

Veldvalorisatie satellietbeelden voor C-vastlegging in de bodem

Definitief



**Karin Pepers
Gera van Os
Gijs Staats
Bas van Wesemael
Klara Dvorakova
Fred Weber
Erik Cammeraat
Roos van Maanen**

Uitvoerders:



Financiers:



Februari 2022

Contactgegevens:

Aeres Hogeschool Dronten
De Drieslag 4
8251 JZ Dronten
E k.pepers@aeres.nl
T 06 3807 6803

Inhoud

1	Inleiding	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Doel van dit project	4
1.3	Achtergrond	4
1.4	Vernieuwing	5
1.5	Beoogde impact	6
2	Materiaal en methode	7
2.1	Kalibratie	7
2.2	Validatie	7
2.3	Perceelsbemonstering	8
2.4	Organische stof-analyses	11
2.5	Data-analyse	11
2.6	Activiteiten mbo-studenten	14
2.7	Planning en communicatie	15
3	Resultaten	16
3.1	Kalibratie modelberekening	16
3.2	Validatie organische stofkaarten	22
3.3	Bewustwording en arbeidsmarkt	23
4	Discussie	24
4.1	Inhoudelijke reflectie op de resultaten	24
4.2	Reflectie op bewustwording en arbeidsmarkt	25
4.3	Spin-off van de samenwerking	26
5	Conclusie	28
	Literatuur	30
Bijlage 1	Organische koolstofanalyses	31
1A	Nat-chemische OS-analysemethode, Aeres Hogeschool	31
1B	SOC-analysemethode met CN-analyser, UCLouvain	33
1C	Resultaten organische stof-analyses	33
Bijlage 2	Onvoorspelde percelen	34
Bijlage 3	Gegevens validatiepercelen	35
2A	Meetpunten Noordoostpolder	35
2B	Meetpunten Flevoland	38
2C	Meetpunten Noord-Holland	42
Bijlage 4	SOC voorspellingen op basis van beelden van Sentinel-2	47

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op de Klimaatconferentie in Parijs van 2015 (COP 21) is het 4 per 1000 initiatief gelanceerd (<https://www.4p1000.org>). Dit initiatief stimuleert het vastleggen van koolstof in de bodem om de klimaatverandering tegen te gaan en tegelijkertijd de kwaliteit van de bodem te verbeteren en daarmee de voedselzekerheid te vergroten. De uitvoering van dit initiatief in Nederland is vastgelegd in het Klimaatakkoord.

Tijdens een symposium bij de Amsterdam Green Campus (AGC) in 2019 over ‘Aansluiting onderzoek en onderwijs op het klimaatakkoord’, is de kiem gelegd voor een samenwerking tussen de partners van het AGC en de Universit  Catholique de Louvain (UCLouvain) m.b.t. het meten en monitoren van koolstofvastlegging in de bodem aan de hand van satellietbeelden.

In 2020 is een verkennend onderzoek gestart, gefinancierd door de provincies Flevoland en Noord-Holland, met cofinanciering vanuit de onderwijsinstellingen. Hiermee is een eerste stap gezet om te bepalen of/hoe deze innovatieve meetmethode met satellietbeelden geschikt kan worden gemaakt voor toepassing onder Nederlandse omstandigheden (grondsoorten en teelt). Het project heeft inzicht en leerpunten opgeleverd over zowel de methodische aanpak als de samenwerking tussen de kennisinstellingen onderling en met het bedrijfsleven. Het inhoudelijke resultaat bood diverse aangrijpingspunten om de meetmethode gericht mee te optimaliseren. Daarom is in 2021 een nieuwe meetronde uitgevoerd met een aangepaste werkwijze.

1.2 Doel van dit project

Het project kent drie doelstellingen:

1. Een veldvalorisatie om de mogelijkheden van een bestaand rekenmodel voor bodems in het buitenland te verkennen voor Nederlandse bodems in Flevoland en Noord-Holland waarmee aan de hand van Satellietbeelden (Sentinel-2) kan worden berekend wat het koolstofgehalte in de bodem is op een relatief fijnmazige schaal (20x20 m)
2. Bewustwording bij agrarisch ondernemers en studenten mbo, hbo en wo in Noord-Holland en Flevoland over de mogelijkheden en meerwaarde van koolstofvastlegging in de bodem
3. De aansluiting tussen het onderwijs en de arbeidsmarkt versterken in de regio

1.3 Achtergrond

Organische stof in de bodem is van groot belang voor de bodemstructuur, bewerkbaarheid, vochthuishouding, bodembiodiversiteit, nutriëntenkringlopen, weerbaarheid tegen ziekten en plagen en daarmee het bodem- en watersysteem zowel kwalitatief als kwantitatief. Afhankelijk van grondsoort en bedrijfsvoering kan het organisch stofgehalte dalen, gelijk blijven of stijgen. Om de klimaatverandering tegen te gaan ligt er een beleidsopgave om meer koolstof in de bodem vast te leggen, de klimaatmitigatie (klimaatakkoord). In de Bodemstrategie spreekt de Minister van LNV

daarnaast ook van klimaatadaptatie, i.e. aanpassing van de landbouw aan de klimaatverandering, zodat de teeltsystemen beter bestand zijn tegen lange periode met extreme droogte en neerslag.

Voor een positieve organische stofbalans (stijgend gehalte) moet een akkerbouwer/bollenteler maximaal investeren in maatregelen. Dit vergt maatwerk per grondsoort en teelt. Als door de klimaatverandering de temperatuur stijgt zal de afbraak van organische stof sneller gaan, waardoor de balans negatief wordt beïnvloed. Om de juiste teeltmaatregelen te stimuleren wordt gewerkt aan beloningssystemen om de ondernemer tegemoet te komen in de kosten. Om de voortgang te monitoren is hierbij een adequaat meetmethode essentieel. De conventionele meetmethoden blijken onvoldoende nauwkeurig voor dit doel (+/- 0,4%). Omdat de opbouw van organische stof in de bodem een zeer traag proces is, ca. 1% organische stof in 10-20 jaar (afhankelijk van grondsoort en bedrijfsvoering), is het verloop van de koolstofopbouw pas na 5-10 jaar meetbaar. Daarnaast wordt meestal één mengmonster per perceel geanalyseerd, hetgeen de teler weinig houvast biedt om o.a. precisietoepassingen te benutten om het organisch stofgehalte op peil te houden en/of te verhogen.

Telers hebben over het algemeen een beperkt beeld van het organisch stofgehalte in hun percelen en hoe dat zich in de tijd ontwikkelt. Tegenwoordig is het ook mogelijk om een bodemscan te laten maken van een braakliggend perceel, die een beeld kan geven van de relatieve verschillen in organisch stofgehalte binnen een perceel. Een dergelijke meting is echter zeer vochtgevoelig (onbetrouwbaar bij verschillen in vochtgehalte en ook bij hoge vochtgehaltes van de bodem) en duur. Er is momenteel nog geen adequate manier om op eenvoudige en betaalbare wijze het verloop van het organisch stofgehalte te monitoren.

1.4 Vernieuwing

De Sentinel-2 satelliet maakt elke 5 dagen satellietbeelden van Nederland (en de rest van de wereld). Uit onderzoek in Duitsland is gebleken dat de beelden, met een pixelgrootte van 20x20 meter, gebruikt zouden kunnen worden voor het inschatten van het organisch stofgehalte in de bovenste grondlaag, mits het onbegroeid, droog land betreft, zonder korst, gewasresten, opslag of onkruidgroei e.d. Dit zou een mooie mogelijkheid kunnen bieden voor het analyseren van het organisch stofgehalte in een perceel of regio over een lange periode, o.a. op grond van beelden uit de afgelopen jaren. In de database van de Sentinel-2 kun je (gratis) de beelden van een perceel terugvinden op het moment in het teeltseizoen dat de bodem kaal ligt en het droog is. De meest geschikte foto's worden genomen in de maanden februari t/m mei, omdat in deze periode veel percelen 'kaal' liggen, zonder storende factoren. Voor betrouwbare meetwaarden is een combinatie nodig van minimaal 8 bruikbare opnames (composietbeelden). Hiermee is doorgaans een periode van 3-5 jaar gemoeid.

Met deze data kunnen perceelskaarten worden gemaakt waarin plaats-specifieke verschillen in organische stof tot uiting komen (resolutie 20x20 m). Dit zou een verfijning zijn ten opzichte van de traditionele grondmonsteranalyse waarbij 1 mengmonster per perceel wordt genomen.

In 2020 is in het kader van het onderzoek o.a. ervaring opgedaan met de perceelselectie op basis van Sentinelbeelden, het nemen van grondmonsters, het verzamelen van bedrijfsinformatie, de dataverwerking en berekeningen, etc. Daarbij hebben zich een aantal knelpunten voorgedaan die

ondervangen moeten worden. De beeldanalyse en modelberekeningen vergen nog een verbeter slag, kalibratie en validatie voor de Nederlandse situatie (o.a. andere grondsoorten).

1.5 Beoogde impact

Het verkregen beeld en/of verloop van het organisch stofgehalte in de bodem (bouwvoor) op basis van satellietdata kan de bewustwording bij agrarische ondernemers stimuleren en motiveren om (plaats specifieke) maatregelen te treffen ter (verdergaande) verhoging van het organisch stofgehalte. Wanneer de meetmethode op regionale schaal wordt toegepast in een reeks van jaren zou dit een beeld kunnen geven van de voortgang van de koolstofvastlegging voor de provincie.

Door het onderzoek te laten uitvoeren bij onderwijsinstellingen (mbo, hbo, wo) raken studenten en docenten bekend met deze innovatieve technologische ontwikkelingen en de problematiek rond de klimaatmitigatie en -adaptatie. Het biedt een authentieke leeromgeving voor de studenten, doordat het veldonderzoek in de praktijk plaatsvindt, en de docenten gebruiken de opgedane kennis en ervaring in hun lessen. Hiermee worden de agrarisch ondernemers en adviseurs van de toekomst (de nieuwe generatie) opgeleid om de bodem duurzaam te beheren en wordt gewerkt aan de ambitie uit het klimaatakkoord om vanaf 2030 per jaar 0,5 Mton CO₂-equivalenten extra vast te leggen in de bodem. Het onderzoek stimuleert de studenten om een kritische en onderzoekende houding aan te nemen en te reflecteren op de relatie tussen landbouw en maatschappij. Goed opgeleide studenten hebben meer kans op de arbeidsmarkt van de toekomst in de regio.

De kennisdoorwerking in de regio's kan worden verbreed door percelen te selecteren bij agrarische ondernemers die reeds betrokken zijn bij lopende regionale projecten en/of bij stagebedrijven. De resultaten van het onderzoek zullen naderhand ook worden gedeeld en bediscussieerd met deze projecten en ondernemers.

De kalibratie en validatie van het rekenmodel voor de Nederlandse bodems is een essentiële stap om de methode geschikt te maken voor de beoogde toepassing. Er zijn veel raakvlakken en er is een nauwe samenwerking met lopende projecten op gebied van koolstofvastlegging in de bodem in Nederland en België en m.b.t. het verwerken van satellietbeelden op Europees niveau.

2 Materiaal en methode

Op basis van de Sentinel-opnames (20x20 m) in de maanden maart, april en mei gedurende de periode 2016-2021 zijn composietbeelden gemaakt die bestaan uit pixels van kale bodems met voor iedere pixel een minimum van 7 opnames. We hebben een multivariate analyse (partial least square regression) gebruikt om het bodem koolstof gehalte van pixels te voorspellen die overeenkomen met monsters genomen op het terrein. Voor de veldvalorisatie van de methode is een kalibratie en een validatie nodig. Voor beide is een aparte bemonsterings- en analyseronde uitgevoerd.

2.1 Kalibratie

Kalibreren is het vergelijken van een gemeten waarde (in dit onderzoek het berekende organisch stofgehalte, afgeleid van de Sentinel composietbeelden) met een werkelijk gemeten waarde (in dit onderzoek het organisch stofgehalte in grondmonsters van percelen) om de afwijking vast te stellen. Hiermee kan de betrouwbaarheid van de meting worden beoordeeld.

Op basis van de eerste organisch stofgehalte kaart (onderzoeksproject 2020) is door de UCLouvain een selectie gemaakt van 100 percelen in Flevoland (Zuidelijk Flevoland en de Noord-Oost Polder) en Noord-Holland (Wieringermeer en Noordelijk Zandgebied) voor de kalibratiebemonstering. Deze percelen werden gekozen aan de hand van een analyse van een Sentinel 2 beeld genomen op 5 april 2020. De percelen dekken zoveel mogelijk de spreiding van de assen van de twee belangrijkste principale componenten. Voor 20 percelen ontbrak de benodigde toestemming. Hiervoor zijn 10 vervangende percelen gekozen en bemonsterd, waarmee het totaal op 90 percelen is gekomen.

De geselecteerde percelen zijn gedeeld met de studenten van Aeres Hogeschool Dronten via Google Maps (link: <https://drive.google.com/open?id=1NKGvASUqWLU3XcwGTXOnDhxcRuyixfdj&usp=sharing>). De percelen zijn bemonsterd volgens onderstaand bemonsteringsprotocol (paragraaf 2.3). Vervolgens is het organisch stofgehalte bepaald bij Aeres Hogeschool Dronten met de nat-chemische analyse en bij UCLouvain met een CN-analyser. De meetresultaten zijn gebruikt voor de kalibratie van de modelberekening voor de Sentinel-kaarten.

Voor de kalibratie is tevens gebruik gemaakt van grondmonsters uit België. UCLouvain heeft 342 foto's van het oppervlak in akkers van de Belgische leemstreek genomen in oktober 2019 en april 2021. Voor deze foto's zijn de datum en coördinaten geregistreerd en tevens zijn ze ingedeeld in de onderscheidende types van bodemoppervlak: pas ingezaaid en vlak, met bodemkorst, met gewas, met gewasrest en natte bodems. De NBR 2 index (genormaliseerde verschil van de kortgolvlige infrarood banden van de Sentinel sensor) en de NDVI zijn bepaald voor de Sentinel 2 beelden die overeenkomen met de plaats en de datum van de foto's. Verder zijn 51 monsters genomen in de Belgische leemstreek op kale akkers in het voorjaar van 2021. De monstername en de analyse van de monsters is vergelijkbaar met de procedures voor Flevoland.

2.2 Validatie

Valideren is het controleren van een waarde op geldigheid of juistheid. In dit onderzoek is gecheckt of de berekende OS-waarden op basis van de Sentinel-beelden daadwerkelijk overeenkomen met de

OS-gehaltes in grondmonsters uit percelen. Hiertoe zijn de percelen geselecteerd op basis van hun waarde op de Sentinel-kaarten.

Voor de validatie zijn 18 percelen geselecteerd in Noord-Holland en Flevoland op basis van de organische koolstofkaart van de Sentinel-2 beelden (resultaat kalibratie-onderzoek 2021). Het betreft percelen met gemiddelde OS-gehaltes als ook met opvallend afwijkende OS-waarden in vergelijking met de omringende percelen of met afwijkende punten (pixels) binnen het perceel, die niet kunnen worden verklaard op basis van grondsoort en hoogteligging (zie Afbeelding 2.1).

In Afbeelding 2.1 is links een voorbeeld te zien van een perceel waarin zeer hoge en lage waarden te zien zijn (de rode en blauwe zones), die niet te verklaren zijn aan de hand van de bodemkaart of hoogtkaart. In zowel de blauwe (lage) zone, de gemiddelde (gele) zone, als de rode (hoge) zone zijn punten bemonsterd. Van alle punten zijn de exacte coördinaten vastgesteld met behulp van een Topcon GPS-systeem (RTK), dat tot op drie centimeter nauwkeurig is.



Afbeelding 2.1: Perceel in de Wieringerwerf (Noord-Holland) aan de Noorderdijkweg. Links de kaart met de organische stof berekening op basis van Sentinel-2 beelden; Midden een luchtfoto van het perceel; Rechts de bodemkaart met grondsoorten (groen = kalkrijke poldervaaggronden (lichte zavel, Mn12A) en geel = kalkhoudende vlakvaaggronden (zeer fijn zand, Zn40A)). Bron: Pdok, BRO Bodemkaart – Bodemvlakken.

Op de geselecteerde locaties zijn grondboringen gedaan met een Edelmanboor (7 cm diameter) tot 50 cm diep om de profielopbouw vast te stellen. Van elke boring is een foto en een beschrijving gemaakt (grondsoort, laagdikte en horizonten). Mogelijk kan hieruit worden afgeleid of afwijkende OS-waarden op de Sentinel-kaarten kunnen worden verklaard door onderliggende grondlagen, zoals een veenlaag in een zand- of klei-perceel.

