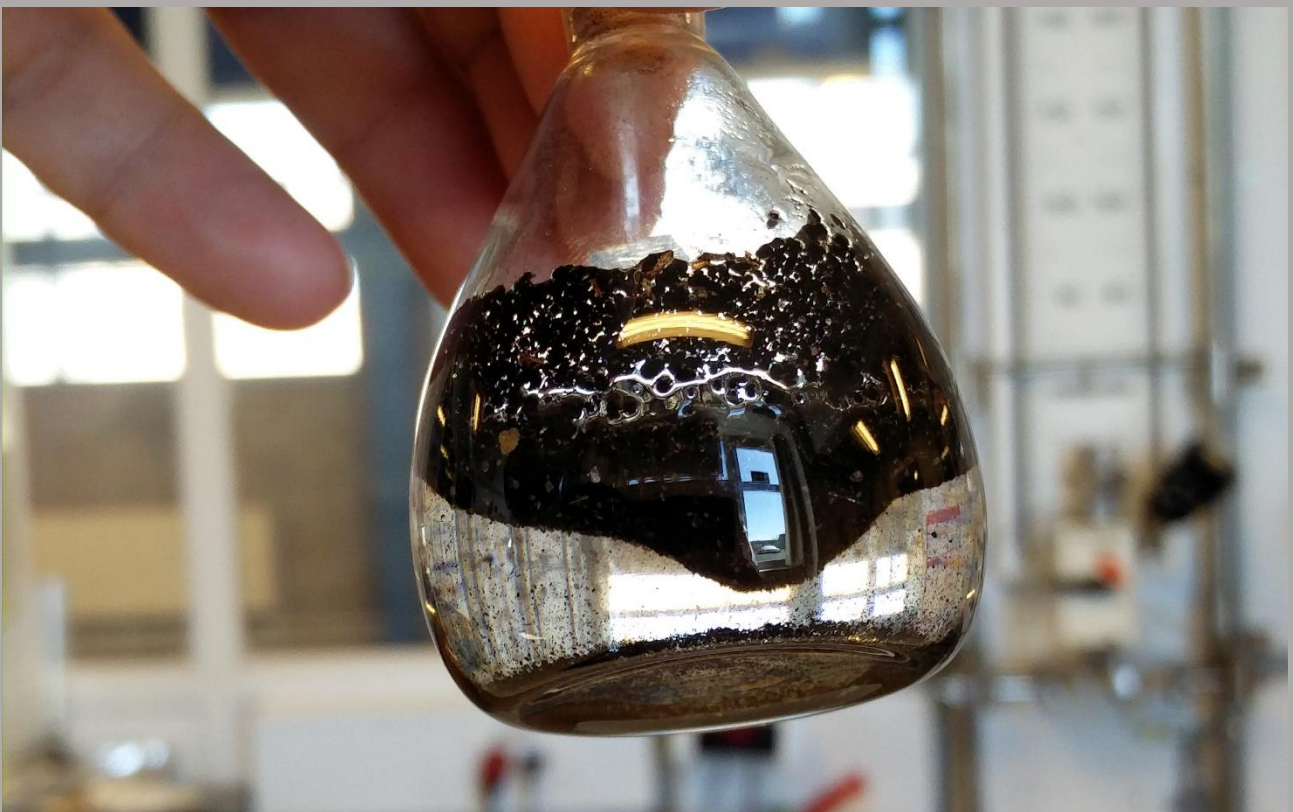


Nye og let målbare jordfysiske parametre til vurdering af jordbundskvalitet inden for miljø, klima og afgrødeproduktion



Rune Kjær Jensen

Speciale i Naturgeografi

Institut for Planlægning

Aalborg Universitet

2016

DATABLAD

Titel	Nye og let målbare jordfysiske parametre til vurdering af jordbundskvalitet inden for miljø, klima og afgrødeproduktion
Forfatter	Rune Kjær Jensen
Institution	Naturgeografi, Institut for Planlægning, Aalborg Universitet
Udgivelsesår	2016
Hovedvejleder	Professor Per Møldrup (Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet)
Medvejledere	Professor MSO Lis Wollesen de Jonge (Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet) og Ph.d. studerende Cecilie Hermansen (Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet)
Bedes citeret	Jensen, Rune (2016): Nye og let målbare jordfysiske parametre til vurdering af jordbundskvalitet inden for miljø, klima og afgrødeproduktion. Speciale i Naturgeografi, Institut for Planlægning, Aalborg Universitet
Emneord	Jordbundskvalitet, evalueringssystem, vandindhold ved lufttør, NIR, spektroskopi, VIS-NIRS, landbrug, miljø, klima, gasdiffusionskoefficient, plantetilgængeligt vand, vandretentionskurve, prædiktion

Gengivelse og brug af data er tilladt med tydelig kildeangivelse

FORORD

Dette speciale er udarbejdet i perioden 1. februar – 25 maj 2016 og udgør 30 ECTS. Specialet er afslutningen på kandidatuddannelsen i Geografi med specialisering i Naturgeografi på Aalborg Universitet. Specialet er inspireret af afslutningen på bogen "*Essential Soil Science – A clear and concise introduction to soil science*" af M.R. Ashman og G. Puri der reflekterer over emnet jordkvalitet. Herudover er specialet inspireret af en samtale omhandlende lignende overvejelser med Professor Per Møldrup, Aalborg Universitet.

Harvard standard er brugt som referencemetode.

I forbindelse med udarbejdelsen af specialet er der en række af samarbejdspartnere, som jeg gerne vil takke:

- Først og fremmest min specialevejleder Professor Per Møldrup (AAU) for konstruktiv vejledning og hjælp til kontakt med Institut for Agroøkologi (AU), samt organisering af forsøgsbestemmelse af partikeldensitet og vandindhold ved lufttør.
- Professor MSO Lis Wollesen de Jonge for konstruktiv vejledning både for specialets indhold, samt vejledning og udleveringstilladelse for jordprøverne for Estrup Mark og Ø Bakker Mark.
- Ph.d. studerende Cecilie Hermansen for hjælp til at pakke og hente de udleverede jordprøver, samt for hjælp til databehandling af NIR resultater i programmet Unscrambler X 10.3.

En stor tak til bygningskonstruktør Anette Næslund Pedersen (AAU) for hjælp til forsøgsbestemmelse af partikeldensitet og andre småting, samt hendes altid gode humør.

Slutteligt skal Signe have tak for at have overtaget en stor del af det praktiske omkring flytning af bopæl op til aflevering af dette speciale og mine studiekammerater Rasmus, Jan, Magnus og Martin have tak for den daglige motivation og hygge igennem alle årene på uddannelsen i Naturgeografi.

ABSTRACT

New and easily measurable soil-physical parameters for assessment of soil quality within an environment, climate and agricultural perspective

by Rune Kjær Jensen

Master Thesis in Physical Geography, Department of Development and Planning

Aalborg University, 2016

Assessment of soil quality has historically had a tendency to revolve around agricultural production. One example of that is *The US land Capability Classification system*, as a system to rank soils according to their agricultural quality. Nevertheless, soil quality is more than just agricultural quality and is a subject of subjectivity, dependent on the current land use.

This thesis sets out to build a method for evaluation for soil quality in three perspectives, being (water)environment, climate and agriculture. The method for evaluation is to be based upon an easy data collection, cost effective in relation to economy and time as well as low uncertainty. For each perspective, soil-physical quality parameters are defined. Quality parameters for agriculture are chosen to be Plant-Available-Water (PAW) and the relative gas diffusion coefficient ($\frac{D_p}{D_0}$), for environment it is chosen to be saturated hydraulic conductivity (K_s) and $\frac{D_p}{D_0}$, and for climate it is chosen to be $\frac{D_p}{D_0}$ alone. Specific boundaries are set for the quality parameters, dividing them in an ideal scenario (Green zone), bad scenario (Red zone) and a scenario in between (Yellow zone). The boundaries are in the table below.

Zones/Quality parameters	Green	Yellow	Red
$K_s [cm/s \cdot 10^{-4}]$	< 10	10 – 50	> 50
PAW $\left[\frac{cm^3 H_2O}{cm^3 soil} \right]$	> 0.15	0.10 – 0.15	< 0.10
$D_p/D_0 \left[\frac{cm air}{cm soil} \right]$	> 0.02	0.005 – 0.02	< 0.005

The method for evaluation revolves around predicting these three quality parameters in a way that fits the overall objectives, just presented as easy data collection, cost effectiveness and low uncertainty. Generally, two measurement strategies are chosen to fit the overall objectives and are expected to be possible to eventually predict the quality parameters. These strategies are air-dry water content at relative humidity of 31.8 % (θ_r) and Visible-Near Infrared Spectroscopy (NIR). θ_r and NIR cannot directly predict the quality parameters but typically only static parameters as clay, organic matter and particle density. From here on the real goal is to find relationships as well as use existing relationships, between a range of soil-physical parameters to eventually get a prediction of the quality parameters.

Three datasets are used for modelling. Two of these handed over from Department of agroecology, Aarhus University, being 45 topsoil samples that represents a gradient in clay (Estrup Field – 55°29'09.96''N, 9°04'09.37''E) and 20 topsoil samples that represents a gradient in organic matter (Ø Bakker Field – 9°37'53.278"N, 56°27'31.46"E). Last dataset in use is the Danish soil database of Hansen (1976).

Generally seen, most of the prediction models for the static parameters are considered as being applicable with various advantages and disadvantages for the inclusion of the whole or a subpart of the dataset and also for measurement strategy.

A computation example of a method of evaluation of soil quality for the Estrup Field dataset, showed that most of the samples had a K_s in the yellow zone, where the remaining samples were defined as being in the green zone. For $\frac{D_p}{D_0}$, all of the samples were defined as being in the yellow zone and for PAW almost all of the samples were defined as being green, with a single sample being defined as yellow. Because of $\frac{D_p}{D_0}$ being defined as a quality parameter for all three perspectives used in this thesis, the soil quality evaluation criteria in all three perspectives are viewed as being partly fulfilled (yellow). This applies because, as in order for a specific soil sample to be defined as green, all soil quality parameters must also be green.

The computation example should though be viewed with cation, as a sensitivity analysis based upon only a subset of the prediction models, showed an uncertainty of the predictions, that exceeds the chosen boundaries for the quality parameters. Hence, more studies are needed to lower the uncertainty of evaluation methods for soil quality, based upon θ_r and NIR spectroscopy alone.

LISTE AF OFTE BRUGTE SYMBOLER OG FORKORTELSER

Symbol/forkort.	Enhed	Forklaring
D_p	$\frac{cm^3 \text{ luft}}{cm \text{ jord/s}}$	Gasdiffusionskoefficient i jord
D_0	$\frac{cm^2 \text{ luft}}{s}$	Gasdiffusionskoefficient i fri luft
$\frac{D_p}{D_0}$	$\frac{cm \text{ luft}}{cm \text{ jord}}$	Relativ gasdiffusionskoefficient
K_s	$\frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}$	Mættet hydraulisk ledningsevne
PAW	$\frac{cm^3 H_2O}{cm^3 \text{ jord}}$	Plantetilgængeligt vand
ψ	$-cm H_2O$	Trykpotentiale
pF	$\log(-(-cm H_2O))$	Trykpotentiale
ψ_e	$-cm H_2O \vee pF$	Trykpotentiale
θ	$\frac{cm^3 H_2O}{cm^3 \text{ jord}}$	Vandindhold
θ_s	$\frac{cm^3 H_2O}{cm^3 \text{ jord}}$	Mættet vandindhold
θ_{fc}	$\frac{cm^3 H_2O}{cm^3 \text{ jord}}$	Markkapacitet
θ_r	$\frac{cm^3 H_2O}{cm^3 \text{ jord}}$	Vandindhold ved lufttør, defineret i denne afhandling ved 31.8 % relativ luftfugtighed
θ_{wc}	$\frac{cm^3 H_2O}{cm^3 \text{ jord}}$	Visnegrænsen
ε_{100}	$\frac{cm^3 \text{ luft}}{cm^3 \text{ jord}}$	Luftindhold ved markkapacitet
ρ_b	$\frac{g \text{ tørstof}}{cm^3 \text{ jord}}$	Volumenvægt
ρ_s	$\frac{g \text{ tørstof}}{cm^3 \text{ tørstof}}$	Partikeldensitet

φ	$\frac{cm^3 \text{ porerum}}{cm^3 \text{ jord}}$	Porøsitet
CL	$\frac{g \text{ ler}}{g \text{ jord}} \vee \%$	Ler
OM	%	Organisk materiale
Campbell b	-	Empirisk parameter for den våde del af vandretentionskurven
NIR	-	Defineret i denne afhandling som synlig nær infrarød spektroskopi i det visuelle område (400 – 2500 nm)
RMSE	-	Den gennemsnitlige fejlmargen/usikkerhed (Root Mean Square Error)
$r^2 \vee R^2$	-	Regressionskoefficient
FINE v Fines	%	Andelen af fine partikler, defineret i denne afhandling som $CL + 2 \cdot OM$
1:1 linje	-	Linje i et prædikteret – reference plot, hvor $x=y$
Måletid	Decimal min	Måletid for Mettler Toledo jordfugtighedsmåler
DDO®	-	Danmarks Digitale Ortofoto

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Indledning	4
1.1	Evaluering af jordkvalitet i en landbrug-, miljø- eller klimakontekst	4
1.2	Forslag til et hierarki for jordfysiske parametre	6
1.3	Nye og let målbare jordfysiske parametre til vurdering af jordkvalitet	6
2	Præsentation af foreslået parameterhierarki ud fra vandvandrethedskurven	8
2.1	De statiske parametre	9
2.2	Faseparametre	10
2.3	Transportparametre	11
3	Materialer og metoder	13
3.1	Eksisterende databaser	13
3.1.1	Estrup mark (ler-gradient)	13
3.1.2	Ø Bakker mark (organisk stof-gradient)	14
3.1.3	Det danske jordkartotek (Lorens Hansen)	15
3.2	Yderligere målinger	16
3.2.1	Synlig-Nær Infrarød Spektroskopi (NIR)	16
3.2.2	Vandindhold ved lufttørring til given luftfugtighed (θ_r)	18
3.2.3	Partikeldensitet	19
3.3	Opsamling	21
4	Prædiktion af organisk stof	23
4.1	Prædiktion ud fra NIR	23
4.1.1	Estrup – Ø Bakker	23
4.1.2	Det danske jordkartotek	24
4.1.3	Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek	24
4.2	Prædiktion ud fra vandindhold i lufttør jord	25
4.2.1	Estrup – Ø Bakker	25
4.3	Prædiktion ud fra måletid for Mettler-Toledo jordfugtighedsmåler	27
4.3.1	Estrup – Ø Bakker	27
4.4	Opsamling	29
5	Prædiktion af ler eller totale Fines (små partikler)	30
5.1	Prædiktion ud fra NIR	30
5.1.1	Estrup – Ø Bakker	30
5.1.2	Det danske jordkartotek	31
5.1.3	Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek	31
5.2	Prædiktion ud fra vandindhold i lufttør jord	32

5.2.1	Estrup – Ø Bakker.....	32
5.3	Opsamling	34
6	Prædiktion af partikeldensitet	35
6.1	Prædiktion ud fra NIR.....	35
6.1.1	Estrup – Ø Bakker.....	35
6.1.2	Det danske jordkartotek	36
6.1.3	Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek.....	36
6.2	Prædiktion ud fra vandindhold i lufttør jord.....	37
6.2.1	Estrup – Ø Bakker.....	37
6.3	Prædiktion ud fra organisk stof.....	38
6.4	Opsamling	39
7	Prædiktion af fase- og transportparametre.....	40
7.1	Prædiktion af volumenvægt	40
7.1.1	Prædiktion ud fra NIR.....	40
7.1.2	Prædiktion ud fra ler og organisk stof	41
7.2	Prædiktion af Campbell b.....	42
7.3	Prædiktion af vandindhold ved pF 2 (θ_{fc})	42
7.4	Prædiktion af vandindhold ved pF 4.2 (θ_{wc})	43
7.5	Prædiktion af luftindhold ved pF 2 (ϵ_{100}).....	44
7.6	Prædiktion af mættet hydraulisk ledningsevne (K_s)	45
7.6.1	Prædiktion ud fra luftindhold ved pF 2	45
7.6.2	Prædiktion ud fra FINE	46
7.7	Prædiktion af den relative gasdiffusionskoefficient $DpD0$	46
8	Anvendelsesmuligheder.....	47
8.1	Beregningseksempel for Estrup Mark.....	47
8.1.1	Kortlægning af mættet hydraulisk ledningsevne K_s	49
8.1.2	Kortlægning af den relative gasdiffusionskoefficient $DpD0$	50
8.1.3	Kortlægning af plantetilgængelig vand (PAW).....	51
8.1.4	Kortlægning af Landbrug – Miljø – Klima.....	52
8.2	Følsomhedsanalyse	53
9	Konklusion.....	55
9.1	Prædiktion af statiske parametre	55
9.2	Prædiktion af fase- og transportparametre.....	56
9.3	Anvendelsesmuligheder.....	56
10	Perspektivering	58
11	Referencer.....	59

1 INDLEDNING

Jordkvalitet som begreb er subjektiv. For en landmand vil en jord, der er i stand til at give et højt udbytte af afgrøder af høj kvalitet formentlig have en god kvalitet. En miljøorganisation vil formentlig vurdere jorden til at være kvalitativ, hvis den er særlig stærk til enten at forhindre eller sænke forurening af vandmiljø og eller leverer særlige biologiske habitater. Det må derfor være klart at evalueringen af begrebet jordkvalitet, er afhængigt af lokalitetens formål.

Evaluering af jordkvalitet har historisk set primært haft fødevareproduktion som omdrejningspunkt. Her kan nævnes *The US Land Capability Classification system*, som et system til at rangordne jordarealer i forhold til deres landbrugskvalitet (Soil Conservation Service, 1961) (Ashman & Puri, 2002). Hos FAO¹ findes der også metoder til evaluering af jordkvalitet, men stadig med et fokus på fødevareproduktion (FAO, u.d.).

Med en stigende erkendelse af miljø- og klimakonsekvenserne af bl.a. et omfattende landbrug bliver det netop relevant, at udvide jordkvalitetsbegrebet til andre formål end ren fødevareproduktion. Andre formål er i denne afhandling defineret som værende miljø og klima, således at begrebet jordkvalitet evalueres i tre kontekster; landbrug, miljø og klima.

1.1 EVALUERING AF JORDKVALITET I EN LANDBRUG-, MILJØ- ELLER KLIMAKONTEKST

For en enhver evaluering af jordkvalitet er det nødvendigt at tage udgangspunkt i succeskriteriet for de benævnte kontekster. Succeskriterierne er som udgangspunkt heterogene og er for dette speciale defineret i Tabel 1.

Tabel 1 - Definerede succeskriterier i en landbrug-, miljø- og klimakontekst der relaterer sig til jorden

Succeskriterier		
Landbrug	Miljø	Klima
Størst muligt udbytte og kvalitet af afgrøder	Undgåelse eller sænkning af næringssalte- og pesticidforurening af vandmiljø (grundvand, overfladevand)	Fjernelse af tunge drivhusgasser fra atmosfæren ved oxidering

Det anerkendes at der, især for jorder i en miljø- og klimakontekst, kan findes adskillige andre succeskriterier, eksempelvis beskyttelse af bestemte af plantearter eller habitater. Succeskriterierne i Tabel 1 repræsenterer dog de kriterier, denne afhandling vil arbejde ud fra.

I landbruget er succeskriteriet økonomisk udbytte, hvor det største udbytte opnås ved højt afgrødeudbytte med en høj afgrødekvalitet. En sådan situation vil bl.a. kun kunne lade sig gøre, hvis afgrøderne har tilpas adgang til næringsstoffer, vand og ilt. En evaluering af jordkvalitet for landbrugsudnyttelse vil derfor basere sig på andelen af plantetilgængeligt vand (PAW) og diffusionskoefficienten for gasdiffusion i jord over gasdiffusion for frit luft ($\frac{D_p}{D_0}$), der har påvirkning for andelen af luftfyldte porer ved markkapacitet² (ϵ_{100}). Ifølge Lorens Hansen (1976) skal PAW udgøre

¹ Food and Agriculture Organization of the United Nations

² Markkapacitet er i langt de fleste tilfælde defineret ved et trykpotentiale på pF 2, som svarer til -100 cm vandsøjle. (Loll & Moldrup, 2000)

$0.15 - 0.2 \frac{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$ for at afgrøderne har tilpas adgang til vand. Stepniewski (1980) (1981) estimerede at $\frac{D_p}{D_0}$ skulle mindst udgøre 0.02 for at jorden er godt iltet og på den baggrund har afgrøderne har tilpas adgang til ilt. Ifølge en simpel model³ for $\frac{D_p}{D_0}$ vil det sige at ε_{100} mindst skal udgøre $0.15 \frac{\text{cm}^3 \text{luft}}{\text{cm}^3 \text{jord}}$.

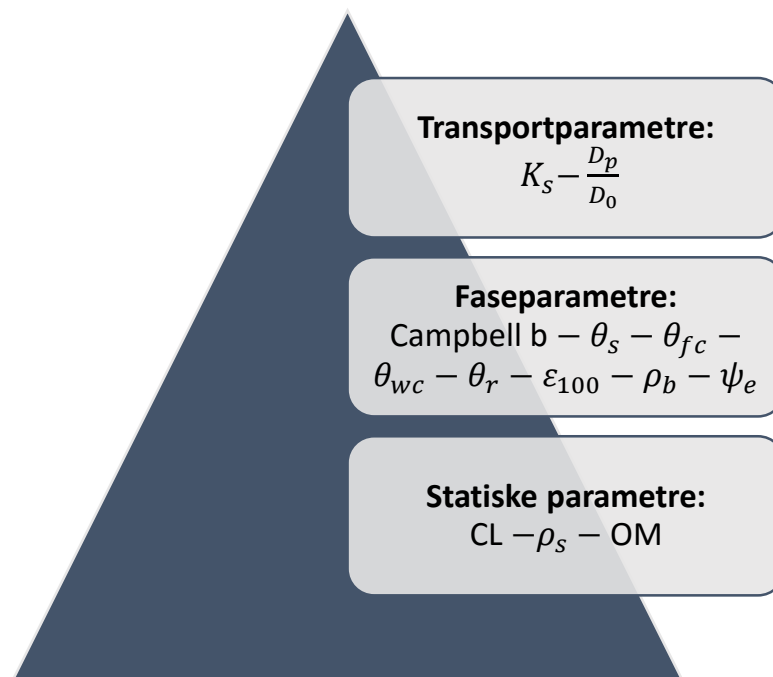
I en klimakontekst er succeskriteriet at få jorden til at opføre sig som et afløb for tunge klimagasser eks. CH₄ og N₂O. Således, at skabe de ideelle forhold for de bakterier der er i stand til at fiksere CH₄ og N₂O og omdanne disse til mindre potente gasser. Studier af CH₄ og N₂O's oxidationspotentiale viser en sammenhæng med den relative gasdiffusionskoefficient $\frac{D_p}{D_0}$, hvor det påvises en ligefrem proportionalitet imellem $\frac{D_p}{D_0}$ og oxidation af CH₄ og N₂O (Balaine & Clough, 2016) (Ball, et al., 1997). Den føromtalte grænse på 0.02 for $\frac{D_p}{D_0}$, kan derfor bruges som en passende sundhedsparameter i en klimakontekst. Stepniewski (1980) (1981) påpeger dog at indenfor intervallet 0.005 – 0.02 vil der være noget luft der tillades adgang til jordsystemet og i tilfælde af at $\frac{D_p}{D_0} < 0.005$ vil der være iltfrit.

I en miljøkontekst er succeskriteriet, at der ikke udvaskes for store mængder af næringsstoffer og pesticider til vandmiljø. Opgaven er derved, at sørge for at jorden ikke skaber for mange makroporer, der vil vanskeliggøre jordens evne til at tilbageholde næringsstoffer og pesticider. I denne afhandling defineres grænsen for hvornår jorden er i stand til, at tilbageholde næringsstoffer og pesticider tilfredsstillende, ved den mættede hydrauliske ledningsevne for finsand, som sættes til $K_s < 10 \text{ cm/s} \cdot 10^{-4}$. $\frac{D_p}{D_0}$ er også relevant i en miljøsammenhæng, da visse pesticider også findes i gasform, som kommer an på deres flygtighed (Miljøstyrelsen, 2001). De føromtalte grænser for $\frac{D_p}{D_0}$ er hermed også relevant i en miljøkontekst.

³ $\frac{D_p}{D_0} = \varepsilon_{100}^2$ (Buckingham, 1904)

1.2 FORSLAG TIL ET HIERARKI FOR JORDFYSISKE PARAMETRE

Forrige afsnit fastlagde kvalitetsparametre for landbrug, miljø og klima. Kvalitetsparametrene, specielt K_s og $\frac{D_p}{D_0}$ kan opfattes, som værende højest i et hierarki af jordparametre inddelt efter stabilitet. På Figur 1 er en præsentation af relevante jordfysiske parametre, hvor parametrene er inddelt hierarkisk i forhold til stabilitet.



Figur 1 - Relevante jordkarakteriserende parametre, inddelt hierarkisk. For en symbolforklaring, se **Liste af ofte brugte symboler og forkortelser**

Nederst i hierarkiet er de statiske parametre, som kun ændres over en stor tidsskala og som derfor kan opfattes som uafhængige af andre parametre. Faseparametrene påvirkes bl.a. af de statiske parametre og influerer transportparametrene i toppen af hierarkiet. Størstedelen af parametrene kan måles direkte, men også bestemmes indirekte ved sammenhænge imellem dem.

1.3 NYE OG LET MÅLBARE JORDFYSISKE PARAMETRE TIL VURDERING AF JORDKVALITET

Med afsæt i disse erkendelser virker det oplagt at udvikle en evalueringsmetode for jordkvalitet i en landbrug-, miljø- og klimakontekst, hvortil de relevante kvalitetsparametre er defineret i afsnit 1.1.

