



Miljøministeriet  
Naturstyrelsen

# Sandjordes følsomhed over for udvaskning af sprøjtemidler

Februar 2015

**Titel:**

Sandjordes følsomhed over for udvaskning af sprøjtemidler

**Redaktion:**

Niels Arne Wahl  
Mogens Humlekrog Greve  
Bo Vangsøe Iversen

**Udgiver:**

Miljøministeriet  
Naturstyrelsen  
Haraldsgade 53  
2100 København Ø  
[www.nst.dk](http://www.nst.dk)

**Foto:**

Mogens Humlekrog Greve

**Illustration:**

Mette Balslev Greve

**År:**

2015

**Kort:**

Mette Balslev Greve

**ISBN nr.**

978-87-7091-607-3

**Ansvarsfraskrivelse:**

Naturstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Naturstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Naturstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Naturstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

## Indholdsfortegnelse

|           |                                                                                     |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Indledning .....</b>                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1       | Baggrund .....                                                                      | 1         |
| 1.2       | Formål .....                                                                        | 2         |
| <b>2.</b> | <b>Det nye nationale jordbundskort .....</b>                                        | <b>3</b>  |
| 2.1       | Behovet for et nyt jordbundskort .....                                              | 3         |
| 2.2       | Test af det nye jordbundskort .....                                                 | 4         |
| 2.3       | Udlægning af punkter ifm. test af det nye jordbundskort .....                       | 5         |
| 2.4       | Prøvetagning .....                                                                  | 6         |
| 2.5       | Resultater af valideringen af det nye jordbundskort .....                           | 6         |
| <b>3.</b> | <b>Udpegning af sprøjtemiddel-følsomme områder .....</b>                            | <b>10</b> |
| 3.1       | Udpegning af de mest sprøjtemiddelfølsomme arealer .....                            | 10        |
| 3.2       | Delkonklusion .....                                                                 | 13        |
| <b>4.</b> | <b>Undersøgelser af markvariabiliteten .....</b>                                    | <b>14</b> |
| 4.1       | Delkonklusion .....                                                                 | 16        |
| 4.2       | Spektrale vis-NIR målinger med en mobil sensorplatform (MSP) .....                  | 18        |
| 4.3       | Traditionel prøvesampling kombineret med laboratoriebaserede vis-NIR målinger ..... | 20        |
| 4.4       | Måling med DUALEM-21S .....                                                         | 22        |
| <b>5.</b> | <b>Sammenfatning .....</b>                                                          | <b>25</b> |
| <b>6.</b> | <b>Konklusion .....</b>                                                             | <b>27</b> |
| <b>7.</b> | <b>Referencer .....</b>                                                             | <b>28</b> |
|           | <b>Bilag 1. Jordbundsprofiler .....</b>                                             | <b>29</b> |
|           | <b>Bilag 2. Geofysiske metoder .....</b>                                            | <b>33</b> |
|           | Målinger med vis-NIR, mobilt og laboratorie baseret .....                           | 33        |
|           | Målinger med DUALEM-21S .....                                                       | 33        |



# 1. Indledning

## 1.1 Baggrund

Resultater fra Varslingssystemet for udvaskning af Pesticider til grundvandet (VAP) viser, at der selv ved en regelret anvendelse af godkendte sprøjtemidler kan være stoffer, der udvaskes fra rodzonen i koncentrationer, der ligger over kvalitetskravene for drikkevand (Brüsch m.fl., 2013). VAP-lokaliteterne er placeret på forskellige jordtyper, hvoraf Tylstrup- og Jydevad-lokaliteten befinder sig på sandede jorde. Jydevad ligger på Tinglev Hedeslette og er den meste grovkornede, sandede jord i VAP konceptet, hvorfor den vurderes som værende den lokalitet, der er mest følsom overfor udvaskning af sprøjtemidler af de to sandede VAP-jorde (Nygaard, 2004). Der er dog lokaliteter, der udviser jordbunde med en mere grovkornet tekstur og et lavere indhold af organisk stof, og disse lokaliteter vil være mere følsomme overfor udvaskning af sprøjtemidler end Jydevad-lokaliteten (Nygaard, 2004). Disse særligt følsomme lokaliteter skal derfor identificeres og udpeges.

Projektet **Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer (KUPA)** blev igangsat i forbindelse med gennemførelsen af Vandmiljøplan II og Drikkevandsudvalgets betænkning fra 1997, hvor de daværende amter blev pålagt at udpege områder, som er særligt følsomme for bestemte typer af forurening. Efter kommunalreformen blev arbejdet pålagt miljøcentrene. Opgaven med at opnå et kendskab til metoder, der kunne anvendes til en udpegning af områder følsomme for udvaskning af sprøjtemidler, blev givet til det daværende Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse (nu De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS) og det daværende Danmarks JordbrugsForskning (nu Aarhus Universitet, AU) i fællesskab.

I dette zoneringsprojekt blev hovedvægten lagt på sandede højbunds-jorde (KUPA-sand, Nygaard, 2004). Hovedkonklusionen af projektet KUPA-sand blev, at det er muligt at udpege potentielt sårbare jorde ud fra jordens volumenvægtede indhold af humus samt summen af finkornsfraktionerne ler (mindre end 2  $\mu\text{m}$ ) og silt (størrelsesfraktionerne fra 2 til 63  $\mu\text{m}$ ) i den øverste meter af jorden. Baseret på et sidenhen udviklet gridbaseret jordbundskort over Danmark (Greve m.fl., 2007) blev der efterfølgende udført praktiske zoneringsforsøg i tre forskellige områder baseret på KUPA-sands kriterier (Nygaard m.fl., 2006a, b, c).

I 2012 igangsatte Naturstyrelsen et projekt (Værkstedsområde Grindsted), hvor det skulle undersøges, om datakvaliteten af jordbundskortet var tilstrækkelig til at kunne anvendes som et forvaltningsegnet værktøj til udpegning af sprøjtemiddelfølsomme områder baseret på KUPA-sands kriterier. Her blev det konkluderet, at jordbundskortets estimering af finkornsfraktionen var acceptabel, men at kortet havde væsentlige afvigelser i forhold til bestemmelsen af jordens indhold af humus (Iversen m.fl., 2012).

## 1.2 Formål

Formålet med nærværende undersøgelse er at kortlægge udbredelsen af sandjorde i Midt- og Sønderjylland, der er mere sårbare end testmarkerne i VAP, og at præsentere disse områder på et landsdækkende kort, der zonerer områderne i ft. følsomhed overfor udvaskning af sprøjtemidler for den øverste meter af jordbunden. Udvasningen af sprøjtemidler styres overordnet af jordens indhold af organisk materiale samt andelen af finfraktionen, dvs. ler og silt. Jorde med et lavt indhold af ler, silt og organisk materiale (humus) er de mest følsomme jorde, da de har en ringe evne til at adsorbere sprøjtemidler og til at nedbryde disse. Disse processer foregår i den umættede zone i og tæt på pløjelagt i den øverste meter af jorden.

Specifikt skal nærværende projekt

- Udarbejde et nyt jordbundskort i en højere opløsning (rumlig opløsning på 30 m) end det hidtidigt anvendte kort ved anvendelse af nyeste statistiske metoder.
- Teste kvaliteten af de nye jordbundskort vha. udtagning og analyse af nye prøver.
- Udarbejde et landsdækkende kort baseret på det opdaterede jordbundskort, inden for KUPA-konceptets gyldighedsområder (jorder i omdrift), over områder, hvor grundvandet er mere sårbart over for udvaskning af sprøjtemidler end den mest sårbare lokalitet i VAP.
- Kortlægge markvariabiliteten af humus, ler og silt på tre undersøgelsesmarker, der er repræsentative for landskabstypen "hedeslette" og undersøge variabilitetens betydning for zoneringskonceptet.
- Undersøge markvariabiliteten på et finskalaniveau ifm. test af robusthed af KUPA konceptet ved anvendelse af alternative sensorbaserede metoder.

Det bemærkes, at KUPA-konceptets anvendelsesområde er afgrænset til dyrkede arealer i omdrift. Sprøjtemiddelfølsomme områder på arealer, som ikke er i omdrift, er ikke omfattet af områdeudpegningerne i nærværende projekt. Disse er omhandlet i den tilknyttede rapport "Indsatsområder inden for sprøjtemiddelfølsomme indvindingsområder" (Duch m.fl., 2015).

Flere arealanvendelser for jorder, som ikke er i omdrift, er relevante i ft. kommunernes indsatsplanlægning mht. sprøjtemidler, fx. juletræs- og frugtplantager. Dermed skal områdeudpegningerne i nærværende rapport ses i sammenhæng med udpegningerne for jorder, som ikke er i omdrift. Naturstyrelsens samlede udpegning af sprøjtemiddelfølsomme områder findes på Danmarks Miljøportal <http://www.miljoportal.dk/Sider/Forside.aspx>.

## 2. Det nye nationale jordbundskort

### 2.1 Behovet for et nyt jordbundskort

I zoneringsarbejdet for sprøjtemidler er der hidtil anvendt et jordbundskort, som blev udarbejdet i 2007 (Greve m.fl., 2007) med en rumlig opløsning på 250 x 250 m. Dette kort blev anvendt i projektet ”Værkstedsområde Grindsted” (Iversen m.fl., 2012).

I mellemtiden er der blevet udarbejdet en ny version af det rasterbaserede jordbundskort med en højere rumlig opløsning (30 x 30 m, Adhikari et al., 2013) på baggrund af data og arbejdsstrin, der beskrives i det følgende.

Den vertikale distribution af jordens tekstur<sup>1</sup> blev modelleret ud fra 1.958 danske jordprofiler (ned til ca. 2 m dybde) og omkring 36.000 topjordprøver fra Den Danske Jordklassificering. Data fra den Danske Jordklassificering blev indsamlet i perioden 1975-79 og består af analyseresultater fra jordprøver udtaget med karteringsspyd i marken, hvorved der typisk blev udtaget prøver i pløjelaget<sup>2</sup> (ca. 0-20 cm). Ligeledes blev der på færre lokaliteter også udtaget en prøve fra underjorden (ca. 35-55 cm dybde).

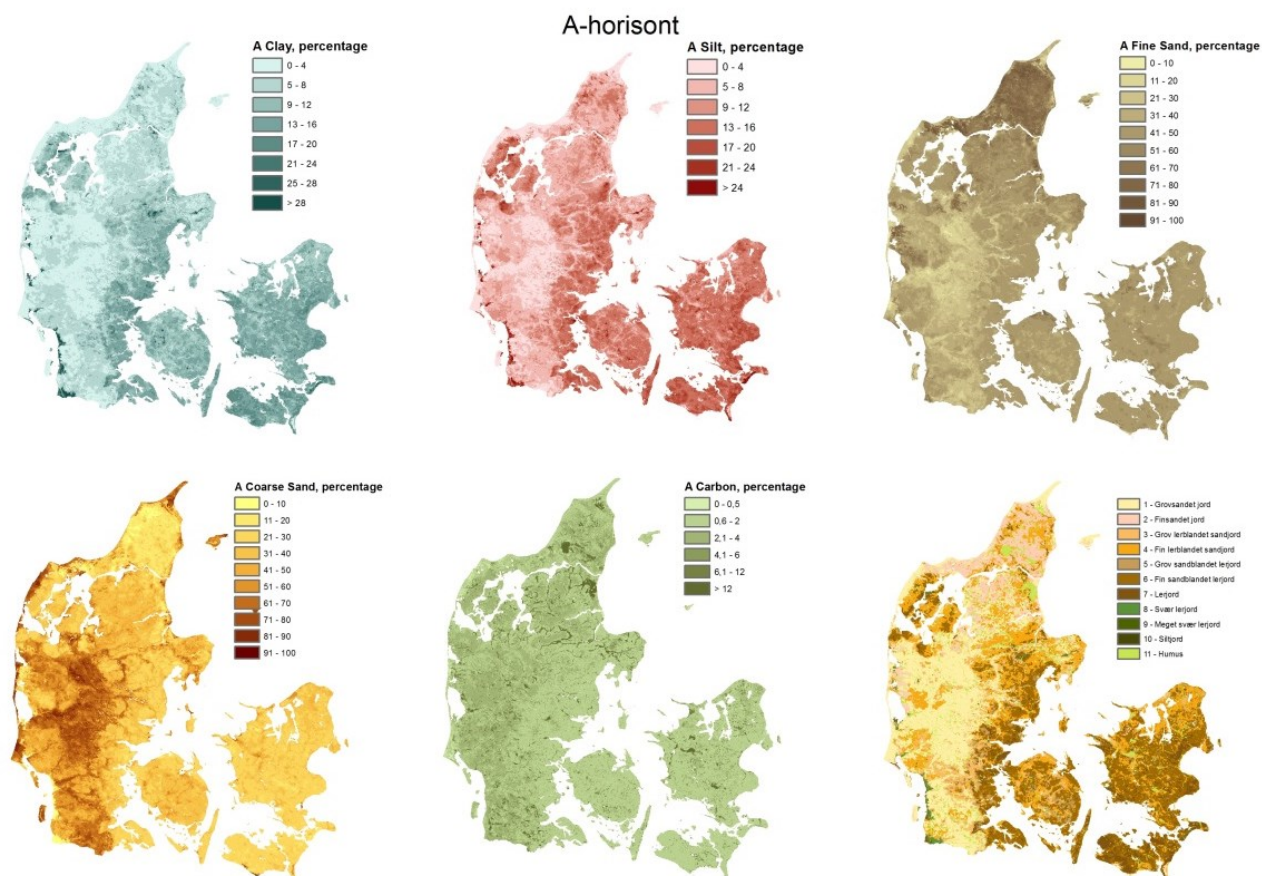
Derudover indgår der ca. 10.000 prøver fra den øverste meter udtaget i forbindelse med SINKS tøvejordskortlægningen. SINKS-projektet (2009-10), der var finansieret af Klima- og Energiministeriet, havde som fokus at kortlægge de danske jordes kulstofpulje med henblik på at vurdere, hvor store mængder kuldioxid, der er bundet og potentielt kan bindes som kulstof i jorden.

Ved hjælp af regressionsregler og interpolering blev teksturfordelingen i seks dybder prædikeret landsdækkende. Teksturværdierne af dette beregnede kort blev herefter sammenlignet med målepunkterne og differensen mellem målepunkterne og det beregnede korts teksturværdier kalkuleret. De derved fremkomne afvigelser (residualer) blev i det næste trin interpoleret (kriging). Residualet blev herefter lagt til teksturværdierne af det først fremkomne korts teksturværdier, hvorved det opdaterede jordbundskort fremkommer (fig. 1).

---

<sup>1</sup> Fordelingen af kornstørrelser igennem et profil (ler, silt og sand), der kendetegner en givet jordbund.

<sup>2</sup> Ifølge den daværende nomenklatur var pløjelaget defineret som den øverste horisont af den pløjede, opdyrkede jord, idet den almindeligt brugte plov i 70-erne vendte jorden til en dybde på gennemsnitlig 20-25 cm.