De percelen zijn bemonsterd volgens onderstaand bemonsteringsprotocol. Vervolgens is het organisch stofgehalte bepaald bij Aeres Hogeschool Dronten met de nat-chemische analysemethode en bij de UCLouvain met een CN-analyser. De meetresultaten zijn gebruikt voor de validatie van de Sentinel-kaarten.

2.3 Perceelsbemonstering

De eigenaars van de percelen zijn achterhaald via internet-zoekacties of door naar de desbetreffende percelen toe te rijden en de dichtstbijzijnde boerderij te bezoeken. De percelen zijn vervolgens met toestemming van de ondernemers bemonsterd volgens onderstaand protocol.

In het gesprek met de boer is ook gevraagd naar bijzonderheden van het perceel, zoals teelthistorie, en organisch stofbeheer (bemesting). Hiermee kan worden achterhaald of er handelingen zijn

verricht die invloed kunnen hebben op het resultaat van de voorspellingen door het rekenmodel op basis van de Sentinel-beelden. Ook is gevraagd of er interesse is in de eindresultaten van het onderzoek. Van de belangstellenden is het email adres genoteerd om t.z.t. de resultaten toe te sturen.

Bemonsteringsprotocol:

1. Met een handheld Topcon GPS-systeem (RTK) (tot 3 cm nauwkeurig) is de juiste locatie op het perceel opgezocht.
2. Voor het nemen van de grondmonsters is een vlak van 10x10 meter gekozen dat minimaal 20 meter van de perceelrand af ligt. Met een **tuinschepje** worden binnen dit vlak 5 scheppen grond genomen, 1 schepje in het midden en 4 schepjes binnen 3 meter daar omheen (zie Afbeelding 2.2). De scheppen grond worden 0-10 cm diep genomen, en *niet dieper* omdat de satellietbeelden alleen meten aan het grondoppervlak en geen indicatie geven van diepere grondlagen. De grond is in een **emmer** gedaan en goed gemengd (Afbeelding 2.3).



Afbeelding 2.2: Voorbeeld van een bemonsteringsplek van 10x10 meter. Het gele rondje in het midden is het geselecteerde meetpunt (GPS) en de 5 kruisjes zijn de locaties van de schepjes voor het mengmonster.

3. Het grondmonster is in een **vershoudzak** van 3 liter gedaan voor transport en bewaring. Per monster is circa 500 gram grond meegenomen, wat ruim voldoende is voor de labanalyses (minder dan 50 gram hiervoor benodigd).
Elke zak is met een watervaste stift gecodeerd:
 - Datum en tijdstip
 - Perceelnummer
4. In elk zakje is een extra **kaartje** met de datum en het perceelnummer gedaan (met potlood geschreven).
5. Er is een apart **logboek** bijgehouden. Hierin worden aanvullende observaties genoteerd, zoals een beschrijving van hoe het perceel erbij ligt. Bijvoorbeeld: pas geploegd, zaaibed, stoppels, gewasresten, onkruid, opslag, groenbemester, droge korst, ruggen, etc.



Afbeelding 2.3: Monsternamen in het veld

6. Dit wordt geïllustreerd door van elk perceel tenminste 2 **foto's** te maken waarop duidelijk de situatie op het perceel te zien is. Een foto direct van bovenaf naar de grond, en een foto met een overzicht van het perceel vanaf het bemonsteringspunt (zie Afbeelding 2.4). Dit kan met de camera van je telefoon. Check eerst dat je smartphone de locatie van de foto opslaat (meestal in lat/long). Doe buiten een test en bekijk de gegevens van je foto in een App zoals 'Exif Viewer' om er zeker van te zijn dat de locatie aan staat. Noteer goed de datum, tijd en het nummer van het perceel en het nummers die de foto van je telefoon krijgt.
7. De monsters worden tot aan de organische stof-analyse bij Aeres Hogeschool bewaard in open zakken (zodat er geen schimmelvorming ontstaat) bij kamertemperatuur.



Afbeelding 2.4: Voorbeeld overzichtsfoto's (boven), detailfoto's (onder)

2.4 Organische stof-analyses

Van alle grondmonsters is het organisch stofgehalte bepaald. Bij Aeres Hogeschool Dronten is hiervoor gebruik gemaakt van de 'nat-chemische' analysemethode (zie Bijlage 1A). Bij de UCLouvain is het koolstofgehalte bepaald met een CN analyzer (Variomax) en gecorrigeerd voor de inorganische koolstof (Sherrod et al., 2002). (zie Bijlage 1B). De resultaten van beide analyses staan in Bijlage 1C.

2.5 Data-analyse

Op basis van een eerste analyse van een Sentinel-2 beeld van april 2020 (PCA) hebben we 124 punten gekozen in akkerlanden die de variatie in Sentinel-2 signaal weerspiegelen. Hiervan lagen 73 punten in Nederland en 51 punten in België. Zeventien van de 90 bemonsterde punten konden vanwege verschillende redenen niet worden gebruikt (outliers, duinen, afwijkend spectrum). Het bodem organische koolstofgehalte (SOC-gehalte) van de monsterpunten die samenvallen met een Sentinel-2 pixel is gebruikt om een Partial least Square regression (PLSR) te kalibreren. De onzekerheid van dit koolstof voorspellingsmodel is dan uitgerekend door de procedure 10 keer te

herhalen met steeds een andere kalibratie set (bootstrapping) en is uitgedrukt als het 95 % betrouwbaarheid interval gedeeld door de mediaan $(q0.05+q0.95)*100/q0.50$; Afbeelding 2.5).

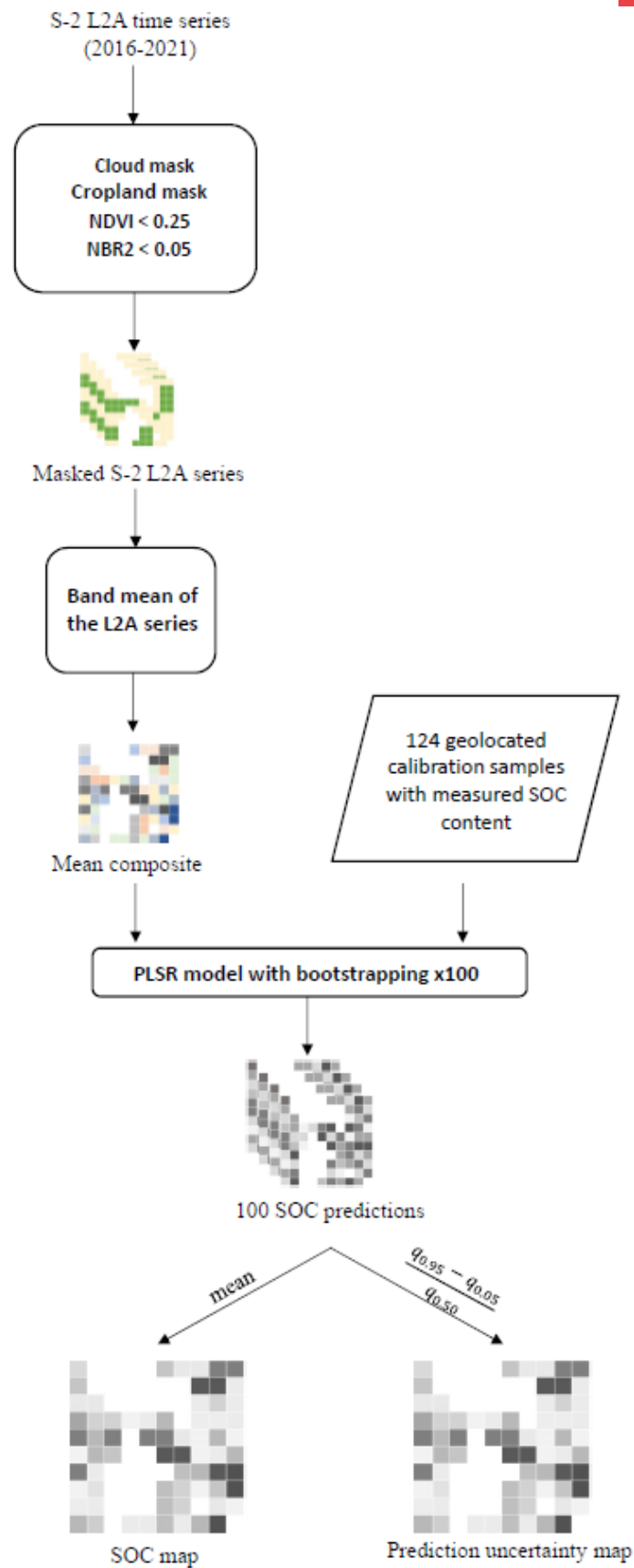
De kwaliteit van het model wordt bepaald aan de hand van een 10-voudige kruisvalidatie. Verder hebben we ook twee onafhankelijke data sets gebruikt om de voorspelde SOC-gehalte te vergelijken met de gemeten waarde in monsterpunten die overeenkomen met de Sentinel-2 pixel. De volgende kwaliteitsparameters zijn gebruikt:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

$$RPD = \frac{\text{std}}{RMSE}$$

where $\hat{y}$ = predicted value, $\bar{y}$ = mean observed value, y = observed values, n = number of samples with $i = 1, 2, \dots, n$, and std the standard deviation of the observed values.



Afbeelding 2.5: Schema van de kalibratie en onzekerheidsberekening voor SOC-voorspelling.

2.6 Activiteiten mbo-studenten

Opzet van het project en plaatsing in het curriculum

Het project 'Koolstofbinding, Veldvalorisatie Sentinel' is direct opgenomen als onderdeel van de lesmodule 'Bodemkunde en Bemestingsleer' van het Clusius College MBO Hoorn. In die module krijgen de studenten vanaf periode 2 in het 1^e leerjaar, gedurende 9 achtereenvolgende periodes vele aspecten van de Bodemkunde en Bemestingsleer aangeboden. Dat betekent dat de studenten alleen het eerste halfjaar van hun 2-jarige (niveau 2) of 3-jarige (niveau 3 en 4) opleiding geen bodemkunde en bemestingsleer als aparte module volgen. Overigens krijgt het dan al wel volop de aandacht in de Teeltlessen. Waarmee dit vakgebied in het curriculum van Clusius College zeer belangrijk is voor de opleiding van de studenten tot Vakexpert Teelt en Groene Technologie (Niveau 4), Vakbekwaam medewerker Teelt (Niveau 3) of Medewerker Teelt (Niveau 2).

In de betreffende module is dit project opgenomen in het 2^e en 3^e leerjaar. De studenten maken voor het eerst kennis met het project tijdens de presentatie door het Projectteam. In 2020 werd dat gedaan middels een - door Corona- online eindpresentatie van de resultaten tot dan toe. In 2021 betreft het een presentatie voor zowel de huidige 3^e jaars studenten, als ook voor de nieuwe lichter 2^e jaars studenten. Op deze wijze kennen de 3^e jaars studenten de eindresultaten van hun inspanningen en wordt het project voor de 2^e jaars studenten geïntroduceerd. Zij kunnen zo voortborduren op de voorgaande studenten en zo, à la Isaac Newton, ervaren hoe het is 'om te staan op de schouders van anderen en zo dus nog weer verder te kunnen kijken'.

Inzet mbo-studenten

Gedurende de deelname aan het project nemen de betreffende Plantenteeltstudenten ieder een bodemmonster. Dat mag op hun stagebedrijf zijn of op het eigen bedrijf. Met name voor de studenten uit de Teelttrichtingen 'Akkerbouw' en 'Bollenteelt' geldt dat zij veelal afkomstig zijn van een productiebedrijf dat zij mogelijk willen overnemen.

De betreffende bodemmonsters worden vervolgens opgestuurd naar de Universiteit van Amsterdam om te worden geanalyseerd op organische stof. De resultaten daarvan zijn zeer interessant voor de betrokkenen.

Naast het bodemmonster nemen de studenten ook een foto van de locatie waar het monster is genomen, noteren ze de coördinaten en nemen ze een interview af met de betreffende ondernemer over de historie van het perceel. Juist ook die inventarisatie van gewasrotatie, bodembewerking en historische bemesting is voor de studenten zeer leerzaam: ze doen nu 'voor het echie' mee in een interessant project.

Het (tijdig) opleveren van het bodemmonster, foto en interview telt mee in het eindcijfer voor het vak Bodemkunde en Bemestingsleer in het 2^e en 3^e leerjaar van de studenten.

Van het Clusius college in Hoorn zijn 2 maal monsters opgehaald (in juni en oktober 2021), en in het lab van de UvA zijn in totaal 16 monsters waarvan coördinaten bekend waren in duplo geanalyseerd op bodemorganische stof middels de gloeiverlies-methode.

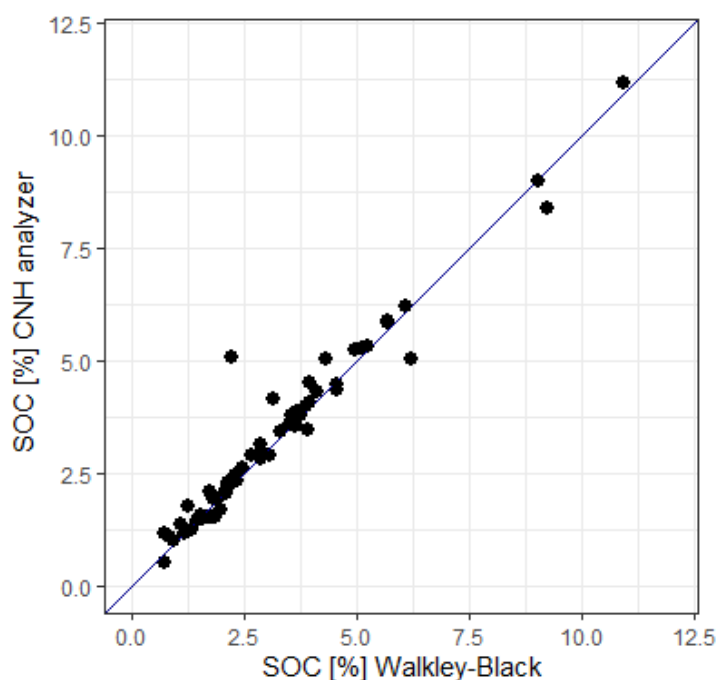
2.7 Planning en communicatie

Februari-juni 2021	Minoropdracht Vitale Bodem: veldwerk en OS-analyse kalibratie-onderzoek (3 studenten Tuin- en Akkerbouw, Aeres Hogeschool)
2 juni 2021	Introductieles in lesmodule 'Bodemkunde en Bemestingsleer', (20 tweedejaars studenten, studierichting Plantenteelt, Clusius College Hoorn)
Juni-oktober 2021	Stageopdracht mbo-studenten: interviews afnemen en grondmonsters verzamelen bij (stage-)bedrijven
3 juni 2021	Projectteamoverleg
14 juli 2021	Satellietdata en bodemkwaliteit. Nieuwsbericht Amsterdam Green Campus https://amsterdamgreencampus.nl/new/satellietdata-en-bodemkwaliteit/
31 augustus 2021	Projectteamoverleg
Sept-okt 2021	Stageopdracht: veldwerk en OS-analyse validatieonderzoek (student Tuin- en Akkerbouw, HVHL)
15 november 2021	Projectteamoverleg
Begin 2022	Slotbijeenkomst met mbo-studenten en ondernemers in Noord-Holland met 20 inmiddels 3 ^e -jaars en 35 nieuwe 2 ^e -jaars studenten.

3 Resultaten

3.1 Kalibratie modelberekening

Het organisch koolstofgehalte in de grondmonsters is bepaald met twee verschillende analysemethoden, een voor organische stof en een voor organische koolstof (zie bijlage 1). Organische stof in de bodem bestaat voor ca. 50% uit koolstof. Bij gebruik van de natte-oxidatiemethode zijn de gevonden meetwaarden van organisch stofgehalte omgerekend naar organisch koolstofgehalte met de Walkley-Black berekening. In Afbeelding 3.1 zijn de meetresultaten van beide analysemethoden tegen elkaar uitgezet. Er is een zeer goede correlatie tussen beide.