Vigtige forhold for en evalueringsmetode for jordkvalitet er at metoden er baseret på:

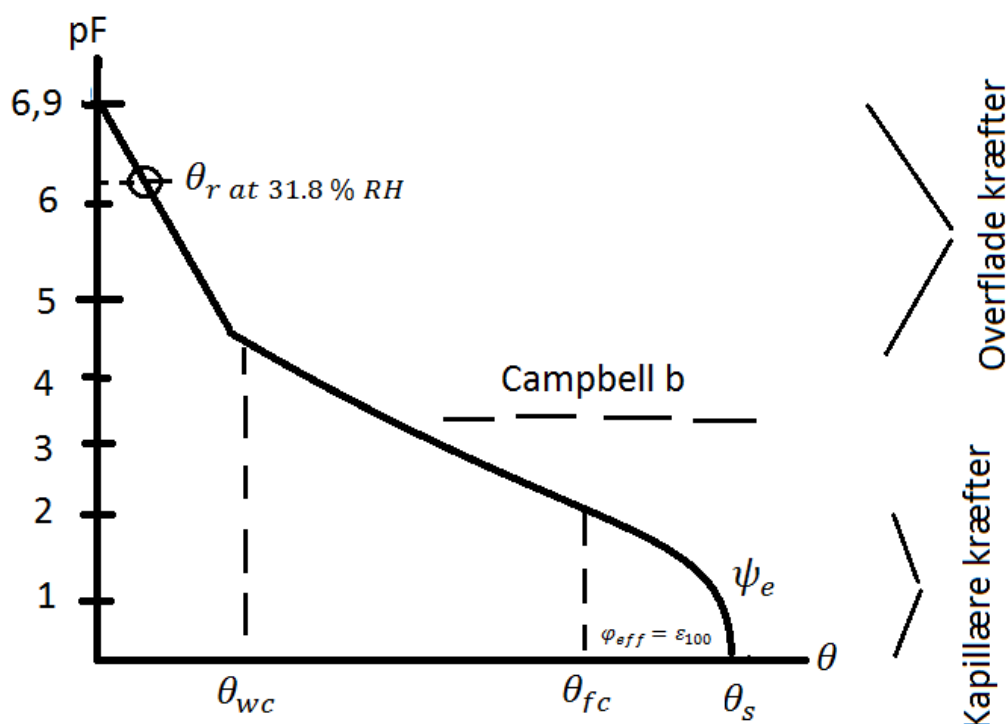
- En simpel prøvetagning, typisk udført af lægmænd.
- Lave økonomiske og tidsmæssige omkostninger.
- Lav usikkerhed.

Afhandlingen vil på denne baggrund derfor have en eksplorativ karakter i forhold til at teste mulige sammenhænge for prædiktering af især de statiske parametre, da de på baggrund af Figur 1 giver adgang til fase- og transportparametrene ved sammenhænge imellem dem. Ved prædiktering i

stedet for måling af K_s , $\frac{D_p}{D_0}$ og PAW spares der både økonomi og tid men tillader også en simpel prøvetagning, hvor prøven ikke nødvendigvis bør være intakt.

2 PRÆSENTATION AF FORESLÅET PARAMETERHIERARKI UD FRA VAND- VANDRETENTIONS-KURVEN

I dette kapitel relateres de jordkarakteriserende parametre præsenteret i Figur 1 til vandretentionskurven, værende sammenhængen imellem trykpotentiale og vandindhold, præsenteret på Figur 2. Med vandretentionskurven som referencepunkt præsenteres det i kapitlet sammenhænge imellem parametrene i Figur 1, som muliggør bestemmelsen af fase- og transportparametrene i hierarkiet i Figur 1. Kapitlet baserer sig på Loll & Moldrup (2000), med mindre andet er angivet.



Figur 2 - Principtegning af vandretentionskurve

Figur 2 er en principtegning af vandretentionskurven med trykpotentiale på y-aksen og vandindhold på x-aksen. Trykpotentiale er her angivet i pF, som er en logskala baseret på $pF = \log_{10}(-\psi)$, hvor ψ angives i cm H_2O . Vandretentionskurven er gående fra fuldt vandmættet ($\theta_s, 0$) til ovntør ($0, \sim 6.9$). Gående fra pF 6.9 til pF 4.2 er vandretentionskurvens forløb lineær, som er den tørre del af vandretentionskurven. I denne del af vandretentionskurven er jordens evne til at holde på vand influeret af adsorberende kræfter også kaldet overfladekræfter.

Den resterende del af kurven er den våde del, hvor vandretentionen afhænger af kapillærkræfter. Kurven kan beskrives ved en sammenhæng, der gør brug af faseparameteren Campbell b. Campbell b bestemmes normalt empirisk igennem Campbells retentionsmodel, præsenteret i Ligning 1 og Ligning 2.

Ligning 1 - Campbells retentionsmodel som funktion af vandindhold

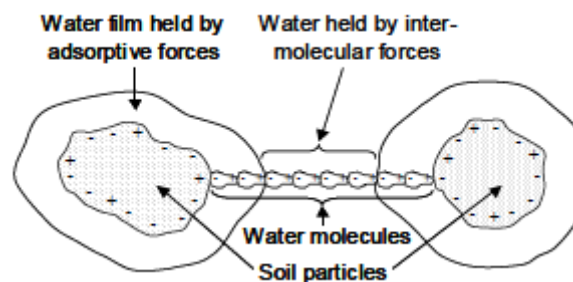
$$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b}$$

Ligning 2 - Campbells retentionsmodel som funktion af trykpotentiale

$$\theta = \theta_s \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^{1/b}$$

2.1 DE STATISKE PARAMETRE

På det lineære forløb af vandretentionskurven på Figur 2 findes punktet vandindhold ved lufttørret jord (θ_r). Som beskrevet er vandretentionen på denne del af kurven afhængig af jordens adsorberende kræfter og dermed er θ_r influeret af jordens adsorberende egenskaber. Egenskaberne er stærkt relateret til de statiske parametre ler og organisk stof (CL og OM), da det er disse parametre, der skaber de adsorberende kræfter. CL og OM skaber jordaggregater, der sammen med OM alene har en net negativ overflade, der typisk resulterer i polære bindinger imellem vand og overfladen (Hermansen, 2015). Figur 3 visualiserer to situationer hvor vand er holdt fast i jorden, adsorption og intermolekylære kræfter. Ved trykpotentiale ved θ_r er størstedelen af vandet holdt fast ved adsorption og de intermolekylære kræfter er ophørt.



Figur 3 - Illustration af vandretention imellem to partikler og direkte på partiklen (Loll & Moldrup, 2000)

Afhængig af porestørrelsesfordelingen og hvordan porerne er forbundne, kan der dog stadig sidde vand tilbage i de fineste porer ved intermolekylære kræfter (Wäldchen, et al., 2012). Wäldchen, et al. (2012) fandt en signifikant lineær sammenhæng i mellem CL og θ_r , især for jorder med en fin tekstur. På baggrund af Wäldchen, et al. (2012) og de overordnede idéer om CL og OM adsorptionsegenskaber giver det mening at gå videre med θ_r som prædiktionsparameter for de statiske parametre.

Det er dog vigtigt at være opmærksom på den relative luftfugtighed, da θ_r er direkte afhængig af dette. Dette er beskrevet igennem Kelvins ligning, der beskriver ændringen i gastryk og baserer sig på termodynamiske principper. Igennem Kelvins ligning kan trykpotentialet for θ_r ved en bestemt relativ luftfugtighed bestemmes. (Summer, 2000)

De statiske parametres evne til at danne jordaggregater har betydning for jordens strukturelle egenskaber og får derigennem betydning for forløbet af den våde del af kurven. De strukturelle egenskaber relaterer sig til fordelingen af porestørrelse, som inddeles i makroporer $> 30 \mu\text{m}$, mellemstørrelsesporer $30 - 0.2 \mu\text{m}$ og mikroporer $< 0.2 \mu\text{m}$. Når jorden drænes fra fuld vandmætning er det makroporerne der tømmes først og herefter tømmes gradvist mindre og mindre porer med

stigende trykpotentiale. Overordnet vil en jord der har et højere indhold af CL og eller OM resultere i flere mikroporer end en mere grovkornet sandet jord. For vandretentionskurven på Figur 2 vil det resultere i en mere eller mindre fladt forløb af den våde del af kurven for en sandet jord, da den sandede jords mange makro- og mellemstørrelsesporer relativt hurtig drænes. Omvendt vil en mere leret/organisk jord have et mere gradvis forløb ved stigende trykpotentiale, da der er flere mikroporer, som er sværere at dræne. Herigennem får de statiske parametre dermed betydning for placeringen af alle punkterne markeret på Figur 2.

2.2 FASEPARAMETRE

Hvor de statiske parametre kan bestemmes ved θ_r , som befinder sig på den tørre del af vandretentionskurven, er faseparametrene derimod primært bestemt ved sammenhænge på den våde del af kurven. Som beskrevet, er den våde del af kurven beskrevet igennem Campbells retentionsmodel i Ligning 1 og Ligning 2. Første opgave er hermed at finde den empiriske parameter Campbell b . Parameteren findes normalt igennem den bedste lineære sammenhæng af et plot af pF mod $\log(\theta)$.

I denne afhandling forsøges den i stedet bestemt ved de statiske parametre, eksempelvis sammenhængen i Ligning 3, som angiver en lineær sammenhæng imellem Campbell b og CL.

Ligning 3 - Sammenhæng imellem Campbell b og CL, hvor A og B angiver konstanter.

$$\text{Campbell } b = A \cdot CL + B$$

Da kurvens startpunkt er fuld vandmætning (θ_s), har denne faseparameter påvirkning på resten af fase- og transportparametrene. Et præcist estimat af θ_s er derfor essentiel. θ_s findes ved sammenhængen i Ligning 4, som gør brug af den statiske parameter partikeldensitet (ρ_s) og faseparameteren volumenvægt (ρ_b).

Ligning 4 - Sammenhæng for θ_s . I en situation hvor jorden er helt vandmættet er $\theta_s = \text{porøsitet } (\varphi)$. Forholdet $\frac{\rho_b}{\rho_s}$ angiver partikelvolumen.

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$$

Omkring pF 1 findes den næste faseparameter. Trykpotentialet for hvornår de første porer drænes, kaldes for trykpotentialet for luftindgang (ψ_e). Til bestemmelsen af ψ_e bruges den før omtalte retentionsmodel af Campbell, hvor faseparametrene θ_s og Campbell b indgår, præsenteret i Ligning 1 og Ligning 2.

Isoleret ψ_e i Ligning 1 gives sammenhængen for ψ_e præsenteret i Ligning 5.

Ligning 5 - Campbells retentionsmodel isoleret for ψ_e

$$\psi_e = -10^{\log_{10}(-\psi) + b \log_{10}\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)}$$

Næste faseparameter langs vandretentionskurven er vandindhold markkapacitet (θ_{fc}). Som det er vist på Figur 2, befinder trykpotentialet for markkapaciteten θ_{fc} sig typisk ved et trykpotentiale på pF 2. Med værdien af ψ_e opnået i Ligning 5 findes θ_{fc} igennem Ligning 2. θ_{fc} er et vigtigt punkt, da det som Figur 2 påpeger er med til at styre luftindholdet ved markkapacitet ε_{100} . Faseparameteren ε_{100} er forskellen imellem θ_s og θ_{fc} , som vist i Ligning 6.

Ligning 6 - Sammenhæng for ε_{100}

$$\varepsilon_{100} = \theta_s - \theta_{fc}$$

Som allerede nævnt, er vandretentionskurvens forløb lineært imellem pF 4.2-6.9. Grænsen for hvornår planter ikke kan trække mere vand ud af jorden kaldes visnegrænsen (θ_{wc}), der konventionelt ligger ved pF 4.2. Denne faseparameter findes i denne afhandling ved θ_r . Da vandindholdet ved pF 6.9 er kendt⁴ kendes to punkter på den lineære del af kurven og hældningen (A) kan derfor bruges til at finde θ_{wc} . Den lineære sammenhæng ses i Ligning 7.

Ligning 7- Lineær sammenhæng mellem trykpotentiale og vandindhold på den tørre del af kurven. Skæringen med y-aksen (B) er kendt ved pF ~ 6.9 .

$$\psi = A \cdot \theta + B$$

Forskellen imellem markkapaciteten og visnegrænsen er det plantetilgængelige vand (PAW) givet ved

Ligning 8 - Sammenhæng for plantetilgængeligt vand

$$PAW = \theta_{fc} - \theta_{wc}$$

PAW er som pointeret i afsnit 1.1, den ene af de to evalueringsparametre i en landbrugskontekst. Den anden jordkvalitetsparameter for landbrug er den relative diffusionskoefficient $\frac{D_p}{D_0}$, som i dette tilfælde styrer, hvor meget luft der tilføres jorden.

2.3 TRANSPORTPARAMETRE

Transportparametrene er det højeste hierarki i Figur 1, da de som benævnt baserer sig på faseparametrene og herigennem de statiske parametre.

Buckingham's (1904) simple model⁵ for $\frac{D_p}{D_0}$ er brugbar, men i denne afhandling er der valgt en anden model, som også baserer sig på ε_{100} . Den er præsenteret i Ligning 9.

Ligning 9 - Sammenhæng for D_p/D_0 . (Moldrup, et al., 2000)

$$\frac{D_p}{D_0} = 2 \varepsilon_{100}^3 + 0.04 \varepsilon_{100}$$

$\frac{D_p}{D_0}$ er som beskrevet i afsnit 1.1 både en evalueringsparameter i en landbrug, klima og miljøsammenhæng. Jævnfør Figur 1 mangler der nu kun en sammenhæng for den sidste evalueringsparameter transportparameteren K_s . I Ligning 10 ses en model der tager udgangspunkt i en empirisk sammenhæng imellem K_s og ε_{100} .

Ligning 10 - Empirisk sammenhæng imellem K_s og ε_{100}

$$\log(K_s) = 2.8 \log(\varepsilon_{100}) + 4.3$$

⁴ Ovntør, derfor $\theta = 0$

⁵ Se fodnote 4

Med Ligning 10 som inspiration forsøges det at finde en prædiktionsmodel for K_s baseret på ε_{100} .

Igennem sammenhængene præsenteret i dette kapitel, er det tydeligt at alle de forskellige parametre i Figur 1, er relateret til vandretentionskurven. Nogle parametre relateres direkte på vandretentionskurven, andre indirekte igennem deres afhængighed af parametre der direkte findes på vandretentionskurven.

Igennem dette kapitel blev der præsenteret en beregningsstrategi for bestemmelsen af evalueringparametrene for landbrug, klima og miljø. Fundamentet for sammenhængene baserer sig på de statistiske parametre i Figur 1 samt ρ_b , eksempelvis i Ligning 3 og Ligning 4. I princippet kan disse parametre måles direkte, men er en dyr metode i forhold tid og økonomi. Jævnfør afsnit 1.3, er det netop målet at finde en metode til bestemmelse af disse parametre, der er relativt billig. Som benævnt i afsnit 1.3 er første opgave dermed at finde metoder til prædiktions af de statistiske parametre samt ρ_b . Med de statistiske parametre og ρ_b prædikeret åbner det op for prædiktions af fase- og til sidst transportparametrene.

3 MATERIALER OG METODER

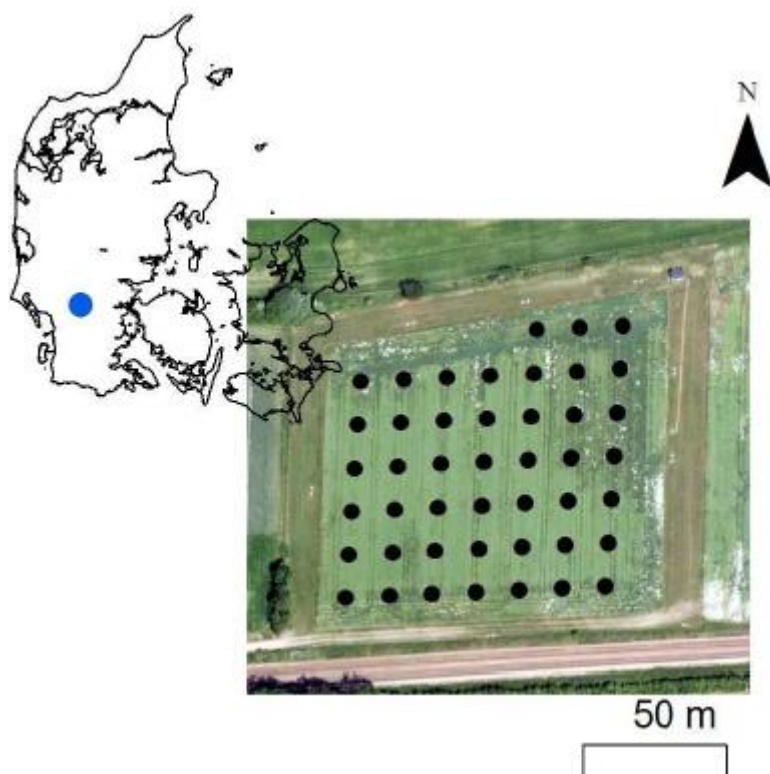
Dette kapitel består af et materialeafsnit (3.1) og en metodeafsnit (3.2). Afsnit 3.1 præsenterer det anvendte datamateriale. De anvendte data i denne afhandling fordeler sig på tre datasæt, der fordeler sig på to skalaer. De tre datasæt er Estrup Mark, Ø Bakker Mark og Det danske jordkartotek af Hansen (1976). Jordprøverne fra Estrup og Ø Bakker er udtaget af Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet og en delmængde af disse er overdraget til brug i denne afhandling. Alle datasæt anvendt i denne rapport involverer prøver af det øverste jordlag, undtagelsesvis hvis datasættet fra Det danske jordkartotek bruges separat fra Estrup og Ø Bakker datasættet. For at kunne vurdere prædiktionsmodellerne, er det nødvendigt at have direkte målinger af de statiske parametre og ρ_b . For Det danske jordkartotek af Hansen (1976), forefindes der allerede målinger af CL, OM, ρ_b og ρ_s . For Estrup og Ø Bakker er der udleveret⁶ målinger af CL og OM. For ρ_b er der kun udleveret målinger for Estrup, da ρ_b på nuværende tidspunkt ikke er målt for Ø Bakker.

Afsnit 3.2 gennemgår, de for denne afhandling, yderligere målinger som tilføjes de eksisterende datasæt. Herunder teori om målemetodens anvendelighed i denne kontekst, hvordan målingerne er udført samt evt. udfordringer. De yderligere målinger er nær infrarød spektroskopi i det visuelle område (NIR), vandindhold ved lufttørring til given luftfugtighed og partikeldensitet.

3.1 EKSISTERENDE DATABASER

3.1.1 Estrup mark (ler-gradient)

Den mindste skala er datasættet fra Estrup mark, som befinder sig i det centrale Jylland ($55^{\circ}29'09.96''N$, $9^{\circ}04'09.37''E$) og har en størrelse på 1.26 ha (Paradelo, et al., u.d.).



Figur 4 – Estrup Mark (Paradelo, et al., u.d.)

⁶ Udleveret af Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

På Figur 4 ses at datasættet involverer 45 jordprøver taget i et karakteristisk gitter af 15 m x 15 m. I Tabel 2 præsenteres statistiske deskriptorer for de direkte målte parametre.

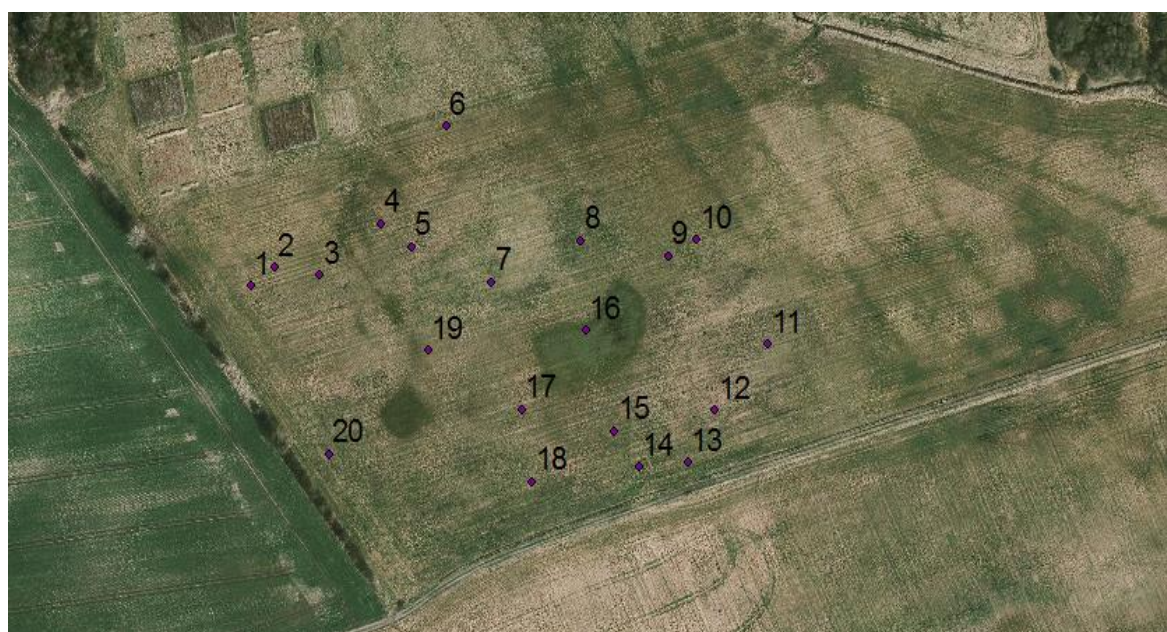
Tabel 2 - Spredning, middel og median af målte parametre for Estrup

Parametre	Spredning	Middel	Median
CL [%]	5.5 – 14.04	10.81	10.88
OM [%]	3.07 – 14.34	5.44	4.48
ρ_s [g/cm^3]	2.41 – 2.66	2.57	2.59
ρ_b [g/cm^3]	1.02 – 1.59	1.39	1.44
θ_r [cm^3/cm^3]	0.72 – 2.28	1.20	1.13

Karakteristisk for Estrupmarken er den relativt store spredning i parametrene på et lille areal gående fra sandede jordprøver til mere lerede jordprøver, jævnfør appendiks C.

3.1.2 Ø Bakker mark (organisk stof-gradient)

Datasættet fra Ø Bakker befinder sig også i det centrale Jylland (9°37'53.278"N, 56°27'31.46"E), imellem Viborg og Randers. Lokaliteten befinder sig i et fredet område, der optræder som en Ø i ådalen. Ø Bakker er i datiden brugt til transport over den fugtige ådal, sidenhen drænet og anvendt til græsning. (Viborg Kommune, u.d.)



Figur 5 - Lokaliteten af prøverne fra Ø Bakker. Målestoksforholdet er ukendt. (Billede udleveret af Cecilie Hermansen – Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet)

Figur 5 viser at der er udtaget 20 jordprøver, som kan tænkes at dække et større areal end Estrup Mark, da prøvetagningen ikke er taget i et defineret gitter system. Prøverne er i stedet taget med det formål at opnå den største diversitet i CL og OM indhold (Oplyst af Cecilie Hermansen – Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet).

Tabel 3 - Spredning, middelværdi og median af målte parametre for Ø Bakker

Parametre	Spredning	Middel	Median
CL [%]	2.30 – 19.60	8.03	7.10
OM [%]	2.70 – 63.40	31.44	25.75
ρ_s [g/cm^3]	1.76 – 2.62	2.14	2.14
θ_r [cm^3/cm^3]	0.51 – 13.64	5.45	4.39

Som Tabel 3 viser er marken i Ø Bakker et ekstremt tilfælde i forhold til variationen i CL og OM, som også afspejles i ρ_s og θ_r . I forhold til udviklingen et jordevalueringssystem baseret på simpel prædiktionsmodel, er den store spredning i datasættet for Ø Bakker en fordel. Fordelen er at de ekstreme indhold af CL og OM tester grænserne for prædiktionsmodelleringen og dermed jordevalueringssystemet i sin helhed.

3.1.3 Det danske jordkartotek (Lorens Hansen)

Datasættet af Hansen (1976) består af en jordklassificering af 15 forsøgsstationer udført i årene 1970-1975. Klassificeringen består af bestemmelse af adskillige jordfysiske parametre, tekstur samt vandretentionskurver i dybden 0 – 100 cm.

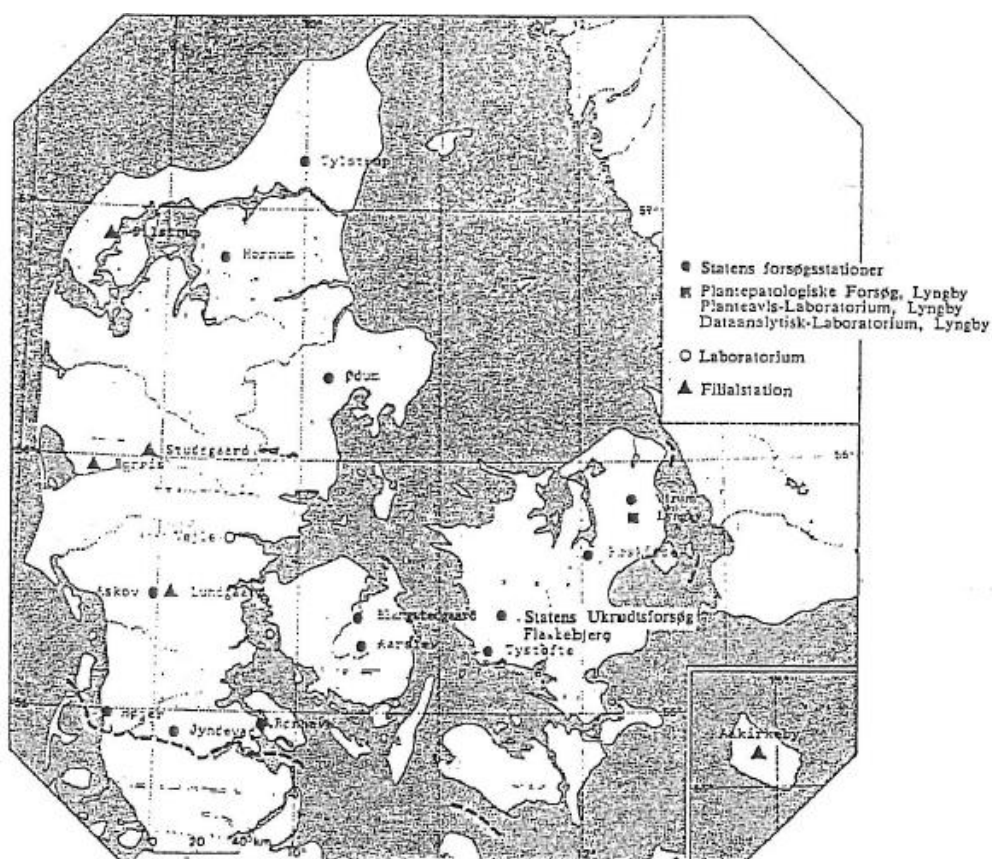


Fig. 1. Beliggenheden af de omtalte forsøgsstationer.

Figur 6 - Oversigt over forsøgsstationer som datasættet stammer fra. (Hansen, 1976)

Som det kan ses på Figur 6, dækker datasættet hele Danmark fra de sandede jorder i Vest til den mere lerede morænejord i Øst og opskalerer derfor resultaterne i denne afhandling.

