

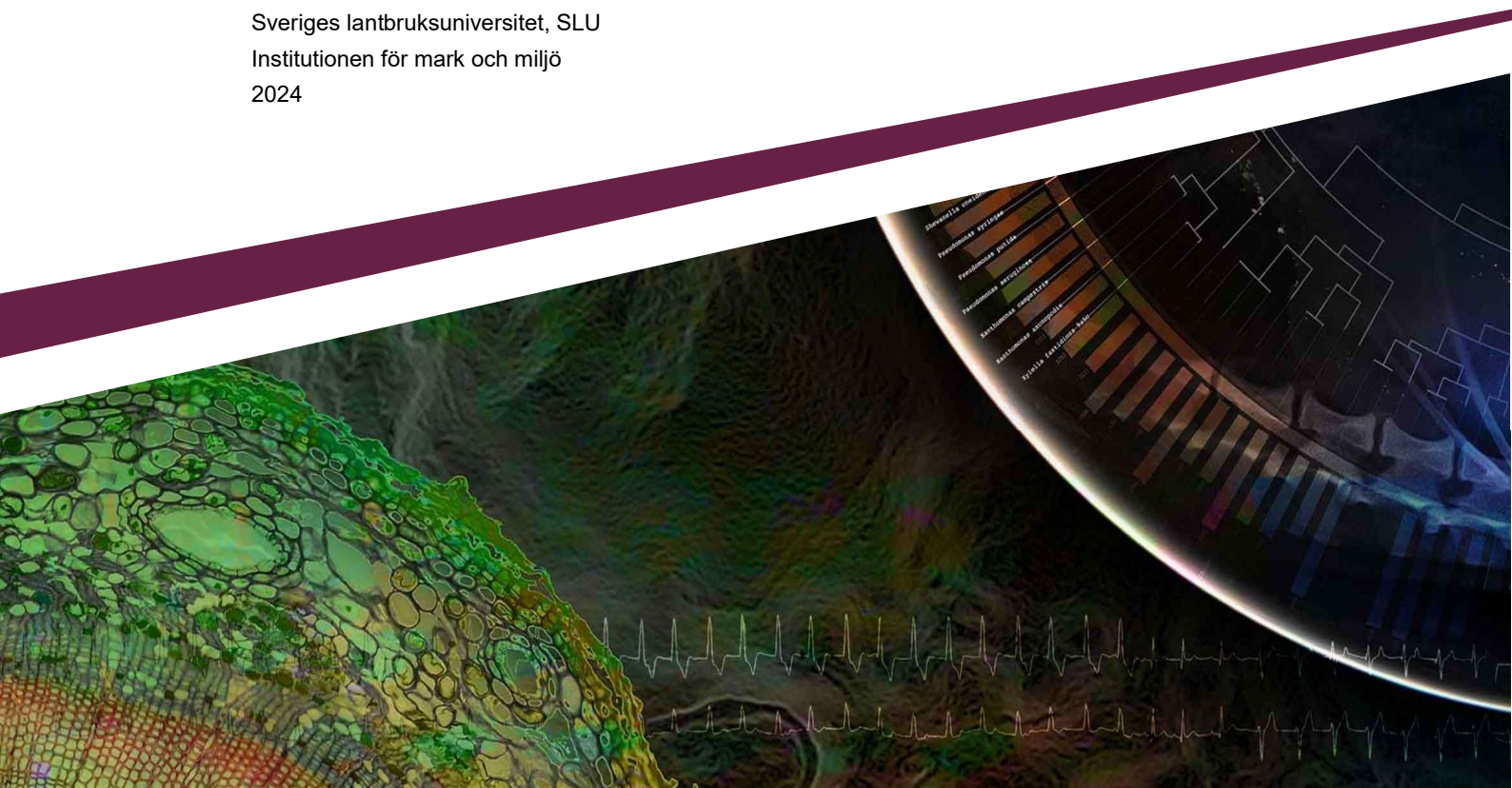


Baby Grain Passport

–säker och hållbart producerad
spannmål till barnmat

Persson K., Söderström M., Börjesson T., Pettersson CG.,
Lindgren A., Adler K., Alshihabi O., Marzec-Schmidt, K.,
Forsström S., Martinsson J., Åsman M., Mickelåker J.

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för mark och miljö
2024



Baby Grain Passport

–säker och hållbart producerad spannmål till barnmat

Kristin Persson, lantbruksuniversitet (SLU), Institutionen för mark och miljö,

Mats Söderström, SLU, Inst. för mark och miljö,

Thomas Börjesson, Agroväst Livsmedel AB,

Carl-Göran Pettersson, Lantmännen och SLU, Inst. för mark och miljö,

Anders Lindgren, Lantmännen.,

Karl Adler, SLU, Inst. för mark och miljö (nuvarande affiliering: Jordbruksverket)

Omran Alshihabi, SLU, Inst. för mark och miljö,

Katarzyna Marzec-Schmidt, SLU, Inst. för mark och miljö och Agroväst Livsmedel AB,

Sune Forsström, Lantmännen,

Johan Martinsson, Dataväxt AB,

Michael, Åsman, Lantmännen,

Johan Mickelåker, Dataväxt AB.

Utgivare:	Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö
Utgivningsår:	2024
Utgivningsort:	Skara
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
DOI:	https://doi.org/10.54612/a.2alsqqj8c8
ISBN (elektronisk version):	978-91-8046-621-9
Nyckelord:	Beslutsstödsystem, deoxynivalenol, digital markkartering, DON, havre, kadmium, livsmedelssäkerhet, mykotoxiner, nickel, precisionsodling, T2+HT2, tungmetaller, Sentinel-2, skördekartering, vete.

© 2024 Författarna

Detta verk är licenserat under CC BY 4.0, andra licenser eller upphovsrätt kan gälla för illustrationer.

Förord

I föreliggande rapport redovisas resultat från ett nyligen avslutat forskningsprojekt som syftade till att underlätta produktionen av säker spannmål avsedd för barnmat, och därigenom möjliggöra uppskalning av produktion och handel. Vi har arbetat med tre huvudsakliga aspekter: livsmedelssäkerhet, hållbar odling och spårbarhet. Råvaran ska:

- 1) *Hålla högsta kvalitet.* Halter av tungmetaller och svampgifter (mykotoxiner) ska ligga under gällande gränsvärden. Vi har tagit fram kartunderlag och riskmodeller så att man enklare kan hitta de bästa partierna.
- 2) *Vara hållbart producerad.* Vi har tagit fram verktyg så att bonden kan anpassa mängden gödning till de unika försättningarna på varje plats i fältet – det gör odlingen resurseffektiv.
- 3) *Kunna spåras tillbaka till gården.* Vi har undersökt möjligheten att följa spannmålspartier genom logistikkedjan till platsen den odlats på.

Projektet har genomförts i samverkan mellan akademi och näringsliv; Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Agroväst Livsmedel AB, Lantmännen ek. för. och Dataväxt AB genomförde projektet under åren 2019–2024 med finansiering från Formas inom det nationella forskningsprogrammet för livsmedel (dnr: 2019–02280).

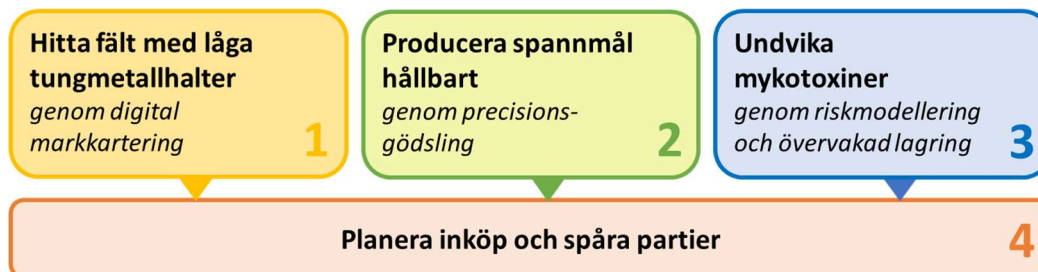
Författarna, juni 2024



Sammanfattning

Det är utmanande att producera tillräckliga volymer spannmål som uppfyller kvalitetskriterierna för barnmatsråvara, främst på grund av strikta gränsvärden för tungmetaller och mykotoxiner. Med bättre underlag i form av digitala kartor och väderbaserade riskmodeller, som tillgängliggörs i ändamålsenliga beslutssystem, kan man arbeta mer effektivt med sourcing (råvaruförsörjning), spårbarhet och kvalitetssäkring. Det ger möjlighet att öka kapaciteten att producera svensk spannmålsråvara med barnmatskvalitet, både för inhemsk konsumtion och export, och samtidigt ställa hållbarhetskrav på odlingen. Med förbättrade modeller i digitala beslutsstöd för växtodlare kan man lättare optimera resurseffektiviteten, vilket bidrar till förverkligandet av nationella och internationella miljö- och klimatmål. T.ex. kan satellitbaserade kartunderlag användas för att med högre rumslig upplösning anpassa gödselgivor till lokala behov (s.k. precisionsodling). I projektet *Baby Grain Passport* har vi arbetat med följande frågor i fyra arbetspaket:

- 1) Till vilka områden bör man styra barnmatsodlingen för att säkerställa att kadmiumhalten i grödan är så låg som möjligt?
- 2) Hur kan man kartera – och ta hänsyn till – varierande skördenivåer inom fält när man anpassar gödselgivor?
- 3) Hur kan man undvika mykotoxiner som kan bildas vid odling och lagring?
- 4) Hur kan man ta kombinerat statiska och dynamiska beslutsunderlag för effektivare sourcing och logistik av spannmål med specialkvalitet?



Baby Grain Passport-projektet är organiserat i fyra arbetspaket.

Markinformation från miljöövervakning och mätkampanjer som Mark- och grödoinventeringen samt Jordbruksverkets åkermarksprovtagning, utgör en värdefull grund för att kunna kartlägga och undvika risk för höga kadmiumhalter i spannmålspartier. Genom att kombinera punktoobservationer med högupplöst bakgrundsinformation enligt principer för digital markkartering togs detaljerade riskkartor för höga kadmiumhalter i matjord fram. I samverkan med SLUs miljöövervakning har sedan metoden generaliserats till ett ramverk för digital åkermarkskartering (Åkermarksdatakuben, ÅMDK), som kan användas för att förhållandevis snabbt ta fram nya eller uppdaterade kartprodukter även över flera andra tungmetaller – i projektet gjordes en test med kartläggning av nickelhalter i mark och i havre. I kartlägningsarbetet blev det tydligt att vissa geografiska områden är särskilt lämpade för produktion av spannmål till barnmat. Risken för att påträffa kadmiumhalter (och nickelhalter) över gränsen för barnmat i havre och vete är liten i t.ex. stora delar av Västsverige

(Halland, Västra Götaland och Värmland). Resultat från kadmiumkarteringen i marken finns tillgänglig här: https://bit.ly/sannolika_kadmiumhalter.

Precisionsstyrning av växtnäring tillämpas idag ganska brett men det finns utrymme till ytterligare förbättring, t.ex. genom att hänsyn tas till varierande skördepotential inom fält. För att kunna göra det behövs effektiva metoder att generera underlag i form av detaljerade skördekartor. Fritt tillgängliga satellitdata kan nyttjas för förenklad skördekartering, utan krav på egen utrustning. När det gäller satellitbaserad skördekartering är det lämpligt att arbeta på en något grövre upplösning än den ursprungliga upplösningen hos satellitbilderna, t.ex. 40 m eller ett antal homogena zoner inom fält. Modellerna blir mer tillförlitliga om de bygger på ett vegetationsindex som är känsligt för grödans vattenstatus (NDWI) och om man använder satellitdata från ett relativt sent utvecklingsstadium (nära mjölkmodnad), alternativt tidsserier av data från uppkomst fram till detta stadium.

Prognossystem och mätprogram för mykotoxinerna DON och T2+HT2 är nödvändiga för att under pågående säsong informera inköpsprocessen samt för fortsatt kunskapsuppbyggnad kring biologi och utbredning av de fusariumsvampar som bildar toxinerna. För att säkert komma under det nya gränsvärde för T2+HT2, som från och med 2024 gäller för skalad havre till barnmat, bör man ha halter <40 ppb i oskalad havre (vilket är vad som mäts vid spannmålmottagning). I de provtagningar och kartläggningar som gjorts kan vi se att förekomsten av höga halter av DON och T2+HT2 varierar geografiskt och mellan år. Högre halter av T2+HT2-toxinerna (vilka är mindre väl undersökta och mer toxiska än DON) är kopplade till varmare och torrare väder under juli samt förekomst av T2+HT2 i närområdet föregående år. När det gäller DON bör halten ligga under 200 ppb i obearbetad spannmål för att man med säkerhet ska komma under gränsvärdet för barnmat i bearbetade produkter. Baserat på data från 80 fältförsök i havre utvecklades fler väderbaserade prognosmodeller för att bedöma om den halten kommer att överskridas. Den prognosmodell som fungerade bäst gav 70 % korrekta klassificeringar, vilket bedöms tillräckligt bra för att vara användbart som riskindikator. Det är viktigt att övervaka lagrad spannmål för att tidigt upptäcka, avvikelser och risk för mykotoxin-bildning. Experiment i små testsilor visade att när koldioxidhalterna steg över 500 ppm, kunde man observera en tydlig tillväxt av mögelsvampar i lagrad vete. Koldioxidövervakning kan därför vara lovande som metod för tidig detektion av lagermögeltillväxt med risk för toxinbildning.

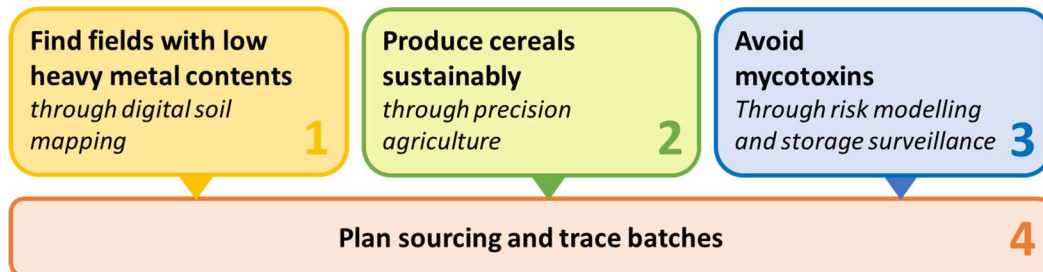
Inköp av spannmål med särskilda kvalitetskrav är en kritisk process som i grova drag innebär att man utifrån ställda krav hittar de volymer som är bäst lämpade. Lantmännen utvecklar nu sina interna strategier och system för inköp och logistik av spannmål med specialkvaliteter. Genom att nyttja bl.a. framtagna riskkartor och riskmodeller från projektet som underlag, kan man få en säkrare urvalsbas och bli effektivare. I processen kan man samtidigt ställa krav på att råvaran är hållbart odlad. Det är denna levande infrastruktur av data, metoder och rutiner som utgör *Baby Grain Passport*.

Nyckelord: Beslutsstödsystem, deoxynivalenol, digital markkartering, DON, havre, kadmium, livsmedelssäkerhet, mykotoxiner, nickel, precisionsodling, T2+HT2, tungmetaller, Sentinel-2, skördekartering, vete.

Executive summary

It is challenging to produce sufficient volumes of cereals that meet the quality criteria for baby food, mainly due to strict limits for heavy metals and mycotoxins. With better decision support in the form of maps and models, which are made available in interactive systems, one can work more efficiently with sourcing, traceability and quality assurance. It provides the opportunity to increase the capacity to produce Swedish grain with baby food quality, both for domestic consumption and export. It is also possible to include sustainability requirements on the crop production. With improved digital decision support, it is easier to optimize resource use efficiency, and thereby contribute to the realization of national and international environmental and climate goals. For example, satellite-based maps can be used to adapt fertilizer rates to local needs with higher spatial resolution (so-called precision agriculture). In the Baby Grain Passport project, we have worked on the following questions in four work packages:

- 1) From which areas should cereals for baby food be sourced in order to ensure that the cadmium content in the grain is as low as possible?
- 2) How can varying yield levels within fields be mapped – and taken into account – when fertilizing the crop?
- 3) How can one avoid mycotoxins from crop production and grain storage?
- 4) How can dynamic and static decision support be taken into account for more efficient sourcing and logistics of grain with special quality?



The Baby Grain Passport-project is organized in four work packages.

Soil information from environmental monitoring programmes and national measurement campaigns form a valuable basis for being able to map and avoid the risk of high cadmium concentration in crops. By combining point observations with high-resolution background information, according to principles of digital soil mapping (DSM), detailed probability maps of different cadmium levels in topsoil were produced. In collaboration with SLU's environmental monitoring unit, the method has been generalized into a DSM framework for arable land (Åkermarksdatakuben, ÅMDK), which can be used to produce new or updated map products more efficiently. During the work, it became evident that certain geographical areas are particularly suitable for the production of cereals suitable for baby food. The risk of finding cadmium levels above the limit for baby food in oats and wheat is small in e.g. large parts of western Sweden (Halland, Västra Götaland and Värmland). The soil cadmium maps can be explored here: https://bit.ly/sannolika_kadmiumhalter.

Precision crop nutrient management is now quite widespread, but there is room for improvement, for example by taking varying yield potential within fields into account, (current models are based

on an expected field average of the yield). For that, efficient methods to generate detailed yield maps are needed. We investigated how freely available satellite data can be used for simplified yield mapping, without need for own yield mapping equipment. Results show that it is advisable to use a relatively coarse resolution (ca 40 m) or a number of homogeneous zones within fields. The most reliable models were based on a vegetation index that is sensitive to the water status of the crop (NDWI). Model performance was improved by using satellite data from a relatively late stage of crop development (around milk maturity) or time series of data from emergence to this stage.

Occurrence of the Fusarium mycotoxins DON and T2+HT2 varies not only geographically but also between different years. Forecast systems and measurement programs are necessary to inform the sourcing process, as well as for improving our knowledge about the biology and distribution of the Fusarium species that form the toxins. In order to safely fall below the new limit value for T2+HT2 that applies from 2024 for dehulled oats for baby food, one should have levels <40 ppb in unprocessed oats (which is what is sampled at grain reception). We have seen that the presence of higher levels of T2+HT2 toxins (which are less researched and more toxic than DON) varies substantially between regions but is also linked to warmer and drier weather in July as well as the presence of T2+HT2 in the neighbourhood area the previous year. As for DON, it is considered reasonable to aim to be below 200 ppb in unprocessed grain to meet the limit for baby food in processed products. Based on data from 80 field trials in oats, more weather-based forecast models were developed to assess the risk for exceeding this level. The prediction model that performed best produced 70% correct classifications, which is considered good enough to be useful as a risk indicator. It is important to monitor stored grain to detect deviations and the risk of mycotoxin formation as early as possible. Experiments in small test silos showed that when carbon dioxide levels rose above 500 ppm, a clear growth of moulds could be observed in stored wheat. Carbon dioxide monitoring is therefore considered promising as a method for early detection of mould growth in stored cereals with risk of toxin formation.

Sourcing of special quality grain is a critical process, and means finding the volumes that are best suited, based on a set of quality criteria. Lantmännen is now developing its internal strategies and systems for sourcing and logistics of grain with special qualities. By using risk maps and risk models from the project, together with other information, one can get a safer selection base of producers and become more efficient. The process allows for other types of selection criteria, such as for sustainability (e.g. precision N management). This living infrastructure of data, methods and routines forms the *Baby Grain Passport*.

Keywords: cadmium, decision support system, deoxynivalenol, digital soil mapping, DON, food safety, heavy metals mycotoxins, nickel, oats, precision agriculture, Sentinel-2, T2+HT2, wheat, yield mapping.

Innehållsförteckning

1	Inledning	11
1.1	Gällande gränsvärden för kadmium och mykotoxiner	11
1.2	Möjlighet till bättre resursutnyttjande genom platsspecifik odling.....	12
1.3	Bättre beslutsunderlag ger säker produktion och möjlighet till ökade volymer.....	13
2	Att hitta produktionsområden med låga kadmiumhalter i marken	15
2.1	Kadmium i mark och spannmål.....	15
2.2	Kartläggningsmetodik	17
2.2.1	Beräkningsmodellens gränsvärden	18
2.2.2	Beräkningsmodellen	18
2.2.3	Validering av beräkningsmodellen.....	19
2.2.4	Regional modell	20
2.2.5	Grödprover.....	20
2.2.6	Kartor på blocknivå och för kilometerrutor.....	21
2.3	Resultat och diskussion	21
2.3.1	Kartor över sannolikheter.....	21
2.3.2	Validering av kartmodellerna	22
2.3.3	Uppdatering med regional PXRF-modell.....	24
2.3.4	Kartor över Cd-halter	24
2.3.5	Halter i gröda	24
2.3.6	Jämförelse med medelhalten på nio fält.....	26
2.3.7	Halt i gröda i förhållande till halt i marken.....	27
2.4	Sammanfattande slutsatser om kadmiumkartläggningen.....	28
2.5	Åkermarksdatakuben – förenklad kartläggning av tungmetaller.....	29
3	Att producera spannmål hållbart genom precisionsodling.....	33
3.1	Att anpassa kvävegivan till varierande behov.....	33
3.1.1	Skördekartering med tröska.....	34
3.1.2	Empiriska modeller	34
3.1.3	Mekanistiska modeller	35
3.1.4	Semi-empiriska modeller	35
3.2	Empirisk satellitbaserad skördekartering	36
3.2.1	Metod.....	37
3.2.2	Resultat.....	38

3.2.3	Implementering i beslutsstödsystem	39
3.3	Semi-empirisk konceptuell skördmodellering	40
3.3.1	Metod	40
3.3.2	Resultat	43
3.3.3	Diskussion	44
4	Att bedöma risk för bildning av mykotoxiner vid odling och lagring.....	47
4.1	Bakgrund och utmaningar	47
4.2	DON-kartering av förekomst och vidareutveckling av prognosmodeller.....	48
4.2.1	Arbete med prognosmodellen baserat på försöksdata	51
4.3	Kartering av T2+HT2 och koppling mellan vädervariabler och toxinförekomst	54
4.3.1	Geografisk variation av T2+HT2 i havreprover	54
4.3.2	Samband mellan väderdata och T2+HT2 värden.....	56
4.3.3	Diskussion – geografisk variation och vädervariabler	56
4.3.4	Inomfältvariation i förekomst av T2+HT2	57
4.3.5	Effekt av kärnstorlek på effekten av skalning	58
4.4	Koldioxid som indikator på mögeltillväxt i lagrad spannmål	59
4.4.1	Bakgrund.....	59
4.4.2	Experiment.....	60
5	Att köpa in och spåra spannmål med särskilda kvalitetskrav	63
5.1	Digitalisering av spannmålsvärdekedjan	63
5.2	Spårbarhet	64
5.3	Sourcing (råvaruförsörjning) av spannmål	66
5.4	Nyttor och behov med ett planeringsverktyg för spannmålsinköp	70
5.5	Utmaningar.....	70
6	Slutsatser.....	73
7	Tack	75
8	Referenser	75

1 Inledning

Den här rapporten handlar om att säkerställa god kvalitet hos vete och havre som ska användas till mat för små barn – den handlar om att producera säker spannmål till välling och gröt, men också om att odla hållbart och om möjligheten att spåra spannmålspartier tillbaka till gården den odlats på. Målet är att markant öka kapaciteten att producera spannmål av allra högsta kvalitet.

Gränsvärden för vissa tungmetaller och giftiga ämnen producerade av mögelsvampar är satta så lågt att det ställer stora krav på att hitta de bästa partierna. Utmaningen är lika stor i ekologiskt som i konventionellt odlad spannmål. Hela kedjan måste fungera – från fältet där spannmål odlas till producenten av barnmat – man måste ha kontroll på och hantera utvalda partier så att kvaliteten och hållbarheten kan garanteras. Det gör att svensk spannmål avsedd för barnmat blir attraktiv på exportmarknaden, när allt större krav ställs på kvalitet och spårbarhet.

1.1 Gällande gränsvärden för kadmium och mykotoxiner

För barnmatskvalitet är det huvudsakligen två gränsvärden som kan vara svåra att garantera i vete och havre. Det är halten av tungmetallen kadmium (Cd) och halten av ett gift som bildas av Fusariumsvampar under odlingen som heter deoxynivalenol (DON). Nyligen har dock även gränsvärden för två andra gifter som bildas av Fusariumsvampar (T2+HT2 toxin) införts, vilket gör att dessa också behöver kontrolleras noggrant. Kadmium (Cd) i vete och havre kommer till största delen från marken där grödan växer. DON bildas i spannmål när väderlek och markfuktighet är rätt för svampen. Det finns skillnader i risker mellan olika geografiska områden, både för kadmium och för svampgifter. Sedan kan man även med rätt odlingsåtgärder påverka riskerna.

EU-kommissionens gränsvärden för Cd i spannmålsbaserad barnmat är 0,04 mg kg⁻¹ (Förordning 2023/915; anges i regelverket i våtvikt). Det kan jämföras med det generella gränsvärdet för vete och havre som är 0,10 mg kg⁻¹. I råg och korn är tillåten halt 0,05 mg kg⁻¹. Betydligt högre tillåtna Cd-halter finner man i t.ex. durumvete (0,18 mg kg⁻¹), ris, quinoa och vetekli (0,15 mg kg⁻¹), och i vetegroddar (0,20 mg kg⁻¹). I det här projektet har vi arbetat med målet 0,04 mg kg⁻¹, trots att man i spannmålsanalyser normalt anger halterna i torrsvikt. Det betyder alltså att 0,04 mg Cd kg⁻¹ i torrsvikt är en striktare gräns än den tillåtna halten (som man kan anta gäller 14 % vattenhalt).

Gränsvärdena för DON som gäller för obearbetad spannmål och som skall användas för livsmedelsändamål varierar för olika spannmålslag. Gränsvärdet har nyligen skärpts för vete från 1250 ppb till 1000 ppb medan havre behåller det gamla gränsvärdet 1750 ppb (Förordning 2024/1022).

Under 2024 införs även ett gränsvärde att på EU-nivå för toxinerna T2+HT2 (Förordning 2024/1038). För obearbetad spannmål är skillnad mellan havre som ligger på 1250 ppb och vete (50 ppb). För bearbetade produkter avsedda att användas för barnmat är gränsen för T2+HT2 satt till 10 ppb för både havre och vete. Detta betyder att industrin behöver sätta betydligt högre krav på havrens ursprungliga innehåll av T2+HT2 än 1250 ppb, vilket vi studerat och diskuterat inom projektet.

Svamptoxiner kan också utvecklas om spannmål lagras vid fel kombination av vattenhalt och temperatur, vilka båda ska vara så låga som möjligt. Ochratoxin A (OTA) är det mest studerade svamptoxinet som kan bildas under lagring av spannmål i Sverige. Anledningen är även här att det finns strikta gränsvärden och att de även här är satta lägre än för barn och andra känsliga konsumentgrupper. OTA kan bildas av *Aspergillus* och *Penicillium*svampar, i Sverige företrädesvis av *P. verrucosum*. Spannmålslager övervakas ofta genom temperaturmätning, men mätning av koldioxid (CO₂) är en ny möjlighet som vi arbetat med inom projektet.