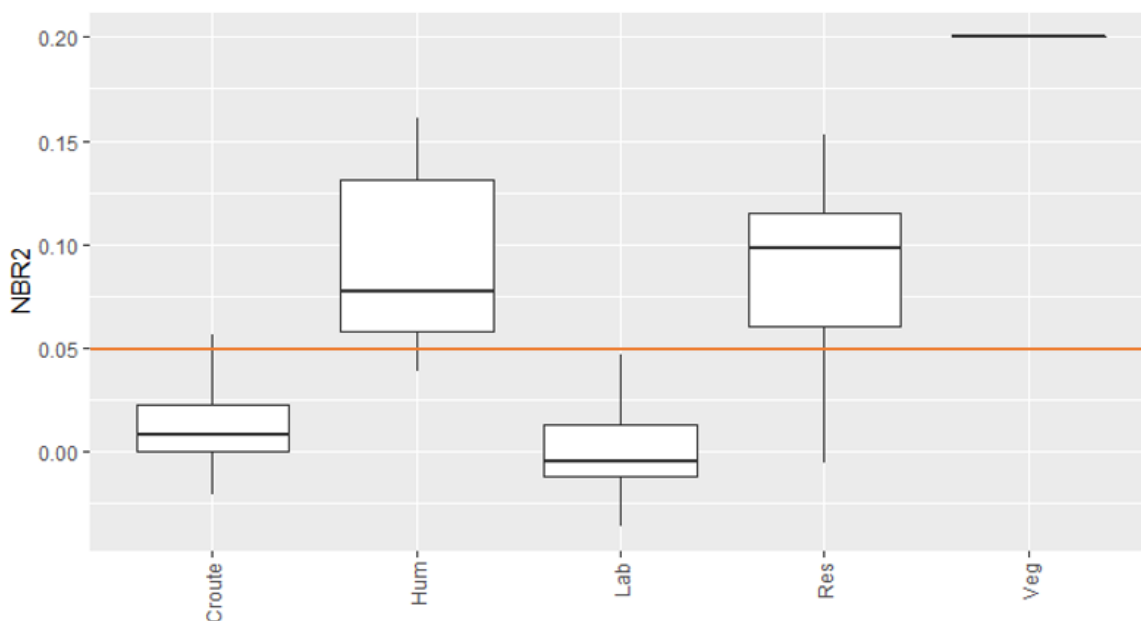
Afbeelding 3.1: Analyse-uitslagen van het organisch koolstofgehalte in de grondmonsters met de CN analyzer (UCLouvain) versus de nat-chemische oxidatie methode met Walkley-Black omrekening (Aeres Hogeschool), $R^2 = 0.95$; RMSE = 0.05 %.

Voor de kalibratie van het model zijn zowel de monsters uit Flevoland en Noord-Holland gebruikt die in dit project zijn verzameld, als de 51 monsters die in België zijn genomen. Het gemiddeld koolstofgehalte van de grondmonsters bedraagt 10.7 g C kg⁻¹ voor de 51 monsters in de Belgische leemstreek en 16.7 g C kg⁻¹ voor de monsters 73 monsters uit Flevoland en Noord-Holland.

De voorspelling van het SOC-gehalte (Soil Organic Carbon) hangt zeer sterk af van de toestand van het bodemoppervlak. Een juist ingezaaide akker tijdens de overvlucht van Sentinel 2 geeft het signaal van een droge, kale en egale bodem weer (Afbeelding 3.1). De NDVI spectrale index wordt algemeen gebruikt om een kale bodem van een groeiend gewas te scheiden met een grenswaarde van $NDVI > 0.25$. Het onderscheid tussen een kale, droge bodem en een natte bodem en/of een bodem met gewasresten wordt gemaakt bij een grenswaarde van $NBR2 < 0.05$ (Afbeelding 3.2 en 3.3).

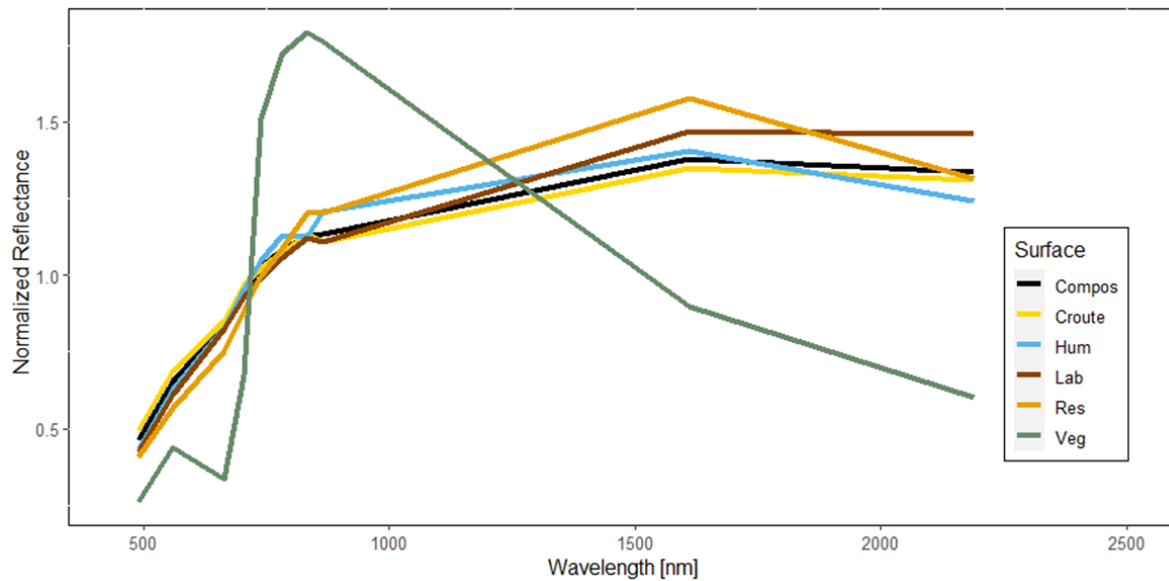


Afbeelding 3.2: Foto's van akkerlanden met van links naar rechts: kale, droge bodem, bodem met korst, bodem met gewasrest en natte bodem.



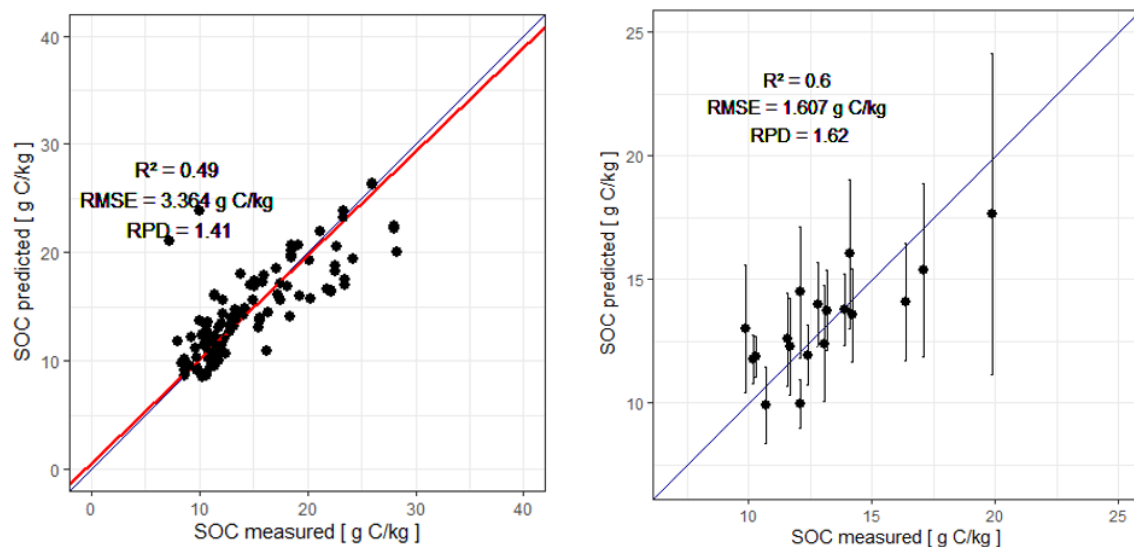
Afbeelding 3.3: Kortgolvlige infrarood index (NBR2) voor verschillende bodemcondities: korst, nat, droog en ingezaaid, gewasrest en gewas (van links naar rechts).

Voor spectrale indices ($NDVI < 0.25$ en $NBR2 < 0.05$) kunnen de natte bodems, gewasresten en groen gewas uit de spectrale composietbeelden worden gefilterd. Het gemiddelde spectrum voor akkerlanden in België laat zien dat het composietbeeld zeer vergelijkbaar is met de droge, ingezaaide bodem (Afbeelding 3.4). Een spectrum van een groen gewas wordt gemakkelijk verwijderd met de $NDVI < 0.25$ (gestandaardiseerd verschil tussen de reflectie bij 665 en 833 nm) en een natte bodem en een gewasrest worden verwijderd met een $NBR2 < 0.05$ (1614 en 2200 nm).



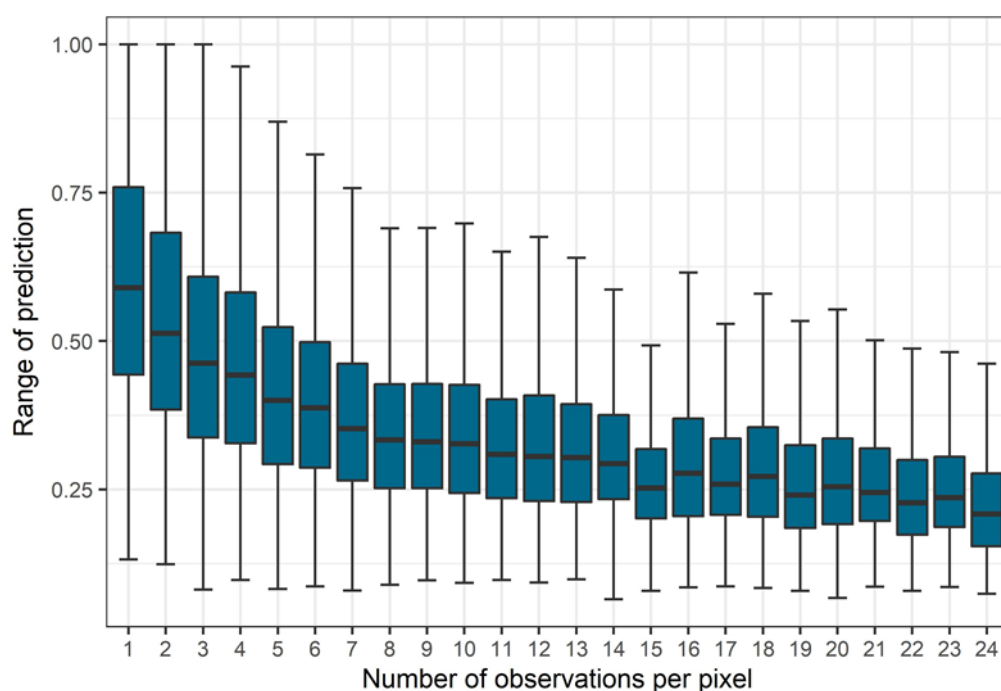
Afbeelding 3.4: Gemiddelde spectra van Belgische akkerlanden met verschillende bodemcondities (zie foto's in Afbeelding 2.5).

Over het algemeen voorspelt het PLSR-model het SOC-gehalte redelijk goed (kruisvalidatie $R^2=0.49$; RMSE= 3.36 g C kg⁻¹ en RPD =1.41; Afbeelding 3.5). Voor een onafhankelijke data set van 18 percelen in de Belgische leemstreek vallen er 78 % van de gemeten waarden binnen de onzekerheid van de voorspelling. Dit ligt iets lager dan de 90 % waarnaar een Engels panel van wetenschappers en beleidsmakers streeft (Andries et al., 2021).



Afbeelding 3.5: Kwaliteit van het PLSR model. Links de 10-voudige kruisvalidatie en rechts vergelijking met een onafhankelijke dataset van gemiddelde organische stofgehalten in 18 Belgische akkerlanden.

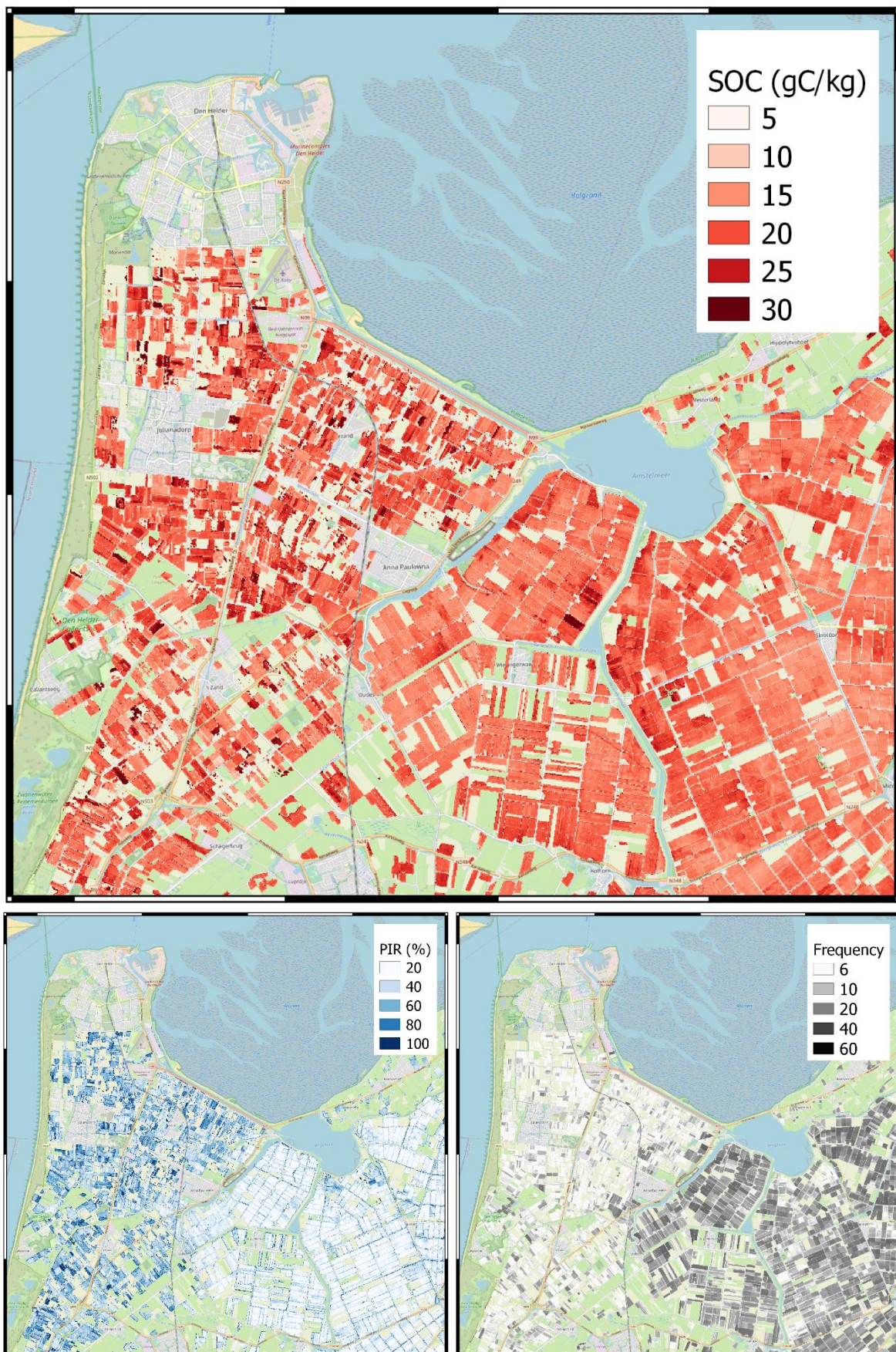
Het betrouwbaarheidsinterval voor de SOC-voorspelling hangt sterk af van het aantal Sentinel-2 opnames dat voor een pixel beschikbaar is op het composietbeeld (Afbeelding 3.6). Minder dan 8 opnames voor een pixel doet de onbetrouwbaarheid toenemen.