Figur 1. Det resulterende jordbundskort med prædiktionen af ler, silt, fin- og grovsand og humus i topjorden (A-horisont, 0-30 cm). Kortet nederst til højre viser jordens resulterende JB-klassificering.

## 2.2 Test af det nye jordbundskort

Arbejdet ved Grindsted (Iversen m.fl., 2012) konkluderede, at de for området omkring Grindsted eksisterende jordbundskort var af tilstrækkelig kvalitet, hvad angår prædiktionen af jordens indhold af ler og silt. Derimod var prædiktionen af humusindholdet ikke af en tilstrækkelig kvalitet.

Denne konklusion førte til et behov for en validering af hele hedesletteområdet i Vestjylland (jf. fig. 2), da disse områder udgør langt størsteparten af arealer med de mest grovsandede jorde i Danmark. Ligeledes var der et behov for at indarbejde resultaterne fra det nye landsdækkende jordbundskort, jf. kap. 2.1.

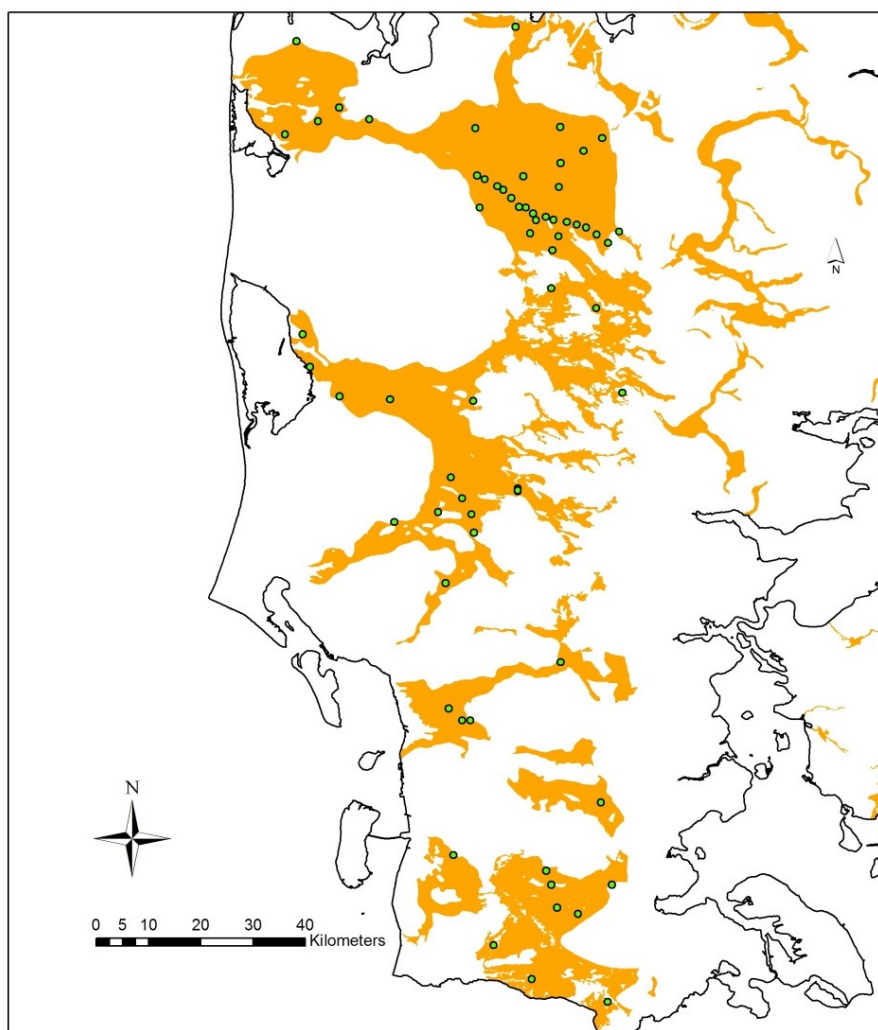
På baggrund af det derpå fremkomne nye jordbundskort, der dels indeholder flere informationer om jordens finfraktion, dels tager højde for de opdaterede humusværdier, blev der udført en ny undersøgelse af zonerings af de sprøjtemiddelfølsomme jorder, jf. kap. 3.1.



### 2.3 Udlægning af punkter ifm. test af det nye jordbundskort

I forbindelse med valideringen af det nye jordbundskort blev det besluttet at udføre en 2-trins tilfældig prøvetagning for at teste validiteten af kortet op imod analyseresultater for tekstur og humus, udtaget på tilfældigt udvalgte testpunkter.

Til det formål blev hedesletten inddelt i celler á 30 x 30 m, svarende til opløsningen på det nye jordbundskort, hvorefter der blev udvalgt 65 tilfældige celler (fig. 2). Inden for hver af disse celler blev der udlagt to tilfældige punkter, hvor der blev taget jordprøver ned til en dybde af ca. 1 m hhv. grundvandsspejlet alt efter hvad der blev antruffet først, dvs. der blev i alt udtaget prøver ved 130 punkter.



Figur 2. De grønne punkter angiver det endelige antal af valideringslokaliteter (49 stk.). Hedesletteområdet er markeret med orange.

## **2.4 Prøvetagning**

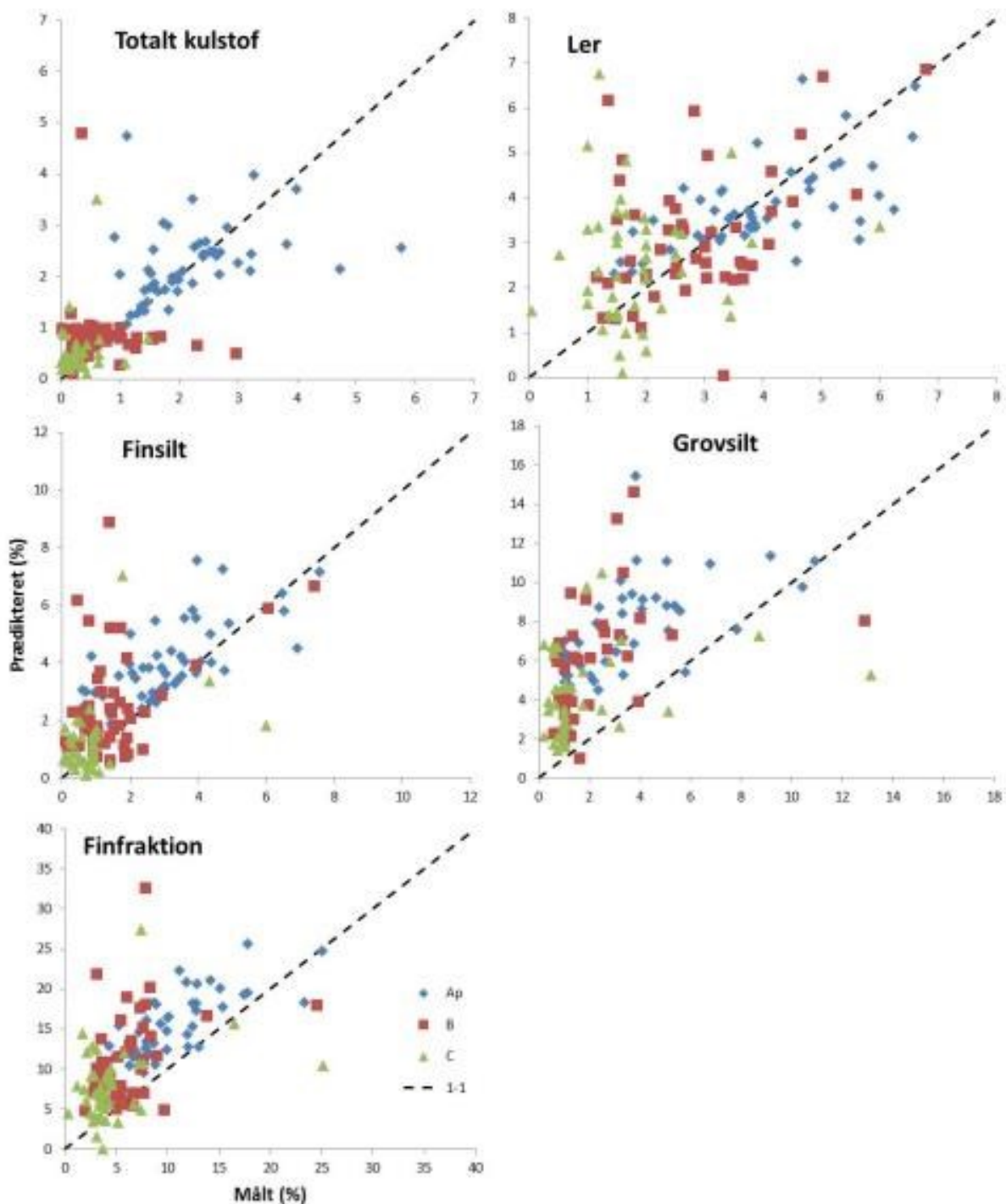
Ved hvert af de 130 punkter blev der udtaget en 300 cm<sup>3</sup> jordprøve i en prøvecylinder i A-horisonten (pløjelaget, ca. 0-30 cm), samt udtaget prøver ved hjælp af et jordbor i dybderne 30 til 60 cm og 60 til 100 cm. Prøverne, i alt 490, blev hjemtaget og sendt til analyse hos analyseinstituttet AGROLAB i Tyskland.

## **2.5 Resultater af valideringen af det nye jordbundskort**

Af de 65 udvalgte valideringslokaliteter blev enkelte punkter ikke besøgt pga. manglende tilladelse (12 stk.). Desuden er punkter beliggende i skov sorteret fra (11 stk.), da disse på grund af ophobning af organisk materiale i skovbunden (litterlaget) vil have et forhøjet indhold af kulstof sammenlignet med det prædikterede jordbundskort. Samtidig blev punkter beliggende tæt på samt i jordbundskortets lavbundsområder sorteret fra (17 stk.), da prædikteringerne af disse havde et unaturligt højt indhold af kulstof i den øverste meter af profilen på grund af en formodet tørvedannelse.

Gennemsnittet af de to tilfældigt udvalgte punkter inden for hver celle antages at repræsentere middelværdien. Punkter analyseret i forbindelse med det oprindelige KUPA-sand projekt samt punkter fra Værkstedsområde Grindsted indgår som et supplement i valideringen (24 stk.). Her er der dog ingen dobbeltbestemmelse for de enkelte lokaliteter. I alt indgår dermed 49 lokaliteter i valideringen af jordbundskortet.

Valideringen af jordbundskortet baseret på målingerne fra de 49 lokaliteter, er vist på figur 3, hvor målte værdier (x-aksen) er plottet mod prædikterede værdier fra jordbundskortet (y-aksen). Jo flere punkter der befinder sig over linjen, jo større er overprædiktion af den tilsvarende fraktion. Som det fremgår af figur 3 overprædikteres indholdet for fin- og grovsiltfraktionen samt indholdet for den totale finfraktion, mens indholdet af organisk stof og ler prædikteres godt (tabel 1).



Figur 3. Resultatet af valideringen af jordbundskortet. Sammenligning mellem målte og prædikerede værdier for totalt kulstof, ler, finsilt, grovsilt og finfraktionen (summen af ler- og siltfraktionerne).

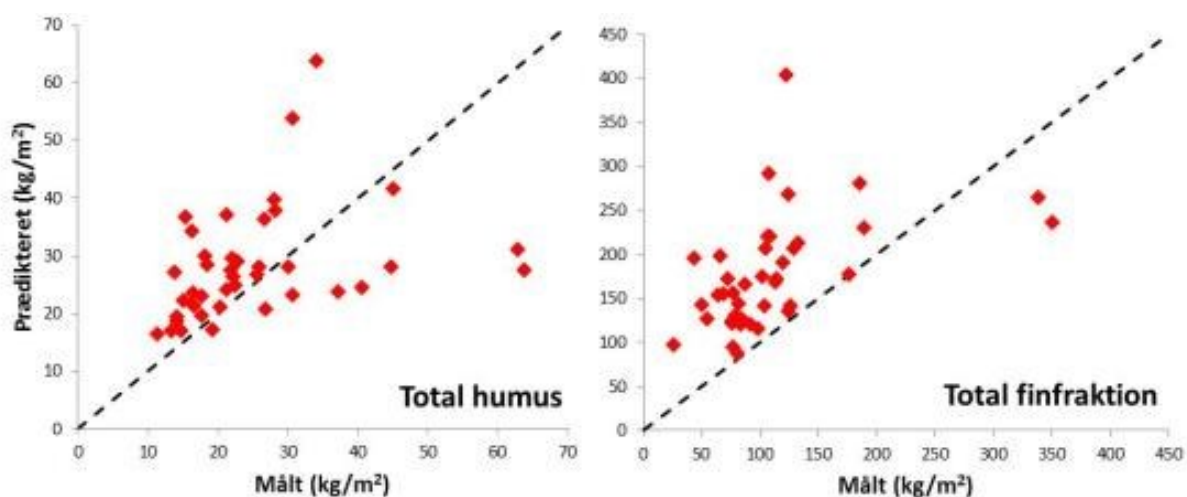
Tabel 1 viser beregnede Nash-Sutcliffe-koefficienter, der udtrykker den prædiktative styrke af de beregnede værdier for jordbundskortet. En koefficient på 1 svarer til en perfekt overensstemmelse mellem prædikerede (jordbundskortet) og målte værdier (testpunkterne), hvorimod faldende værdier mod 0 viser en ringere modelbeskrivelse. Negative værdier indikerer, at residualvariansen er større end datavariansen, hvilket betyder, at modellen ikke forudsiger mere nøjagtigt end middelværdien for testpunkterne.

Ligeledes er Root Mean Square Error-værdier vist, der udtrykker forskellen (residualet) mellem værdier præsigeret af jordbundskortet og markværdier, der baserer sig på faktiske analyseresultater af jordbundsprøver.

Tabel 1. Nash-Sutcliffe-koefficienter (N-S) og Root Mean Square Error (RMSE) for de præsigerede værdier af kulstof, ler, finsilt og grovsilt (i %) samt finfraktion, den totale mængde kulstof og den totale mængde finfraktion (i kg/m<sup>2</sup>) i den øverste meter af profilet. Humusfraktionen er beregnet ud fra antagelsen om at den udgør 58,7 % af den totale kulstofmængde.

| Parameter | Horisont | Total kulstof | Ler  | Finsilt | Grovsilt | Finfraktion | Total humus | Total finfraktion |
|-----------|----------|---------------|------|---------|----------|-------------|-------------|-------------------|
| N-S       | Ap       | 0             | 0,4  | 0,1     | -2,4     | -0,7        | -0,1        | -1,1              |
| N-S       | B        | -1,4          | -1,2 | -1,3    | -0,4     | -0,4        |             |                   |
| N-S       | C        | -3,1          | -3,1 | -0,5    | -1,4     | -1,2        |             |                   |
| RMSE      | Ap       | 1,0           | 1,0  | 1,5     | 4,5      | 6,7         | 12,8        | 91,2              |
| RMSE      | B        | 0,9           | 1,8  | 2,0     | 5,4      | 8,0         |             |                   |
| RMSE      | C        | 0,8           | 2,7  | 1,7     | 4,7      | 8,1         |             |                   |

Som det fremgår af Figur 3 og Tabel 1, ses de bedste præsiktioner for Ap-horisontens indhold af totalt kulstof og ler. Samtidig ses det, at kvaliteten for præsiktionen af de forskellige jordarter bliver ringere med større dybde og ringeste præsiktion ses for indholdet af organisk kulstof i C-horisonten. Indholdet af fin- og især grovsilt er generelt overpræsigeret, men summeres finfraktionerne ses der, specielt for B- og C-horisonten, en lidt bedre præsiktion.



