

Notat omkring remote sensing af kulstof

Projekt 8512 – Få styr på kulstoffet i jorden

December 2022

Forfattere:

Nanna Sommer

Rita Hørfarter

Rasmus Emil Jensen

Indhold

1	INDLEDNING	3
2	ESA, DET EUROPÆISKE RUMAGENTUR - SENTINEL SATELLITTER	3
2.1	SENTINEL-1	4
2.2	SENTINEL-2	4
2.3	SENTINEL-3	5
2.4	SENTINEL-4 OG 5	5
3	LITTERATURSTUDIE	6
3.1	KULSTOF I JORD – KAN DET MÅLES MED SATELLIT?	6
3.2	HYPERSPEKTRALE ELLER MULTISPEKTRALE SATELLITBILLEDER	6
3.3	SOC-NIVEAUET PÅVIRKER PRÆCISIONEN.....	7
3.4	SAMMENSETNING AF BILLEDER FRA FORSKELLIGE TIDSPUNKTER	7
3.5	MODELLERINGSTEKNIKKER	8
3.6	KOMBINEREDE MODELLER.....	8
3.7	KONKLUSION.....	8
4	AARHUS UNIVERSITET OG NYT LANDSDÆKKENDE KULSTOFKORT	9
5	SMART CLOUD FARMING.....	9
5.1	PILOTPROJEKT	9
5.2	KONKLUSION.....	11
6	SOIL OPTIX	11
7	SOC-MÅLINGER FRA DRONE.....	12
8	LITTERATUR.....	13

1 INDLEDNING

Dette notat indeholder en oversigt over, hvor langt teknologierne er, med hensyn til at bestemme kulstofindholdet i jorden fra satellitter. Sentinel satellitterne er gennemgående i alle eksemplerne, så derfor præsenteres en kort oversigt over, hvad de hver især kan og deres formål.

Dernæst beskrives to cases, hvor kulstofprocenter bestemt i laboratorie sammenholdes med satellit beregnede værdier.

Til sidst er medtaget en kort gennemgang af litteraturen om, hvad der findes om kulstof bestemmelse fra satellitter.

Til bestemmelse af kulstof i jord fra satellit anvendes både Sentinel-1 og Sentinel-2 og ofte sammen med Landsat satellitterne.

2 ESA, DET EUROPÆISKE RUMAGENTUR - SENTINEL SATELLITTER

Copernicus programmet administreres af EU-Kommissionen, mens udviklingen af Copernicus foregår i samarbejde med en række europæiske organisationer og fora blandt andet European Space Agency (ESA). Copernicus Space Component omfatter en række satellitter kaldet 'Sentinels', hvis overordnede formål er at bidrage til en forbedret forvaltning af jordens miljø, at øge forståelsen af effekterne af klimaaendringer og at sikre civil sikkerhed og beredskab.

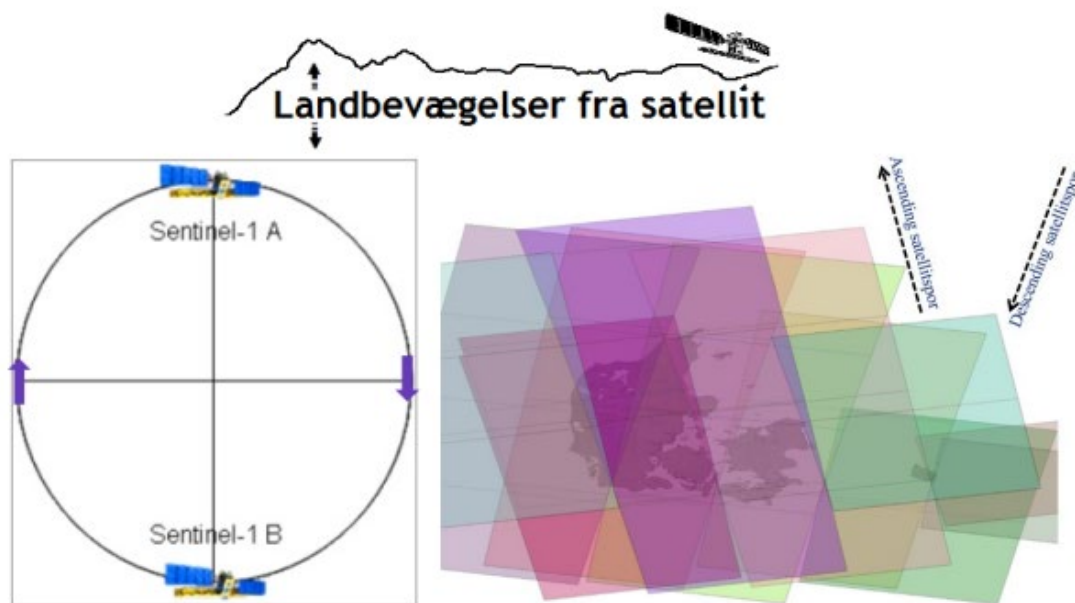
Copernicus programmet omfatter seks forskellige typer Sentinel satellitter, hvor hver type er udviklet med henblik på indsamling af særlige typer af data (tabel 1).