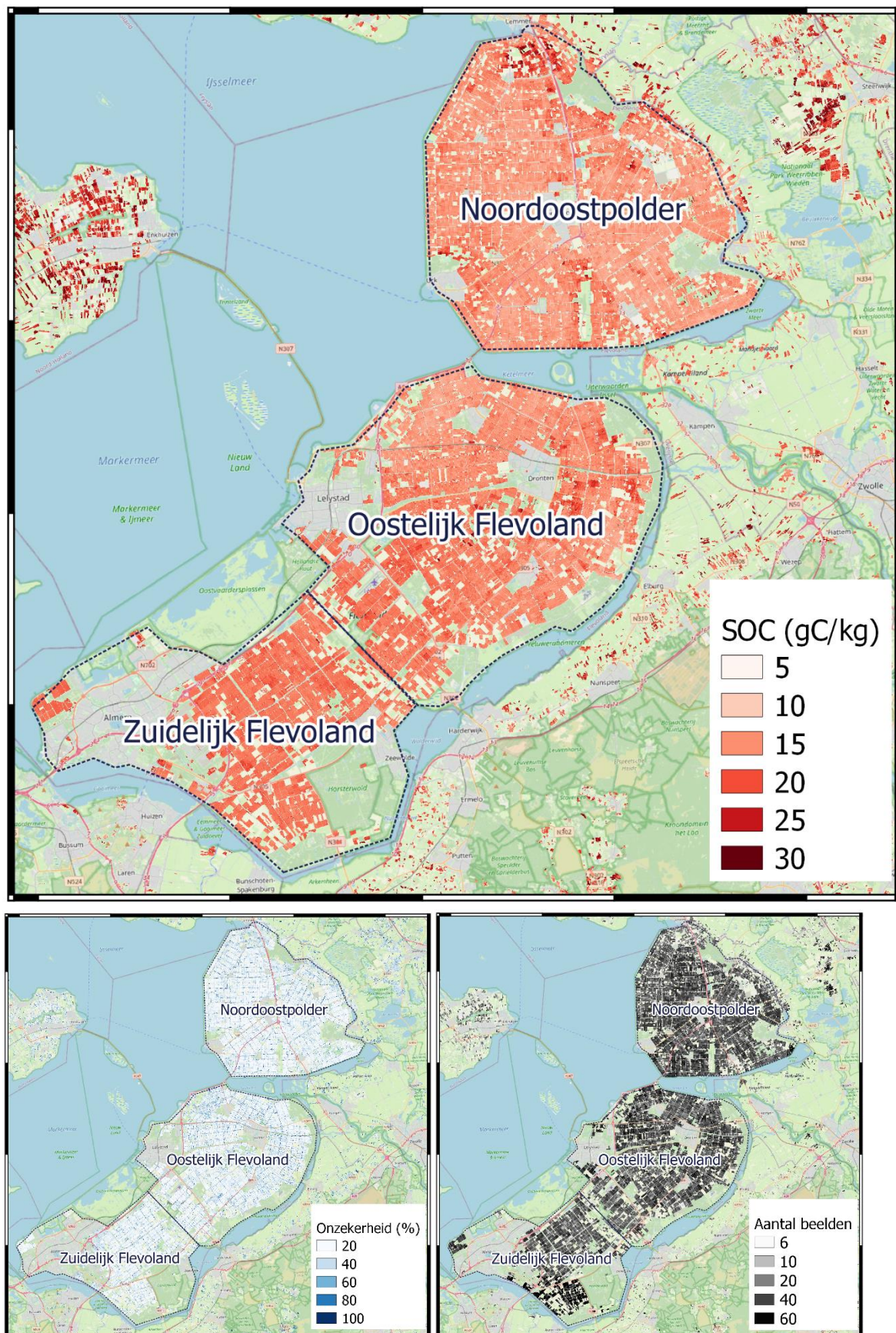
Afbeelding 3.6: Betrouwbaarheidsinterval $(q_{95}-q_5)/q_{50}$, zie paragraaf 2.5) als functie van het aantal spectra beschikbaar voor een pixel van het composietbeeld.

De analyses betreffen de Sentinel-2 beelden T31UFR, T31UFS en T31UFS met gebieden waar akkerbouw overheerst zoals de IJsselmeerpolders, de Wieringermeer en de Belgische Leemstreek. Van deze beelden zijn composietbeelden over de voorjaarsperiodes (maart, april en mei) van 2016 t/m 2021 gebruikt. Deze composietbeelden geven voor ieder pixel een gemiddelde van het spectrum verzameld uit alle opnames die voldoen aan een wolkeloze hemel en een onbedekt bodemoppervlak. De spectra van de composietbeelden zijn vergeleken voor 342 punten in de Belgische leemstreek met spectra van Sentinel-2 beelden waarvoor op hetzelfde moment foto's van het oppervlak zijn gemaakt. Hiermee kan kwalitatief worden vergeleken welke toestand van het bodemoppervlak representatief is voor de composiet-spectra. Eveneens kunnen dan spectrale indices worden getest, zoals de NDVI (zichtbaar en nabij infrarood; golflengte: 665 en 833 nm) en de NBR2 (kortgolvig infrarood; 1614 en 2200 nm), die groene gewassen en gewasresten of vochtige bodems kunnen uitfilteren.

Op de kaart is het effect van het aantal beschikbare pixels op de betrouwbaarheid goed te zien in Noord-Holland (Afbeelding 3.7). De bollenteelt in het duinengebied tussen Den Helder en Castricum zorgt al vroeg in het seizoen voor een hoge gewasbedekking. Hierdoor is het aantal Sentinel opnames met een $NDVI < 0.25$ beperkt en is de betrouwbaarheid van de voorspelling duidelijk lager dan voor het akkerbouwgebied in Flevoland (Afbeelding 3.8), waarvan meer geschikte opnames met kaal land beschikbaar waren. Toch waren ook voor sommige akkerbouwpercelen in de Wieringermeer te weinig geschikte opnames per pixel beschikbaar voor een betrouwbare voorspelling (zie bijlage 2).



Afbeelding 3.7: SOC-voorspelling (boven), het betrouwbaarheidspercentage (linksonder) en het aantal bruikbare beelden voor de composietfoto (rechtsonder) voor de kop van Noord-Holland.



Afbeelding 3.8: SOC-voorspelling (boven), het betrouwbaarheidspercentage (linksonder) en het aantal bruikbare beelden voor de composietfoto (rechtsonder) voor de provincie Flevoland.

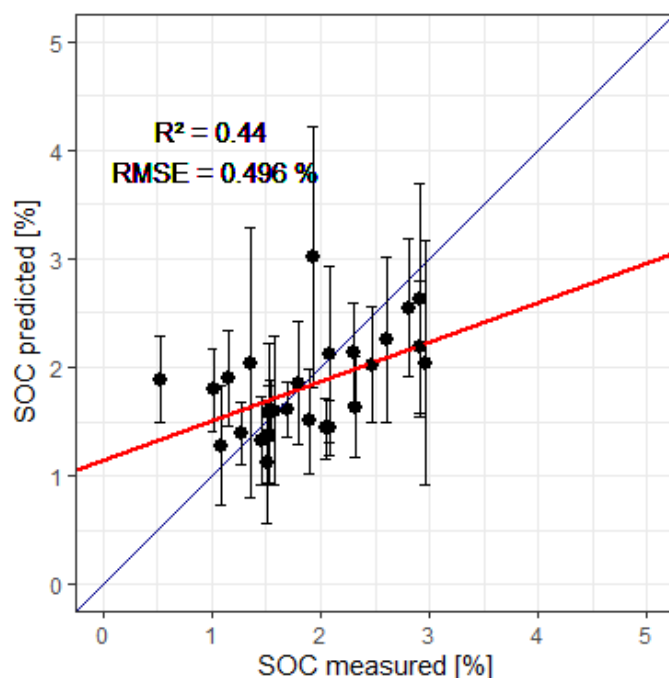
3.2 Validatie organische stofkaarten

Op 63 puntlocaties in Flevoland en Noord-Holland zijn grondmonsters genomen waarvan het organisch koolstofgehalte is bepaald (zie bijlage 3). In bijlage 3 zijn per regio alle bemonsteringslocaties weergegeven, met bijbehorende perceelsgegevens en meetwaarden. De meetwaarden zijn vergeleken met de resultaten van de modelberekening op basis van de Sentinel-2 beelden.

Organische stofgehaltenes van meer dan 3% worden niet goed voorspeld door het rekenmodel op basis van de Sentinelbeelden. In de kalibratieset waren geen monsters met organische stofgehaltenes boven 3%. Bij de validatie zijn waarden boven 3% dan ook buiten beschouwing gelaten. Alhoewel er een overschatting is door het model (gemiddelde residu = 0.9%), vallen 74% van de gemeten waarden binnen de onzekerheid van de voorspelling (hierbij raken de balkjes van het onzekerheidsinterval de ideale lijn, de diagonaal in afbeelding 3.9). Deze validatie is op *pixel-basis*.

Voor Wallonië is er een dataset van de Bodemkundige Dienst met gemiddelde organische stofgehaltenes *per perceel*. Hiermee zijn gemiddelden per perceel voorspeld, waarbij 95% binnen de onzekerheid van de voorspelling viel ($\pm 0.5\%$).

De R^2 van 0.44 is een indicatie van de mate waarin het Sentinelbeeld een voorspelling geeft van de gemeten waarde op pixel-niveau (Afbeelding 3.9). Dit geeft aan dat 44% van de variantie in het organische stofgehalte verklaard kan worden door het model.



Afbeelding 3.9: Gemeten koolstofgehalte in de grondmonsters (UCLouvain) uitgezet tegen de voorspelde waarde op basis van de Sentinelbeelden. De diagonaal staat voor de **ideale** correlatie waarbij de voorspelling 100% overeenkomt met de werkelijke (gemeten) waarden. De foutbalken geven het onzekerheidsinterval ($\pm 2 \times \text{std}$) weer. De rode lijn is de **gevonden** correlatie met 44% overeenkomst.

3.3 Bewustwording en arbeidsmarkt

De participatie van de mbo-studenten in projectactiviteiten hebben geleid tot meeropbrengst in de vorm van:

- Direct bruikbare resultaten voor de ondernemers, in de vorm van organisch stofgehaltes van de bemonsterde percelen
- Bewustwording m.b.t. de gevolgen van klimaatverandering en de wijze waarop je daarop kunt anticiperen via o.a. organisch stofbeheer. Het gesprek met de ondernemers van de bemonsterde percelen hierover draagt hier in het bijzonder aan bij.
- Gescoorde studiepunten voor de studievoortgang.
- Het streven is om die lessen/activiteiten te geven 'in de groeipunt van de sector'. Dus om mee te doen met de modernste ontwikkelingen op het gebied van de bedrijfsvoering. Alleen dan heeft de student de idee dat ze thuis of op het stagebedrijf 'iets nieuws' te vertellen hebben en 'modern onderwijs' volgen. Het betrokken zijn bij een project waarbij satellietbeelden mogelijk kunnen worden gerelateerd aan de bodemverbeteringsprestatie van een ondernemer, spreekt wat dat betreft tot de verbeelding.
- Het is voor de studenten een mooie manier om kennis te maken met de samenwerking tussen diverse partijen in de praktijk en met studenten van het HBO en WO. Veel van de betrokken studenten gaan waarschijnlijk doorstuderen en krijgen zo ook een kijkje in die keuken.

4 Discussie

4.1 Inhoudelijke reflectie op de resultaten

Bemonsteringspunten validatieonderzoek

Tijdens het opstellen van het validatieonderzoek zijn diverse percelen geselecteerd op basis van sterk afwijkende pixelwaarden voor wat betreft het voorspelde organische koolstofpercentage. Pixels langs de perceelsgrens zijn buiten beschouwing gelaten vanwege de grote kans op randeffecten. Om een betrouwbaar monster te nemen is het noodzakelijk dat dit plaatsvindt in het centrum van de pixel, zodat er geen grond uit de naastgelegen pixels wordt meegenomen. Als het bemonsteringspunt aan de rand van een pixel is geplaatst, kan bij het nemen van het mengmonster per ongeluk ook grond worden meegenomen uit naastgelegen pixels. Dit zal een negatief effect hebben op de correlatie tussen de gemeten en de voorspelde waarde van het organisch koolstofgehalte in het betreffende pixel, met name naarmate de verschillen organisch koolstofgehalte tussen aangrenzende pixels groter zijn. Bij een aantal bemonsteringspunten is er bij de uitvoering van het validatieonderzoek géén rekening gehouden met de gewenste plaatsbepaling, o.a. bij de bemonsteringspunten 14, 20, 27, 35, 52, 57, 60, 61, 64, 66 en 67. Dit kan hebben bijgedragen aan de relatief lage correlatie tussen de gemeten en de voorspelde organische koolstofgehaltenes.

Filters voor ongeschikt bodemoppervlak

Om tot de organische stof kaart te komen op basis van de Sentinel-beelden zijn verschillende filters en berekeningen nodig om percelen met een ongeschikt bodemoppervlak eruit te halen (natte bodem, gewasresten, begroeiing). Zo heeft het filteren op basis van NDVI en NBR2 (drempelwaarde 0.05) als voordeel dat de bodemcondities een betere voorspelling van organische stof toelaten (Afbeelding 3.5, helemaal links). Het nadeel is dat voor sommige percelen niet genoeg opnames per pixel beschikbaar zijn voor een betrouwbare organische stof-voorspelling (Afbeelding in Bijlage 2, aangeduid in het zwart). Dit komt zowel in het Noordelijk Zandgebied als in de Wieringermeer voor.

Factoren die interpretatie van Sentinel-beelden verstoren

Bij de voorspelling van het organische stofgehalte op basis van de Sentinel-2 beelden zijn er verschillende factoren die van invloed zijn op de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid (onderscheidend vermogen):

- Langdurig natte plekken – Vocht heeft een effect op de reflectie waardoor onder natte omstandigheden er een overschatting kan zijn van het organisch stofgehalte. Onbekend is hoe vaak dit voorkomt en hoe groot de impact hiervan is op de organische stofkaart.
- Schaduw- en randeffecten – Gebouwen en bomen langs de rand kunnen schaduw werpen over het perceel. Op de Sentinel beelden kan dit leiden tot een afwijkend organische stofgehalte. Er moet nader onderzocht worden hoe dergelijke randeffecten uitgesloten kunnen worden.
- Organisch stofgehalte – Bij het iken van het rekenmodel zijn geen percelen met (extreem) hoge organische stofgehalten meegenomen. Hierdoor kan het organisch stofgehalte van dit soort percelen niet nauwkeurig worden ingeschat. Uitbreiding van de kalibratieset en

validatieset is nodig om dit wel te kunnen. Ook kan nu niet worden vastgesteld of het rekenmodel bij alle organisch stofgehaltes even nauwkeurig is.

- Grondsoort en/of bodemtype – Gekoppeld aan bovenstaand punt met betrekking tot het organische stofgehalte is onbekend of de berekening van het organische stofgehalte voor alle grondsoorten en/of bodemtypes even nauwkeurig is. Hiervoor zijn meer metingen nodig op verschillende grondsoorten en bodemtypes. Over het algemeen is het in de spectroscopie nog niet uitgemaakt hoe we bodemtypes moeten onderscheiden.
- Werking vegetatiefilter – Bij het validatieonderzoek is het voorgekomen dat bij 3 van de 18 percelen, die door het filter werden geselecteerd als braakliggend, in de praktijk grasland bleken te zijn. Onduidelijk is of het filter bijstelling vereist of dat het landgebruik recent is gewijzigd. Dit vergt nader onderzoek.

Potentie van de methode op regioniveau

Om betrouwbare meetwaarden te krijgen is een combinatie gemaakt van minimaal 8 bruikbare Sentinel-opnames (composietbeelden), afkomstig uit een periode van 3-5 jaar. Er zijn beelden gebruikt uit de periode dat de bodem in de akkerbouw over het algemeen braak ligt, namelijk van maart t/m mei. In de bollenteelt staat in deze periode wel een gewas op het land, waardoor de Sentinel-beelden niet geschikt zijn voor de organische stof voorspelling. Dit verklaart waarom er in het noordelijk zandgebied de voorspellingen een grotere onzekerheid hebben. Om deze percelen beter in kaart te brengen zullen Sentinel-beelden uit een andere periode gebruikt moeten worden, namelijk juni en juli. In vervolgonderzoek kan hiermee rekeningen gehouden worden.

Je kunt op twee manieren reflecteren op de nauwkeurigheid van de metingen:

- In figuur 3.9 is te zien dat er een matige correlatie is tussen de gemeten organische stofgehaltes in de bodem en de voorspelling aan de hand van de Sentinel-beelden ($R^2=0,44$). Als er in vervolgonderzoek meer extreme organische stofgehaltes (hoger dan 3%) worden toegevoegd aan de kalibratieset, zal dit de correlatiecoëfficiënt verhogen. Daarmee wordt echter de nauwkeurigheid van de voorspelling binnen de range die nu is gehanteerd, van 1% tot 3% organische stof, niet beter.
- Van de gemeten waardes valt 74% binnen de onzekerheid van de voorspelling. Dit geeft aan dat het statistisch model waarop de voorspelling is gebaseerd op pixelniveau aardig klopt. Normaal gesproken wordt gestreefd naar een percentage van tenminste 90%. Dit percentage zou haalbaar kunnen zijn als niet het pixelniveau, maar het perceelniveau wordt gehanteerd. Dit betekent dat het uiteindelijk haalbaar lijkt te zijn om de voorspellingen van het organisch stofgehalte op basis van Sentinel-beelden te gebruiken op gebiedsniveau, waarbij op perceelniveau het verloop van het organisch stofgehalte in de tijd kan worden beoordeeld (gemeten in tijdvakken van ten minste 3 jaar, gekoppeld aan de composietbeelden). Effecten van verschillen in bedrijfsvoering en bodembeheer op het organisch stofgehalte kunnen hiermee zichtbaar worden.

