

Notat vedrørende fortsættelse af Kvadratnettet ved monitorering af kulstof i dansk landbrugsjord

Bestilt af SEGES Innovation P/S

Af Laura Sofie Harbo, Johannes L. Jensen, Bent T. Christensen og Lars Elsgaard

Institut for Agroøkologi, AU-Viborg, 8830 Tjele

Leveret 9. december 2023

0. Resume

Kvadratnettet (KVN) blev etableret i 1986 med henblik på at bestemme indhold af mineralsk kvælstof (N) i landbrugsjord til brug ved udarbejdelse af årlige kvælstofprognoser. Desuden er der ca. hvert 10. år (1986/87, 1996/97, 2008/09, 2018/19) bestemt indhold af organisk kulstof (C). Prøver indsamlet i KVN har også været anvendt ved kortlægning af den dyrkede jords indhold af fosfor (Rubæk et al., 2013) og tungmetaller (Bak et al., 1997; Jensen et al., 2016), samt ved opgørelse af C-lagring under skov (Callesen et al., 2015).

KVN har i årenes løb fået stigende forskningsmæssig interesse. Også i europæisk sammenhæng er KVN unikt med hensyn til monitorering af udviklingen i jordens C-indhold. Det skyldes ikke mindst den lange historik og arealdækning (dækker hele landet), samt at der via databaser administreret af SEGES er adgang til oplysninger vedrørende driftstiltag på det enkelte punkt. Resultater fra langvarige forsøg bruges ofte til kalibrering af modeller, der simulerer ændringer i jordens C-lager, herunder effekter af landbrugspraksis. Data fra KVN kan indgå ved verificering af modellers repræsentativitet for dansk dyrket jord (Taghizadeh-Toosi og Olesen, 2016). Desuden har KVN et stort potentiale for undersøgelser af udviklingen i en række jordparametre knyttet til jordens sundhed. Disse kunne gennemføres i særskilte, eksternt finansierede forsknings- og monitoreringsprojekter.

En videreførelse af KVN med jævnlig udtagning af jordprøver har derfor stort forsknings- og anvendelsesmæssigt potentiale. Med øget fokus på udledning af drivhusgasser, grøn omstilling og bæredygtig produktion, inklusiv den nye EU Soil Health Law, er det relevant at fastholde KVN, samt overveje en eventuel udvidelse og delvis restrukturering.

1. Kvadratnettets nuværende tilstand

Der er visse begrænsninger ved brugen af det historiske datasæt fra KVN. For prøveindsamlinger fra før 2008/09 er der usikkerhed vedrørende præcis lokalisering af det enkelte KVN-punkt, ukendt variation i C-

indhold på mark-niveau, samt usikkerhed omkring ændringer i jordens volumenvægt. Desuden er der mangler knyttet til præcision og detaljeringsgrad i de indmeldte driftsoplysninger. Usikkerhed vedrørende lokalisering er nu håndteret ved anvendelse af GPS-teknologi. Prøveudtagnings-praksis, forsøgsdesign, indsamlingsfrekvens, og kvalitet i driftsoplysninger er dog stadig emner som bør overvejes for yderligere at forbedre estimater for ændring i C-indhold.

Siden etableringen af KVN er der sket ændringer i prøveindsamlingspraksis. I de to første indsamlingskampagner (1986/87, 1996/97) blev 16 stik indsamlet langs tre transekter på tværs af KVN punktet (Fig. 1A). Prøverne blev opdelt i fire dybder (0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 75-100 cm). Dog blev de fleste prøver fra 1996/97 blev kun indsamlet til 50 cm dybde. KVN-punkter blev ved disse to indsamlinger lokaliseret via kortblade (1:25.000). Ved prøveindsamlingen i 2008/09 blev proceduren ændret til 16 udvalgte felter, fastsat med GPS koordinater, hvor prøverne blev taget i både 2008/09 og 2018/19 (Fig. 1B). Jordprøverne blev inddelt i tre dybder (0-25 cm, 25-50 cm, 50-100 cm). Dertil kom yderligere fire felter, hvor der i 2018/19 blev indsamling ringprøver (0-25 cm, 25-50 cm) fra fritlagt jord til evaluering af jordens volumenvægt og stenindhold. Disse informationer bruges til beregning af den totale mængde af i jorden (C-lageret).