1.2 Möjlighet till bättre resursutnyttjande genom platsspecifik odling

För att uppnå högsta kvalitet, men ändå skapa hållbarhet vad gäller naturresursutnyttjande, miljöpåverkan och ekonomi, måste man anpassa odlingen till den enskilda platsens förutsättningar. Detta kallas precisionsodling eller precisionsjordbruk och betyder att man har som mål att göra rätt åtgärd på varje enskild plats på fältet (till exempel Gebbers och Adamchuk 2006).

Med *Farm to Fork*-strategin strävar EU-kommissionen dels efter att minska förluster av växtnäringsämnen till miljön med 50 % (20 % fram till 2030 jämfört med basåret 1990), och dels efter att säkra produktionen av näringsrik och prisvärd mat till medborgarna (European Commission, 2020). Samtidigt pekar Jordbruksverket ut effektivare resursanvändning som central för lantbrukets bidrag till att nå Sveriges miljö kvalitetsmål *Minskad klimatpåverkan* och betonar att vi behöver ny teknik och innovation för att förverkliga detta (Jordbruksverket 2023). Cirka 18 % av Sveriges utsläpp av växthusgaser kommer från jordbruket och 7,8 % av jordbrukets utsläpp kommer från användning av mineralgödsel (*ibid.* baserat på SCB 2023).

Genom s.k. precisionsodling kan man öka utnyttjandegraden av tillfört kväve och därmed minska riskerna för förlust till miljön –man anpassar mängden insatsmedel till lokala behov i hög rumslig upplösning, även inom fält. I en svensk studie, simulerade Karlsson Potter *et al.* (2022) en minskning av lustgasutsläpp med 15 % med platsspecifik kväveoptimering inom svenska fält, och Delin och Stenberg (2014) visade att nitratläckage ökade exponentiellt när platsspecifika optimala kvävehalter överskreds i svensk spannmål.

Platsspecifik kvävekomplettering är numera vanligt. År 2021 gödslades uppskattningsvis 40–50 % av den svenska höstvetarealen med variabel kvävegiva med hjälp av traktormonterade N-sensorer eller satellitbildsbaserade beslutsstödsystem (opublicerad statistik från Yara AB, Malmö, Sverige; opublicerad undersökning av Lantbrukarnas Riksförbund, 2020). Det är dock fortfarande ovanligt att ta hänsyn till varierande skördepotential inom fält, när man plantsanpassar kvävegivor. För att kunna göra det måste man ha effektiva metoder att ta fram beslutsunderlag i form av skördekartor eller skördeprognoser.

1.3 Bättre beslutsunderlag ger säker produktion och möjlighet till ökade volymer

Endast en liten del av allt vete och havre som produceras går till barnmat, och nuvarande system för planering och hantering är komplexa och innebär mycket manuellt arbete. Med bättre dataunderlag, verktyg och rutiner, kan man lättare hitta och hantera vete och havre av barnmatskvalitet. Det gör att man kan skala upp produktionen. De utarbetade rutinerna kan sedan utvidgas till arbete med andra specialkvaliteter.

2 Att hitta produktionsområden med låga kadmiumhalter i marken

2.1 Kadmium i mark och spannmål

Kadmiumhalten i spannmål varierar inte slumpmässigt (Söderström och Eriksson, 2013). Den viktigaste faktorn som avgör halten i spannmålskärnor är Cd-halten i marken. Ett antal andra faktorer påverkar också upptaget, vilket gör att det är en utmaning att i detalj beräkna vilken Cd-halt den skördade grödan kommer att ha på ett enskilt fält (Bengtsson *et al.*, 2023). Om man lyfter blicken från det enskilda fältet, och undersöker hur halterna i grödor och mark varierar regionalt, så är dock mönstret mer förutsägbart (Eriksson *et al.*, 2010, Eriksson *et al.*, 2017, Söderström och Eriksson, 2013). I det här projektet är målet att i första hand kartlägga Cd-halten i åkermark på ett mer detaljerat sätt än vad som gjorts tidigare. Med det som utgångspunkt görs sedan en bedömning av halten i spannmål som baseras på statistik av tidigare gjorda analyser, och med målet att lokalisera geografiska områden med de allra lägsta halterna som säkerställer att gränsvärdena för barnmat inte överskrids.

Nuvarande gränsvärden för barnmat (se vidare kap. 1.1 ovan) kan delvis vara utmanande att nå, särskilt vad gäller höstvetete. Andelen prover i södra Sverige (avser Skåne-Gävleborg, som är området som kartlagts i detta projekt) med en Cd-halt i spannmålskärna som ligger under gränsvärdet för barnmat ($0,04 \text{ mg kg}^{-1}$) är i höstvetete 47 % och för havre 85 % (enligt data från Mark- och grödoinventeringen; $n=486$ för höstvetete, och $n=364$ för havre). Motsvarande andel som ligger under det generella gränsvärdet $0,10 \text{ mg kg}^{-1}$ är 96 % för höstvetete och 98 % för havre. Mark- och grödoinventeringen görs inom miljöövervakningens programområde Jordbruksmark på Naturvårdsverket och genomförs av SLU (se vidare t.ex. Eriksson *et al.*, 2021, och <https://www.slu.se/institutioner/mark-miljo/miljoanalys/akermarksinventeringen>).

Cd-halten i svensk jordbruksmark har kartlagts vid några olika tillfällen under senaste decennierna (t.ex. Eriksson *et al.*, 1995; 1997; 2010; 2021). Hittills gjord kartläggning har enbart varit relativt översiktlig (med en rumslig upplösning på som mest 2,5 km). För mindre områden har kartframställningar gjorts med hög geografisk detaljeringsgrad (50 m), t.ex. över delar av Östergötland (Söderström och Eriksson, 2010) respektive sydöstra Skåne (Söderström och Eriksson, 2013). I dessa fall har ny provtagning av åkermark genomförts, och delvis kombinerats med data från Mark- och grödoinventeringen. Dessutom har Cd-halter i provpunkterna kombinerats med andra typer av data som t.ex. härrör från geofysiska

underökningar eller fjärranalys för att om möjligt kunna ta fram mer högupplösta prediktionsmodeller. Nyligen presenterade Adler *et al.* (2023) en ny prediktionsmetodik för Cd-halten i åkermarkens matjord (0–20 cm djup) i Skåne. Jordar med hög halt organiskt material (mullhalt >20 %) undantogs eftersom dessa gjorde prediktionsmodellerna sämre. Även i detta fall hade kartprodukten en hög detaljeringsgrad (50 m pixlar). Metoden som användes var digital markkartering baserat på maskininlärning (beskrivs t.ex. av McBratney *et al.*, 2003), där grunden var en databas av uppmätta och predikerade Cd-halter (data från Mark- och grödoinventeringen kombinerat med Jordbruksverkets nationella jordartskartering; Paulsson *et al.*, 2015). I området Skåne-Gävleborg finns knappt 1500 Cd-analyserade jordprover i Mark- och grödoinventeringen där mullhalten är som mest 20%. I Jordbruksverkets nationella jordartskartering finns drygt 11000 jordprover i ej organiska jordar, dessa är dock inte analyserade med avseende på Cd-halt. Emellertid har det gjorts mätning med portabel röntgenfluorescens (PXRF) i alla dessa prover, och en beräkningsmodell har tagits fram för att uppskatta Cd-halten i Jordbruksverksproverna (Adler *et al.*, 2020). Eftersom det är mätt med PXRF på både jordproverna i Mark- och grödoinventeringen och på jordproverna i Jordbruksverkets nationella provtagning, öppnas nya möjligheter för mer detaljerad kartläggning av framförallt vissa tungmetaller. Halten Cd kan inte mätas direkt i jordprov från åkermark med PXRF p.g.a. att halten är så låg, men Cd-halten går att beräkna m h a andra ämnen (Adler *et al.*, 2020).

I det här arbetet var avsikten att vidareutveckla den digitala markkarteringen till att omfatta åkermarken från Skåne t.o.m. Gävleborg, med bibehållen rumslig upplösning. Därtill var målet att ta fram en ny typ av karta innehållande en fördelning av sannolikheter för olika halter på varje plats, snarare än ett predikerat värde. Kopplingen till halter i spannmål görs genom jämförelser med data från Mark- och grödoinventeringen.

Som en förlängning av arbetet med Cd-kartläggningen skapades också ett ramverk för framtida kartläggning av andra ämnen i Sveriges åkermark – den s k Åkermarksdatakuben. Genom att vissa andra ämnen ger samma halter med PXRF som vid laboratorieanalys (t.ex. järn, zink och bly), och halten av en del andra ämnen kan på samma sätt som för Cd beräknas (t.ex. nickel), öppnar Åkermarksdatakuben möjligheten att snabbt kunna ta fram kartor över flera andra tungmetaller i åkermarken.

2.2 Kartläggningsmetodik

En procedur i två steg användes för att ta fram kartmodellerna:

- 1) först utökades antalet Cd-observationer genom att de två dataseten som nämndes ovan kombinerades (1434 laboratorieanalyserade matjordsprover från Mark- och grödoinventeringen (här benämnda ”NV-data”) samt 11093 jordprover med beräknade Cd-halter från mätning med PXRF; se Adler *et al.*, 2020 för detaljer, här benämnda ”JV-data”);
- 2) sedan togs en digital Cd-karta fram genom att hela datasetet med Cd-värden (n=12527) kombinerades med ett antal hjälpvariabler (enligt samma princip som i Adler *et al.*, 2023). Dessa hjälpvariabler är kartlager som täcker hela kartområdet, och som eventuellt kan bidra till att förklara den geografiska variationen i Cd-halt (se Box 2.1).

I det andra steget gjordes prediktioner av sannolikheter för att vissa Cd-halter i matjorden underskreds. Detta gjordes i ett geografiskt punktnät med värden var 50:e m i åker- och betesmark enligt Jordbruksverkets blockkarta. Punktnätets utbredning följde det som användes i den digitala åkermarkskartan (DSMS; Piikki och Söderström, 2019¹)

Box 2.1. Hjälpvariabler som användes i beräkningsmodelleringen.

Gammaradiometrisk data från SGU: ²³²Th [mg kg⁻¹], ²³⁸U [mg kg⁻¹], ⁴⁰K [%] samt från dessa beräknad dosrat [nG hr⁻¹].

Jordartsklasser från kvartärgeologiska kartan från SGU: förenklad indelning, kategoriska data (Lera, Sand, Silt, Morän, Moränlera, Övrigt) (enligt Piikki och Söderström, 2019)

Topografiska data från Lantmäteriet: höjd över havet (Z [m]), relativ höjd inom grannskap på 5 ha (form5 [m]), 50 ha (form50 [m]), 500 ha (form500 [m]) (enligt Piikki & Söderström, 2019).

Markfuktighetsindex från SLU (Ågren *et al.* 2021): beräknad från topografiska data (SLUFukt [index]).

Klimatdata från SMHI: årsmedeltemperatur (TempSmooth [°C]), årsmedelnederbörd (PrecSmooth [mm]).

I tillägg till modellering som beskrivs ovan (som vi i detta dokument kallar den ”nationella” modellen även om den bara täcker in södra Sverige) gjordes även en jämförelse med en regional modellering för att undersöka om sådana ger säkrare prediktioner än en nationell modell. Detta gjordes över Västra Götalandsregionen på motsvarande sätt som för den nationella modellen. Modellering och

¹ Digitala åkermarkskartan kan laddas ned från: <https://www.sgu.se/samhallsplanering/planering-och-markanvandning/markanvandning/jordbruk-skog-och-fiske/lerhaltskartan-digital-akermarkskarta/>

datahantering gjordes i programmeringsspråket Python med Scikit-learnpaketet (<https://scikit-learn.org/0.24/modules/ensemble.html>) för maskininlärning, medan kartantering gjordes i ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, USA).

2.2.1 Beräkningsmodellens gränsvärden

I studien predikterades sannolikheter för att Cd-koncentrationen i matjord är under angivna halter ("gränsvärden"). Som gränsvärden har vi använt halter av Cd i matjorden som utgörs av percentiler av uppmätta halter av Cd från jordprover i mark och grödoinventeringen, den tredje provtagningsomgången (tredje omdrevet) 2011–2017 (Tabell 2.1). Antalet prover som används här (1434 st.) skiljer sig från totala antalet prover i det omdrevet bl.a. p.g.a. att vi enbart använde jordprover från Skåne – Gävleborg, och att enbart de prover som har en mullhalt <20 % (ej organiska jordar) ingick. Således skiljer sig percentilerna i den här studien något från Mark- och grödoinventeringens.

2.2.2 Beräkningsmodellen

Beräkningsmodellen består av två delar. Ena delen är en så kallad *Random Forest*-modell som predikterar antingen 1 eller 0 (dvs. klasser). Klassen 1 betyder att halten som har predikterats är under gränsen i fråga. Som ett exempel, om modellen för percentil 40 (p_{40}) (Tabell 1) predikterar 1 betyder detta att halten beräknas vara under halten i fråga, och följaktligen om prediktionen är 0 så beräknas halten vara över 40 mg kg⁻¹.

Random Forest är en partitionsmodell som består av flera undermodeller i form av beslutsträd. Modellen är vad som kallas en ensemble-modell, dvs. att flera undermodeller används för att producera den slutgiltiga prediktionen. Om 51 % av alla undermodeller predikterar att en beräkningspunkt har värdet 1, så betyder det att den slutgiltiga prediktionen kommer vara 1. Denna "råa" sannolikhet brukar anses inte vara kalibrerad.

Den andra delen av beräkningsmodellen består av en så kallad *logistic regression*-modell. Denna modell används för att justera de predikterade värdena från *Random Forest*-modellen. Justeringen av sannolikheterna görs genom en modell som kalibreras med prediktioner från korsvalideringen av den första modellen, och producerar vad man kallar för kalibrerade sannolikheter. Detta görs för att minimera överanpassning (*overfitting*), dvs. att modellen passar träningsdata mycket bra, men inte fungerar lika väl vid tillämpning på andra data. Proceduren fungerar bara på binära prediktioner, vilket görs i den här studien. För att sammanfatta hur den slutgiltiga modellen ser ut: först matas data in i *Random Forest*-modellen som predikterar ett värde. Detta värde matas in i *logistic regression*-modellen som justerar den predikterade sannolikheten.

Proceduren upprepades för varje percentil. Totalt skapades då nio modeller som predikterar sannolikheten att vara under respektive percentil (som anges i Tabell 2.1). Summan blir en kartmodell med nio kartlager, där varje lager beskriver sannolikheten att vara under en viss halt i marken. Varje punkt, eller rastercell, i kartan har därmed information om alla percentiler. På så sätt kan man få fram för vilken percentil den aktuella platsen är under en viss Cd-halt. Man kan säga att varje plats erhåller en kontinuerlig, kumulativ fördelningsfunktion, enligt prediktionsmodellen.

2.2.3 Validering av beräkningsmodellen

Validering av beräkningsmodellen gjordes genom en variant på korsvalidering med fem vikningar (*five-fold cross-validation*). I varje iteration användes alla JV-prover (med PXRF-predikterade halter av Cd) tillsammans med 80 % av NV-proverna för att kalibrera en modell, som sedan valideras mot de resterande 20 % av NV-proverna. Detta betyder att valideringen alltid skedde mot laboratorieanalyserade halter av Cd som återfinns i NV-proverna. På detta vis får alla NV-prover både observerade och predikterade Cd-koncentrationer, och man kan då utvärdera hur prediktionerna fungerar. En liknande procedur användes även i Adler *et al.* (2022) och Adler *et al.* (2023). Detta gjordes för varje av de nio modellerna. De utvärderingsmått som användes var klassningsnoggrannhet (*recall*), objektnoggrannhet (*precision*) och brier-värde (*brier score*).

Recall anger hur många 1:or i valideringsdata som faktiskt också predikteras att vara 1. Om t.ex. valideringsdata har två stycken 1:or, och modellen predikterar en av dessa korrekt, erhålls ett *recall*-värde på 50 %. Detta värde ger därmed en bild av mörkertalet i den slutgiltiga kartmodellen. Om värdet är väldigt lågt betyder det att modellen är dålig på att hitta 1:or. *Recall* kan säga: ”Vad är sannolikheten att vi hittar alla matjordar under den angivna gränsen?”.

Precision visar om den predikterade 1:an är korrekt eller inte. Högt värde på *precision* visar att i de fall modellen väl predikterar 1, så är det korrekt. Om t.ex. modellen predikterade tre stycken 1:or, varav bara två av dessa faktiskt var 1:or i valideringsdata, så är *precision*-värdet 67 %. *Precision* säger således: ”När modellen väl predikterar under gränsen, hur stor är sannolikheten att prediktionen är korrekt?”.

Brier score är det mått som utvärderar de predikterade sannolikheterna. Här får man en uppfattning om hur nära en predikterad sannolikhet är den faktiska klassen. Man kan säga att *brier score* är en variant av *mean squared error*. Ett exempel, om modellen predikterar 0,75 och den faktiska klassen var 1, så blir då *brier*-värdet $= (1 - 0,75)^2 = 0,0625$. Ett *brier*-värde nära 0 är så bra som möjligt, och nära 1 är mycket dåligt. En modell som alltid predikterar en sannolikhet på 0,5 (50 %) (en

ambivalent modell), ger ett *brier*-värde på 0,25. Därmed kan 0,25 vara en bra gräns att jämföra med; värdet bör vara lägre. *Brier* kan säga: ”Hur träffsäkra är sannolikheterna som produceras av modellen?”.

2.2.4 Regional modell

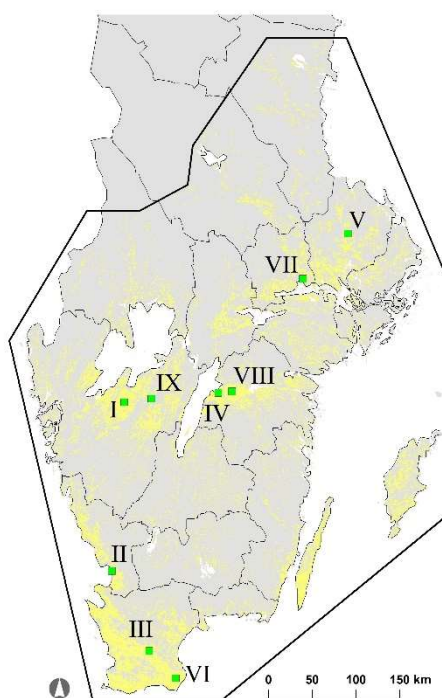
Modellering och validering gjordes också för en regional modell över Västra Götalandsregionen, för att undersöka hur en regional modell fungerar i jämförelse med en nationell modell. I regionen fanns 290 prover från NV-datasetet och 2269 prover från JV-datasetet. Samma valideringsstrategi användes som i den nationella modelleringen, dock med viss modifiering så att den regionala och den nationella modellen kunde jämföras: en körning gjordes med enbart kalibreringsdata inom Västra Götalandsregionen – regional modell; en annan körning gjordes med kalibreringsdata inom och utanför Västra Götalandsregionen – nationell modell. Validering skedde alltid mot uppmätta halter från NV i Västra Götalandsregionen.

2.2.5 Grödprover

Uppmätta halter av Cd i kärna från höstvetete, vårkorn och havre användes för att undersöka hur halterna i gröda varierar med markmodellens prediktioner. Grödprover som användes för detta var från både omdrev 2 och omdrev 3 i Mark- och grödoinventeringen (2001–2017) inom det karterade området (utbredningen är gula ytor i Figur 2.1). Respektive beräknad percentil i markmodellen jämfördes med Cd-halterna i grödproverna. Vi valde att utgå från percentilerna i datasetet för att täcka upp spridningen i förekommande Cd-halter i matjorden.

Tabell 2.1. Percentiler samt korresponderande Cd-halter i matjorden (Cd_{mark}) som använts som gränsvärden i beräkningsmodellen. Antal prov är det antal grödprover i respektive percentilintervall ($\leq p10$, $p10-p20$ osv) som använts i jämförelse mellan beräkningsmodellen och Cd-halten i gröda.

Percentil (pnn)	Cd_{mark} ($mg\ kg^{-1}$)	Antal prov		
		Havre	Vårkorn	Höstvetete
p10	0,104	38	23	26
p20	0,126	40	29	27
p30	0,141	43	33	42
p40	0,158	36	37	38
p50	0,175	37	47	37
p60	0,197	36	59	40
p70	0,221	38	49	63
p80	0,257	47	60	89
p90	0,313	30	34	62
>p90	> 0,313	19	42	55



Figur 2.1. Kartområde och jordbruksmark (gult). Nio höstvetefält (I-IX) som användes som en del av utvärderingen är markerade med grön symbol.

2.2.6 Kartor på blocknivå och för kilometerrutor

Medeltalet för rastercellsprediktionerna beräknades för varje jordbruksblock. Jämförelser gjordes med fältdata insamlade i ett projekt som genomfördes 2016–2018². Där gjordes detaljerad provtagning av matjord och höstvetekärnor på nio fält utspridda i södra Sverige (se Figur 2.1). Tjugo prover samlades in på varje fält, och Cd analyserades i matjord och höstvetekärna. En ännu mer generaliserad produkt (1 km-rutor) togs också fram för visualiseringar och presentationer.

2.3 Resultat och diskussion

2.3.1 Kartor över sannolikheter

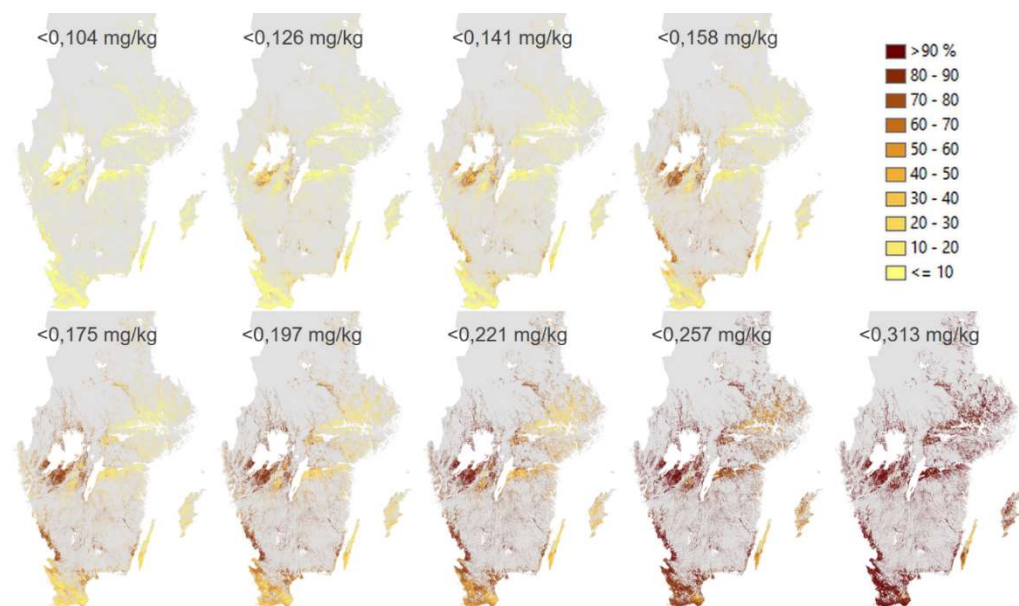
Den nationella beräkningsmodellen visar att högst sannolikhet för låga halter av Cd i matjord oftast påträffas i Värmland, Västergötland, Halland och Småland. Enligt kartorna i Figur 2.2 finns de lägsta halterna i jordbruksområdena kring Väneren, längs Hallandskusten och på fastlandet i Kalmartrakten. I Skåne är sannolikheten lägre att träffa på jordar med låg Cd-halt, dock med undantag av

² Finansierat av Lantmännens forskningsstiftelse (dnr: 2016F002)

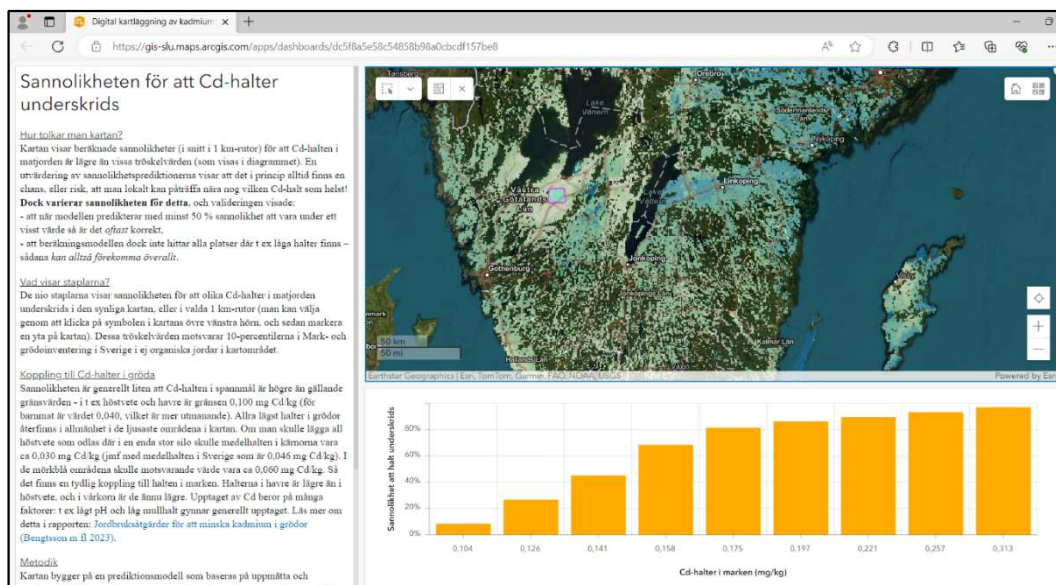
nordöstra Skåne där sannolikheten för låga halter generellt är ganska hög. I Östergötland och Mälardalen är det mindre sannolikt att hitta jordar med låga Cd-halter. Detta övergripande mönster i den geografiska variationen bekräftar det som mindre detaljerat visats i t.ex. Eriksson *et al.* (2010). Områdena med ofta styv lera i östra Sverige har generellt högre halter, och samma sak i områden där det lösa jordlagret påverkats av lokala förekomster av vissa bergarter, särskilt alunskiffer (t.ex. Söderström och Eriksson, 2013). Man kan dock se i t.ex. Figur 2.2 att det även i dessa områden med viss sannolikhet förekommer jordar med relativt låg Cd-halt. Kartlagren som visas i Figur 2.2 har gjorts tillgängliga i en interaktiv, digital anslagstavla (Figur 2.3). I anslagstavlan har prediktionsvärdena aggregerats till medelvärden i 1 km-rutor. Genom att använda de olika verktygen för in-zoomning och urval kan man där lätt jämföra de predikterade sannolikheterna mellan olika områden.