Figur 4. Test af zoneringskonceptet (total humus og finfraktion) i den øverste meter af jorden. Sammenligning mellem målt og præsigeret total mængde humus (omregnet fra totalt kulstof) og finfraktion.

Figur 4 viser test udført på zoneringskonceptet, dvs. total volumenvægtede værdier i den øverste meter af profilen, hvor det fremgår, at humusfraktionen præsikteres med en god overensstemmelse, bortset fra en tendens til en mindre overpræsiktion ved meget lave humusindhold. Generelt fordeler værdierne sig dog på hver side af 1-1-linjen, dvs. at resulaterne fordeler sig ligeligt omkring middelværdien. Den samlede finfraktion overpræsikteres, især hvad angår lave indhold af ler og silt, men datapunkterne ligger på et lineært forløb. Det vil sige, at det er muligt, vurderet ud fra nærværende datasæt, at præsiktere den rumlige variation af den totale finfraktion. Samtidig vil den, som det fremgår af figur 4, blive overpræsikteret.

Sammenfattende vurderes det, at en overpræsiktion af den totale finfraktion betyder, at en zonerings for risikoen af udvaskning af sprøjtemidler vil være forholdsvis konservativ. Dette medfører, at andelen af følsomme arealer, der på baggrund af ovennævnte kriterier udpeges, vil være marginalt mindre end det faktiske areal af følsomme jorde, jf. kap. 3.2.

# 3. Udpegning af sprøjtemiddelfølsomme områder

## 3.1 Udpegning af de mest sprøjtemiddelfølsomme arealer

VAP programmet har som formål at give et tidligt varsel om risiko for påvirkning af grundvandsressourcen ved regelret anvendelse af godkendte sprøjtemidler under realistiske forhold. For sandede jorde omfatter programmet to lokaliteter, hvoraf Jyndevad er den mest grovkornede og humusfattige. Der er dog lokaliteter, der udviser jordbunde med en mere grovkornet tekstur og et lavere indhold af organisk stof end Jyndevad-lokaliteten. Disse lokaliteter vil derfor være mere følsomme overfor udvaskning af sprøjtemidler end jorder repræsenteret i VAP. Nærværende undersøgelse skal derfor identificere og udpege disse særligt følsomme lokaliteter.

Følsomheden baserer sig på KUPA-konceptet, hvor der er fokus på jordens iboende egenskaber, i dette tilfælde jordens indhold af ler, silt og humus (Nygaard, 2004). Følgende jorde indgår ikke i zoneringskonceptet for sandede jorde og vil derfor ikke blive vurderet.

- Jorde med et lerindhold >10 %,
- Lavbundslande,
- ikke-dyrkede arealer (byer, skov, infrastruktur etc.).

Der er flere arealanvendelser på de "ikke-dyrkede arealer" der er relevante i fht. kommunernes indsatsplanlægning mht. sprøjtemidler. Disse er omhandlet i den tilknyttede rapport "Indsatsområder inden for sprøjtemiddelfølsomme indvindingsområder" (Duch m.fl., 2015).

De modellerede resultater fra det oprindelige KUPA-sand projekt af udvaskningen af sprøjtemiddel fra jorde fra kvadratnettet blev inddelt efter deres volumenvægtede indhold af ler, silt og humus, hvor forskellige farvenuancer repræsenterer den relative grad af udvaskning ud af jordens rodzone (figur 6).

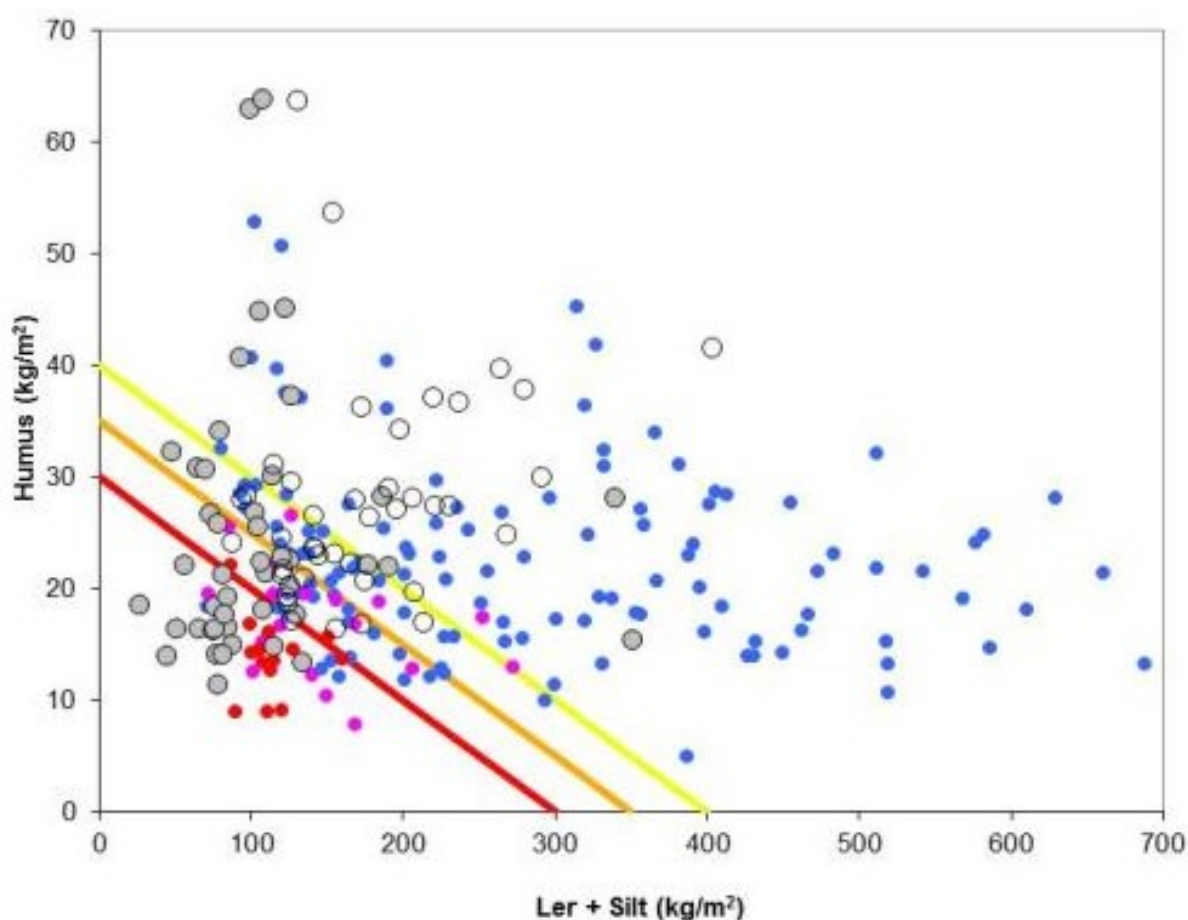
Punkterne er inddelt med lineære relationer, der repræsenterer forskellige grader af følsomhed, specificeret som følgende:

- Punkter under den røde linje vurderes at være *særligt* følsomme profiler,
- Punkter under den orange linje indbefatter yderligere profiler, der vurderes at være *potentielt* følsomme,

- Punkter under den gule linje indbefatter ydermere profiler, der vurderes at være *mindre* følsomme overfor udvaskning af sprøjtemidler.

Det præciseres, at punkterne på figur 5, der ligger under både den røde og den orange linje, vurderes at være mere følsomme end den mest følsomme lokalitet i VAP-programmet, Jyndevad.

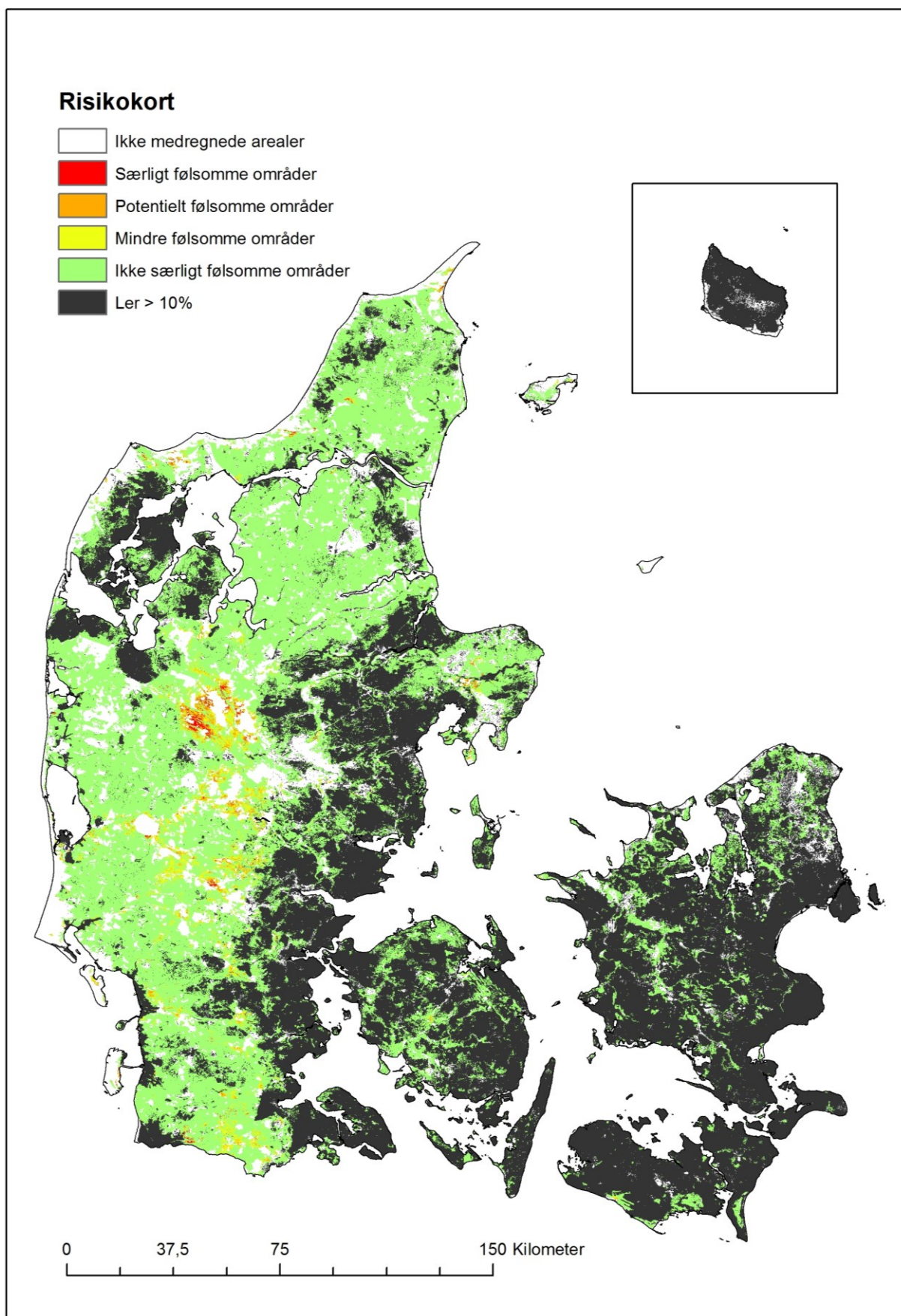
Af figur 5 fremgår ligeledes valideringslokaliteternes målte (grå cirkler) og prædikterede værdier (ikke-farvede cirkler), jf. præsentation i kap. 2.5. Disse værdier fordeler sig over alle sårbarhedsklasser, og det fremgår ligeledes af figuren, at der er flere målte værdier lokaliseret i de mest følsomme områder, end det gør sig gældende for de prædikterede værdier. Dette skyldes det faktum, at specielt finkornsfraktionen overprædikteres (jf. fig. 5 og forklaring dertil), hvilket ”skubber” de prædikterede værdier mod højre på x-aksen og dermed ud af arealet, der omfatter de særligt- og de potentielt følsomme områder.



Figur 5. Sortering af den simulerede udvaskning fra profilerne fra kvadratnettet efter volumenvægtet humus-, ler- og silt-indhold i den øverste meter af jorden (modificeret fra Nygaard, 2004). Se tekst for signaturforklaring. De kulørte punkter baserer sig på modellering af udvaskningen for 175 sandede profiler.

Det oprindelige forslag til zonering af sandede jorde inddelte områder i forhold til deres følsomhed over for udvaskning af sprøjtemidler, dvs. om de var særligt, potentielt, mindre eller ikke følsomme (figur 5). På baggrund af det nye jordbundskort er der foretaget en inddeling ud fra disse følsomhedskriterier for danske sandjorde (figur 7) med undtagelse af nogle specifikke arealer (jf. figurtekst for figur 6).





Figur 6. Zoneringsresultat for Danmark. Farveinddelingen repræsenterer de tre linjer i figur 6. "Ikke medregnede arealer" (hvide områder) omfatter ikke-dyrkede områder (byer, skov, infrastruktur etc.) og lavbundslande. Jorde med et lerindhold >10 % er ligeledes ikke omfattet af zoneringskonceptet.



Som det fremgår af fig. 6, er det specielt på hedesletteområderne de særligt- og potentielt følsomme områder findes. Ligeledes er der enkelte områder på Djursland samt i Nordjylland på flyvesandsaflejringer samt spredt langs Vestkysten i klitområder og ligeledes på Midtfyn. Det ses som forventet, at områder med størst følsomhed befinder sig på de mest grovkornede områder på hedesletten i Midt- og Sydjylland. For hedesletteområdet er det specielt Karup Hedeslette, der skiller sig ud.

Den procentvise fordeling mellem de fire følsomhedskriterier for sandjorderne i omdrift fremgår af tabel 2 og det ses, at de særligt- og potentielt sprøjtemiddelfølsomme jorde, der altså vurderes at være mere følsomme end Jyndevad-lokaliteten, udgør omkring 2 % (el. 31.700 ha) af det samlede areal af sandede jorder i omdrift.

Tabel 2. Areal og andel af sprøjtemiddelfølsomme arealer med sandjorde.

| <b>Følsomhedsklasse</b> | <b>Areal, ha</b> | <b>Andel, %</b> |
|-------------------------|------------------|-----------------|
| Særligt følsomme        | 6.800            | 0,4             |
| Potentielt følsomme     | 24.900           | 1,4             |
| Mindre følsomme         | 65.000           | 3,7             |
| Ikke følsomme           | 1.672.400        | 94,5            |
| <b>Sum</b>              | <b>1.769.100</b> | <b>100</b>      |

### 3.2 Delkonklusion

Det nye jordbundskort har en langt højere detaljeringsgrad end det kort, der tidligere er anvendt. Dette betyder, at kortet mere præcist kan afbilde skift i landskabstyper og afgrænsningen mod lavbundsområder.

