added to the soil*. Water, Air and Soil Pollution, 48, 317-335.
- Eriksson J.E. 1990. *Factors influencing adsorption and plant uptake of cadmium from agricultural soils*. Doktorsavhandling, SLU, Uppsala.
- Eriksson, J. 2021. *Tillståndet i svensk åkermark och gröda*. Data från 2011-2017. Ekohydrologi 168, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö.
- Eriksson, J. & Ledin, S. 1999. *Changes in phytoavailability and concentration of cadmium in soil following long term cropping of Salix*. Water, Air and Soil Pollution 114, 171-184.
- Eriksson, J., Mattsson, L., Söderström, M. 2010. *Tillståndet i svensk åkermark. Data från 2001-2007*. Naturvårdsverket, rapport 6349.
- Eriksson J., Stenberg B., Andersson A., Andersson R. 2000. *Tillståndet i svensk åkermark och spannmålsgröda: jordartens betydelse för markegenskaperna, samband markfaktorer och elementhalter i kärna*. Naturvårdsverket, 2000.
- Eriksson J.E., Söderström M. 1996. *Cadmium in soil and winter wheat grain in southern Sweden I. Factors influencing Cd levels in soils and grain*. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Sciences, 46, 240-248.
- Eriksson J.E., Öborn I., Jansson G., Andersson A. 1996. *Factors influencing Cd-content in crops – Results from Swedish field investigations*. Swedish Journal of Agricultural Research, 26, 125-133.
- Fan J-L., Ziadi N., Belanger G., Parent L.É., Cambouris A., Hu Z-Y. 2009. *Cadmium accumulation in potato tubers produced in Quebec*. Canadian Journal of Soil Science, 89, 435-443.
- Florijn P.J., Nelemans J.A., Vanbeusichem M.L. 1992. *The influence of the form of nitrogen nutrition on uptake and distribution of cadmium in lettuce varieties*. Journal of Plant Nutrition, 15, 2405-2416.
- Gao X., Mohr R.M., McLaren D.L., Grant C.A. 2011. *Grain cadmium and zinc concentrations in wheat as affected by genotypic variation and potassium chloride fertilization*. Field Crops Research, 122, 95-103.

- Grant C.A., Bailey L.D. 1998. *Nitrogen, phosphorus and zinc management effects on grain yield and cadmium concentration in two cultivars of durum wheat*. Canadian Journal of Plant Science, 78, 63-70.
- Grant C.A., Buckley W.T. & Wu R.G. 2007. *Effect of selenium fertilizer source and rate on grain yield and selenium and cadmium concentration of durum wheat*. Canadian Journal of Plant Science, 87, 703-708.
- Grawé K.P., Öborn I. & Gustafsson K. 2001. *Kadmium och andra spårelement i matpotatis odlad i Sverige - ett utvecklingsprojekt inom miljöövervakningen*. Slutrapport till Naturvårdsverket. 30 s.
- Gray C.W., Yi Z., Lehto N.J., Robinson B.H., Munir K., Cavanagh J-A.E. 2019. *Effect of cultivar type and soil properties on cadmium concentrations in potatoes*. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 47, 182–197.
- Greger M., Landberg T. 1999. *Use of Willow in Phytoextraction*, International Journal of Phytoremediation 1, 115-123.
- Greger M., Landberg T. 2019. *Silicon reduces cadmium and arsenic levels in field-grown crops*. Silicon, 11, 2371–2375.
- Greger M., Landberg T., Vaculík M. 2018. *Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species*. Plants, 7, 41.
- Greger M., Kabir A.H., Maity P.J., Landberg T., Lindberg S. 2016. *Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat*. Environmental Pollution, 211, 90-97.
- Greger M., Löfstedt M. 2004. *Comparison of uptake and distribution of cadmium in different cultivars of bread and durum wheat*. Crop Science, 44, 501–507.
- Gustafsson J.P. 2013. *Soil chemical behaviour of cadmium pigments from paints*. PM 4/13, Kemikalieinspektionen, Stockholm.
- Guttieri M.J., Baenziger P.S., Frels K., Carver B., Arnall B., Wang S., Akhunov E., Waters B.M. 2015. *Prospects for selecting wheat with increased zinc and decreased cadmium concentration in grain*. Crop Science, 55, 1712–1728.
- He L-L., Huang D-Y., Zhang Q., Zhu H-H., Xu C., Li B., Zhu Q-H. 2021. *Meta-analysis of the effects of liming on soil pH and cadmium accumulation in crops*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 223, 112621.
- He Q.B., Singh B.R. 1994. *Crop uptake of cadmium from phosphorus fertilizers: I. Yield and cadmium content*. Water, Air, and Soil Pollution, 74, 251–265.
- Holm P.E., Rootzen H., Borggaard O.K., Moberg J.P., Christensen T.H. 2003. *Correlation of cadmium distribution coefficients to soil characteristics*. Journal of Environmental Quality, 32, 138-145.
- Hou L., Ji S., Zhang Y., Wu X., Zhang L., Liu P. 2023. *The mechanism of silicon on alleviating cadmium toxicity in plants: A review*. Frontiers in Plant Science, 14, 1141138.