2.3.2 Validering av kartmodellerna

Utvärderingen av den nationella beräkningsmodellen visar på svårigheten i att prediktera sannolikheten för att Cd-halten understiger mycket låga nivåer (Figur 2.4). *Precision*-värdet är oftast högt även vid de låga halterna, vilket antyder att när den slutgiltiga kartan predikterar att en halt är under ett visst värde så är det troligen korrekt. *Recall*-värdet är mycket lägre vid låga halter, vilket visar att den slutgiltiga kartan inte hittat alla platser där låga halter uppmätts. *Brier-talet* är konsekvent under 0,25, vilket tyd er på att de predikterade sannolikheterna i alla

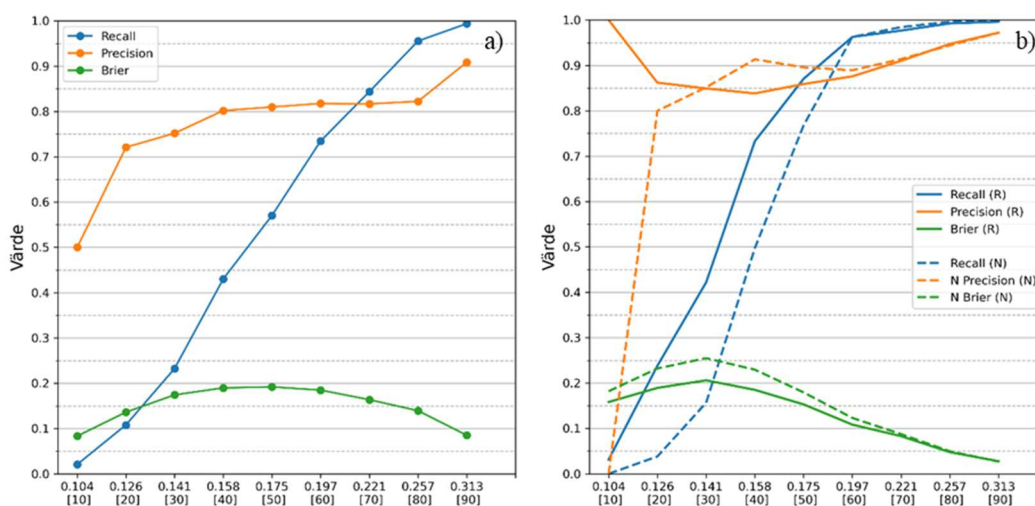


Figur 2.2. Beräknade sannolikheter för att Cd-halten i jordbruksmarkens matjord underskrider angivna värden. Kartorna finns även tillgängliga via en interaktiv, digital anslagstavla (Figur 2.3).



Figur 2.3 Interaktiv, digital anslagstavla, som visar kartorna i Figur 2.2. (https://bit.ly/sannolika_kadmiumhalter).

fall fungerar bättre än en ambivalent modell. I utvärderingen av den regionala modellen med data från Västra Götalandsregionen visade det sig att den fungerade något bättre jämfört med den nationella modellen (Figur 2.4). Det är alltid svårt att prediktera sannolikheten för riktigt låga halter, dock är den regionala modellen tydligt bättre upp till omkring p_{60} , där modellerna fungerar ungefär lika bra. Anledningen i det här fallet kan vara att de riktigt låga halterna sannolikt i stor utsträckning förekommer inom just det län som innefattar den regionala modellen,



Figur 2.4. a) Nationell validering av beräkningsmodellen för att vara under respektive percentil ($n=1434$). Valideringsvärden för recall, precision och brier syns som blå, orange och grönt; b) Validering av den regionala beräkningsmodellen för Västra Götalandsregionen ($n=290$). Helt dragen linje (R) avser resultat från kalibreringsdata enbart från Västra Götalandsregionen (dvs. regionala modellen) medan den streckade linjen (N) avser resultat från modellering med kalibreringsdata utanför och innanför Västra Götalandsregionen (dvs. nationella modellen).

och att dessa påverkar den regionala beräkningsmodellen mer än den nationella. Det är inte självklart att det alltid är bättre med en regional modell, det kan t.ex. finnas begränsningar i hur många kalibreringsprover man måste ha för att modellen ska fungera tillfredsställande. När man avgränsar ett regionalt område är det antagligen lämpligt att utgå från naturgeografiska enheter, där använda hjälpvariabler varierar på ett enhetligt sätt i förhållande till Cd-halten i marken. Det är dock viktigt att områdena utformas så att tillräckligt många kalibreringsprover finns i området.

2.3.3 Uppdatering med regional PXRF-modell

En annan osäkerhet i den nationella modelleringen som uppmärksammades var att det kan finnas en viss regional variation i hur väl prediktionerna av Cd-halterna i matjordsproverna i JV-datasetet med PXRF-modellen fungerade. Det var en nationell PXRF-modell som användes, och särskilt på Gotland var de PXRF-predikterade Cd-halterna tydligt högre (medel 0,32 mg Cd kg⁻¹; median 0,30 mg Cd kg⁻¹; n=353) jämfört med Cd-halterna i matjord i NV-proverna som analyserats på labb (medel 0,24 mg kg⁻¹; median 0,19 mg kg⁻¹; n=27). En möjlighet till förbättring är att ta fram regionala PXRF-modeller och tillämpa dem på JV-datasetet. Detta testades för Gotland, och det resulterade i predikterade Cd-halter som låg betydligt närmare de som uppmätts i NV-proverna (medel 0,22 mg kg⁻¹; median 0,23 mg kg⁻¹; n=353). I kartorna i Figur 2.5 är data för Gotland uppdaterade med den regionala PXRF-modellen. Det återstår att undersöka om det kan finnas andra geografiska områden som kan förbättras med en regional uppdatering på liknande sätt.

2.3.4 Kartor över Cd-halter

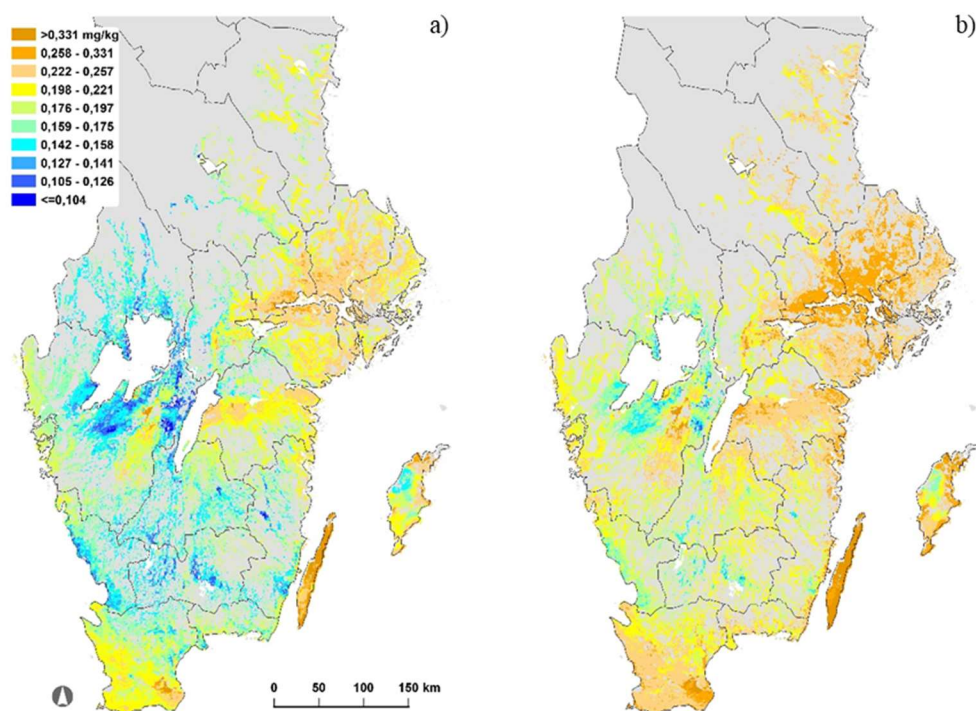
Eftersom beräkningsmodellen för Cd-halt i matjorden genererar sannolikheter för att ett visst värde underskrids (Figur 2.2), så kan man även ta fram kartor som visar sannolik Cd-halt. I Figur 2.5 har kartorna i Figur 2.2 aggregerats till 1 km-pixlar (medeltalet inom pixeln), och kartan visar den beräknade Cd-halten när det är över 50 % sannolikhet att värdet som anges underskrids. Det kan liknas vid en ”vanlig” haltkarta och kan vara ett alternativt sätt att visualisera kartorna i Figur 2.2. På samma sätt går det även att ta fram haltkartor för andra sannolikheter. Figur 2.5b visar Cd-halten när det är minst 75 % sannolikhet att kartvärdet underskrids. Denna typ av karta skulle t.ex. kunna vara användbar när man vill hitta områden som med stor sannolikhet har låga halter.

2.3.5 Halter i gröda

Halterna i grödorna är lägre i de områden som sannolikt har de lägsta halterna i matjorden (Figur 2.6). Matjordshalterna i Figur 2.6 är framtagna som i Figur 2.5,

men på ursprunglig pixelnivå (50 m-pixlar). Antalet grödprover i respektive klass visas i Tabell 2.1. Med ökad predikterad halt i marken, ökar kärnornas halter i alla grödor. Tydligast är ökningen i höstvetete, som generellt har högre halter än havre, som i sin tur har något högre Cd-halter än vårkorn vid samma Cd-halt i marken. Det finns en ganska stor spridning i kärnornas Cd-halterna inom varje Cd-haltsklass i matjorden, vilket är naturligt eftersom det inte enbart är halten i marken som avgör halten i grödan (som t.ex. redovisas i Bengtsson *et al.* 2023). Särskilt i de högsta matjordsklasserna är spridningen i grödhalter stor, och man kan notera att det kan förekomma låga grödhalter i alla områden. Däremot är det mycket ovanligt att det förekommer höga halter i grödor i områden som kartlagts i de lägsta klasserna.

Även om det är en spridning inom varje klass i Figur 2.6, kan man utläsa att man totalt i Sverige, kan erhålla en snitthalt på $<0,040 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ (gränsvärdet för barnmat) om man räknar på den gröda som produceras i områden som kartlagts $<p50$. Medelhalten av Cd i svenskt höstvetete är $0,047 \text{ mg Cd kg}^{-1}$, vilket är något över gränsvärdet för barnmat. Vill man med stor sannolikhet erhålla en lägre halt, t.ex. $<0,030 \text{ mg Cd kg}^{-1}$, får man fokusera på områden med de tre lägsta klasserna i Figur 2.6. Det är viktigt att notera att ovanstående resonemang gäller den samlade skörden, och kan vara relevant för spannmålshandeln. I det enskilda fallet och på

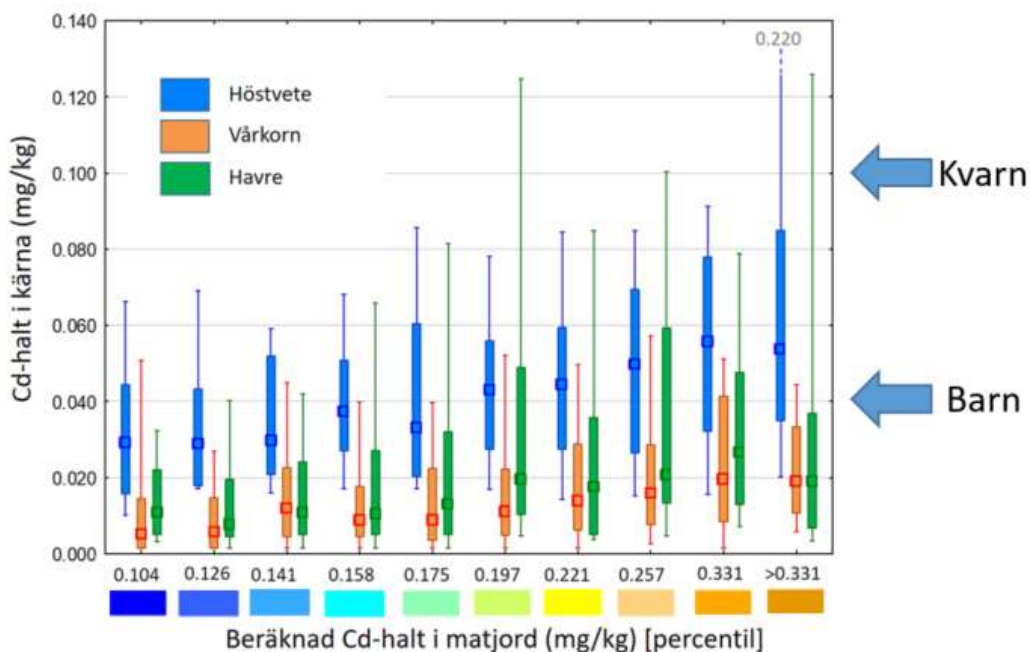


Figur 2.5. Cd-halt i matjorden (mg kg^{-1}) där sannolikheten att kartvärdet underskrids är åtminstone: a) 50 %, och b) 75 %. Klassindelningen följer percentilerna som anges i Tabell 2.1. Karta a) kan sägas motsvara en vanlig haltkarta (som visar det mest sannolika värdet). Kartorna är baserade på aggregerade värden för 1 km-rutor. Endast rutor med minst 5 ha jordbruksmark är redovisade.

den enskilda gården, kan man hitta tillräckligt låga halter i alla beräkningsklasser för kriteriet för barnmat ska uppfyllas.

2.3.6 Jämförelse med medelhalten på nio fält

I Figur 2.7 visas hur beräkningsmodellerna för de olika gränsvärdena, när data aggregerats på jordbruksblocksnivå, förhåller sig till uppmätta Cd-halter i matjord och i höstvetete på några fält i södra Sverige (fältens position visas i Figur 2.1). I figuren kan man se hur sannolikhetsprediktionerna varierar för de olika fälten allteftersom gränsvärdet höjs. Tydligt är att fält I och II, som har mycket låg Cd-halt i matjorden ($<0,12 \text{ mg kg}^{-1}$), också är de där sannolikheten att gränsvärdena underskrids, ökar snabbast. Diagrammet kan ge en förståelse för hur kopplingen mellan sannolikhetsvärdet och halten i marken samspelar, och även för att det är svårt att direkt från en sådan sannolikhetsprediktion avgöra om halten på ett fält är låg eller ej. Särskilt en gård (V) verkar ha lägre halt i matjorden än vad beräkningsmodellerna antyder, men generellt pekar diagrammet, liksom Figur 2.4, på att det är svårt för beräkningsmodellen att med hög sannolikhet prediktera en låg halt. Det blir tydligt att sannolikhetskartorna endast ger en fingervisning, och är



Figur 2.6. Uppmätta Cd-halter i höstvetete, vårkorn och havre i områden med olika beräknade Cd-halter i matjorden enligt Figur 2.5a (färgrutorna längs x-axeln överensstämmer med kartans färger i Figur 2.5a). Boxarna anger 20–80 percentilerna, linjerna 5–95 percentilerna och märket är medianen. Antalet prov per klass visas i Tabell 2.1. Notera att i högsta klassen ligger 95-percentilsvärdet för höstvetete utanför diagramskalan. Pilarna visar både det generella gränsvärdet för höstvetete och havre (Kvarn) och det för barnmat (Barn). För vårkorn är det generella gränsvärdet $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$.

tänkta att användas som ett översiktligt verktyg för att hitta fält där man i snitt kan anta att halterna även i spannmål håller sig på en viss nivå.

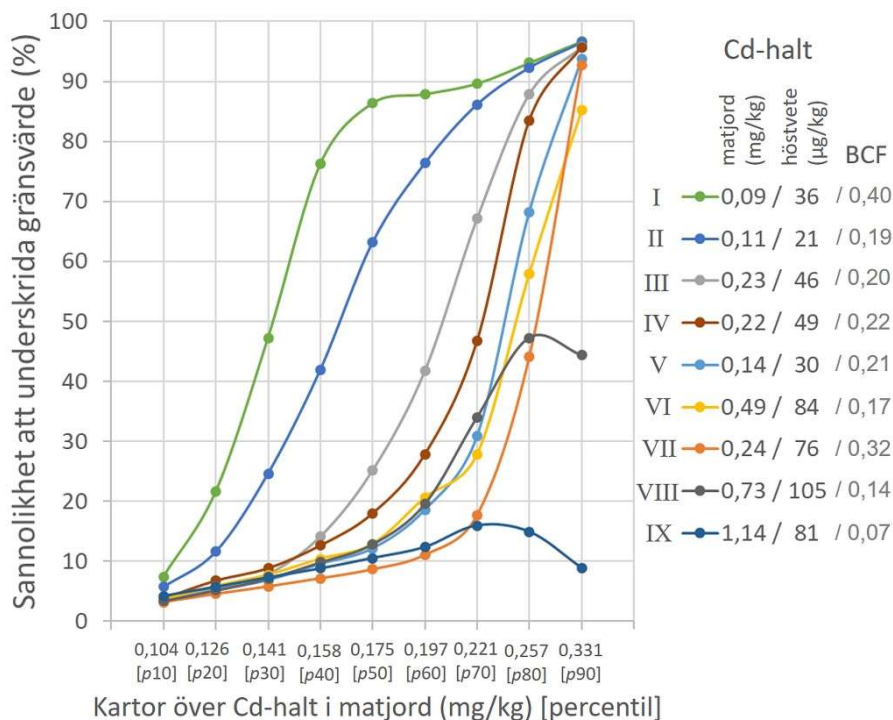
2.3.7 Halt i gröda i förhållande till halt i marken

I Figur 2.7 visas också korresponderande Cd-halter i höstvetekärnor och i stort ökar de med halten i matjorden, gård IX har en något lägre halt i grödan i förhållande till halten matjord. Detta indikeras med en låg BioConcentration Factor (BCF; Swartjes, 2015), som är ett enkelt mått på Cd-upptaget i växten (här i spannmålskärna; $Cd_{kärna}$; mg kg^{-1}) i förhållande till Cd-halten i marken (Cd_{mark} ; mg kg^{-1}), beräknat enligt Ekvation 2.1.

$$BCF = \frac{Cd_{kärna}}{Cd_{mark}}$$

Ekvation 2.1.

Medianen för BCF i alla prover som ingår i vårt dataset är för höstvetete 0,21 (n=485), vårkorn 0,06 (n=413), och havre 0,08 (n=364). BCF varierar förstås med en rad faktorer annat än Cd-halten i matjorden, t.ex. är Cd-halten i alven också viktig, men den har vi inte kännedom om här, liksom att Cd-upptaget kan skilja mycket mellan sorter. Även nederbörds mängd och biomassa kan ha en effekt på Cd-upptaget



Figur 2.7. Uppmätt medelhalt av Cd i matjord och höstvetete på de nio testfälten (I-IX; se Figur 2.1) (medel av 20 labbanalyserade prover av jord och gröda per fält), och hur beräkningsmodellerna predikerat sannolikheten att underskrida percentilvärdena (gränsvärdena) för dessa fält. Även kvoten mellan halten i gröda och halten i matjord visas (BCF – BioConcentration Factor).

(Eriksson och Söderström, 1996). I tillägg till detta är det känt att upptaget av Cd varierar med t.ex. markens pH och mullhalt (t.ex. Eriksson *et al.*, 2010). Även lerhalten och halten zink (Zn) i matjorden (som har liknande kemiska egenskaper som Cd) kan påverka upptaget (Zhou *et al.*, 2020). Den stora spridningen av halter i kärnor inom jordhaltsklasserna i Figur 2.6 är därför inte oväntad med tanke på att Cd-upptaget avgörs av ett komplext samspel mellan flera faktorer. I Box 2.2 visas hur BCF (medianvärdet) för höstvetete varierar med mullhalt, pH, lerhalt och Zn i matjorden i detta dataset. BCF är påtagligt lägre vid högt pH (>7) jämfört med om pH i matjorden är lågt. Även högre mullhalt, lerhalt och Zn-halt tycks vara kopplat till BCF i detta dataset. Man ska komma ihåg att det kan finnas en samvariation mellan egenskaperna i Box 2.2 vilket gör tolkningen av värdena svårare; man kan se siffrorna som indikativa.

Box 2.2. Kvoten mellan Cd-halten i höstvetekärna och Cd-halten i matjorden (BCF) i mar med olika egenskaper. Medianvärdet av BCF i respektive grupp visas.

Mull (%)	≤3	3–6	6–12	12–20	
BCF (n)	0,23 (154)	0,19 (291)	0,19 (34)	0,11 (6)	
pH	≤6,0	6,0–6,5	6,5–7,0	7,0–7,5	>7,5
BCF (n)	0,27 (67)	0,22 (192)	0,18 (129)	0,15 (58)	0,14 (39)
Ler (%)	≤15	15–25	25–40	>40	
BCF (n)	0.24 (109)	0.22 (133)	0.17 (122)	0.18 (121)	
Zn (mg kg⁻¹)	≤30	30–50	50–70	70–90	>90
BCF (n)	0.28 (29)	0.24 (143)	0.20 (127)	0.17 (82)	0.16 (104)

2.4 Sammanfattande slutsatser om kadmiumkartläggningen

Kartläggning i form av sannolikhetsprediktioner kan vara svårtolkade. Emellertid kan de ge en mer verklighetstrogen bild av vad en prediktion egentligen är, jämfört med om man tar fram ett beräknat värde som visas i en kartbild. Kartor kan lätt tolkas som en sorts sanning och därmed kan de lätt användas på fel sätt. Sannolikhetsprediktionerna som gjordes här visar att det i princip alltid finns en

chans, eller risk, att man lokalt kan påträffa nära nog vilken Cd-halt i matjorden som helst. Dock varierar sannolikheten för detta, och valideringen av de prediktionskartor som togs fram visade att när modellerna predikerade att vara under ett visst värde, så var det *troligen* korrekt. Dock visade valideringen att modellen inte hittat alla platser där låga halter uppmätts – sådana kan alltså i viss utsträckning förekomma även i områden där det halterna enligt modellen förväntas vara höga.

Det är flera grundläggande förutsättningar som påverkar hur bra prediktionerna blir. I det här arbetet finns ett par moment som påverkar resultaten i stort, antagligen mer än exakt vilken maskininlärningsmetod som används: *i*) det är en ”nationell” modellering (hela datasetet) som gjorts, men vissa resultat visar att regionala modeller kunde fungerat bättre, och *ii*) tillgängliga hjälpvariabler är inte så starkt kopplade till Cd-halten i matjorden, vilket kan skapa ett visst brus i prediktionerna. Dessa punkter behöver utredas närmare i eventuella kommande arbeten med kartläggningen av Cd-halter.

Genom att kombinera Figur 2.5a med data från Figur 2.6 kan prediktionskartorna användas för att styra spannmålskontrakt riktade mot barnmat. Det blir tydligt vilka områden som är lämpade för odling av den mest krävande produktionen, för att minimera risken för att kadmiumhalten ska vara för hög. Lokal provtagning bör kunna minskas om odlingen sker i de områden som pekats ut att ha lägst halter. I ett framtida arbete kan det vara lämpligt att undersöka hur man bäst inkluderar lokal information (om t.ex. pH, mullhalt, zinkhalt och lerhalt) i kombination med våra prediktioner för att få en mer precis bedömning om risker för upptag i grödor.

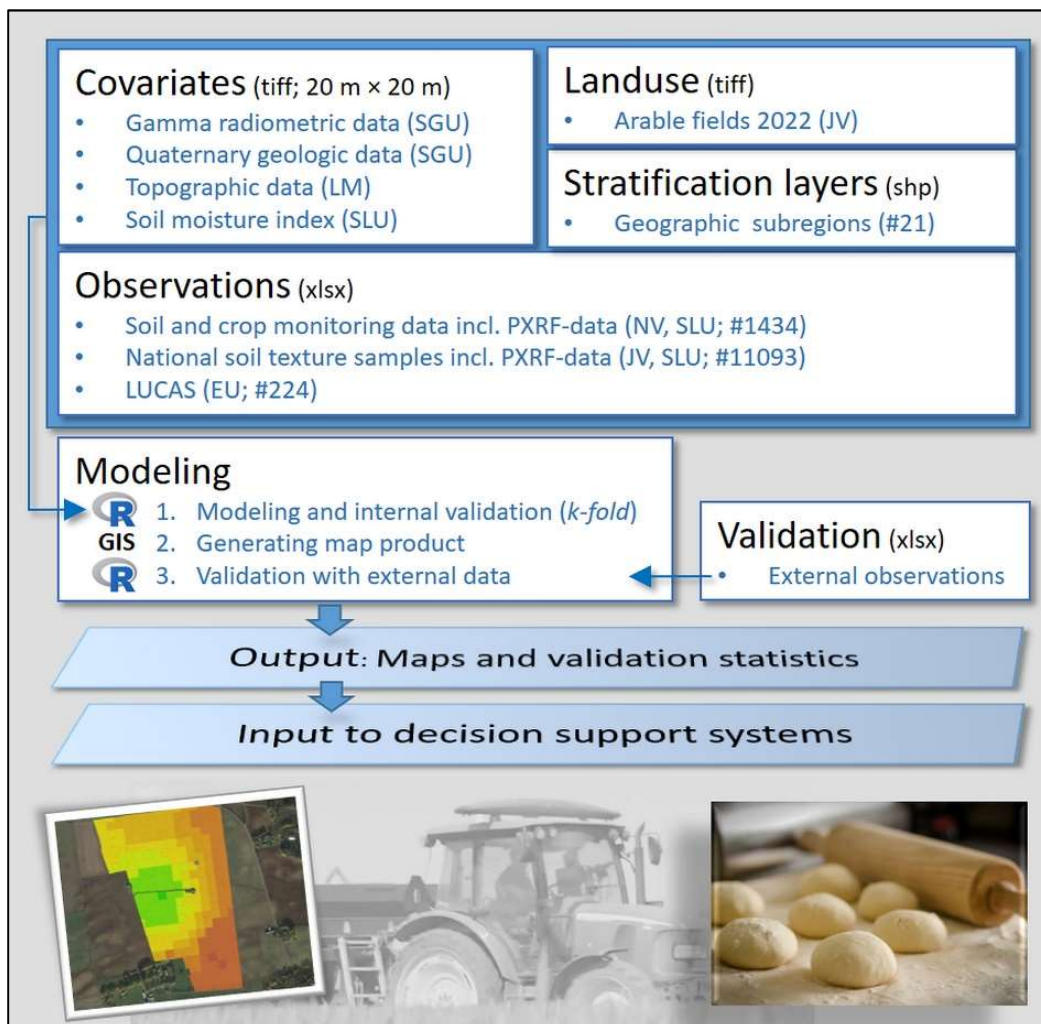
2.5 Åkermarksdatakuben – förenklad kartläggning av tungmetaller

Som nämnts tidigare resulterar mätningar med PXRF på jordprover i halter på en lång rad grundämnen, främst tungmetaller. För att förenkla kartläggning av andra ämnen än Cd skapades ett ramverk för prediktionsmodellering som grundades på de mätdata och de hjälpvariabler som användes i Cd-modelleringen. Ramverket som benämns Åkermarksdatakuben (ÅMDK)³ består av data och ett paket av metoder som medger framtagning av kartor i åkermark över data från PXRF-mätningarna, och även av flera analyserade element i Mark- och grödoinventeringen (Figur 2.8). Resulterande kartlager från ÅMDK är i form av raster med 20 m-pixlar (som sammanfaller med data från Sentinel-2-satelliterna). Olika ingående data kan ganska lätt bytas ut eller uppdateras, vilket underlättar när

³ Detta arbete genomfördes med medel från SLUs Miljöanalys samt från Baby Grain Passport-projektet.

nya data blir tillgängliga (i Figur 2.8 visas t.ex. att data från LUCAS från EU (Tóth *et al.*, 2013) kan inkluderas bland dataseten). Det är också lätt att komplettera t.ex. hjälpvariablerna med fler lager. I nuvarande version av ÅMDK används datautvinningsmetoden *multivariate adaptive regression splines* (Hastie *et al.*, 2009). Även andra metoder kan vara intressanta att utvärdera.