Når der sammenlignes prædiktioner med valideringsprøver, ses det, at kulstofindholdet i A-horisonten prædikteres godt, dog med en vis spredning. Kulstofindholdet i B- og C-horisonterne prædikteres noget dårligere, men deres bidrag til profilets samlede kulstof indhold er også mere beskedent. Prædiktionerne af ler- og siltindholdet er valide, men også her er der spredning omkring middelværdien. Grovsiltfraktionen ser ud til at blive overprædikeret.

Sammenfattende betyder dette, at det samlede estimat af finfaktionen bliver underestimeret, med den konsekvens at området, som kortlægges som værende følsomt, er marginalt mindre end det faktisk er. Udpegningen vil derfor være konservativ i ft. det faktiske areal af følsomme områder.

Valideringsresultaterne viser dog også, at de udpegede områder ligger rigtigt placeret i ft. de geologiske aflejringsmiljøer og det vurderes derfor, at resultaterne på baggrund af ovenstående metodik og datagrundlag udpeger følsomme områder i overensstemmelse med KUPA konceptet, og at de potentielt og særligt følsomme områder er mere følsomme end den mest følsomme VAP-mark i Jyndevad.

## 4. Undersøgelser af markvariabiliteten

Formålet med undersøgelserne af variabiliteten på markniveau er at beskrive variationen af teksturparametrene samt kulstofindholdet inden for enkelte udvalgte marker ved at anvende metoder (herunder sensorbaserede metoder), der er sammenlignelige med dem, der også er anvendt på VAP-markerne. Dette blev udført, fordi der skulle testes, om udpegningerne ved anvendelsen af det opdaterede jordbundskort også kunne anses som valide, når skalaniveauet blev meget finere, dvs. når man bevæger sig fra skalaniveauet ”landsskabsэлеment” (i dette tilfælde hedeslette), ned på det meget finere skalaniveau ”mark”, eller om konceptet ville vise for mange områder på markniveau, der retteligt ikke skulle kortlægges som værende sprøjtemiddelfølsomme.

Der blev således benyttet tre alternative metoder til undersøgelse af markvariabiliteten. Resultaterne fra disse undersøgelser er præsenteret i de efterfølgende kapitler.

1. Anvendelse af mobil vis-NIR-sensorplatform (kap. 4.1),
2. Måling med DUALEM-21S (kap. 4.2), og
3. Anvendelse af traditionel prøvindsamling med yderligere vis-NIR-måling på laboratoriet (kap. 4.3).

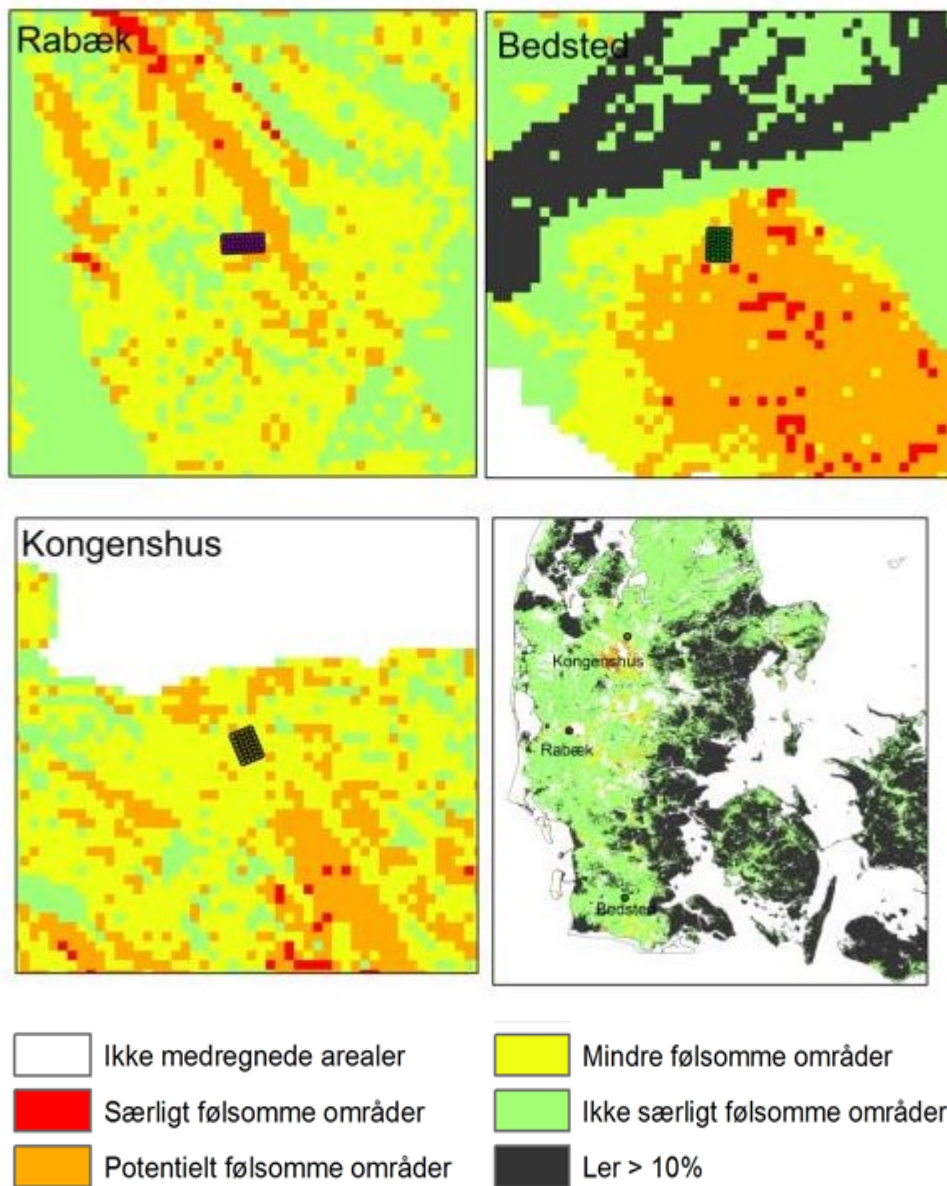
Tre undersøgelsesmarker på hedelseområdet (Bedsted, Kongens Hus og Rabæk, jf. fig. 8) blev udvalgt til undersøgelsen af markskalavariationen på baggrund af de oprindeligt 65 tilfældigt udvalgte testlokaliteter, jf. kap. 2.3. Alle marker udviste jordbundsforhold, der er repræsentative for hedesletten. På markerne blev der yderligere beskrevet to profiler fra hver mark, hvor der ligeledes blev udtaget jordprøver til referenceformål (profilerne og analyseresultater ses i bilag 1).

På markerne blev der udført detaljerede analyser af variabiliteten af tekstur samt humus.

Undersøgelserne blev suppleret med to marker ved Voulund i forbindelse med testen af den mobile vis-NIR sensorplatform. Markerne blev ligeledes kortlagt med en DUALEM-21S-sensor, der sammen med den anvendte inversionssoftware giver et detaljeret kvalitativt mål for den dybdespecifikke variabilitet af organisk kulstof og finfraktionen i de øverste fem meter.

Markernes placering og den rumlige fordeling af følsomheden overfor udvaskning af sprøjtemidler, der er udpeget i ft. nærværende zoneringskoncept, er vist på figur 7.

## Markernes placering



Figur 7. Geografisk placering og detaljebeliggende af undersøgelsesmarkerne udvalgt til markvariabilitetsstudiet.

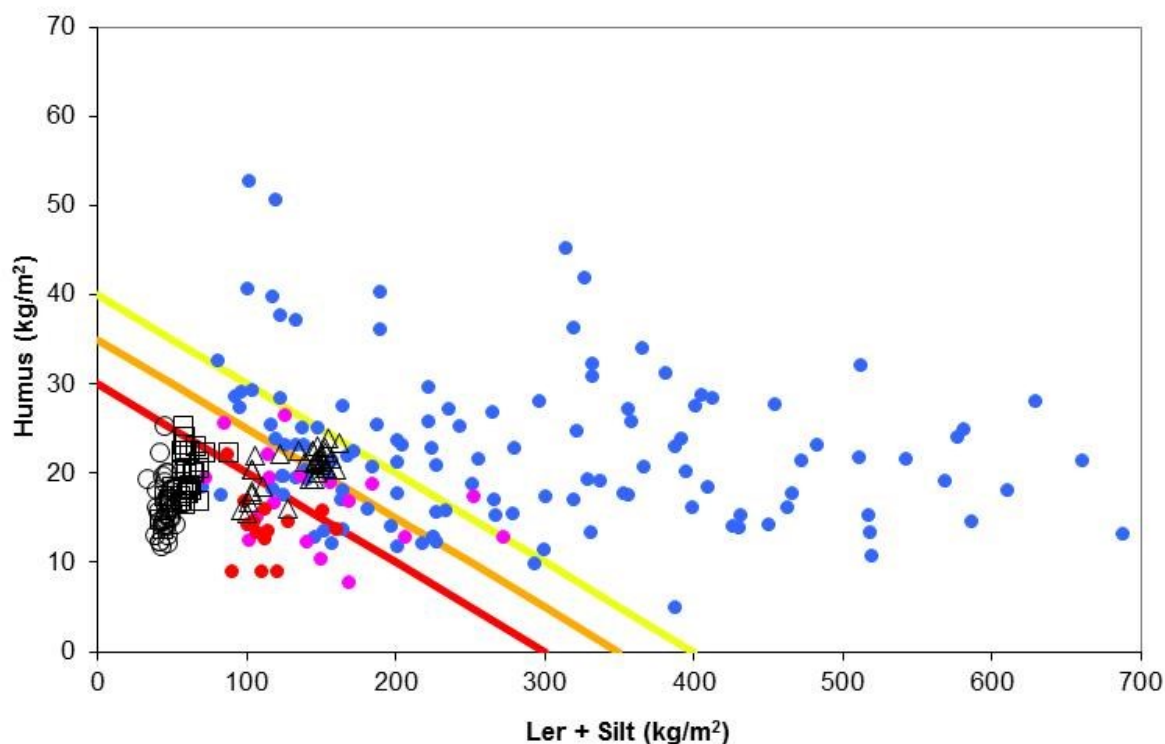
I tabel 3 er der angivet teksturparametrene for de tre marker, der er udvalgt til undersøgelse af markvariabiliteten.

Tabel 3. Generel statistik over jordens egenskaber for variabilitetsmarkerne.

| <b>Rabæk/Kongens Hus/Bedsted</b> |             |             |             |                |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| <b>%</b>                         | <b>TOC*</b> | <b>Ler</b>  | <b>Silt</b> | <b>Sand</b>    |
| <b>Maks</b>                      | 2,4/2,6/2   | 3,5/3,7/5,6 | 4,2/9,2/12  | 98,3/96,4/97,4 |
| <b>Middel</b>                    | 1,4/1,9/1,6 | 1,7/2,4/3,7 | 2,3/4,8/7,4 | 95,9/92,9/88,9 |
| <b>Min</b>                       | 0,8/1,1/1   | 0,1/0,5/1   | 1,0/1,9/1,2 | 93,7/87,1/82,8 |
| <b>Standardafvigelse</b>         | 0,4/0,4/0,3 | 0,6/0,7/1,5 | 0,7/1,5/3,3 | 0,8/1,8/4,6    |

\*TOC: total organisk kulstof

Figur 8 viser sprøjtemiddelfølsomheden for de enkelte gridpunkter af de tre undersøgelsesmarker, hvor der blev udtaget jordbundsprøver til analyse for humus, ler- og siltindhold (jf. kap. 2.3) plottet sammen med den simulerede udvaskning fra profilerne fra kvadratnettet efter volumenvægtet indhold af humus, ler og silt i den øverste meter af jordbunden (Nygaard, 2004).



Figur 8. De målte gridpunkters sprøjtemiddelfølsomhed ( $\Delta$ : Bedsted,  $\square$ : Kongens Hus,  $\circ$ : Rabæk), modificeret efter Nygaard (2004).

#### 4.1 Delkonklusion

Resultaterne af markvariabilitetsstudierne viser, at der er en betydelig rumlig variation af humus og finkornsfraktionen indenfor de enkelte marker. Samtidig viser studiet, at alle prøver taget indenfor de tre marker, kan betragtes som værende følsomme, jf. KUPA-konceptet. Da de tre marker er

repræsentative for hedesletten betyder dette, at den rumlige variation af sprøjtemiddelfølsomheden på markniveau kan håndteres af KUPA-konceptet, bl.a. fordi den konceptbetingede overprædiktation af jordens finkornsfraktion resulterer i en underprædiktation af arealet af sprøjtemiddelfølsomme områder. På denne måde er konceptet konservativt, da sandsynligheden for at marker fejlagtigt udpeges, minimeres.

## 4.2 Spektrale vis-NIR målinger med en mobil sensorplatform (MSP)

For en kort redegørelse for metoden henvises til bilag 2.

### Resultater

Markerne blev kortlagt ved hjælp af MSP i november 2013. Resultaterne fra den mobile kortlægning blev kontrolleret ved PLS krydsvalidering af de 45 (3 x 15) prøver og var med undtagelse af Kongens Hus ikke vellykkede. Resultaterne fra Rabæk og Bedsted er derfor ikke medtaget i dette afsnit, men er i stedet erstattet af resultaterne fra to tidligere kortlægninger, nærmere Voulund 1 og Voulund 2, hvor MSP teknikken tidligere er anvendt med godt resultat. Disse to marker ligger placeret på homogene hedesletteaflejringer (tabel 4), så de overordnet svarer til de tre undersøgelsesmarker brugt i nærværende projekt.

Tabel 4. Generel statistik over jordens egenskaber for Voulund-markerne.

| <b>Voulund 1/Voulund 2</b> |             |            |             |             |
|----------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| <b>%</b>                   | <b>TOC*</b> | <b>Ler</b> | <b>Silt</b> | <b>Sand</b> |
| <b>Maks</b>                | 3,1/3,6     | 5,5/6,7    | 1,9/2       | 92/90,4     |
| <b>Middel</b>              | 2,4/2,4     | 4,3/4,5    | 1/1,1       | 90,3/90,4   |
| <b>Min</b>                 | 1,4/1,2     | 1,3/2,2    | 0,2/0,1     | 77,4/85,6   |
| <b>Standardafvigelse</b>   | 0,3/0,4     | 0,5/0,6    | 0,3/0,3     | 0,7/1,5     |

\*TOC: total organisk kulstof

Som det fremgår af tabel 5 blev der for de analyserede jordegenskaber for Voulund-markerne indsamlet langt bedre og forudsigelige egenskaber med MSP, med  $R^2$ -værdier  $>0,7$  og med færre prædiktionsfejl end tilfældet var for Kongens Hus marken. Prædiktionsfejlene ved Kongens Hus var to til tre gange så høje. Voulund-markerne havde en lavere variabilitet for teksturparametrene (jf. tabel 3 og 4) end de undersøgte tre marker i nærværende projekt, hvorfor der opnås en langt højere korrelation med NIR-spektre sammenlignet med de tre nye undersøgelsesmarker.