4.2 Reflectie op bewustwording en arbeidsmarkt

Er is een tekort aan goede mbo'ers op de arbeidsmarkt. Het Clusius College MBO Hoorn probeert daarom in alle lessen de directe, actieve betrokkenheid van de praktijk (lees: het bedrijfsleven, onderzoek en overheid) te realiseren. Zodat 'Nice to Know' verandert in 'Need to Know'. Dat maakt het onderwijs aantrekkelijker en de mbo'ers geschikter voor de arbeidsmarkt. Hiertoe is het Clusius

Meetingpoint opgestart, een systeem van onderwijs binnen projecten. Het Sentinel-project is daar onderdeel van geworden, waarmee een aantal zeer actuele aspecten van bodemkunde direct in het curriculum van mbo'ers is terechtgekomen.

4.3 Spin-off van de samenwerking

De uitvoering van een aantal werkzaamheden en beoogde communicatie-activiteiten zijn deels bemoeilijkt door de beperkingen die zijn opgelegd vanwege corona. Desondanks zijn de doelstellingen behaald, niet in het minst doordat er kon worden doorgepakt op de kennis en ervaringen uit het voorgaande project in 2020. Hierdoor kon in 2021 een vliegende start worden gemaakt en verliep de samenwerking zeer soepel.

Behalve de geplande output in de vorm van een nieuwsbericht en inhoudelijke presentaties bij de aanvang en de afsluiting van het project, heeft de samenwerking tussen de uitvoerende partijen ook extra spin-off gegenereerd, die op voorhand niet was ingecalculeerd. Hieronder een greep uit de onvoorziene dynamiek die het project heeft opgeleverd.

- De resultaten (data) zijn opgenomen in het promotieonderzoek van Klara Dvorakova (UCLouvain). Dit heeft geresulteerd in een vruchtbare wisselwerking bij de verwerking en interpretatie van de gegevens. Hiermee zijn de Nederlandse meetgegevens onderdeel geworden van een groter geheel, in combinatie met o.a. meetgegevens van Belgische percelen.
- Voortvloeiend uit het promotietraject zullen er wetenschappelijke publicaties volgen waarin de meetgegevens uit dit project zijn verwerkt. Bijvoorbeeld In mei 2022:
Klara Dvorakova, Uta Heiden, Karin Pepers, Gijs Staats, Gera van Os, Florence Ferber, Bas van Wesemael, 2022. Improving SOC predictions from Sentinel-2 soil composites by assessing surface conditions and uncertainties. The Living Planet Symposium, ESA. Session A3.02 Towards a space-based Earth Observation Soil Monitoring System. (abstract submitted for poster or oral presentation)
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Save_the_date_Living_Planet_Symposium_2022
- Er is vanuit AGC een link gelegd tussen 'het Sentinel-project' en 'het Bloemkool-project' in Noord-Holland. In april en oktober 2021 zijn de analyse resultaten van 2 x 40 grondmonsters uit het bloemkool-project, aangeleverd bij UCLouvain voor SOC-analyse (met expliciete toestemming van alle partijen; provincie, telers, AGC, en onderzoekers). De grondmonsters en analysedata zijn gekoppeld aan GPS-coördinaten, zodat ook een ruimtelijke analyse gedaan kan worden gekoppeld aan RS-beelden.
- De onderzochte meetmethode is besproken in een interview met Prof. Bas van Wesemael door Frédérique Hupin: La géographie au service de l'observation du sol. Agronomie, Écologie et Innovation, 2021. TCS N°111 Janvier/Février p.33
- De Rabo Carbon Bank werkt aan een protocol om Carbon Credits voor boeren te faciliteren. Gevoed door de kennis en ervaringen vanuit o.a. dit project, heeft Gera van Os, als lid van de Rabo-ESTI Sounding Board, meegewerkt aan een kritische reflectie op nieuwe meet- en rekenmethoden voor het monitoren van koolstofvastlegging in de bodem.
- Het Clusius College is met de opleiding Plantenteelt genomineerd voor de Nationale Onderwijsprijs 2019-2021. In de toelichting en bij de prijsuitreiking zal het Sentinel-project als

voorbeeld worden genoemd van de werkwijze op het Clusius College. Hierin staat de samenwerking met het bedrijfsleven en het toepassen van innovatieve technieken centraal.

Planning: 9 februari 2022 de provinciale finale in Zaandam en vervolgens gaat de winnaar naar de landelijke finale in maart 2022.

Deze uitkomst (output, outcome en impact) van het project is een aardige illustratie van de meerwaarde van samenwerking tussen kennisinstellingen over diverse niveaus heen, van mbo en hbo tot universitair.

5 Conclusie

De conclusies en uitkomsten per deeldoelstelling:

1. Een veldvalorisatie om de mogelijkheden van een bestaand rekenmodel voor bodems in het buitenland te verkennen voor Nederlandse landbouwbodems in Flevoland en Noord-Holland, waarmee aan de hand van Satellietbeelden (Sentinel-2) kan worden berekend wat het koolstofgehalte in de bodem is op een relatief fijnmazige schaal (20x20 m).
Geconcludeerd kan worden dat:
 - Op basis van de Sentinel-2 beelden, kaarten (plattegronden) kunnen worden gemaakt met het organische stofgehalte van tuin- en akkerbouwpercelen, waarin ook de variatie binnen percelen zichtbaar is (resolutie van 20x20 m; dit is veel gedetailleerder dan de standaard bodemanalyses bij Eurofins, die meestal een perceel-gemiddelde meten).
 - De kaarten blijken *niet* nauwkeurig genoeg om te kunnen sturen binnen percelen. De kaarten bieden echter *wel* perspectief voor het monitoren van het organisch stofgehalte tussen percelen en op **regionaal niveau** door de jaren heen. Hierbij is het mogelijk om terug te kijken tot 2015.
 - Voor de doorontwikkeling naar een monitoringstool voor koolstofvastlegging op regioniveau is een uitbreiding nodig van de kalibratie in minerale gronden met hogere organisch stofgehaltes dan die nu in de steekproef zaten.
2. Bewustwording bij agrarisch ondernemers en studenten mbo, hbo en wo in Noord-Holland en Flevoland over de mogelijkheden en meerwaarde van koolstofvastlegging in de bodem:
 - De mbo-studenten hebben direct bruikbare resultaten ontvangen in de vorm van organisch stofgehaltes van de bemonsterde percelen voor de agrarische ondernemers (stagebedrijven).
 - De projectactiviteiten hebben bij de studenten geleid tot meer bewustwording m.b.t. de gevolgen van klimaatverandering en de wijze waarop je daarop kunt anticiperen via o.a. organisch stofbeheer. Het gesprek met de ondernemers van de bemonsterde percelen hierover heeft hier in het bijzonder aan bijgedragen.
3. De aansluiting tussen het onderwijs en de arbeidsmarkt versterken in de regio:
 - Het streven is om die lessen/activiteiten te geven 'in de groepspunt van de sector', dus om mee te doen met de modernste ontwikkelingen op het gebied van de bedrijfsvoering. Alleen dan heeft de student het idee dat ze thuis of op het stagebedrijf 'iets nieuws' te vertellen hebben en 'modern onderwijs' volgen. Het betrokken zijn bij een project waarbij satellietbeelden mogelijk kunnen worden gerelateerd aan de bodemverbeteringsprestatie van een ondernemer, spreekt wat dat betreft tot de verbeelding.
 - Het project was voor de studenten een mooie manier om kennis te maken met de samenwerking tussen diverse partijen in de praktijk en met studenten van het HBO en WO. Veel van de betrokken studenten gaan waarschijnlijk doorstuderen en krijgen zo ook een kijkje in die keuken.
 - Dit project was onderdeel van het Clusius Meetingpoint, waarmee de actualiteit rond bodemkunde en klimaatmitigatie in het curriculum van mbo'ers terecht is gekomen. Dat

maakt deze mbo'ers geschikter voor de arbeidsmarkt. Er is een tekort aan goede mbo'ers. Bij het Clusius College MBO Hoorn wordt ernaar gestreefd om bij alle lessen een directe, actieve betrokkenheid van de praktijk (lees: het bedrijfsleven, onderzoek en overheid) te realiseren. Zodat 'Nice to Know' verandert in 'Need to Know'.

Literatuur

- Andries, A., Morse, S., Murphy, R. J., Lynch, J., Mota, B., & Woolliams, E. R. (2021). Can current earth observation technologies provide useful information on soil organic carbon stocks for environmental land management policy? *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132112074>
- Dekker, P., van Geel, W., van den Berg, W., van der Burgt, G., & Bokhorst, J. (2010, april). *Duurzaamheid organische stof*. Opgehaald van PPO: https://www.researchgate.net/publication/283398889_Duurzaamheid_organische_stof_met_hoden_om_de_kwaliteit_van_organische_meststoffen_te_meten_en_beoordeling_kwaliteit_van_organische_stof_van_digestaat_tussenrapportage_2009/link/5a15445245851500521328a5/dow
- ESA. (2015, juli 24). *Sentinel-2 User Handbook*. Opgehaald van ESA: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- ESA. (2021). *Sentinel-2*. Opgehaald van ESA: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
- Sherrod, L.A., Dunn, G., Peterson, G.A. & Kolberg, R.L, 2002. Inorganic carbon analysis by modified pressure-calimeter method.
- van Eekeren, N., Deru, J., Lenssinck, F., & Bloem, J. (2016). *Bodemkwaliteit op veengrond*. Opgehaald van Louisbolk institute: <https://www.louisbolk.institute/downloads/3119.pdf>
- Vanhoof, C., & Tirez, K. (2003, december). *Bepaling van organische stof/koolstof in vaste stoffen*. Opgehaald van Vito: https://esites.vito.be/sites/reflabos/onderzoeksrapporten/Online%20documenten/rapport_orpmat_2003.pdf

Bijlage 1 Organische koolstofanalyses

1A Nat-chemische OS-analysemethode, Aeres Hogeschool

De natte-oxidatie methode is berust op het principe dat organische stof doormiddel van chroomzuur geoxideerd kan worden. Via titratie en soms colorimetrisch wordt de mate van omzetting van chroom gemeten. Verschillende nadelen van deze methode zijn dat de oxidatie nooit compleet is, dat het stikstofgehalte ook de oxidatie beïnvloedt en dat ook andere stoffen dan organische stof meedoen aan het oxidatieproces (Dekker, van Geel, van den Berg, van der Burgt, & Bokhorst, 2010). De natte oxidatiemethode vindt plaats in een sterk zuur milieu en onder invloed van een krachtige oxidator. Door het mengsel te verhitten vindt er oxidatie plaats van het monster (Vanhoof & Tirez, 2003).

Alle mengmonsters worden uit de vershoudzakjes verwijderd en vervolgens in zakjes gedaan met kleine poriën. Hierdoor kan er warme lucht die de oven geeft door het zakje heen en droogt de grond van het mengmonster. De oven verhit alle monsters 2 dagen lang op 100 graden Celsius. Er is gekozen voor 2 dagen omdat monsters behoorlijk nat waren en deze tijd nodig hadden om te drogen. Nadat de monsters gedroogd zijn worden ze stuk voor stuk vermalen tot een fijn monster en worden ze in transparante potjes gedaan. De monsters zijn op dit moment lucht-droog en fijn vermalen, waarna ze door kunnen voor de natte-oxidatie methode.

Elk monster wordt in het transparante potje goed gemengd doormiddel van een lepeltje. Er wordt vervolgens 0,2 gram grond van elk monster ingewogen en in aparte erlenmeyers van 100 ml gedaan. Zo komen er in totaal van alle 63 monsters, 63 erlenmeyers te staan met elk dus 0,2 gram grond. Een aantal monsters waren veenachtig (9 van de 63), daar verwachtten we een hoog percentage organische koolstof. Van deze monsters is 0,1 gram grond ingewogen en in erlenmeyers van 100 ml gedaan. Zo komen we op 9 erlenmeyers met 0,1 gram grond en 54 erlenmeyers met 0,2 gram grond. Elke erlenmeyer is gemarkeerd met een nummer die staat voor de gegevens van de meetpunten, zodat ze herkenbaar zijn en er bekend is welk monster er in zit. Aan de inhoud van de erlenmeyers wordt nu, doormiddel van een dispenser, 25 ml zwavelzure kaliumdichromaatoplossing (ca. 0,04M) toegevoegd. Dit gebeurt ook bij een lege erlenmeyer die mee gaat als blanco. De erlenmeyers worden nu in een afgesloten waterbad gebracht waarin ze met een lichte schud functie in water van ca. 100 graden Celsius staan. Er kunnen hier 14 erlenmeyers in staan, waarvan 13 gevuld met afgewogen monsters en elke keer één blanco. Ze moeten hier gedurende een uur in blijven. Wanneer het uur voorbij is moeten de erlenmeyers uit het waterbad worden gehaald en minimaal een kwartier afkoelen. Na het afkoelen zijn de monsters klaar om terug te titreren.

Voor het terugtitreren wordt er aan de afgekoelde erlenmeyers 25ml demiwater toegevoegd en 5 druppels indicatoroplossing (O-phenantroline-oplossing). Om het titratieproces goed te laten verlopen wordt er een magneetje en een roerder gebruikt om het mengsel in de erlenmeyers goed door te mengen. Alle monsters worden terug getitreerd met Mohr's zoutoplossing (0,4M), totdat de transparante groene kleur verandert in een bruine troebele kleur. Om te beginnen met de blanco. Het aantal ml Mohr's zoutoplossing wordt genoteerd per erlenmeyer totdat de verandering in kleur plaatsvindt, en wordt zo gekoppeld aan het bemonsteringspunt.

De data die bekend wordt uit de natte-oxidatiemethode wordt in een formule omgerekend naar organische koolstof. De formule gaat als volgt: $(V_{\text{blanco}} - V_{\text{monster}}) \times 0,4 \times 0,25 \times 12 = C_{\text{org}}$. Hierin is V het

volume getitreerde Mohr's zout in ml, dus van het blanco monster en het monster. 0,4 is de Molariteit van het gebruikte Mohr's zout, 0,25 is de correctiefactor van de reactievergelijking (zie bijlage 2) en 12 is de molecuulmassa van koolstof.

Wanneer bekend is wat de C_{org} (organische koolstof) is, kunnen er vanuit daar verschillende andere stappen worden toegepast om organische koolstofpercentage (de eenheid waar de kaarten die zijn gebaseerd op Sentinel-2 beelden ook uit bestaan), het organische stofgehalte en het organische stofpercentage te berekenen.

Voor het berekenen van het organische koolstofpercentage wordt de totale hoeveelheid C_{org} gedeeld door het totaal gewicht in milligram van het ingewogen monster vermenigvuldigd met 100%. De berekening ziet er als volgt uit: $(C_{org}/\text{inweeggewicht monster (mg)}) \times 100\% = \% \text{ organische koolstof}$.

Voor het berekenen van het organische stofgehalte wordt er vanuit gegaan dat 58% van de totale organische stof bestaat uit koolstof. $100\%/58\% = 1,724$ (de vermenigvuldiging factor voor organische koolstof om de organische stof te berekenen). De formule gaat als volgt: $1,724 \times C_{org} = Org$ (organische stof). Om vervolgens het percentage organische stof te weten, moet het gedeelte organische stof gedeeld worden door het totale inweeggewicht van de gewogen monsters in milligram, en dat vermenigvuldigen met 100%. De formule is als volgt: $(Org/\text{inweeggewicht monster (mg)}) \times 100\% = \% \text{ organische stof}$.

Voor de laboratoriumanalyses is gebruik gemaakt van verschillende apparaten en materialen. Hieronder is overzichtelijk weergegeven waar gebruik is van gemaakt en waarvoor.