Tabel 1. Gennemgang af de seks typer Sentinel satellitter.

Satellit	Instrumenter monteret på satellitten	Opløsning, meter	Interval mellem genoverflyvning af samme område, antal dage	Kan måle om natten og ved skyer og regn	Hovedformål
Sentinel-1	Radar	20	3	Ja	Observere bevægelser i jordens overflade (hav og is)
Sentinel-2	Optisk sensor	10, 20, 60	4	Nej	Observere vegetation og afgrøder (skov og landbrug)
Sentinel-3	Radar, optisk sensor og temperaturmåling	300	1	Ja og Nej	Indsamler både optiske og termiske data samt radar-data
Sentinel-4,5 og 6	Spektrometer – målinger af drivhusgasser	5,5 km*3,5 km	<1	Ja	Atmosfæriske satellitter

2.1 Sentinel-1

Sentinel-1 er en konstellation bestående af to radar-satellitter Sentinel-1A og -1B. Den første blev opsendt i april 2014 og den anden i april 2016. Idet Sentinel-1B flyver i samme kredsløb som Sentinel-1A, men forskudt med 180°, overflyves det samme satellitspor nu hver sjette dag. Med alle satellitspor over Danmark bliver der taget målinger mindst hver tredje dag. Det skyldes, at alle steder dækkes af minimum fire satellitspor (figur 1).



Figur 1: Til venstre: Tvillingsatellitterne Sentinel-1A og Sentinel-1B i deres kredsløb. Satellitterne flyver i samme bane men forskudt 180° af hinanden. Til højre: Satellitspor fra Sentinel-1 over Danmark. Kilde: Styrelsen for datasikkerhed og effektivisering 2020, "Introduktion til kortlægning af landbevægelser fra satellit".

Sentinel-1 er en radar, hvilket betyder, at den kan levere data både dag og nat, i al slags vejr - også når det er overskyet og regner. Dette gør disse data særlig velegnede for de polare egne, som f.eks. ved kortlægning af havisens udbredelse og bevægelser. Konstellationen af Sentinel-1 A og -B gør, at der kan leveres data med stor hyppighed fra samme geografiske område. Dette gør disse data velegnede i mange sammenhænge, ved overvågning af ændringer i brug af landområder eller i f.eks. beredskabssammenhæng.

En vigtig anvendelse af disse data er til detektion af selv meget små ændringer i jordoverfladen (landhævninger og – sænkninger). Overflyvning med Sentinel-1 dækker et område på 250 km med 20 meters opløsning.

Anvendelse: landhævninger/landsænkninger, bevægelse af gletsjere, fjeldskred. Derudover til at overvåge ulovligt fiskeri.

2.2 Sentinel-2

Sentinel-2A og 2B leverer optiske billeder i høj opløsning (10 meter) beregnet for land- og skovbrug. Populært kan det siges, at missionen har "farvesyn". Dette indebærer, at satellittens data er særlig anvendelig til vegetationskortlægning og ved overvågning af ændringer i vegetationsdække. Satellittens data kan også anvendes ved forureningsovervågning af søer eller kystnære havområder samt beredskabsmæssigt i forbindelse med naturkatastrofer.

Sentinel-2 har påmonteret et multispektral kamera, der i alt måler på 13 spektrale bånd.

Desværre kan Sentinel-2 ikke se gennem skyer, regn og diset vejr. Så på vores breddegrader kan der opstå lange perioder uden data, på trods af at Sentinel-2 kommer over det samme sted i Danmark hver 3.- 4. dag.

Data fra Sentinel-2 anvendes især til monitorering af vegetation f.eks. NDVI, NDRE, plantedække generelt og vand (jordfugtighed) m.m.

Anvendelse: Overvåger vegetation generelt. Indenfor landbruget anvendes data især til bestemmelse af biomasse i forbindelse med omfordeling af gødning. Data benyttes også til europæisk kontrol af, hvilken afgrøde der reelt dyrkes på marken (CAP - *Common Agricultural Policy*)

2.3 Sentinel-3

Formålet med Sentinel-3 missionen er, at måle havoverfladetopografi, hav- og landoverfladetemperatur og hav- og landoverfladefarve med høj nøjagtighed og pålidelighed, for at understøtte havprognosesystemer, miljøovervågning og klimaovervågning. Det er den mest avancerede af Sentinel satellitterne og er en kombination af Sentinel-1 og Sentinel-2. Derudover måler den "Land Surface Temperature" vha. infrarød radiation, som er et udtryk for temperaturen på overfladen.