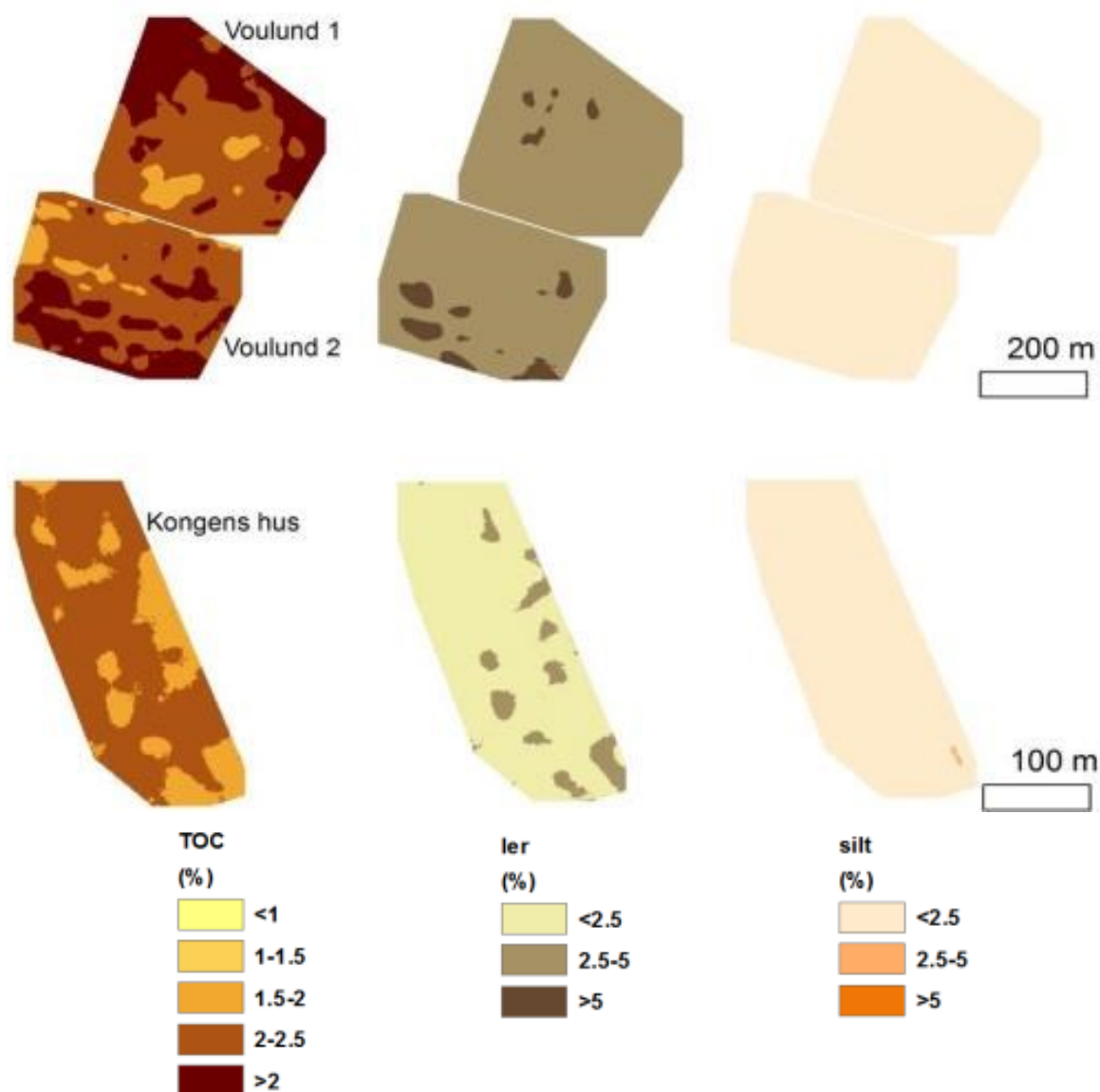
Tabel 5. Resultater fra NIR-kalibreringsmodeller.

|              | <b>Voulund 1</b> |       | <b>Voulund 2</b> |       | <b>Kongens Hus</b> |       |
|--------------|------------------|-------|------------------|-------|--------------------|-------|
|              | <i>RMSECV*</i>   | $R^2$ | <i>RMSECV</i>    | $R^2$ | <i>RMSECV</i>      | $R^2$ |
| <b>TOC**</b> | 0,14             | 0,94  | 0,17             | 0,93  | 0,36               | 0,35  |
| <b>ler</b>   | 0,33             | 0,77  | 0,27             | 0,92  | 0,84               | -     |
| <b>silt</b>  | 0,35             | 0,82  | 0,43             | 0,72  | 0,65               | 0,24  |

\*RMSECV: "mean square error of prediction" - prædiktionsfejl

\*\*TOC: total organisk kulstof

Resultaterne fra MSP prædiktionerne på Voulund-markerne og på Kongens Hus-markerne er præsenteret på figur 9. TOC viste den højeste variabilitet på alle undersøgte marker. Der blev påvist en meget lille variation i ler og silt, og i de fleste tilfælde faldt de to parametre i en klasse  $<2,5$  %.



Figur 9. TOC, ler- og silt prædiktioner fra de mobile sensorplatformsmålinger fra Voulund 1 og 2 og Kongens Hus.

### Delkonklusion

I projektet har der været problemer med MSP, hvilket sandsynligvis skyldes en kombination af tekniske udfordringer med en lyskilde, og det faktum, at der er betydeligt flere ukendte faktorer tilstede, når marker kortlægges med en MSP. Disse faktorer er fx variation i vandindhold, tilstedeværelse af planterester, sten mm. der vil påvirke spektrumskvaliteten på MSP. Resulterne fra Voulum markerne og Kongens Hus marken samt tidligere erfaringer med MSP indikerer dog, at teknologien i fremtiden vil have et stort potentiale, men at den på nuværende tidspunkt endnu ikke er egnet til at kunne anvendes i en detaljeret zonerings aktivitet.

### 4.3 Traditionel prøvesampling kombineret med laboratoriebaserede vis-NIR målinger

I alt blev der indsamlet 95 topjordsprøver (0-30 cm) og 35 underjordsprøver pr. mark i et 15 m grid. Jordprøverne blev analyseret for total kulstof, ler- og siltindhold (tabel 6). Lufttørret jord blev efterfølgende scannet ved hjælp af en laboratoriesensor vis-NIR (350-2.500 nm) LabSpec® 5100, som er produceret af ASD Inc. (Boulder, CO, USA). "Partial least square (PLS)" regression blev anvendt til at korrelere spektrum på de 95 jordprøver med referenceværdier, der blev målt på laboratoriet, for de udvalgte jordegenskaber.

Tabel 6. Generel statistik af vis-NIR- værdier målt med mobil sensorplatform og referenceværdier (traditionel prøveindsamling med vis-NIR måling på laboratoriet) af gridprøver.

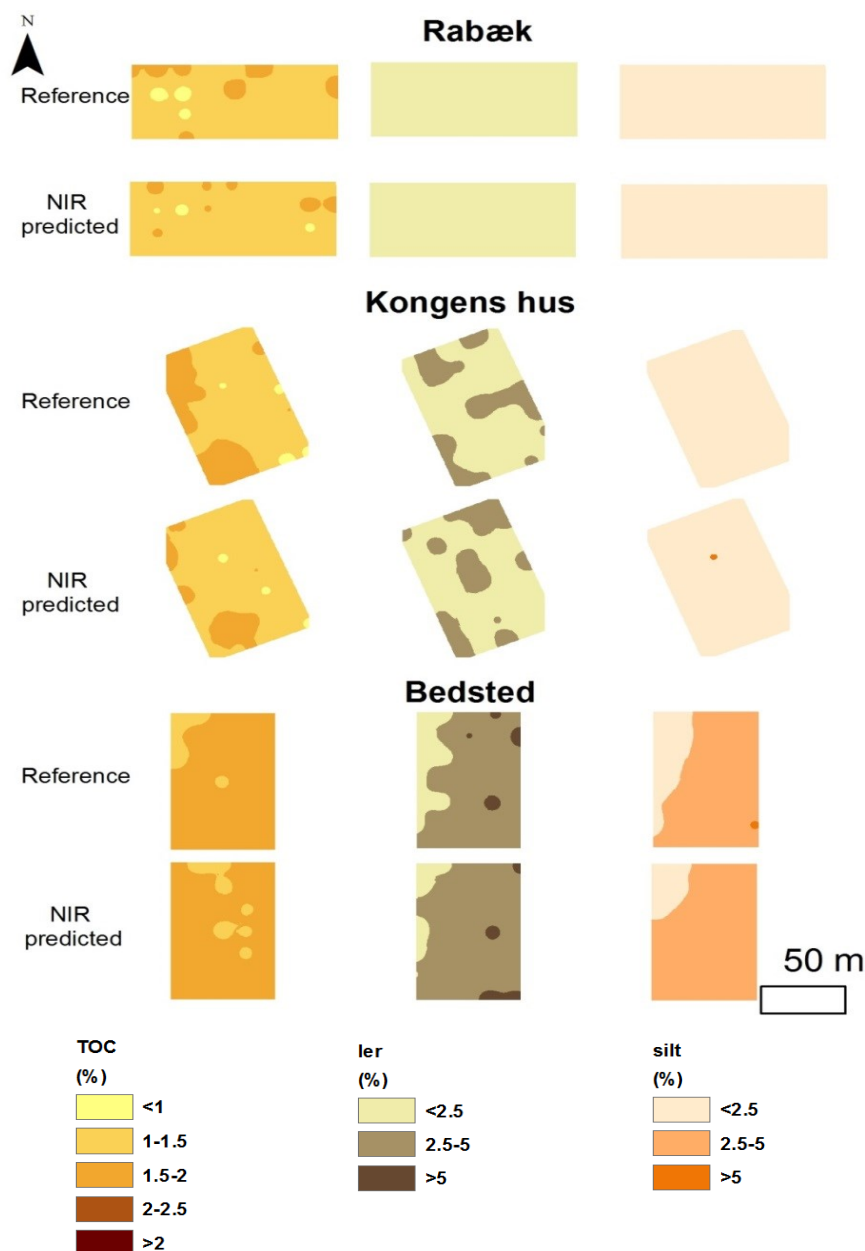
|                    | Reference<br>TOC* | Prædikeret<br>TOC* | Reference<br>ler | Prædikeret<br>ler | Reference<br>silt | Prædikeret<br>silt |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| <b>Rabæk</b>       |                   |                    |                  |                   |                   |                    |
| Middel             | 1,31              | 1,32               | 1,65             | 1,65              | 1,06              | 1,01               |
| Maks.              | 1,88              | 1,66               | 2,5              | 2,49              | 2,2               | 1,77               |
| Min.               | 0,84              | 0,85               | 0,9              | 0,76              | 0,1               | 0                  |
| Standardafv.       | 0,28              | 0,21               | 0,39             | 0,45              | 0,43              | 0,42               |
| <b>Kongens Hus</b> |                   |                    |                  |                   |                   |                    |
| Middel             | 1,85              | 1,84               | 2,37             | 2,37              | 1,34              | 1,42               |
| Maks.              | 2,54              | 2,6                | 3,6              | 3,75              | 2,5               | 2,64               |
| Min.               | 1,43              | 1,42               | 0,5              | 0,95              | 0,39              | 0,53               |
| Standardafv.       | 0,32              | 0,25               | 0,63             | 0,61              | 0,52              | 0,5                |
| <b>Bedsted</b>     |                   |                    |                  |                   |                   |                    |
| Middel             | 1,66              | 1,67               | 3,74             | 3,75              | 3,15              | 3,15               |
| Maks.              | 2,01              | 2,01               | 5,5              | 5,7               | 5,2               | 4,19               |
| Min.               | 1,13              | 1,4                | 1                | 1,66              | 0,94              | 1,88               |
| Standardafv.       | 0,2               | 1,17               | 1,46             | 1,17              | 1,11              | 0,61               |

\*TOC: totalt kulstof

Når man sammenligner de to metoder, blev der genereret meget lignende resultater (tabel 6). Højere, prædiktive egenskaber ved den traditionelle prøveindsamling med laboratoriebaseret NIR-måling blev opnået på alle jordegenskaber sammenlignet med prædiktionerne udført med den mobile sensorplatform. Middelkvadrat-prædiktionsfejlene ligger på 0,22 %, 0,68 % og 0,60 % for henholdsvis totalt kulstof, ler og silt.

Markernes placering i forhold til deres sprøjtemiddelfølsomhed er vist på figur 7. Som det fremgår af figur 7 ligger alle tre marker i et sprøjtemiddelfølsomt område. Bedsted ligger i et område klassificeret som potentielt følsomt, mens Rabæk og Kongens Hus ligger placeret i et mindre følsomt område. Sammenfattende repræsenterer de tre marker områder, der er klassificeret som mere følsom hhv. lige så følsom som Jyndevad lokaliteten. De målte værdier af markprøverne (figur 8) placerer sig generelt i mere følsomme kategorier end prædikeret ud fra jordbundskortet.





Figur 10. Total organisk kulstof, ler- og silt. Resultater efter traditionel metode (reference) vs. resultater med mobil sensorplatform (NIR predicted) fra Rabæk, Kongens Hus og Bedsted.

## Delkonklusion

Ved at sammligne værdier for total organisk kulstof, silt og lerindhold, fremkommet efter laboratorieanalyse kombineret med vis-NIR målinger, med værdier, der er prædikeret vha. den mobile sensorplatform alene, ses det, at kvaliteten af vis-NIR-metoden med en mobil sensorplatform er fuldtud på højde med den traditionelle laboratoriemetode, når markvariabiliteten skal kortlægges. NIR-prædiktioner viser desuden, at de rumlige mønstre på markerne dannet ud fra disse data stemte godt overens med mønstrene fremkommet efter den traditionelle metode (figur 10).

#### 4.4 Måling med DUALEM-21S

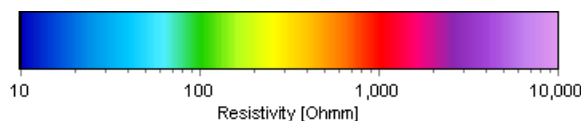
For en kort redegørelse over metodens tilgrundliggende teknik henvises til bilag 2 samt Søltøft et al., 2013.

##### Resultater

I det følgende er resultaterne repræsenteret som middelmodstandskort. For hvert af de tre områder er der produceret middelmodstandskort med et interval på 0,5 m fra 0-3 m dybde, der præsenteres i bilag 2. Derudover er der produceret 3 middelmodstandskort for de tre undersøgelsesmarker i intervallerne 0-0,3 m, 0,3-0,6 m og 0,6-1,5 m. Disse intervaller repræsenterer de mere interessante jordlag i ft. nærværende problemstilling.