- Huang Y., Sun C., Min J., Chen Y., Tong C., Bao J. 2015. *Association mapping of quantitative trait loci for mineral element contents in whole grain rice (Oryza sativa L.)*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63, 10885–10892.
- Hussain I., Ashraf, M.A. Rasheed R., Asghar A., Sajid M.A., Iqbal M. 2015. *Exogenous application of silicon at the boot stage decreases accumulation of cadmium in wheat (Triticum aestivum L.) grains*. Brazilian Journal of Botany, 38, 223–234.
- Hussain W., Campbell M.T., Jarquin D., Walia H., Morota G. 2020. *Variance heterogeneity genome-wide mapping for cadmium in bread wheat reveals novel genomic loci and epistatic interactions*. The Plant Genome, 13, e20011.
- Husson O. 2013. *Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy*. Plant and Soil, 362, 389–417.
- Imran M., Garbe-Schönberg D., Neumann G., Boelt B., Mühling K.H. 2017. *Zinc distribution and localization in primed maize seeds and its translocation during early seedling development*. Environmental and Experimental Botany, 143, 91–98.
- Ishikawa N., Ishioka G., Yanaka M., Takata K., Murakami M. 2015. *Effects of ammonium chloride fertilizer and its application stage on cadmium concentrations in wheat (Triticum aestivum L.) grain*. Plant Production Science, 18, 137–145.
- Ishikawa S., Abe T., Kuramata M., Yamaguchi M., Ando T., Yamamoto T., Yano M. 2010. *A major quantitative trait locus for increasing cadmium-specific concentration in rice grain is located on the short arm of chromosome 7*. Journal of Experimental Botany, 61, 923–934.
- Ishikawa S., Ae N., Yano M. 2005. *Chromosomal regions with quantitative trait loci controlling cadmium concentration in brown rice (Oryza sativa)*. New Phytologist, 168, 345–350.
- Jansson G. 2002. *Cadmium in arable crops – The influence of soil factors and liming*. Doktorsavhandling, SLU, Uppsala.
- Jegadeesan S., Yu K., Poysa V., Gawalko E., Morrison M.J., Shi C., Cober E. 2010. *Mapping and validation of simple sequence repeat markers linked to a major gene controlling seed cadmium accumulation in soybean [Glycine max (L.) Merr]*. Theoretical and Applied Genetics, 121, 283–294.
- Jiao Y., Grant C.A., Bailey L.D. 2004. *Effects of phosphorus and zinc fertilizer on cadmium uptake and distribution in flax and durum wheat*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 84, 777–785.
- Jordbruksverket, 2017. *Jordbruket i siffror. En blogg från Jordbruksverket*. <https://jordbruketisiffror.wordpress.com/2017/08/11/odling-av-salix-poppel-och-hybriasp-2005-2017/> [2023-08-11].