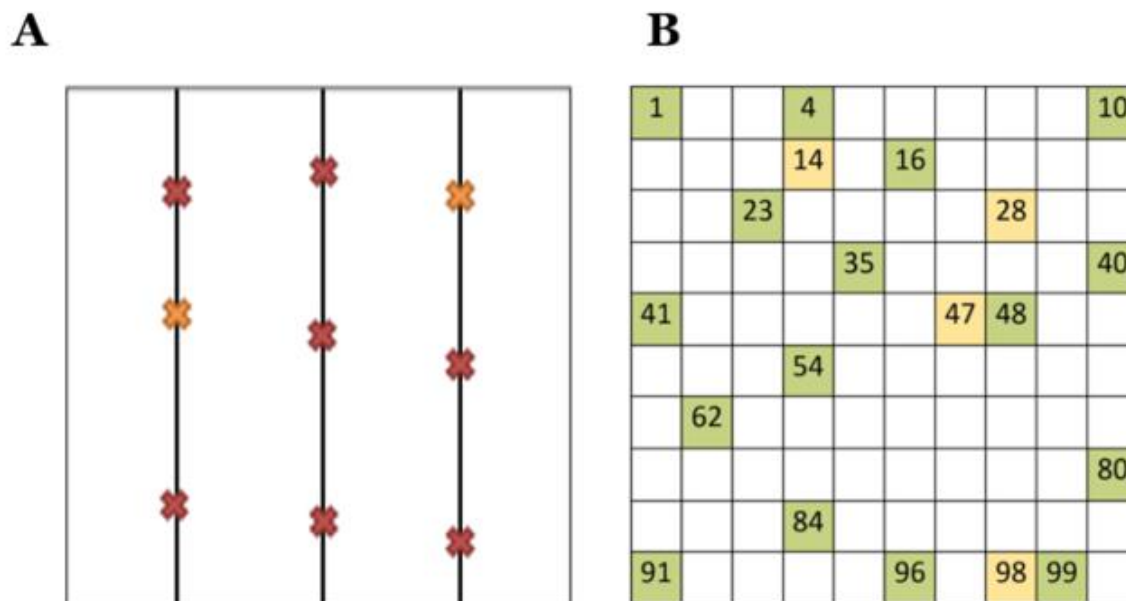


Fig. 1. Prøveindsamlingsprocedure (A) med transekter i 1986 og 1997 og (B) med 5 x 5 m felter i 2009 og 2019. I (A) symboliserer de ni krydspunkter prøveindsamling hvor der ved nogle punkter udtages mere end én prøve (16 i alt). I (B) symboliserer de grønne felter ($n = 16$) tilfældigt udvalgte kvadrater til indsamling af prøver til kulstof analyse, mens der i de gule felter ($n = 4$) er indsamlet prøver til bestemmelse af stenindhold og volumenvægt (kun i 2018/19). Det samlede KVN punkt er det samme (50 x 50 m).

Anvendelse af GPS-koordinater, implementeret i 2008/09, har bidraget afgørende ved mere præcis genfindelse af KVN-punkter. Derved kan det med større sikkerhed sikres, at ændringer der observeres i C-indhold, reelt er ændringer der er sket over tid og ikke over tid og i rum. Dette er en stor forbedring i forhold til analyse af C-dynamik på det enkelte KVN-punkt, men er fundet at have mindre betydning for konklusioner på regional og national skala (Harbo et al., 2022). Men idet variationen på punktniveau er ukendt, er KVN i sin nuværende form ikke egnet til at beregne ændringer i C-indhold på punktniveau. Selvom der er sket en forbedring i forhold til detaljeringsgrad af den indsamlede information om driftstiltag er sammenligning af punkt-data fra de forskellige indsamlingskampagner begrænset. Med de datasæt der indtil videre er indsamlet i KVN, kan følgende parametre beregnes:

- Gennemsnitlig C-indhold samt standardafvigelse i dansk landbrugsjord på fire forskellige tidspunkter, på nationalt niveau samt for JB-kategorier, for overjord (0-25 cm), underjord (25-50 cm) og dyb underjord (50-100 cm). Ved denne beregning antages, at fordelingen af punkterne i KVN er repræsentativ for hele det dyrkede areal, samt at antallet af observationer i alle JB-kategorier er tilstrækkeligt til statistisk analyse (antallet af observationer afhænger af den ønskede sikkerhed på estimer). Opgørelser for enkelte indsamlingskampagner kan forstås som øjeblikbilleder af situationen på det givne tidspunkt.
- Ændringer i C-indhold i KVN for hvert jordlag for Danmark på national skala og for JB-kategorier for punkter, der indgår i flere indsamlingskampagner. Ændringen i C-indhold kan beregnes over en eller flere indsamlingskampagner (ca. 10-årige perioder), alt efter formål og tilgængelige data. Ændringer kan både beregnes som forskellen mellem to nationale estimer, eller som gennemsnittet (eller medianen) af punkternes observerede ændring i tid. Den sidstnævnte beregning kan give indsigt i fordelingen af observerede ændringer.
- Jordens C-lager (0-25 cm, 25-50 cm, 0-50 cm) samt ændringen i denne. Denne beregning kræver kendskab til volumenvægten af jorden. Denne information er alene bestemt ved indsamlingen i 2018/19. For de øvrige indsamlinger er der anvendt værdier fra nationale jorddatabaser.
- Tidligere var punkt-specifik information vedrørende jordens volumenvægt ikke tilgængelig, og gennemsnitsværdier for JB-kategorier blev brugt. Dette medfører usikkerhed på estimatet af jordens C-lager. Jordens volumenvægt blev målt ved indsamlingskampagnen i 2018/19, og brugen af denne information sammen med C-indhold fra tidligere indsamlingskampagner reflekterer alene ændringen i jordens C-indhold. Ændringer i jordens pakningsgrad som følge af trafik, pløjning eller anden management, er således ikke afspejlet i beregninger, der bruger den samme værdi for jordens volumenvægt til beregninger for flere år.