Tabel: Gebruikte apparatuur voor nat-chemische OS-analyse

Apparaat/materiaal	Functie
Precisie balans	Inwegen monsters
Dispensers 2x	Vloeistoffen toevoegen aan de erlenmeyers
Erlenmeyers (68 stuks)	Hierin wordt de natte oxidatie methode in toegepast op de monsters.
Titrette met digitale monitoring	Titreren van de monsters met de functie van het digitaal bijhouden van de gebruikte ml
Veiligheidsbril en labjas	Veiligheid
Waterbad (100°C)	Oxidatieproces organische stof
Kaliumdichromaat-zwavelzuurmengsel (0,04M)	Reactie op gang brengen
Indicatoroplossing (O-phenantroline oplossing)	Indicatie voor het titratieproces
Mohr's zoutoplossing (0,4M)	Titratievloeistof

1B SOC-analysemethode met CN-analyser, UCLouvain

De grondmonsters van de Aeres Hogeschool zijn met behulp van de CN analyzer geanalyseerd bij de universiteit van Leuven. De monsters zijn in het lab gedroogd aan de lucht en gezeefd over 2 mm. Het totaal koolstofgehalte is bepaald na verhitting tot 900 °C en analyse met IR spectroscopie van de geproduceerde CO₂ met behulp van een Variomax CN analyzer (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany). Voor de monsters die reageerden met 0 % HCl, is het carbonaat gehalte geanalyseerd met een aangepaste druk calcimeter methode (Sherrod et al., 2002). Het bodemkoolstofgehalte (SOC) is dan het totale koolstofgehalte minus het inorganisch (carbonaat) koolstofgehalte. De analyseresultaten zijn gebruikt voor de kalibratie en validatie van de modelberekeningen voor het maken van de organische stof kaart.

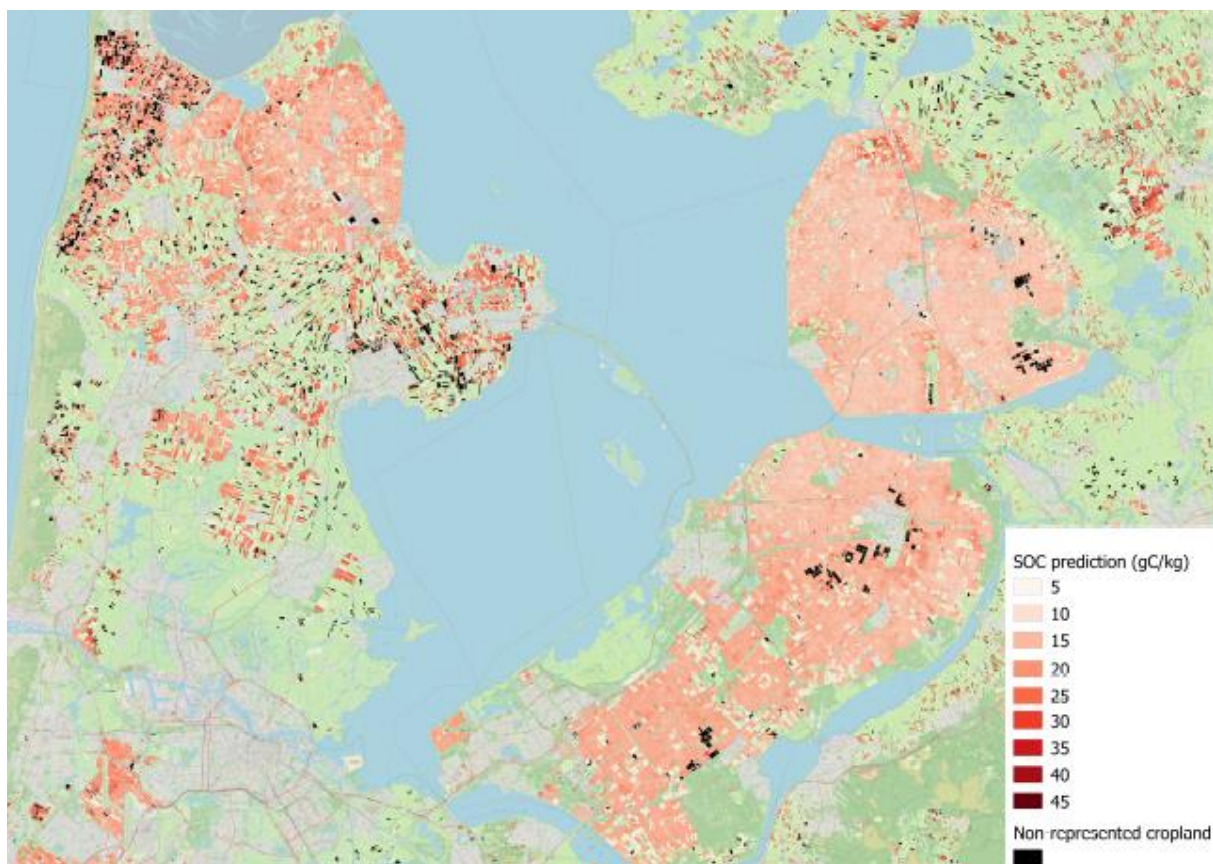
1C Resultaten organische stof-analyses

Bodem organische stof bepaling (Loss of ignition)

Het bodemorganische stof gehalte is gemeten met de 'loss of ignition' of LOI methode, dat wil zeggen het bodemmateriaal wordt zodanig verhit dat de organische stof ontleed, waarna het gewichtsverlies wordt bepaald en dat een maat vormt voor het bodemorganische stof gehalte .

Het bodemmateriaal wordt eerst aan de lucht gedroogd en vervolgens gestampt en gemalen. Vervolgens wordt een monster van ongeveer 5 gram in een keramiek kroesje gedaan, en afgewogen op een balans met 4 decimalen precisie (0.1mg). Vervolgens wordt het monster voor 24 uur gedroogd aan 100°C in een oven, zodat het bodemmonster watervrij is. Na afkoelen in exsiccator wordt vervolgens het monster opnieuw gewogen op de zelfde balans. Daarna wordt het monster in de oven verhit tot 500°C voor 16 uur. Na afkoelen in de exsiccator wordt het monster opnieuw gewogen en kan via het gewichtsverlies het organische stofgehalte (als percentage van de op 100 °C graden gedroogde grond) worden berekend.

Bijlage 2 Onvoorspelde percelen



SOC-kaart met akkerlanden waarvoor wel (rood) of geen SOC (zwart) voorspeld kan worden. Bij de zwart gekleurde percelen is de drempelwaarde voor NDVI of NBR2 niet gehaald op ten minste acht Sentinel-beelden.

Bijlage 3 Gegevens validatiepercelen

2A Meetpunten Noordoostpolder

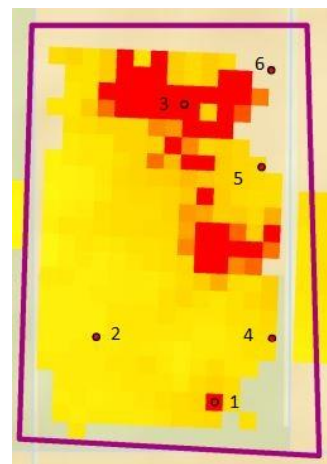
In de Noordoostpolder zijn 2 percelen geselecteerd voor de validatie van de bepaling van organische koolstof op basis van beelden van Sentinel-2.

Perceelnummer 17

Locatie: Vliegtuigweg 15, Ens.

Aantal bemonsteringspunten: 6

Grondsoort: Waardveengronden op zeggeveen KVC



Wat opvalt aan perceel 17 is dat het niet volledig in kaart is gebracht door Sentinel-2. Tijdens veldwerk viel op dat dit land meerdere natte plekken heeft, rechts tussen punt 6 en 5, en rechtsonder tussen punt 4 en 1. Dit zou kunnen verklaren dat deze stukken niet in kaart gebracht zijn, omdat er dus water werd gemeten aan het oppervlakte. Een andere reden zou kunnen zijn dat hier vegetatie stond. Tijdens het veldwerk op 26-10-21 lagen namelijk de punten 3, 5 en 6 in grasland en punten 1, 2 en 4 in maisstoppel. Het gras kan dan een oorzaak zijn voor de hogere meting van organische koolstof. Wat voor de rest opvalt is dat rechtsboven en rechtsmidden een hoger percentage SOC is berekend. Dit komt waarschijnlijk omdat het veen hier meer door de bovengrond is gemengd. Dit viel met het veldwerk heel erg op, dat er in het perceel plekken waren met veen aan de bovengrond.

Figuur 1: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 17, Ens.

Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
1	3,426100	9,262500	-5,836400
2	2,209536	3,172277	-0,962741
3	3,886539	10,922222	-7,035683
4	2,888296	6,203571	-3,315275
5	3,007747	6,224176	-3,216429
6	-	4,564706	-

Tabel 1: SOC% Sentinel-2, C org % lab analyse en de verschillen hiertussen per bemonsteringspunt, geldend voor perceel 17.

In de bovenstaande tabel is per bemonsteringspunt te zien wat voor percentage organische koolstof is voorspeld op basis van Sentinel-2 beelden en wat er is gemeten door lab analyse. Helemaal rechts is het verschil te zien tussen beide methoden ($\text{SOC\% Sentinel-2} - \text{C org \% lab analyse} = \text{Vershil}$).

Bij punt 6 is geen voorspelling gedaan op basis van Sentinel-2 beelden, zie figuur 3, omdat hier waarschijnlijk water heeft gestaan. Wat opvalt tussen SOC% Sentinel-2 en C org% lab analyse is dat de verschillen nogal uiteenlopen. Zo is bij punt 2 te zien dat het verschil ongeveer -0,9 is en bij punt 3 maar liefst -7,0. De organische koolstof op basis van de Sentinel-2 beelden zitten in de meeste gevallen bij dit perceel niet in de buurt van de lab analyses.



Figuur 2: Boringen naar de ondergrond op perceel 17, Ens. Links: punt 2, en rechts punt 3.

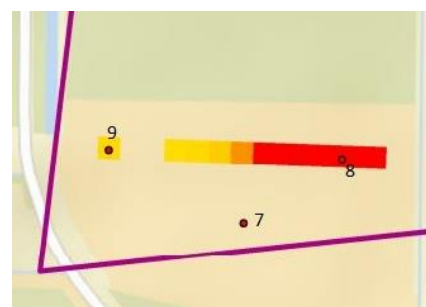
In figuur 4 zijn de boringen naar de ondergrond op perceel 17 te zien. Wanneer beide punten worden vergeleken valt er te zien dat punt 2 een stuk lichter van kleur is dan punt 3. In dit geval is punt twee poldervaaggrond en punt 3 echt waardveen. Bij punt 3 hoort dan ook een hogere organische koolstof gemeten te worden ten opzichte van punt 2. Voorspelling van Sentinel-2 was op punt 3 (waardveengrond) ongeveer 3,8%, terwijl uit het lab bleek dat het daadwerkelijke percentage op 10,9% lag.

Perceelnummer 12

Locatie: Westerveerweg 3, Urk.

Aantal bemonsteringspunten: 3

Grondsoort: Meerveengrond op zand zonder humuspodzol /
Meerveengrond op veenmosveen.



Figuur 3: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 12, Urk.

Perceel 4 is op de kaart gebaseerd op beelden van Sentinel-2 raar gevormd. Een groot gedeelte van het perceel is niet ingekleurd en een gedeelte is wel ingekleurd met een hoge constatering van organische koolstof. Bij het perceelbezoek is geconstateerd dat het perceel voornamelijk gebruikt wordt voor grasland. Dit komt omdat de ondergrond vaak nat is (veen) en teelt van (blijvend) gras, volgens de beheerder van het perceel, de beste optie was. Dit maakt het in eerste instantie al raar dat de modelberekening dit

perceel door laat gaan, omdat het vegetatie zou moeten constateren en dus geen waarde aan dit perceel zou moeten koppelen. Wellicht is hierdoor bij punt 7 bijvoorbeeld niks gemeten en bij punten 9 en 8 wel. Wat opvalt is dat het ingekleurde gedeelte op 1 lijn zit. Het is bijvoorbeeld niet door het hele perceel heen gevlekt.

Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Verschil
7	-	2,652632	-
8	4,869891	9,063830	-4,193939
9	2,939791	2,877778	0,062013

Tabel 2: SOC% Sentinel-2, C org% lab analyse en de verschillen hiertussen per bemonsteringspunt, geldend voor perceel 12.

De verschillen in de bovenstaande tabel zijn bij punt 8 aardig hoog. Uit de lab-analyses blijkt dat het organische koolstofgehalte van punt 8 in werkelijkheid zo'n 4,1 procent hoger is. Bij punt 9 is het verschil nihil en zit de voorspelling van het organische koolstofgehalte op basis van beelden van Sentinel-2 aardig goed. Wat wel opvalt is dat punt 8 een veel hogere organische koolstof heeft dan punten 7 en 9.



Figuur 4: Boringen naar de ondergrond op perceel 12, Urk. Links: punt 7, midden punt 8 en rechts punt 9.

Dankzij de boringen naar de ondergrond kunnen een aantal dingen worden waargenomen. Zo valt te zien dat bij punt 7 het veen ongeveer begint op een diepte van 40 cm en dat de bovenste 40 centimeter (A horizont) typische poldervaaggrond is. Punt 7 heeft dan ook een vrij "normale" organische koolstofpercentage.

Bij punt 9 begint het veen op een diepte van zo'n 25 cm, maar wat al wat meer opvalt is dat de bovenste laag t/m 25 cm wat grijzer is dan bijvoorbeeld punt 7. Dit komt waarschijnlijk omdat hier wat veen door de A horizont is gemengd met bijvoorbeeld ploegen of een andere groundbewerking.

Het organische koolstofpercentage is daarentegen niet veel hoger, wat je wel zal verwachten wanneer er veen door de bovengrond heen is gemengd, omdat veen van nature een hoog percentage organische stof en dus ook koolstof in zich heeft. Bij punt 9 heeft de kaart van Sentinel-2 ook een waarde gegeven voor organische koolstof en die zit 0,06% hoger dan de daadwerkelijke waarde van het monster van punt 9. De voorspelling van organische koolstof is hier vrij nauwkeurig.

Punt 8 heeft van alle meetpunten het hoogste percentage organische koolstof, ongeveer 9%. Wanneer de oorzaak moet worden aangegeven waarom hier het percentage zo hoog is, valt heel goed uit te leggen met het beeld van de boring bij punt 8. Er valt te zien, aan de donkere kleur, dat hier het veen echt goed door de bovenste laag is gemengd. Tijdens het veldwerk is ook opgevallen dat hier veel veenresten in de bovenste laag zaten en in het monster dat hier uiteindelijk van genomen is ook. Wat opvalt is dat de voorspelling organische koolstof door Sentinel-2 vrij ver van de waarde van de lab resultaten zitten. In totaal zit hier ongeveer 4% verschil tussen, waarin Sentinel-2 te weinig organische koolstof voorspelt.

2B Meetpunten Flevoland

In de Flevopolder zijn 3 percelen geselecteerd voor de validatie van de bepaling van organische koolstof op basis van beelden van Sentinel-2

Perceelnummer 10

Locatie: Elandweg 15, Swifterbant

Aantal bemonsteringspunten: 4

Grondsoort: Kalkrijke poldervaaggrond Mn25A



Figuur 5: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 10, Swifterbant.

In figuur 6 is perceel 10 te Swifterbant te zien. Op de afbeelding is het lastig te zien, maar op punt 13 is een blauwe pixel getekend, wat aangeeft dat het organische koolstofgehalte volgens Sentinel-2 voorspellingen heel laag was. Wat ook opvalt is dat op de punten 11 en 12 Sentinel-2 geen waarde heeft voorspeld.