- Jordbruksverket, 2022. Jordbruksmarkens användning 2022. Slutlig statistik. <https://jordbruksverket.se/om-jordbruksverket/jordbruksverkets-officiella-statistik/jordbruksverkets-statistikrapporter/statistik/2022-10-20-jordbruksmarkens-anvandning-2022.-slutlig-statistik#h-Resterandeakermarkinklusivevtrada> [2023-08-11].
- Jorhem L., Åstrand C., Sundström B., Engman J., Kollander B. 2016. *Frukt, bär grönsaker och svamp. Metaller i livsmedel - fyra decenniers analyser*. Livsmedelsverkets rapport nr. 10, 2016.
- Jönsson E.H.L., Asp H. 2013. *Effects of pH and nitrogen on cadmium uptake in potato*. *Biologia Plantarum*, 57, 788-792.
- Kamewada K., Nakayama M. 2011. *A widely applicable model for predicting the cadmium concentration in soil solution*. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57, 367-376.
- Kantola M., Vartiainen T. 2001. *Changes in selenium, zinc, copper and cadmium contents in human milk during the time when selenium has been supplemented to fertilizers in Finland*. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 15, 11-17.
- Kashiwagi T, Shindoh K, Hirotsu N, Ishimaru K. 2009. *Evidence for separate translocation pathways in determining cadmium accumulation in grain and aerial plant parts in rice*. *BMC Plant Biology*, 9, 1–10.
- Kidd P., Mench M., Álvarez-López V., Bert V., Dimitriou I., Friesl-Hanl W., Herzig R., Janssen O.J., Kolbas A., Müller I., Neu S., Renella G., Ruttens A., Vangronsveld J. Puschenreiter M. 2015. *Agronomic Practices for Improving Gentle Remediation of Trace Element-Contaminated Soils*. *International Journal of Phytoremediation*, 17, 1005-1037.
- Knutson P. 2011. *Spårelement i Sveriges jordbruksmark: flöden, trender och fältbalanser*. Examensarbeten 2011:02, Institutionen för Mark och miljö, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Klang-Westin, E., Eriksson, J. 2003. *Potential of Salix as phytoextractor for Cd on moderately contaminated soils*. *Plant and Soil*, 249, 127-137.
- Knox R.E., Pozniak C.J., Clarke F.R., Clarke J.M., Houshmand S., Singh A.K. 2009. *Chromosomal location of the cadmium uptake gene (Cdu1) in durum wheat*. *Genome*, 52, 741–747.
- Kollander B., Rodushkin I., Sundström B. 2023. *Multi-Element Assessment of Potentially Toxic and Essential Elements in New and Traditional Food Varieties in Sweden*. *Foods*, 12, 1831.
- Kubátová P., Száková J., Břendová K., Kroulíková-Vondráčková S., Drešlová M., Tlustoš P. 2018. *Effect of tree harvest intervals on the removal of heavy metals*

from a contaminated soil in a field experiment. *Plant, Soil and Environment*, 64, 132–137.

Kubier A., Wilkin R.T., Pichler T. 2019. *Cadmium in soils and groundwater: A review*. *Applied Geochemistry*, 108.

Landberg, T., Greger, M. 1994. *Can heavy metal tolerant clones of Salix be used as vegetation filters on heavy metal contaminated land? In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Report 50, pp. 133–144. (Aronsson, P. and Perttu, K., Eds.). Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.*

Landberg, T., Greger, M. 1996. *Differences in uptake and tolerance to heavy metals in Salix from unpolluted and polluted areas*. *Applied Geochemistry*, 11, 175–180.

Landberg T., Greger M. 2003. *Influence of N and N supplementation on Cd accumulation in wheat grain.* /th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Uppsala '03, Conference Proceedings 1:III, 90-91.

Larsson Jönsson H., Asp H., Gissén C. 2010. *Kadmiuminnehåll i matpotatis – Betydelse av odlingsåtgärder, markfaktorer och sorter*. Rapportserie Landskap Trädgård Jordbruk, nr 2010:32, Sveriges Lantbruksuniversitet, Alnarp.

Laxmar E., 2018. *Kartering av kadmiumhalt i matjord med portabelt röntgenfluorescensinstrument*. Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, 2018:06, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.

Lei G.J., Fujii-Kashino M., Wu D.Z., Hisano H., Saisho D., Deng F., Yamaji N., Sato K., Zhao F.-J., Ma J.F. 2020. *Breeding for low cadmium barley by introgression of a Sukkula-like transposable element*. *Nature Food*, 1, 489–499.

Liang X., Strawn D.G., Chen J., Marshall J. 2017. *Variation in cadmium accumulation in spring wheat cultivars: uptake and redistribution to grain*. *Plant and Soil*, 421, 219–231.

Liu C., Ding S., Zhang A., Hong K., Jiang H., Yang S., Ruan B., Zhang B., Dong G., Guo L. 2020. *Development of nutritious rice with high zinc/selenium and low cadmium in grains through QTL pyramiding*. *Journal of Integrative Plant Biology*, 62, 349–359.

Liu W., Liang L., Zhang X., Zhou Q. 2015. *Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (Triticum aestivum L.) cultivars*. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 8432–8441.

Livsmedelsverket 2022. *Nu startar en ny matkorgsundersökning*. <https://www.livsmedelsverket.se/matvanor-halsa--miljo/mat-och-naring/nu-startar-en-ny-matkorgsundersokning> [2023-08-02].

Livsmedelsverket 2023. *Kadmium och andra metaller – utökade analyser*. <https://www.livsmedelsverket.se/om-oss/samarbeten-och-projekt/projekt2/>

kadmium-och-andra-metaller-utokade-analyser-av-spannmalsprodukter-potatis-och-rotfrukter [2023-08-02].

Loganathan P., Vigneswaran S., Kandasamy J. & Naidu, R. 2012. *Cadmium sorption and desorption in soils: A review*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 42, 489-533.