I beregningen af middelmodstandskortene er den øvre DOI grænse (*depth of investigation*) brugt som afskæringskriterie, sådan at modelinformation, der ligger under denne grænse, er udeladt. Den øvre DOI angiver den grænse i jordbunden, hvorunder tolkningsresultater skal tages med forbehold, mens nedre DOI angiver den grænse, hvorunder måleresultater er så usikre, at de ikke bør anvendes i tolkningen.

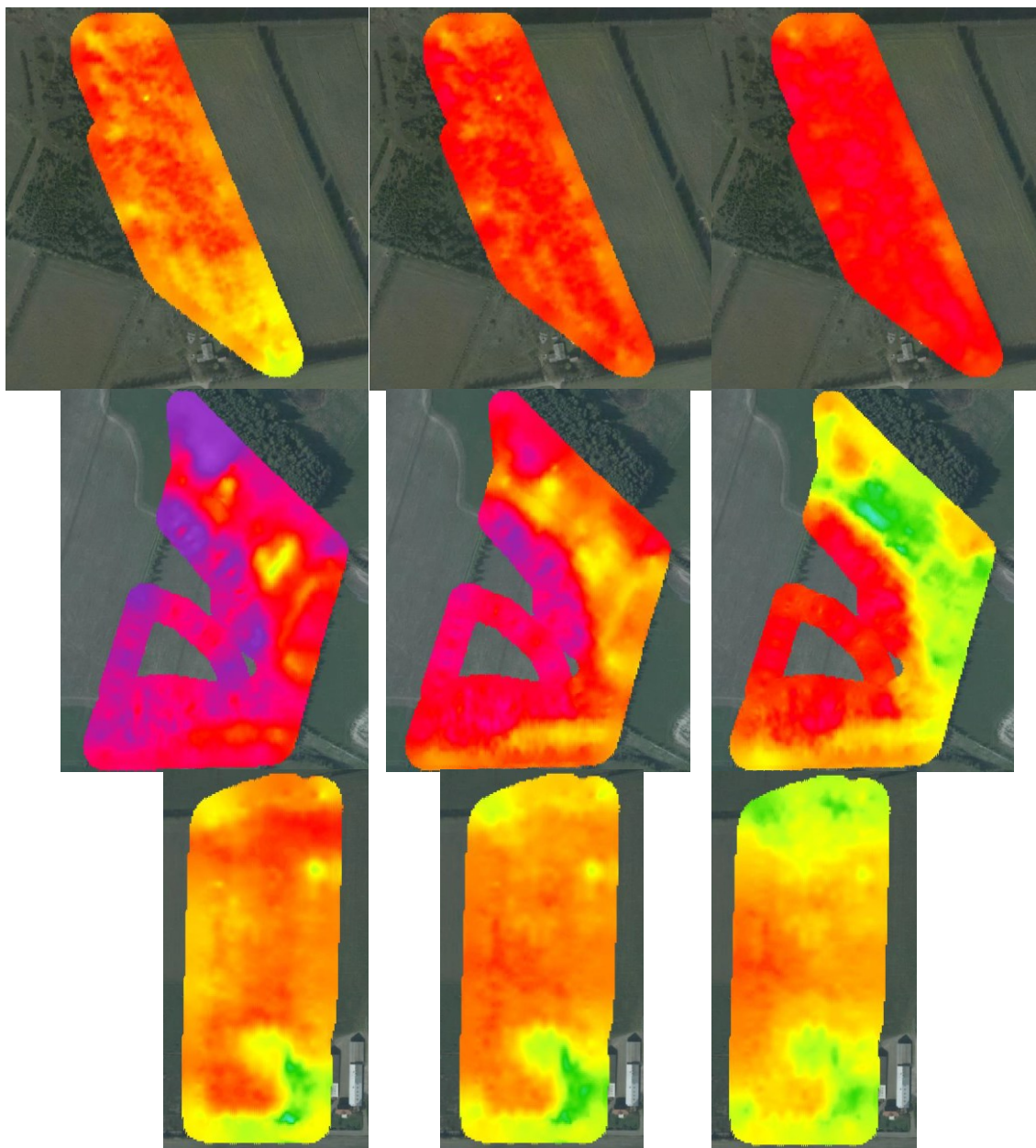
Jordens modstand måles i Ohmm, jf. skala nedenfor (fig. 11).



Figur 11. Skala brugt på middelmodstandskort (Ohmm).

Den logaritmiske skala angiver de målte modstandsforhold og kan groft tolkes som følgende. Lave modstande i venstre skaladel med blå farve angiver meget finkornede (lerede) aflejringer. Lila farver angiver meget grovkornede aflejringer (stenet-gruset). Morænelersaflejringer angives med grøn-gullig nuancering, mens sandede aflejringer angives med gullig-rødlige nuancer.

På næste side ses en samstilling over middelmodstandskortene for de tre undersøgelsesmarker til undersøgelsen af markvariabiliteten (figur 12).



Figur 12. Middelmodstandskort for Kongens Hus marken (øverste række), Rabæk (midterste række) og Bedsted (nederste række) for dybderne 0-0,3 m (venstre), 0,3-0,6 m (midt for) og 0,6-1,5 m (højre) [OBS! forskelligt skalaniveau].

Af figur 12 (øverste række) fremgår, at variabiliteten for Kongens Hus marken falder stødt med tiltagende jorddybde. Variabiliteten i ft. fordelingen af fine og grove jordpartikler er højest i pløjelaget (0-30 cm) med et subområde i den sydøstlige del af marken, hvor andelen af finere materiale er lidt højere. Denne forskel udviskes dog allerede i næste dybdetrin fra 30-60 cm. Overordnet set er der tale om en mellemkornet smeltevandsaflejring. Kongens Hus marken er de mest homogene hvad angår den rumlige fordeling af teksturklasser af de tre undersøgelsesmarker i nærværende projekt.

Aflejringsforholdene og materialesammensætningen på Rabæk marken (fig. 12, midterste række) er mere variable. Pløjelagt består af meget grovkornet sand med nogen enkelte indslag af finere sand i det nordøstlige markhjørne. I de to næste dybdetrin ses det, at den centrale og den vestlige del af marken

stadigvæk består af grov- til mellemkornet materiale, mens teksten for den øvrige mark bliver mere finkornet med større dybde. Dette er især udpræget på den nordøstlige del af marken, hvor der i dybden findes enkelte linser med morænelersagtigt præg.

På Bedsted marken (fig. 12, nederste række) observeres en omvendt rækkefølge af fin- og grovkornet materiale. Marken er tredelt, med en mere finkornet sammensætning på den nordlige og den sydlige del af marken og mere groft materiale i den centrale del. Andelen af finkornet materiale øges med dybden på den nordlige del af marken, mens det modsatte gør sig gældende på den sydlige del. Den centrale del er i alle dybdetrin domineret af mellemgrove aflejringer, hovedsageligt mellemsand.

### **Delkonklusion**

DUALEM-21S sensoren og den tilhørende inversionssoftware muliggør en hurtig evaluering af materialesammensætningen i dybden. DUALEM-21S målingerne viser tydeligt, at der kan forventes stor variabilitet i materialesammensætningen på marker repræsenterende hedesletten. Variabiliteten skyldes primært markernes geografiske beliggenhed i ft. de aflejringsforhold, der var fremherskende på aflejringstidspunktet. Hovedsageligt er der dog tale om sandede aflejringer med enkelte finkornede indslag. Sammenfattende er metoden velegnet til undersøgelsen af markvariabiliteten.

## 5. Sammenfatning

I det oprindelige projekt KUPA-sand identificeredes de parametre, der er styrende for sandjordes sprøjtemiddelfølsomhed, nemlig jordens indhold af humus, ler og silt i den øverste meter. For at kunne gennemføre en zonerings af de danske sandjorde er et detaljeret kendskab til zoneringsparametrene nødvendigt. Information om jordens indhold af humus, ler og silt i Danmark fandtes oprindeligt i form af et rasterbaseret kort med en rumlig opløsning på 250 m. Dette korts anvendelighed som basis for en fremtidig sprøjtemiddelzonering er tidligere blevet testet i et område ved Grindsted. Konklusionen af dette arbejde blev, at ler og silt var kortlagt med tilstrækkelig høj kvalitet, hvorimod der var problemer med kvaliteten af humuskortlægningen. Desuden gav den relativt grove opløsning problemer med en tilstrækkelig nøjagtig afgrænsning op mod arealer, der ikke er omfattet af KUPA-konceptet såsom skovområder og bymæssig bebyggelse, idet KUPA-konceptet alene er dækkende på dyrkede områder i omdrift.

Siden de oprindelige teksturkort med en opløsning på 250 m blev udarbejdet, er en ny detaljeret højdemodel blevet tilgængelig. Denne nye højdemodel har muliggjort en kortlægning i en forbedret opløsning på 30 m. Til selve kortlægningen er der anvendt en statistisk metode, som er en kombination af regressionsanalyse og interpolering. Det nye jordbundskorts højere detaljeringsgrad betyder, at kortet mere præcist kan fange skift i landskabstyper og afgrænsninger mod lavbundsområder.

De nye jordbundskort, som beskriver jordens tekstur i tre dybder (0-30 cm, 30-60 cm og 60-100 cm), er i nærværende projekt blevet testet ved dels at indsamle nye prøver fra et større antal sandede lokaliteter samt dels at anvende resultater fra tidligere indsamlede punktdata. De indsamlede prøver blev analyseret for indholdet af humus, ler og silt. I alt blev jordens teksturfordeling i 49 punkter testet mod det nye jordbundskort. I forbindelse med markvariabilitetsundersøgelserne blev der udtaget gridprøver med en afstand af 15 m på tre udpegede marker. På disse marker blev der udtaget 95 topjordsprøver og 35 underjordsprøver, der ligeledes blev analyseret for indholdet af humus, ler og silt.

Testen af de nye jordbundskort viser, at humusindholdet i A-horisonen prædikteres mere nøjagtigt sammenlignet med kortet, der blev brugt i Grindsted projektet, dog med en vis spredning af værdierne. Humusindholdet i B- og C-horisonerne prædikteres noget dårligere, men deres bidrag til profilers samlede kulstofindhold er også mere beskedent, hvilket betyder, at den lidt dårligere prædiktation ikke har væsentlig betydning for udpegningen af sprøjtemiddelfølsomme områder. Prædiktionerne af ler- og siltindholdet er valide, men her er der større spredning omkring middelværdien. Grovsiltfraktionen ser ud til at blive overprædikeret, hvilket betyder, at kortet forudsiger et højere indhold af grovsilt, end der er målt i valideringsprøverne. Konsekvensen af dette er, at det samlede estimat af finfaktionen

ned til 1 m dybde ligeledes bliver overprædikeret. Dette betyder, at det samlede område, der kortlægges som værende sprøjtemiddelfølsomt, er marginalt mindre end det i virkeligheden er. Valideringsresultaterne viser dog også, at de udpegede områder ligger rigtigt placeret i forhold til de geologiske aflejringsmiljøer.

Sprøjtemiddelzoneringskortet har som formål at udpege de mest følsomme områder i Danmark for udvaskning af sprøjtemidler. Iht. KUPA-konceptet zonerer områderne på basis af, om de er særligt, potentielt, mindre eller ikke følsomme overfor udvaskning af sprøjtemidler. Særligt og potentielt følsomme områder udpeget i nærværende projekt er mere følsomme end den mest følsomme lokalitet i varslingsystemet for udvaskning af sprøjtemidler til grundvand (VAP) i Jyndevad.

På baggrund af de ovenfor nævnte zoneringskriterier blev der lavet en inddeling af alle danske sandjorder i omdrift. Her ses som forventet, at områder med størst følsomhed befinder sig på de mest grovkornede områder på hedesletten, hvor specielt Karup Hedeslette skiller sig ud. De fire zoneringskriterier fordeler sig på følgende vis: særligt følsomme områder, 6.800 ha (0,4 %); potentielt følsomme områder, 24.900 ha (1 %); mindre følsomme områder, 65.000 ha (4 %) og ikke følsomme områder, 1.672.400 ha (95 %).

Resultaterne af markvariabilitetsstudierne viser, at der er en betydelig rumlig variation af humus og finkornsfraktionen indenfor de enkelte marker. Samtidig viser studiet, at alle prøver taget indenfor de tre marker, kan betragtes som værende følsomme, jf. KUPA-konceptet. Da de tre marker er repræsentative for hedesletten betyder dette, at den rumlige variation af sprøjtemiddelfølsomheden på markniveau kan håndteres af KUPA-konceptet, bl.a. fordi den konceptbetingede overprædiktation af jordens finkornsfraktion resulterer i en underprædiktation af arealet af sprøjtemiddelfølsomme områder. På denne måde er konceptet konservativt, og sandsynligheden for at marker fejlagtigt udpeges, minimeres.

De detaljerede studier af markvariabiliteten vha. jordsensorer viser, at vis-NIR spektroskopi udført på jordbundsprøver i laboratoriet er en velegnet metode til at skaffe information om jordens indhold af kulstof, ler og silt på en hurtig og økonomisk måde. Metoden vil i løbet af kort tid være et omkostningseffektivt alternativ til traditionelle analysemetoder.

De spektrale vis-NIR målinger med anvendelsen af en mobil sensorplatform i felten viste, at der er et stort potentiale for denne metode. Indtil videre er teknologien dog umoden og kræver yderligere udvikling, førend den vil kunne anvendes til en kortlægning af markvariabiliteten. Anvendelsen af DUALEM-21S-sensoren og det anvendte inversionssoftware giver mulighed for at se dybdespecifikke variationer i jordens ledningsevne, som er en god tilnærmelse af jordens indhold af ler og organisk materiale, og vil derfor ligeledes kunne anvendes til studier af markvariabiliteten.

## 6. Konklusion

Formålet med nærværende projekt har været at udarbejde et landsdækkende kort over følsomheden af sandjorder overfor udvaskning af sprøjtemidler. Til grunde for kortet ligger et nyt jordbundskort i en højere rumlig opløsning (opløsning på 30 m) end det hidtidige (opløsning 250 m), der er testet og kvalitetssikret op imod uafhængige markdata. Det nye jordbundskort muliggør en afgrænsning af landskabstyper og lavbundsområder i en detaljeringsgrad, der hidtil ikke har været opnåelig.

Samtidig er der undersøgt, om zoneringskonceptets udpegningsgrundlag er følsomt overfor variabilitet på markskalaniveau. Markvariabilitetsstudiet viser, at variationen på markskalaniveau ikke kompromiterer KUPA-konceptet, idet de undersøgte marker er repræsentative for hedesletteområdet og findes sprøjtemiddelfølsomme i ft. KUPA-konceptet. Konceptet er derfor robust overfor lokal jordbundsvariation.