Sentinel-3 leverer både optiske- og radar data af høj nøjagtighed til hav- og landtjenester. Satellittens data om farve, højde og temperatur af havoverflader og på land anvendes til f.eks. prognoser for havstrømme, kortlægning af algeopblomstring eller forudsigelser af ekstreme hændelser som stormfloder eller oversvømmelser af kystnære områder. Data optaget over land kan eksempelvis bruges til detektion af brande.

Data fra Sentinel-3 har en opløsning på 300 meter.

Sentinel-3 er ikke anvendt direkte indenfor landbruget på grund af en lav opløsning i forhold til de ovenfor beskrevne Sentinel satellitter, men Sentinel-3 kan indgå som supplement til andet satellitdata.

Anvendelse: Højdemålinger af landhævninger, bølgehøjder, temperatur på land og hav samt til bestemmelse af vegetation på større skala.

2.4 Sentinel-4 og 5

Hovedformålet med Sentinel-4 missionen er, at overvåge vigtige luftkvalitetssporstoffer og aerosoler over Europa til støtte for Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) ved høj rumlig opløsning og med en hurtig gensynstid.

Sentinel-4, -5 og -5 precursor er tænkt som komplementære elementer i en konstellation, der tjener CAMS's specifikke behov. Sentinel-4 vil levere data på timebasis om troposfæriske bestanddele over Europa, primært til luftkvalitetsapplikationer. Målarterne for Sentinel-4 omfatter de vigtigste luftkvalitetsparametre NO₂ (nitrogendioxid), O₃ (ozon), SO₂ (svovldioxid), HCHO (formaldehyd), CHOCHO (glyoxal) og aerosoler.

Komplementært vil Low Earth Orbiting (LEO)-missionerne Sentinel-5 og Sentinel-5 precursor levere Sentinel-4-målarterne og derudover CO (kulilte), CH₄ (methan) og stratosfærisk O₃ (ozon) med global daglig dækning for klima, luftkvalitet og ozon/overflade UV-applikationer.

3 LITTERATURSTUDIE

3.1 Kulstof i jord – kan det måles med satellit?

Jordens organiske kulstof (Soil Organic Carbon - SOC) bestemmes typisk ved at tage jordprøver, som sendes til spektroskopi-undersøgelse i et laboratorium. Dette er både dyrt i mandetimer og udstyr. Mange forskere arbejder med at bruge satellitbilleder til at bestemme SOC (Castaldi et al., 2016).

Men er forskningen og den teknologiske udvikling af satellitter kommet så langt, at satellitbilleder kan bruges til at bestemme SOC lige så godt som laboratorieanalyser?

Vi har gennemgået den nyeste litteratur på området og vil i de efterfølgende afsnit lave en kort gennemgang af, hvor langt forskningen er kommet og hvilke overvejelser man skal være opmærksomme på.

3.2 Hyperspektrale eller multispektrale satellitbilleder

Optiske satellitbilleder bliver taget med sensorer som måler elektromagnetisk stråling. Sensorerne måler i bånd over det elektromagnetiske spektrum – der er stor forskel på antallet og bredden af disse bånd. Kort fortalt giver flere bånd en højere spektralopløsning. For at kunne lave et estimat af SOC med satellit, er der behov for en høj spektralopløsning. Specielt er det vigtigt, at sensoren har smalle bånd i det kortbølgede infrarøde område, også kaldet SWIR regionen (960-2440 nm). Nogle studier har endda afgrænset området endnu mere, til at være mellem 1900-2400 nm (Castaldi et al., 2016). SWIR leverer vigtig information om lignin (1600-1800 nm samt 2100 nm), cellulose (2100 nm) samt amid og alifatiske grupper i jordens organiske materiale (2300 nm).

Helt generelt er der flere områder i det elektromagnetiske spektrum, som er vigtige for SOC-estimeringen. Også det synlige spektrum (VIS: 400-700 nm) indeholder vigtig information om jordens indhold af organiske materialer (Gholizadeh et al., 2018; Mzid et al., 2022).

Et studie af Castaldi et al., 2019 har vist, de områder i det elektromagnetiske område, der er vigtige for en præcis estimering, kan variere mellem lokaliteter. Komponenterne i det organiske materiale kan variere, hvilket ses i forskellige spektralresponsen.

Hyperspektrale satellitbilleder har hundred eller tusindvis af smalle bånd. Fra 2000-2017 havde NASA EO-1-satellitten oppe, som havde den hyperspektrale sensor Hyperion ombord. Sensoren målte i 220 bånd, som hver havde en bredde på 10 nm. (Hyperion, 2019).

Der er dog problemer med den høje kompleksitet i de hyperspektrale satellitbilleder. Brugen af de mange smalle bånd giver støj, som besværliggør en præcis bestemmelse af SOC. Specielt er der problemer med mange forstyrrelser netop i SWIR-regionen (Castaldi et al., 2016).