Lombi E., Scheckel K.G., Pallon J., Carey A-M., Zhu Y-G., Meharg A.A. 2009. *Speciation and distribution of arsenic and localization of nutrients in rice grains*. New Phytologist, 184, 193–201.

Lu C, Zhang L, Tang Z, Huang X-Y, Ma JF, Zhao F-J. 2019. *Producing cadmium-free Indica rice by overexpressing OsHMA3*. Environment international 126, 619–626.

Maccaferri M, Harris NS, Twardziok SO, Pasam RK, Gundlach H, Spannagl M, Ormanbekova D, Lux T, Prade VM, Milner SG. 2019. *Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets*. Nature Genetics 51, 885–895.

Maier N.A., McLaughlin M.J., Heap M., Butt M., Smart M.K. 2002. *Effect of nitrogen source and calcitic lime on soil pH and potato yield, leaf chemical composition and tuber concentrations*. Journal of Plant Nutrition, 25, 523-544.

Maier N.A., McLaughlin M.J., Heap M., Butt M., Smart M.K. Williams C.M.J. 1997. *Effect of current-season application of calcitic lime on soil pH, yield and cadmium concentration in potato tubers*. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 47, 29-40.

Mayerová M., Petrová S., Madaras M., Lipavský J., ŠimonT., Vaněk T. 2017. *Non-enhanced phytoextraction of cadmium, zinc, and lead by high-yielding crops*. Environmental Science and Pollution Research, 24, 14706–14716.

McLaughlin M.J., Maier N.A., Rayment G.E., Sparrow L.A., Berg G., McKay A., Milham P., Merry R.H., Smart M.K. 1997. *Cadmium in Australian potato tubers and soils*. Wiley Online Library.

McLaughlin M.J., Maier N.A., Freeman K., Tiller K.G. Williams C.M.J. & Smart M.K. 1995. *Effect of potassic and phosphatic fertilizer type, fertilizer Cd concentration and zinc rate on cadmium uptake in potatoes*. Fertilizer Research, 40, 63-70.

McLaughlin M.J., Palmer L.T., Tiller K.G., Beech T.A., Smart M.K. 1994. *Increased soil-salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato-tubers*. Journal of Environmental Quality, 23, 1013-1018.

McLaughlin M.J., Smolders E., Zhao F.J., Grant C., Montalvo D. 2021. *Chapter one – Managing cadmium in agricultural systems*. Advances in Agronomy, 166, 1-129.

McLaughlin M.J., Williams C.M.J., McKay A., Kirkham R., Gunton J., Jackson K.J., Thompson R., Dowling B., Partington D., Smart M.K. 1994. *Effect of cultivar on uptake of cadmium by potato tubers*. Australian Journal of Agricultural Research, 45, 1483–1495.

Meharg AA, Norton G, Deacon C, Williams P, Adomako EE, Price A, Zhu Y, Li G, Zhao F-J, McGrath S. 2013. *Variation in rice cadmium related to human exposure*. Environmental Science & Technology, 47, 5613–5618.

Mengist M.F., Alves S., Griffin D., Creedon J., McLaughlin M.J., Jones P.W., Milbourne D. 2018. *Genetic mapping of quantitative trait loci for tuber-cadmium and zinc concentration in potato reveals associations with maturity and both overlapping and independent components of genetic control*. Theoretical and Applied Genetics, 131, 929–945.

Mengist M.F., Milbourne D., Griffin D., McLaughlin M.J., Creedon J., Jones P.W., Alves S. 2017. *Cadmium uptake and partitioning in potato (Solanum tuberosum L.) cultivars with different tuber-Cd concentration*. Environmental Science and Pollution Research, 24, 27384–27391.

Meuwissen T.H.E., Hayes B.J., Goddard M. 2001. *Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps*. Genetics, 157, 1819–1829.

Mia Kristersson. 2017. *Kadmium i livsmedel*. Livsmedelsverkets rapportserie nr. 15, 2017.

Minasny B., McBratney A.B., 2016. *Digital soil mapping: A brief history and some lessons*, Geoderma, 264, 301-311.

Miyadate H., Adachi S., Hiraizumi A., Tezuka K., Nakazawa N., Kawamoto T., Katou K., Kodama I., Sakurai K., Takahashi H. 2011. *OsHMA3, a P1B-type of AT-Pase affects root-to-shoot cadmium translocation in rice by mediating efflux into vacuoles*. New Phytologist, 189, 190–199.

Molla K.A., Sretenovic S., Bansal K.C., Qi Y. 2021. *Precise plant genome editing using base editors and prime editors*. Nature Plants, 7, 1166–1187.