Til brug i denne afhandling er der udleveret måledata for 13 af de 15 forsøgsstationer og da datasættene for Estrup og Ø Bakker kun involverer topjorder, består det udvalgte datasæt af kartoteket ligeledes kun af topjorder. Således består datasættet af 13 jordprøver, der bringer det totale antal jordprøver for alle tre datasæt op på 78 prøver.

Tabel 4 - Spredning, middel og median for målte parametre for det udvalgte datasæt af Det danske jordkartotek.

Parametre	Spredning	Middel	Median
CL [%]	3.70 – 16.30	9.62	10.60
OM [%]	1.60 – 3.30	2.40	2.30
ρ_s [g/cm ³]	2.57 – 2.65	2.61	2.62
ρ_b [g/cm ³]	1.27 – 1.68	1.48	1.50

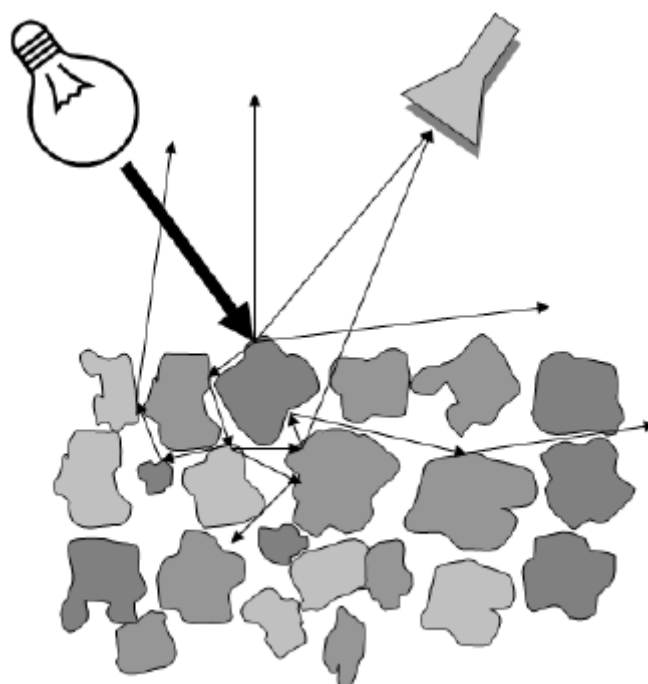
Tabel 4 repræsenterer en mere typisk spredning i indhold af OM, hvilket afspejler sig i den lave spredning i ρ_s . Spredningen af indhold af CL er dog den samme som i de to andre datasæt.

Således bevæger datasættet for denne afhandling sig på 2 skalaer. Estrup og Ø Bakker repræsenterer markskalaen hvoraf datasættet af Hansen (1976) er på landsskala.

3.2 YDERLIGERE MÅLINGER

3.2.1 Synlig-Nær Infrarød Spektroskopi (NIR)

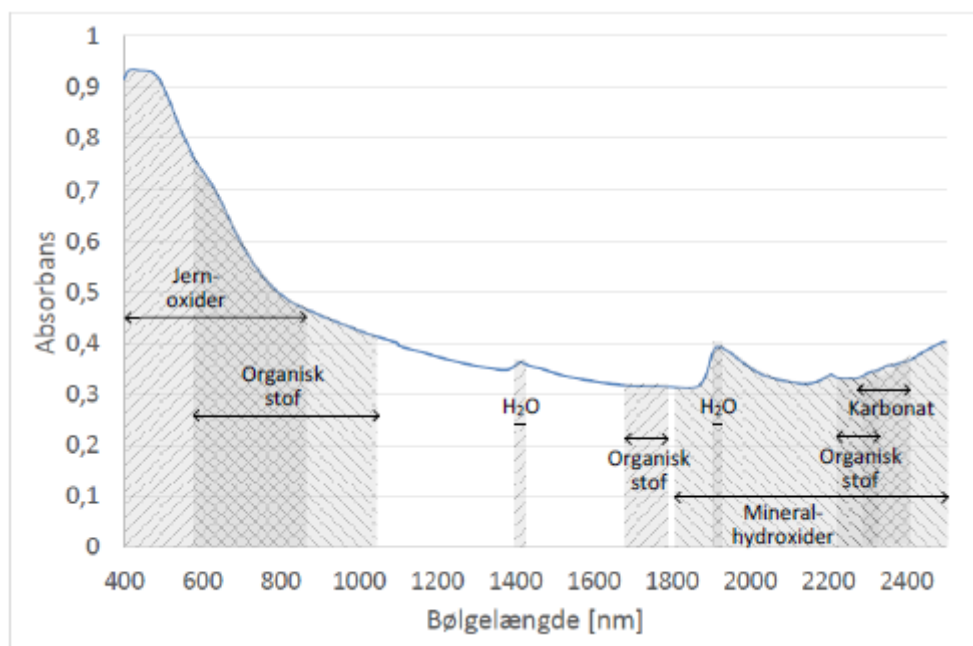
Den seneste teknologiske udvikling har introduceret Synlig-Nær Infrarød Spektroskopi (NIR) i jordvidenskaben. Grundlæggende består NIR-apparatet af en lyspære, der belyser jordprøven med energi i et spektrum af bølgelængder gående fra 400 – 2500 nm og to detektorer som måler mængden af lys der reflekteres tilbage til detektoren (Paradelo, et al., u.d.) (Clark, 1999). Når lysfotoner af forskellig bølgelængde rammer jordprøven, er der tre mulige udfald. Nogle fotoner vil



Figur 7 - Principtegning af spektroskopi (Stenberg, et al., 2010)

reflekteres, andre passerer igennem og muligvis brydes i ny retninger og endelig nogle vil absorberes (Clark, 1999). På Figur 7 ses en principtegning af refleksion, der illustrerer at fotonernes refleksionsbevægelse igennem jordprøven er stærkt afhængig af jordstrukturen (Stenberg, et al., 2010).

Resultatet af NIR scanningen gives i mængde af lys der absorberes, som er differencen imellem det udsendte og reflekterede lys (Hermansen, 2015). Fordelen ved dette er at der gives et resultat, hvor det er muligt at aflæse de bølgelængder der relaterer sig til eksempelvis OM, mineralbindinger og vand (Knadel, et al., 2014). Dette illustreres på Figur 8 som er et eksempel på et absorbansresultat i spektret 400 – 2500 nm.



Figur 8 - Eksempel på absorbansresultat for NIR analyse i spektret 400 – 2500 nm. De skraverede områder er hvor de angivne komponenter absorbere lys. Mørkegrå skravering angiver overlappende områder (Knadel, et al., 2012)

Fra Figur 8 ses det at vand absorberer lys omkring 1400 nm og 1900 nm i dette resultat. Det er kendt at vand har stærke absorptionsbånd i det nær-infrarøde spektrum, hvilket afspejler sig i de høje toppe på kurven. Den stærke absorption af vand er et problem for NIR teknologien, da der er en risiko for, at disse bånd vil forstyrre scanning af andre jordkomponenter. (Knadel, et al., 2014) På nuværende tidspunkt lufttørres jordprøverne derfor inden NIR scanning (Paradelo, et al., u.d.). Figur 8 viser også at lysabsorption af OM optræder ved flere bølgelængder. OM optræder ikke så karakteristisk som vand på kurven, især pga. de overlappende absorptionsbånd fra de resterende mineralske bindinger. De overlappende absorptionsbånd umuliggør direkte bestemmelse af de statiske parametre og ρ_b og der anvendes derfor multivariabel statistik til prædiktions af parametrene (Paradelo, et al., u.d.). For prædiktionen af de statiske parametre og ρ_b anvendes mindste kvadraters metode (PLS⁷ regression). Dette gøres vha. programmet *Unscrambler X 10.4*, som muliggør en kryds-validering af prædiktionsmodellerne. Det foregår ved at datasættet deles op i 20 dele, hvortil en af delene anvendes som validering på baggrund af regression af de 19 andre dele.

⁷ Partial Least Squares

Alle datasæt til brug i denne afhandling er NIR scannet af Institut for Agroøkologi – Aarhus Universitet med et NIRSTM DS2500 spektrofotometer (FOSS, Hillerød, Danmark) og en opløselighed på 0.5 nm. Et billede af spektrofotometeret er vist på Figur 9.



Figur 9 - Billede af NIRSTM DS2500 spektrofotometer (FOSS, Hillerød, Danmark).

Hver jordprøve scannes 7 forskellige steder under rotation, hvoraf de 7 resulterende resultater transformeres til et middelfresultat.

3.2.2 Vandindhold ved lufttørring til given luftfugtighed (θ_r)

Som beskrevet i kapitel 0 afhænger θ_r af CL og OM og giver derfor mening at bruge som prædiktionsparameter.

Forsøgsprocedure

Bestemmelsen af θ_r er en simpel og billig metode, da en stor del af bestemmelsen er baseret på en naturlig ligevægt. Vandindholdet i en løs jordprøve vil ved fordampning over tid indstille sig i en ligevægt med vandindholdet i den omgivende luft (Hermansen, 2015). Når ligevægten er indtruffet er jordprøven lufttør. I denne afhandling har forsøgsproceduren bestået af at afveje 10 g af hver udleveret jordprøve fra Estrup og Ø Bakker. Der er ikke blevet udleveret nogle jordprøver fra Det danske jordkartotek af Lorens Hansen (1976) og θ_r er som konsekvens ikke målt for disse. Som beskrevet i afsnit 3.1, er der en stor variation i jordprøverne fra Estrup og Ø Bakker, hvilket illustreres godt på billedet på Figur 10.



Figur 10 - Prøver af Estrup og Ø Bakker sat til lufttørring. Prøvernes udseende illustrerer den store forskel i prøvernes indhold af OM, hvor de mørkeste jorder har højest indhold af OM.

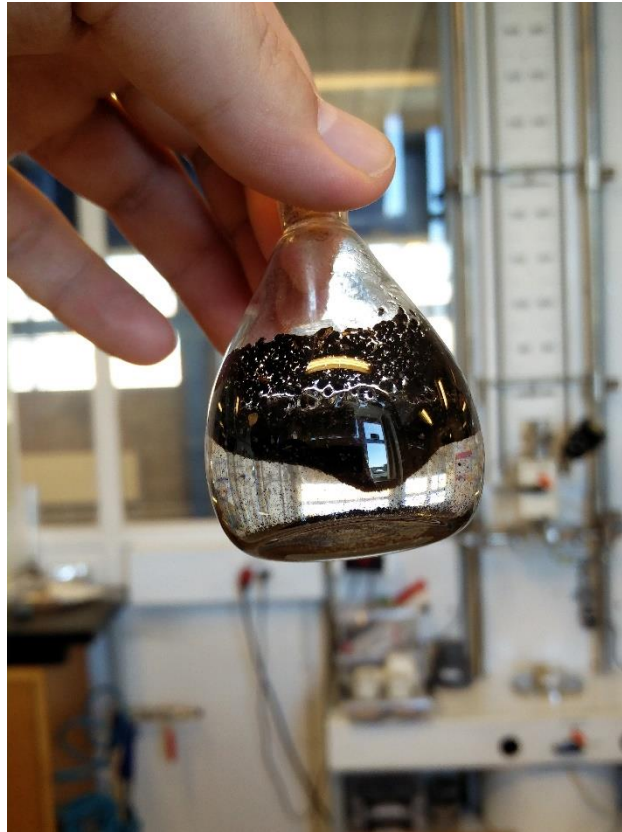
Jordprøverne fra Estrup og Ø Bakker er herefter sat til lufttørring i 31 dage i et rum med 31.8 % relativ luftfugtighed ved 22°C. Under disse forhold befinder θ_r , ifølge Kelvins ligning, konkret ved et trykpotentiale på pF 6.19 (Summer, 2000). Undervejs måles vægten af jordprøverne og når disse ikke ændres mere, er prøven lufttør. Jordprøverne skal herefter måles for vandindhold, hvilket traditionelt udføres ved tørring i ovn ved 105°C i 24 timer. I denne afhandling er der i stedet brugt en jordfugtighedsmåler fra virksomheden Mettler. Måleprincippet er det samme som ovntørring, hvor der i stedet bruges halogenlamper til relativt hurtigt at fordampe det resterende vandindhold. Herefter bruges vægtforskellen til at give vandindholdet som vægtprocent. Herudover er måletiden for jordfugtighedsmåleren noteret for de fleste prøver, som et potentielt (ekstra) værktøj til bestemmelsen af de statiske parametre og ρ_b .

3.2.3 Partikeldensitet

Målinger af ρ_s for Estrup og Ø Bakker er blevet bestemt som en del af denne afhandling vha. pyknometer. Målingerne er udført efter forsøgsvejledningen i appendiks B, som baserer sig på standard nr. DS/CEN ISO/TS 17892-3.

Forsøgsprocedure

Som det første blev et 50 cm³ pyknometer fyldt med cirka 5 g jordprøve. Herefter tilføjes luftfrit demineraliseret vand til pyknometeret er halvfyldt. Det er vigtigt at inducere så lidt luft som muligt i vandet, hvilket opnås ved at tilføje vandet langs indersiden af pyknometeret. Da nogle af jordprøverne har ekstreme indhold af OM, har det for forsøgsproceduren i denne afhandling, været nødvendigt at lade prøverne stå natten over, da det ekstreme indhold af OM gør prøven vandsky. Et eksempel på en vandsky prøve ses på Figur 11.



Figur 11 - Eksempel på vandsky prøve fra Ø Bakker. Materialet lægger sig som en båd på toppen af vandet og blandes langsomt med vandet.

At gøre prøverne våde dagen før forsøget afviger fra forsøgsproceduren i appendiks B. Når materialet vurderes til at være opblandet med vandet, er næste opgave at fjerne skjulte luftbobler i materialet. Det gøres ved at holde pyknometeret på skrå og dreje det langsomt, således materialet afsættes på pyknometerets kant. Hermed frigøres luftbobler fra materialet når vandet løber til den anden side af pyknometeret. Pyknometeret blev drejet på skrå, indtil der ikke var flere synlige luftbobler. Herefter blev pyknometeret anbragt i vakuum-ekssikkator i mindst 60 min. Der blev banket jævnlige på ekssikkatoren, da det hjælper til at frigøre luftboblerne i pyknometeret. Herefter er pyknometeret blevet fyldt fuldt op med luftfrit demineraliseret vand langs pyknometerets side som før. Der er fyldt så meget vand i, at når pyknometerets prop sættes i, flyder vandet over. Inden da blev det sikret, at vandets temperatur i pyknometeret er det samme som lufttemperaturen. Herefter blev pyknometeret aftørret omhyggeligt og vejet på en vægt med tre decimaler. Temperaturen blev noteret og prøven blev hældt over i et vejet bægerglas og skyllet efter med luftfrit demineraliseret vand. Herefter blev tørvægten bestemt ved tørring i ovn ved 105°C i 22-24 timer. Partikeldensiteten bestemmes herefter ved sammenhængen præsenteret i

Ligning 11.

Ligning 11 - Formel for partikeldensitet (se appendiks B).

$$\rho_s = \frac{W_s \cdot \rho_w^t}{W_s + W_2 - W_1}$$

Hvor,

W_s	Vægt af tørstof
ρ_w^t	Densitet af demineraliseret vand ved temp. t
W_1	Vægt af pyknometer fyldt med prøve og demineraliseret vand
W_2	Vægt af pyknometer fyldt med demineraliseret vand

Ud fra er det altså nødvendigt at kende W_2 på forhånd ved den temperatur prøven er på. Da pyknometrene brugt i denne afhandling ikke havde kendt W_2 ved måletidspunktet, er denne blevet bestemt som en del af forsøget. Bestemmelsen af W_2 følger samme forsøgsvejledning, men uden jordprøven i pyknometeret. For alle Estrup og Ø Bakker jordprøver er ρ_s dobbeltbestemt, hvoraf middelværdien er brugt til videre analyse.

Udfordringer og fejlkilder

Da beregningen af ρ_s ud fra

Ligning 11 baseres på en lille vægtforskel imellem W_1 og W_2 kræves en stor omhyggelighed i forhold til vejning, temperaturmåling og fjernelse af luft i pyknometeret. 60 min i vakuum-ekssikkatoren vurderes normalt som nok til at fjerne indesluttet luft i jordprøven, men da det i denne afhandling arbejdes med jorder så vandsky og mørke som prøven på Figur 11 vanskeliggøres detekteringen af indesluttet luft. Der er altså en overvejende risiko for at indesluttet luft i jordprøven, kan have en signifikant påvirkning for bestemmelsen af ρ_s .

Lokaletemperaturen har også været en udfordring, da denne ikke har været konstant under forsøget. Bestemmelsen af W_2 for de ti anvendte pyknometre har haft varierende temperaturer imellem 21 – 23°C for vandet i pyknometeret. Da der ikke har været tid nok til at bestemme W_2 for alle mulige lokaletemperaturer, er der opstået situationer, hvor W_2 er bestemt ved én temperatur og W_1 ved en anden. Lokaletemperaturen under målinger for W_1 har fluktueret imellem 21 - 26°C, hvor temperaturen brugt til ρ_w^t er den temperatur W_1 er målt under. En klar fejlkilde er altså denne temperaturforskel der påvirker densiteten af det demineraliserede vand.

3.3 OPSAMLING

Igennem kapitlet er datamaterialet samt yderligere målinger, der komplementerer det eksisterende datasæt gennemgået. De næste tre kapitler vil beskæftige sig med prædiktionen af de statistiske parametre OM, CL og ρ_s . Kapitlerne er opdelt i prædiktionsmodeller for henholdsvis NIR og θ_r , som opdeles efter forskellige skala på baggrund af de tre databaser. Prædiktionsmodellerne består af den målte værdi på x-aksen og den prædikterede værdi på y-aksen for NIR modellerne og θ_r på x-aksen og den målte værdi på y-aksen for modellerne for vandindhold i lufttør jord. For NIR modellerne er der kun mulighed for lineære sammenhænge⁸, hvorimod det for modellerne for vandindhold i lufttør jord er mulig at bruge andre sammenhænge. Til udvælgelsen af de bedste modeller til prædiktion af de statistiske parametre og ρ_b anvendes der for både θ_r og NIR metoder to statistiske parametre. Disse er regressionskoefficienten r^2 samt RMSE⁹, som giver et mål for

⁸ Oplyst af Cecilie Hermansen, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

⁹ Root Mean Square Error

henholdsvis kvaliteten af modellens datafit og den gennemsnitlige fejlmargen¹⁰ af prædiktionen. Grænsen for hvor lav r^2 og RMSE må være, er afhængig af de data der bruges og evalueres derfor løbende igennem rapporten. For sammenligningen af RMSE værdier ved de forskellige prædiktionsmodeller anerkendes det at der er en risiko for, at RMSE værdierne ikke er statistisk signifikant forskellige og således vurderes modelpræstationen også ved visuel analyse. Da ρ_s er blevet dobbeltbestemt giver det mulighed for udregning af RMSE værdien for bestemmelsen af ρ_s . Måleusikkerheden er udregnet til $0.04 \frac{g \text{ tørstof}}{cm^3 \text{ tørstof}}$.

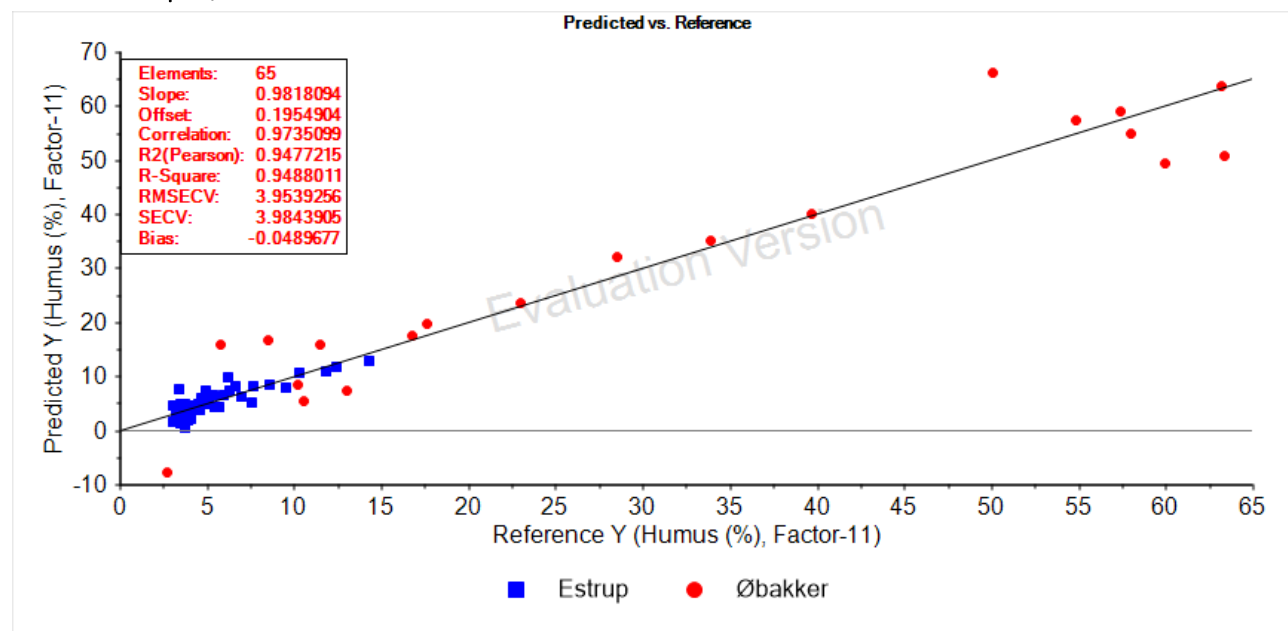
¹⁰ Gennemsnitlige usikkerhed

4 PRÆDIKTION AF ORGANISK STOF

4.1 PRÆDIKTION UD FRA NIR

For NIR modellerne er Det danske jordkartotek benævnt Lorens Hansen.

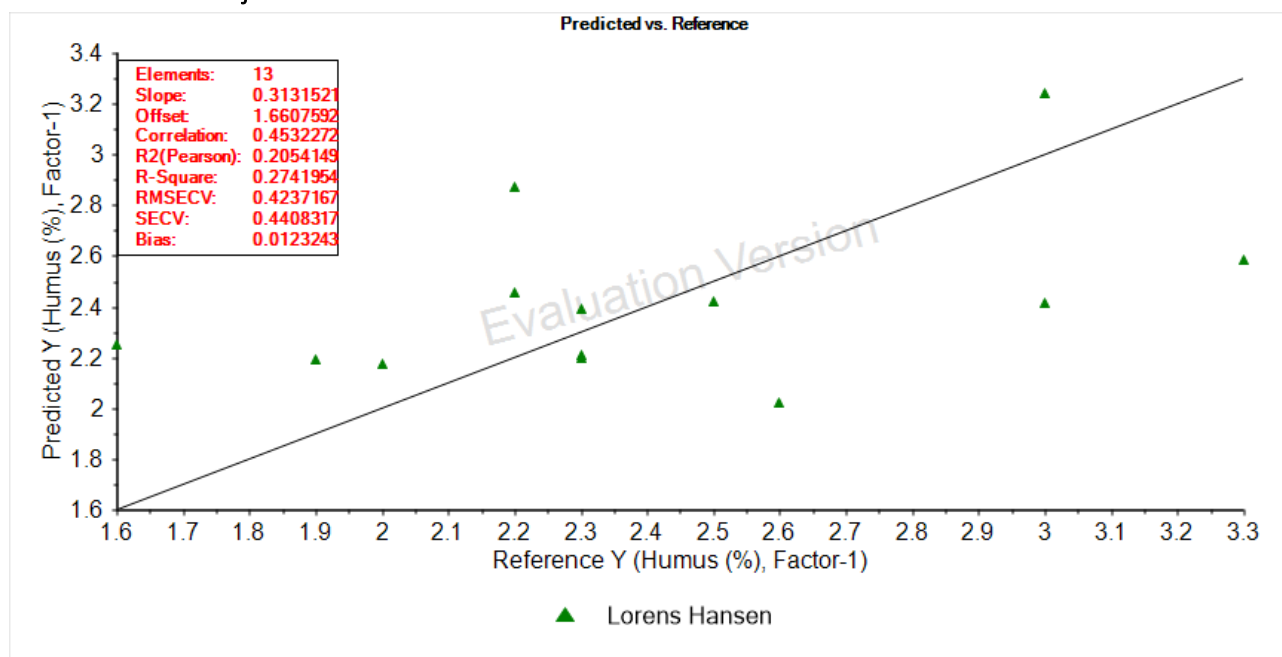
4.1.1 Estrup – Ø Bakker



Figur 12 - Prædiktion af OM på baggrund af NIR for Estrup - Ø Bakker.

På Figur 12 ses prædiktionen af OM på markskala. Modellen viser et godt datafit med en regressionskoefficient (R^2) på 0.95. Selvom datasættet for Estrup har OM procenter op til 15 % er det en relativ lille mængde i forhold til de ekstreme indhold af OM i prøverne fra Ø Bakker. Den gennemsnitlige fejlmargen i prædiktionen (RMSE) på 3.95 % vurderes derfor acceptabel på baggrund af datasættet fra Ø Bakkers ekstremitet i OM. Figur 12 viser også, at Ø Bakker datasættet har en meget større spredning end datasættet for Estrup. Det relativt lille Ø Bakker datasæt på 20 jordprøver vil derfor, kunne stå alene uden Estrup datasættet og levere en acceptabel prædiktion. Med undtagelse af den enkelte negative prædiktion i Ø Bakker datasættet, er dataene bedst repræsenteret ved indhold af OM op til 40 %. Fjernes jordprøverne der har et OM indhold større end 40 %, giver det en gennemsnitlig fejlmargen på 2.85 % i stedet. Ud fra Figur 12 alene kan det derfor være et argument for at begrænse prædiktionsmodeller på baggrund af NIR til indhold af OM på maksimum 40 %.