Multispektrale satellitbilleder består derimod typisk kun af 3-10 brede bånd, de har derfor en væsentlig lavere spektralopløsning. Oftest måler de ikke engang i SWIR-regionen, hvorved de ikke kan bruges til formålet. Sentinel-2 er en multispektral sensor med 13 bånd, hvor et af båndene måler mellem 2100-2280 nm, som netop er indenfor SWIR regionen. Studier har vist, at Sentinel-2 er bedre til at estimere SOC end Hyperion var, simpelthen på grund af de mange forstyrrelser ved at benytte et stort antal smalle bånd (Castaldi et al., 2016).

Teoretisk burde hyperspektrale sensorer være vejen frem, for at øge præcisionen af SOC estimering med satellitbilleder, men man er nødt til at komme omkring støjen i SWIR-regionen. En måde kan være at udvikle analyser, som kan fjerne denne støj. Dette arbejder flere forskere på (Meng et al., 2020). En anden løsning er at udvikle bedre hyperspektrale sensorer, som måler i de ønskede bølglængder, men med mindre støj. Det bliver spændende om for eksempel den tyske EnMAP satellitmission opsendt i 2022 (EnMAP,

2022) eller den italienske PRISMA opsendt i 2019 (PRISMA, 2022) kan levere på disse kriterier. De studier, som har arbejdet med PRISMA satellitbilleder ser lovende ud.

Støjen på bølgelængderne måles som Signal to Noise Ratio (SNR). Hyperion havde en SNR på 40:1 for bølgelængden 2125 nm (Castaldi et al., 2016). Mzid et al., 2022 oplyser, at PRISMA har en SNR på >100:1 i området 1950-2350 nm og ved 2100 nm er den oppe på >200:1. Dette betyder, at de har formået at reducere støjen i SWIR-regionen, hvorved der er større chance for succes med SOC-estimeringen.

Forsøg lavet i Italien tyder på, at PRISMA er væsentlig bedre til at estimere SOC end Sentinel-2, specielt ved høje SOC-værdier, hvor Sentinel-2 ellers har en tendens til at underestimere (Mzid et al., 2022). Der skal holdes øje med studier, som tester PRISMA satellitbilleder i områder, der minder mere om de danske i forhold til klima, jordtyper og jordfugtighed.

3.3 SOC-niveauet påvirker præcisionen

Studier har vist, at hvor god Sentinel-2 sensoren er til at estimere SOC, afhænger af mængden af SOC i det undersøgte område. Generelt har det vist sig, at i områder med høje niveauer af SOC, er estimeringen af SOC mere præcis. Modsat har sensoren svært ved at estimere høje SOC-niveauer, i områder med et generelt lavt niveau af organisk kulstof i jorden (Gholizadeh et al., 2018).

Både He et al., 2021 og Castaldi et al., 2019 har i deres studier registreret, at høje SOC underestimeres og lave SOC overestimeres. Castaldi et al., 2019 vurderer, at det skyldes at høje SOC-værdier generelt er underrepræsenteret i deres datasæt og foreslår at benytte en box-cox transformation, som reducerer denne skævvridning og forbedrer estimatet.

Disse registreringer og udfordringer, er netop også hvad SEGES Innovation erfarer, da vi testede data for det tyske firma Smart Cloud Farming, se afsnit 5.

3.4 Sammensætning af billeder fra forskellige tidspunkter

Optiske satellitbilleder kan ikke benyttes til SOC estimering, hvis himlen er dækket med skyer. Men der er også en lang række andre faktorer, som påvirker præcisionen af SOC-estimatet. Atmosfæriske forstyrrelser påvirker præcisionen og afhænger af fx sæson, vinklen på solens indstråling (sol azimuth), skyer og højde. Derudover er markens overfladejævnheder, fugtighed samt plantevækst vigtige faktorer. Marken skal være uden plantevækst og helst også vissent plantemateriale, for at opnå den højeste præcision på SOC-estimatet (Dvorakova et al., 2021; Vaudour et al., 2021).

Selvom Sentinel-2 tager billeder af Danmark hver 3-5. dag, er der flere af disse billeder, som ikke kan benyttes pga. skydække. Derudover ligger de danske agerjorde sjældent uden plantedække. I løbet af vinteren er de oftest dækket med enten efterafgrøder, vintersæd eller andet plantemateriale. Det optimale ville være, hvis alle de danske marker lå med bar jord i den samme periode, uden skyer og vand på marken. Dette er langt fra virkeligheden og Vaudour et al., 2021 foreslår at lave et multidato mosaikbillede, hvor bar jord indenfor en 2-årig periode sammensættes til et mosaikbillede ud fra en række udvælgelseskriterier. De bruger radardata fra Sentinel-1 til at bestemme jordfrugtigheden og derved udvælge brugbare datoer med den tørreste jord. De opnår de bedste resultater ved at sammensætte 4 datoer, alle i foråret.