Montesinos López O.A., Montesinos López A., Crossa J. 2022. *Multivariate statistical machine learning methods for genomic prediction (p. 691)*. Springer Nature. Cham, 2022.

Muvunyi B.P., Zou W., Zhan J., He S., Ye G. 2022. *Multi-Trait Genomic Prediction Models Enhance the Predictive Ability of Grain Trace Elements in Rice*. Frontiers in Genetics 13, 883853.

Naeem A., Saifullah, Ghafoor A., Farooq M. 2015. *Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating abilities of cultivars*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 95, 2467–2472.

Nancharaiah Y.V., Lens P.N.L. 2015. *Selenium biomineralization for biotechnological applications*. Trends in Biotechnology, 33, 323-330.

Natasha N., Shahid M., Khalid S., Bibi I., Naeem A., Niazi N.K., Tack F.M.G., Ippolito J.A., Rinklebe J. 2022. *Influence of biochar on trace element uptake, toxicity*

and detoxification in plants and associated health risks: A critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52, 2803-2843.

Nevo Y., Nelson N. 2006. *The NRAMP family of metal-ion transporters.* Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research, 1763, 609–620.

Nissan N., Hooker J., Pattang A., Charette M., Morrison M., Yu K., Hou A., Gols-hani A., Molnar S.J., Cober E.R. 2022. *Novel QTL for low seed cadmium accumulation in soybean.* Plants, 11, 1146.

Norton G.J., Deacon C.M., Mestrot A., Feldmann J., Jenkins P., Baskaran C., Me-harg A.A. 2015. *Cadmium and lead in vegetable and fruit produce selected from specific regional areas of the UK.* Science of the Total Environment, 533, 520–527.

Ojeda A.G., Escobosa A.R.C., Wrobel K., Barrientos E.Y., Wrobel K. 2013. *Effect of Cd(II) and Se (IV) exposure on cellular distribution of both elements and concentration levels of glyoxal and methylglyoxal in Lepidium sativum.* Metallomics, 5, 1254-1261.

Oladzad-Abbasabadi A., Kumar A., Pirseyedi S., Salsman E., Dobrydina M., Poudel R.S., AbuHammad W.A., Chao S., Faris J.D., Elias E.M. 2018. *Identification and validation of a new source of low grain cadmium accumulation in durum wheat.* G3: Genes, Genomes, Genetics, 8, 923–932.

Oliver D.P., Hannam R., Tiller N.S., Wilhelm N.S., Merry R.H., Cozens G.D. 1994. *The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain.* Journal of Environmental Quality, 23, 705-711.

Olsson K. 1998. *Kadmiumupptag i potatis och morötter.* Meddelande från Södra jordbruksförsöksdistriktet.

Pessoa G. de S., Júnior C.A.L., Madrid K.C., Arruda M.A.Z. 2017. *A quantitative approach for Cd, Cu, Fe and Mn through laser ablation imaging for evaluating the translocation and accumulation of metals in sunflower seeds.* Talanta, 167, 317–324.

Qiao L., Wheeler J., Wang R., Isham K., Klassen N., Zhao W., Su M., Zhang J., Zheng J., Chen J. 2021. *Novel quantitative trait loci for grain cadmium content identified in hard white spring wheat.* Frontiers in Plant Science 12, 756741.

Reid R.J., Dunbar K.R., McLaughlin M.J. 2003. *Cadmium loading into potato tubers: the roles of the periderm, xylem and phloem.* Plant, Cell & Environment, 26, 201–206.

Reimann C., Siewers U., Tarvainen T., Bitjukova L., Eriksson J., Gilucis A., Gregorauskiene V., Lukashov V.K., Matinian N.N., & Pasieczna A., 2003. *Agricultural Soils in Northern Europe: A Geochemical Atlas.* Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Reihe D, Heft SD 5, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 279 p.

Rizwan M., Ali S., Abbas T., A, Zia-ur-Rehman M., Hannan F., Keller C., Al-Wabel M.I., & Ok Y.S. 2016 *Cadmium minimization in wheat: A critical review*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 130, 43–53.

Safdar L.B., Almas F., Sarfraz S., Ejaz M., Ali Z., Mahmood Z., Yang L., Tehseen M.M., Ikram M., Liu S. 2020. *Genome-wide association study identifies five new cadmium uptake loci in wheat*. *The Plant Genome*, 13, e20030.

Saifullah, Sarwar N., Bibi S., Ahmad M., Ok Y.S. 2014. *Effectiveness of zinc application to minimize cadmium toxicity and accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.)*. *Environmental Earth Sciences*, 71, 1663-1672.