Ud fra nærværende studie konkluderes det, at der med det nuværende datagrundlag kan udpeges sprøjtemiddelfølsomme områder med tilstrækkelig faglig sikkerhed. Det bagvedliggende datagrundlag overestimerer finfaktionsindholdet, hvilket fører til at sprøjtemiddelfølsomheden underestimeres. Dermed bliver det areal, der udpeges som værende sprøjtemiddelfølsomt, marginalt mindre end det rent faktisk er. Denne konceptbetingede differens i udpegningsarealets størrelse mindsker dog sandsynligheden for at marker fejlagtigt udpeges.

# 7. Referencer

Adhikari, Kabindra, Bou Kheir, Rania; Greve, Mette Balslev; Bøcher, Peder Klith; Malone, Brendan P.; Minasny, Budiman; McBratney, Alex B.; Greve, Mogens Humlekrog. High-Resolution 3-D Mapping of Soil Texture in Denmark. Soil Science Society of America. Journal, Vol. 77, Nr. 3, 2013, s. 860-876.

Brüsch, W., A.E. Rosenbom, R.K. Juhler, L. Gudmundsson, C.B. Nielsen, F. Plauborg and P. Olsen 2013. The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme - Monitoring results 1999–June 2012. Geological Survey of Denmark and Greenland, Danish Ministry of Climate, Energy and Building. Department of Agroecology, Aarhus University. Department of Bioscience, Aarhus University. 146 pp. ISBN 978-87-7871-363-6.

Duch, P.M., Skriver, M., Creutzfeldt, M.I., Wahl, N.A., Munk, L.M., Pedersen, P.G. og Marcher, S. 2015. Indsatsområder inden for sprøjtemiddelfølsomme indvindingsområder. Miljøministeriet, Naturstyrelsen. 16 p. ISBN 978-87-92256-36-2.

Greve M. H., M. B. Greve, P. K. Bøcher, T. Balstrom, H. B. Madsen, and L. Krogh. 2007. Generating a Danish raster-based topsoil property map combining choropleth maps and point information. Danish J. Geogr. 107:1–12.

Iversen, B.V., Greve, M.H., Juhler, R.K. 2013. Validering af jordbundsdata. Pesticidfølsomme sandjorder – Værkstedsområde Grindsted. Naturstyrelsen. 30 pp. ISBN 978-87-7279-614-7.

Nygaard, E. (red.). 2004. Særligt pesticidfølsomme sandområder: Forudsætninger og metoder for zonerings. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Danmarks JordbrugsForskning, 93 pp. ISBN 87-7871-143-8.

Nygaard, E., M.H. Greve, M.B. Greve, B.V. Iversen, I. Møller, S. Torp 2006a. Afprøvning af KUPA zoneringskriterier for sandede jorde, Vester Haasingområdet, Nordjyllands Amt. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Danmarks JordbrugsForskning, 25 pp. ISBN 87-7871-174-6.

Nygaard, E., M.H. Greve, M.B. Greve, B.V. Iversen, I. Møller, S. Torp 2006b. Afprøvning af KUPA zoneringskriterier for sandede jorde, Grindstedområdet, Ribe Amt. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Danmarks JordbrugsForskning, 24 pp. ISBN 87-7871-176-2.

Nygaard, E., M.H. Greve, M.B. Greve, F.v.P. Hallermund, B.V. Iversen, I. Møller, S. Torp 2006c. Afprøvning af KUPA zoneringskriterier for sandede jorde, Nordøstlige Djursland, Århus Amt. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Danmarks JordbrugsForskning, 25 pp. ISBN 87-7871-175-4.

Søltoft, T.H., Christiansen, A.V. & Pedersen, J., 2013. GCM undersøgelser ved Rabæk, Kongens Hus & Løgumkloster. GCM udstyr og data – SFO. Hydrogeophysics Group, Aarhus University.



# Bilag 1. Jordbundsprofiler

Tabel 7. Jordfysiske data for de seks gravede profiler ifm. markvariabilitetsundersøgelsen.

| Lokalitet  | Profil nr. | Horisont | Fra. cm | Til. cm | Pro. ve. fra | Pro. ve. til | Bulk density | Organisk C (TOC) | Ler (<0.002 mm) | Silt (0.002-0.02 mm) | Kornstørrelse (0.02-0.06 mm) | Kornstørrelse (0.06-0.2 mm) | Grovsand (0.2 - 2.0 mm) |
|------------|------------|----------|---------|---------|--------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Kongenshus | 13         | Ap       | 0       | 27      | 10           | 15           | 1.56         |                  |                 |                      |                              |                             |                         |
|            |            |          |         |         |              |              |              | 1.41             | 2.1             | 0.81                 | 1.6                          | 33.2                        | 61                      |
|            |            | Bs       | 27      | 60      | 35           | 45           | -            | 0.67             | 2.2             | 0.43                 | 3.3                          | 37.2                        | 56                      |
|            |            | C1       | 60      | 100     | 80           | 90           | -            | 0.38             | 2               | 0.96                 | 7.6                          | 30                          | 59                      |
|            |            | C2       | 100     | 200     | 180          | 190          | -            | 0.14             | 0.8             | <0.10                | 0.4                          | 7.7                         | 91                      |
|            |            | C3       | 200     | 260     | 250          | 260          | -            | <0.10            | 1.5             | 1                    | 0.3                          | 21.6                        | 76                      |
| Kongenshus | 23         | Ap       | 0       | 27      | 10           | 15           | 1.49         |                  |                 |                      |                              |                             |                         |
|            |            |          |         |         |              |              |              | 3.05             | <0.50           | <0.10                | 3.7                          | 32.0                        | 61                      |
|            |            | Bs       | 27      | 70      | 35           | 45           | -            | 0.48             | 2               | 0.84                 | 4.7                          | 29.5                        | 63                      |
|            |            | C        | 70      | 100     | 70           | 80           | -            | 0.15             | <0.50           | 0.16                 | 0.6                          | 20.8                        | 78                      |
|            |            | C2       | 100     | 200     | 150          | 160          | -            | <0.10            | 2.9             | <0.10                | 0.5                          | 12.9                        | 84                      |
|            |            | C3       | 200     | 250     | 250          | 260          | -            | 0.38             | 1.3             | 0.16                 | 1.2                          | 17.6                        | 79                      |
| Rabæk      | 1          | Ap       | 0       | 32      | 10           | 20           | 1.60         | 1.22             | 1.7             | 0.65                 | 0.8                          | 18.2                        | 77                      |
|            |            | Bhs      | 32      | 74      | 50           | 50           | 1.53         | 0.34             | <0.50           | 0.37                 | 1.3                          | 21.4                        | 76                      |
|            |            | C        | 74      | 120     | 90           | 100          | 1.65         | <0.10            | 1.9             | 0.18                 | 0.3                          | 25.0                        | 73                      |
|            |            |          |         |         |              |              |              |                  |                 |                      |                              |                             |                         |
| Rabæk      | 2          | Ap       | 0       | 33      | 10           | 25           | 1.43         | 2.29             | 1.4             | 0.65                 | 0.9                          | 15.0                        | 80                      |
|            |            | Bhs      | 33      | 71      | 40           | 50           | 1.49         | 0.51             | 1.6             | 1.4                  | 0.4                          | 8.4                         | 88                      |
|            |            | C        | 71      | 140     | 80           | 95           | 1.67         | 0.35             | 1.7             | 0.19                 | 0.3                          | 29.7                        | 68                      |
|            |            |          |         |         |              |              |              |                  |                 |                      |                              |                             |                         |
| Bedsted    | 1          | Ap1      | 0       | 31      | 10           | 20           | 1.51         | 2.05             | 6.6             | 3.0                  | 7.5                          | 31.6                        | 49                      |
|            |            | Ap2      | 31      | 62      | -            | -            | -            | -                | -               | -                    | -                            | -                           | -                       |
|            |            | Ap3      | 62      | 83      | -            | -            | -            | -                | -               | -                    | -                            | -                           | -                       |
|            |            | Bhs      | 83      | 97      | 85           | 95           | 1.27         | -                | -               | -                    | -                            | -                           | -                       |
|            |            | Bs       | 97      | 130     | -            | -            | 1.75         | 2.99             | 3.4             | 2.8                  | 9.4                          | 34.7                        | 47                      |
|            |            | C        | 130     | 160     | 130          | 140          | -            | 0.28             | 1.8             | <0.10                | 1.0                          | 30.2                        | 67                      |
|            |            |          |         |         |              |              |              |                  |                 |                      |                              |                             |                         |
| Bedsted    | 2          | Ap       | 0       | 34      | 10           | 20           | 1.49         | 1.57             | 4.2             | 3.7                  | 3.9                          | 12.7                        | 74                      |
|            |            | Bs       | 34      | 68      | 45           | 55           | 1.54         | 0.59             | 3.6             | 2.7                  | 6.7                          | 12.0                        | 74                      |
|            |            | C        | 68      | 115     | 115          | 125          | 1.60         | 0.20             | 1.1             | 0.18                 | 0.4                          | 10.7                        | 87                      |

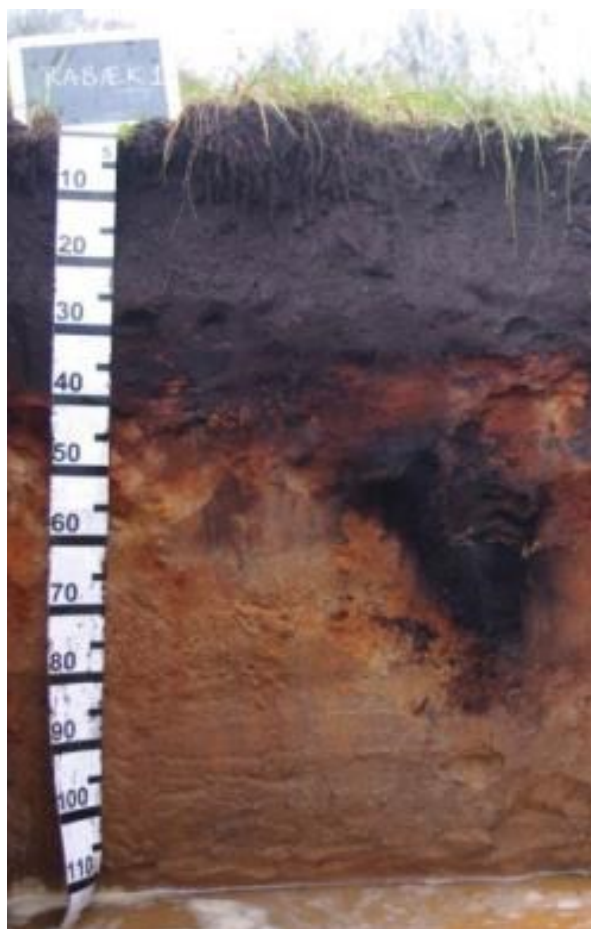
## Jordbundsprofiler



Figur 13. Kongens Hus – profil nr. 13



Figur 14 .Kongens Hus – profil 23



Figur 15. Rabæk - profil nr. 1.



Figur 16. Rabæk – profil nr. 2.



Figur 17. Bedsted - profil nr 1.



Figur 18. Bedsted - profil nr 2.

# Bilag 2. Geofysiske metoder

Kapitlet har til hensigt at give en kortfatet introduktion til de to geofysiske metoder (vis-NIR og DUALEM-21S), der er anvendt i nærværende projekt for at undersøge variationen af humus og finfraktionsindholdet på tre testmarker ifm. test af zoneringskonceptet. Der henvises i øvrigt til rapport om processering og inversion af GCM data (Søltoft et al., 2013).

## **Målinger med vis-NIR, mobilt og laboratorie baseret**

Den mobile VERIS-sensorplatform (MSP), (Veris Technologies, Kansas, USA), består af sensorudstyr, der er monteret på en platform, som bliver trukket af en traktor. Sensorplatformen indsamler kontinuerligt følgende data: synlig og nær-infrarøde (vis-NIR) spektre (350-2.200 nm), elektriske konduktivitetsmålinger samt jordtemperatur. NIR-spektre indeholder informationer om jordens organiske og uorganiske komponenter, partikelstørrelse, farve samt vandindhold. Oplysninger omkring jordegenskaberne bliver gemt inden for specifikke, spektrale regioner i forhold til deres absorberingsevner.

Udover disse spektre blev der indsamlet 15 repræsentative jordprøver fra hver mark, der blev brugt som referenceanalyser ved opbygning af modeller til bestemmelse af total organisk kulstof (TOC) og tekstur. For at kunne forudsige jordegenskaber blev der udviklet "partial least square (PLS)" regressionsmodeller til hver enkelt mark ved hjælp af kalibreringsprøverne. For at kunne redegøre for forskellige fysiske faktorer såsom jordstruktur, fugtighed, temperaturer og partikelstørrelser, som kan have en indflydelse på markspektret, blev der inkorporeret relativt billige, supplerende hjælpedata (elektrisk konduktivitet, EC, og temperaturer) som kovarianter i modeludviklingen. De endelige modeller blev brugt til at forudsige jordegenskaber fra de tilbageværende markspektre.

## **Målinger med DUALEM-21S**

DUALEM-21S er et GCM- instrument (Ground Conductivity Meter) som benytter elektromagnetisk induktion til at estimere den tilsyneladende konduktivitet (og tykkelse af lagene) i jorden. Ved elektromagnetisk induktion udsendes der en vekselstrøm igennem senderspolen hvilket danner et primært elektromagnetisk felt der diffunderer ned i jorden. Dette inducerer et elektrisk felt i jorden som danner et sekundært elektromagnetisk felt, der måles af de forskellige modtagerspoler simultant.



Instrumentet består af en horisontal senderspøle, som er fastsat i den ene ende af et 2 m langt rør. I midten af røret sidder der to modtagerspøler. Den ene er horisontal (HCP), den anden er vertikal (PRP). De er henholdsvis 1 og 1,1 m fra senderspølen. I den anden ende af røret sidder der igen en horisontal og en vertikal modtagerspøle, henholdsvis 2 og 2,1 m fra senderspølen (figur 19).



Figur 19. Skitse af sender (TX) og modtagerspøler (RX) i et DUALEM-21S system.  
For HCP er spolen i samme horisontale plan som senderspølen. For PRP er spolen vinkelret og centreret omkring senderspølen's horisontale plan.

DUALEM-21S er et frekvens-domæne system der kontinuert sender et primært felt ud med en frekvens på 9 kHz. Modtagerspølerne måler det sekundære felts amplitude og fase. Amplituden og faseren er målt i forhold til det primære felt.