Dvorakova et al., 2021 foreslår en anden fremgangsmåde for at øge dækningsgraden. De arbejder med, at det optimale tidspunkt for at måle SOC med satellit er lige efter såning. Der er endnu ingen plantevækst, gamle planterester er blevet fjernet og jordskorpen er blevet glattet ud. Ud over dette, så sker såning typisk også i perioder, hvor jorden ikke er fuldstændig vandmættet. Dog viser det sig, at ved også at implementere en tærskelværdi for, hvor fugtig jorden må være, øges modellen markant. Metoden hedder "greening-up" og også her sammensættes billeder for en årrække for at øge dækningen. De benytter kun data fra Sentinel-2 også til at udregne, hvor vandmættet jorden er. Dette studie blev lavet for et område i Belgien og endte med at inkludere data fra månederne april, maj, august og september.

Begge studier formår at fordoble det målbare areal mod en mindre reduktion i præcisionen. Dog som Dvorakova et al., 2021 skriver, opnår de over en toårig periode kun en dækning på 62% af det undersøgte areal modsat, hvis der alene benyttes en NDVI-tærskelværdi, hvor dækningen kan komme op på 95%. Der er altså et tydeligt trade-off mellem hvor præcis estimerne af SOC med satellit skal være mod dækningsgraden.

Begge studier viser, at fugtig jord væsentlig reducere muligheden for at estimere SOC med satellit. Når man medregner, hvor fugtige danske jorde kan være i foråret samt efteråret, kan dette blive et problem for præcisionen.

3.5 Modelleringsteknikker

Der kan bruges en række forskellige modelleringsteknikker til at lave et SOC kort. Nogle af dem, som ofte nævnes i litteraturen er; Random Forest (RF), Boosted Regression Trees (BRT), bagged Classification And Regression Trees (CART), Support Vector Maschine (SVM) samt Partial Least Square Regression (PLSR). Fælles for dem alle er, at de skal kalibreres med jordprøver fra det undersøgte område. Flere studier har vist, at der er ingen enkelt modelleringsteknik, som fungerer bedst under alle forhold (Zhou et al., 2020; Castaldi et al., 2019). Hvilken der vil fungere bedst under danske forhold, skal derfor testes på et dansk dataset.

3.6 Kombinerede modeller

En digital terrænmodel (Digital Elevation Model, DEM) er en repræsentation af topografien for et område, hvor der kan udtrækkes informationer om en lang række terrænparametre som fx højde og hældning. Zhou et al., 2020 fandt, at af parametre udledt af Sentinel-1, Sentinel-2 og DEM, havde DEM parametre den største forklarende faktor for at forudsige SOC. Det omtalte studie blev lavet i den sydlige del af central Europa, i et område hvor der fx er bjerge. Topografien er derfor meget anderledes end det danske. Dog er det oplagt at undersøge, om inkludering af terrænparametre med satellitbilleder kan forbedre præcisionen af SOC-estimeringen i Danmark.

I det samme studie af Zhou et al., 2020 undersøgte de også, om radar teknologi, i dette tilfælde Sentinel-1, kunne bruges til at estimere SOC. Fordelen ved radar målinger er, at de kan bruges i alt slags vejr samt både dag og nat. Studiet viste, at Sentinel-1 alene fungerede dårlige end Sentinel-2 alene. Dog bidrog radaren med værdifuld information, så ved at kombinerer radar og optiske satellitbilleder blev modellen mere præcis. Den bedste model var, når Sentinel-1, Sentinel-2 og DEM blev kombineret.

3.7 Konklusion

Sentinel-2 leverer multispektrale optiske satellitbilleder. Sensorerne benytter kun 13 bånd, men til gengæld dækker de hele området fra VIS til SWIR og har en væsentlig højere SNR end de hyperspektrale satellitter. I disse år bliver der lanceret nye hyperspektrale satellitter, hvor støjen i SWIR regionen er blevet reduceret. Studier med disse satellitter skal følges nøje.

Der findes forskellige metoder, til at forbedre præcisionen af SOC estimatet med Sentinel-2 satellitbilleder. Det er muligt at lave mosaikbilleder fra flere forskellige datoer men også at kombinerer de optiske satellitbilleder med radar målinger og allerede kendte terrænparametre.

Det er vigtigt at være bevidst om begrænsningerne, når man benytter SOC målinger estimeret med satellitter. Der skal bruges ressourcer på at undersøge og tilpasse de udviklede modeller til danske jorde og under danske dyrkningsforhold. Høj jordfugtighed påvirker præcisionen, dette kan blive et problem for implementeringen af denne metode.