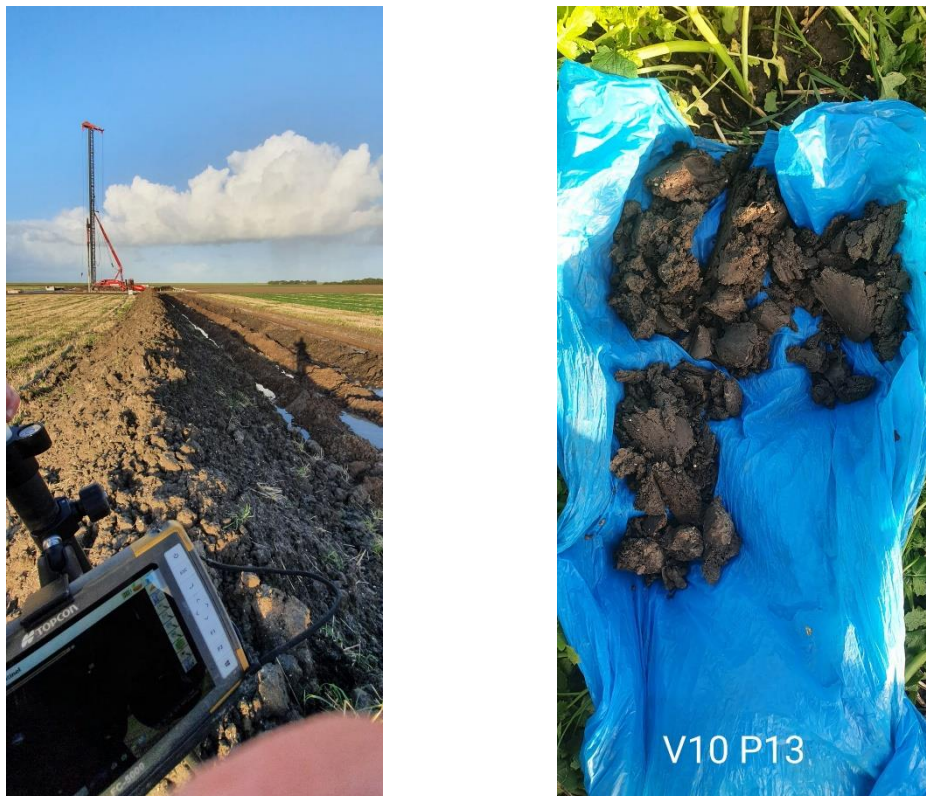
Volgens de eigenaar van dit perceel zit op die plek een perceelscheiding die doorloopt tot rechts van punt 10. Het zou kunnen dat Sentinel-2 hier vegetatie, schaduw, gewasresten of water heeft gezien, waardoor hij geen voorspelling van organische koolstof heeft gedaan.

Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
10	1,717310	-	-
11	-	2,066341	-
12	1,675705	1,908293	-0,232588
13	0,707455	2,328000	-1,620545

Tabel 3: SOC% Sentinel-2, C org% lab analyse en de verschillen hiertussen per bemonsteringspunt, geldend voor perceel 10.

In tabel 3 is te zien dat bij bemonsteringspunt 10 geen meting geweest is vanuit het lab. Dit komt omdat op het perceel op dat punt een grote bult met grond lag. Er werd gebouwd aan een windmolen waardoor er grond is afgegraven voor een weg, sloot en de plaats van de windmolen zelf. Hierdoor kon er geen monster genomen worden van dit punt.

Voor de rest is er in tabel 3 te zien wat de verschillen zijn tussen de metingen uit het lab voor punt 12 en 13 en de voorspelling van Sentinel-2 hiervan. Punt 12 zit de voorspelling voor organische koolstof dicht op elkaar. Sentinel-2 zit van de daadwerkelijke waarde maar 0,2% af. Voor punt 13, waar Sentinel-2 een lage waarde voor organische koolstof voorspeld, is in werkelijkheid 1,6% hoger dan de voorspelling op basis van satelliet beelden. Volgens de eigenaar van het perceel heeft in de hoek waar Sentinel-2 een lage organische koolstof voorspeld baggerslib gelegen. Doordat baggerslib nat is zou het kunnen zijn dat dit de oorzaak is waarom Sentinel-2 hier een laag percentage voorspeld.



Figuur 6: Boringen naar de ondergrond op perceel 10, Swifterbant.. Links: punt 10 waar geen monster kon worden genomen en rechts punt 13,

In figuur 8 is links punt 10 te zien, waar de mogelijkheid om een goed monster te nemen niet mogelijk was. Rechts is punt 13 te zien waar Sentinel-2 een lage voorspelling heeft gedaan van organische koolstof. Wat opviel tijdens deze boring, is dat de bovenste 10 cm veel organisch materiaal had met onder andere stro resten van tarwe. Hierdoor zou er verwacht kunnen worden dat het organische koolstofgehalte juist relatief hoog zou zijn, terwijl Sentinel-2 hier juist een lage voorspelling heeft gedaan.

Perceelnummer 11

Locatie: Wisentweg 20, Dronten

Aantal bemonsteringspunten: 6

Grondsoort: Kalkrijke poldervaaggrond Mn35A

In figuur 9 is perceel 11 in Dronten te zien. Opvallend aan de kaart is dat er een groot gedeelte niet is voorspeld door Sentinel-2. Zo valt er te zien dat bij punten 17, 18 en 19 een groot gedeelte mist. Wat minder goed in figuur 9 is te zien, is dat punt 14 een pixel blauw gekleurd is, wat aangeeft dat het organische koolstofpercentage daar laag is, terwijl de rest van het perceel een andere, egalere, waarde heeft.



Figuur 7: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 11, Dronten.

Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
14	0,549829	2,097196	-1,547367
15	1,677843	2,276923	-0,599080
16	1,742545	2,094340	-0,351795
17	-	1,693805	-
18	1,729849	1,844776	-0,114927
19	1,775961	1,978537	-0,202576

Tabel 4: SOC% Sentinel-2, C org % lab analyse en de verschillen hiertussen per bemonsteringspunt, geldend voor perceel 11.

In tabel 4 valt op dat punt 14, die op de kaart gebaseerd op beelden van Sentinel-2 een laag percentage organische koolstof had, maar in werkelijkheid hoger is. Omdat de plek van punt 14 vlak bij een singel is, met veel bomen, heeft Sentinel-2 waarschijnlijk last gehad van schaduwwerking van de bomen. Hierdoor is de voorspelling van het organische koolstofgehalte lager uitgevallen dan dat het daadwerkelijk is. De rest van de punten zijn vrij nauwkeurig voorspeld, waarin bij punt 15 Sentinel-2 het verste afzit van de werkelijkheid, namelijk ongeveer 0,6%.



Figuur 8: Boringen naar de ondergrond op perceel 11, Dronten. Punt 14.

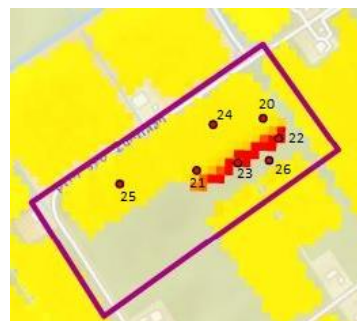
Ook op basis van de ondergrond is er geen verklaring waarom de voorspelling van Sentinel-2 bij punt 14 ernaast zat. Typische poldervaaggrond met daaronder typische zuiderzeegrond met daaronder pleistoceen zand.

Perceelnummer 1

Locatie: Professor zuurlaan 12, Biddinghuizen

Aantal bemonsteringspunten: 7

Grondsoort: Kalkrijke poldervaaggrond lichte/zware zavel
Mn56A/Mn25A



Figuur 9: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 1, Biddinghuizen.

In figuur 11 is perceel 1 in Biddinghuizen te zien. Perceel 1 heeft een aantal aspecten waarom het perceel geselecteerd is voor validatie. Er is een strook tussen de punten 21 en 22, waarin de voorspelling van Sentinel-2 veel hoger is dan de rest, zie tabel 5. Tussen de punten 25 en 20 zit het organische koolstofpercentage ten opzichte van tussen de punten 21 en 22 juist heel laag. Tijdens het veldwerk is er ook gevraagd naar een mogelijke verklaring volgens de eigenaar van het perceel. Toen bleek dat de afgelopen 40 jaar turf op die strook is opgebracht en van die 40 jaar de laatste 20 jaar ook nog eens zaagsel in combinatie met turf. De verwachting was dan ook dat het organische koolstofpercentage hier hoger zou zijn dan op de rest van het perceel, omdat hier geen turf en zaagsel is opgebracht.

Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Verschil
20	2,129426	3,961809	-1,832383
21	2,321553	5,245249	-2,923696
22	3,473526	5,701523	-2,227997
23	3,338352	5,686700	-2,348348
24	2,066415	3,753555	-1,687140
25	2,037706	3,947511	-1,909805
26	-	6,092308	-

Tabel 5: SOC% Sentinel-2, C org% lab analyse en de verschillen hiertussen per bemonsteringspunt, geldend voor perceel 1.

2C Meetpunten Noord-Holland

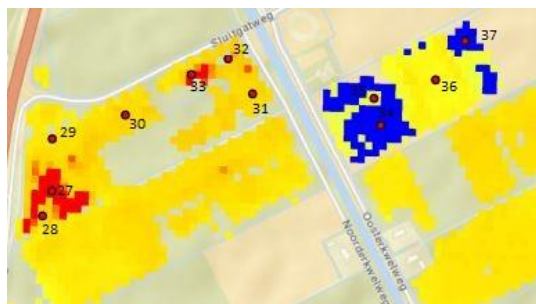
In Noord-Holland zijn 8 percelen geselecteerd voor de validatie van de bepaling van organische koolstof op basis van beelden van Sentinel-2.

Perceelnummer 15

Locatie: Noorder (links) – en Oosterkwelweg (rechts) 27, Wieringerwerf

Aantal bemonsteringspunten: 11

Grondsoort: Veldpodzolgrond leemarm Hn21 (links)– kalkrijke drachtvaaggrond zavel Mv51A (rechts)



Figuur 10: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 15, Wieringerwerf.

Rechts drachtvaaggrond

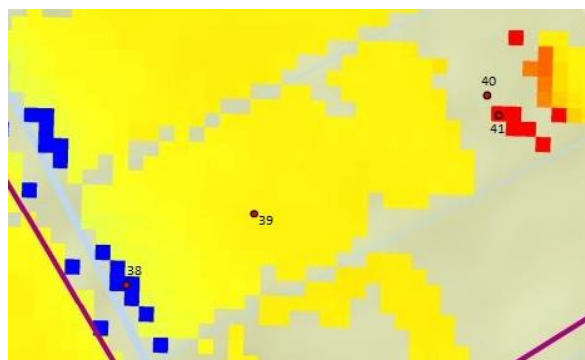
Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Verschil
27	3,665390	2,314286	1,351104
28	3,002259	2,152764	0,849495
29	2,349174	1,738537	0,610637
30	3,091370	2,465025	0,626345
31	2,842714	1,086792	1,755922
32	-	1,169388	-
33	3,503782	1,797183	1,706599
34	0,569249	2,425131	-1,855882
35	0,869667	1,519212	-0,649545
36	1,782405	1,260829	0,521576
37	0,357552	3,530769	-3,173217

Perceelnummer 7

Locatie: Noorderdijkweg 17, Wieringerwerf

Aantal bemonsteringspunten: 4

Grondsoort: Kalkhoudende vlakvaaggrond zeer fijn zand Zn40A



Figuur 11: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 7, Wieringerwerf.

Gras op punten 40 en 41

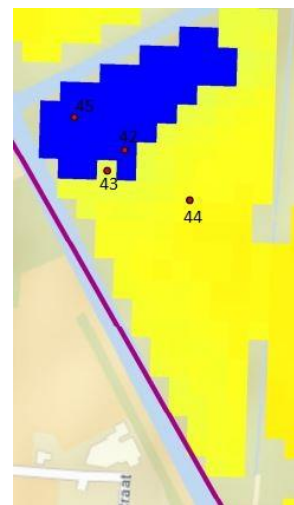
Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
38	0,667463	0,864975	-0,197512
39	1,857780	0,931980	0,925800
40	-	0,712871	-
41	3,618592	0,725714	2,892878

Perceelnummer 5

Locatie: Oosterterpweg 34, Kreileroord

Aantal bemonsteringspunten: 4

Grondsoort: Kalkrijke poldervaaggrond Mn12A/Mn15A – vlakbij kalkhoudende vlakvaaggronden zeer fijn zand Zn40A en Wieringermeergronden zand en lichte zavel AZW1A



Figuur 12: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel d 5, Kreileroord.

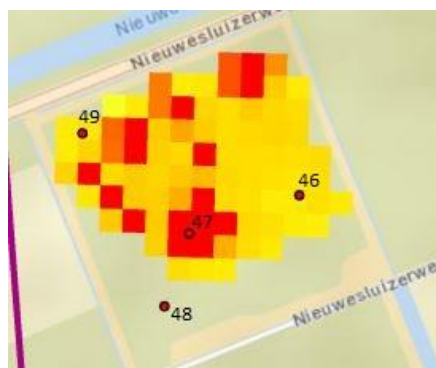
Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
42	0,553611	1,785915	-1,232304
43	0,710920	1,438806	-0,727886
44	1,123251	1,349223	-0,225972
45	0,462371	1,590291	-1,127920

Perceelnummer 6

Locatie: Nieuwesluizerweg 33, Slootdorp

Aantal bemonsteringspunten: 4

Grondsoort: Kalkrijke poldervaaggrond Mn25A/Mn35A



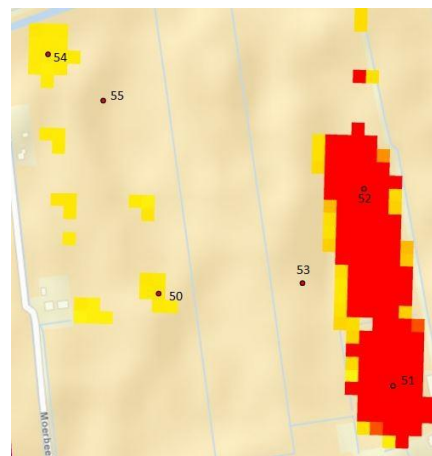
Figuur 13: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 6, Slootdorp.

Perceelnummer 4

Locatie: Moerbeek 35, Lutjewinkel

Aantal bemonsteringspunten: 6

Grondsoort: Knippige poldervaaggrond lichte/zware zavel
gMn83C – dicht bij tuineerdgrond zwarte zavel en klei EK79



Figuur 14: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 4, Lutjewinkel.

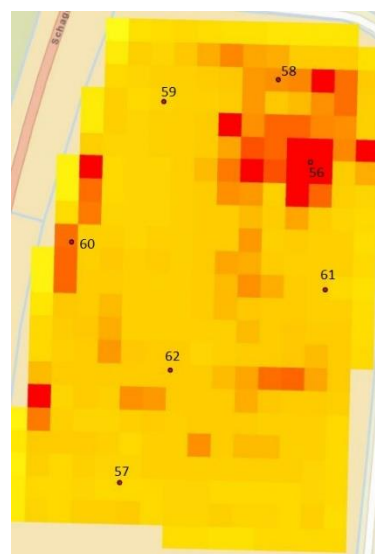
Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
50	-	-	-
51	4,083793	3,558824	0,524969
52	3,739056	3,920000	-0,180944
53	-	3,643243	-
54	-	-	-
55	-	-	-

Perceelnummer 3

Locatie: Meerweg 21, Dirkshorn

Aantal bemonsteringspunten: 7

Grondsoort: Kalkrijke leek-/woudeerdgronden klei pM85A



Figuur 15: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 3, Dirkshorn.

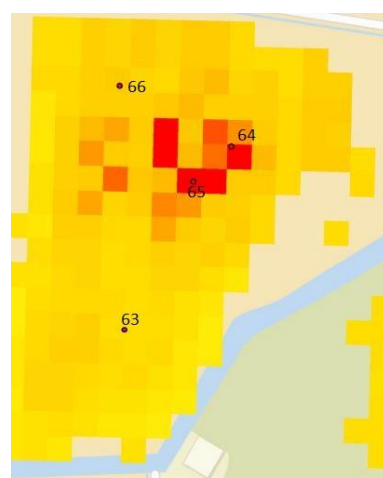
Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
56	3,432000	4,125714	-0,693714
57	3,049261	3,617476	-0,568215
58	3,333834	3,890047	-0,556213
59	3,112035	3,651923	-0,539888
60	3,359575	3,593909	-0,234334
61	3,169515	2,906422	0,263093
62	3,206344	3,667005	-0,460661

Perceelnummer 2

Locatie: Rekerkoogwerk 11, Warmenhuizen

Aantal bemonsteringspunten: 4

Grondsoort: Kalkrijke poldervaaggrond lichte/zware zavel
Mn56A/Mn25A



Figuur 16: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel d 2, Warmenhuizen.