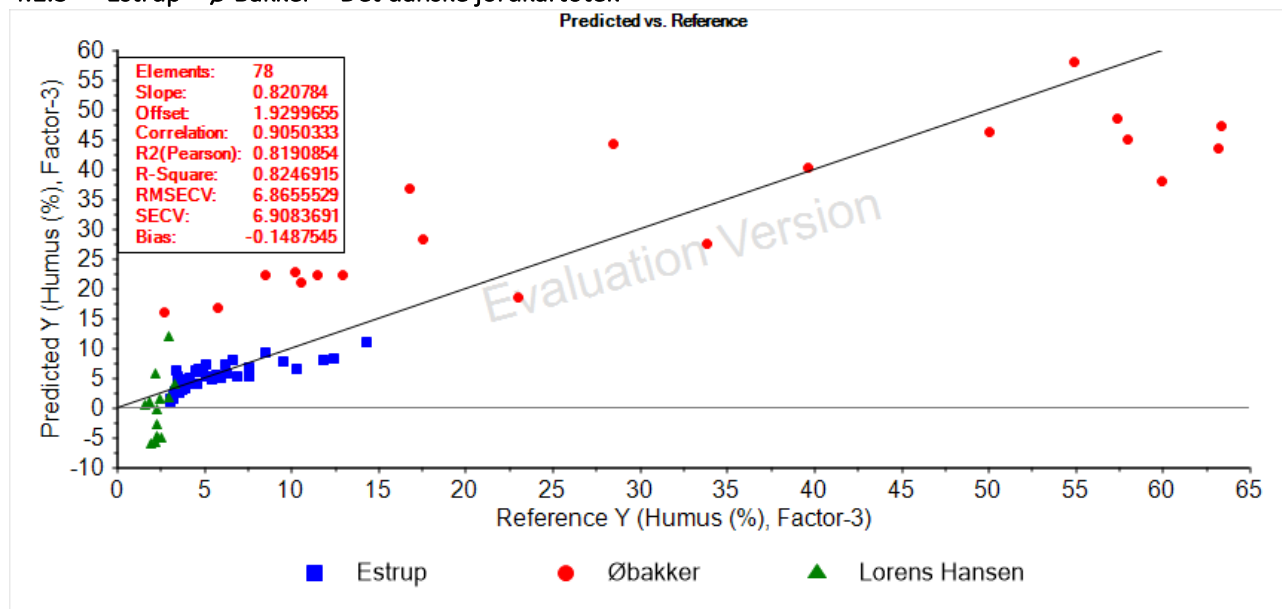
4.1.2 Det danske jordkartotek



Figur 13 - Prædiktion af OM på baggrund af NIR for Det danske jordkartotek.

På Figur 13 ses prædiktion af OM på landsskala. Den lille datamængde på 13 prøver ser ud til at påvirke prædiktionen negativt, som den lave regressionskoefficient på 0.21 og den relativt høje RMSE værdi på 0.42 bekræfter. Det viser sig derfor, at for prædiktionen af OM på baggrund af NIR på et lille datasæt er det nødvendigt, at datasættet har en langt større spredning end Det danske jordkartotek. En spredning der formentlig skal være i størrelsesordenen som Ø Bakker datasættet på Figur 12.

4.1.3 Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek

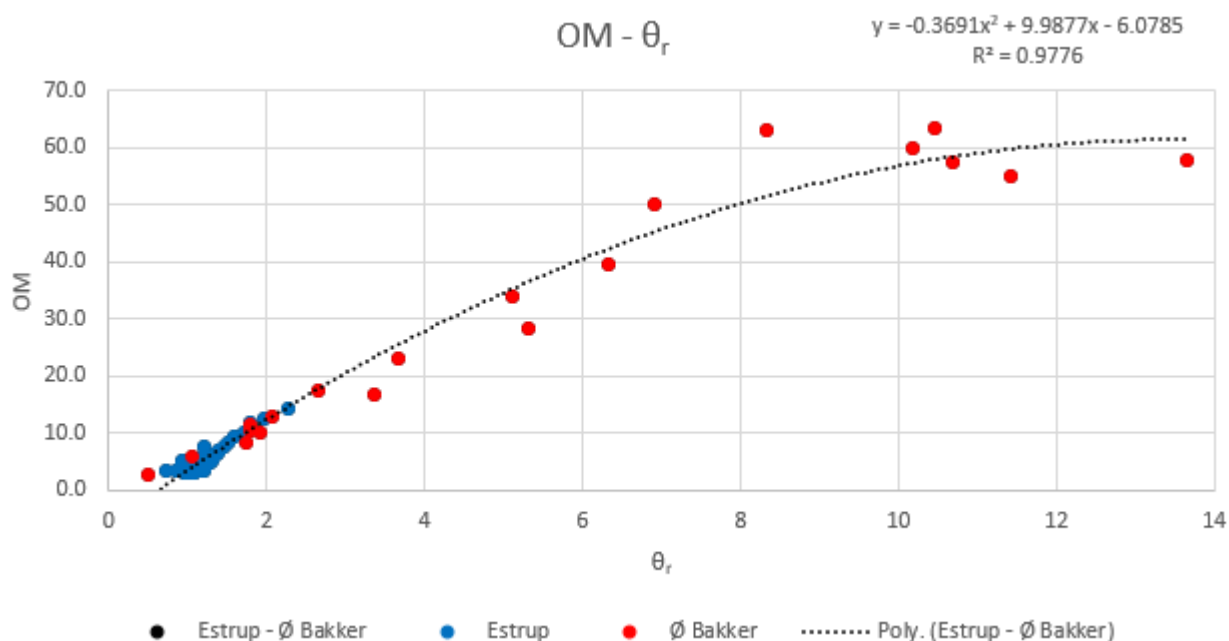


Figur 14 – Prædiktion af OM på baggrund af NIR for Estrup, Ø Bakker og Det danske jordkartotek.

Figur 14 viser det samlede datasæt af 78 prøver og kombinerer derfor mark- og landsskala. Modellens datafit er forholdsvis god med en regressionskoefficient på 0.82 og en RMSE på 6.87 %. Ø Bakker datasættet dominerer modelresultatet og giver problemer for prædiktionen af Det danske

jordkartotek, som indeholder meget lave indhold af OM i forhold til Ø Bakker. I appendiks D findes en NIR model for Estrup – Det danske jordkartotek alene. Fjernes Ø Bakker datasættet giver det en signifikant bedre regressionskoefficient på 0.90 og en RMSE på 0.84, hvor spredningen i stedet befinder sig mellem 1.5 – 15 %.

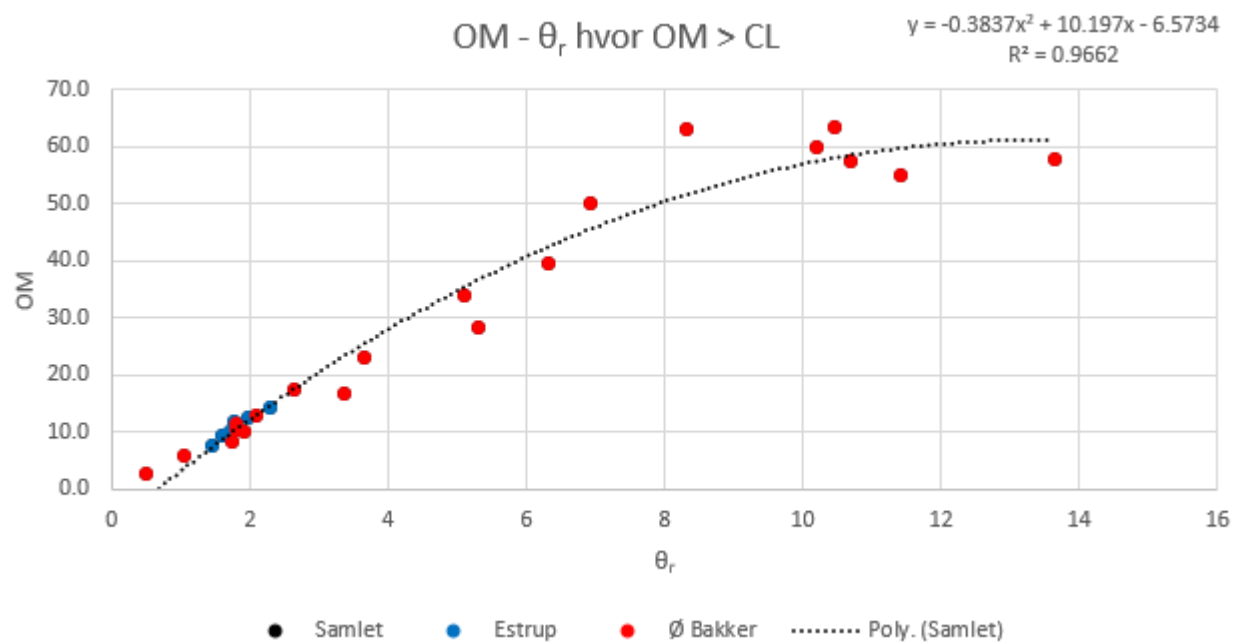
4.2 PRÆDIKTION UD FRA VANDINDHOLD I LUFTTØR JORD



Figur 15 - Prædiktion af organisk stof på baggrund af vandindhold ved lufttør for Estrup - Ø Bakker.

4.2.1 Estrup – Ø Bakker

Figur 15 viser prædiktionen af OM på markskala. Modelresultatet minder om NIR resultatet på Figur 12 og indeholder derfor mange af de samme konklusioner. Dog har modellen et bedre datafit med en regressionskoefficient på 0.98, som beskrives ved en andengradslikning. Den gennemsnitlige fejlmargen på 2.56 % er også bedre end NIR resultatet på Figur 12. I appendiks D findes prædiktionen af OM for henholdsvis Estrup og Ø Bakker datasættene separeret, som også viser gode datafit. En central bemærkning er dog, at det ser ud til, at de jordprøver hvor $OM > CL$ bærer modellen. Dette bekræftes i Figur 16.

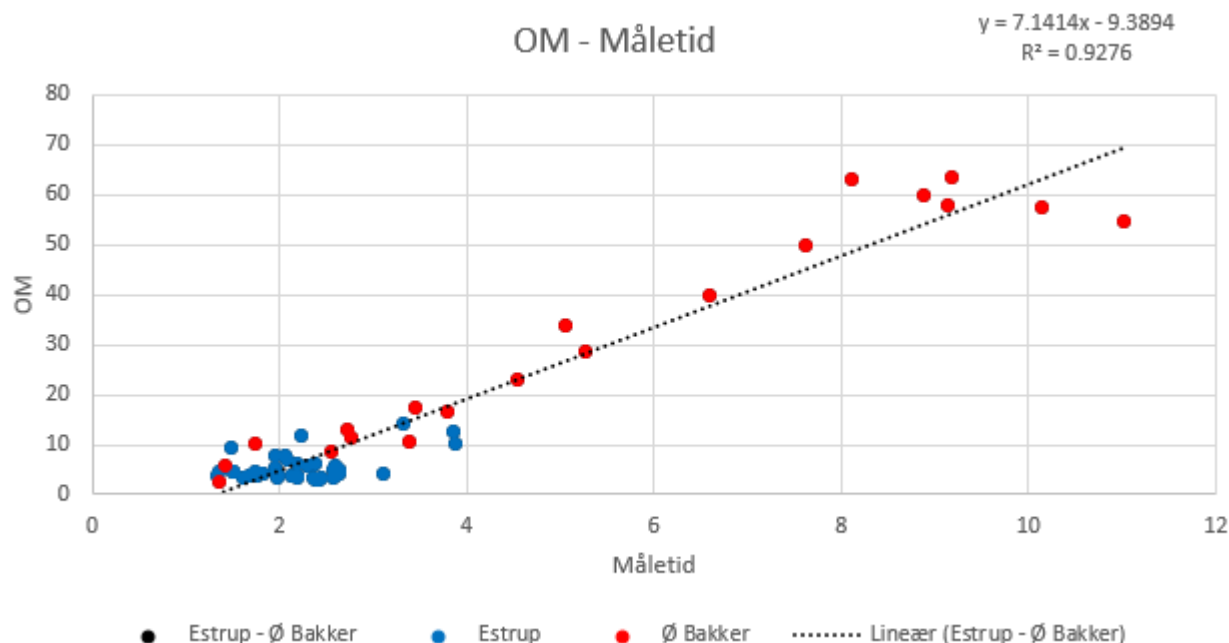


Figur 16 - Prædiktation af organisk stof på baggrund af vandindhold ved lufttør for de Estrup - Ø Bakker jordprøver som opfylder OM > CL..

4.3 PRÆDIKTION UD FRA MÅLETID FOR METTLER-TOLEDO JORDFUGTIGHEDSMÅLER

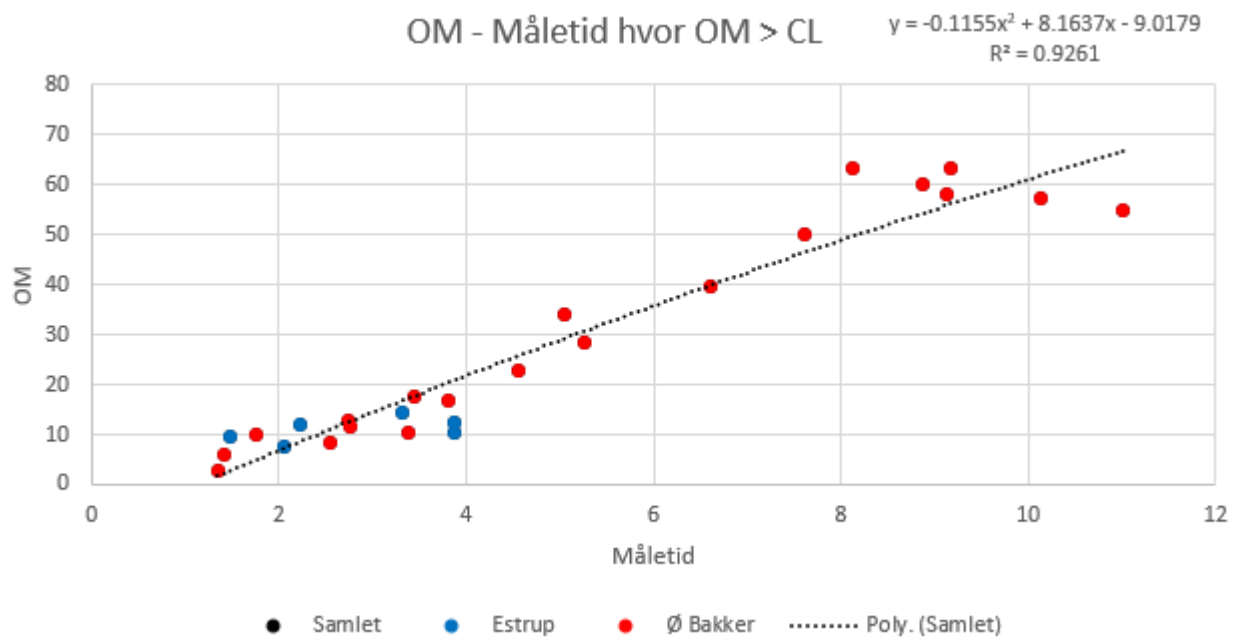
Som en del af måleserien for θ_r blev måletiden, for den jordfugtighedsmåler der blev brugt til at bestemme vandindholdet noteret. Ønsket er at se om måletiden, kan være en brugbar prædiktionsparameter i denne kontekst.

4.3.1 Estrup – Ø Bakker



Figur 17 - Prædiktion af organisk stof på baggrund af måletiden for Estrup - Ø Bakker på Mettler – Toledo jordfugtighedsmåler. Måletiden er angivet i decimal-minutter.

Som Figur 17 angiver er der en god sammenhæng for OM som funktion af måletid. Sammenhængen er lineær, med en regressionskoefficient på 0.93 og en RMSE på 4.80 %. Ø Bakker datasættet dominerer igen modelresultatet, som i de forrige modelresultater af Estrup – Ø Bakker. I appendiks D findes modelresultater for de to datasæt enkeltvis, som viser at der ingen sammenhæng er for OM og måletid for Estrup datasættet. Samme bemærkning som for modellen for vandindhold ved lufttør gælder også for måletid. Jordprøverne der opfylder at $OM > CL$ bærer modellen. Dette bekræftes på Figur 18.



Figur 18 - Prædiktion af organisk stof på baggrund måletiden for Estrup - Ø Bakker der opfylder at OM > CL.

4.4 OPSAMLING

Tabel 5 viser en oversigt over de statistiske parametre for prædiktionsmodellerne for OM i dette kapitel og i appendiks D, som udgør en basis for valget af den bedste prædiktionsmodel for evalueringen af jordkvalitet.

Tabel 5 - Sammenfatning af RMSE og regressionsværdier for prædiktionsmodellerne for OM præsenteret i kapitlet og i appendiks D. RMSE og R^2 er noteret i formen; RMSE (R^2).

Prædiktionsmodel	Estrup – Ø Bakker	Estrup – Det danske jordkartotek	Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek	Det danske jordkartotek	Estrup	Ø Bakker
NIR	3.95 % (0.95)	0.84 % (0.90)	6.87 % (0.82)	0.42 % (0.21)	0.86 % (0.89)	Ikke testet
Vandindhold i lufttør jord	2.56 % (0.98)	Ingen data	Ingen data	Ingen data	0.90 % (0.88)	7.02 % (0.98)
Måletid	4.80 % (0.93)	Ingen data	Ingen data	Ingen data	Ingen sammenhæng	5.24 % (0.94)

De fleste prædiktionsmodeller viste sig at have et acceptabelt datafit, da det kun er måletiden for Estrup og NIR modellen for det danske jordkartotek der viste ingen sammenhæng. NIR prædiktionsmodellen for det totale datasæt, bestående af Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek, er domineret af den store spredning for Ø Bakker datasættet. Modellens RMSE på 6.87 % er acceptabel i forhold til spredningen i Ø Bakker, men vurderes for høj i forhold til prædiktionen af indhold af OM under 5 %. Fjernes Ø Bakker datasættet så modellen består af datasættet Estrup – Det danske jordkartotek resulterer det i en RMSE værdi på 0.84 %. I situationer hvor det på forhånd er forventet, at der er et lavt indhold af OM, er modellen for Estrup – det danske jordkartotek et bedre alternativ på baggrund af NIR.

På markskala for Estrup – Ø Bakker viste prædiktionsmodellen for θ_r , som værende bedre end NIR og måletid. Alle tre prædiktionsmodeller viste meget gode datafit, men den gennemsnitlige fejlmargen viste sig at være lavest for θ_r på 2.56 %. Prædiktionsmodellen baseret på θ_r har den laveste RMSE for de modeller der indeholder Ø Bakker datasættet.

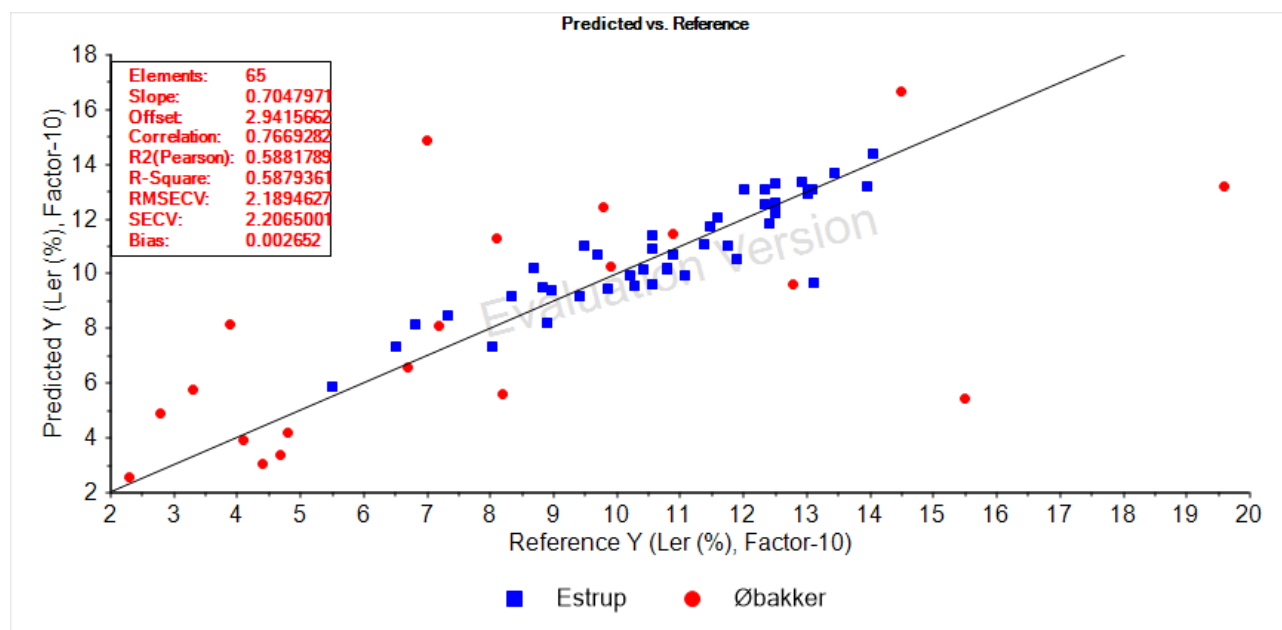
Valget af den prædiktionsmodel for OM til videre benyttelse i denne afhandling baserer sig på nogle overordnede overvejelser af datasættene. Argumentet for at bruge NIR modellen indeholdende det totale datasæt baseres på at, det er nødvendigt at bruge en prædiktionsmodel der indeholder data på landsskala, hvis den skal bruges på landsskala. Derfor virker det nærliggende at vælge denne model, selv om den har sine svagheder ved lave indhold af OM. Alligevel vælges prædiktionsmodellen for Estrup – Ø Bakker baseret på θ_r til videre benyttelse i denne afhandling, selvom datasættet kan argumenteres for kun repræsentere to lokaliteter. Den store spredning i Ø Bakker datasættet kan argumenteres for at dække en stor del af diversiteten i OM for danske jorder. Herigennem vurderes det acceptabelt at gå videre med valget af denne prædiktionsmodel. Det anerkendes at modellen kun går godt for jorder, hvor $OM > CL$ hvilket peger i retning af brugen af NIR modeller eller modellen for $OM > CL$ alene, for det tilfælde af et datasæt der primært består af jorder, hvor $OM < CL$. En anden metode for et datasæt hvor $OM < CL$, er brugen af totalmængden af fine partikler (Fines). Denne metode beskrives i næste kapitel.

5 PRÆDIKTION AF LER ELLER TOTALE FINES (SMÅ PARTIKLER)

5.1 PRÆDIKTION UD FRA NIR

For NIR modellerne er Det danske jordkartotek benævnt Lorens Hansen.

5.1.1 Estrup – Ø Bakker



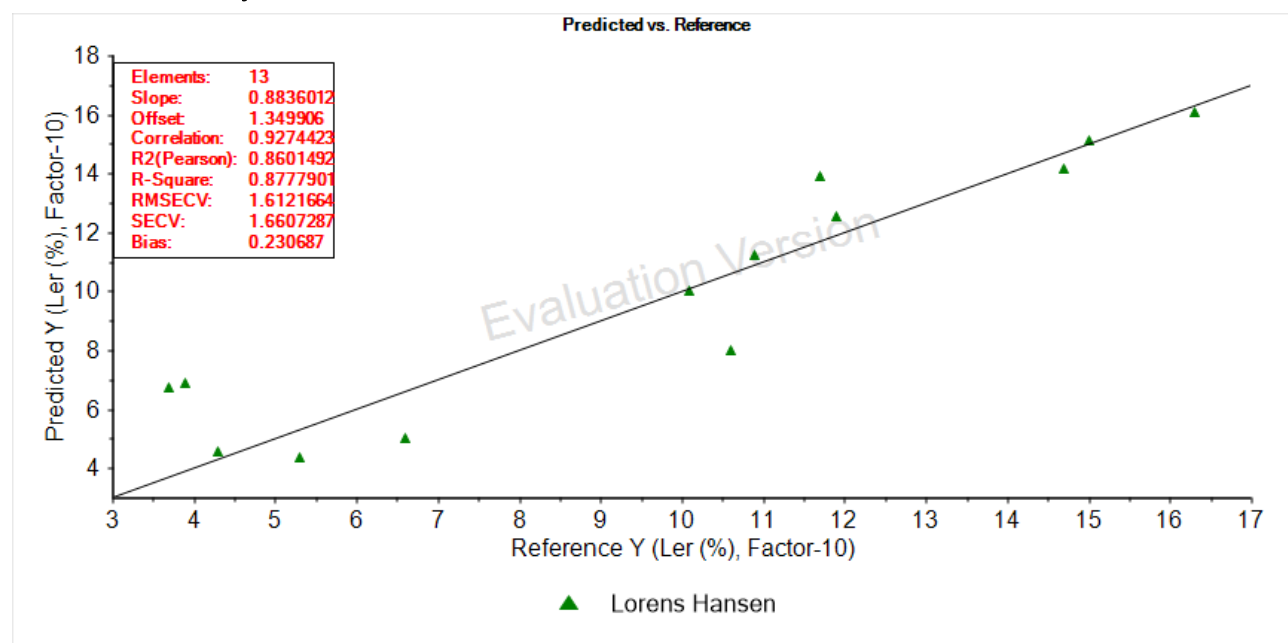
Figur 19 - Prædiktion af CL på baggrund af NIR for Estrup - Ø Bakker.

Figur 19 viser prædiktionen af CL på markskala. Sammenhængen er i nogen grad lineær med en regressionskoefficient på 0.59. Modellen ser ud til at fungere godt for Estrup datasættet, hvorimod datapunkterne for Ø Bakker er mere spredt i forhold til afstanden til 1:1 linjen. De ekstreme indhold af OM i nogle af prøverne fra Ø Bakker ser ud til at påvirke prædiktionen af CL på baggrund af NIR, da de tre datapunkter med den største afstand til 1:1 linjen¹¹ alle har et indhold af OM over 54 %. Det lader sig dog ikke gælde i alle tilfælde, da eksempelvis punktet (14.5, 16.64) har et indhold af OM på 63.4 %.

De 45 jordprøver fra Estrup agerer som anker for modellen og holder RMSE nede på 2.19 %. Dette er anderledes i forhold til prædiktionen af OM i kapitel 4. Den største forskel er den større spredning i indhold af CL som muliggør, at Estrups større antal af prøver, bliver styrende for modellen. I appendiks E findes modellen kun for Estrup datasættet, hvor RMSE er lavere på 0.78 %.