4 AARHUS UNIVERSITET OG NYT LANDSDÆKKENDE KULSTOFKORT

Anders Bjørn Møller

PostDoc, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

1. december, 2022

Vi har udarbejdet nye jordbundskort i 10 meters opløsning som en del af projektet DigiJord. På nuværende tidspunkt viser kortene topjordens (0 – 20 cm) indhold af ler og humus for størstedelen af landbrugsarealet. Kortene bygger på jordprøver fra den Danske Jordklassificering og en række kort med forklarende variabler. De forklarende variabler omfatter blandt andet geologiske kort og afledte variabler fra en digital højdemodel. En vigtig tilføjelse i forhold til tidligere kort, er at metoden nu også inddrager et stort antal satellitbilleder. For det første har DHI udviklet et sammenhængende billede af den bare jord ved at kombinere adskillige billeder fra de tidspunkter, hvor jorden har været synlig. For det andet har de sammensat en tidsserie af billeder fra tørkeåret 2018, hvor afgrødernes vækst mange steder har afspejlet jordbunden. De nye datasæt indeholder mere end 100 forklarende variabler, som vi har anvendt i modeller til at forudsige indholdet af ler og humus. Vi brugte algoritmen Cubist til at opbygge modellerne gennem maskinlæring. Cubist kombinerer beslutningstræer og lineær regression til at redegøre for komplekse sammenhænge mellem mange variabler. En krydsvalidering viste, at de nye kort havde en korrelation (R^2) på 69% for lerindholdet og 0.42% for humusindholdet, hvilket er en væsentlig forbedring i forhold til tidligere kort. Satellitbilleder af den bare jord var særligt vigtige for kortlægningen og gjorde modellerne i stand til at vise variationer på markniveau med langt større nøjagtighed end hidtil. I den næste fase af projektet vil vi kortlægge variationen i flere dybder og tilføje flere jordbundsegenskaber.

5 SMART CLOUD FARMING

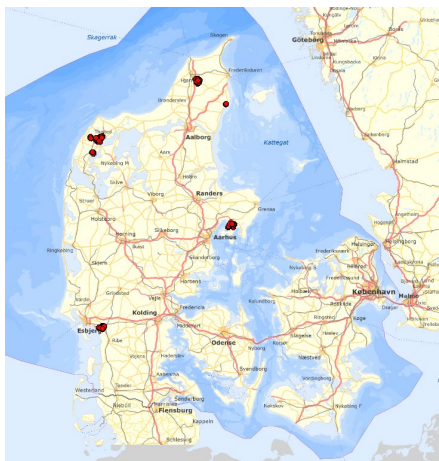
Firmaet Smart Cloud Farming er en tysk startupvirksomhed, der har udviklet en model til at bestemme kulstofindhold i jord. Modellen bruger satellitbilleder som input (Landsat og Sentinel konstellation) og dertil avanceret AI (kunstig intelligens).

Modellen bag indeholder følgende:

- 1) Bestemmelse af Soil Organic Carbon (SOC) ned til 30 cm dybde.
- 2) Pt. er opløsningen på 30 meter. På sigt skal opløsningen ned på kun 10 meter.
- 3) Modellen er udviklet og valideret på baggrund af fysiske jordprøver baseret på ISO 10694:1995-protokollen (Automated Dry  Combustion).
- 4) Hastighed – der kan processeres 2 ha pr. sek. eller 7200 ha pr. time.

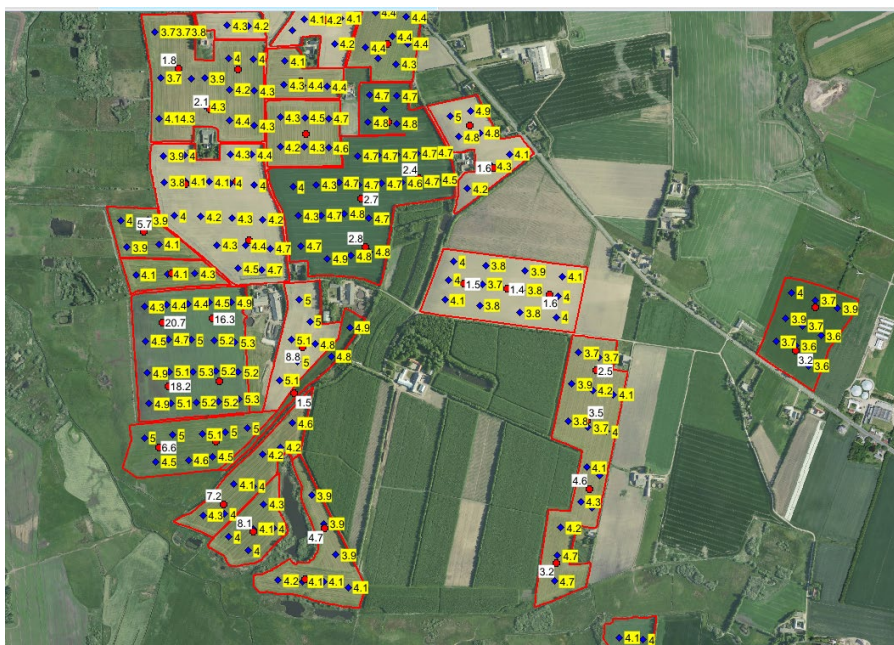
5.1 Pilotprojekt

SEGES har kontaktet 4 landmænd og fået deres accept af, at kulstofanalyser fra deres marker måtte indgå i et pilotprojekt sammen med Smart Cloud Farming. Nedenfor i figur 2 ses placeringen af de 4 bedrifter.