För att testa användningen av ÅMDK gjordes en kartläggning av Ni-halten i matjord. Nickel är ett aktuellt ämne i sammanhanget eftersom nya striktare gränsvärden håller på att införas. Ett gränsvärde i spannmål för barnmat kommer eventuellt att bli 4,0 mg kg⁻¹. Nickel avviker från de flesta tungmetaller genom att halterna i havre tenderar att vara klart högre än de i t.ex. höstvet, och att dessutom

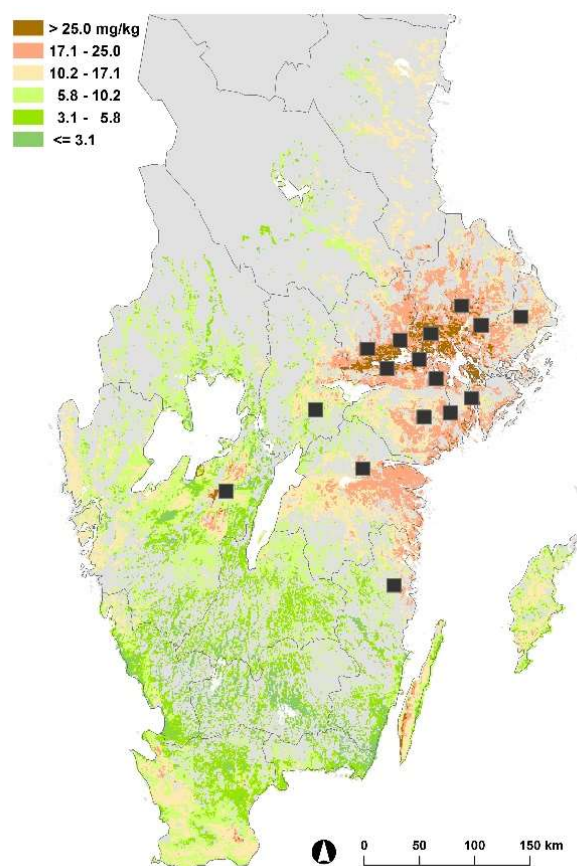


Figur 2.8. Principbild som visar flödet i Åkermarksdatakuben. Data i de olika boxarna kan lätt kompletteras eller bytas ut. Steg 2 i modelleringen görs för närvarande manuellt i GIS-programvara, men även det steget skulle kunna automatiseras i till exempel programspråket R. JV=Jordbruksverket, MoG=Mark- och grödoinventeringen, LM=Lantmäteriet, LUCAS=Land Use and Coverage Area frame Survey, SGU=Sveriges geologiska undersökning, SLU=Sveriges lantbruksuniversitet.

upptaget i havre är relativt starkt kopplat till Ni-halten i marken (se t.ex. Eriksson *et al.*, 2010). I Mark- och grödoinventeringen har 6 % av havreproverna halter $>3,5$ mg kg⁻¹, medan inga höstveteprover har så höga Ni-halter.

Resultatet från kartläggningen av Ni-halten i matjord med ÅMDK visas i Figur 2.9. Förekomsten av Ni-halter i havre som överstiger 3,5 mg kg⁻¹ är lokaliserade till områdena med höga halter i marken, men Ni-upptaget påverkas även av t ex markens pH, lerhalt och mullhalt (Eriksson *et al.*, 2010). De flesta observationerna med höga Ni-halter finns i Mälardalen, men de flesta havreproverna i området har halter under 3,5 mg kg⁻¹ (ca 80 % av havreproverna).

Ni-halterna i marken kombinerades med data över pH, mullhalt och lerhalt för att göra en relativt välfungerande beräkningsmodell för den förväntade halten i havre. I det här fallet kombinerades kartans Ni-halter med lokala analysvärden (baserat på data från Mark- och grödoinventeringen; $R^2=0,59$; $n=223$) och ger Ekvation 2.2, där enheterna är mg kg⁻¹ för Ni_{havre} och Ni_{karta} och % för ler- och mullhalt.



Figur 2.9. Beräknad Ni-halt i matjorden med hjälp av Åkermarksdatakuben. Markeringarna visar halter i havre $> 3,5$ mg kg⁻¹ (positionerna är inte exakta utan indikerar enbart i vilka områden sådana halter förekommer).

$$Ni_{\text{havre}} = \frac{e^{4.739 - 0.905\text{pH} + 0.014\text{ler} + 0.070Ni_{\text{karta}}}}{\text{mull}^{0.341}}$$

Ekvation 2.2.

Exemplet med Ni visar hur ÅMDK kan användas för att förhållandevis snabbt ta fram nya eller uppdaterade kartprodukter. På motsvarande sätt som för Cd kan resultatet från Ni-kartläggningen användas för att lokalisera produktion avsedda för barnmat till de mest lämpliga geografiska områdena.

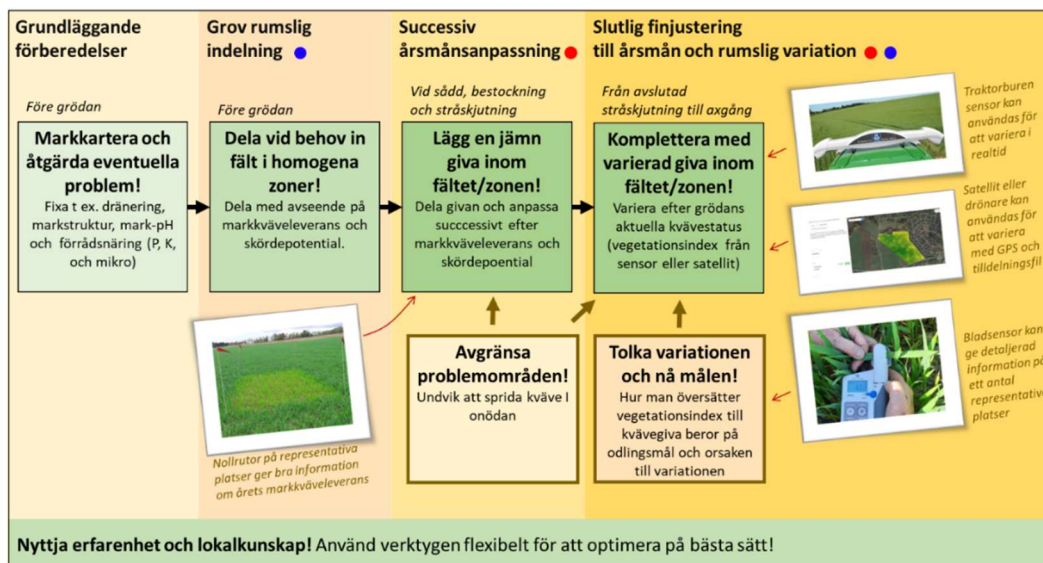
3 Att producera spannmål hållbart genom precisionsodling

3.1 Att anpassa kvävegivan till varierande behov

Grödans kvävebehov beror huvudsakligen på skördepotentialen (utan kvävebegränsning) och markens kväveleverans. Båda beror på markens lokala beskaffenhet och på årsmånen och kan skilja sig markant mellan platser och år (se t.ex. Algerbo, 2003 och Wetterlind, 2010). Med delad kvävegiva kan man successivt anpassa mängden kvävegödsel till grödans behov det aktuella året (se t.ex. Jordbruksverket, 2024), och de sena givorna kan med fördel varieras inom fält efter optiska mätningar av grödans varierande kvävestatus.

Det finns två huvudsakliga tekniker för att variera kvävegivan efter optiska beståndsmätningar, *i*) man kan justera givan i realtid under det att man gödslar med hjälp av en traktormonterad sensor (Raun *et al.*, 2001, Reusch, 2003) eller *ii*) man kan i förväg ta fram en kvävebehovskarta från fjärranalysdata (drönare eller satellit), en s.k. tilldelningsfil och sedan gödsla efter den (Söderström *et al.*, 2017, Vizzari *et al.*, 2019). Det förstnämnda kräver investering i en kvävesensor medan det andra kräver ett beslutsstödsystem samt ett positioneringssystem på traktorn (till exempel GPS). Figur 3.1 ger översikt över strategier och verktyg för kvävestyrning i spannmål. Som växtodlare kan man förstås välja att nyttja tillgängliga verktyg på bästa sätt efter lokala förutsättningar och vad man vill uppnå. Historiska skördar och skördeprognoser är viktiga för anpassad kvävegödsling

Skördekartor från flera tidigare säsonger kan vägas samman till generella skördenivåkartor (Blackmore, 2000; Basso och Antle, 2020). Dessa kan vara bra underlag både för en grov indelning och fält i homogena zoner och som bakgrund för platsspecifik kompletteringsgödsling (Figur 3.1). Om man kan göra tillförlitliga skördeprognoser under innevarande säsong (dvs. om de ger en bättre uppskattning av den kommande skördens storlek än ett medelvärde av tidigare års skördar), skulle de kunna bidra till bättre årsmåsanpassning. När man utvecklar modeller för skördeprediktion med målet att de ska tillämpas i ett beslutsstödsystem är följande viktigt att tänka på:



Figur 3.1. Översikt över strategier för precisionsgödsling med kväve och hur man kan använda historiska skördeobservationer respektive skördeprognoser (fältmedel eller kartor). Skördekartor från tidigare år kan – tillsammans med annan information – nyttjas dels för indelning av fält i homogena zoner och dels som bakgrundsinformation vid platsspecifik kvävekomplettering (blå cirkel). Om det vore möjligt att göra tillförlitliga skördeprognoser vid de olika tidpunkterna för gödsling skulle de kunna nyttjas för bättre årsmånsanpassning (röd cirkel).

- 1) att ingående data finns tillgängliga i ett format och vid en tidpunkt som passar praktisk användning, och
- 2) att man lägger upp utvärderingen på sådant sätt att man testat hur väl modellerna fungerar på fält helt utan skördedata, eftersom det är så de kommer användas i praktiken.

3.1.1 Skördekartering med tröska

Skördemätning på tröskor har funnits sedan mitten av nittio-talet. Då förväntades att tekniken skulle komma att bli en grundbult inom precisionsodlingen (t.ex. Schnug *et al.* 1993; Birrell *et al.* 1996; Nissen och Söderström 1999). Så har det av olika anledningar inte blivit. Många har utrustning för skördekartering på tröskan men det är inte särskilt vanligt att insamlade data sedan används för att växtplatsanpassa odlingsåtgärder (Lowenberg-DeBoer *et al.*, 2019; Lachia *et al.*, 2019).

3.1.2 Empiriska modeller

Empiriska modeller kan vara enkla statistiska regressionsmodeller eller mer komplexa modeller, t.ex. baserade på datautvinning, som anpassas till observationsdata. Empiriska modeller för skördeprognos, baseras ofta enbart på fjärranalysdata (t.ex. Hunt *et al.*, 2019; Söderström *et al.* (2021); Segarra *et al.*, 2022; Perich *et al.* 2023). De blir då enkla att tillämpa brett men man går miste om det som väderdata eller vår kunskap om grödors utveckling och tillväxt i

förhållande till ljus, temperatur och nederbörd kan förklara. Satellitbaserad skördekartering, som inte kräver egen mätutrustning, kan vara en mer funktionell metod som snabbt ger skördekartor, jämfört med skördekartering med tröska.

3.1.3 Mekanistiska modeller

Mekanistiska (även kallade processbaserade) grödmodeller bygger på kunskap om grödans tillväxt och utveckling i förhållande omgivningsfaktorer. En möjlig nackdel vid praktisk användning (implementering i beslutsstödsystem för precisionsodling) är att de ofta kräver mer detaljerad information om till väder och markförhållanden än vad som finns tillgängligt. Där data inte finns, får approximationer göras. Ursprungligen har den här typen av modeller sällan dragit nytta av den information om grödans status som numera finns lätt tillgänglig i satellitbilder men det sker nu en intensiv utveckling på området (Luo *et al.* 2023). Ofta genereras tidsserier av bladyteindex (leaf area index; LAI) från satellitdata och integreras den mekanistiska modellen (se exempelvis Bouras *et al.*, 2023). Mekanistiska modeller är inte alltid programmerade för så att man effektivt kan göra rumsliga prediktioner.

3.1.4 Semi-empiriska modeller

Vi har testat en kompromisslösning mellan empiriska och mekanistiska modeller, anpassad just för att modellera skörd i digitala beslutsstödsystem för precisionsodling. Det är en semi-empirisk konceptuell modell som på dagsbasis integrerar de data som faktiskt finns tillgängliga (tidsserier av satellit- med väderdata), enligt grundläggande växtfysiologi, till ett tidsintegrerat skördeindex fram till den tidpunkt då prognosen görs (den konceptuella delen). Sedan parametreras en regressionsmodell mellan detta index och skörd (den empiriska delen).

Tabell 3.1 ger en översikt över tillgängliga och tänkbara metoder för att kartera och prognosticera skörd i olika rumsliga upplösningar.

I det här avsnittet beskrivs två delstudier. Därefter följer en diskussion om praktisk tillämpning i digitala beslutsstödsystem för varierad kvävegödsling. Delstudierna handlar om:

- 1) hur man designar ett ramverk för empirisk satellitbaserad skördekartering, samt vilka vegetationsindex, vilka utvecklingsstadier, och vilken rumslig upplösning man bör basera systemet på; och
- 2) en vidareutveckling i form av konceptuella modeller som integrerar satellit- och väderdata, samt ett test av väl de fungerar de för prediktion av icke-kvävebegränsad skörd när man tillämpar dem vid olika tidpunkter på säsongen.

Alshihabi *et al.* (manuskript) beskriver den första delstudien. Den bygger vidare på resultat från Söderström *et al.* (2021) samt Alshihabi *et al.* (2023). Den andra delstudien beskrivs här för första gången. Den första fokuserar på höstvetete (*Triticum aestivum* L.) medan den andra undersöker havre (*Avena sativa* L.).

Tabell 3.1. Några metoder att uppskatta skörd i olika rumsliga och tidsmässiga skalor. Ja=metoden möjlig (betyder dock inte nödvändigtvis att den tillräckligt tillförlitlig för praktisk användning). ---=metoden ej aktuell.

Metod att bestämma skörd	Efter säsong (historia)		Under säsong (prognos)	
	fältmedel	zon/pixel	fältmedel	zon/pixel
Erfarenhetsbaserad uppskattning	Ja ¹	Ja, för zon	Ja ¹	Ja, för zon
Invägning	Ja ²	---	---	---
Skördemätning med tröska	Ja	Ja	---	---
Empirisk satellitbaserad modell	Ja	Ja	Ja ³	Ja ³
Semiempirisk konceptuell modell	Ja ³	Ja ³	Ja ³	Ja ³
Mekanistisk modell	Ja	Ja	Ja ³	Ja ³

¹Förmodligen vanligast i praktiken.

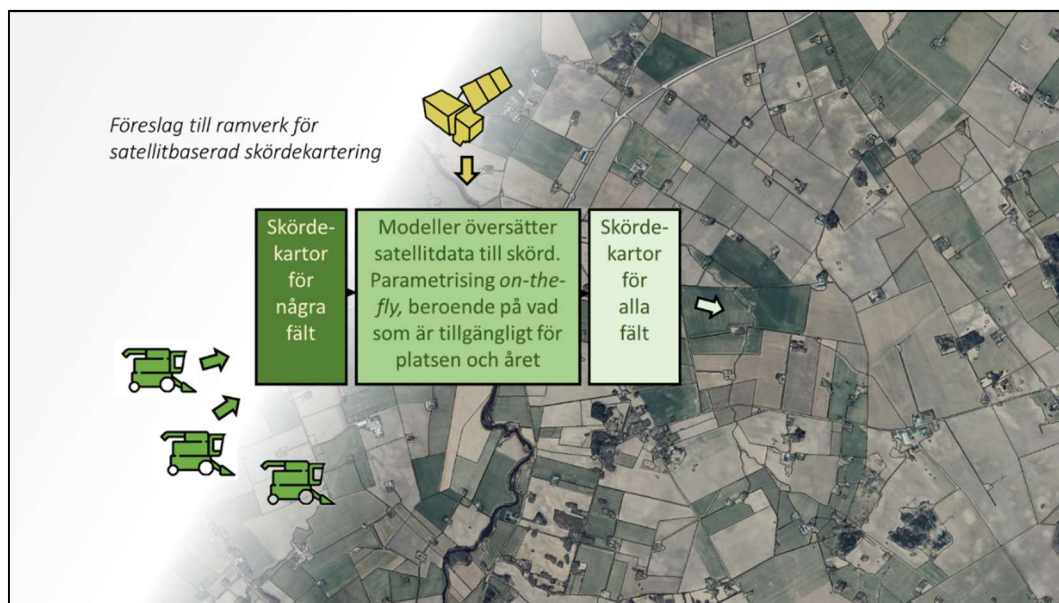
²Kan vara svårt i praktiken att hålla isär fält.

³Testat i denna studie.

3.2 Empirisk satellitbaserad skördekartering

I den här delstudien föreslår vi ett ramverk för satellitbaserad skördekartering, som kan implementeras i beslutsstödsystem för precisionsodling (Figur 3.2). En utmaning för denna användning är att hårdkodade modeller för skörd blir beroende av att molnfria satellitdata finns tillgängliga vid samma utvecklingsstadiet hos grödan varje år. Så är inte alltid fallet i praktiken. Istället kan man tänka sig ett system där:

- 1) skördedata från tröschor laddas upp efter skörd och utgör en referensdatabas,
- 2) den lantbrukare som önskar satellitbaserade skördekartor går in i systemet och väljer fält,
- 3) tillgängliga satellitbilder och referensdata för aktuellt år och område identifieras,
- 4) ett antal empiriska modellvarianter kalibreras *on-the-fly* och en intern utvärdering görs,
- 5) den modell som fungerar bäst tillämpas på de valda fälten.



Figur 3.2. Förslag till ramverk för satellitbaserad skördekartering, designat för att fungera i beslutsstödsystem för precisionsodling.

Detta innebär datadelning från ett fåtal till nytta för många. För att ta reda på hur man bäst utformar den empiriska modelleringen för ett sådant system gjordes ett antal tester:

- 1) vilka vegetationsindex fungerar bäst som prediktorvariabler (ett eller flera)?
- 2) vid vilka utvecklingsstadier hos grödan bör man söka efter satellitbilder (ett eller flera)?
- 3) vilken rumslig upplösning bör man arbeta med?
- 4) hur stort blir felet i de satellitbaserade skördekartorna (samma satellitbild men andra fält än de där referensdata samlats in)?

3.2.1 Metod

Vi använde ett dataset med skördedata från 18 höstvetefält i Skåne 2019 (samma lantbrukare). För dessa fält fanns det fyra molnfria Sentinel-2 bilder från det aktuella året. Datumen 4, 14 och 29 juni samt 11 juli, vilket ungefär motsvarade axgång (DC 49–54; Zadoks *et al.*, 1974), blomning (DC 61–65), mjölkmodnad (DC 71–75) och degmodnad (DC 83–85). Satellitdata och tröskdata kvalitetskontrollerades noggrant och alla data inom en buffertzona längs fältens kanter togs bort, eftersom varken satellitdata eller tröskdata bedöms helt tillförlitliga nära fältkanter. Buffertzonen var 15 m bred vid 20 m upplösning och eller 25 m vid 40 m upplösning. Punktobservationer från tröskan aggregerades till satellitens 20 m-raster. Alla data aggregerades även till 40 m upplösning, samt till medeltal per fält. Fem olika vegetationsindex beräknades: NDVI (Rouse *et al.*,

1974), NDWI (Zhang *et al.*, 2017), NDRE (Sims och Gamon 2002), NDDI (Gu *et al.* 2007) and GRVI (Adamsen *et al.*, 1999).

Linjära regressionsmodeller testades för 15 indexkombinationer \times 15 datumkombinationer \times tre upplösningar (totalt 675 modeller). För att simulera den praktiska tillämpningen parametriserades en modell med data från sjutton fält och tillämpades på det artonde. Detta repeterades tills prediktioner gjorts för alla fält. För att kvantifiera hur väl modellerna fungerade beräknades absolut medelfel (*mean absolute error*; MAE) och determinationskoefficienten (r^2) för en linjär regression mellan predikterade och observerade värden.

3.2.2 Resultat

Modellerna blev mer tillförlitliga ju grövre upplösningen var, troligen pga. att osäkerheter i värden och positioner till viss del jämnar ut sig inom en större pixel. Man bör därför välja en relativt grov upplösning (kanske 40 m), alternativt en finare upplösning och sedan aggregera till odlingszoner. En översikt över hur väl olika index- och datum-kombinationer fungerade ges i Figur 3.3. Man kan se att modeller där vegetationsindexet NDWI ingår fungerar bättre än övriga indexkombinationer och att modeller där satellitdata från mjölkmodnad ingår generellt fungerar bättre.

Datum 1, 2, 3, 4	516	489	476	412	490	517	508	458	455	494	448	447	445	453	446
Datum 2, 3, 4	550	569	569	429	530	557	560	432	515	567	431	473	433	469	425
Datum 1, 3, 4	511	482	472	402	480	503	497	424	504	473	411	446	402	419	415
Datum 1, 2, 4	559	507	478	433	478	520	492	492	494	497	483	473	470	461	479
Datum 1, 2, 3	526	487	474	406	485	514	505	462	452	492	469	454	470	459	485
Datum 3, 4	568	587	585	430	569	580	580	512	501	588	512	496	516	500	483
Datum 2, 4	608	607	592	480	520	631	640	514	563	604	501	523	496	512	476
Datum 2, 3	558	565	564	423	528	567	566	431	569	564	429	518	431	494	422
Datum 1, 4	581	497	470	426	469	583	589	486	560	498	442	492	424	446	453
Datum 1, 3	519	479	470	398	476	514	504	426	562	470	411	506	399	452	410
Datum 1, 2	631	528	490	454	486	564	528	515	520	505	494	490	473	464	491
Datum 4	710	740	749	524	582	737	736	509	536	744	512	508	504	518	499
Datum 3	574	583	579	426	574	585	581	427	482	580	428	446	429	455	428
Datum 2	683	611	593	542	545	620	594	549	548	599	546	545	544	538	546
Datum 1	685	533	482	448	492	529	480	449	468	483	452	464	452	466	441
	GRVI	NDVI	NDRE75	NDWI	NDDI	GRVI - NDVI	GRVI - NDRE75	GRVI - NDWI	GRVI - NDDI	NDVI - NDRE75	NDVI - NDWI	NDVI - NDDI	NDRE75 - NDWI	NDRE75 - NDDI	NDDI - NDWI

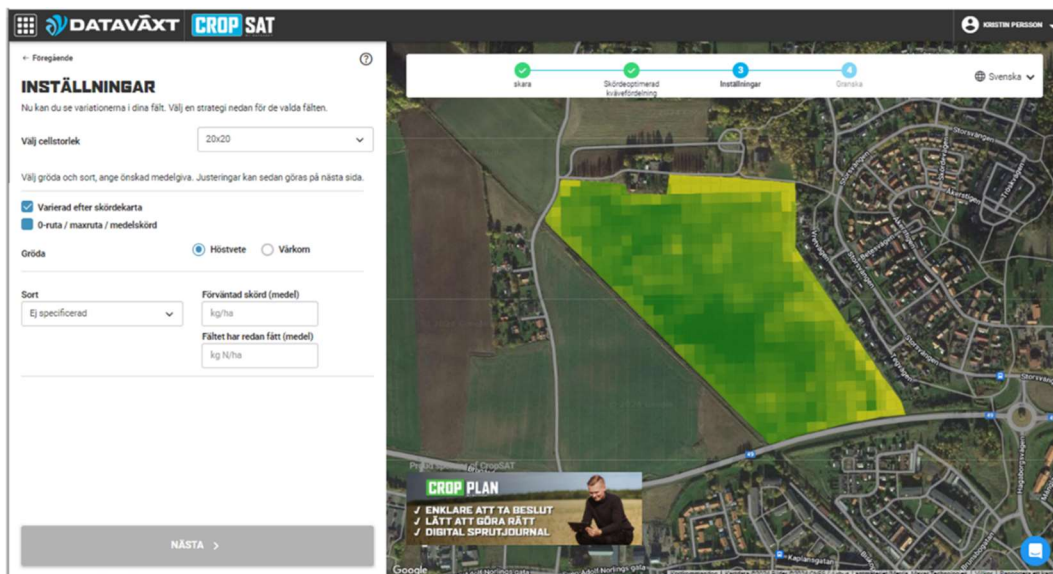
Figur 3.3. Absolut medelfel (MAE; kg ha^{-1}) i en korsvalidering av linjära regressionsmodeller för satellitbaserad skördekartering, där ett fält utelämnades i taget. Översikten visar resultat för 40 m upplösning. Ju mindre fel (starkare grön färg), desto bättre modell. Den röda rektangeln markerar den modell som var bäst i en kombinerad rankning av r^2 och MAE. Data från Alshihabi *et al.* (manuskript under granskning).

Att NDWI befanns fungera bra kan bero på att det bygger på ett våglängsband där reflektansvärden är känsliga för grödans vattenhalt (runt 1610 nm). Modeller som enbart baserades på data från tidiga stadier (t.o.m. blomning) eller enbart på GRVI – ett index som enbart bygger på reflektans av synligt ljus – fungerade sämre. Den bästa modellen i den här studien, som baserades på NDWI vid mjölkmodnad och axgång, hade ett genomsnittligt fel på knappt 400 kg ha⁻¹ och ett r²-värde på 0,59.

Själva tanken med det föreslagna ramverket är dock att man från fall till fall ska ta fram nya modeller och det blir förmodligen viss variation i vilka index och utvecklingsstadier som fungerar bäst. Det kan vara inbyggt i algoritmen att ett antal varianter testas och den som är bäst i en intern valideringsprocess blir den som tillämpas för att generera skördekartor. Baserat på denna studie kan man dock ge rekommendationen att man bör sträva efter att ha med satellitbilder från perioden mellan avslutad blomning och det att grödan börjar mogna, samt att man bör ha med vegetationsindex som, liksom NDWI säger något om grödans vattenstatus. I tidigare studier har man sett att index som inkluderar Sentinel-2 band 11 och 12 (1610 nm respektive 2190 nm) även fungerade bra för proteinhaltsprediktioner i spannmål (Morandin Figueiredo *et al.*, 2023; Börjesson *et al.* 2019). GRVI, som baseras enbart på synligt ljus och som kan beräknas på bilder från exempelvis en vanlig kamera fungerade sämre än de vegetationsindex som baseras på längre våglängdsband och är förmodligen inte tillräckliga för ett välfungerande system.

3.2.3 Implementering i beslutsstödsystem

Det system som beskrivs här finns ännu inte implementerat. Det finns en rad frågor som först behöver lösas och en mer omfattande utvärdering kan rekommenderas. Bland annat behöver juridiska frågor kring datadelning och eventuell ersättning till de lantbrukare som delar data från sina tröskor diskuteras och prövas. Detta ligger i tiden och initiativ som Agronod, som utvecklar en plattform för delning av lantbruksdata, kan komma att utgöra en grund för sådana här system. Man kan alternativt tänka sig att man bygger systemet på andra typer av referensdata, såsom de data från SCBs årliga telefonintervjuer som ligger bakom nationell skördestatistik. I det satellitbaserade beslutsstödsystemet CropSAT har vi lagt in enkel funktionalitet att använda en satellitbaserad skördekartor från ett tidigare år som bakgrundsinformation när man tar fram tilldelningsfiler för precisionsgödning med kväve (Figur 3.4). I systemet tas skördekartorna fram med hårdkodade modeller, som är beroende av att man har satellitdata från slutet av blomningen till mjölkmodnad (DC69–73) (eller så nära som möjligt). Systemet kräver också att användaren anger medelskörden för fältet – den satellitbaserade prediktionsmodellen ger alltså “enbart” den rumsliga skördevariationen kring detta medelvärde.