Med adgang til informationer om driftstiltag indsamlet af SEGES kan yderligere analyser foretages:

- Effekt af dyrkningspraksis på jordens C-indhold. Hertil kræves information om årlige driftstiltag, samt punkt-koordinater for at undersøge, om der skal korrigeres for rumlig autokorrelation. Grundet høj varians-inflation blev en sådan analyse af forskellige kombinationer af driftstiltag foretaget via en lineær model (Harbo et al. 2023), men der blev ikke fundet statistisk signifikante effekter grundet høj varians-inflation.
- Modelling af klimapåvirkning på C-lageret i dansk landbrugsjord. Data vedrørende driftstiltag kan bruges til at beregne forskellige klima-scenarier med realistisk (og historisk) management. Hvis yderligere information, f.eks. meteorologisk data, skal inddrages, er koordinater formentligt nødvendige for at finde den nærmeste målestation eller finde data fra kort.

Brugen af KVN til undersøgelse af C-dynamik i jorden er udfordret af flere aspekter ved prøveudtagningens design. Den relativt lange historik giver KVN en værdi i forhold til at undersøge den historiske udvikling i C-indholdet i dansk landbrugsjord, og kan bruges til at forstå tidligere og fremtidige ændringer. Dog kan denne historik bedst forstås ved at inddrage punkter, der er medtaget ved alle indsamlinger. Antallet af disse punkter er imidlertid støt faldende. Det betyder, at det lange perspektiv i KVN-datasættet mindskes over tid, hvis ikke der gøres en indsats for at genbesøge så mange punkter som muligt.

Ved evaluering af ændringer i C-indhold på det enkelte punkt er det vigtigt at prøvestedet genfindes præcist. Variationen i C-indhold på markniveau (KVN-punkt) er imidlertid ukendt, idet de 16 stik puljes inden udtagning af delprøve til C-analyser. Markvariation på nationalt, regionalt og JB-kategori niveau er også ukendt. Det er derfor uvist om den nuværende prøveindsamlingsmetode giver resultater, der er lige repræsentative for alle jordtyper og driftstyper. Grundet den ukendte variation på mark-niveau er det ikke muligt med den nuværende udformning af KVN at beregne den mindste ændring, der med statistisk sikkerhed vil kunne observeres på punkt-niveau.

Idet indsamlingskampagnerne i KVN finder sted ca. hvert 10. år er det uvist, hvad C-dynamikken er i den mellemliggende årrække. Selvom varige ændringer i jordens C-lager sker langsomt, kan der være kortvarige ændringer i jordens C-indhold mellem to indsamlingskampagner. Det nuværende KVN-datasæt vil ikke kunne afsløre drifts- eller klimaafledte ændringer i C-indhold med en kortere tidsskala end 10 år.

2. Nytænkning af KVN

Ændringer til designet af prøveindsamlingen, samt hvilke og hvor mange prøver og analyser der udføres, kan bidrage til, at KVN datasættet kan bruges til at analysere flere aspekter af C-dynamikken i dansk landbrugsjord, samt mindske usikkerhed på estimer. Det er klart, at omkostningerne vil øges jo flere prøveindsamlinger og analyser, der inkluderes i KVN. Effekten af nogle omkostninger vil først vise sig på

længere sigt (fx først efter næste indsamling), hvorfor ændringer i KVN må betragtes som en langsigtet investering.

2.1 Målepunkter

Ideelt set besøges så mange punkter i KVN som muligt ved den enkelte indsamlingskampagne. Der vil naturligt være et fald i antallet af punkter, der indgår i efterfølgende indsamlingskampagner, idet punkter kan udgå af flere grunde, bl.a. ændring fra landbrug til f.eks. vej, bolig, skov, sø eller mose, og ved manglende tilladelse fra lodsejer. Således er det kun 219 ud af de oprindelige 776 punkter, der indgår i alle indsamlingskampagner. Ved de to seneste indsamlingskampagner (2009, 2019) er der dog indgået flere punkter end i 1997 (Fig. 2)