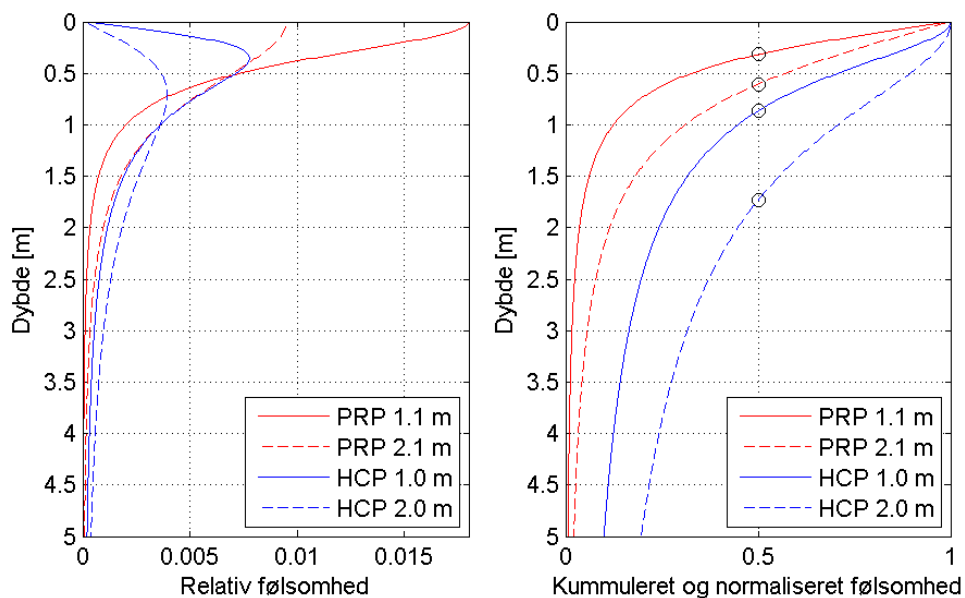
Følsomheden til jordlagene i forskellige dybder afhænger af resistiviteten i jordlagene (geologien), den valgte frekvens, afstanden mellem sender- og modtagerspølerne samt orienteringen af spolerne i forhold til hinanden. For DUALEM-21S-systemet er frekvensen samt den indbyrdes geometri af spolerne faste, men da der er to geometrisk forskellige modtagerspøler, som hver sidder i to forskellige afstande fra senderspølen, opnås totalt 4 konfigurationer. For hver af disse 4 konfigurationer måles der både en amplitude og en fase, men traditionelt er faseren svær at kalibrere på disse instrumenter, derfor blev sidstnævnte ikke inddraget i tolkningen. Der opnås derfor 4 datapunkter pr. måling. De 4 datapunkter indeholder information om forskellige dybder da de har forskellige følsomheder. VCP-konfigurationen trænger dybere ned end PRP og konfigurationer med længere spoleafstand trænger ligeledes længere ned end konfigurationer med kortere spoleafstand. GCM-systemet monteres på en slæde der trækkes efter en ATV, hvorved man opnår et hurtigt og naviger-bart system der kan kortlægge mange kilometer per dag.

For begge ligninger er  $z$  en normaliseret dybde:  $z = d/r$ , hvor  $d$  er dybden og  $r$  er afstanden mellem sender- og modtagerspøle. Følsomhedsfunktionerne for de 4 konfigurationer er vist grafisk i figur 11, hvor plottet til venstre viser ovenstående ligninger (normaliseret med den totale følsomhed) og plottet til højre viser de kumulerede følsomheder.

Ud fra følsomhedsfunktionerne kan det ses at PRP-opsætningerne har mest information helt i overfladen hvorimod HCP-konfigurationerne har lille følsomhed helt i toppen med et distinkt maksimum et stykke under overfladen. For HCP-konfigurationen med 1 m spoleafstand er den maksimale følsomhed i en dybde på ca. 0,35 m, og tilsvarende for 2 m spoleafstand i 0,70 m. PRP konfigurationerne har betydelig større følsomhed end HCP konfigurationerne ned til ca. 0,5 m dybde.

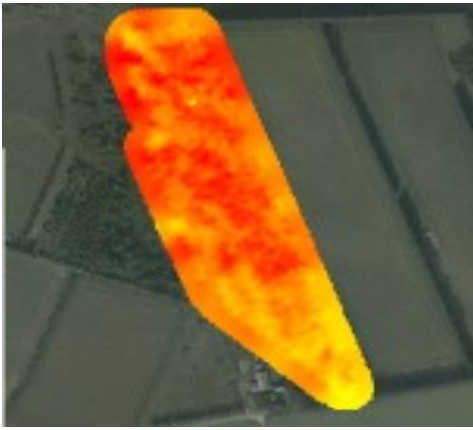
Ud fra den summerede følsomhedsfunktion i figur 20 kan man aflæse et mål for fokusdybden, som typisk angives i den dybde hvor 50% af følsomheden ligger over, henholdsvis under. For HCP-

konfigurationen på 1 m er fokusdybden ca 0,87 m (1,73 m for 2 m spoleafstand) og for PRP-konfigurationen på 1,1 m er det ved en dybde på ca 0,32 m (ca 0,61 m ved 2,1 m spoleafstand). Disse angivne maksimale følsomheder og fokusdybder er ud fra antagelsen at udstyret måler fra jordoverfladen. Da dette GCM udstyr måler 27 cm over jordfladen vil værdierne være en smule mindre da noget af følsomheden går tabt i luften.

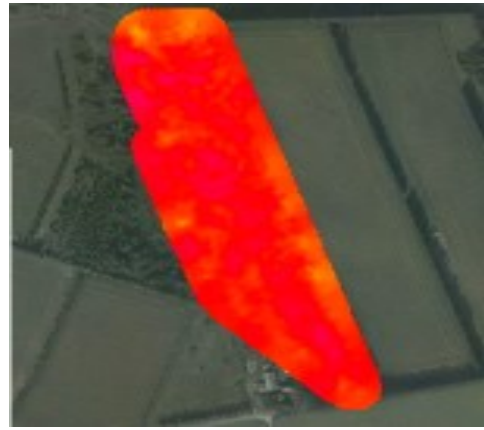


Figur 20. Venstre figur: Følsomhedsfunktion for HCP (blå kurver), og PRP (rød kurver).  
Højre figur: Den integrerede følsomhedsfunktion for HCP (blå kurver), og PRP (rød kurver).

Figur 21-23 viser fordelingen af modstandsforholdende på de tre nye undersøgelses marker gennem jorden fra 0 til 3 m dybde i 0,5 m intervaller. Modstandende måles i Ohmm. Modstanden stiger fra venstre (blå) mod højre (lila) og ligesåledes jordens andel af sand dvs. blå farve repræsenterer ler mens lila repræsenterer grusede aflejringer.



Middelmodstandskort 0-0,5 m



Middelmodstandskort 0,5-1 m



Middelmodstandskort 1-1,5 m



Middelmodstandskort 1,5-2 m



Middelmodstandskort 2-2,5 m

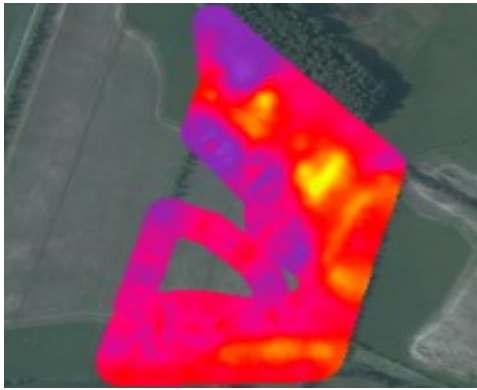


Middelmodstandskort 2,5-3 m

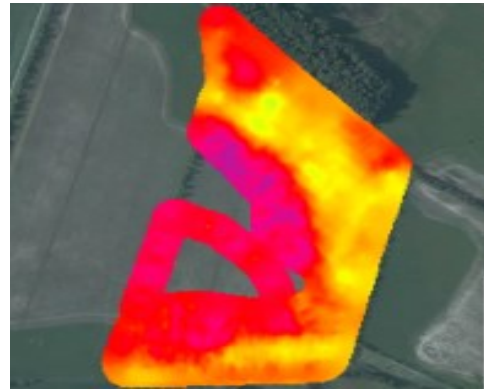
Figur 21. Middelmodstandskort for Kongens Hus marken.

Som det ses af figur 21, er Kongens Hus marken kendetegnet ved en meget lille variabilitet hvilket taler for geologisk ensformigt materiale og ensartede aflejringsforhold, i modsætning til Rabæk og Bedsted markerne, jf. fig. 22 og 23.

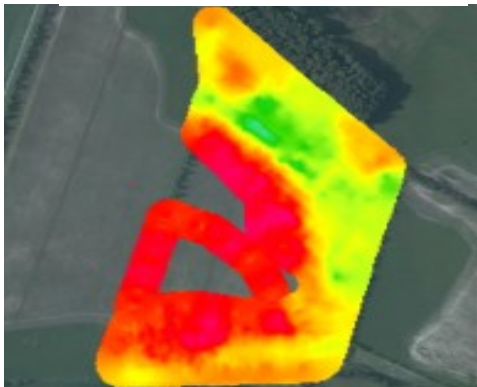




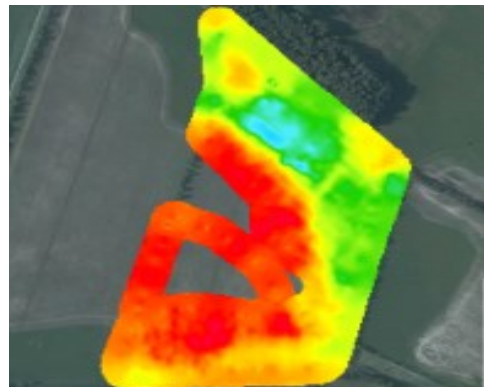
Middelmodstandskort 0-0,5 m



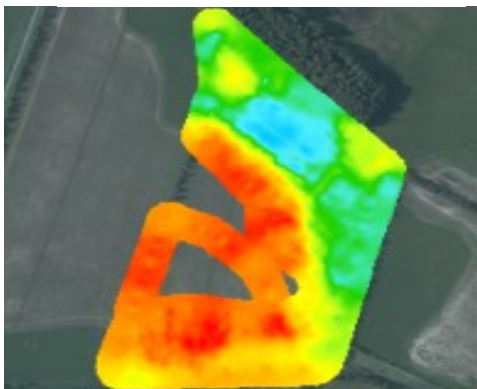
Middelmodstandskort 0,5-1 m



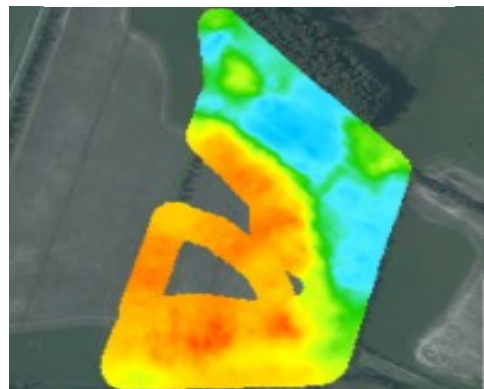
Middelmodstandskort 1-1,5 m



Middelmodstandskort 1,5-2 m



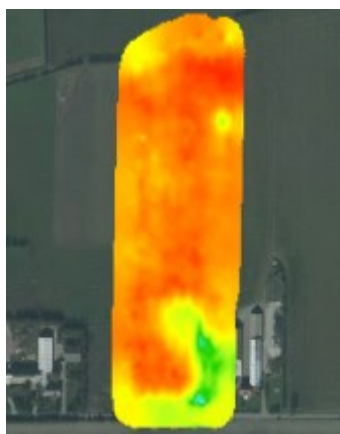
Middelmodstandskort 2-2,5 m



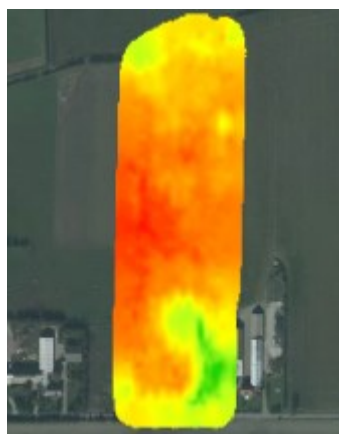
Middelmodstandskort 2,5-3 m

Figur 22. Middelmodstand på Rabæk marken.

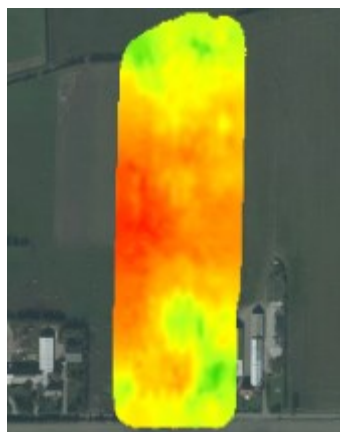
Modstandsforholdene på Rabæk marken (fig. 22) er meget uensformige, hvilket betyder at materialerne er meget forskellige mht. kornstørrelsesforhold. Marken viser en tvedeling i ft. kornstørrelser med en tydelig nø-sv opsplitning. Den nordøstlige del af marken viser meget finkornet materiale med tiltagende dybde, mens den sydvestlige del bærer et meget sandet/grovkornet præg.



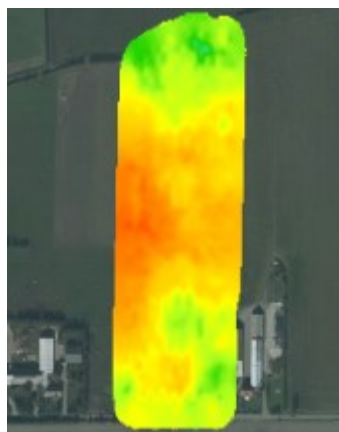
Middelmodstandskort 0-0,5 m



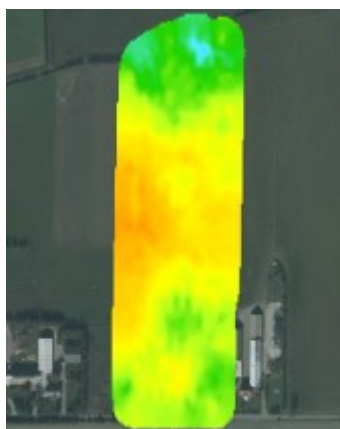
Middelmodstandskort 0,5-1 m



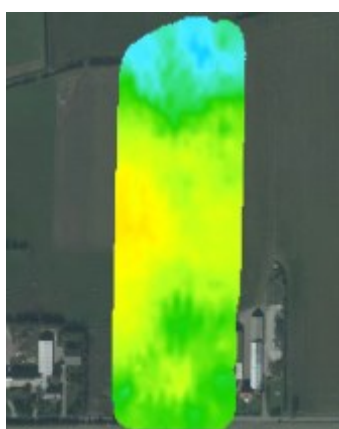
Middelmodstandskort 1-1,5 m



Middelmodstandskort 1,5-2 m



Middelmodstandskort 2-2,5 m



Middelmodstandskort 2,5-3 m

Figur 23. Middelmodstand på Bedsted marken.

Bedsted marken (fig. 23) viser til en dybde på ca. 1 m sandet-grusede aflejringer. Under denne dybde dukker i den nordlige og sydlige del af marken lerede aflejringer op, der bærer præg af et sandet indslag i den sydlige del. Samlet set er både Bedsted og Rabæk marken en del mere inhomogene i ft. aflejringsforhold og kornstørrelsesfordeling end Kongens Hus marken.





Miljøministeriet

Naturstyrelsen

Haraldsgade 53

DK - 2100 København Ø

Tlf.: (+45) 72 54 40 00

**[www.nst.dk](http://www.nst.dk)**