Figur 3.4. Exempel på ett satellitbaserat beslutsstödsystem där man kan använda satellitbaserad skördekartor från ett tidigare år som bakgrundsinformation, när man genererar tilldelningsfiler för plats-specifik kvävegödsling.

3.3 Semi-empirisk konceptuell skördmodellering

Syftet med den här delstudien var att ta fram och utvärdera semi-empiriska konceptuella skördmodeller som är anpassade för digitala beslutsstödsystem för precisionsodling. Tanken är att de ska vara tekniskt och datamässigt enklare att tillämpa än förekommande processbaserade modeller och att de ska ha bättre tillförlitlighet än helt empiriska satellitbaserade skördmodeller (såsom den som testades i delstudie 1).

3.3.1 Metod

3.3.1.1 Modeller

En konceptuell modell formuleras baserat på en uppfattning om hur något fungerar medan en empirisk modell, i det här fallen en enkel linjär regression, tas fram baserat på observationsdata. Den semi-empiriska metod som testats här fungerar som följer:

- 1) ett tidsintegrerat skördeindex (y_i) beräknas med en konceptuell modell (Ekvation 3.1), och
- 2) skördeindexet räknas om till absolut skörd (t.ex. ton per hektar) med en empirisk modell (Ekvation 3.2).

I ekvation 3.1 står y_i för skördeindex, v_i för vegetationsindex, t_i för temperaturindex, l_i för ljusindex och d_i för torkindex. Dessa beräknas per dag (i) från meteorologiska data, multipliceras, och summeras från sådd till den dag då prognosen görs (n). Eftersom Ekvation 3.2 parametreras för detta utvecklingsstadium kan den inte antas vara tillämplig för andra utvecklingsstadier.

$$y_i = \int_{i=1}^n v_i \times t_i \times l_i \times d_i \quad \text{Ekvation 3.1.}$$

$$\text{Skörd} = f(y_i) \quad \text{Ekvation 3.2.}$$

Ekvation 3.1 utgår ifrån att den gröna biomassan (v_i) bygger skörden genom fotosyntesen. En lång period med kraftig biomassa och gynnsamma förhållanden ger en större skörd än en mindre biomassa eller en kortare period. Temperatur-, ljus-, och tork-indexen (t_i , l_i och d_i) varierar mellan 0 och 1. Under förmodat optimala förhållanden är de 1 och utgör ingen begränsning medan under icke-optimala förhållanden är de lägre än 1 och begränsar den gröna biomassans kolassimilering. Indexen är dock alltid större än noll. Indexen för temperatur och ljus (globalstrålning) är noll vid 5 °C eller 5 W m⁻², och ökar linjärt till 1 vid 15 °C eller 15 W m⁻². Optima är satta kring medelförhållanden för platsen. Detta baseras på tanken att grödan är förädlad och anpassad för att fungera optimalt i det område där den odlas. Någon begränsning vid överoptimala förhållanden togs inte med i denna studie. Perioder med torra (*drought*) eller liten nederbörd (*dryspell*) identifierades enligt Malmquist och Barron (2022). Torkindexet sattes *ad hoc* till 0,7 under torra och till 0,85 till under perioder med liten nederbörd.

3.3.1.2 Data

Studien gjordes i havre, med data från en serie kvävegödslingsförsök (Engström *et al.*, *in press*). Sammanlagt nio försök gjordes på tre platser i Västra Götaland (Multorp, Lanna och Götala) under tre år (2020–2022). Ett förmodat kvävebegränsat, samt en förmodat icke-kvävebegränsat, led användes med totala kvävegivor om 70 respektive 130 kg N ha⁻¹ togs med. Bevattnade led utelämnades. Alla sorter togs med och medelvärden beräknades per försök och led.

Man kan inte direkt koppla vegetationsindex från Sentinel-2 till skördedata från försöksrutor, eftersom försöksrutorna är mindre än satellitpixlarna. Istället samlade vi in data med en drönaruren kamera (MAIA-S2, Eoptis, Trento, Italy) som har nio band som spektralt överensstämmer med banden hos satelliten Sentinel-2 (från 400 nm till 890 nm, se t.ex. Piikki *et al.* 2022 för detaljer). Söderström och Persson (2022) har diskuterat och exemplifierat metoden att använda drönardata i fältförsök för att ta fram modeller som ska tillämpas på satellitdata. I tre försök gjordes den sista flygningen för tidigt, innan vegetationsindexkurvan planat ut. Dessa försök

uteslöts, eftersom det inte gick att konstruera en kurva över vegetationsindexets utveckling över säsongen. Det var försöken i Lanna och Multorp 2020 samt på Götala 2021. Det återstod alltså sex försök. Utvecklingsstadierna i de sex inkluderade försöken var 31–32, 43–45 och 61–71 vid de tre flygtillfällena.

Drönarflygningarna genomfördes vid jämn väderlek (soligt eller molnigt) på 80 m flyghöjd (på samma sätt som redovisats i detalj i Piikki *et al.*, 2022). Bilder togs en gång i sekunden, flyghastigheten var 5 m s^{-1} , och överlappet mellan bilder var minst 80 %. Bilderna från en flygning sattes efteråt samman till en mosaik (en multispektral bild med nio våglängdsband som täcker ett helt försök) med webbapplikationen Solvi (<https://solvi.ag>). Plattor ($50 \times 50 \text{ cm}$ stora) med känd reflektans (med 2, 9, 23 respektive 44 % reflektans) hade placerades ut i försöken vid varje flygning, och användes för kalibrering av bilddata i mosaikerna till reflektans (andel reflekterat ljus).

Det vegetationsindex som användes var d75r6, vilket korrelerar väl med grödans kvävestatus (Piikki *et al.*, 2022). NDWI, som fungerade bra i de helt empiriska modellerna (delstudie 1), kunde tyvärr inte testas eftersom det vattenkänsliga våglängdsbandet kring 1610 nm inte registreras av den drönarburna kameran. Vegetationsindexet sattes till 0,1 vid 17 dagar efter sådd (strax efter uppskattad uppkomst) och till 0,25, 15 dagar innan skörd (uppskattad mognad) med ledning av satellitbilder från försöksplatserna. En säsongskurva över vegetationsindexet skapades sedan genom att anpassa en *spline*-funktion till de fem punkterna (tre observationer samt uppskattad uppkomst och mognad). För att undvika extrapolering, begränsades funktionen uppåt till det högsta observerade värdet på vegetationsindexet.

Väderdata hämtades från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI, Norrköping, Sverige) via SLU Fältforsks json-tjänst (<https://www.ffe.slu.se/lm/JSON/InfoDatauttag.html>). Det var dagliga värden för lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$), globalstrålning (W m^{-2}) och nederbörd (mm) i gridformat (2,5 km MESAN grid; Häggmark *et al.*, 2000). Data extraherades för de gridceller fältförsöken låg i.

3.3.1.3 Modellutvärdering

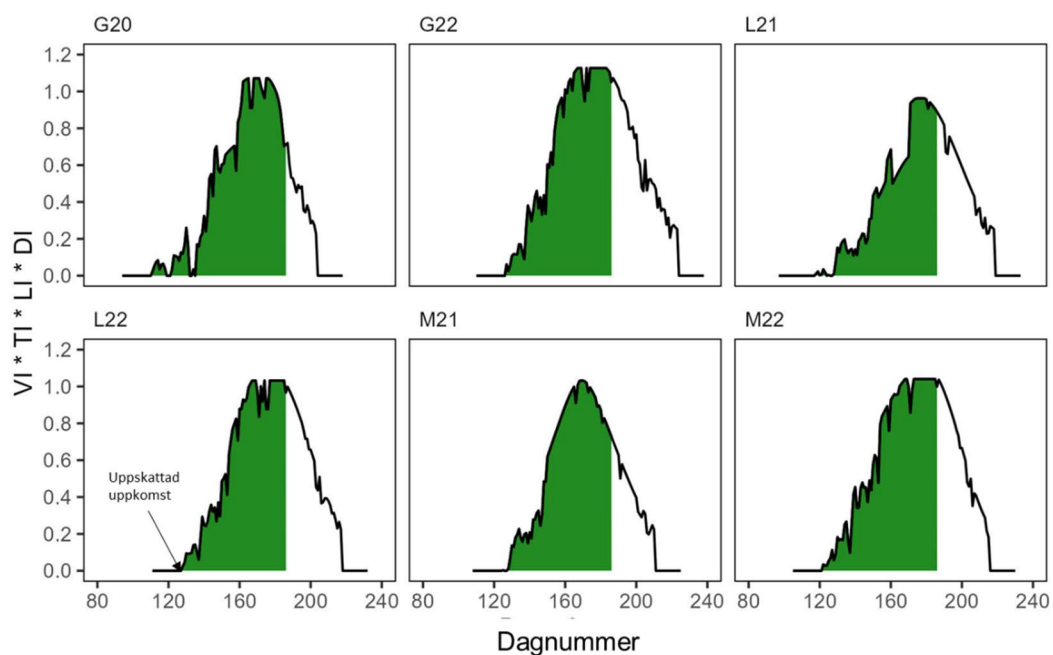
Modellberäkningar gjordes vid begynnande stråskjutning, under axets vidgning, under blomning samt vid skörd. Ett antal varianter testades: skördeindexet (y_i) beräknades enbart från vegetationsindexkurvan (v_i), samt med vegetationsindexkurvan begränsad av en faktor i taget ($v_i \times t_i$, $v_i \times l_i$ och $v_i \times d_i$), begränsad av två faktorer ($v_i \times t_i \times l_i$, $v_i \times t_i \times d_i$ och $v_i \times l_i \times d_i$) eller begränsad av alla faktorer ($v_i \times t_i \times l_i \times d_i$). Som referens användes modellprediktioner från

helt empiriska modeller, enbart baserade på vegetationsindexet vid prognostillfället.

I ett beslutsstödsystem är det viktigt att de modeller som används är tillförlitliga på andra platser och (om prognos ska göras) under andra år än de den parametriserades för. Vi gjorde en korsutvärdering där ett försök i taget utelämnades. MAE och modelleringseffektiviteten E (Nash och Sutcliffe, 1970) användes som utvärderingsmått. E anger i hur stor grad variationen i ett dataset förklaras. Ett E -värde ≤ 0 tolkas som att ett medelvärde av observationerna är mer korrekt än vad prediktionerna är, och ett E -värde på 1 betyder att alla observerade värden predikteras exakt.

3.3.2 Resultat

Dagliga värden för vegetationsindexet (vi) multiplicerat med de begränsande indexen ($ti \times li \times di$) visas i Figur 3.5. Dessa integreras från sådd till det datum då prediktionen görs (grönmarkerad area). I Tabell 3.2 visas utvärderingsstatistik från de olika korsutvärderingarna och i Figur 3.6 visas predikterade värden plottade mot de observerade värdena för tre av modellerna.



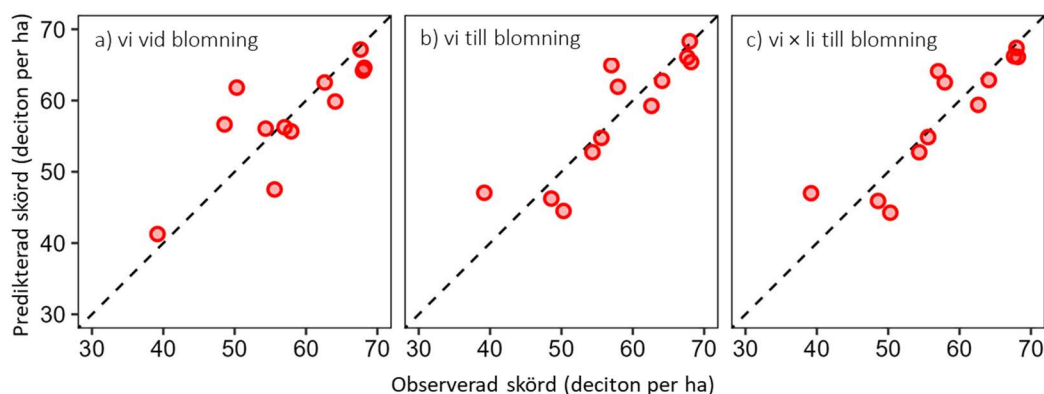
Figur 3.5. Vegetationsindex (vi) som begränsas av icke-optimal temperatur (ti), ljus (li) och nederbörd (di) i de sex försöken. Den gröna arean visar det tidsintegrerade skördeindexet som kalibreras mot skörd i en empirisk modell. Dataurval: enbart gödsling 130 kg N ha^{-1} . I rubrikerna betyder G=Götala, L=Lanna och M=Multorp, medan siffrorna anger året.

Tabell 3.2. Absolut medelfel (MAE; kg ha⁻¹) och modelleringseffektivitet (E) från korsvalidering av semi-empiriska skörde modeller. vi=vegetationsindex, ti=temperaturindex, li=ljusindex, di=torkindex, DC=utvecklingsstadium enligt Zadoks et al. (1974), tidsint.=tidsintegrerat.

Ingående index				Tidsint.	MAE (E)			
vi	ti	li	di		DC 31–32	DC 43–45	DC 61–71	Skörd
x				Nej	862 (<0)	400 (0.61)	388 (0.63)	---
x				Ja	1206 (<0)	1036 (<0)	331 (0.76)	375 (0.77)
x	x			Ja	1068 (<0)	727 (<0)	363 (0.67)	569 (0.34)
x		x		Ja	1172 (<0)	1009 (<0)	326 (0.77)	368 (0.78)
x			x	Ja	1117 (<0)	710 (0.01)	381 (0.63)	397 (0.7)
x	x	x		Ja	1067 (<0)	728 (<0)	361 (0.67)	564 (0.36)
x		x	x	Ja	1084 (<0)	683 (0.07)	381 (0.62)	406 (0.69)
x	x		x	Ja	1002 (<0)	655 (<0)	448 (0.51)	554 (0.33)
x	x	x	x	Ja	1002 (<0)	656 (<0)	445 (0.51)	555 (0.33)

3.3.3 Diskussion

Skördeprognoser före blomning fungerar dåligt (prediktionerna blev ofta mer fel än om man använt medelskörden för alla försök). Slutsatsen blir därför att så länge man inte har bättre prognosmodeller än så här får man fortsatt förlita sig på egna uppskattningar, till exempel baserat på historiska skördar, när man bestämmer gödselgiva. Skördeprediktionerna fungerade generellt bäst vid blomning. Det är för sent för att de ska kunna användas som underlag för gödsling det aktuella året, men modellerna kan användas för skördekartering innevarande eller tidigare år. Skördeprediktionerna som baserades på hela säsongen (vid skörd) var ibland mindre exakta än de som gjordes under blomning: detta gäller framför allt de modeller där temperaturindexet var med.



Figur 3.6. Predikterad skörd plottad mot observerad skörd för olika modeller. vi=vegetationsindex, li=ljusindex.

Tidsintegrerade index fungerade bättre än referensmetoden (att prediktera skörd från vegetationsindex vid ett tillfälle) även när *vi* integrerades utan begränsande faktorer. Tidsintegrerade index kan ha praktiska fördelar vid implementering i beslutsstödsystem. Exempelvis kan de tillämpas för nya år – eftersom en säsongskurva anpassas är man inte beroende av satellitbilder i specifika utvecklingsstadier, bara av att det finns tillräckligt många observationer för att man ska kunna anpassa en *vi*-kurva.

Att ta med den begränsande effekten av torka eller liten nederbörd som begränsande faktor förbättrade inte modellerna. Möjligen var det inte så mycket torkstress under dessa år. Det är också tänkbart att effekten av torka eller liten vattentillgång redan kommer med i modelleringen genom att vegetationsindexet påverkas. Kanske är det ett bättre alternativ att använda ett vegetationsindex som är känsligt för grödans vattenstatus (t.ex. NDWI) än att försöka modellera effekt av torkstress via agrometeorologiska index. I skördekarteringsstudien ovan såg vi att NDWI fungerade bättre än andra vegetationsindex för skördekartering.

Sammanfattningsvis kan sägas att detta är en första pilotstudie med flera begränsningar. Man kan ändå se att tidsintegrerade vegetationsindex har potential att fungera bättre som predikterande variabel för skörd än vegetationsindex vid enbart ett tillfälle. Semi-empiriska skördemodeller som tar med den begränsande effekten av ljus, temperatur och liten vattentillgång är en intressant kompromiss mellan mekanistiska (processbaserade) och empiriska (datadrivna) modeller för implementering i digitala beslutsstödsystem för precisionsodling men vi såg dock inga stora förbättringar i hur väl skörden predikterades när dessa faktorer togs med i den här studien, kanske beroende på att vegetationsindexet redan förklarar en stor del av variationen och kanske för att de begränsande indexen inte är optimalt formulerade. Det kan vara värt att förfina de begränsande indexen, exempelvis genom litteraturstudier. Man behöver också utvärdera hur väl inomfältvariation i skörd återspeglas av modellen. Den främsta användningen av de beskrivna modellerna är förmodligen att ta fram skördekartor från tidigare år som underlag för skördepotentialskartor – den här pilotstudien visade inga lovande resultat för skördeprognos under säsongen.

4 Att bedöma risk för bildning av mykotoxiner vid odling och lagring

4.1 Bakgrund och utmaningar

Att mögelskadad spannmål kan vara hälsovådlig har varit känt under mycket lång tid och forskningsområdet som rör mögelgifter, mykotoxiner, är stort och spänner idag över hela världen. Man räknar globalt med mycket stora förluster på grund av att mykotoxiner gör spannmålen obrukbar som människoföda. Man behöver även beakta att många djur, t.ex. grisar är lika känsliga som vi, så mögelskadad spannmål är ofta inte heller lämplig som djurfoder.

Två grupper av svampar, så kallade fältsvampar och lagersvampar, producerar mykotoxiner som kan finnas i spannmål. Fältsvampar som till exempel *Fusarium* producerar mykotoxiner i grödor på fält och även i vissa fall även efter skörd. *Aspergillus* och *Penicillium* är exempel på lagersvampar som producerar mykotoxiner i den lagrade skörden. Mykotoxiner som produceras av dessa svampar har olika egenskaper och toxicitetsnivåer. Det finns ett stort antal mykotoxiner att ta hänsyn till, men under svenska förhållanden har en mycket stor del av uppmärksamheten under senare år ägnats åt deoxynivalenol (DON) och ochratoxin A (OTA).

DON bildas framförallt i fält av *Fusarium*svampar och i Sverige framförallt av arten *Fusarium graminearum*. En orsak att fokusera på DON var att man 2006 införde gränsvärden inom EU för bl.a. DON (Förordning 1881/2006). Lantmännen har under perioden 2011-2023 årligen tagit ut och analyserat cirka 6000 havreprover som levererats in. Däremot har endast ett mindre antal stickprov tagits på andra spannmålsslag som t.ex. vete. Orsaken till att fokusera på havre är att man 2011 hade osedvanligt stora problem med DON just i havre och så mycket som hälften av skördad havre höll halter över gränsvärdet på 1750 ppb för obearbetad havre, beroende på region. Problemen i andra grödor var mindre även om man i försök noterat att vårvete varit ungefär lika drabbat som havre. Det finns en ganska god kunskap om under vilka vädermässiga förhållanden som risken för höga DON-halter är som störst. Sedan länge är det känt att svampen infekterar spannmålen i samband med blomningen som oftast inträder under juni månad, beroende på spannmålsslag och landsdel (Hjelkrem et al., 2017). Även i Sverige har detta studerats ingående och det finns sedan en tid en prognosmodell framtagen som baseras på väderdata och Lantmännens inleveransdata för att bedöma risken för DON-bildning. Under åren har även kartmaterial tagits fram som visar på risken för förhöjda DON-nivåer i olika regioner. Inom projektet har prognosmodeller förfinats

och kartmaterial för de senaste åren tagits fram. En första prototyp för hur dessa data skall kunna användas operativt av Lantmännen har också tagits fram.

Mer resurser i projektet har ägnats åt Fusariumtoxiner T2+HT2. Dessa har inte uppmärksammats lika mycket som DON, delvis på grund av att det inte funnits gränsvärden för dessa förrän 2024. Dock har de studerats relativt ingående just i de nordiska länderna, kanske delvis på grund av att toxiner framförallt förekommer i havre, vilket är ett viktigt spannmålslag i Norge, Sverige och Finland. Det är också känt att *Fusarium langsethiae* är den svamp som dominerar bildningen av dessa toxiner i Norden. T2- och HT2-toxiner är betydligt giftigare än DON (tolerabelt dagligt intag är $0,02 \mu\text{g kg}^{-1}$ kroppsvikt jämfört med $1 \mu\text{g kg}^{-1}$ kroppsvikt för DON) och gränsvärden för barnmat⁴ är också betydligt lägre (10 ppb jämfört med 150 ppb för DON, Förordning 2024/1038). I projektet har därför en relativt omfattande kartläggning utförts för att studera regionala skillnader i förekomst, inomfältvariation, samt sambanden mellan förekomst och väderfaktorer. De geografiska skillnaderna är relativt tydliga och kan sannolikt användas för att avgränsa regioner som är mer lämpliga för produktion av havre avsedd för barnmat.

Ochratoxin (OTA) kan under vissa betingelser bildas i lagrad spannmål. Risken för OTA är dock relativt liten, även om enstaka fynd görs årligen. Den mögelsvamp som kan bilda OTA (som misstänks vara cancerframkallande) under svenska förhållanden, *Penicillium verrucosum*, bildar inte detta toxin vid normala lagerförhållanden. Vid något lägre vattenhalter och temperaturer kan man dock notera mögeltillväxt i spannmålslager, som kan ge nedsatta kvalitetsegenskaper och potentiellt kan andra mindre kända toxiner bildas som kan ge problem, inte minst för känsliga konsumentgrupper såsom barn. I projektet har vi därför valt att inte fokusera just på OTA utan på hur man med ny teknik kan övervaka mögeltillväxt mer generellt i lagrad spannmål. I synnerhet har vi fokuserat på mätning av koldioxidhalten (CO_2), en metod som redan används av Lantmännen i viss utsträckning, men där sambandet mellan avlästa värden och kvalitetsförsämringar behöver verifieras.

4.2 DON-kartering av förekomst och vidareutveckling av prognosmodeller

Som nämnts ovan har arbete med prognosmodeller och kartering av förekomst av DON arbetats med en längre tid, men arbetet har fortsatt i Baby Grain Passport-projektet. Dels har arbetet med att bedöma risken för förhöjda DON-nivåer i havre som levererats in till Lantmännen baserat på väderdata fortsatt (11 km MESAN

⁴ Gäller för torrsubstansen hos produkten på marknaden och det alla spannmålsbaserade livsmedel

grid; Häggmark *et al.*, 2000). Prognosmodeller har tagits fram baserade på väderdata från och med hösten före odlingsäsongen fram till olika brytpunkter under säsongen då man har nytta av prognoser för olika åtgärder. Projektet har sammanfattats i av Wang *et al.* (manuskript). I samband med att prognosmodellerna vidareutvecklats, har även kartmaterial tagits fram för att beskriva de geografiska skillnaderna vad gäller DON-förekomst över åren och för ett begränsat antal år har data tagits fram för att studera om geografiska skillnader är statistiskt signifikanta. En mindre studie av skördetidens effekt på DON-halter har också genomförts.

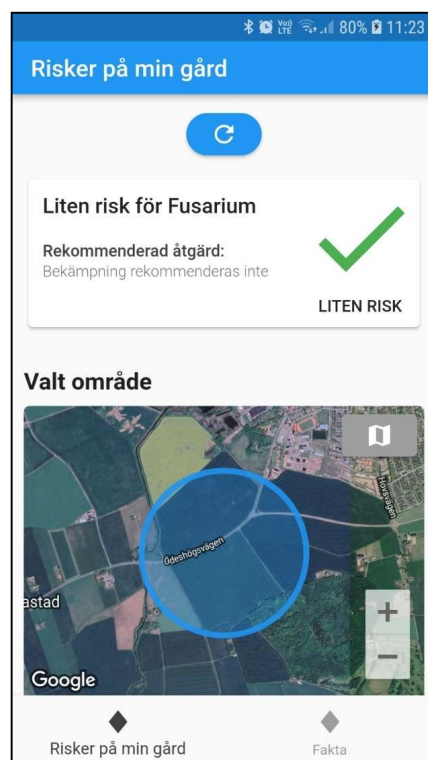
Förutom arbetet med att studera DON-halter i prover som levererats in till Lantmännen, har även ett liknande arbete genomförts för att studera koppling mellan väder och DON i växtodlingsförsök (Marzec-Schmidt, *et. al.*, 2021). Fördelen med att använda data från försök är att man även har andra data att tillgå från försöksplatserna, men samtidigt är totala mängden observationer mer begränsad. I detta arbete ingick förutom havre, även vårkorn, vårvete och höstvete. Dessutom ingick som en del i ett annat projekt⁵ en jämförelse med data från Litauen och Polen.

Arbetet med prognosmodellen, geografiska skillnader samt effekt av skördetid baserat på inleveranser av havre till Lantmännen har varit en fortsättning av det arbete som pågått under tidigare år. En app, DONAppen har tagits fram (se Figur 4.1), med vilken man enkelt får fram risknivån för det område man befinner sig. Man får en bedömning av om man ligger i lägsta riskklassen (under 500 ppb), medelnivån (500–1000 ppb) eller högsta klassen (över 1000 ppb), vid tre tillfällen (brytpunkter) under säsongen. I samtliga fall börjar man samla in väderdata den 1 november året före odlingsäsongen. Det första tillfället då man kan ha nytta av prognosen är under juni då man planerar att eventuellt utföra en bekämpningsinsats för att minska risken för förhöjda DON-halter vid skörd. Det finns mycket forskning som visar att bekämpning med triazoler vid spannmålsgrödans blomning har relativt god effekt på de *Fusarium*svampar, främst *F. graminearum*, som bildar DON – bättre effekt än vid en tidigare bekämpning (t.ex. Edwards och Godley, 2010). Därför lades den första brytpunkten för väderdata i prognosmodellen till 1 juni för att man skulle ha chans att använda modellen för att besluta om ev. bekämpningsinsats som vanligtvis utförs i slutet av juni eller början av juli. De övriga brytpunkterna lades vid 1 juli och 15 augusti. Dessa brytpunkter var anpassade efter att man ska kunna dels planera för ev. förhöjda DON-halter (1 juli) och dels ska kunna få en uppfattning om risknivån i samband med att skörden startar (15 augusti). Den första brytpunkten är mest användbar för lantbrukare, medan de andra främst är till nytta för handelsledet.

⁵ Finansierat av Svenska institutet (dnr: 10230/2017)

Wang *et al.* (manuskript) har tagit fram *Random Forest*-modellerna i appen, som bygger på medelvärden för indata för perioden 1 november året före odlingsåret och 14-dagarsperioder för perioden från 1 april fram till de olika brytpunkterna. Att använda 14-dagars-perioder hade tidigare använts med framgång i ett tidigare arbete (Persson *et al.*, 2017). De väderdata som användes var medelvärden för perioderna för minimitemperaturen, medeltemperaturen, maxtemperaturen, nederbörden, relativ fuktighet, vindhastighet, vindriktning samt instrålning och data för cirka 6000 inleveranser per år under åren 2012 till och med 2019 har använts. Ridascreen ELISA (Rhone Biopharm, Darmstadt, Tyskland) eller Lateral Flow Devices (Charm Sciences Inc., Lawrence, MA USA) har använts för DON-analyserna.