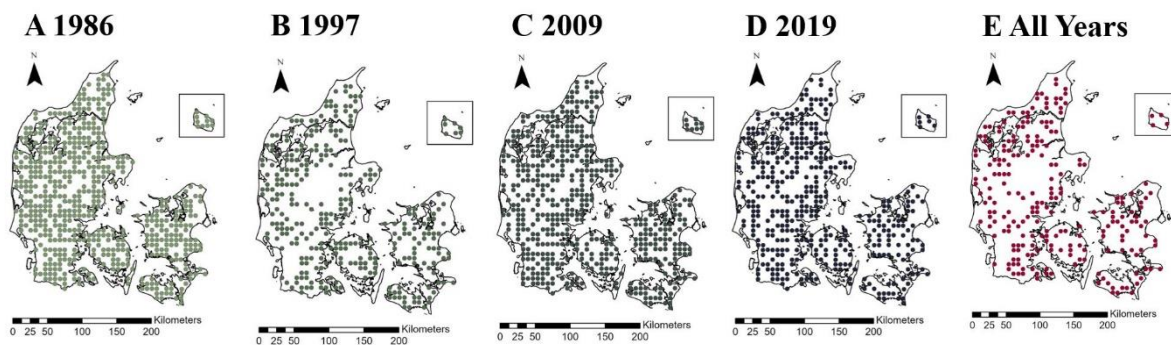


Fig. 2. Kort over KVN-punkterne for hver national indsamlingskampagne; A) 1986 ($n = 573$), B) 1997 ($n = 325$), C) 2009 ($n = 507$), D) 2019 ($n = 406$), samt E) antallet af fordelingen af KVN-punkter, der er inkluderet i samtlige indsamlingskampagner til bestemmelse af kulstofindholdet i dansk landbrugsjord ($n = 229$).

Givet disse informationer, kan det være en fordel fremover at bruge 2009 som startpunkt, når analyser foregår på punkt-niveau, da det vil medføre mindst fordele; (i) reduceret usikkerhed på genfindelse af punkter giver mindre effekt af markvariation på observerede ændringer, og (ii) flere punkter end 229 kan indgå i de efterfølgende indsamlinger.

Selvom den lange historik giver datasættet fra KVN substantiel værdi, er usikkerheder forbundet med genfindelse af punkter, ændringer i indsamlingsstrategi og kvalitet i driftsoplysninger med til at gøre analyse af individuelle punkter mere usikker. Usikkerheden ved brug af data fra 1986 og 1997 er dog væsentlig mindre når de anvendes til opgørelser på nationalt-, regionalt- eller JB-niveau.

2.1.1 Målrættede KVN-punkter

Der er særlige driftsformer (conservation agriculture, økologi, pløjefri dyrkning, regenerativt landbrug, øget græs-andel i sædskiftet, osv.), der kan have interesse for såvel forskere som jordbrugere og politikere. Det er derfor relevant at undersøge om KVN i sin nuværende form eller ved eventuel

udvidelse/restrukturering kan understøtte forskning fokuseret på specifikke dyrkningstiltag. Generelt må det antages at de nuværende driftsformer er proportionalt repræsenterede i KVN i forhold til deres andele i dansk landbrug. Under- og overrepræsentation kan ske, hvis en given driftsform er koncentreret i et geografisk område. I øjeblikket vides det ikke om driften på de enkelte KVN-punkter repræsenterer en særlig og kontinuert driftsform. Det er derfor ikke umiddelbart muligt at undersøge en given driftsforms effekt på jordens C-indhold.

Etablering af KVN-punkter med særlige driftsformer kan bidrage til analyse af udviklingen i jordens C-indhold over tid, hvis datasættet dækker over en relativ lang tidsperiode (10-30 år). For at kunne lave statistiske analyser af sådanne særlige punkter vil der minimum skulle være 10-30 punkter, alt efter hvilke statistiske analyser der ønskes. Men givet at robust analyse af udvalgte dyrkningstiltag kræver solide reference-målinger til sammenligning, er det ikke sikkert, at det vil være muligt at bruge KVN til at estimere effekten af disse tiltag på national skala. Desuden er det næppe muligt at finde nye målepunkter til KVN for de særlige driftsformer fordelt jævnt ud over Danmark, og punkter vil formentligt falde uden for det etablerede 7 km × 7 km net, hvorfra KVN-prøverne udtages. Ekstra punkter vil kræve at i) indsamling og analyser af jordprøver foregår på samme måde som med resten af prøverne fra KVN, og ii) at de nye punkter først karakteriseres som tidligere (tekstur mv).