Sasaki A., Yamaji N., Ma J.F. 2014. *Overexpression of OsHMA3 enhances Cd tolerance and expression of Zn transporter genes in rice*. *Journal of Experimental Botany*, 65, 6013–6021.

Satoh-Nagasawa N., Mori M., Nakazawa N., Kawamoto T., Nagato Y., Sakurai K., Takahashi H., Watanabe A., Akagi H. 2012. *Mutations in rice (*Oryza sativa*) heavy metal ATPase 2 (*OsHMA2*) restrict the translocation of zinc and cadmium*. *Plant and Cell Physiology*, 53, 213–224.

Sato H., Shirasawa S., Maeda H., Nakagomi K., Kaji R., Ohta H., Yamaguchi M., Nishio T. 2011. *Analysis of QTL for lowering cadmium concentration in rice grains from 'LAC23'*. *Breeding Science*, 61, 196–200.

Sauve S., Hendershot W., Allen H.E. 2000. *Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden and organic matter*. *Environmental Science & Technology*, 34, 1125-1131.

Shanker K., Mishra S., Srivastava S., Srivastava R., Dass S., Prakash S & Srivastava M. 1995. *Effect of selenite and selenate on plant uptake of cadmium by kidney bean with reference to Cd-Se interaction*. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 7, 97-100.

Shanker K., Mishra S., Srivastava S., Srivastava R., Dass S., Prakash S & Srivastava M. 1996. *Effect of selenite and selenate on plant uptake of cadmium by maize (*Zea mays*)*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 56, 419-424.

Shao J.F., Xia J., Yamaji N., Shen R.F., Ma J.F. 2018. *Effective reduction of cadmium accumulation in rice grain by expressing OsHMA3 under the control of the OsHMA2 promoter*. *Journal of Experimental Botany*, 69, 2743–2752.

Shiyu Q.I.N., Hongen L.I.U., Zhaojun N.I.E., Rengel Z., Wei G.A.O., Chang L.I., Peng Z. 2020. *Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review*. *Pedosphere*, 30, 168–180.

Sigua G.C., Novak J.M., Watts D.W., Ippolito J.A. Ducey T.F., Johnson M.G., Spokas K.A. 2019. *Phytostabilization of Zn and Cd in mine soil using corn in combination with biochars and manure-based compost*. *Environments*, 6, 69.

SLU Grogrund. 2021. *Utveckling av genomeditering i livsmedelsgrödor*. <https://www.slu.se/centrumbildningar-och-projekt/grogrund/projekt/ny-sidutveckling-av-genomeditering-i-livsmedelsgrodor/> [2023-08-02].

Smolders E., McLaughlin M.J. 1996. *Chloride increases cadmium uptake in Swiss chard in a resin-buffered nutrient solution*. Soil Science Society of America Journal, 60, 1443-1447.

Songmei L., Jie J., Yang L., Jun M., Shouling X., Yuanyuan T., Youfa L., Qingyao S., Jianzhong H. 2019. *Characterization and evaluation of OsLCT1 and OsNramp5 mutants generated through CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis for breeding low Cd rice*. Rice Science, 26, 88–97.

Sparrow L.A., Salardini A.A. & Bishop A.C. 1993. *Field studies of cadmium in potatoes I Effects of lime and phosphorus on cv Russet Burbank*. Australian Journal of Agricultural Research, 44, 845-853.

Šrek P., Hejcman M., Kunzová E. 2012. *Effect of long-term cattle slurry and mineral N, P and K application on concentrations of N, P, K, Ca, Mg, As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn in peeled potato tubers and peels*. Plant, Soil and Environment, 58, 167–173.

Stolt P., Asp H., Hultin S. 2006. *Genetic variation in wheat cadmium accumulation on soils with different cadmium concentrations*. Journal of Agronomy and Crop science, 192, 201–208.

Swedish Food Agency, Edgar D., Sand S., Svanström Å., Eneroth H., Julin B., Bjeremo H. 2022. *Risk and Benefit Assessment of Whole Grain Intake in the Swedish Adult Population*. Livsmedelsverkets rapportserie nr. 11, 2022.

Söderström M., Eriksson J. 2010. *Gamma Ray Sensing for Cadmium Risk Assessment in Agricultural Soil and Grain: A Case Study in Southern Sweden*. I: Viscarra Rossel RA, McBratney AB, Minasny B (red.). Proximal Soil Sensing, s. 333–342. Springer Netherlands, Dordrecht.