Arbetet av Wang *et al.* (manuskript) kan sammanfattas med att det tycks bekräfta andra erfarenheter av att vädret under sommarmånaderna är betydelsefullt för att bedöma risken för förhöjda DON-halter. Då data från ett år som inte varit med i kalibreringsmaterialet användes för validering (2016) var det bara möjligt att prediktera klasserna låg och hög risknivå med ganska god säkerhet (75% respektive 80%). Medelnivån kunde dock inte predikteras väl. En orsak kan vara att det detta år var mycket få observationer i denna klass. De variabler som var mest användbara vid den externa valideringen för att förklara klassningar i medelklassen och den högsta klassen, alltså att de var värdefulla för att förklara höga DON-halter var hög



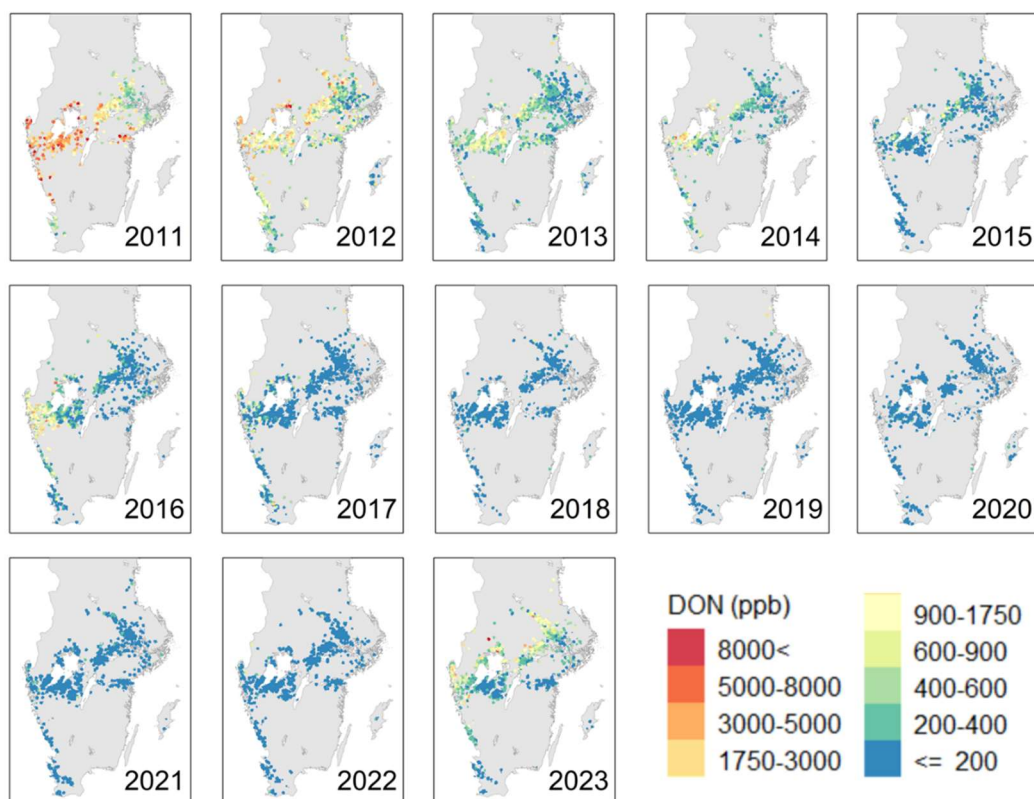
Figur 4.1. Exempel på sprutrekommendation då man använder DONAppen vid den första brytpunkten, 1 juni

nederbörd i december året innan odlingsåret samt låg temperatur i början av augusti. Ett försök gjordes även att använda bara två klasser, en under 500 ppb och en över. Då steg andelen korrekta klassificeringar till 84%.

I Baby Grain passport-projektet har även prognoser tagits fram för åren 2020–2024. Data för de aktuella åren har matats in och prognoser presenterats via appen. Dock pausades arbetet med att lägga ut data via appen 2024 och istället har Lantmännen erhållit information vad gäller juniprognosen direkt via beräkningsmodellen som hanteras av mjukvaruleverantören (Niffitech, Lund, Sverige). Under denna period har risken hela tiden varit låg. På samtliga platser har man legat under första brytpunkten på 500 ppb och värdet i verksamheten har legat i att informera om detta och eventuellt har vissa bekämpningsinsatser undvikits. Samtliga data har också sammanställts i kartform (Figur 4.2) Man kan notera att 2023 utmärker sig genom förekomst av relativt många höga observationer i Västmanland och Dalarna. I många av dessa fall levererades havren in sent och det var detta år tydligt att andel prover över gränsvärdet var betydligt högre i sent inlevererad havre (Figur 4.3).

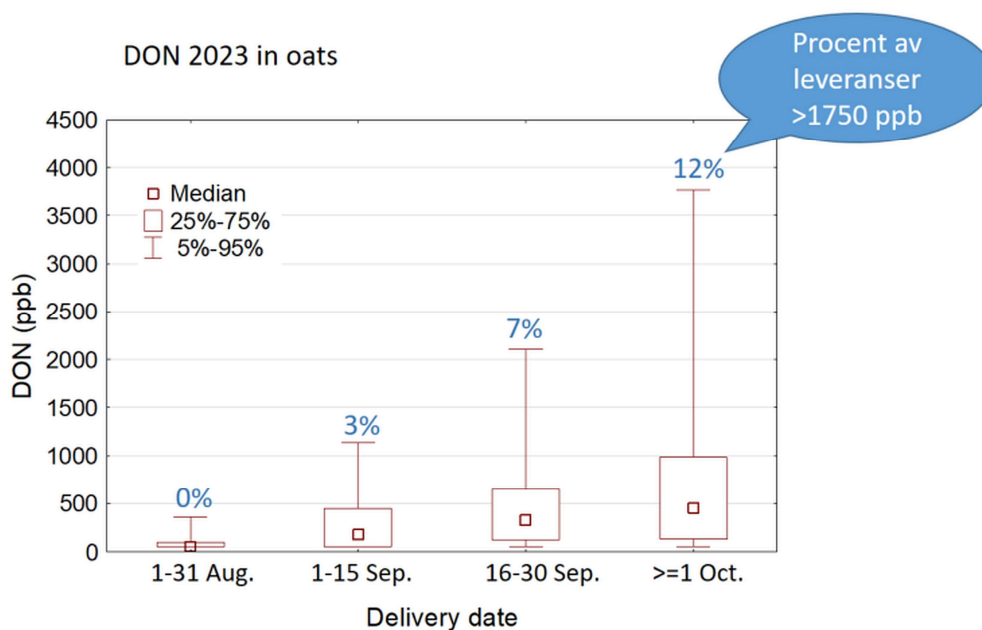
4.2.1 Arbete med prognosmodellen baserat på försöksdata

Detta arbete omfattade data från försök under åren 2010 t.o.m. 2014. Anledningen till att arbeta med detta dataset var att det under perioden fanns bra tillgång på



Figur 4.2. DON-halter i havreleveranser 2011–2023 (medelvärden för 5 km-rutor).

väderdata och att DON-nivåerna varierade en hel del över åren. Det var höga halter 2012 och framförallt 2011, medan de var lägre under de övriga åren. De försök som ingick var 80 havreförsök, 53 vårkornförsök och 70 vårveteförsök. I havreförsöken, som redovisas här, ingick endast sorten Kerstin, obehandlade led. De vädervariabler som användes var desamma som användes i Wang *et al.* (manuskript) Data från november t.o.m. mars användes dock inte, utan endast data från 1 april fram till 31 juli. Däremot användes rullande medelvärden för 14-dagarsperioder för perioden. Med detta menas att man förflyttade perioden med en dag i taget, så att man på så sätt totalt fick fram 110 14-dagarsperioder. Att använda 14-dagarsperioder hade visat sig lämpligt utifrån tidigare svenska arbeten (Persson *et al.*, 2017) och även brittiska erfarenheter (Xu *et al.*, 2014). Samma vädervariabler användes som input som i arbetet med Lantmännens inleveransdata, men instrålningsdata ersattes med lufttryck. Istället för SMHIs griddata användes data från de väderstationer som placerats ut i anslutning till försöken. Prognosmodellernas möjlighet att förutse risken att komma över brytpunkten 200 ppb bedömdes. Att välja 200 ppb berodde delvis på tidigare erfarenheter av att det kan vara svårt att ta fram bra modeller om det saknas data i vissa klasser och att detta var en mer rimlig nivå än 500 ppb med tanke på det material som finns tillgängligt. I denna undersökning låg 29% av proverna över 200 ppb. För barnmat är det också rimligt att använda en lägre brytpunkt. Dessutom låg den tidigare gränsen för bearbetade spannmålsprodukter som skall användas för barnmat på 200 ppb, men den har numera sänkts till 150 ppb. I detta arbete analyserades DON med hjälp av vätskekromatografi med tandem masspektrometri (LC-MS-MS).

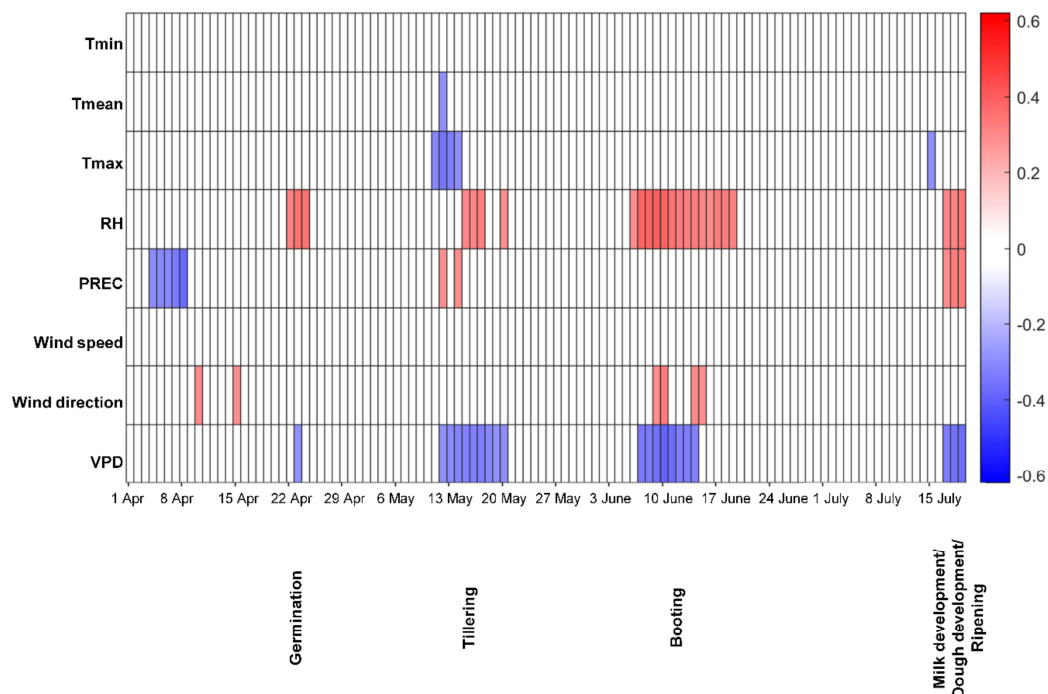


Figur 4.3. Andel havre som legat över gränsvärdet för havre under 2023 beroende på inleveranstid.

Ett stort antal olika prognosmodeller utvärderades: *Decision Tree*, *Random Forest*, *Support Vector Machine with Linear Kernel* (SVML), och *Support Vector Machine with Radial Basis Function Kernel*. Alla bygger på träning på 75% av försöken och test på resterande försök.

Resultaten kan sammanfattas med att det varierade ganska mycket mellan de olika spannmålslagen vilka faktorer som var viktigast för att förklara skillnaderna i DON-innehåll: För havre var det generellt så att hög nederbörd och höga relativa fuktigheter var kopplat till högre DON-halter, men inte som förväntat under blomning i slutet av juni och början av juli (Figur 4.4).

Att man inte såg så tydlig koppling till just väderförhållanden under blomning skulle delvis kunna förklaras av att man har svårt att definiera blomning i havre, som pågår längre tid än i övriga spannmålslag. I Figur 4.4 ser man att nederbörd och hög luftfuktighet i mitten av juli samvarierar positivt med DON-halten. Man har dock även i andra studier sett att fuktigt väder efter blomningen kan öka DON-halterna (Persson *et al.*, 2017) och det kan förklaras av att svampen som infekterat under blomningen får god möjlighet att växa till och bilda toxiner vid fuktiga förhållanden senare under säsongen. Den prognosmodell som fungerade bäst för att bedöma om ett havreprov skulle tillhöra klassen över 200 ppb eller inte var SVML med 70% korrekta klassificeringar.



Figur 4.4. Korrelationskoefficienter (Spearman) mellan DON i havre och olika vädervariabler från 80 fältförsök. Röd färg indikerar positiv korrelation, medan blått indikerar negativ korrelation. Ursprungligen publicerad av Marzec-Schmidt *et al.* (2021), licens: CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

4.3 Kartering av T2+HT2 och koppling mellan vädervariabler och toxinförekomst

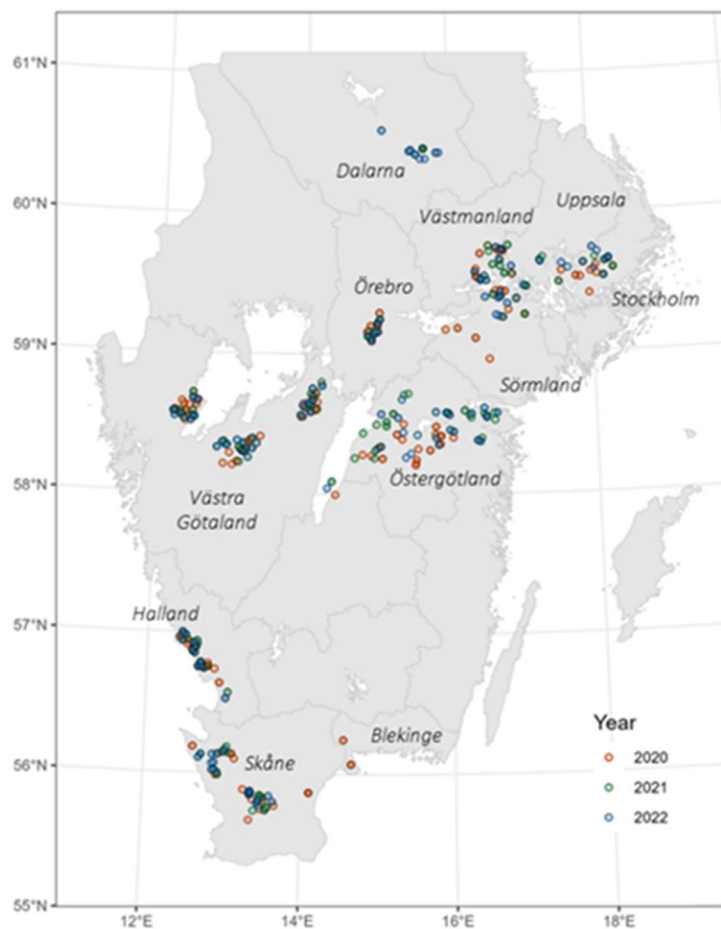
Toxinerna T2+HT2 inte är lika väl kartlagda som DON. I denna studie har en treårig provtagningsinsats gjorts. Mest fokus har varit på att studera geografiska skillnader i förekomst, vilket i första hand skulle kunna användas för att avgränsa sannolikt lämpliga regioner för att produktion av havre avsedd för barnmat. Då relativt tydliga geografiska skillnader kunde iakttas, gjorde även en utredning av kopplingar mellan väder och den sammanlagda halten av T2+HT2. Vi använde i detta arbete endast korrelationer mellan månadsmedelvärden av temperatur och nederbörd och förekomst av T2+HT2 samt ett mindre test av att kombinera olika vädervariabler med hjälp av multivariata metoder. Vi har även gjort ett mindre arbete med att studera inomfältvariationer och även en studie av hur havrekärnors storlek påverkar hur stor andel av toxinerna som försvinner vid skalning.

4.3.1 Geografisk variation av T2+HT2 i havreprover

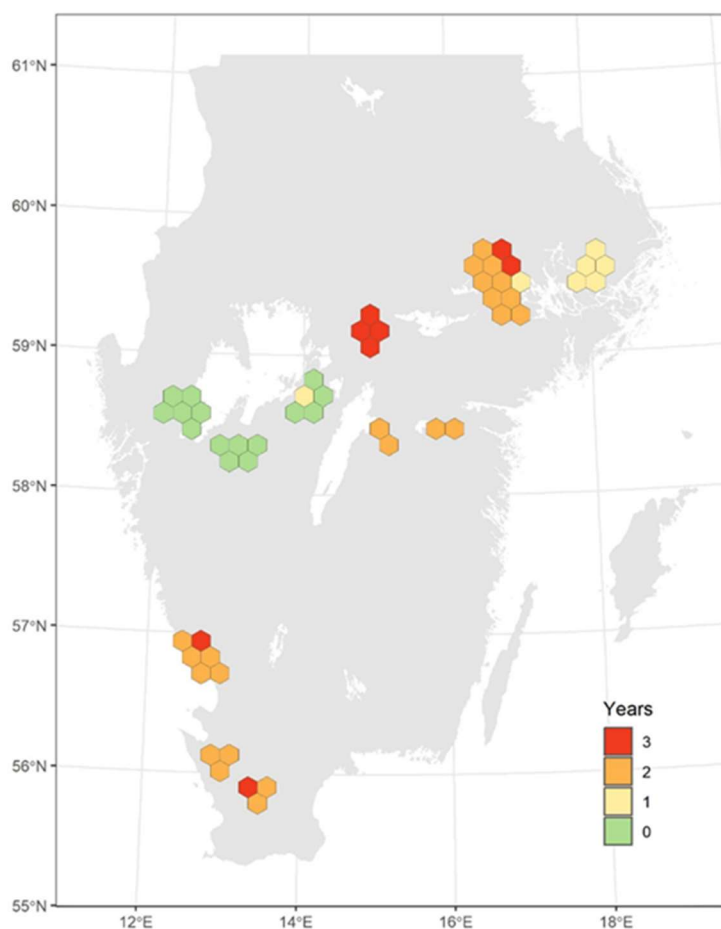
I detta arbete har vi utgått från de havreprover som analyserats med avseende på DON på Lantmännens laboratorium i Svalöv (Cereallaboratoriet). Varje år under åren 2020 till och med 2022 gick vi igenom dessa prover och valde ut 10–14 prover från 10–14 någorlunda distinkta områden i Sverige som är viktiga havreproduktionsområden (Figur 4.5). Antal prover varierade något mellan åren och totalt togs 677 prover ut för T2+HT2-analyser på Cereallaboratoriet.

Analysmetodiken som användes var ELISA (Rhone-Biopharm, Darmstadt, Tyskland). Från början användes ett standardförfarande där man tog ut och malde 5 g prov, men efter att vi studerat olika malningsmängder, konstaterades att om man istället mal 10 gånger så mycket, 50 g, blir variationen mellan upprepade analyser betydligt lägre. Relativa standardavvikelsen var vid malning av 50 g var 22 ppb mot 46 ppb vid malning av 5 g. Detta är värdefulla data, eftersom det är troligt att T2+HT2 analyserna kommer att öka betydligt på grund de nyligen införda gränsvärdena.

För att ta reda på om det förekom geografiska skillnader vad gäller T2+HT2 gjordes beräknades Morans I. vilket påvisade en statistiskt signifikant geografisk variation i överskridandena av 40 ppb under åren 2021 och 2022, men inte 2020. För att åskådliggöra de geografiska skillnaderna beräknades medelvärden av överskridanden (1) och underskridanden (0) av 40 ppb för ett hexagonalt rutnät. Alla prover inom en radie av 20 km från cellernas centrum punkter togs med i beräkningen. Resultatet blir en karta över andelen överskridanden. Figur 4.6 visar antal år (av tre) där minst en fjärdedel av proverna hade en halt av T2+HT2 över 40 ppb. Att använda sig av 40 ppb som gräns grundar sig på att man räknar med att ca 75% av toxinerna försvinner då havren skalas (Meyer *et al.*, 2022) och gränsvärdet för spannmålsprodukter som skall användas till barnmat ligger på 10ppb. Man kan se att under den undersökta perioden var Västra Götaland sannolikt ett lämpligt område för sourcing av havre till barnmat.



Figur 4.5. Platser där prover kommer ifrån som analyserats avseende T2+HT2-toxiner. Från Börjesson *et al.* (manuskript).



Figur 4.6. Antal år 2020–2022 där minst 25% av proverna har en T2+HT2 halt över 40 ppb. Enbart celler med minst fem observationer per år visas. Från Börjesson et al. (manuskript).

4.3.2 Samband mellan väderdata och T2+HT2 värden

Det var tydligt att höga temperaturer och låga nederbördsnivåer i juli var kopplade till höga halter av T2+HT2 nivåer (Tabell 4.1). Det var också tydligt att höga halter året innan kunde utgöra en riskfaktor. Att kombinera olika indata gav något starkare korrelationer.

4.3.3 Diskussion – geografisk variation och vädervariabler

Dessa resultat stämmer väl överens med tidigare erfarenheter (t.ex. Imathiu et al, 2013). En förklaring till att man ser dessa samband, trots att den svamp som producerar T2 och HT2 i Norge och Sverige *F. langsethae* gynnas av fuktighet, är att den konkurrerar bättre med andra svampar vid högre temperaturer och lägre

nederbördsmängder. Dessa erfarenheter behöver studeras mer ingående för att Inomfältsvariationer i förekomst

värdera i hur hög grad väder styr förekomsten av dessa toxiner i jämförelse med andra geografiska skillnader. En intressant iakttagelse är att man trots relativt fuktiga förhållanden i Halland, ändå noterade jämförelsevis höga T2+HT2-halter. Detta stämmer även överens med tidigare erfarenheter (Karlsson et. al., 2023).

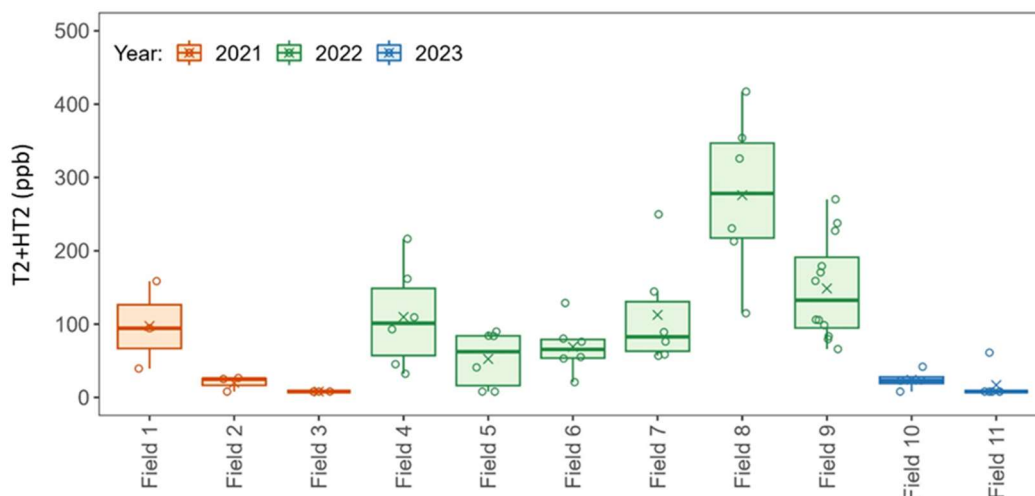
Tabell 4.1. Korrelationer mellan förekomst av förhöjda halter av T2+HT2 och vädervariabler. Den beroende variabeln var andelen prover som översteg tröskeln på 40 ppb T2+HT2. Analyserna utfördes för de hexagonala cellerna i figur 4.6 (n=53). TM=månadsmedeltemperatur, PM=månadsnederbörd. Siffrorna 4–8 är månadsnummer (t.ex. TM7=månadsmedeltemperatur i juli). T2+HT2 föreg.=T2+HT2 föregående år. Anpassad från Börjesson et al. (manuskript).

Prediktor- variabler	År prediktorer	År prediktion	Pearson r	p-värde
TM7	2020	2020	0.35	<0.001
TM7	2021	2021	0.52	<0.001
TM7	2022	2022	0.43	<0.001
TM7	2020–2022	2020–2022	0.52	<0.001
PM7	2020	2020	-0.13	>0.05
PM7	2021	2021	-0.69	<0.001
PM7	2022	2022	-0.16	>0.05
PM7	2020–2022	2020–2022	-0.58	<0.001
T2+HT2	2020	2021	0.51	<0.001
T2+HT2	2020	2022	0.51	<0.001
T2+HT2	2021	2022	0.52	<0.001
TM7, PM7, PM8	2020–2022	2020–2022	0.64	<0.001
TM4, TM7, PM7, PM8, T2+HT2 _{föreg.}	2021–2022	2021–2022	0.75	<0.001

¹ För T2+HT2 föreg. istället 2020–2021

4.3.4 Inomfältsvariation i förekomst av T2+HT2

Inomfältsvariationer med avseende på T2 och HT2 har inte alls studerats tidigare. Vi tog ut 3–12 prover per fält i elva fält i områden med relativt höga halter av T2+HT2, i Sörmland och Halland. Resultaten visade att det ofta var en viss variation inom fältet (Figur 4.7). Proverna 1, 5 och 11 är från samma gård nära



Figur 4.7. Beskrivande statistik för T2+HT2-halter i prover från 11 olika fält i Sörmland och Halland. Kryss anger medelvärdet, mittlinje median, ruta interkvartilintervall. Lodrätt streck indikerar högsta och lägsta observationer inom $1,5 \times$ interkvartil-intervall. Högre och lägre observationer utgör extremvärden (outliers). Från Börjesson et al. (manuskript).

Gudbrandstorp, Halland. Även dessa data indikerar att det finns tydliga geografiska kopplingar, då halterna låg på ungefär samma nivå alla tre åren.

4.3.5 Effekt av kärnstorlek på effekten av skalning

Meyer *et al.* (2022) har studerat i hur hög grad kärnstorleken påverkar hur stor andel T2+HT2 toxin som försvinner vid skalning. Man reducerade halten med 85% i stora kärnor medan man för mindre kärnor bara lyckas skala bort 66%. Detta tyder på att man när det gäller mindre kärnor kanske behöver tillgripa andra metoder, t.ex. putsning, för att få ner halterna lika mycket som för större kärnor. Erfarenheterna kan vara viktiga i de fall man har problem att få ner halterna tillräckligt för att nå de gränser som gäller för barnmat. Därför gjordes ett experiment inom ramen för Baby Grain Passport projektet för att studera detta.