2.1.2 Indsamlingsfrekvens

Frekvensen for indsamling af prøver i KVN har indtil nu været ca. hvert 10. år og har været finansieret af forskellige forskningsprojekter uden at dette har haft et langtidsplanlagt ophæng. En tilsvarende indsamlingsfrekvens findes i andre internationale monitoringsnetværk. Et interval på 10 år antages ofte som tilstrækkeligt, idet jordens C-lager ikke forventes at ændres målbart over en kortere periode (Post and Kwon 2000; Smith 2004). Ved hyppigere indsamlinger vil observerede ændringer i C niveau i højere grad kunne skyldes korttidsændringer i dyrkningspraksis og markvariation. Ønskes en hyppigere indsamling af prøver på alle KVN-punkterne, kan opdeling af punkterne være et kompromis. Ved en sådan mulig løsning ville den nationale indsamling hvert 10. år fastholdes, samtidigt med at en gruppe af punkterne besøges oftere. Disse punkter skal udvælges således at de er jævnt fordelt geografisk, samt at forskellige JB-kategorier er proportionalt repræsenteret. For at muliggøre statistisk analyse vil en relativ stor andel af punkterne skulle besøges; mellem 1/5 og 1/3 alt efter ønske til statistisk sikkerhed og antallet af punkter i en eventuel kategori. For statistisk analyse på JB-kategori niveau vil denne tilgang formentligt ikke være mulig, da der derved vil være for få observationer.

Det er også muligt at opdele KVN-punkterne i et antal grupper, der så besøges i rotation; f.eks. kan punkterne opdeles i 4 grupper, der hver især besøges hvert 4., 5., eller 6. år. Derved opnås en relativt tæt dataserie i tid som er repræsentativ for hele landet, uden at der skal bruges ekstra ressourcer på at besøge alle punkterne hvert år. Givet at disse punkter og grupper er repræsentative for hele KVN, vil der oftere kunne gøres status på kulstofudviklingen i dansk landbrugsjord, som verificeres med en større undersøgelse

hvert 10. år. Samtidig kan prøvetagningen de mellemliggende år afgrænses til de øverste 0-50 cm, hvor de største ændringer i jordens C indhold sker. Dette vil gøre prøvetagningen mere operationel og flugte med muligheden for at bestemme af volumenvægt uden store ekstra arbejdsopgaver.

Yderligere fordele ved sådan en indsamlingsprocedure er i) at der kræves færre prøveindsamlere, og der kan opbygges erfaring og større konsistens og kontinuitet i arbejdsgangen, ii) at der kommer færre prøver til forbehandling og analyse samtidigt og iii) at det vil være større fleksibilitet i indsamlingen, idet individuelle punkter kan flyttes fra en gruppe til en anden uden at påvirke statistiske analyser substantielt.

2.2 Procedure for prøvetagning

Den bedst egnede prøveudtagningsprocedure er relateret til, hvad man vil bruge data til bagefter. Generelt er usikkerheden på jordens kulstofindhold fra KVN forbundet med rumlig (i plan og i dybde) og tidslig variation, samt ukendte ændringer i jordens parametre over tid.

2.2.1 Stedsbestemmelse

Usikkerheden forbundet med genfindelse af KVN-punkterne var relativt høj indtil 2009 (op til 40 m (Taghizadeh-Toosi et al. 2014)). Dette er nu forbedret til <10-20 cm med GPS-teknologi. For fortsat at opretholde den nye, lavere usikkerhed, skal koordinaterne for prøveindsamlingsfelterne opretholdes. Idet der er 16 koordinater (et for hvert stik) tilknyttet hver KVN-punkt, er det ikke sandsynligt, at der kan inkluderes en fysisk markør i marken.

2.2.2 Stik

Den nuværende procedure for indsamling af jordprøver involverer 16 stik, der opdeles i de forudbestemte jordlag (0-25 cm, 25-50 cm, 50-100 cm). Hvert lag puljes derefter og en delprøve bliver analyseret for C-indhold. Idet de 16 stik tages fra et område på 50 m × 50 m (Fig. 1B), antages det, at delprøven er repræsentativ for hele prøvetagningsfeltet på 2500 m² (0,25 hektar). Markvariation forbliver imidlertid ukendt. Ved analyse af de enkelte stik kan markvariationen bestemmes og en gennemsnitsværdi for punktet (\pm standardafvigelse) beregnes. Dette vil tillade en statistisk bestemmelse af ændringer på det enkelte KVN-punkt. En analyse af markvariationen kan både foregå på national skala og JB-kategori. Det gør det muligt at evaluere i) om der er forskel i markvariation på tværs af landet, mellem driftsformer og/eller jordtyper, ii) om det gennemsnitlige C-indhold er repræsentativt for marken, området, JB-kategori, m.m., og iii) om der er områder hvor flere eller færre prøver end 16 stik er nødvendige.

En sådan undersøgelse kan også foregå som et særskilt projekt, hvor alle eller et udvalgt antal KVN-punkter besøges med henblik på at kvantificere markvariationen. Markvariation er stadig ikke bredt undersøgt, hverken på markniveau, JB-kategori, driftsform eller national skala (Potash et al., 2023). Det vil derfor potentielt være muligt at øge værdien af KVN og optimere brug af ressourcer. Det bemærkes, at

markvariationen kan ændres over tid, hvilket påvirker antallet af prøver ved den efterfølgende indsamlingskampagne.