¹¹ Punkterne (7, 14.85) (15.5, 5.4) (19.6, 13.19)

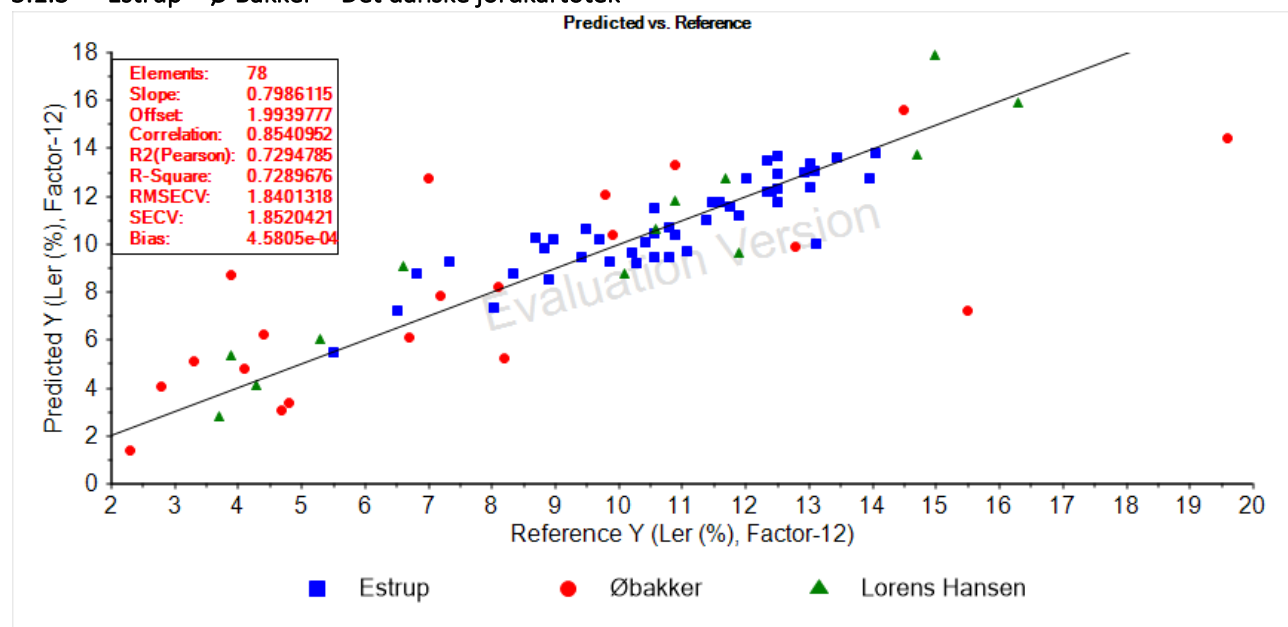
5.1.2 Det danske jordkartotek



Figur 20 - Prædiktion af CL på baggrund af NIR for Det danske jordkartotek.

Modellen på Figur 20 har en regressionskoefficient på 0.86, hvilket indikerer en god lineær sammenhæng. Jordprøverne fra Det danske jordkartotek følger 1:1 linjen godt med en RMSE på 1.61 %. Spredningen af CL er langt højere end spredningen af OM for Det danske jordkartotek og på den baggrund har den lave datamængde på 13 prøver ikke så stor indflydelse på modelresultatet. Det lave indhold i OM kan tænkes også at bidrage positivt til model, baseret på konklusionerne i afsnit 5.1.1.

5.1.3 Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek

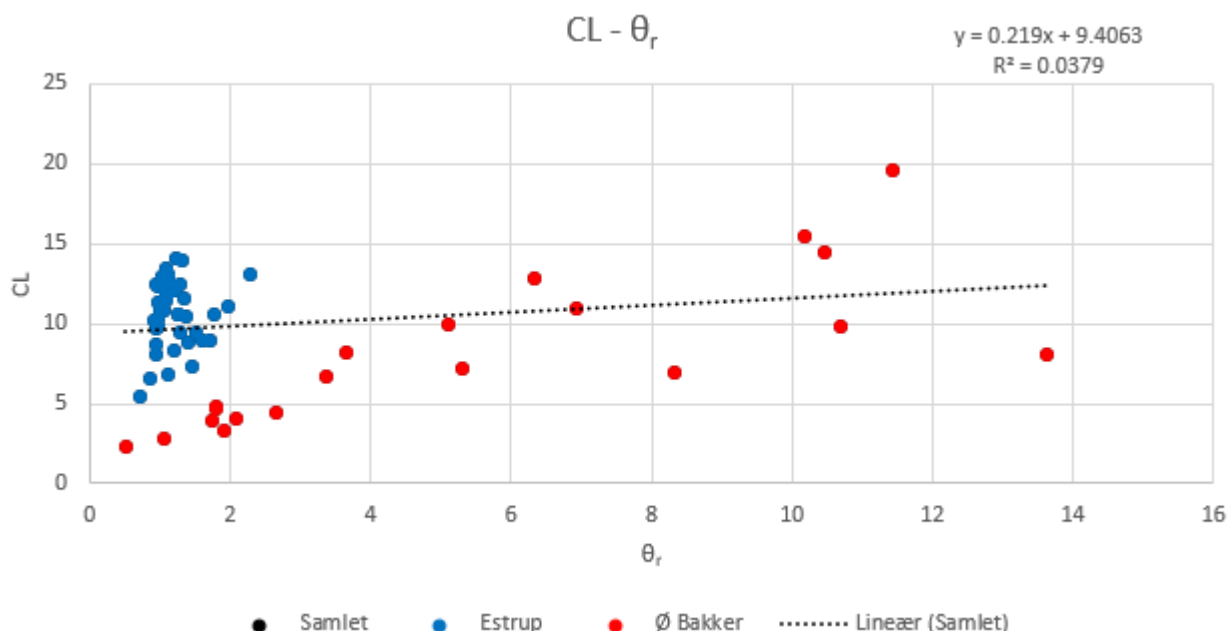


Figur 21 - Prædiktion af CL på baggrund af NIR for Estrup - Ø Bakker - Det danske jordkartotek.

Figur 21 viser prædiktionen af CL for det samlede datasæt. Modellen minder meget om modellen for Estrup – Ø Bakker og de samme konklusioner omhandlende Ø Bakker datasættet gælder. Fokuseres det kun på prøverne fra Estrup – Det danske jordkartotek forlænger prøverne fra Det

danske jordkartotek variationen i CL for disse to datasæt. De ekstra 13 prøver fra Det danske jordkartotek styrker hermed modellens R^2 og RMSE på henholdsvis 0.73 og 1.84 % i forhold til modellen for Estrup – Ø Bakker på Figur 19.

5.2 PRÆDIKTION UD FRA VANDINDHOLD I LUFTTØR JORD



Figur 22 - Prædiktion af CL på baggrund af vandindhold ved lufttør for Estrup - Ø Bakker.

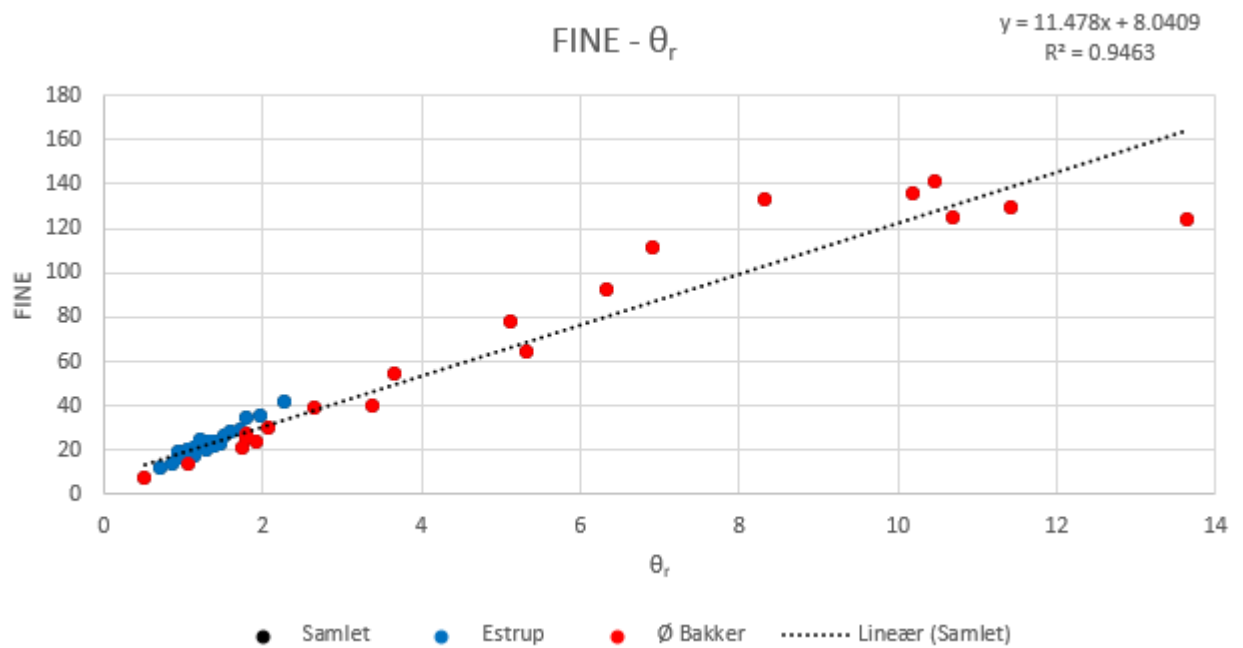
5.2.1 Estrup – Ø Bakker

Figur 22 viser umiddelbart ingen sammenhæng mellem CL og θ_r for Estrup – Ø Bakker. Spredningen i θ_r er betydeligt højere for Ø Bakker end Estrup. Da Ø Bakker datasættet repræsenterer en gradient i indhold af OM må OM ud fra modelresultatet have en betydelig rolle for θ_r . Jævnfør afsnit 3.2.2 og Figur 2 er det de adsorberende kræfter der influerer θ_r . Afhængig af lerminerallerne for Estrup – Ø Bakker er der en sandsynlighed for at OM repræsenterer et meget større specifikt overfladeareal end lerminerallerne¹², hvor vandet kan adsorberes fast på ved lufttør (Loll & Moldrup, 2000). På den baggrund defineres FINE i Ligning 12, som angiver totalt antal fine partikler.

Ligning 12 - Prædiktionsparameter FINE der tager hensyn til indflydelsen af OM for θ_r .

$$FINE = CL + 2 OM$$

¹² Typisk spredning for specifikt overfladeareal for ler er 5 – 800 m^2/g , hvorimod det for OM er 800 – 1000 m^2/g . OM kan holde 4 -5 gange mere vand end ler (Loll & Moldrup, 2000).



Figur 23 - Prædiktion af FINE på baggrund af vandindhold ved lufttør for Estrup - Ø Bakker.

Prædiktionsmodellen for FINE på Figur 23 viser en lineær sammenhæng på R^2 på 0.95, hvilket bekræfter bemærkningerne for Figur 22. Modellen er meget god ved lav θ_r og usikkerheden stiger ved høj θ_r . RMSE værdien ligger på 8.07. Tydeligt er dog det lineære forløb for Estrup alene, som har en R^2 på 0.93. Estrup modellen kan findes i appendiks E. I appendiks findes samme model for FINE på baggrund af måletiden for Mettler-Toledo jordfugtighedsmåler med en R^2 på 0.94, måletiden er altså også en gyldig prædiktionsparameter i dette tilfælde.

5.3 OPSAMLING

Tabel 6 viser en oversigt over de statistiske parametre for prædiktionsmodellerne for CL (FINE) i dette kapitel og i appendiks E, som udgør en basis for valget af den bedste prædiktionsmodel for evalueringen af jordkvalitet.

Tabel 6 - Sammenfatning af RMSE og regressionsværdier for prædiktionsmodellerne for OM præsenteret i kapitlet og i appendiks E. RMSE og R^2 er noteret, RMSE (R^2)

Prædikti- onsmodel	Estrup – Ø Bakker	Estrup – Ø Bakker – Det dan- ske jord- kartotek	Det dan- ske jord- kartotek	Estrup Ø Bakker	Ø Bakker
NIR (CL)	2.19 % (0.59)	1.84 % (0.73)	1.61 % (0.86)	0.78 % (0.85)	Ikke te- stet
Vandind- hold i luft- tør jord (FINE)	8.07 % (0.95)	Ingen data	Ingen data	1.38 % (0.93)	8.52 % (0.97)
Måletid (FINE)	8.70 min (0.94)	Ingen data	Ingen data	Ingen sammen- hæng	10.10 min (0.96)

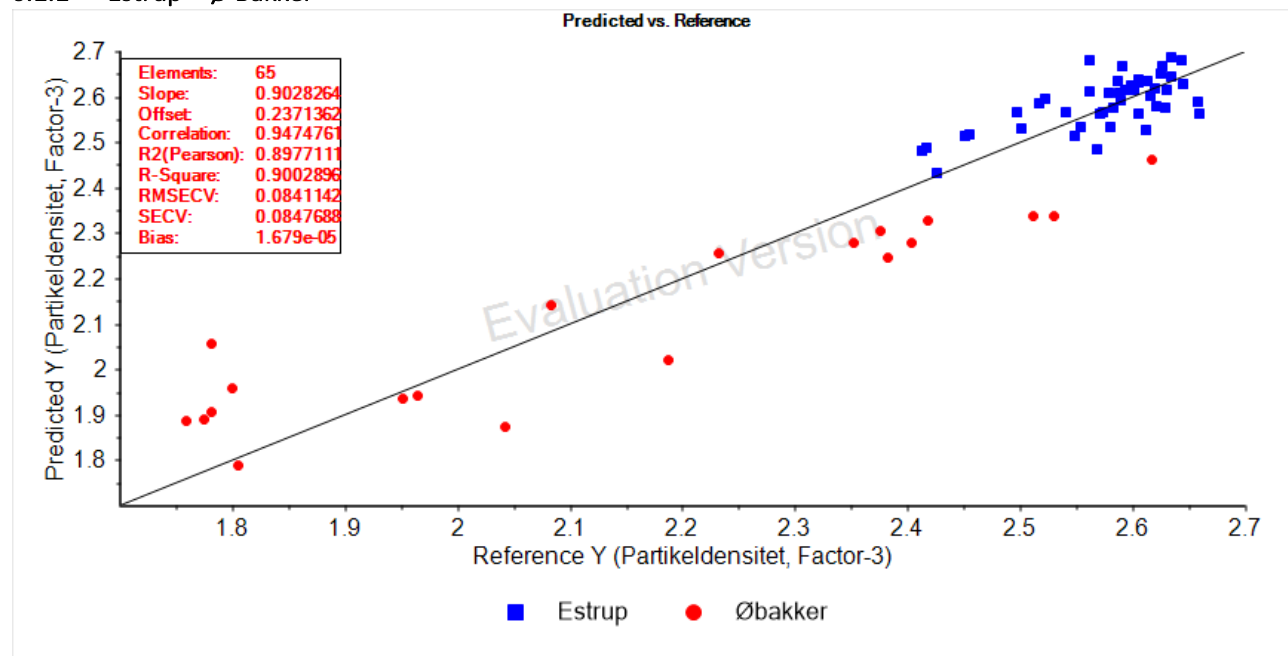
NIR modellerne har i nogen grad lineære sammenhænge, hvor den laveste regressionskoefficient er for Estrup – Ø Bakker. En gennemsnitlig fejlmargen på 1.84 % CL for det samlede datasæt for NIR modellerne vurderes som acceptabelt, i kontekst af Ø Bakkers store spredning i OM. Prædiktionsmodellerne af FINE på baggrund af θ_r og måletid markerer sig ved de samme karakteristika. Begge har pæne regressionskoefficienter, dog er den gennemsnitlige fejlmargen lavere for modellerne baseret på θ_r . Alle tre prædiktionsmodeller vurderes derfor som værende anvendelige.

6 PRÆDIKTION AF PARTIKELDENSITET

6.1 PRÆDIKTION UD FRA NIR

For NIR modellerne er Det danske jordkartotek benævnt Lorens Hansen.

6.1.1 Estrup – Ø Bakker

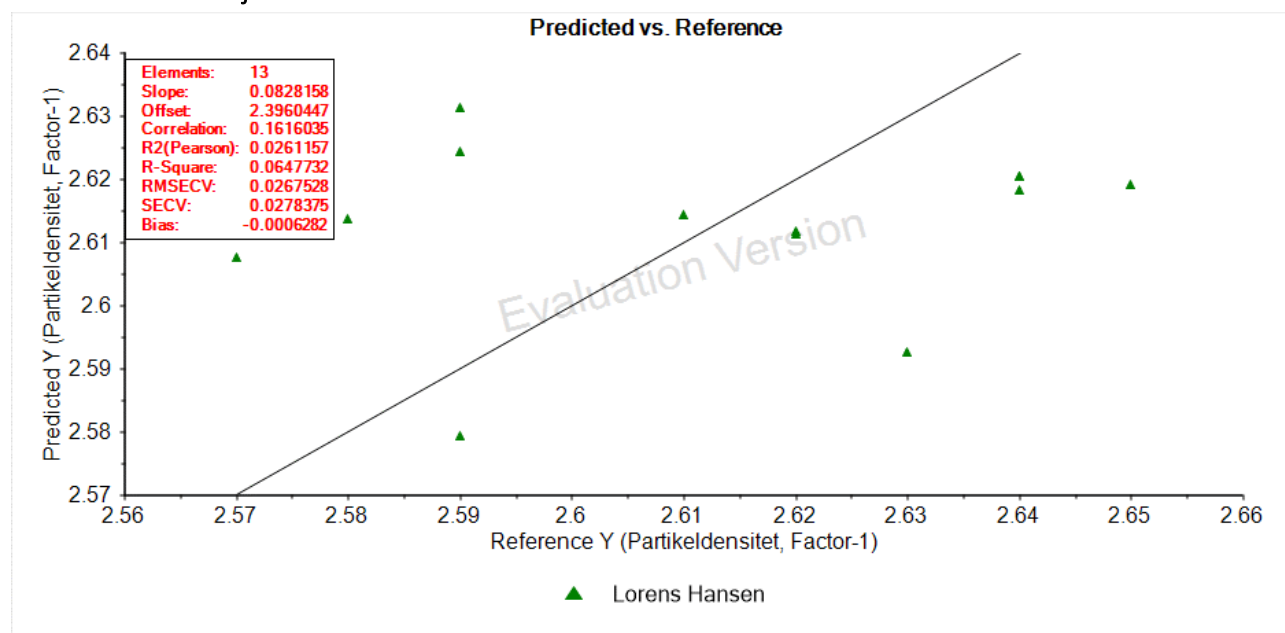


Figur 24 - Prædiktion af partikeldensitet på baggrund af NIR for Estrup - Ø Bakker.

Figur 24 viser prædiktionen af ρ_s på markskala. Modellen kan beskrives som lineær med en R^2 på 0.9. Spredningen i Ø Bakker datasættet er forventeligt baseret på spredningen i OM for Ø Bakker¹³. Modellen vurderes som værende meget præcis på baggrund af den lave RMSE på $0.08 \frac{g \text{ tørstof}}{cm^2 \text{ tørstof}}$. Alligevel er det værd at bemærke modellens vanskeligheder ved særlig lav ρ_s . Modellens usikkerhed stiger derfor med faldende ρ_s eller stigende OM.

¹³ En høj andel af OM sænker partikeldensiteten, da densiteten af OM typisk ligger ved $1 \frac{g \text{ tørstof}}{cm^2 \text{ tørstof}}$. Omvendt befinder mineraler sig typisk ved $2.65 - 2.7 \frac{g \text{ tørstof}}{cm^2 \text{ tørstof}}$ som betyder, at ρ_s vil befinde sig i det område, hvis andelen af OM er lav (Loll & Moldrup, 2000).

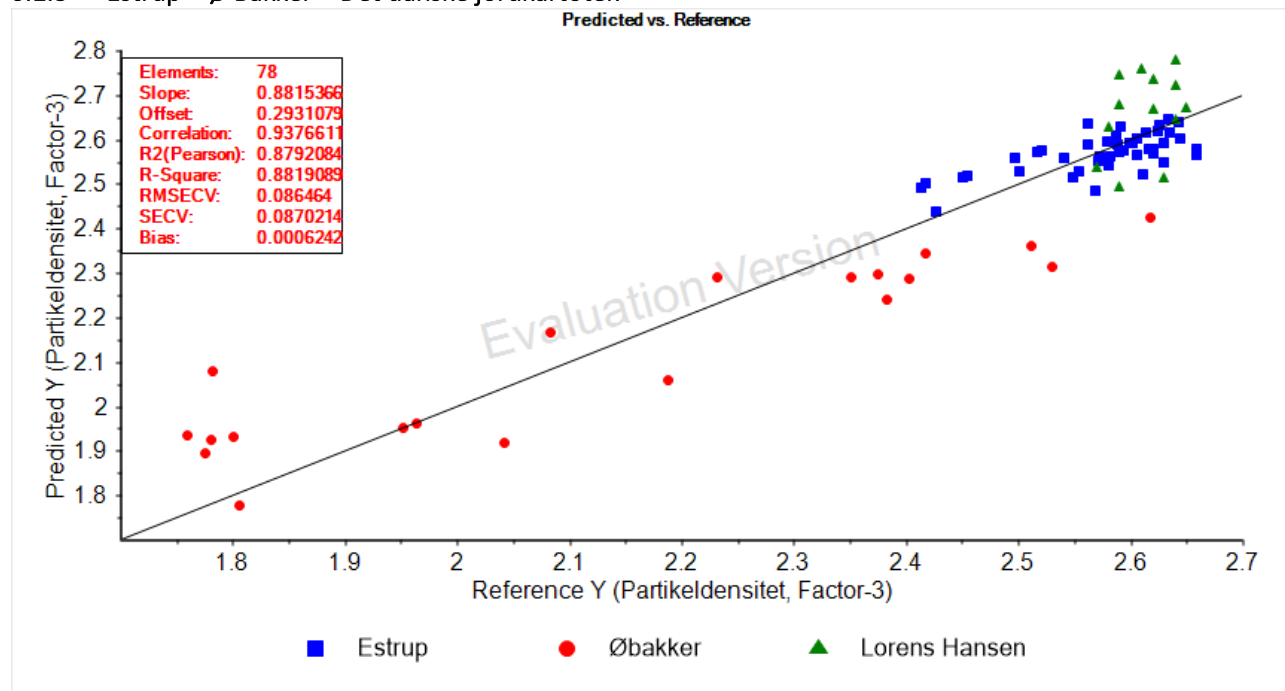
6.1.2 Det danske jordkartotek



Figur 25 - Prædiktion af partikeldensitet på baggrund af NIR for Det danske jordkartotek.

Figur 25 viser prædiktion af ρ_s på landsskala hvor det tydeliggøres at datamængden koblet med den manglende spredning i ρ_s vanskeliggør prædiktion på baggrund af NIR.

6.1.3 Estrup – Ø Bakker – Det danske jordkartotek



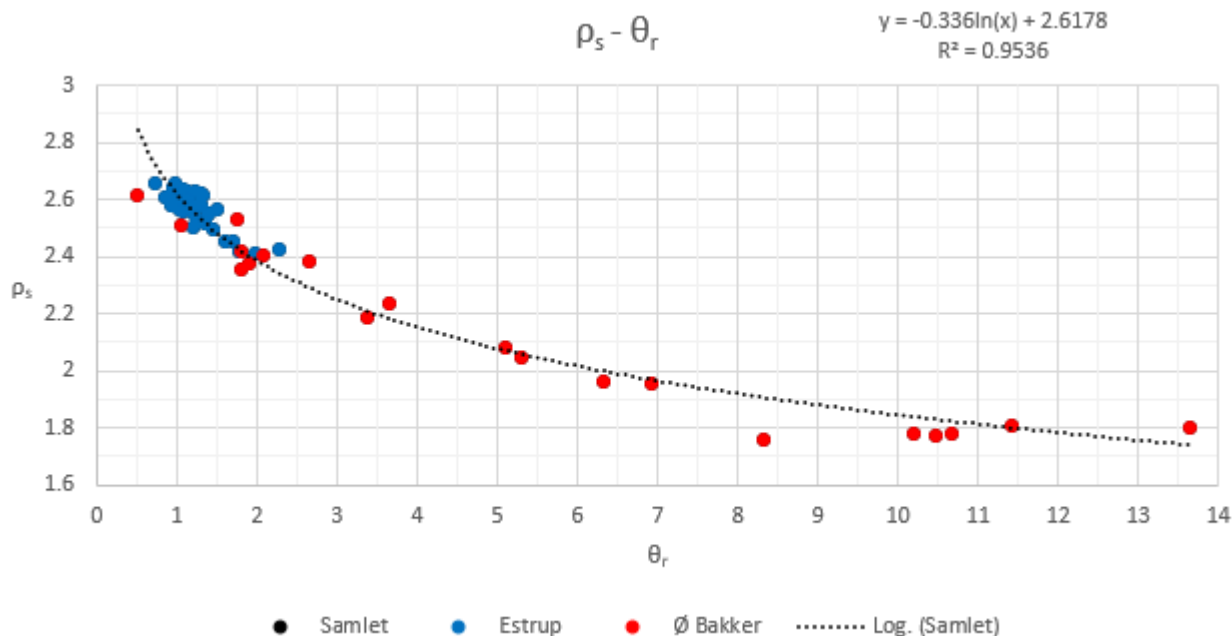
Figur 26 - Prædiktion af partikeldensitet på baggrund af NIR for Estrup - Ø Bakker - Det danske jordkartotek.

Figur 26 viser prædiktion af ρ_s for det samlede datasæt. Da datamængden af Det danske jordkartotek er relativt lille drager modellen mange ligheder med modellen for Estrup – Ø Bakker på Figur 24, og konklusionerne er derfor de samme. Regressionskoefficienten er dog en smule lavere på 0.88, og RMSE en smule højere på $0.9 \frac{\text{g tørstof}}{\text{cm}^2 \text{tørstof}}$. Det forklæres ved den relativt store fejlmargen for Det danske jordkartotek på Figur 26. Datasættet af Det danske jordkartotek ændrer dog ikke

meget for modellen Estrup – Ø Bakker, da prøverne befinder sig det samme sted som Estrup prøverne. I appendiks F er vist en NIR model for Ø Bakker – Det danske jordkartotek, der bekræfter tesen.