Ett urval om 36 prover med T2+HT2 halter på minst 40 ppb från datasetet ovan kördes först i C-grainutrustning (<https://www.cgrain.se/>) för att ta fram data på genomsnittlig storlek på de kärnor som ingick i provet. Därefter skalades proverna med en laboratorieskalare på Cereallaboratoriet i Svalöv och kördes därefter i C-grainutrustningen igen. Tills sist analyserades T2+HT2 igen på samma sätt som tidigare med hjälp av ELISA-teknik. C-grain används för att bestämma storlek och färg i spannmålsprov med hjälp av bildanalys. Bland applikationerna kan nämnas att man kan bestämma inblandning av vetekärnor i havreprover och färgavvikelser

som indikerar mögeltillväxt. Man kan med hjälp av kärnornas storlek även beräkna genomsnittlig vikt på de spannmålskärnor som analyseras.

De 36 proverna hade en genomsnittlig halt av T2+HT2 på 38,7 ppb före skalningen och i genomsnitt 10,6 ppb efter skalningen. I genomsnitt reducerades T2+HT2 halterna med 68,3% vid skalning. I samtliga fall var halterna över metodens kvantifieringsgräns på 16 ppb före skalningen, men i många fall under denna gräns efter skalning och därmed får resultaten anses som osäkra.

Det visade sig att det fanns ett visst samband mellan reduktion av T2+HT2 vid skalning och kärnstorleken även i vår undersökning, även om korrelationerna inte var särskilt tydliga. Bäst korrelation mellan de storleks/viktsrelaterade variablerna var en svagt positiv korrelation mellan genomsnittlig area för havrekärnorna och reduktionen av T2+HT2 halterna ($r=0,21$). Ännu bättre korrelation förelåg mellan halten i oskalade kärnor och reduktionen ($r=0,31$). Resultaten stämmer i båda fallen överens med erfarenheter från Meyer *et al.* (2022). I fortsatta studier behöver man arbeta med större variation i ursprungliga T2+HT2 halter för att få säkrare resultat även efter skalning. Studien visar sammantaget att analyser med C-grainutrustningen kan ge en indikation om vilken reduktion av T2+HT2 halter man kan åstadkomma vid skalning av olika partier.

4.4 Koldioxid som indikator på mögeltillväxt i lagrad spannmål

4.4.1 Bakgrund

Ett förändrat klimat med högre temperaturer och mer nederbörd under skördeperioden ställer högre krav på kylning och snabb nedtorkning för att undvika problem med lagerskadesvampar. Man måste också räkna med större variationer mellan åren, vilket vi nyligen erfarit med extremt torrt och varmt år (2018) och ett år med blöta och sena skördeförhållanden (2023). Med tanke på att även skördarna ökat under senare år, är det i dag vanligt att man inte har tillräcklig kapacitet för att kunna hantera skörden på ett tillfredställande sätt varje år.

Förutom att bygga ut kapaciteten, vilket tar tid, är det också ännu viktigare än tidigare att övervaka lagrad spannmål för att få en förvarning, om lagerskadesvampar börjar växa till. Det finns ett stort antal mögelsvampar som kan växa till framförallt om vattenhalten är högre än rekommendationen på 14%. Tillväxten är dock även beroende på temperaturen och om t.ex. 14%-ig spannmål lagras vid 20° C istället för 14° C förkortas säker lagringstid betydligt (Lantmännen, 2024).

Vid tillväxt av mögelsvamp i ett lager produceras både vatten och CO₂ samtidigt som temperaturen stiger. Det finns således möjlighet att få en indikation om tillväxten genom att mäta någon eller några av dessa parametrar. Både när det gäller temperatur och vattenhalt gäller dock att man behöver mäta på många platser i lagret för att inte missa de härddar av mögeltillväxt som kan uppstå. Koldioxid har däremot fördelen att den fördelar sig i lagret, även om får räkna med viss skiktning med högre halter längre ner i lagret. Ofta uppträder mögelhärddar i toppen på silon, särskilt om man lagrat in spannmål vid för hög temperatur och man får ett uppåtgående luftflöde som ger kondens då luften avkyls vid silotoppen. Det förkommer även läckage som orsakar lokala mögelhärddar. Det finns forskning som visar på att CO₂ är ett effektivare mått på mögeltillväxt i lagrad spannmål än de idag mesta använda systemen som bygger på temperaturmätning (Ramachandran, 2022).

Det finns idag system med CO₂-mätning på marknaden (Ramachandran, 2022) men det är dåligt undersökt vilka nivåer man bör använda som riktvärden. Det finns dock amerikanska litteraturuppgifter från praktisk lagring som visar att 500 ppm, alltså något över atmosfärnivån på drygt 400 ppm, skulle kunna indikera mögeltillväxt i lagrad spannmål (Maier, 2010).

4.4.2 Experiment

Vi valde att studera sambanden mellan mögeltillväxt och CO₂ utveckling i experimentsilos som byggt av RISE (Skara, Sverige) (Figur 4.8). Dessa minisilor hade ursprungligen satts upp för att inom ramen för ett annat projekt studera hur olika torkningsmetoder fungerar för olika grödor och vattenhalter. Inom ramen för Baby Grain Passport-projektet har de försetts med specialtillverkade lock där man även monterat NDIR CO₂-sensorer. Minisilorna är även utrustade med spjut för mätning av relativ luftfuktighet i toppen och i botten samt tre temperaturspjut på olika nivåer. Det är också möjligt att ta ut prover med provtagningsspjut på olika nivåer.

Ett initialt experiment kördes under våren 2023, men detta upprepades vid två tillfällen under vårvintern 2024, med andra CO₂-sensorer (EE782, E+E Elektronik Ges.m.b.H., Engerwitzdorf, Österrike). som visade sig vara mycket stabilare än de vi använde i det inledande experimentet. En viktig orsak är troligen att de vi använde 2024 är tempererade, så att man inte får avvikelser i avläsningarna beroende på att temperaturen varierar.



Figur 4.8. Minisilor som rymmer 10 kg spannmål och som använts i spannmålslagrings-experimenten.

Experimenten 2024 kördes vid två olika temperaturer, runt 20° C och runt 16° C. Vid varje tillfälle fuktades vete upp till 16%, 18% och 20% vattenhalt och ca 10 kg fylldes på varje minisilo. De lagrades därefter i en månad och en gång i veckan togs prover ut från tre nivåer i silorna. Analyser utfördes med avseende på vattenaktivitet, kolonibildande enheter (CFU), ett mått på lagermögelsvamparnas sporulering samt endogen infektion av lagerskademögel. Logaritmen för CFU bör inte överstiga 5 och procentandelen endogen infektion bör inte vara högre än 35%. Resultaten visade tydligt att då CO₂-halterna började stiga över 500 ppm, kunde man även notera en tydlig mögeltillväxt i de prover som tagits ut (Tabell 4.2). Vi noterade att CO₂-halterna var något högre generellt då spannmålen lagrades vid 20° C, vilket troligen kan kopplas till högre cellandning från spannmålen vid den högre temperaturen. Man kunde även notera att temperaturerna varierade ganska mycket även inom denna lilla silo och att det därmed indikerar det att CO₂ är ett stabilare sätt att följa mögeltillväxt på än temperaturövervakning.

Tabell 4.2. Koldioxidutveckling och mögeltillväxt i minisilor under fyra veckors lagring vid olika temperaturer. CFU=kolonibildande enheter.

Veckor efter start	Vattenhalt (%)	Lagringstemperatur 16° C			Lagringstemperatur 20° C		
		CO ₂ -halt (ppm)	Log CFU	Endogen infektion (%)	CO ₂ -halt (ppm)	Log CFU	Endogen infektion (%)
1	16	487	4,4	0	479	3,0	6
1	18	554	4,0	4	769	<3	38
1	20	1335	4,2	88	1833	5,4	98
2	16	454	3,0	4	589	<3	8
2	18	582	3,8	36	1067	5,6	90
2	20	2194	5,8	96	1498	6,3	100
3	16	455	<3	6	589	4,1	6
3	18	786	4,5	62	961	5,5	98
3	20	1406	6,2	98	1343	6,4	100
4	16	476	4,2	28	589	3,8	26
4	18	673	5,7	96	816	5,7	96
4	20	1173	6,3	100	1293	6,3	100

5 Att köpa in och spåra spannmål med särskilda kvalitetskrav

Lantmännen köper idag in spannmål med särskilda krav på kvalitet för att sedan kunna säljas vidare som råvara till barnmatsprodukter. Det handlar om havre, vete och råg. Råvaran kontrakteras med särskilt utvalda lantbrukare som också är anslutna till Lantmännens odlingsprogram Klimat och Natur eller odlar enligt odlingskonceptet Natur+. Genom odlingsprogrammet Klimat och Natur säkras omställning mot en mer hållbar odling, med insatser för minskad klimatpåverkan och främjande av biologisk mångfald. Vidare säkerställs spårbarhet och de specifika kvalitetskrav som ställs på spannmålsråvara som ska användas som barnmatsråvara. Lantmännen producerar idag inte barnmat i egen regi, utan levererar mjöler färdiga att använda i barnmatsprodukter av olika slag.

5.1 Digitalisering av spannmålsvärdekedjan

Effektiv automatiserad datainsamling är en förutsättning för att digitalisera information om varor varuflöden i en värdekedja. För spannmål är detta särskilt viktigt tidigt i värdekedjan där stora volymer hanteras under kort tid samtidigt som förädlingsvärdet där är lågt.

Det är också viktigt att den data som samlas in skapar värde. Värdet kan bestå av information om råvarans faktiska egenskaper som till exempel kadmium- eller mykotoxinhalter, men även hållbarhetsparametrar som klimatprestanda, där ingen faktisk kvalitetsegenskap går att mäta i spannmålsråvaran. Digitalisering i spannmålsvärdekedjan innebär också förbättrad kunskap om vilka volymer som finns och var de produceras.



Figur 5.1. Den digitala värdekedjan löper parallellt med den fysiska. Mätdata genereras i den fysiska värdekedjan och skapar mervärde.

Olika delar av produktionskedjan genererar data som beskriver många kvalitetsegenskaper och svarar på olika frågor (Figur 5.1). Några exempel på viktiga data:

- 1) Odling – hållbarhetsparametrar, klimatprestanda, prediktioner av tungmetaller och mykotoxiner; *Hur har spannmålen odlats och vilket klimatavtryck har den? och Är spannmålen odlad på jordar med lågt innehåll av kadmium?*
- 2) Skördad kvalitet/analysdata; *Är halten av tungmetaller och mykotoxiner under specificerade gränsvärden?*
- 3) Torkning och lagring – energieffektiv torkning och säker lagring; *Hur mycket energi har gått åt vid torkning och vid vilka förhållanden har spannmålen lagrats? och Är spannmålen fri från mykotoxiner?*

Datainsamling och digitalisering är grundläggande för att effektivare arbeta med spårbarhet och kvalitetssäkring. I projektet har fokus legat på data kring tungmetaller och mykotoxiner, men all data som skapar insikter om spannmålsråvaran samt mervärde vid vidareförädling är värdefull. Potentialen att producera spannmål för användning som råvara i barnmat är mycket större än idag. Effektiva verktyg vid sourcing (råvaruförsörjning) gör det möjligt att lättare hitta råvara. Mer om detta under avsnitt 5.3 om sourcing av spannmål

5.2 Spårbarhet

Spårbarhet är ett grundläggande krav i livsmedelslagstiftningen. I korthet innebär det att alla livsmedelsföretagare i hela produktions-, bearbetnings- och distributionskedjan ("från jord till bord") måste kunna identifiera från vilka de har mottagit livsmedel och kunna identifiera vilka livsmedelsföretag de har försett med produkter. Under projektet har vi undersökt möjligheterna för förbättrad och effektiviserad spårbarhet av spannmål där särskilda kvalitetskrav ställs. I dagsläget säkras spårbarhet i enlighet med de krav som livsmedelslagstiftningen föreskriver. Spårbarhet i spannmålsvärdekedjan sker idag oftast på aggregerad nivå. Det innebär att batcher (till exempel ett lastbilslass) vid mottagning provtas varpå ett antal parametrar analyseras. Är analyserna godkända enligt de kvalitetsspecifikationerna som är uppställda, hamnar lasset efter erforderlig torkning slutligen tillsammans med andra godkända lass i en lagringssilo. Från denna silo lastas sedan spannmålen ut till rätt kund. I detta skede är en batch oftast ganska stor och består av leveranser från många lantbrukare. Den större batchen av spannmål homogeniseras och ett representativt prov tas ut och fullständiga analyser av kvalitetsegenskaper utförs. Godkänt prov innebär att råvaran kan genomgå erforderliga processteg för att slutligen säljas som råvara till barnmatsproducent. Färdig råvara genomgår även kvalitetssäkring genom ett provtagningsprogram.

Sker leverans under lagersäsongen (det vill säga från lantbrukares egna lager) finns mer tid att provta spannmålen. Mängden spannmål som ska användas till barnmat är ofta mindre volymer än till exempel brödvete och malkorn och köps uteslutande in från gårdar under lagersäsong. Detta innebär att kvalitet kan säkerställas innan spannmålen transporteras, vilket innebär att logistiken effektiviseras avsevärt. Godkänd analys säkerställer att endast den spannmål som uppfyller kvalitetskrav kanaliseras till rätt slutdestination. Även vid lagerleverans gäller principen att ett godkänt parti (lastbillass) kommer att blandas med andra, och tillhöra en batch som består av leveranser från flera gårdar. En godkänd batch särhålls under vidareförädling (i fallet havre – rensning, skalning och malning) och färdig barnmatsråvara levereras till slutlig kund. Innan leverans sker genomförs analyser för att ytterligare säkerställa kvalitetspecification.

För att säkerställa att spannmålen verkligen uppfyller kvalitetskraven, är spårning och dokumentation avgörande. Regelbundna analyser sker för att bekräfta att spannmålen uppfyller kvalitetskraven. Om avvikelser upptäcks, måste åtgärder vidtas, vilket kan innebära att en batch kasseras. Eftersom spannmål hanteras på aggregerad nivå (en batch=leveranser från flera gårdar), innebär kassation betydande kostnader. Därför är det viktigt att kvaliteten på enskilda leveranser säkerställs innan leveransen samlas med övriga.

Distributed Ledger Technology (DLT) är en metod att distribuera register (eller med ett annat ord – databaser) med information på ett säkert sätt. I stället för ett system där en central enhet för register över de transaktioner som genomförs sker detta i ett decentraliserat register som samtliga användare har tillgång till. Blockkedjeteknik är ett exempel på DLT och innebär transparens och gemensam kontroll. Teknologin kan användas för att förbättra transparensen och spårbarheten vid produktion av barnmat. Under projektet har vi undersökt möjligheterna att applicera denna typ av teknik, men det har visat sig vara en alltför dyr och avancerad lösning. Blockkedjeteknik är särskilt effektiv i värdekedjor där tillit mellan aktörer är låg samtidigt som stora värden hanteras vid varje transaktion. Befintliga lösningar på spårbarhet, och kvalitetssäkring, är optimalt anpassade för spannmålsråvara där partier blandas i batcher.

Under projektet har vi även undersökt möjligheterna till att kommunicera spårbarhet och kvalitetssäkring som sker längs värdekedjan till slutkonsument. Då inga barnmatsproducenter ingått i projektet, har upplevelsen av eventuella mervärden inte undersökts i projektet. Några exempel på hur detta skulle kunna se ut visas i Figur 5.2. Genom enkla QR-koder som informationsbärare erbjuds man som konsument mer information om produkten och hur råvarorna produceras.



Figur 5.2. Exempel på hur säker kvalitet och spårbarhet kan visualiseras och kommuniceras i konsumentled. a-b) Fiktivt exempel på märkning av produkt med informationsbärare (Natur och Klimat) samt QR-kod som hänvisar till mer information; c) konceptuell modell från ett kanadensiskt företag som leder till data/information som är publik och garanterar råvarans kvalitet, i detta fall glutenfri; d) indisk barnmatstillverkare som använder blockkedjeteknik för att säkra spårbarhet och kunna visa transparens mot sina kunder.

5.3 Sourcing (råvaruförsörjning) av spannmål

Inköp av spannmål med särskilda kvalitetskrav är en kritisk process och innebär i grova drag att utifrån ställda krav hitta de volymer som är bäst lämpade. Detta kan ske enligt två modeller – särskilt utvalda (kontrakterade) odlare eller genom ett urval av särskilda batcher (se Figur 5.3).

Väljer man att kontraktera *särskilda odlare* innebär det tydligare koppling till odling och primärproduktion. Det är också möjligt att lättare styra produktionsmetoder på enskilda gårdar. Dock föreligger avsevärd risk för att vissa



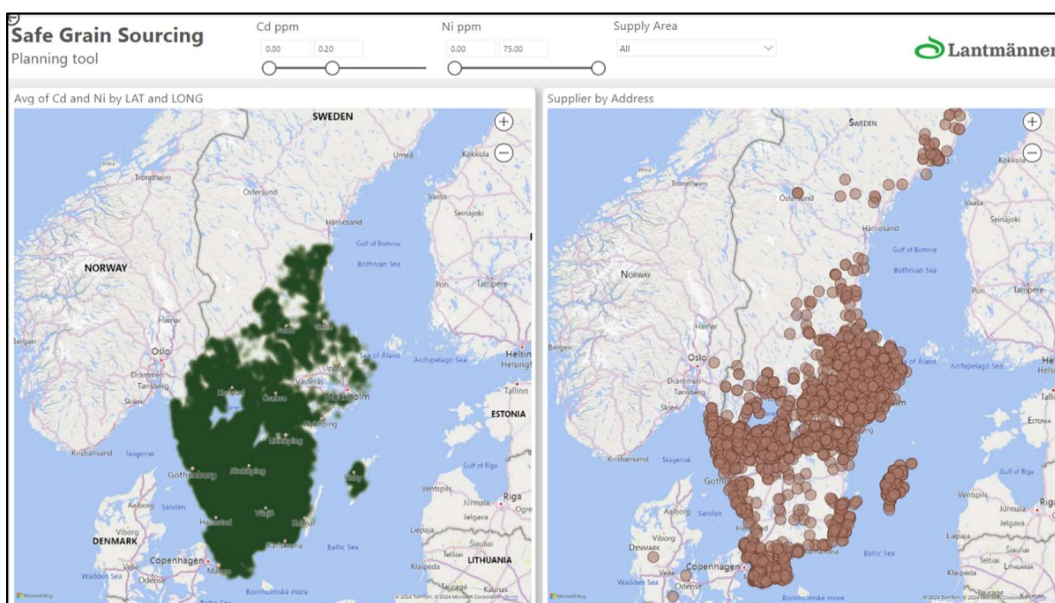
Figur 5.3. Två modeller för sourcing av spannmål med specialkvalitet

spannmålsleveranser inte kommer att uppfylla kvalitetskraven. I praktiken behöver man således kontraktera ”överareal”, vilket innebär ökade kostnader.

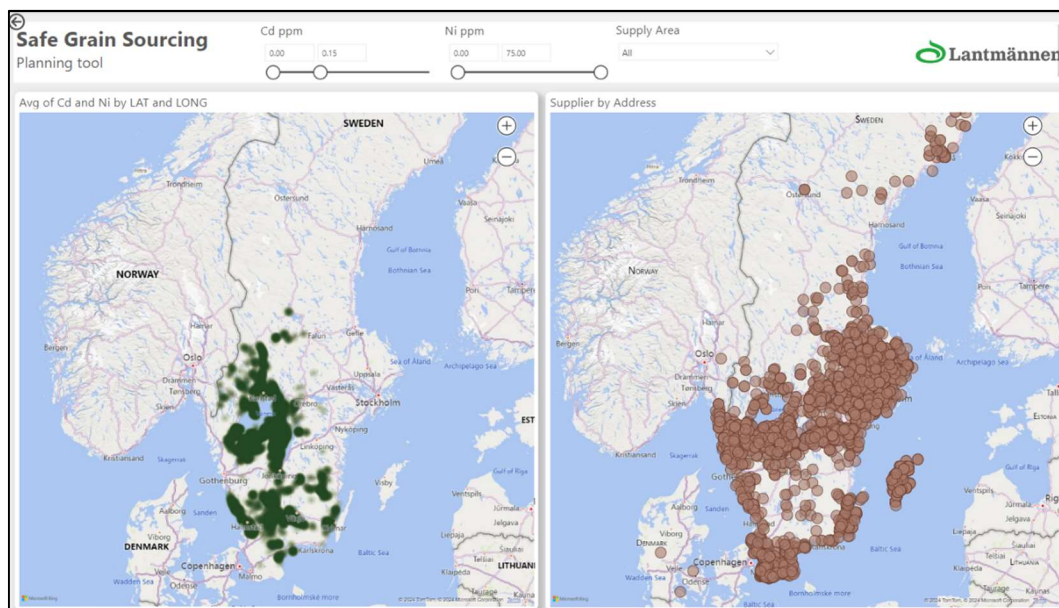
Det andra alternativet är att köpa in spannmål utifrån ett bredare urval. Genom att välja ut *särskilda batcher* som uppfyller kvalitetskraven gör man det möjligt att använda större urvalsbas. Detta skapar en större flexibilitet men kan innebära utmaningar inom spårbarhet, då leverantörer tillåts variera mer över tid. Fokus ligger här snarare på råvarans kvalitetsegenskaper än odlingsplats. Dock kan odlingsmetod (där till exempel hållbarhetsvärden innefattas) ingå som kvalitetsparameter.

Oavsett vilken metod man tillämpar, är det viktigt att det finns verktyg som förenklar råvaruflöden och logistik, samtidigt som spårbarheten säkras. Lantmännen har inom ramen för projektet arbetat med ett planeringsverktyg (*Safe Grain Sourcing*; Figur 5.4–5.8) som är tänkt att förenkla inköp av spannmål med kvalitetsegenskaper som gör att den lämpar sig för användning som råvara vid barnmatstillverkning. Verktöget använder sig av data som tagits fram i projektet (till exempel jordens innehåll av kadmium och nickel), men det finns möjlighet att använda annan data som definierar spannmålsråvarans kvalitet (exempelvis proteinhalt och falltal).

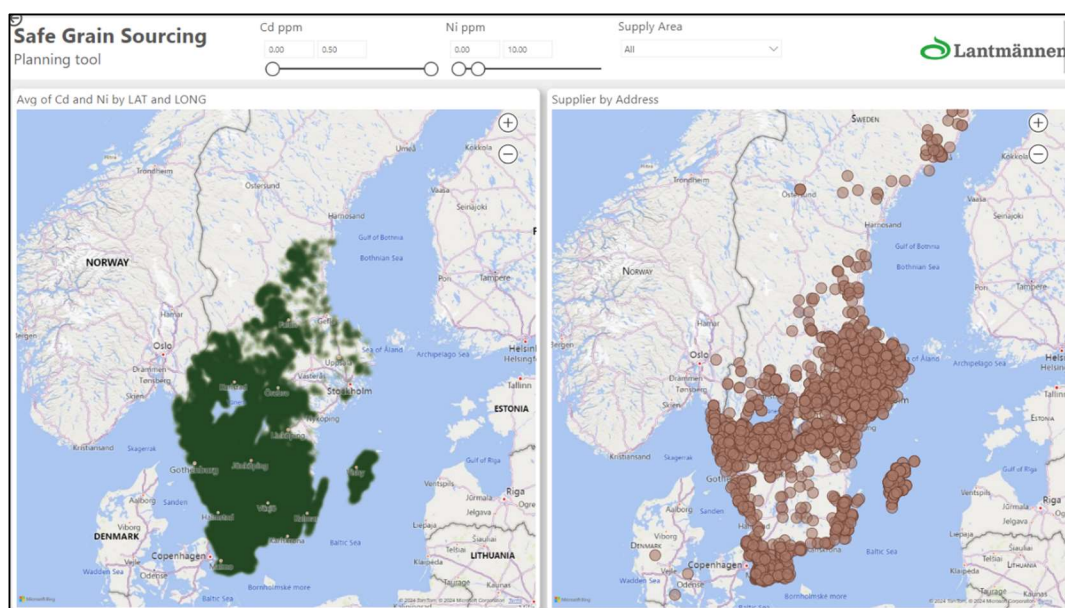
Verktöget bygger på *off the shelf*-analysverktyg för *Business Intelligence* som används inom Lantmännen. Parallellt med (predikterad) data om kommande skörd finns data om möjliga leverantörer och deras leveranshistorik, som gör det möjligt att planera logistik före skörd. Insikter om spannmålsråvaran på ett tidigt skede (redan före skörd) innebär att man på ett effektivare sätt kan hitta rätt spannmålsråvara och kanalisera den till rätt mottagningsplats.



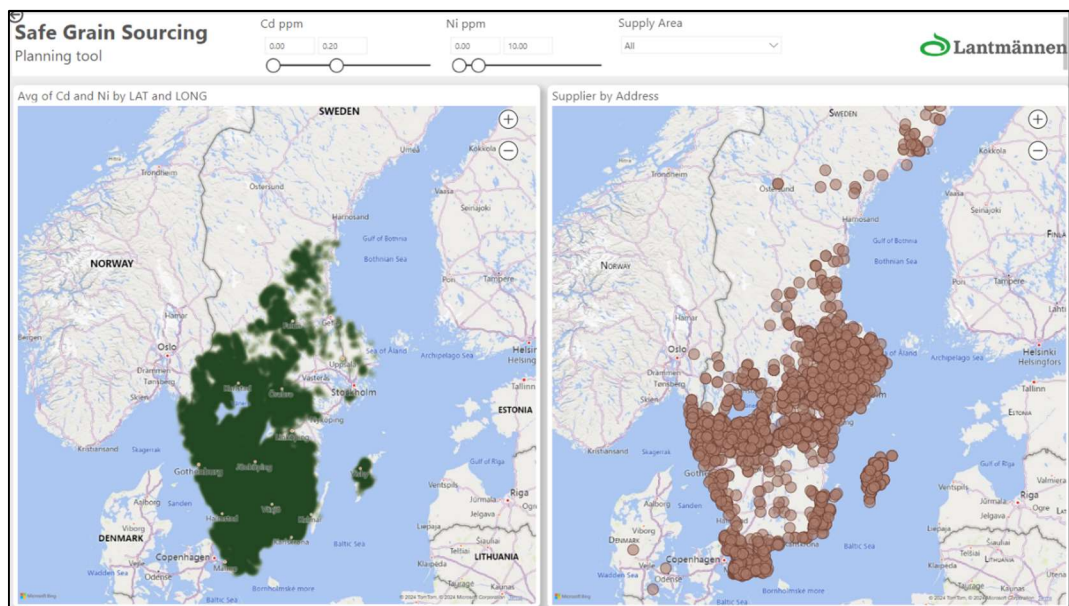
Figur 5.4. Planeringsverktyget –filtrerat för kadmiuminnehåll i jorden på $\leq 0,20 \text{ mg kg}^{-1}$.