Ved tidligere indsamlingskampagner er der udtaget 16 ekstra stik i 25 af KVN-punkterne. En analyse af disse punkter viste, at der ikke var signifikant forskel på gennemsnittet af de første 16 stik og de næste i overjorden (0-25 cm), men at forskellen var signifikant i underjorden (25-50 cm) (Harbo et al., 2022). Fordelingen af C er mere heterogen i underjorden end overjorden, idet de dybere jordlag ikke homogeniseres ved jordbearbejdning. Det vil kræve et stort antal prøver at opnå samme statistiske sikkerhed i underjorden. Dette vil være endnu mere udtalt for det dybeste jordlag (50-100 cm).

Ved brugen af stik til indsamling af jordprøver kan der være risiko for at jorden i spyddet komprimeres, og at den målte mængde jord derfor repræsenterer en større dybde end hvad stikket viser. Derudover kan der i jorde med mange og/eller store sten være problemer med at tage en repræsentativ prøve, idet stenene ikke kan være i spyddet eller forhindrer, at det går ned i jorden. I dansk landbrugsjord er der i gennemsnit 2% sten (volumen) i jorden (Harbo et al., 2022), hvilket er relativt lavt. Selvom der for individuelle KVN-punkter kan være en risiko for overestimering af C-lager, er bekymringen omkring om manglende repræsentativt grundet sten ikke substantiel i Danmark.

2.2.3 Jordlag

Da KVN blev etableret, blev stikkene til 1 m dybde inddelt i 4 jordlag, hver af 25 cm dybde. Dog blev prøverne fra de to dybeste jordlag ikke altid analyseret. Siden prøveindsamlingskampagnen i 2008/09 er de to nederste jordlag blevet lagt sammen (50-100 cm). Prøvetagning, hvor jordlagene defineres af den dybde, de er taget fra, kaldet fast dybde udtagning (*fixed depth*; FD). Her bruges dybden sammen med jordens volumenvægt (se afsnit 2.2.4) til at beregne den totale mængde C i jorden (tons C ha⁻¹).

Fordelene er, at det er relativt nemt at opdele stikkene og bruge dybden som et element i statistiske analyser. FD-metoden er dog blevet kritiseret (von Haden et al., 2020; Fowler et al., 2023), idet der ikke tages højde for, at jordens pakningsgrad kan variere fra sted til sted, og muligvis fra år til år. Det er derfor ikke nødvendigvis den samme jordmængde, der er i et 25-cm lag ved alle punkter. Derved sammenlignes der muligvis forskellige mængder jord, når jordens C-lager beregnes. Ofte foreslås ækvivalent-jordmasse-metoden (*equivalent soil mass*; ESM) som et mere præcist alternativ til FD (Ellert and Bettany, 1995; von Haden et al., 2020). Denne metode kræver dog punkt-specifikke målinger af jordens volumenvægt (densitet), og fungerer bedst, når der er data tilgængeligt for mere end to jordlag, idet masse-korrektion for det øvre lag er afhængigt af de nedre lag.

Et andet anerkendt problem med FD-metoden (og til dels ESM-metoden) er, at der ikke tages hensyn til jordens geologiske horisonter. Derved er det ikke muligt at forbinde pedologiske processer med observerede ændringer i de faste jordlag. At opdele jordprøverne efter deres geologiske horisonter

forudsætter imidlertid at der udgraves jordprofiler for hvert enkelt KVN-punkt. Dette er dog en invasiv tilgang der ikke egner sig til langvarige monitoringsprogrammer for bestemmelse af jordens kulstoflager.

Hvis stikkene i det øverste 0-50 cm jordlag blev opdelt i flere lag end de nuværende to, vil det være muligt at opnå en mere detaljeret forståelse af C-ændringer med dybden i topjorden. De jordlag, der undersøges, kan være begrænsende eller definerende for de ændringer, der er mulige at observere. En sådan yderligere opdeling kunne være relevant ved analyse af KVN-punkter med særlige driftsformer, som f.eks. pløjefri dyrkning, hvor det organiske kulstof ikke længere fordeles jævnt i det tidligere pløjelag (det øverste jordlag; 0-25 cm).