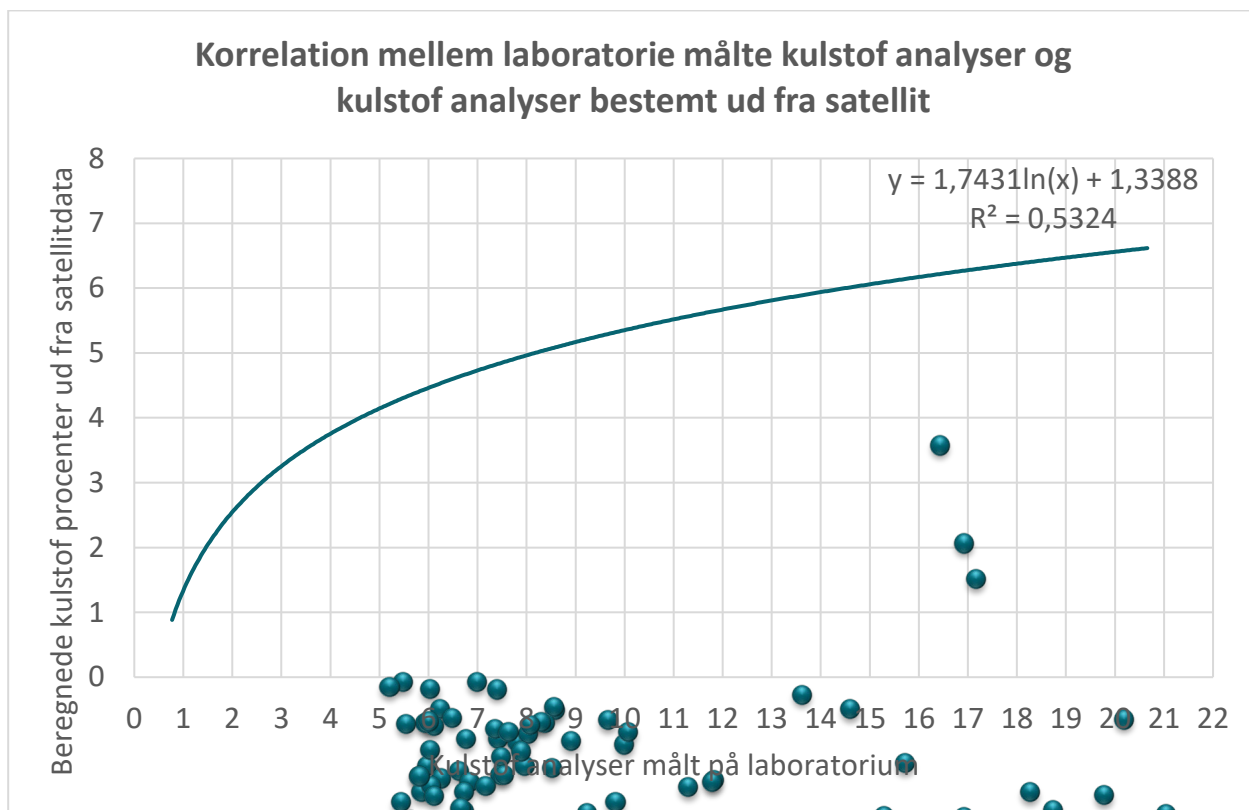
Figur 2. Kortet viser placeringen af de 4 bedrifter.

Nedenfor i figur 3 ses marker med blå og røde punkter. De røde punkter viser udtagningen af de fysiske jordprøver, som er udtaget med en prøve hver 3-4 ha. De blå punkter er de satellit bestemte kulstofanalyser. Disse ligger med 30 meters afstand.



Figur 3. De røde punkter viser, hvor de fysiske jordprøver til kulstofbestemmelse på laboratorie er udtaget. De blå punkter viser kulstofprocenten bestemt med satellit og AI.

Nedenfor i figur 4 ses korrelationen mellem de målte kulstofprocenter sammenholdt med den nærmeste kulstofprocent bestemt med satellit. Langt den overvejende del af de fysiske kulstofanalyser ligger mellem 1 og 6 procent kulstof. En korrelation på 0.53 er ganske tilfredsstillende.



Figur 4. Korrelation mellem den beregnede kulstofprocent fra satellitdata og det målte kulstof.