6.2 PRÆDIKTION UD FRA VANDINDHOLD I LUFTTØR JORD

6.2.1 Estrup – Ø Bakker

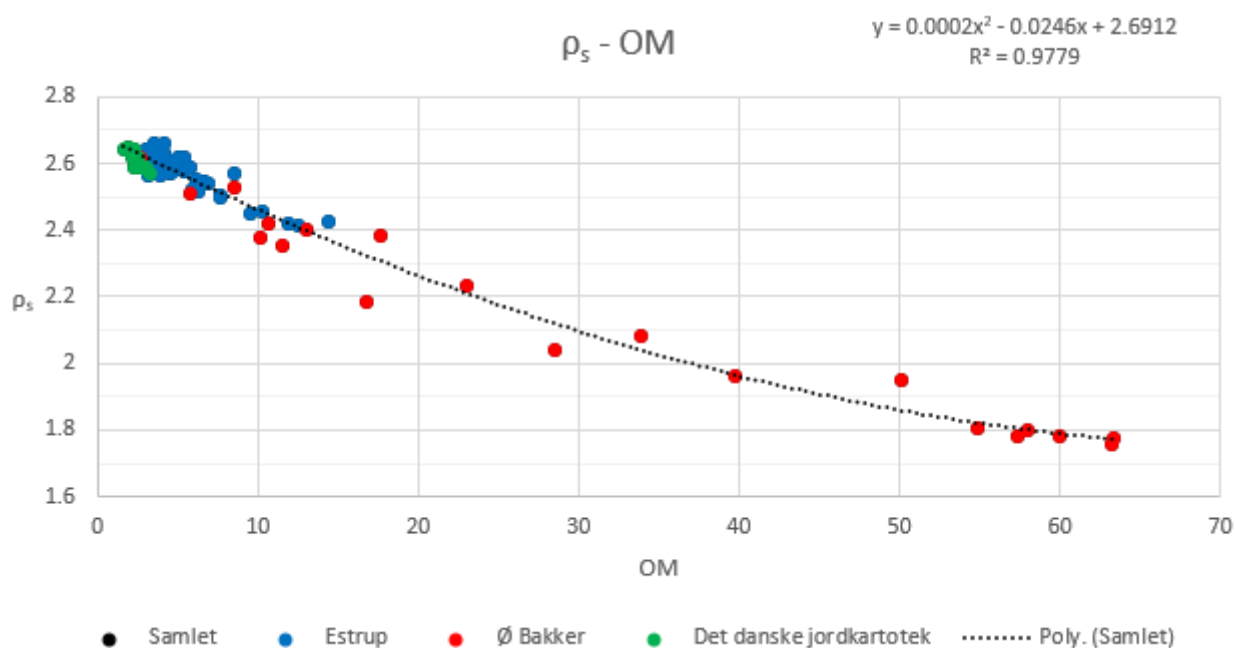


Figur 27 - Prædiktions af partikeldensitet på baggrund af vandindhold ved lufttør for Estrup - Ø Bakker.

Figur 27 viser prædiktions af partikeldensitet på markskala. Vandindhold ved lufttør viser sig at være en stærk prædiktionsparameter for partikeldensitet. Modellen beskrives bedst ved en logaritme hvor R^2 er 0.95. Modellen er præcis med en gennemsnitlig fejlmargen på $0.06 \frac{\text{g tørstof}}{\text{cm}^2 \text{tørstof}}$, hvilket er bedre end prædiktionsmodellen på baggrund af NIR for Estrup – Ø Bakker. Tydeligt er det, at indholdet af OM er styrende for θ_r , da alle prøverne for Ø Bakker der opfylder $\theta_r > 6.9\%$ indeholder mindst 50 % OM.

6.3 PRÆDIKTION UD FRA ORGANISK STOF

I afsnit 6.1 og 6.2 blev det påvist, at OM spiller en væsentlig rolle for prædiktionen af ρ_s på baggrund af NIR og θ_r . Det virker derfor logisk at teste OM som prædiktionsparameter.



Figur 28 - Prædiktion af partikeldensitet på baggrund af OM for Estrup - Ø Bakker - Det danske jordkartotek.

Figur 28 viser prædiktionsmodellen på baggrund af OM for det samlede datasæt af 78 jordprøver. Modellens regressionskoefficient er høj på 0.98 der beskrives som en andengradsligning. Den gennemsnitlige fejlmargen er 0.06, hvilket vurderes som meget lavt. Modellen bekræfter konklusionerne for spredningen i ρ_s på Figur 24, hvor ρ_s falder med stigende OM.

6.4 OPSAMLING

Tabel 7 - Sammenfatning af RMSE og regressionsværdier for prædiktionsmodellerne for partikeldensitet præsenteret i kapitlet og i appendiks F. RMSE og R² er noteret, RMSE (R²). Alle RMSE værdier er angivet i $\frac{\text{g tørstof}}{\text{cm}^2 \text{tørstof}}$.

Prædikti- onsmodel	Estrup – Ø Bakker	Ø Bakker – Det dan- ske jord- kartotek	Estrup – Ø Bakker – Det dan- ske jord- kartotek	Det dan- ske jord- kartotek	Estrup	Ø Bakker
NIR	0.08 (0.90)	0.12 (0.86)	0.09 (0.88)	Ingen sammen- hæng	0.03 (0.72)	Ikke te- stet
Vandind- hold i luft- tør jord	0.06 (0.95)	Ingen data	Ingen data	Ingen data	0.03 (0.70)	0.09 (0.92)
Måletid	0.09 (0.90)	Ingen data	Ingen data	Ingen data	Ingen sammen- hæng	0.07 (0.94)
Organisk stof	Ikke testet	Ikke te- stet	0.06 (0.98)	Ikke te- stet	Ikke testet	Ikke te- stet

For NIR modellerne er der ikke stor forskel for modellerne, der indeholder datasættet fra Ø Bakker, hvor den bedste NIR model baserer sig på Estrup – Ø Bakker. Ø Bakker er altså styrende for modelresultaterne, hvilket hænger sammen med at en del af prøverne fra Ø Bakker er meget organiske. Partikeldensiteterne for Ø Bakker er spredte langs 1:1 linjen, hvorimod partikeldensiteterne for Estrup og Det danske jordkartotek er mere komprimerede. Overordnet anses NIR modellerne, der indeholder Ø Bakker for at være gode baseret på deres statistiske parametre. Vandindhold ved lufttør for Estrup – Ø Bakker anses også for at være en god prædiktionsparameter, der viste sig at have en lavere RMSE og højere R² end NIR modellerne. Prædiktionsmodellen baseret på Ø Bakker datasættet alene viste sig at være god, hvilket bekræfter Ø Bakkers positive egenskaber for prædiktionen af ρ_s . Godkendte modeller for måletiden af Mettler – Toledo jordfugtighedsmålere er også tilstede, men som i afsnit 0 viste vandindhold ved lufttør at være en smule bedre. Den mest præcise model viste sig at være prædiktionsmodellen baseret på OM med en RMSE på 0.06.

Valget af prædiktionsmodel til videre brug er genstand for subjektivitet. Alle prædiktionsparametrene i Tabel 7 indeholdende Ø Bakker vurderes som værende anvendelige. NIR spektrofotometeret er dog det dyreste udstyr og samtidig det mindst præcise, men kræver mindst mulig tid i laboratoriet. Bestemmelsen af OM eller vandindhold ved lufttørring er begge nemme. Bestemmelsen af vandindhold ved lufttørring tager dog 31 dage, hvorimod bestemmelsen af organisk stof tager 1 – 2 dage. Da prædiktion på baggrund af OM er den mest præcise model falder valget på denne til videre brug.

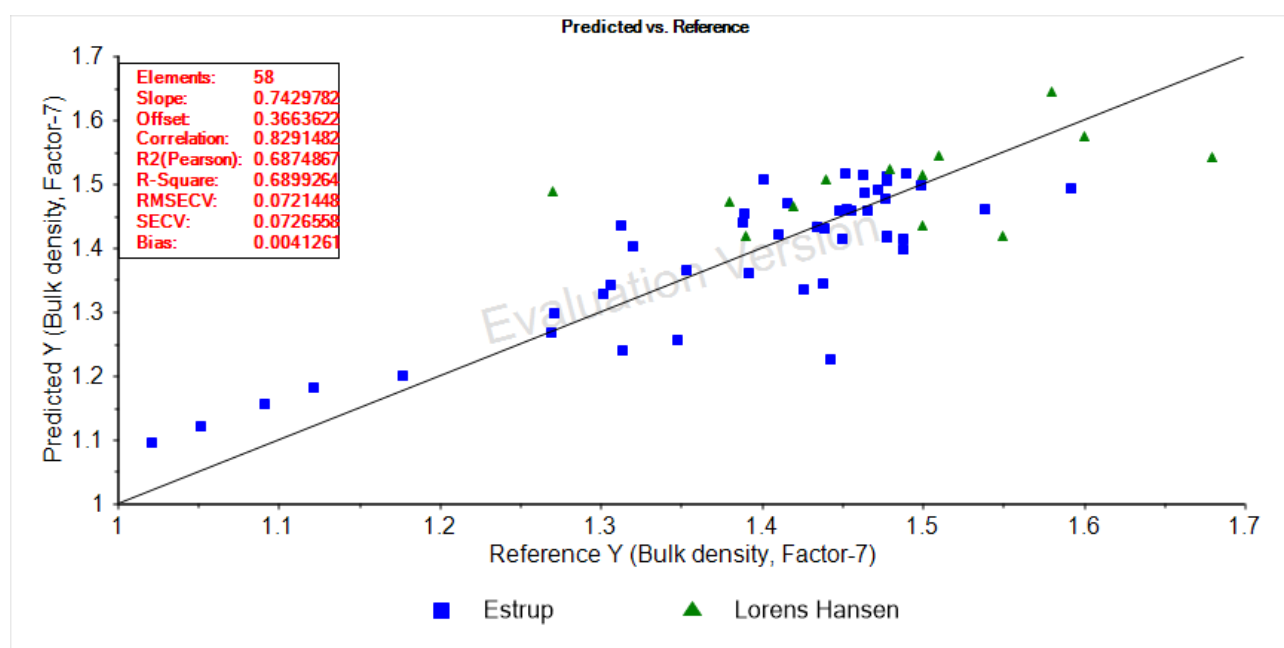
7 PRÆDIKTION AF FASE- OG TRANSPORTPARAMETRE

Kapitel 4, 5 og 6 præsenterede nye og let målbare metoder til prædiktions af de statiske parametre. Med de mest grundlæggende parametre prædikeret er opgaven i dette kapitel at prædiktere resten af parametrene i Figur 1 på side 6 ved brug af prædiktionsmodeller og universelle sammenhænge imellem dem.

7.1 PRÆDIKTION AF VOLUMENVÆGT

For prædiktions af volumenvægt er det i dette afsnit præsenteret to metoder. Den ene prædiktionsmodel baserer sig på NIR spektroskopi, hvor den anden baserer sig på CL og OM kombineret.

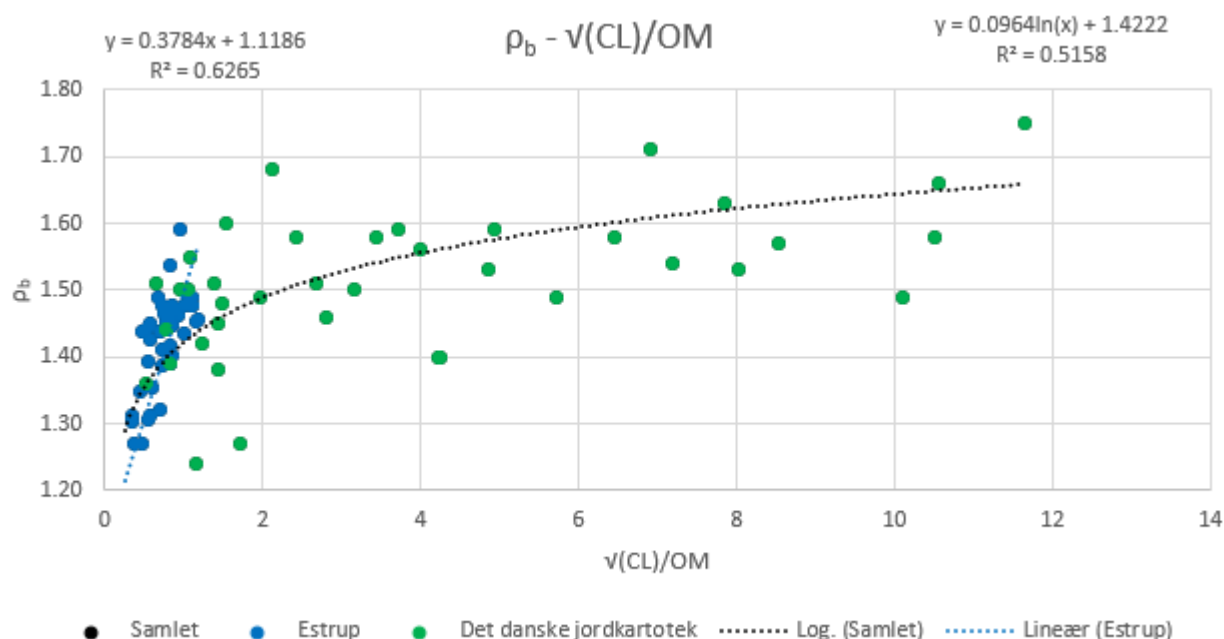
7.1.1 Prædiktions ud fra NIR



Figur 29 - Prædiktions af volumenvægt (bulk density) på baggrund af NIR for Estrup - Det danske jordkartotek.

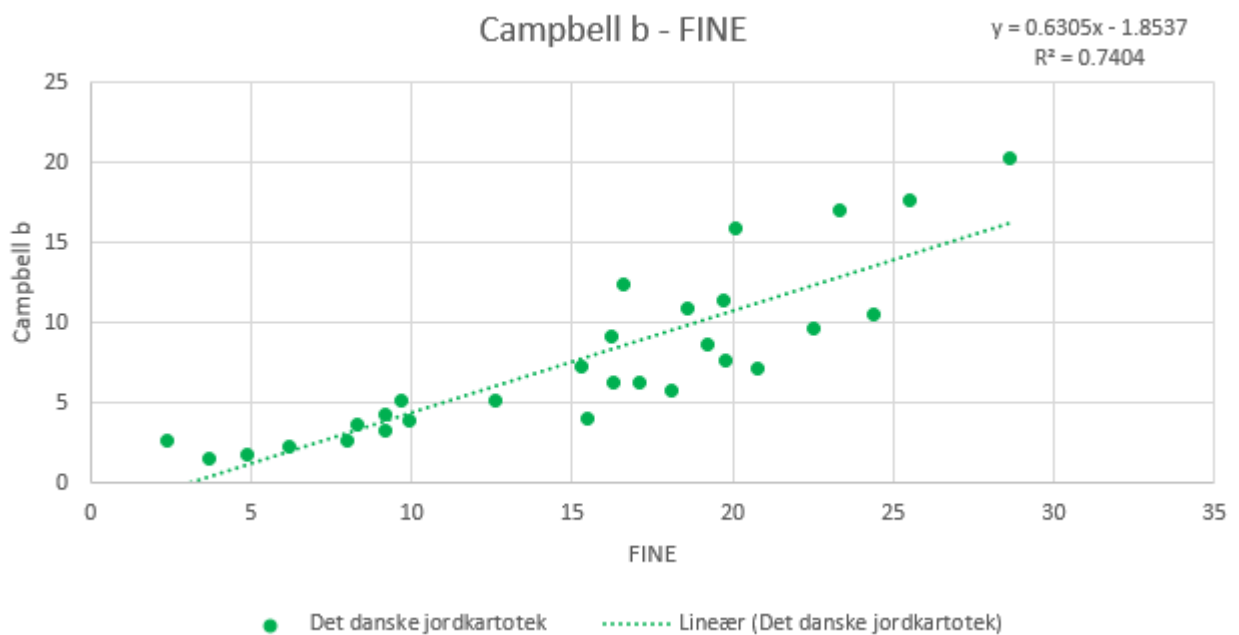
Modellen viser en lille lineær tendens med en regressionskoefficient på 0.69. Som nævnt i kapitel 0 forefindes der på nuværende tidspunkt ingen data for ρ_b for Ø Bakker, således er NIR modellen baseret på Estrup – Det danske jordkartotek. Selvom prædiktionsmodellen ikke er så stærk som for nogle af de andre NIR modeller, vurderes modellen som værende acceptabelt på baggrund af den gennemsnitlige fejlmargen på $0.07 \frac{\text{g tørstof}}{\text{cm}^2 \text{ jord}}$.

7.1.2 Prædiktions ud fra ler og organisk stof



Figur 30 - Prædiktions af volumenvægt på baggrund af CL og OM for Estrup og 41 jorder af Det danske jordkartotek. CL og OM er angivet som %.

Figur 30 viser prædiktions af volumenvægt som funktion af $\frac{\sqrt{CL}}{OM}$ igen på baggrund af Estrup – Det danske jordkartotek men også for Estrup datasættet alene. Kvadratroden af CL er et forsøg på at tillægge OM større betydning for prædiktions af ρ_b . Dataene Estrup – Det danske jordkartotek beskrives bedst ved en logaritme med en R^2 på 0.52. Et enkelt yderpunkt fra Det danske jordkartotek er fjernet for modellen, værende prøve nr. 55B i Det danske jordkartotek. Den gennemsnitlige fejlmargen er $0.11 \frac{g \text{ tørstof}}{cm^2 \text{ jord}}$, hvilket vurderes som værende acceptabelt. Bedre går det for Estrup datasættet alene med en R^2 på 0.63 og en RMSE på $0.08 \frac{g \text{ tørstof}}{cm^2 \text{ jord}}$. Begge prædiktionsparametre på Figur 29 og Figur 30 vurderes som værende anvendelige.



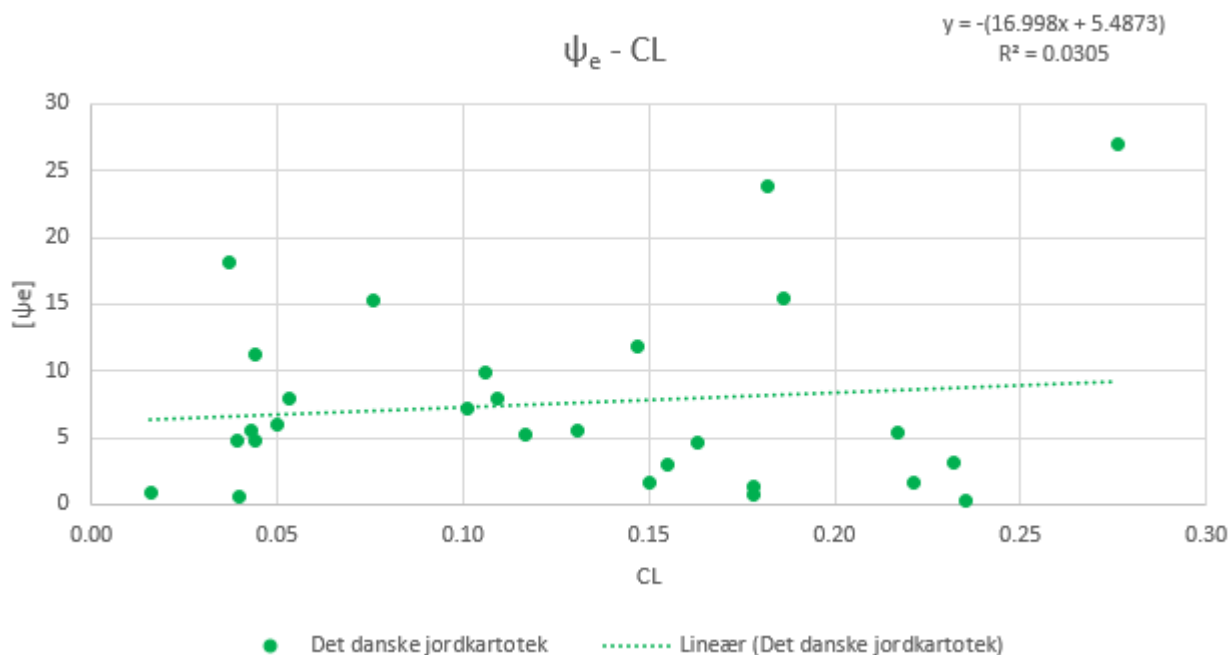
Figur 31 - Prædiktion af Campbell b ud fra FINE for 29 jorder af det Det danske jordkartotek. CL er angivet som $\frac{g \text{ CL}}{g \text{ Jord}}$.

7.2 PRÆDIKTION AF CAMPBELL B

Modellen på Figur 31 er beskrevet bedst som en lineær funktion med en R^2 på 0.74. Modelpræstationen er generelt pæn, men det skal dog bemærkes at usikkerheden er højere ved $FINE > 20$ %. Den gennemsnitlige fejlmargen ligger på 2.55 %, hvilket vurderes som værende anvendeligt for videre brug.

7.3 PRÆDIKTION AF VANDINDHOLD VED PF 2 (θ_{fc})

Prædiktionen af θ_{fc} baserer sig på Campbells retentionsmodel, jævnfør kapitel 0. For at kunne gøre brug af retentionsmodellen er det nødvendigt at kende ψ_e .



Figur 32 - Prædiktions af trykpotentiale ved luftindgang på baggrund af CL for 29 jorder af Det danske jordkartotek. CL er angivet som $\frac{g \text{ CL}}{g \text{ jord}}$

Figur 32 viser en prædiktions af ψ_e på baggrund af CL. ψ_e værdierne er fundne igennem Ligning 5, jævnfør afsnit 2.2. Modellen viser umiddelbart et dårligt datafit med en R^2 på 0.03. At bruge modellen er dog en bedre metode end at bruge konventionen på Figur 2, der lyder på $\psi_e = -10 \text{ cm H}_2\text{O}$. Modellen foreslår et lavere trykpotentiale for ψ_e stigende med CL indhold. Ud fra vandretentionsmodellerne i Det danske jordkartotek lader det til at være mere korrekt, da langt de fleste af disse har $\psi_e < -10 \text{ cm H}_2\text{O}$ (Hansen, 1976). Modellen vurderes dog som værende for usikker og på den baggrund fastsættes $\psi_e = -1 \text{ cm H}_2\text{O}$ som en fast værdi for videre anvendelse.

Med ψ_e bruges Campbells retentionsmodel (Ligning 2) til udregning af θ_{fc} , hvor $\psi = -100 \text{ cm H}_2\text{O}$.

7.4 PRÆDIKTION AF VANDINDHOLD VED PF 4.2 (θ_{wc})

Prædiktions af θ_{wc} baserer sig på det lineære forløb af vandretentionskurven, konventionelt imellem pF 4.2 – 6.9, jævnfør Figur 2. Det skal dog påpeges at θ_{wc} befinder sig på grænsen imellem den lineære og kurvede del af vandretentionskurven. Som benævnt i afsnit 2.2 kendes to punkter på den lineære del af vandretentionskurven¹⁴, hvilket muliggør bestemmelsen af hældningskoefficienten (Ligning 13), jævnfør også appendiks H.

Ligning 13 - Hældningskoefficienten (A) bestemmes ved to kendte punkter på den lineære del af vandretentionskurven

$$A = \frac{\psi_r - \psi_{Ovntør}}{\theta_r - \theta_{Ovntør}}$$

Ved at isolere for θ for det lineære forløb findes θ_{wc} , præsenteret i Ligning 14.

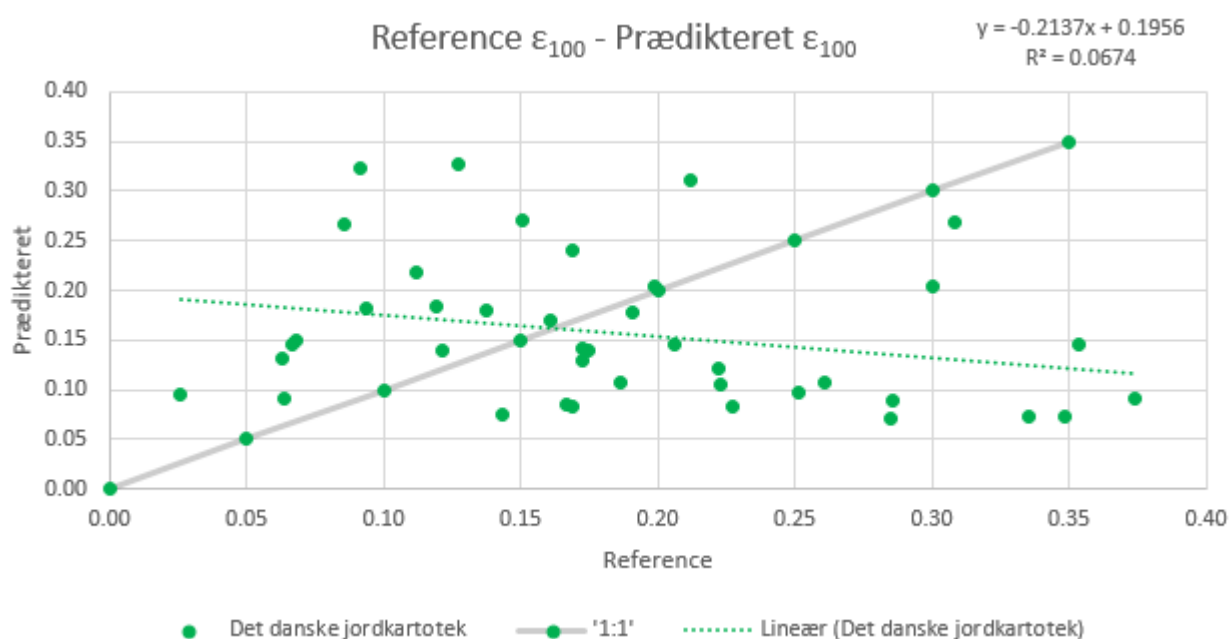
¹⁴ Ovntør: (0, 6.9) og lufttør (θ_r , 6.19), jævnfør afsnit 2.2 og 3.2.2.

$$\theta_{wc} = \frac{\psi_{wc} - \psi_{Ovntør}}{A}$$

Med θ_{wc} og θ_{fc} bestemt er det muligt at bestemme den ene evalueringsparameter for afgrødeproduktion, det plantetilgængelige vand (PAW).

7.5 PRÆDIKTION AF LUFTINDHOLD VED PF 2 (ε_{100})

For prædiktionen af $\frac{D_p}{D_0}$ og K_s er det nødvendigt at kende ε_{100} . Sammenhængene i kapitel 0 baner vejen for prædiktion af θ_s og θ_{fc} , hvor forskellen er ε_{100} .



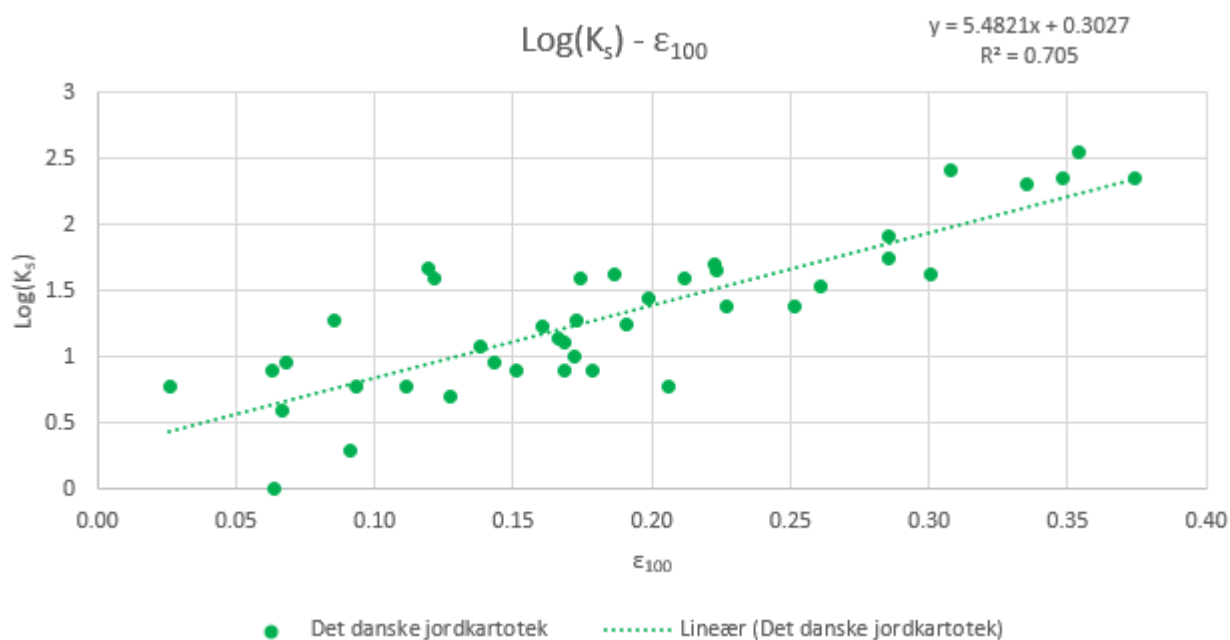
Figur 33 - Reference og prædikeret ε_{100} for beregningsmetoden baseret på kapitel 2. ε_{100} er angivet som $\frac{\text{cm}^3 \text{ luft}}{\text{cm}^3 \text{ jord}}$.