2.2.4 Jordens volumenvægt

Ved prøveindsamlingen i 2018/19 blev der for hvert KVN-punkt indsamlet fire ringprøver i overjorden (0-25 cm) og underjorden (25-50 cm) til estimering af jordens volumenvægt og indhold af sten (se afsnit 2.2.5). Tidligere blev der anvendt en gennemsnitligt volumenvægt for hver JB-kategori (Madsen et al., 1992). Statistisk sammenligning af de observerede volumenvægte og litteraturværdierne fra Madsen et al. (1992) viste ikke signifikant forskel for JB-kategorierne, men for individuelle KVN-punkter kunne forskellen være op til $\pm 25\%$ (Harbo et al. 2022). Derved konkluderedes, at punkt-specifik måling af jordens volumenvægt er essentiel for præcise, lokale estimater af jordens C-lager. Beregning af jordens volumenvægt baseret på teksturanalyse kan ikke anbefales som erstatning for udtagning af ringprøver, idet volumenvægt er en dynamisk egenskab, som også påvirkes af management herunder især jordbearbejdning.

2.2.5 Jordens stenindhold

For at undgå at overestimere jordens C-lager skal mængden af sten (> 2 mm) modregnes (Poeplau et al., 2017; Harbo et al., 2022). Overestimeringen af C-lageret er proportional med stenindholdet, men givet det relativt lave stenindhold i dansk landbrugsjord er fejlkilden relativt lille. Dog er der enkelte punkter i KVN, hvor relativt høje stenindhold er observeret (Harbo et al., 2022), og derfor er det nødvendigt at kende stenindholdet for alle punkterne.

Der er umiddelbart ingen grund til at tro, at stenindholdet i dansk landbrugsjord ændrer sig markant mellem prøveindsamlingskampagner. Derfor kan stenindholdet observeret i 2018/19 antages også at være gældende for nye indsamlingskampagner. Dog vil KVN-punkter der ikke blev besøgt i 2018/19 samt eventuelle nyoprettede punkter have brug for at få målt stenindholdet i jordlagene.

Undersøgelsen af Harbo et al. (2022) viste, at det er muligt at estimere stenindholdet i dansk landbrugsjord relativt præcist ved at prøvetageren visuelt vurderer, hvorvidt jorden indeholder f. eks. $<5\%$, $5-10\%$, eller $>10\%$ sten. Den visuelle bedømmelse blev sammenlignet med stenindholdet i ringprøver (100 cm^3) udtaget i forbindelse med bestemmelse af jordens volumenvægt. Hvis der i forvejen udtages ringprøver til beregning af jordens volumenvægt, er det ikke særligt tidskrævende at sigte jorden og veje stenene (>2

mm) og omregne stenenes vægt til en volumen med en fast partikeldensitet for sten, typisk 2.65 g cm^{-3} (Harbo et al. (2022)).

2.3 Aktivitetsdata

Aktivitetsdata (valg af afgrøder, efterafgrøder, pløjning, gødskning, m.m.) er essentielt for brugen af data fra KVN til statistiske analyser og modellering, hvis effekten af management på ændringer i jordens C lager skal opgøres. Selvom det ikke har vist sig muligt at estimere effekter af forskellige landbrugspraksis via lineære modeller (Harbo et al., 2023), er det muligt at bruge andre statistiske metoder til at undersøge effekterne. Hvis data fra KVN ønskes at blive benyttet sammen med C-modeller, såsom C-TOOL og RothC, er det nødvendigt at aktivitetsdata er tilgængeligt. Både modellering og kalibrering kræver at aktivitetsdata er af god kvalitet.

2.4 Relief

Jord kan omfordeles i landskabet via erosion og deposition, både af vind og vand, og via jordbearbejdning. Med jorden flyttes der også C (VandenBygaart et al., 2012; Nadeu et al., 2015; Doetterl et al., 2016). Viden om KVN-punktets placering i landskabet kan bidrage til en forståelse af hvordan erosion og deposition kan påvirke C-lageret både på punktniveau og nationalt. Det er muligt, ved brug af digitale elevationsmodeller og KVN-punkternes præcise koordinater at beregne hældning samt placering i landskabet. En analyse af relieffets effekt på akkumulering og tab af C kan udføres som et særskilt projekt.

2.5 Organisering af prøvehåndtering

Indsamling af prøver i KVN resulterer i et stort antal prøver, der skal håndteres efter selve prøveindsamlingen. En sådan håndtering inkluderer bl.a. registrering, tørring, nedknusning og sigtning, udtagning af delprøver og formaling for yderligere analyser i laboratorie, samt arkivering af den resterende jordprøve. Ligeledes skal jorden analysers for indholdet af uorganisk C (f.eks. fra kalk, CaCO_3), der skal fraregnes ved måling af jordens totale C indhold. Det er derfor vigtigt, at der etableres en fast protokol for arbejdets udførelse og ansvarsfordeling. Hertil kommer forpligtigelser vedrørende arkiv for jordprøver, samt håndtering og sikring af kvalitet i forbindelse med driftsoplysninger for det enkelte KVN-punkt. Den mængde jord der indsamles og arkiveres i forbindelse med prøveudtagning, er typisk relativt stor i forhold til behovet for analyse af jordens C-indhold. Derved er der jord nok til at foretage andre analyser på prøverne som fx næringsstoffer og tungmetaller. Sådanne målinger kan muliggøre forskning på en række andre områder, hvor viden på national og regional skala er mangelfuld. Prøvehåndteringen kan ligeledes fremadrettet blive tilpasset, så det tilgodeser brugen af frisk indsamlede jordprøver til analyse for biologiske indikatorer på jordsundhed, hvorved KVN kan indgå som et element i den danske indsats for overvågning af dyrkningsjordens sundhed i forbindelse med tiltagene i den nye EU Soil Health Law.