5.2 Konklusion

Modellen fra Smart Cloud Farming er trænet på amerikanske marker med kulstof procenter mellem 1 og 6. Smart Cloud Farming erkender, at det er nødvendigt at udvikle en lokal model for Danmark på grund af de til tider høje kulstofprocenter i markerne. I den enkelte mark kan der også forekomme store variationer, hvilket er en udfordring.

I litteraturstudiet, afsnit 3, henvises der til Zhou et al., 2020, Dvorakova et al., 2021 samt Vaudour et al., 2021. I disse studier blev der opnået en R^2 værdi på henholdsvis 0,44, 0,54 og 0,51. R^2 værdien kan ikke bruges alene til at validere en model. Men hvis man sammenligner R^2 værdien fra Smart Cloud Farming's model med de tre andre, ser niveauet acceptabelt ud. De kan altså forklare 53% af variationen med deres model.

6 SOIL OPTIX

SoilOptix er en kontaktløs sensor, som er placeret på et køretøj cirka 60 centimeter over jorden. Der kan køres med op til 20 km/t i 12 meters bredde ved indsamling af data. I Danmark forhandles systemet kun af Danish Agro.

Sensoren er baseret på gamma-strålingsteknologi og kortlægningen af jordbundsforhold suppleres med strategisk udvalgte jordprøver. Der udtages cirka én jordprøve per 3,2 hektar i 15-20 centimeters dybde (minimum 4 prøver per mark). Der kan med systemet kortlægges information om f.eks. lerindhold, CEC (*cation exchange capacity*), organisk materiale, samt makro- og mikronæringsstoffer. Systemet kan også give indsigter i kulstof-processerne på marken ved at måle organisk kulstof og aktivt kulstof. Således kan den totale mængde organisk kulstof per hektar kortlægges.

7 SOC-MÅLINGER FRA DRONE

Vi har i nærværende rapport ikke beskæftiget os med droner specifikt. Det er dog værd at bemærke, at mange af de omtalte sensorer kan monteres på droner. Droner har den fordel i forhold til satellitter, at de kan indsamle data (f.eks. multispektral data) på tidspunkter hvor satellitten ikke kan, som ved skyet vejr. Kapaciteten for dronerne er dog, naturligvis, langt mindre end for satellitter. Derfor er deres kapacitet bedre brugt ved opgaver med brug f.eks. meget høj opløsning og fleksibel dataindsamling.

8 LITTERATUR

- Castaldi, F., Hueni, A., Chabrilat, S., Ward, K., Buttafuoco, G., Bomans, B., Vreys, K., Brell, M., & van Wesemael, B. (2019). Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147, 267-282.
- Castaldi, F., Palombo, A., Santini, F., Pascucci, S., Pignatti, S., & Casa, R. (2016). Evaluation of the potential of the current and forthcoming multispectral and hyperspectral imagers to estimate soil texture and organic carbon. *Remote Sensing of Environment*, 179, 54-65.
- Dvorakova, K., Heiden, U., & van Wesemael, B. (2021). Sentinel-2 exposed soil composite for soil organic carbon prediction. *Remote Sensing*, 13(9), 1791.
- EnMAP (2022). <https://www.enmap.org/mission/>. Tilgæt 22 november 2022.
- Gholizadeh, A., Žižala, D., Saberioon, M., & Borůvka, L. (2018). Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. *Remote Sensing of Environment*, 218, 89-103.
- He, X., Yang, L., Li, A., Zhang, L., Shen, F., Cai, Y., & Zhou, C. (2021). Soil organic carbon prediction using phenological parameters and remote sensing variables generated from Sentinel-2 images. *Catena*, 205, 105442.
- Hyperion (2019). <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-earth-observing-one-eo-1-hyperion>. Tilgæt 22 november 2022.
- Mzid, N., Castaldi, F., Tolomio, M., Pascucci, S., Casa, R., & Pignatti, S. (2022). Evaluation of Agricultural Bare Soil Properties Retrieval from Landsat 8, Sentinel-2 and PRISMA Satellite Data. *Remote Sensing*, 14(3), 714.
- PRISMA (2022) <https://www.asi.it/scienze-della-terra/prisma/>. Tilgæt 22 november 2022.
- Vaudour, E., Gomez, C., Lagacherie, P., Loiseau, T., Baghdadi, N., Urbina-Salazar, D., Loubet, B., & Arrouays, D. (2021). Temporal mosaicking approaches of Sentinel-2 images for extending topsoil organic carbon content mapping in croplands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102277.
- Zhou, T., Geng, Y., Chen, J., Pan, J., Haase, D., & Lausch, A. (2020). High-resolution digital mapping of soil organic carbon and soil total nitrogen using DEM derivatives, Sentinel-1 and Sentinel-2 data based on machine learning algorithms. *Science of The Total Environment*, 729, 138244.