Figur 33 viser et plot af de målte ε_{100} mod prædikterede ε_{100} værdier for 41 jordprøver fra Det danske jordkartotek. CL, OM, ρ_s og ρ_b er prædikeret vha. NIR, ψ_e og Campbell b er prædikeret vha. Figur 31 og Figur 32 og θ_s og θ_{fc} er udregnet på baggrund af disse prædiktioner. Plottet indikerer en forholdsvis stor fejlprædiktion i forhold til referencen. Den gennemsnitlige fejlmargen er $0.13 \frac{\text{cm}^3 \text{ luft}}{\text{cm}^3 \text{ jord}}$. Det anerkendes at Figur 33 kun indeholder datasættet for Det danske jordkartotek, og billedet muligvis kan være anderledes for Estrup og Ø Bakker.

7.6 PRÆDIKTION AF MÆTTET HYDRAULISK LEDNINGSEVNE (K_s)

Med ε_{100} præsikteret er det muligt at bruge den empiriske sammenhæng i Ligning 10 for bestemmelsen af K_s . Ligning 10 baserer sig på 90 jordprøver udviklet af Poulsen et. al. (1999). Med et ønske om at bringe modellerne tættere på det anvendte datamateriale, forsøges det at udvikle en sammenhæng på baggrund af data fra Det danske jordkartotek.

7.6.1 Prædiktion ud fra luftindhold ved pF 2

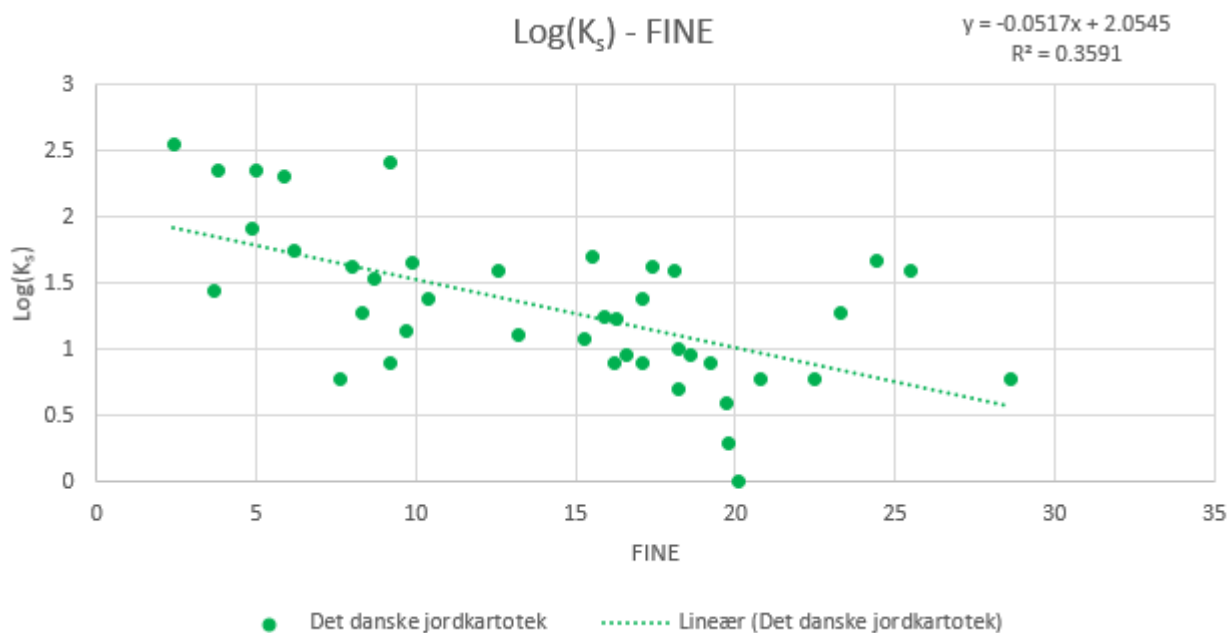


Figur 34 - Prædiktion af $\log K_s$ på baggrund af ε_{100} for 41 jorder af Det danske jordkartotek. K_s er angivet i $\log \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 10^{-4} \right)$ og ε_{100} i $\frac{\text{cm}^3 \text{ luft}}{\text{cm}^3 \text{ jord}}$.

Modellen angiver en nogenlunde god sammenhæng med en R^2 på 0.71. Det angives at $\log(K_s)$ er stigende ved stigende ε_{100} . Det giver god mening, da ε_{100} samtidigt angiver makroporøsiteten¹⁵ og størrelsen af K_s primært afhænger af makroporøsiteten (Loll & Moldrup, 2000). Modellen vurderes til at have en pæn RMSE på $0.31 \log \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 10^{-4} \right)$.

¹⁵ Andelen af porer $> 30 \mu\text{m}$ (Loll & Moldrup, 2000).

7.6.2 Prædiktation ud fra FINE



Figur 35 - Prædiktation af $\log(K_s)$ på baggrund af FINE for 41 jorder af Det danske jordkartotek. K_s er angivet i $\log\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 10^{-4}\right)$ og FINE er angivet som % w/w.

Modellen angiver en svag lineær tendens med en R^2 på 0.36. Det angives at en stigende andel af fine partikler sænker $\log(K_s)$. Jævnfør afsnit 2.1 giver det god mening, da andelen af fine partikler er styrende for pore størrelsesfordelingen og dermed ε_{100} som påvirker K_s . Modellens gennemsnitlige fejlmargen på $0.46 \log\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 10^{-4}\right)$ er dog højere end den direkte sammenhæng mellem $\log(K_s)$ og ε_{100} på Figur 34. Med afsæt i disse overvejelser bruges modellen på Figur 34 til videre brug i denne afhandling.

7.7 PRÆDIKTION AF DEN RELATIVE GASDIFFUSIONSKOEFFICIENT $\left(\frac{D_p}{D_0}\right)$

Da der ikke kendes til data for $\frac{D_p}{D_0}$ for Det danske jordkartotek, Estrup og Ø Bakker, er der ikke mulighed for at udvikle en prædiktationsmodel for dette. Prædiktationen af $\frac{D_p}{D_0}$ må derfor basere sig på den empiriske sammenhæng i Ligning 9.

8 ANVENDELSESMULIGHEDER

Dette kapitel præsenterer anvendelsesmulighederne for prædiktionsmodellerne præsenteret i kapitel 4, 5, 6 og 7 for Estrup datasættet. Kapitlet indledes med et beregningseksempel for Estrup Mark, der samtidig fastlægger et eksempel på en beregningsstrategi. Kapitlet afsluttes med en følsomhedsanalyse af Estrup datasættet.

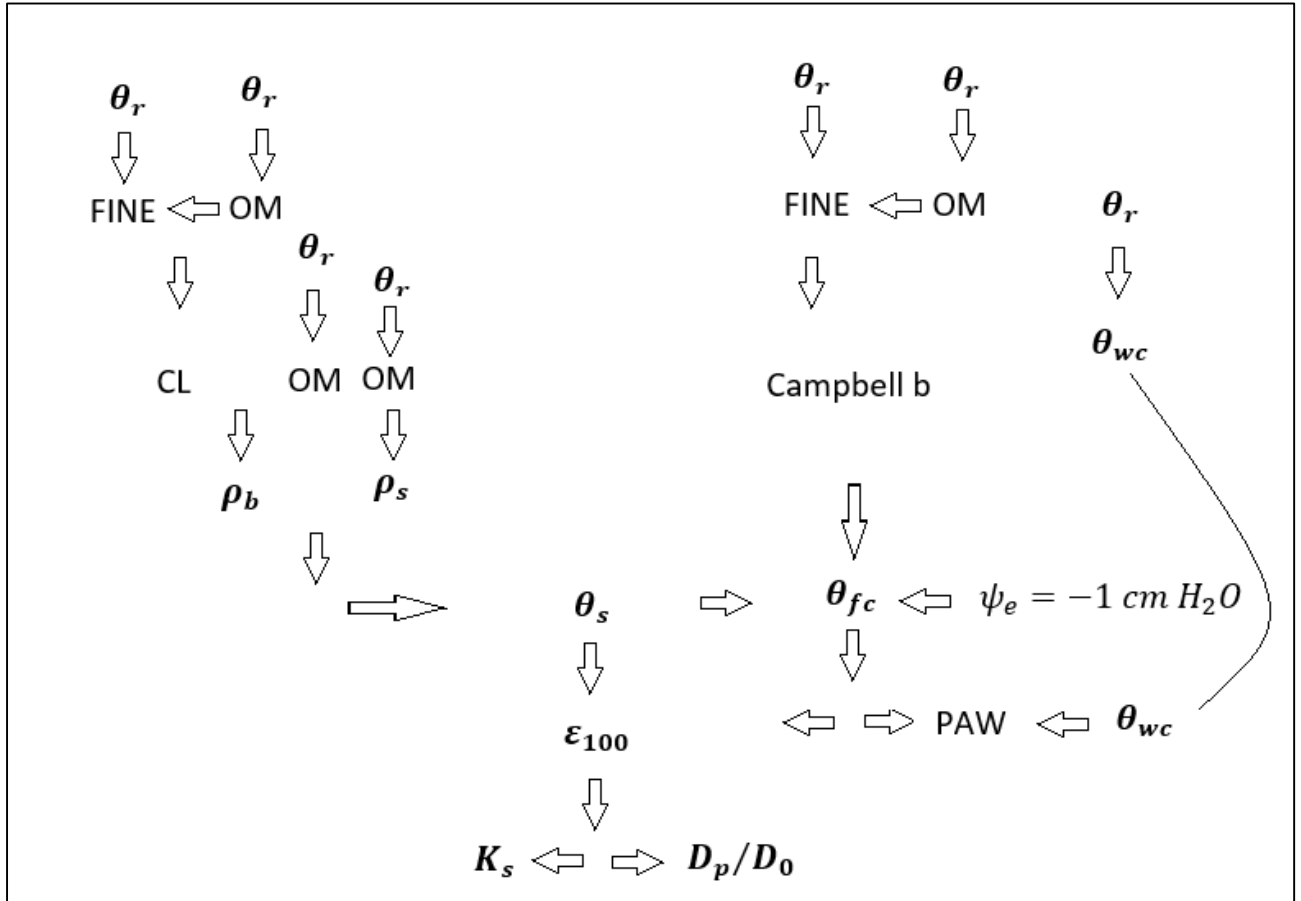
8.1 BEREGNINGSEKSEMPEL FOR ESTRUP MARK

Tabel 8 - Beregningseksempel for Estrup Mark med statistiske deskriptorer for hver parametre.

Parametre	Anvendt model	RMSE	Min.	Maks.	Middel	Median
θ_r [%]	-	-	0.85	2.28	1.21	1.13
OM [%]	Figur 16	1.06	1.82	14.68	5.20	4.46
FINE [%]	Figur 23	8.07	17.80	34.21	21.97	21.01
CL [%]	Ligning 12	-	4.85	14.16	11.56	12.09
CL [g/g]	:100	-	0.05	0.14	0.12	0.12
ρ_b $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Figur 30 - Estrup	0.08	1.18	1.90	1.43	1.41
ρ_s $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Figur 28	0.06	2.37	2.65	2.57	2.59
θ_s $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	Ligning 4	-	0.28	0.51	0.45	0.45
ψ_e [-cm H ₂ O]	Figur 32	6.76	-7.89	-6.31	-7.45	-7.54
Campbell b [-]	Figur 31	2.55	9.37	19.72	12.00	11.39
θ_{fc} $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	Ligning 2, hvor ψ_e er fastsat til -1 cm H ₂ O	-	0.17	0.40	0.30	0.30
θ_{wc} $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	Ligning 14	-	0.05	0.09	0.06	0.06
ϵ_{100} $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	Ligning 6	-	0.11	0.15	0.14	0.15
PAW $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	Ligning 8	-	0.12	0.31	0.24	0.24
D_p/D_0 $\left[\frac{cm}{cm}\right]$	Ligning 9	Ukendt	0.007	0.013	0.012	0.012
K_s $\left[\frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}\right]$	Figur 34	2.04	7.57	13.45	12.29	12.80

I Tabel 8 præsenteres et eksempel på en beregningsstrategi for bestemmelse af evalueringsparametrene PAW, $\frac{D_p}{D_0}$ og K_s ud fra måling af θ_r alene for Estrup Mark. Strategien er en funktion af de bedste modeller foreslået i kapitel 4, 5, 6 og 7. For hver parameter er minimum, maksimum, middel og median værdien præsenteret og for de parametre estimeret på baggrund af en model er

RMSE værdien også præsenteret. En enkelt jordprøve fra Estrup datasættet prædikterede ρ_b højere end ρ_s ¹⁶, hvilket resulter i en negativ θ_s og derigennem θ_{fc} , ε_{100} , PAW og $\frac{D_p}{D_0}$. Da kolonnen af minimumsværdier i Tabel 8 ville være påvirket heraf er denne jordprøve fjernet fra tabellen og i det resterende kapitel.



Figur 36 - Visualisering af beregningsstrategi i Tabel 8

I Figur 36 visualiseres beregningsstrategien i Tabel 8, og giver derigennem et klarere billede for den anvendte metode til at finde evalueringsparametrene $\frac{D_p}{D_0}$, K_s og PAW. Pilene imellem parametrene kan enten indikere en sammenhæng fundet kapitel 4, 5, 6 og 7 eller en af de universelle sammenhænge præsenteret i kapitel 0. Som Figur 36 viser er hele den anvendte beregningsstrategi baseret på måling af θ_r ved 31.8 % relativ luftfugtighed og indeholder således ingen data fra NIR spektroskopi. Fravalget af NIR data er ikke baseret på at NIR metoden er en dårligere prædiktionsparameter end θ_r , men reflekterer mere tilvalget af θ_r som en ny prædiktionsparameter til brug i dette valgte eksempel. Herigennem afprøves, om θ_r kan ses som en konkurrencedygtig prædiktionsparameter i forhold til den mere kendte prædiktionsmetode på baggrund af NIR.

¹⁶ Jordprøve 5: ρ_b prædikteret til $3.71 \frac{g}{cm^3}$ og indeholder desuden det største indhold af CL.

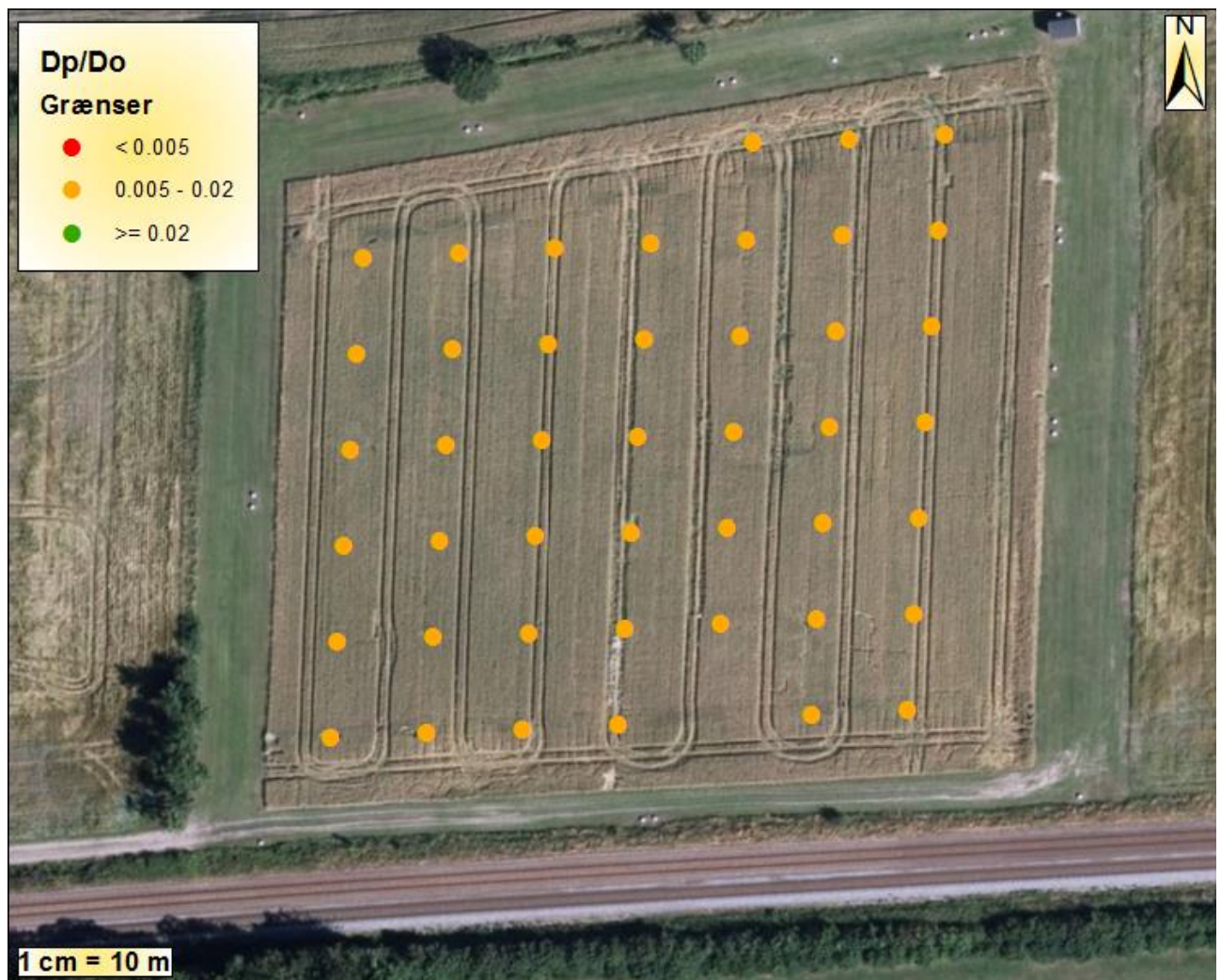
8.1.1 Kortlægning af mættet hydraulisk ledningsevne (K_s)



Figur 37 - Ortofoto af Estrup Mark, der viser kortlægningen af 44 jordprøver fra Estrup datasættet i forhold til forudbestemte grænser for rød-gul-grøn værdier af K_s . Ortofoto er af typen DDO®2014 fotograferet af COWI i maj-juli 2014. Enheden af K_s er $\frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}$.

Figur 37 viser kortlægningen af datasættet for Estrup i forhold til prædefinerede grænser for K_s , hvor Estrup jordprøve 5 er fjernet fra datasættet. Grænsen for et grønt punkt relaterer sig til afsnit 1.1, hvor $K_s < 10 \frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}$ for at jorden er i stand til at tilbageholde næringsstoffer og pesticider tilfredsstillende. For minimering af usikkerheden omkring denne grænse indføres en gul zone imellem $10 - 50 \frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}$ og hvis $K_s \geq 50 \frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}$ er punktet rødt. For Estrup Mark er der ingen røde punkter og domineres generelt af K_s værdier i den gule zone. Fire punkter er grønne, hvor tre af disse indeholder de højeste prædikterede indhold af OM og det sidste punkt har det højeste prædikteret indhold af CL.

8.1.2 Kortlægning af den relative gasdiffusionskoefficient ($\frac{D_p}{D_0}$)



Figur 38 - Ortofoto af Estrup Mark, der viser kortlægningen af 44 jordprøver fra Estrup datasættet i forhold til forudbestemte grænser for rød-gul-grøn værdier af $\frac{D_p}{D_0}$. Ortofoto er af typen DDO®2014 fotograferet af COWI i maj-juli 2014. Enheden af $\frac{D_p}{D_0}$ er $\frac{\text{cm luft}}{\text{cm jord}}$.

Figur 38 viser kortlægningen af datasættet for Estrup i forhold til prædefinerede grænser for $\frac{D_p}{D_0}$, hvor Estrup jordprøve 5 er fjernet fra datasættet. Grænserne for rød-gul-grøn relaterer sig igen til afsnit 1.1 inspireret af Stepniewskis (1980) (1981) zone på 0.005 – 0.02 for $\frac{D_p}{D_0}$, hvor nogen gasdiffusion er tilstede. Alle punkterne for Estrup Mark befinder sig i den gule zone og Estrup Mark er derfor i nogen grad iltet.

8.1.3 Kortlægning af plantetilgængelig vand (PAW)



Figur 39 - Ortofoto af Estrup Mark, der viser kortlægningen af 44 jordprøver fra Estrup datasættet i forhold til forudbestemte grænser for rød-gul-grøn værdier af PAW. Ortofoto er af typen DDO®2014 fotograferet af COWI i maj-juli 2014. Enheden af PAW er $\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$.

Figur 39 viser kortlægningen af datasættet for Estrup i forhold til prædefinerede grænser for PAW, hvor Estrup jordprøve 5 er fjernet fra datasættet. Jævnfør afsnit 1.1 har planterne brug for mindst $0.15 \frac{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{cm}^3 \text{Jord}}$ for at have tilpas adgang til vand og er derfor grænsen for et grønt punkt. Som benævnt, er det en fordel at have tre definerede zoner for at mindske usikkerheden for jordprøver, der bevæger sig tæt op af grænseværdien for grønt punkt. På den baggrund er $0.10 \frac{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{cm}^3 \text{Jord}}$ fastsat som minimumsgrænse for PAW og repræsenterer derfor grænsen for rødt punkt. Strukturen for Estrup Mark er god i forhold til PAW, da næsten alle punkter er grønne. Det enkelte gule punkt har det laveste prædikeret indhold af OM for alle punkterne og på den baggrund indikerer det, at indholdet af OM er styrende for PAW.

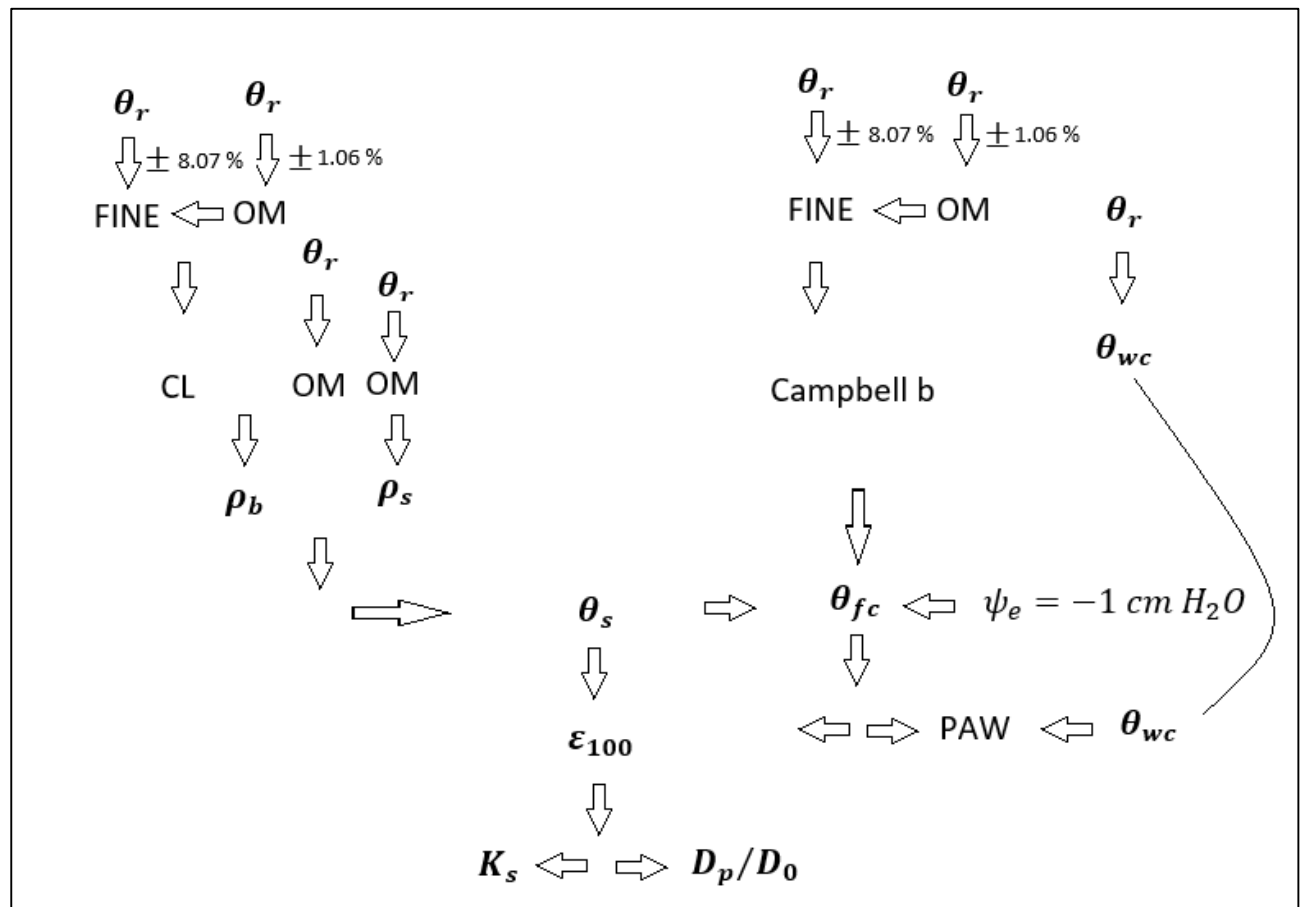
8.1.4 Kortlægning af Landbrug – Miljø – Klima



Figur 40 - Ortofoto af Estrup Mark, der viser kortlægningen af 44 jordprøver fra Estrup datasættet i forhold til forudbestemte kriterier for rød-gul-grøn værdier for Landbrug - Miljø - Klima. Ortofoto er af typen DDO®2014 fotograferet af COWI i maj-juli 2014.