3. Referencer

Bak, J., Jensen, J., Larsen, M.M., Pritzl, G., & Scott-Fordsmand, J. (1997). A heavy metal monitoring-programme in Denmark. *Science of the Total Environment*, 207, 179-186.

Callesen, I., Stupak, I., Georgiadis, P., Johannsen, V.K., Østergaard, H.S., & Vesterdal, L. (2015). Soil carbon stock changes in the forests of Denmark between 1990 and 2008. *Geoderma Regional*, 5, 169-180.

Doetterl, S., Berhe, A.A., Nadeu, E., Wang, Z., Sommer, M., & Fiener, P. (2016). Erosion, deposition and soil carbon: a review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews*, 154, 102–22.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.12.005>.

Ellert, B.H., & Bettany, J.R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 529–38.

<https://doi.org/10.4141/cjss95-075>.

Fowler, A.F., Basso, B., Millar, N., & Brinton, W.F. (2023). A simple soil mass correction for a more accurate determination of soil carbon stock changes. *Scientific Reports*, 13(1), 2242.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-29289-2>.

von Haden, A.C., Yang, W.H., & DeLucia, E.H. (2020). Soils' dirty little secret: depth-based comparisons can be inadequate for quantifying changes in soil organic carbon and other mineral soil properties. *Global Change Biology*, 26(7), 3759–70. <https://doi.org/10.1111/gcb.15124>.

Harbo, L.S., Olesen, J.E., Lemming, C., Christensen, B.T., & Elsgaard, L. (2023). Limitations of farm management data in analyses of decadal changes in SOC stocks in the danish soil-monitoring network. *European Journal of Soil Science*, 74(3), e13379. <https://doi.org/10.1111/ejss.13379>.

Harbo, L.S., Olesen, J.E., Liang, Z., Christensen, B.T., & Elsgaard, L. (2022). Estimating organic carbon stocks of mineral soils in Denmark: impact of bulk density and content of rock fragments. *Geoderma Regional*, 30, e00560. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00560>.

Jensen, J., Larsen, M.M., & Bak, J. (2016). National monitoring study in Denmark finds increased and critical levels of copper and zinc in arable soils fertilized with pig slurry. *Environmental Pollution*, 214, 334-340.

Madsen, H.B., Nørr, A.H., & Holst, K.A. (1992). Atlas of Denmark. Vol. 3: The Danish Soil Classification. Copenhagen: C.A Reitzel Publishers.

- Nadeu, E., Gobin, A., Fiener, P., van Wesemael, B., & van Oost, K. (2015). Modelling the impact of agricultural management on soil carbon stocks at the regional scale: the role of lateral fluxes. *Global Change Biology*, 21(8), 3181–92. <https://doi.org/10.1111/gcb.12889>.
- Poeplau, C., Vos, C., & Don, A. (2017). Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *SOIL*, 3(1), 61–66. <https://doi.org/10.5194/soil-3-61-2017>.
- Post, W.M., & Kwon, K.C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6(3), 317–27. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>.
- Potash, E., Guan, K., Margenot, A.J., Lee, D., Boe, A., Douglass, M., Heaton, E., et al. (2023). Multi-site evaluation of stratified and balanced sampling of soil organic carbon stocks in agricultural fields. *Geoderma*, 438, 116587. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116587>.
- Rubæk, G.H., Kristensen, K., Olesen, S.E., Østergaard, H.S., & Heckrath, G. (2013). Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark. *Geoderma*, 209/210, 241-250.
- Smith, P. (2004). How long before a change in soil organic carbon can be detected? *Global Change Biology*, 10(11), 1878–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00854.x>.
- Taghizadeh-Toosi, A., & Olesen, J.E. (2016). Modelling soil organic carbon in Danish agricultural soils suggests low potential for future carbon sequestration. *Agricultural Systems*, 145, 83-89.
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E., Kristensen, K., Elsgaard, L., Østergaard, H.S., Lægdsmand, M., Greve, M.H., & Christensen, B.T. (2014). Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils between 1986 and 2009. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 730–40. <https://doi.org/10.1111/ejss.12169>.
- VandenBygaart, A.J., Kroetsch, D., Gregorich, E.G., & Lobb, D. (2012). Soil C erosion and burial in cropland. *Global Change Biology*, 18(4), 1441–52. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02604.x>.