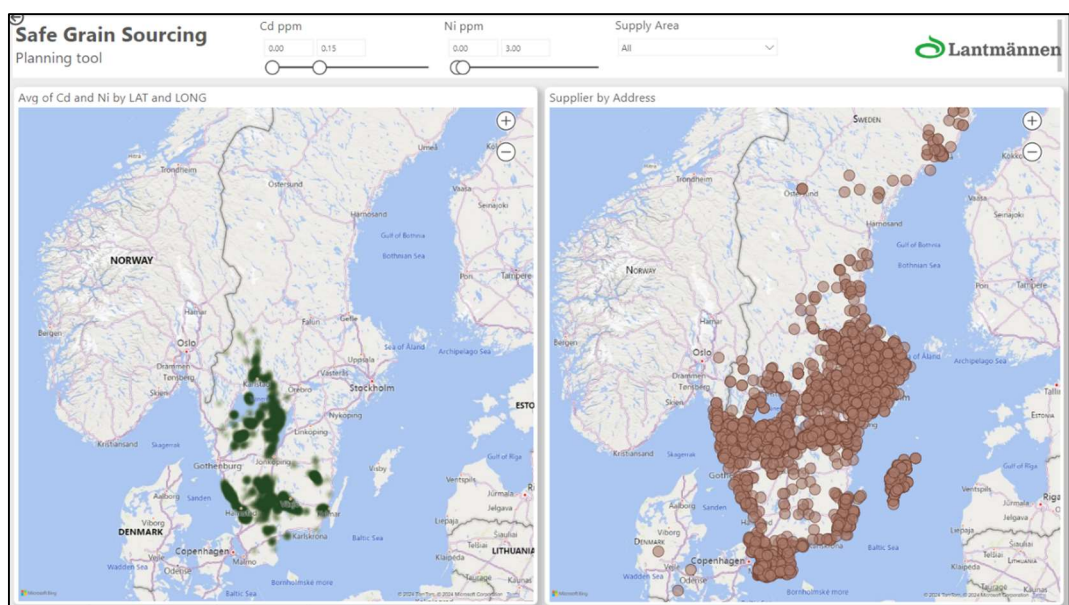
Figur 5.5. Planeringsverktyget filtrerat för kadmiuminnehåll i jorden på $\leq 0,15 \text{ mg kg}^{-1}$. Kartan till vänster – områden med önskat maximalt kadmiuminnehåll i jorden, kartan till höger – position på odlare.



Figur 5.6. Planeringsverktyget filtrerat för nickelinnehåll i jorden på $\leq 10 \text{ mg kg}^{-1}$. Kartan till vänster – områden med önskat maximalt kadmiuminnehåll i jorden, kartan till höger – position på odlare.



Figur 5.7. Planeringsverktyget filtrerat för både kadmium- och nickelinnehåll i jorden; tröskelvärde $Cd \leq 0,20 \text{ mg kg}^{-1}$ resp. $Ni \leq 10 \text{ mg kg}^{-1}$. Kartan till vänster – områden med önskat maximalt kadmium- och nickelinnehåll i jorden, kartan till höger – position på odlare.



Figur 5.8. Planeringsverktyget filtrerat för både kadmium- och nickelinnehåll i jorden; tröskelvärde $Cd \leq 0,15 \text{ mg kg}^{-1}$ resp. $Ni \leq 3 \text{ mg kg}^{-1}$. Kartan till vänster – områden med önskat maximalt kadmium- och nickelinnehåll i jorden, kartan till höger – position på odlare.

5.4 Nyttor och behov med ett planeringsverktyg för spannmålsinköp

Insikter om spannmålets kvantitet och kvalitet så tidigt som möjligt är värdefullt för att kunna planera logistik. I projektet har vi jobbat med att ta fram modeller som genererar kunskap om sannolika kvaliteter redan före skörd. Det gör det möjligt att med bättre träffsäkerhet avgöra från vilka odlingsområden som barnmatskvalitet bäst odlas. Oavsett om man väljer en modell med särskilt utvalda och kontrakterade odlare (se Figur 5.3 ovan), eller om man använder sig av spannmål från kvalitetssäkrade batcher, ökar träffsäkerheten när man gör urvalet. Onödig överkontraktering eller risk för kasserade batcher minskar, samtidigt som inköpsprocessen effektiviseras.

Projektet har fokuserat på kadmiumpåbud, mykotoxiner och hållbarhet i odlingen, men potentialen är stor för att även jobba med andra kvalitetsparametrar som till exempel proteinhalt och falltalsdata samt prediktering av skördevolym på regionnivå.

En tydlig nytta med förbättrade verktyg vid råvaruförsörjning, som framhävs av spannmålsinköpare, är när man har behov att hitta nya odlare. Eftersom sourcing ofta sker från samma odlare över tid, har man god koll på vilka kvalitet som normalt sett brukar levereras från dessa. Att förutse kvalitet på spannmål från odlare som ej tidigare levererat spannmål till barnmat är svårt. Ett planeringsverktyg som hjälper spannmålsinköpare att välja ut odlare innebär effektiviseringar, då man ökar sannolikheten att kontrakterad odlare kommer att producera önskad kvalitet.

5.5 Utmaningar

Grundläggande för att säkra specifika kvaliteter av spannmål är att kunna särhålla dessa. Särhållning av spannmål innebär ökade hanteringskostnader och minskning av kapacitet. Spannmål har tidigt i värdekedjan ett förhållandevis lågt värde och handelsmarginalerna är här låga. Det innebär att incitamenten för värdeskapande åtgärder vid handel av spannmål riskerar att bli få. Samtidigt är logistik och infrastruktur anpassade för stora volymer. Gällande kapacitet är som mest kritisk under skörd då spannmål direktlevereras, men av underordnad betydelse när leverans sker från gårdslager.

Under projektet meddelade Semper som var en av projektets intressenter att man avser avveckla produktionen av barnmat i Sverige. Detta har gjort möjligheterna för att kommunicera spårbarhet ända till slutkonsument försvårats. Lantmännen producerar idag inte barnmat i egen regi, utan endast råvara (mjöl). Det finns dock

goda möjligheter för svensk produktion av spannmål med kvaliteter som lämpar sig som barnmatsråvara.

Det är förhållandevis lätt att idag samla in data. Utmaningarna ligger i att samla in korrekt och relevant data som möjliggör effektivisering och spårbarhet. Dock ska man vara medveten om vikten av att värdera data. Insikter och information om en specifik produkt (och dess ingående råvaror) genererar ett värde som måste tillfalla det produktionsled där det uppstår. Det kan till exempel vara specifika produktionskostnader på gård eller hanteringskostnader i form av särskilt i värdekedjan. Dessutom behöver man klargöra vem som äger data och hur man på bästa sätt lagrar den.

Data som är statiska och där förändringar över tid och variation mellan år är små är lätta att hantera. Det handlar till exempel om jordens innehåll av kadmium. Med bra data vet man vilka områden som med störst sannolikhet kommer att kunna leverera spannmål av önskad kvalitet. Egenskaper som varierar, till exempel mykotoxinhalter i spannmål som varierar mellan år, gårdar och regioner men även på fältnivå innebär mycket större utmaningar.

6 Slutsatser

Vi drar följande slutsatser från projektet:

- I Sverige finns förutsättningar att öka produktionen av höstvet och havre av specialkvalitet, till exempel för barnmat. Datainsamling och digitalisering gör detta möjligt genom att man arbetar effektivare med spårbarhet och kvalitetssäkring.
- Markdata från miljöövervakning och mätkampanjer som Mark- och grödoinventeringen och Jordbruksverkets åkermarksprovtagning, är en värdefull grund för att kunna kartlägga och undvika risk för högt kadmiumupptag av grödan.
- En ny typ av karteringsmetodik för kadmiumhalt i matjorden presenterades. Kartprodukten innehåller sannolikhetsprediktioner för att olika tröskelvärden underskrids. Jämförelser med kadmiumhalter i spannmålsprover visade att prediktionskartorna kan användas för att lokalisera områden där risken är liten att gränsvärdet överskrids.
- Ett ramverk för digital åkermarkskartering skapades och testades för kartläggning av nickel i mark och gröda. Den s.k. Åkermarksdatakuben förenklar processen att ta fram kartor även för andra tungmetaller.
- I kartläggningsarbetet blev det tydligt att vissa geografiska områden är särskilt lämpade för produktion av spannmål till barnmat. Risken för att påträffa kadmiumhalter (och nickelhalter) över gränsen för barnmat i havre och vete är liten i t.ex. stora delar av Västsverige (Halland, Västra Götaland och Värmland).
- Fritt tillgängliga satellitdata kan användas för att ta fram detaljerade skördekartor över svensk åkermark. Den här typen av effektiv skördekartering, utan krav på egen utrustning, ger möjlighet till bred tillämpning av växtplatsanpassad (till exempel precisionsgödsling med kväve) och mer resurseffektiv växtproduktion, något som krävs för realisering av nationella och internationella mål.
- Empiriska eller semi-empiriska skördemodeller är lämpliga för implementering i beslutsstödsystem för precisionsodling. När det gäller satellitbaserad skördekarting är det lämpligt att arbeta med en något grövre upplösning än den ursprungliga upplösningen hos satellitbilderna, t.ex. 40 m eller ett antal homogena zoner inom fält. Modellerna blir mer tillförlitliga om de bygger på ett vegetationsindex som är känsligt för

grödans vattenstatus (NDWI) och om man använder satellitdata från ett relativt sent utvecklingsstadium (omkring mjölkmodning) eller tidsserier av data från uppkomst fram till detta stadium. Skördeprognoser vid tidpunkt för kompletteringsgödsling var inte tillräckligt tillförlitliga för praktisk användning.

- Förekomst av mykotoxinerna DON och T2+HT2 varierar kraftigt mellan år. Prognossystem och mätprogram är nödvändiga för att löpande informera inköpsprocessen samt för fortsatt kunskapsuppbyggnad kring biologi och utbredning av de Fusariumsvampar som bildar toxinerna. För att med viss marginal komma under kommande gränsvärden för T2+HT2 i skalad havre bör man sikta på halter <40 ppb i oskalade prov.
- Koldioxidövervakning vid spannmålslagring bedöms som en lovande metodik för tidig detektion av lagermögelutveckling med risk för toxinbildning.
- Infrastruktur för förädling, kombination och tillgängliggörande av desamma i ett agerbart format krävs för att de ska kunna informera beslutsfattande (t.ex. för inköpsplanering) och nå effekt i praktiken

7 Tack

Projektet har finansierats av Formas inom det nationella forskningsprogrammet för livsmedel (dnr: 2019–02280). Arbetet med kadmiumkartläggningen har även finansierats av nationella FoU-medel från Jordbruksverket (dnr: 4.1.18-02741/2022-3), samt av Region Västra Götaland/SLU (dnr: RUN 2018-00141 och 2021-00020). Åkermarksdatakuben har även finansierats av SLU Miljöanalys 2022. Tack också till alla som på något sätt medverkat i projektet.

8 Referenser

- Adamsen, F.J., Pinter, P.J., Barnes, E.M., LaMorte, R.L., Wall, G.W., Leavitt, S.W., Kimball, B.A. (1999). Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science* 39, 719 –724.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900030019x>
- Adler, K., Persson, K., Söderström, M., Eriksson, J., Pettersson, CG. (2023). Digital Soil Mapping of Cadmium: Identifying Arable Land for Producing Winter Wheat with Low Concentrations of Cadmium. *Agronomy*, 13(2), 317.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13020317>
- Adler, K., Piikki, K., Söderström, M., Eriksson, J. (2022). Digital soil mapping of copper in Sweden: Using the prediction and uncertainty as decision support in crop micronutrient management. *Geoderma Regional*, 30, e00562,
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00562>
- 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(2), 474. <https://doi.org/10.3390/s20020474>
- Algerbo, P.A., Mattson, L., Thylén, L. (2003). Skörderelaterad kvävegödsling: teknik, metodik och erfarenheter. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, report 311. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:959553/FULLTEXT01.pdf>
- Alshihabi, O., Persson K., Söderström M. (2023). Post-processing yield maps of winter wheat using data from satellites and combines. In: Stafford, J.V. (red) *Precision Agriculture '23*: Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands. p. 523 –530. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-947-3_66
- Alshihabi O., Persson K., Söderström M. Easy yield mapping for precision agriculture, manuskript.
- Basso, B., Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3, 254 –256. <https://www.nature.com/articles/s41893-020-0510-0>
- Bengtsson, T., Hamnér, K., Eriksson J. (2023). Jordbruksåtgärder för att minska kadmium i grödor. Jordbruksverket, rapport OVR664,
<https://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/ovr664.html>

- Birrell, S.J., Sudduth, K.A., Borgelt, S.C. (1996). Comparison of sensors and techniques for crop yield mapping. *Computers and Electronics in agriculture*, 14, 215 –233. [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(95\)00049-6](https://doi.org/10.1016/0168-1699(95)00049-6)
- Blackmore, S. (2000). The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and electronics in agriculture*, 26, 37 –51. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00075-7)
- Börjesson, T., Wolters, S., Söderström, M. (2019). Satellite-based modelling of protein content in winter wheat and malting barley. In: Stafford, J. V. (red) *Precision Agriculture '19: Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands*. p. 581 –587. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_72
- Börjesson T., Persson K., Lindgren, A. Spatial dynamics of T2+HT2 toxins in Swedish oats, manuskript.
- Bouras, E.H., Olsson, P.O., Thapa, S., Díaz, J.M., Albertsson, J., Eklundh, L. (2023). Wheat Yield Estimation at High Spatial Resolution through the Assimilation of Sentinel-2 Data into a Crop Growth Model. *Remote Sensing*, 15(18), 4425. <https://doi.org/10.3390/rs15184425>
- Delin, S., Stenberg, M. (2014). Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *European Journal of Agronomy*, 52, 291 –296. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.007>
- Edwards, S.G., Godley, N.P. (2010). Reduction of Fusarium head blight and deoxynivalenol in wheat with early fungicide applications of prothioconazole. *Food Additives and Contaminants*, 27(5), 629 –635. <https://doi.org/10.1080/19440040903515942>
- Engström L, Delin S, Wetterlind J, Jonsson A., Shah S.R.U. (2024). Optimum N-rate and effect of split N fertilization timing on yield and quality in spring oat varieties. *Agricultural and Food Science*, *in press*.
- Eriksson, J., Söderström, M. (1996). Cadmium in soil and winter wheat grain in southern Sweden. I. Factors influencing Cd-levels in soil and grain. *Acta Agriculturae Scandinavica B-Plant Soil Sciences*, 46, 240 –248. <https://doi.org/10.1080/09064719609410957>
- Eriksson, J. (2021). Tillståndet i svensk åkermark och gröda –Data från 2011–2017. Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Ekohydrologi 168. https://pub.epsilon.slu.se/23486/1/eriksson_j_210514.pdf
- Eriksson, J., Andersson, A., Andersson, R. (1997). Tillståndet i svensk åkermark. Naturvårdsverket, rapport 4778. <https://www.slu.se/globalassets/ew/org/inst/mom/ma/akermarksinventeringen/tillstandet-i-svensk-akermark-1997.pdf>
- Eriksson, J., Dahlin, A.S., Sohlenius, G., Söderström, M., Öborn, I. (2017). Spatial crop patterns of essential trace element concentrations in Swedish soils and crops. *Geoderma Regional*, 10, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.07.001>
- Eriksson, J., Mattsson, L., Söderström, M. (2010). Tillståndet i svensk åkermark och gröda. Naturvårdsverket, rapport 6349. <https://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:745674/FULLTEXT01.pdf>

- Eriksson, J., Söderström, M., Andersson, A. 1995. Kadmiumhalter i matjorden i svensk åkermark. Naturvårdsverket, rapport 4450.
- 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, rapport 5062.
<https://www.slu.se/globalassets/ew/org/inst/mom/ma/akermarksinventeringen/tillstandet-i-svensk-akermark-rapp-2.pdf>
- European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety, (2020). From farm to fork : our food, our health, our planet, our future : the European Green Deal. Publications Office of the European Union.
<https://data.europa.eu/doi/10.2875/653604>
- Förordning 2006/1881. KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EG) nr 1881/2006 av den 19 december 2006 om fastställande av gränsvärden för vissa främmande ämnen i livsmedel. <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1881/oj>
- Förordning 2023/915. KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) nr 2023/915 av den 25 april 2023 om gränsvärden för vissa främmande ämnen i livsmedel och om upphävande av förordning (EG) nr 1881/2006. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj>
- Förordning 2024/1022. KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) nr 2024/1022 av den 8 april 2024 om ändring av förordning (EU) 2023/915 vad gäller gränsvärden för deoxynivalenol i livsmedel. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1022/oj>
- Förordning 2024/1038. KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) nr 2024/1038 av den 9 april 2024 om ändring av förordning (EU) 2023/915 vad gäller gränsvärden för T-2-toxin och HT-2-toxin i livsmedel. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1038/oj>
- Gebbers, R., Adamchuk, V.I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327, 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P., Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6), L06407.
<https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Hjelkrem, A.-G.R., Torp, T., Brodal, G., Aamot, H.U., Strand, E., Nordskog, B., Dill-Macky, R., Edwards, S.G., Hofgaard, I.S. (2017). DON content in oat grains in Norway related to weather conditions at different growth stages. *European journal of plant pathology*, 148(3), 577–594.
<https://doi.org/10.1007/s10658-016-1113-5>
- Hägemark, L., Ivarsson, K.I., Gollvik, S., Olofsson, P.O. (2000). Mesan, an operational mesoscale analysis system. *Tellus A*, 52, 2–20.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v52i1.12250>
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*, 2nd ed. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
<https://hastie.su.domains/Papers/ESLII.pdf>

- Hunt, M.L., Blackburn, G.A., Carrasco, L., Redhead, J.W., Rowland, C.S. (2019). High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111410. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111410>
- Jordbruksverket. (2023). Jordbrukets roll i arbetet med det nationella klimatmålet. Jordbruksverket, report RA23:12. <https://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/ra2312.html>
- Jordbruksverket. (2024). Rekommendationer för gödsling och kalkning 2024. Jordbruksverket, rapport JO23:17. <https://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/jo219.html>
- Imathiu, S.M., Edwards, S.G., Ray, R.V., Back, M.A. (2013). *Fusarium langsethiae*—a HT-2 and T-2 toxins producer that needs more attention. *Journal of Phytopathology*, 161(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jph.12036>
- Karlsson, I., Mellqvist, E., Persson, P. (2023). Temporal and spatial dynamics of *Fusarium* spp. and mycotoxins in Swedish cereals during 16 years. *Mycotoxin Research*, 39(1), 3 –18. <https://doi.org/10.1007/s12550-022-00469-9>
- Karlsson Potter H., Delin S., Engström, L., Stenberg, B., Hansson, P.A. (2022). Precision nitrogen application – potential to lower the climate impact of crop production. Swedish university of agricultural Sciences, Mistra Food Futures Report 9. <https://mistrafoodfutures.se/wp-content/uploads/2022/11/mistra-food-futures-report-9-web.pdf>
- Lantmännen (2024). Säker Spannmål. Riktlinjer och rutiner för hur torkning och hantering skall gå till. https://www.lantmannenlantbrukmaskin.se/siteassets/om-oss/vara-tjanster/broschyrtorg/spannmal-och-vaxtodling/saker_spannmal.pdf [2024-06-25].
- Lachia, N., Pichon, L., Marcq, P., Taylor, J., Tisseyre, B. (2021). Why are yield sensors seldom used by farmers—a French case study. In: Stafford, J.V. (red) *Precision Agriculture '21*: Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands. p. 745 –751. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_89
- Lowenberg-DeBoer, J., Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4), 1552 –1569. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- Luo, L., Sun, S., Xue, J., Gao, Z., Zhao, J., Yin, Y., Gao, F., Luan, X. (2023). Crop yield estimation based on assimilation of crop models and remote sensing data: A systematic evaluation. *Agricultural Systems*, 210, 103711. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103711>
- Malmquist, L., Barron, J. (2022). Identification and synthesis of agrometeorological extreme weather indicators for the temperate-boreal zone. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö. https://www.slu.se/globalassets/ew/org/inst/mom/research/water-quality/malmquist_barron_2022_identification-and-synthesis-of-agrometeorological-extreme-weather-indicators-for-the-temperate-boreal-zone.pdf

- Maier, D.E., Channaiah, L.H., Martinez-Kawas, A., Lawrence, J.S., Chaves, E.V., Coradi, P.C., Fromme, G.A. (2010). Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain. In: Carvalho, M.O. *et al.* (red) Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection. Julius Kühn Archives 425. <https://doi.org/10.5073/jka.2010.425.332>
- Marzec-Schmidt, K., Börjesson, T., Suproniene, S., Jędryczka, M., Janavičienė, S., Góral, T., Karlsson I., Kochiieru Y., Ochodzki, P., Mankevičienė, A., Piikki K. (2021). Modelling the effects of weather conditions on cereal grain contamination with deoxynivalenol in the Baltic Sea Region. *Toxins*, 13(11), 737. <https://doi.org/10.3390/toxins13110737>
- McBratney, A.B., Santos, M.M., Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- Meyer, J.C., Birr, T., Hennies, I., Wessels, D., Schwarz, K. (2022). Reduction of deoxynivalenol, T2+HT2 toxins and associated Fusarium species during commercial and laboratory de-hulling of milling oats. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 39(6), 1163–1183. <https://doi.org/10.1080/19440049.2022.2059576>
- Morandin Figueiredo, B., Söderström, M., Persson, K., Börjesson, T. (2023). Evaluation of portable tools for fast field assessment of winter wheat grain quality. In: Stafford, J.V. (red) *Precision Agriculture '23: Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands*. p. 145–151. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-947-3_16
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nissen, K., Söderström, M. (1999). Mapping in precision farming—from the farmer's perspective. In: Stafford, J.V. (red) *Precision agriculture '99*. Sheffield Academic Press. 655–664. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20013118464>
- Paulsson, R., Djodjic, F., Carlsson Ross, C., Hjerpe, K. 2015. Nationell jordartskartering, Matjordens egenskaper i åkermarken. Jordbruksverket, rapport RA15:19. <http://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/ra1519.html>
- Perich, G., Turkoglu, M.O., Graf, L.V., Wegner, J.D., Aasen, H., Walter, A., Liebisch, F. (2023). Pixel-based yield mapping and prediction from Sentinel-2 using spectral indices and neural networks. *Field Crops Research*, 292, 108824. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108824>
- Persson, T., Eckersten, H., Elen, O., Roer Hjelkrem, A.G., Markgren, J., Söderström, M., Börjesson, T. (2017). Predicting deoxynivalenol in oats under conditions representing Scandinavian production regions. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(6), 1026–1038. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1305125>
- Piikki, K., Söderström, M. (2019). Digital soil mapping of arable land in Sweden—Validation of performance at multiple scales. *Geoderma*, 352, 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.049>

- Piikki, K., Söderström, M., Stadig, H. (2022). Remote sensing and on-farm experiments for determining in-season nitrogen rates in winter wheat—Options for implementation, model accuracy and remaining challenges. *Field Crops Research*, 289, 108742. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108742>
- Ramachandran, R.P. (2022). Integrated approach on stored grain quality management with CO₂ monitoring-A review. *Journal of stored products research*, 96, 101950. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.101950>
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E., Schepers, J.S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93(1), 131–138. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.931131x>
- Reusch, S. (2003). Optimisation of oblique-view remote measurement of crop N-uptake under changing irradiance conditions. In: Stafford, J.V., Werner, A. (red) *Precision Agriculture*, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands. p. 573–578. https://doi.org/10.3920/9789086865147_087
- Rouse, J.W., Jr., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1974). *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. NASA Special Publication, 351, 309. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.73017>
- SCB (2023). *Utsläpp och upptag av växthusgaser*. Sveriges officiella statistik. <https://www.scb.se/mi0107>
- Schnug, E., Murphy, D., Evans, E., Haneklaus, S., Lamp, J. (1993). Yield mapping and application of yield maps to computer-aided local resource management. In: Robert, P.C. Rust, R.H., Larson W.E. (red)) *Proceedings of Soil Specific Crop Management: A Workshop on Research and Development Issues*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, p. 87–93. <https://doi.org/10.2134/1993.soilspecificcrop.c7>
- Segarra, J., Arous, J.L., Kefauver, S.C. (2022). Farming and Earth Observation: Sentinel-2 data to estimate within-field wheat grain yield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102697>
- Sims, D.A., Gamon, J.A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Swartjes, F.A. (2015). Human health risk assessment related to contaminated land: state of the art. *Environmental Geochemistry and Health*, 37, 651–673. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9693-0>
- Söderström, M., Eriksson, J. (2010). Gamma-ray sensing for cadmium risk assessment in agricultural soil and grain –a case study in southeastern Sweden. In: Viscarra Rossel, R.A *et al.* (red). *Proximal Soil Sensing*, Progress in Soil Science I, Springer Science+Business Media B.V, Berlin/Heidelberg, Tyskland. p. 333–342.

- Söderström, M., Eriksson, J. (2013). Gamma-ray spectrometry and geological maps as tools for cadmium risk assessment in arable soils. *Geoderma* 192, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.014>
- Söderström, M., Persson, K. 2022. From drone to satellite – does it work? In: Proceedings of the 2nd African Conference on Precision Agriculture, 7–9 Dec., 2022, Nairobi, Kenya. p. 199–203. https://www.paafrica.org/files/2nd_AfCPA_Proceedings_Final_240423.pdf
- Söderström, M., Piikki, K., and Stadig, H. (2021). Yield maps for everyone - scaling drone models for satellite-based decision support. In: Stafford, J.V. (red) Precision Agriculture '21: Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands. p. 911–918. http://dx.doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_109
- Söderström, M., Piikki, K., Stenberg, M., Stadig, H., Martinsson, J. (2017). Producing nitrogen (N) uptake maps in winter wheat by combining proximal crop measurements with Sentinel-2 and DMC satellite images in a decision support system for farmers. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil, Plant Science*, 67(7), 63–650. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1324044>
- Toth, G., Jones, A., Montanarella, L., Alewell, C., Ballabio, C., Carre, F., De Brogniez, D., Guicharnaud, R., Gardi, C., Hermann, T., Meusburger, K., Nocita, M., Panagos, P., Rusco, E., Stevens, A., Van Liedekerke, M., Van Wesemael, B., Weynants, M., Yigini, Y. (2013). LUCAS Topsoil Survey - methodology, data and results. Topsoil Survey. Methodology, Data and Results. JRC Publications Office of the European Union, Luxembourg Technical Reports Number 26102. http://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR26102EN.pdf
- Xu, X., Madden, L.V., Edwards, S.G. (2014). Modeling the effects of environmental conditions on HT2 and T2 toxin accumulation in field oat grains. *Phytopathology*, 104(1), 57–66. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-13-0070-R>
- Wang X., Börjesson T., Wetterlind J., van der Fels-Klerx H.J. Regional prediction of deoxynivalenol contamination in spring oats in Sweden using machine learning, manuskript.
- Vizzari, M., Santaga, F., Benincasa, P. (2019). Sentinel 2-based nitrogen VRT fertilization in wheat: Comparison between traditional and simple precision practices. *Agronomy*, 9(6), 278. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060278>
- Wetterlind, J. 2010. Mätningar med Yara N-sensor för att skatta markens kvävelevererande förmåga. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö, rapport 4. https://pub.epsilon.slu.se/4667/1/wetterlind_j_100506.pdf
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415–421. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zhang, T., Su, J., Liu, C., Chen, W., Liu, H., Liu, G. (2017). Band selection in sentinel-2 satellite for agriculture applications. In: Proceedings of 2017 23rd International Conference on Automation and Computing University of Huddersfield, Huddersfield, UK, p. 1–6. <https://doi.org/10.23919/IConAC.2017.8081990>

- Zhou, J., Zhang, C., Du, B., Cui, H., Fan, X., Zhou, D., Zhou, J. (2020). Effects of zinc application on cadmium (Cd) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars. *Environment Pollution*, 265, 115045. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115045>
- Ågren, A.M., Larson, J., Shehkar, S.P., Laudon, H., Lidberg, W. (2021). Use of multiple LIDAR-derived digital terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape. *Geoderma*, 404, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115280>