Söderström M., Eriksson J. 2013. *Gamma-ray spectrometry and geological maps as tools for cadmium risk assessment in arable soils*. Geoderma, 192, 323-334. Operativt underlag för låga halter av kadmium (Cd) i spannmål

Söderström M., Eriksson J. 2018. *Operativt underlag för låga halter av kadmium (Cd) i spannmål*. Opublicerad slutrapport till Lantmännens Forskningsstiftelse, projektnr. 2016F002. 28 s.

Söderström, M., Stadig, H.F. 2015. *Test av portable röntgenfluorescens (PXRF) för bestämning av jordart, näringsämnen och tungmetaller direkt i fält – en pilot-studie*. POS Teknisk rapport 33, Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet.

- Takahashi R., Bashir K., Ishimaru Y., Nishizawa N.K., Nakanishi H. 2012. *The role of heavy-metal ATPases, HMAs, in zinc and cadmium transport in rice*. Plant signaling & behaviour, 7, 1605–1607.
- Tang B., Luo M., Zhang Y., Guo H., Li J., Song W., Zhang R., Feng Z., Kong M., Li H. 2021. *Natural variations in the P-type ATPase heavy metal transporter gene ZmHMA3 control cadmium accumulation in maize grains*. Journal of Experimental Botany, 72, 6230–6246.
- Tanhuanpää P., Kalendar R., Schulman A.H., Kiviharju E. 2007. *A major gene for grain cadmium accumulation in oat (Avena sativa L.)*. Genome, 50, 588–594.
- Thyssen G.M., Keil C., Wolff M., Sperling M., Kadow D., Haase H., Karst U. 2018. *Bioimaging of the elemental distribution in cocoa beans by means of LA-ICP-TQMS*. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 33, 187–194.
- Tlustos P., Szakova J., Korinek K., Pavlikova D., Hanc A., Balik J. 2006. *The effect of liming on cadmium, lead, and zinc uptake reduction by spring wheat grown in contaminated soil*. Plant Soil and Environment, 52, 16-24.
- Treder, W., Cieslinski, G. 2005. *Effect of silicon application on cadmium uptake and distribution in strawberry plants grown on contaminated soils*. Journal of Plant Nutrition, 28, 917–929.
- Ueno D., Yamaji N., Kono I., Huang C.F., Ando T., Yano M., Ma J.F. 2010. *Gene limiting cadmium accumulation in rice*. Proceedings of the national academy of sciences, 107, 16500–16505.
- Van Malderen S. 2017. *Optimization of methods based on laser ablation-ICP-mass spectrometry (LA-ICP-MS) for 2-D and 3-D elemental mapping*. Doktorsavhandling, Ghent University.
- Wada N., Ueta R., Osakabe Y., Osakabe K. 2020. *Precision genome editing in plants: state-of-the-art in CRISPR/Cas9-based genome engineering*. BMC Plant Biology, 20, 1–12.
- Wang S., Zhongyang L. 2016. *Pyrolysis of biomass*. Walter de Gruyter GmbH & Co, Berlin/Boston, 268 s.
- Wang X-K., Gong X., Cao F., Wang Y., Zhang G., Wu F. 2019. *HvPAA1 encodes a P-Type ATPase, a novel gene for cadmium accumulation and tolerance in barley (Hordeum vulgare L.)*. International Journal of Molecular Sciences, 20, 1732.
- Warne, M., Rayment G., Brent P., Drew N., Klim E., McLaughlin M., Milham P., Shelley B., Stevens D., Sparrow L. 2007. *Final report of the national cadmium management committee (NMC) (2000-2006)*. National Cadmium Management Committee, Report.
- Wegler K., McLaughlin M.J., Graham R.D. 2004. *Effect of chloride in soil solution on the plant availability of biosolid-borne cadmium*. Journal of Environmental Quality, 33, 496-504.