Figur 40 viser kortlægningen af datasættet for Estrup i forhold til prædefinerede kriterier for de tre kontekster, hvor Estrup jordprøve 5 er fjernet fra datasættet. Kriterierne for god landbrugsjord baserer sig på PAW og $\frac{D_p}{D_0}$, en god miljøjord baserer sig på K_s og $\frac{D_p}{D_0}$ og en god klimajord baserer sig på $\frac{D_p}{D_0}$ alene, jævnfør afsnit 1.1. Kortlægningen baserer sig på den dårligste zone af evalueringsparametrene og da $\frac{D_p}{D_0}$ indgår i alle tre kontekster giver det, i dette eksempel, det samme billede som kortlægningen af $\frac{D_p}{D_0}$ på Figur 38. På denne baggrund er kriterierne for god jord i alle tre kontekster delvis opfyldt.

8.2 FØLSOMHEDSANALYSE



Figur 41 - Beregningsstrategi med RMSE for første række.

Figur 41 viser RMSE for prædiktionsmodellerne for FINE og OM. Således viser disse usikkerheden for første led af beregningsstrategien. Beregningsstrategien er forbundet med en usikkerhed for hvert led, der baserer sig på en prædiktionsmodel, hele vejen til evalueringsparametrene. I Tabel 9 vises en følsomhedsanalyse for en af jordprøverne fra Estrup datasættet baseret på RMSE værdien for prædiktionsmodellen for FINE og OM alene.

Tabel 9 - Følsomhedsanalyse for et af prøverne fra Estrup datasættet.

Parametre	Modelværdi	Fine – 8.07 %	Fine + 8.07 %	OM – 1.06 %	OM + 1.06 %
θ_r [%]	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
OM [%]	2.67	2.67	2.67	1.61	3.73
FINE [%]	18.83	10.76	26.90	18.83	18.83
CL [%]	13.49	5.42	21.56	15.61	11.37
CL [g/g]	0.13	0.05	0.22	0.16	0.11
ρ_b $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1.64	1.45	1.78	2.05	1.46
ρ_s $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	2.63	2.63	2.63	2.65	2.60
θ_s $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	0.38	0.45	0.32	0.23	0.44
ψ_e [$-cm H_2O$]	-7.78	-6.41	-9.15	-8.14	-7.42
Campbell b [-]	10.02	4.93	15.11	10.02	10.02
θ_{fc} $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	0.24	0.18	0.24	0.14	0.28
θ_{wc} $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ϵ_{100} $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	0.14	0.27	0.09	0.08	0.16
PAW $\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$	0.19	0.13	0.19	0.09	0.23
D_p/D_0 $\left[\frac{cm}{cm}\right]$	0.011	0.051	0.005	0.005	0.015
K_s $\left[\frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}\right]$	11.54	62.44	5.87	5.80	15.45

K_s kan altså variere mellem $5.80 - 62.44 \frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}$ baseret på usikkerheden for prædiktionen af FINE og OM alene. For $\frac{D_p}{D_0}$ er intervallet $0.005 - 0.051 \frac{cm\ luft}{cm\ jord}$ og PAW kan variere mellem $0.09 - 0.13 \frac{cm^3 H_2O}{cm^3\ jord}$.

Jævnfør grænserne for rød-gul-grøn for evalueringsparametrene i Figur 37, Figur 38 og Figur 39 kan K_s både være defineret som værende rød, gul eller grøn baseret på RMSE for modellerne for FINE og OM alene. Det samme kan siges for PAW, men for $\frac{D_p}{D_0}$ betyder usikkerheden kun mulighederne gul eller grøn. Med tanke på at dette kun gælder for RMSE for prædiktionsmodellerne for FINE og OM og derved kun en start på en følsomhedsanalyse, kan det forventes at usikkerhedsintervallet vil være en del højere for en komplet følsomhedsanalyse af alle prædiktionsmodeller anvendt i dette beregningseksempel. Den relativt høje usikkerhed i forhold til kortlægningen i et rød-gul-grøn grænsesystem er en svaghed for denne beregningsstrategi. Det kan på den baggrund overvejes, om beregningsstrategien vil være bedste tjent med færre antal af prædiktionsmodeller og flere fastlagte værdier såsom $\psi_e = -1\ cm\ H_2O$.

9 KONKLUSION

Målet for denne afhandling var at skabe en evalueringsmetode for jordkvalitet i tre prædefinerede kontekster, på baggrund af nye og let målbare jordfysiske parametre. De tre prædefinerede kontekster er landbrug, miljø og klima, hvortil det blev fastlagt at det for evalueringen af jordkvalitet for disse kontekster, kan basere sig på at kende K_s , $\frac{D_p}{D_0}$ og PAW.

Jordevalueringsmetoden skulle have lave økonomiske og tidsmæssige omkostninger, lav usikkerhed og basere sig på en simpel jordprøvetagning. På den baggrund valgtes to prædiktionsmetoder værende måling af θ_r og NIR spektroskopi. Ud fra data fra én af disse prædiktionsmetoder var målet at kunne estimere evalueringsparametrene K_s , $\frac{D_p}{D_0}$ og PAW og i sidste ende jordkvaliteten i de tre kontekster. Prædiktionen af evalueringsparametrene kunne dog ikke gøres direkte og involverede en række af mellemberegninger af andre jordfysiske parametre. Overordnet kunne parametrene inddeles i et hierarki af statistiske parametre, faseparametre og transportparametre, hvortil K_s og $\frac{D_p}{D_0}$ er transportparametre og PAW en faseparameter.

9.1 PRÆDIKTION AF STATISKE PARAMETRE

Prædiktionen af de statistiske parametre baserede sig på NIR spektroskopi, θ_r og måletiden for Mettler-Toledo jordfugtighedsmålere.

For prædiktionen af OM på baggrund af NIR for det totale datasæt viser det sig at Ø Bakkers store spredning i OM dominerer modellen. Dette har betydning for prædiktionen af lave OM indhold under 5 %, da RMSE for modellen er 6.87 %. RMSE værdien virker umiddelbar som høj, men skal ses i forhold til de ekstremt høje OM indhold for Ø Bakker. Således er det anbefalelsesværdigt for NIR prædiktioner af jorder med forhåndskendte lave indhold af OM at bruge modellen for Estrup – Det danske jordkartotek, der har en RMSE værdi på 0.84 %. På markskala (Estrup – Ø Bakker) viser alle tre prædiktionsmetoder gode datafit og pæne RMSE. RMSE viser sig dog at være lavest for prædiktionsmodellen på baggrund af θ_r for alle datasæt indeholdende Ø Bakker. Særligt bemærkelsesværdigt er dog at prædiktionsmodellen for Estrup – Ø Bakker på baggrund af θ_r er kun god for jorder, hvor OM > CL.

For prædiktionen af CL på baggrund af θ_r og måletid var det nødvendigt at tage hensyn for det organiske materiales større indflydelse end CL på θ_r og måletid. En samlet parameter for de fine partikler blev defineret som FINE, der tillagde indhold af OM dobbelt så stor indflydelse end indhold af CL. Prædiktionsmodellerne på baggrund af θ_r og måletid prædikterede derfor i stedet indholdet af FINE. For Estrup – Ø Bakker markerer de to prædiktionsmetoder for FINE ved samme karakteristika og pæne RMSE, hvor prædiktionsmodellen på baggrund af θ_r har den laveste RMSE. NIR modellen for det samlede datasæt viser sig at have en lavere RMSE (1.84 %) end NIR modellen for Estrup – Ø Bakker (2.19 %). Karakteristisk for NIR modellerne er at Estrup og Det danske jordkartotek fungerer som anker i modellerne, hvor Ø Bakker er mere spredt i forhold til 1:1 linjen. Alle tre prædiktionsmetoder vurderes som værende anvendelig.

For prædiktionen af ρ_s på baggrund af NIR viste det sig, at det organiske Ø Bakker datasæt er styrende for modelresultaterne. Dette har til grund i at langs med 1:1 linjen er ρ_s for Ø Bakker mere spredt end Estrup og Det danske jordkartotek. NIR modellerne anses som værende meget gode baseret på de statistiske parametre. θ_r og måletid viser sig også at være stærke prædiktionsmetoder og har ligeså gode RMSE som NIR. OM blev også testet som prædiktionsparameter

for ρ_s som viser sig at have den laveste RMSE og på den baggrund er valgt som bedste prædiktionsmodel. At vælge prædiktionsmodel på baggrund af den laveste RMSE i dette tilfælde kan dog diskuteres, da RMSE for alle modellerne er så tætte på hinanden, at den statistiske usikkerhed negligerer forskellene. Dog kan valget af OM som prædiktionsmetode forsvares, da bestemmelsen af OM er nem og dermed går hånd i hånd med et omkostningseffektivt evalueringssystem for jordkvalitet.

9.2 PRÆDIKTION AF FASE- OG TRANSPORTPARAMETRE

Prædiktionen af fase- og transportparametre baserede sig både på modellerede sammenhænge imellem de forskellige jordfysiske parametre men også på mere universelle sammenhænge.

Dog er prædiktionen af volumenvægt en undtagelse, da ρ_b blev forsøgt prædikeret ud fra NIR spektroskopi. NIR modellen viser i nogen grad en lineær sammenhæng og har en pæn RMSE på $0.07 \frac{\text{g tørstof}}{\text{cm}^2 \text{ jord}}$. ρ_b blev også forsøgt prædikeret ud fra CL og OM, som giver nogenlunde den samme RMSE som for NIR. Begge modeller vurderes som værende anvendelige.

Campbell b blev forsøgt prædikeret ud fra FINE, som giver en lineær relation, der især er god for FINE procenter under 20. For prædiktionen af θ_{fc} og herigennem ψ_e viste prædiktionsmodellen for ψ_e på baggrund af CL at være for upræcis og ψ_e blev som konsekvens heraf sat som en fast værdi. 1:1 plottet af ε_{100} på baggrund af den anvendte beregningsstrategi for bestemmelsen af ε_{100} indeholder en forholdsvis stor fejlprædiktion. Dog er det vigtigt at bemærke, at datasættene for prædiktionsmodellerne overvejende er influeret af Estrup – Ø Bakker, som i 1:1 plottet på Figur 33 bruges til prædiktion af ε_{100} i Det danske jordkartotek.

Den mættede hydrauliske ledningsevne blev forsøgt modelleret på baggrund af ε_{100} og FINE, hvortil prædiktionsmodellen på baggrund af ε_{100} giver den laveste RMSE.

9.3 ANVENDELSESMULIGHEDER

For at eksemplificere en anvendelsessituation er Estrup prøverne udvalgt som beregningseksempel. Beregningsstrategien og herved evalueringssystemet er valgt til at basere sig på måling af θ_r alene. Fra θ_r er det så muligt at prædiktere jordfysiske parametre hele vejen til evalueringsparametrene.

Kortlægningen af K_s for Estrup Mark viser at de fleste jordprøver har en K_s mellem $10 - 50 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 10^{-4}$, som er defineret som et gult punkt. De resterende punkter er grønne med en $K_s < 10 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 10^{-4}$, som markerer sig ved at have de tre højeste prædikterede indhold af OM og det fjerde punkt det højeste prædikterede indhold af CL. Kortlægningen af den anden evalueringsparameter $\frac{D_p}{D_0}$ viser at alle kortlaggede 44 jordprøver har en $\frac{D_p}{D_0}$ mellem $0.005 - 0.02 \frac{\text{cm luft}}{\text{cm jord}}$. De er således alle defineret i den gule zone, hvor diffusion af særligt den livsvigtige ilt til planterne i nogen grad er aktiv. Kortlægningen af den sidste evalueringsparameter PAW viser at næsten alle jordprøver har en $\text{PAW} \geq 0.15 \frac{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{cm}^3 \text{Jord}}$, hvilket er den grønne zone, hvor planterne ikke mangler vand. En enkelt prøve har en PAW mellem $0.10 - 0.15 \frac{\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{cm}^3 \text{Jord}}$, hvilket er den gule zone. Prøven markerer sig ved at have det højeste prædikterede indhold af CL og det laveste prædikterede indhold af OM. For den kontekstbaserede kortlægning af landbrug, miljø og klima er resultatet influeret af at $\frac{D_p}{D_0}$ indgår som evalueringsparameter i alle tre kontekster. Ud fra forsigtighedsprincippet om at

tage laveste fællesnævner fik kortlægningen af disse kontekster således den samme karakter som for kortlægningen af $\frac{D_p}{D_0}$. Alle prøverne fik en gul karakter som indikerer delvist opfyldt kriterier.

Resultaterne i beregningseksemplet skal dog tages med et forbehold, da en følsomhedsanalyse af det første led af prædiktionsmodeller viser en usikkerhed, der er af en størrelse, der har påvirkning for kortlægningen af rød-gul-grønne zoner. Det første led af prædiktionsmodeller er prædiktionsmodellerne for FINE og OM. Følsomhedsanalysen viser at K_s kan variere mellem $5.80 - 62.44 \frac{cm}{s} \cdot 10^{-4}$, $\frac{D_p}{D_0}$ kan variere mellem $0.005 - 0.051 \frac{cm\ luft}{cm\ jord}$ og PAW kan variere mellem $0.09 - 0.13 \frac{cm^3 H_2O}{cm^3\ Jord}$. En komplet følsomhedsanalyse inkluderende alle prædiktionsmodeller vil gøre disse usikkerhedsintervaller endnu større. I forhold til målet om lav usikkerhed for evalueringsmetoden er dette derfor ikke opnået. Ideen er dog godt på vej, og kræver mere arbejde i forhold til at sænke usikkerheden. En metode til at sænke usikkerheden kan være at evalueringsmetoden skal basere sig på færre prædiktionsmodeller og flere fastsatte værdier, såsom ψ_e er blevet i denne afhandling.

10 PERSPEKTIVERING

Bæredygtig arealanvendelse

Karakteristisk for denne afhandling er opdelingen af evalueringsmetoden for jordkvalitet i tre kontekster. Tankegangen bag er at jordkvalitet som begreb er subjektiv, da jordkvalitet er kontekstafhængigt. Arealmæssig formålsopdeling er praktisk i forhold til opbygningen af et evalueringssystem, men repræsenterer ikke bæredygtig arealanvendelse. En bæredygtig arealanvendelse fokuserer på helheden af jordarealet, hvor et enkelt areal fortrinsvist skal opfylde adskillige formål. I denne sammenhæng handler det således om at kunne skabe værdier for K_s , $\frac{D_p}{D_0}$ og PAW der alle ligger i den grønne zone. De arealmæssige formål behøver ikke at begrænse sig til landbrug, miljø og klima. Eksempelvis er herlighedsværdien i den moderne tid også blevet et nævneværdigt formål, hvor arealets produktions- eller beskyttelsesmæssige fokus ikke er i fokus men mere det visuelle. Det kan dog argumenteres, at de forskellige formål ofte hænger sammen. Hvis arealet har en god kvalitet for landbrug, miljø og klima er herlighedsværdien formentlig også opnået, da et godt areal formentlig vil vurderes som havende lav herlighedsværdi.

Hvad kan der gøres ved et rødt punktresultat?

Et evalueringssystem for jordkvalitet er stadig i udvikling. Denne afhandlings konklusioner er en start på et evalueringssystem, men mangler stadig en del i forhold til sænkning af usikkerheden. Ikke desto mindre er et fuldt ud færdigudviklet evalueringssystem kun halvdelen af et samlet jordforvaltningssystem. Jordforvaltningssystemet kan bestå af to halvdele, den første værende evalueringen af jordkvalitet. Anden halvdel omhandler en handlingsplan i det tilfælde, at evalueringssystemet giver et resultat til forbedring. Der eksisterer allerede meget viden om jordforbedring i en landbrugskontekst, da landbrug har været det primære formål for jordarealer i mange århundreder. For at fuldende et såkaldt jordforvaltningssystem mangler der stadig mere viden for jordforbedring i andre sammenhænge, eksempelvis miljø og klima. Mere centralt mangler der viden for jordforbedring, der anskuer jordarealet holistisk, som et areal der skal opfylde adskillige formål. På den måde kan dette jordforvaltningssystem markedsføre sig selv som en bæredygtig jordforvaltning.

Remote sensing som dataindsamlingsmetode for NIR spektroskopi

Dataindsamlingsmetoden for evalueringssystemet i denne afhandling har baseret sig på at skulle være nem, således lægmænd ville kunne indsamle jordprøver til analyse. Derfor har evalueringssystemet baseret sig på at kunne anvende løse jordprøver og ikke intakte cylinderprøver, som ikke kan forventes ville prøvetages regelmæssigt korrekt af lægmænd. Disse konklusioner gør sig stadig gældende for prædiktionsmodeller på baggrund af θ_r . Prædiktionsmodeller på baggrund af NIR spektroskopi har dog et potentiale i forhold til remote sensing med droneteknologi som dataindsamlingsmetode. En fremtidig situation hvor et NIR spektrofotometer kan fastgøres til en drone, der overflyver et areal og indsamler data in situ. Fordelen er at ingen fysisk jordprøve skal tages og tidsbesparingen kan derfor formentlig blive endnu større. En videreudvikling af denne teknologi kunne være et fastgjort apparat på dronen, der kan give pålidelige prædiktioner af evalueringsparametrene in situ og herefter anbefale en jordforbedringsstrategi afhængig af områdets formål. Apparatets bagvedliggende beregning af evalueringsparametrene, kan være baseret på en mere præcis variant af beregningsstrategien præsenteret i denne afhandling.

Stadigvæk skal der dog en del mere forskning til at nå dertil. NIR spektroskopi kræver stadig en lufttør jord for resultatets brugbarhed og jordforvaltningssystemet er stadig ikke færdigudviklet.

11 REFERENCER

- Ashman, M. R. & Puri, G., 2002. *Essential Soil Science - A clear and concise introduction to soil science*. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Balaine, N. & Clough, T. J., 2016. Soil gas diffusivity controls N₂O and N₂ emissions and their ratio. *Soil Science Society American Journal*, Issue 80 - Just published.
- Ball, B. C., Dobbie, K. E., Parker, J. P. & Smith, K. A., 1997. The influence of gas transport and porosity on methane oxidation in soils. *Journal of geophysical research*, Issue 102 Nr. D19, pp. 23301-23308.
- Buckingham, E., 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. *USDA Bur. Soil*, Issue 25.
- Clark, R. N., 1999. Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. I: A. N. Rencz, red. *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*. s.l.:John Wiley & Sons, Inc..
- FAO, u.d. *Soil assessment*. [Online]
Available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-assessment/en/>
[Senest hentet eller vist den 9 maj 2016].
- Hansen, L., 1976. Jordtyper ved statens forsøgsstationer. *Tidsskrift for Planteavl*, pp. 742-758.
- Hermansen, C., 2015. *Udvikling af simple modelkoncepter samt synlig-nær infrarød spektroskopi til effektiv bestemmelse af jordparametre til risikovurdering på foruerende grunde*, Aalborg Universitet, Civilingeniør uddannelsen i Miljøteknologi: Kandidatspeciale.
- Knadel, M. et al., 2014. The Effect of Moisture Conditions - From Wet to Hyper dry - On Visible Near-Infrared Spectra of Danish Reference Soils. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 78, pp. 422-433.
- Knadel, M. et al., 2012. Visible-Near Infrared Spectra as a Proxy for Topsoil Texture and Glacial Boundaries. *Soil Science of America Journal*, Issue 77, pp. 568-579.
- Loll, P. & Moldrup, P., 2000. *Soil Characterization and Polluted Soil Assessment*. Kursusmateriale på Institut for Miljøteknologi Aalborg Universitet red. Aalborg: Danish Environmental Consulting og Aalborg Universitet.
- Miljøstyrelsen, 2001. *Pesticides in air and in precipitation and effects on plant communities*, Pesticidforskningsprogram: Bekæmpelsesmiddelforskning nr. 57.
- Moldrup, P. et al., 2000. Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, januar, Issue 64 nr. 1, pp. 94-100.
- Paradelo, M. et al., u.d.. *Vis-NIR spectroscopy predicts contaminant sorption in soil at field scale*. Tjele: Upubliceret materiale.
- Poulsen, T. G., Moldrup, P., Yamaguchi, T. & Jacobsen, O. H., 1999. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. *Soil Science*, Issue 164 Nr. 12, pp. 877-887.

- Soil Conservation Service , 1961. *Land-Capability Classification*. 210 red. Washington: U.S. Department of Agriculture.
- Stenberg, B., Rossel, R. A. V., Mouazen, A. M. & Wetterlind, J., 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in Agronomy*, Issue 107, pp. 163-215.
- Stepniewski, W., 1980. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. *Polish Journal of Soil Science*, Issue 1 nr. 13, pp. 3-13.
- Stepniewski, W., 1981. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. *Polish Journal of Soil Science*, Issue 2 nr. 14, pp. 3-13.
- Summer, M. E., 2000. *Handbook of soil science*. New York: CRC Press.
- Viborg Kommune, u.d. *Ø Bakker i Nørreådal*. [Online]
Available at: <http://oplevelser.viborg.dk/Natur/Sevaerdigheder/Oe-Bakker>
[Senest hentet eller vist den 6 maj 2016].
- Wäldchen, J. et al., 2012. Estimation of clay content from easily measurable water content of air-dried soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Issue 175, pp. 367-376.

APPENDIKS

A1: MÅLEDATA

Partikeldensitet

Estrup numre: 1 – 45 Ø Bakker numre: 46 – 65

Prøve nr.	A	B	Gns.	Prøve nr.	A	B	Gns.
[-]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[-]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	2.64	2.59	2.61	36	2.59	2.62	2.61
2	2.54	2.60	2.57	37	2.58	2.60	2.59
3	2.55	2.55	2.55	38	2.62	2.59	2.61
4	2.58	2.57	2.57	39	2.61	2.62	2.61
5	2.66	2.66	2.66	40	2.59	2.60	2.59
6	2.62	2.59	2.61	41	2.65	2.64	2.64
7	2.66	2.63	2.64	42	2.61	2.65	2.63
8	2.45	2.46	2.46	43	2.66	2.60	2.63
9	2.49	2.36	2.43	44	2.63	2.64	2.63
10	2.41	2.41	2.41	45	2.53	2.59	2.56
11	2.54	2.57	2.55	46	1.79	1.81	1.80
12	2.56	2.60	2.58	47	1.77	1.80	1.78
13	2.56	2.58	2.57	48	1.76	1.79	1.78
14	2.60	2.60	2.60	49	1.79	1.78	1.78
15	2.43	2.47	2.45	50	1.96	1.94	1.95
16	2.45	2.38	2.42	51	1.79	1.82	1.81
17	2.49	2.50	2.50	52	2.63	2.60	2.62
18	2.53	2.51	2.52	53	2.41	2.42	2.42
19	2.58	2.57	2.58	54	2.27	2.20	2.23
20	2.54	2.59	2.56	55	2.07	2.09	2.08
21	2.54	2.64	2.59	56	1.77	1.75	1.76
22	2.48	2.52	2.50	57	2.03	2.06	2.04
23	2.54	2.55	2.54	58	2.38	2.38	2.38
24	2.56	2.48	2.52	59	2.52	2.54	2.53
25	2.59	2.58	2.58	60	2.39	2.42	2.40
26	2.65	2.67	2.66	61	1.95	1.98	1.96
27	2.62	2.64	2.63	62	2.17	2.21	2.19
28	2.63	2.63	2.63	63	TABT	2.35	2.35
29	2.65	2.60	2.62	64	2.39	2.37	2.38
30	2.57	2.60	2.59	65	2.51	2.52	2.51
31	2.60	2.63	2.62				
32	2.57	2.61	2.59				
33	2.62	2.58	2.60				

34	2.63	2.61	2.62
35	2.57	2.68	2.62

Vandindhold ved lufttørring til given luftfugtighed

Estrup numre: 1 – 45 Ø Bakker numre: 46 – 65

Prøvenr.	θ [% w/w]	Prøvenr.	θ [% w/w]
1	0.94	46	13.64
2	1.51	47	10.68
3	1.39	48	10.46
4	1.13	49	10.19
5	0.72	50	6.92
6	0.85	51	11.42
7	0.99	52	0.51
8	1.71	53	1.79
9	2.28	54	3.66
10	1.98	55	5.11
11	1.2	56	8.33
12	0.95	57	5.31
13	1.06	58	2.65
14	0.98	59	1.74
15	1.6	60	2.08
16	1.78	61	6.33
17	1.46	62	3.37
18	1.26	63	1.8
19	0.93	64	1.91
20	1.02	65	1.05
21	1.13		
22	1.2		
23	1.38		
24	1.35		
25	1.29		
26	0.99		
27	1.09		
28	1.22		
29	1.29		
30	1.27		
31	1.32		
32	1.08		
33	0.95		
34	1.05		
35	1.11		

Måletid for Mettler – Toledo jordfugtighedsmåler
Estrup numre: 1 – 45 Ø Bakker numre: 46 – 65

Prøvenr.	Måletid [min:sek]	Decimal [min]	Prøvenr.	Måletid [min:sek]	Decimal [min]
1	Ikke målt	Ikke målt	46	09:08	9.13
2	Ikke målt	Ikke målt	47	10:08	10.13
3	Ikke målt	Ikke målt	48	09:11	9.18
4	Ikke målt	Ikke målt	49	08:53	8.88
5	Ikke målt	Ikke målt	50	07:37	7.62
6	Ikke målt	Ikke målt	51	11:01	11.02
7	Ikke målt	Ikke målt	52	01:21	1.35
8	03:53	3.88	53	03:23	3.38
9	03:19	3.32	54	04:33	4.55
10	03:52	3.87	55	05:03	5.05
11	02:23	2.38	56	08:07	8.12
12	01:45	1.75	57	05:16	5.27
13	01:30	1.50	58	03:27	3.45
14	02:12	2.20	59	02:33	2.55
15	01:29	1.48	60	02:44	2.73
16	02:14	2.23	61	06:36	6.60
17	02:04	2.07	62	03:48	3.80
18	02:18	2.30	63	02:46	2.77
19	01:31	1.52	64	01:45	1.75
20	01:20	1.33	65	01:25	1.42
21	02:08	2.13			
22	01:57	1.95			
23	02:05	2.08			
24	02:12	2.20			
25	02:35	2.58			
26	01:58	1.97			
27	01:50	1.83			
28	02:27	2.45			
29	01:57	1.95			
30	02:36	2.60			
31	02:39	2.65			
32	03:07	3.12			
33	01:46	1.77			
34	02:11	2.18			
35	02:36	2.60			

APPENDIKS A2 – J

CD