- Wiebe K., Harris N.S., Faris J.D., Clarke J.M., Knox R.E., Taylor G.J., Pozniak C.J. 2010. *Targeted mapping of Cdu1, a major locus regulating grain cadmium concentration in durum wheat (Triticum turgidum L. var durum)*. Theoretical and Applied Genetics, 121, 1047–1058.
- Wu B., Andersch F., Weschke W., Weber H., Becker J.S. 2013. *Diverse accumulation and distribution of nutrient elements in developing wheat grain studied by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry imaging*. Metallomics, 5, 1276–1284.
- Wu D., Sato K., Ma J.F. 2015. *Genome-wide association mapping of cadmium accumulation in different organs of barley*. New Phytologist, 208, 817–829.
- Wu F.B., Zhang G.P. 2002. *Alleviation of cadmium-toxicity by application of zinc and ascorbic acid in barley*. Journal of Plant Nutrition, 25, 2745-2761.
- Wångstrand H., Eriksson J., Öborn I. 2007. *Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization*. European Journal of Agronomy, 26, 209-214.
- Yan B., Isaure M-P., Mounicou S., Castillo-Michel H., De Nolf W., Nguyen C., Cornu J-Y. 2020. *Cadmium distribution in mature durum wheat grains using dissection, laser ablation-ICP-MS and synchrotron techniques*. Environmental Pollution, 260, 113987.
- Yan H., Guo H., Xu W., Dai C., Kimani W., Xie J., Zhang H., Li T., Wang F., Yu Y. 2023. *GWAS-assisted genomic prediction of cadmium accumulation in maize kernel with machine learning and linear statistical methods*. Journal of Hazardous Materials, 441, 129929.
- Yan H., Xu W., Xie J., Gao Y., Wu L., Sun L., Feng L., Chen X., Zhang T., Dai C. 2019. *Variation of a major facilitator superfamily gene contributes to differential cadmium accumulation between rice subspecies*. Nature Communications, 10, 2562.
- Yan Y-F., Lestari P., Lee K-J., Kim M.Y., Lee S-H., Lee B-W. 2013. *Identification of quantitative trait loci for cadmium accumulation and distribution in rice (Oryza sativa)*. Genome, 56, 227–232.
- Yang Y.J., Xiong J., Tao L.X. Cao Z.Z., Tang W., Zhang J.P., Yu X.Y., Fu G.F., Zhang X.F., Lu Y.L. 2020. *Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: A review*. Science of the Total Environment, 708, 135186.
- Ye Y., Dong W., Luo Y., Fan T., Xiong X., Sun L., Hu X. 2020. *Cultivar diversity and organ differences of cadmium accumulation in potato (Solanum tuberosum L.) allow the potential for Cd-safe staple food production on contaminated soils*. Science of the Total Environment, 711, 134534.

- Yousaf B., Liu G.j., Abbas Q., Ullah H., Wang R.W., Zia-ur-Rahman M., Amina, Niu Z.Y. 2018. *Comparative effects of biochar-nanosheets and conventional organic-amendments on health risks abatement of potentially toxic elements via consumption of wheat grown on industrially contaminated soil*. Chemosphere, 192, 161-170.
- Yu Y., Yuan S.L., Zhuang J., Wan Y.A., Wang Q., Zhang J.S., Li H.F. 2018. *Effect of selenium on the uptake kinetics and accumulation of and oxidative stress induced by cadmium in Brassica chinensis*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 162, 571-580.
- Zdunić Z., Grljušić S., Ledenčan T., Duvnjak T., Šimić D. 2014. *Quantitative trait loci mapping of metal concentrations in leaves of the maize IBM population*. Hereditas, 151, 55–60.
- Zhang L., Gao C., Chen C., Zhang W., Huang X-Y., Zhao F-J. 2020. *Overexpression of rice OsHMA3 in wheat greatly decreases cadmium accumulation in wheat grains*. Environmental Science & Technology, 54, 10100–10108.
- Zhang X., Zhang G., Guo L., Wang H., Zeng D., Dong G., Qian Q., Xue D. 2011. *Identification of quantitative trait loci for Cd and Zn concentrations of brown rice grown in Cd-polluted soils*. Euphytica, 180, 173–179.
- Zhao F., Wang N., Bao F., Zhao G., Jing L., Wang G., Han Q., Hao Z., Chen B. 2022. *Genome-Wide Association Study Reveals Genetic Basis of Trace Elements Accumulation in Maize Kernels*. Agriculture, 12, 262.
- Zhao X., Luo L., Cao Y., Liu Y., Li Y., Wu W., Lan Y., Jiang Y., Gao S., Zhang Z. 2018. *Genome-wide association analysis and QTL mapping reveal the genetic control of cadmium accumulation in maize leaf*. BMC Genomics, 19, 1–13.
- Zhu H.H., Chen C., Xu C., Zhu Q.H. Huang D.Y. 2016. *Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China*. Environmental Pollution, 219, 99-106.
- Öborn I., Jansson G., Johnsson L. 1995. *A field study on the influence of soil pH on trace element levels in spring wheat, potatoes and carrots*. Water, Air and Soil Pollution, 85, 835-840.
- Öztürk E., Atsan E., Polat T., Kara K. 2011. *Variation in heavy metal concentrations of potato (Solanum tuberosum L.) cultivars*. Journal of Animal and Plant Sciences, 21, 235–239.



Jordbruksverket
551 82 Jönköping
Tfn 036-15 50 00 (vx)
E-post: jordbruksverket@jordbruksverket.se
www.jordbruksverket.se