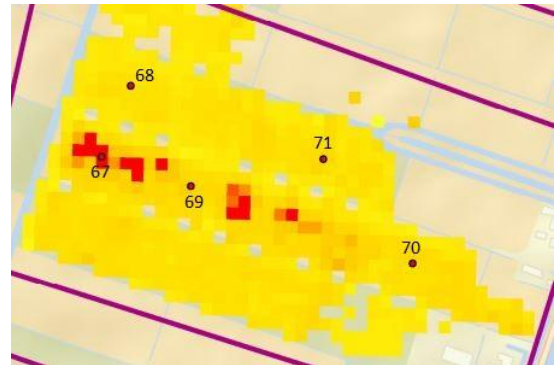
Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
63	2,812080	3,079024	-0,266944
64	3,412270	2,871233	0,541037
65	3,488191	3,307317	0,180874
66	3,244726	2,919588	0,325138

Perceelnummer 18

Locatie: Zuidervaart 141, Alkmaar

Aantal bemonsteringspunten: 5

Grondsoort: Kalkarme leek-/woudeerdgronden klei
pMn85C

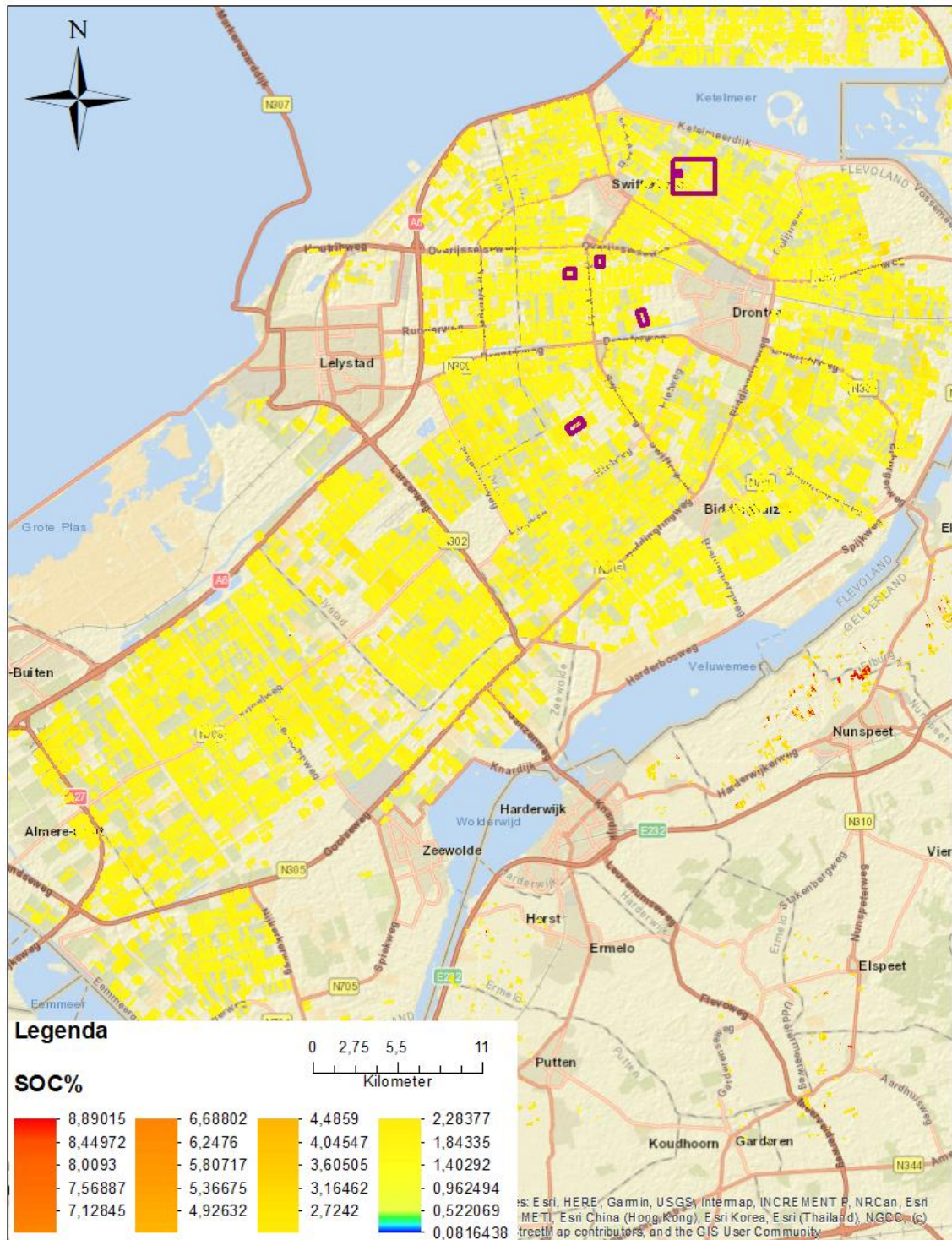


Figuur 17: SOC voorspelling op basis van Sentinel-2 beelden. Perceel 18, Alkmaar.

Bemonsteringspunt	SOC% Sentinel-2	C org % lab analyse	Vershil
67	3,401400	4,326000	-0,924600
68	2,651748	4,983251	-2,331503
69	2,988906	5,136000	-2,147094
70	2,685038	4,560000	-1,874962
71	2,818786	2,243243	0,575543

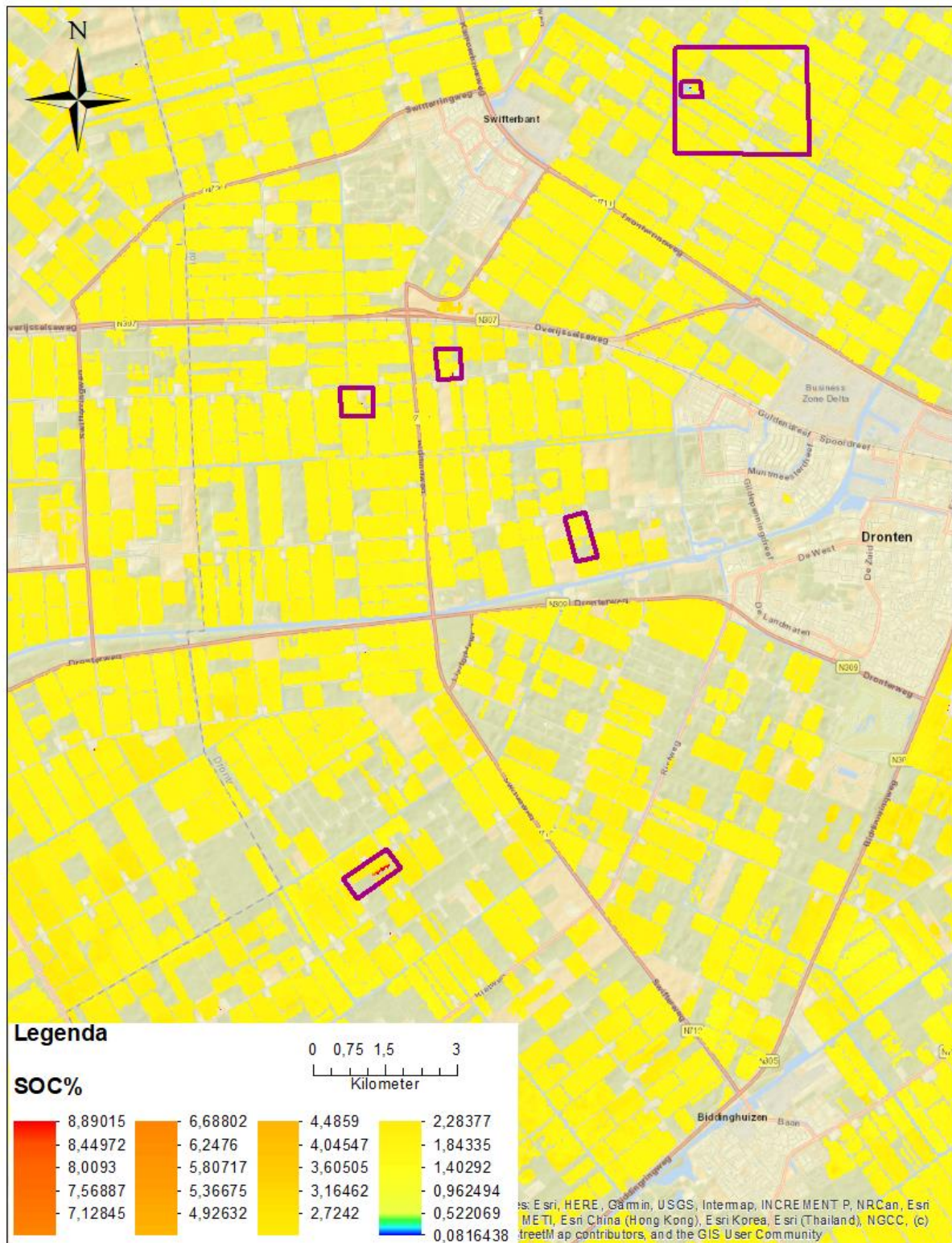
Bijlage 4 SOC voorspellingen op basis van beelden van Sentinel-2

Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Flevoland.



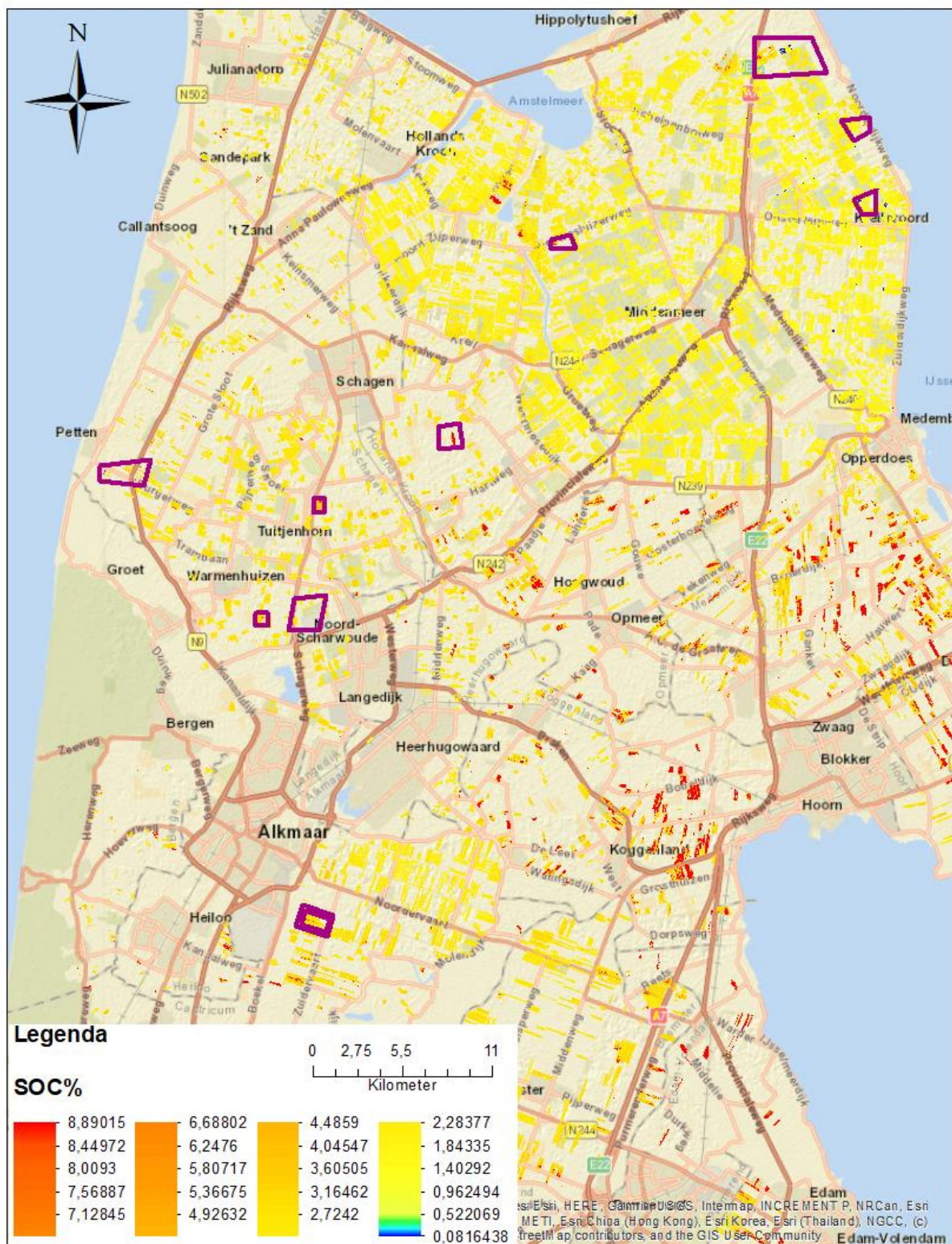
Figuur 18: Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Flevoland. De polygonen getekend in de afbeelding zijn de geselecteerde percelen voor validatie van de voorspelling van organische koolstofpercentage door Sentinel-2.

Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Flevoland.



Figuur 19: Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Flevoland. De polygonen getekend in de afbeelding zijn de geselecteerde percelen voor validatie van de voorspelling van organische koolstofpercentage door Sentinel-2.

Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noord-Holland.



Figuur 20: Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noord-Holland. De polygonen getekend in de afbeelding zijn de geselecteerde percelen voor validatie van de voorspelling van organische koolstofpercentage door Sentinel-2.

Maarten N

Legend

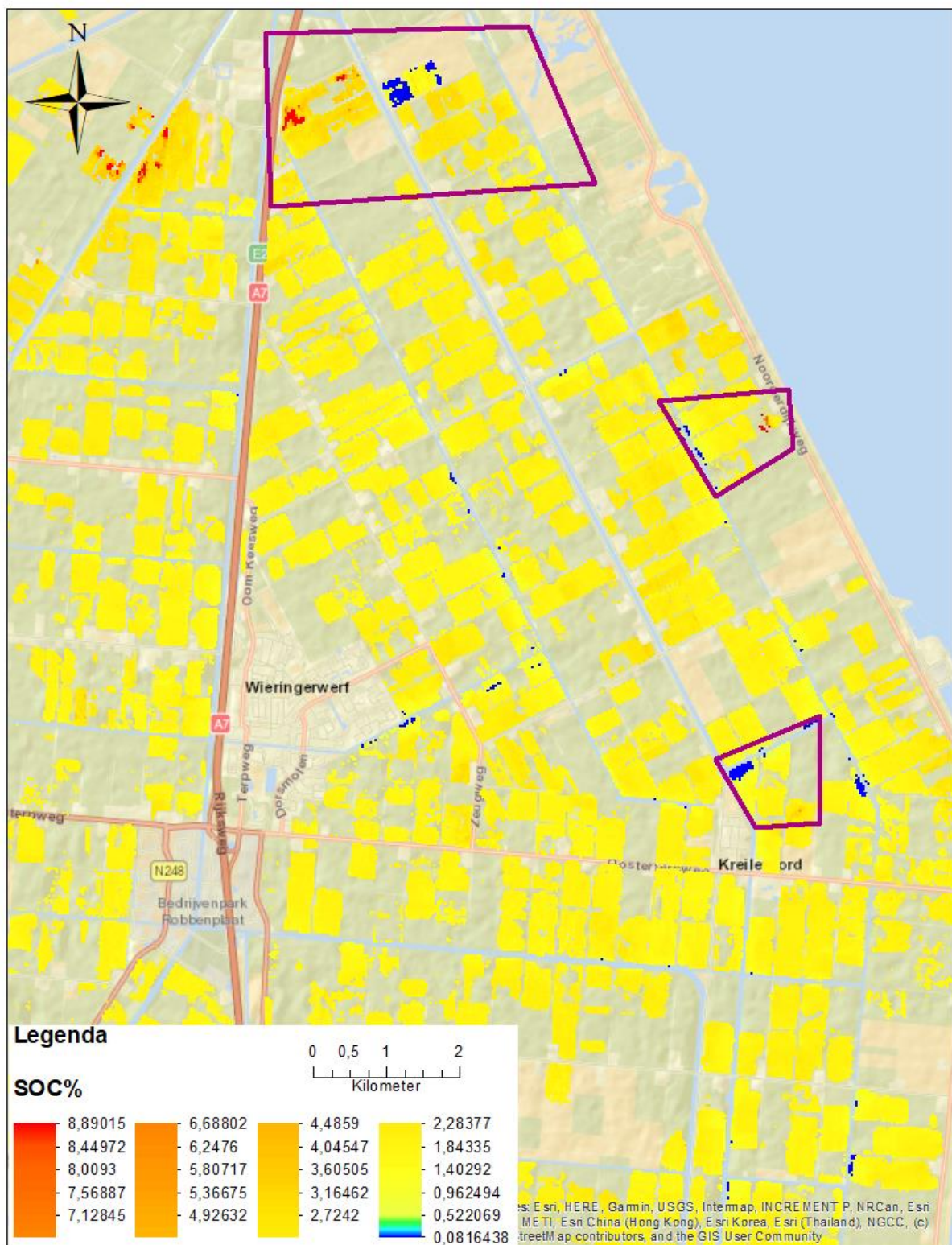
SOC%

8.89015	6.68802	4.4859	2.28377
8.44972	6.2476	4.04547	1.84335
8.0093	5.80717	3.60505	1.40292
7.56887	5.36675	3.16462	0.962494
7.12845	4.92632	2.7242	0.522069
			0.0816438

0 0,5 1 2
Kilometer

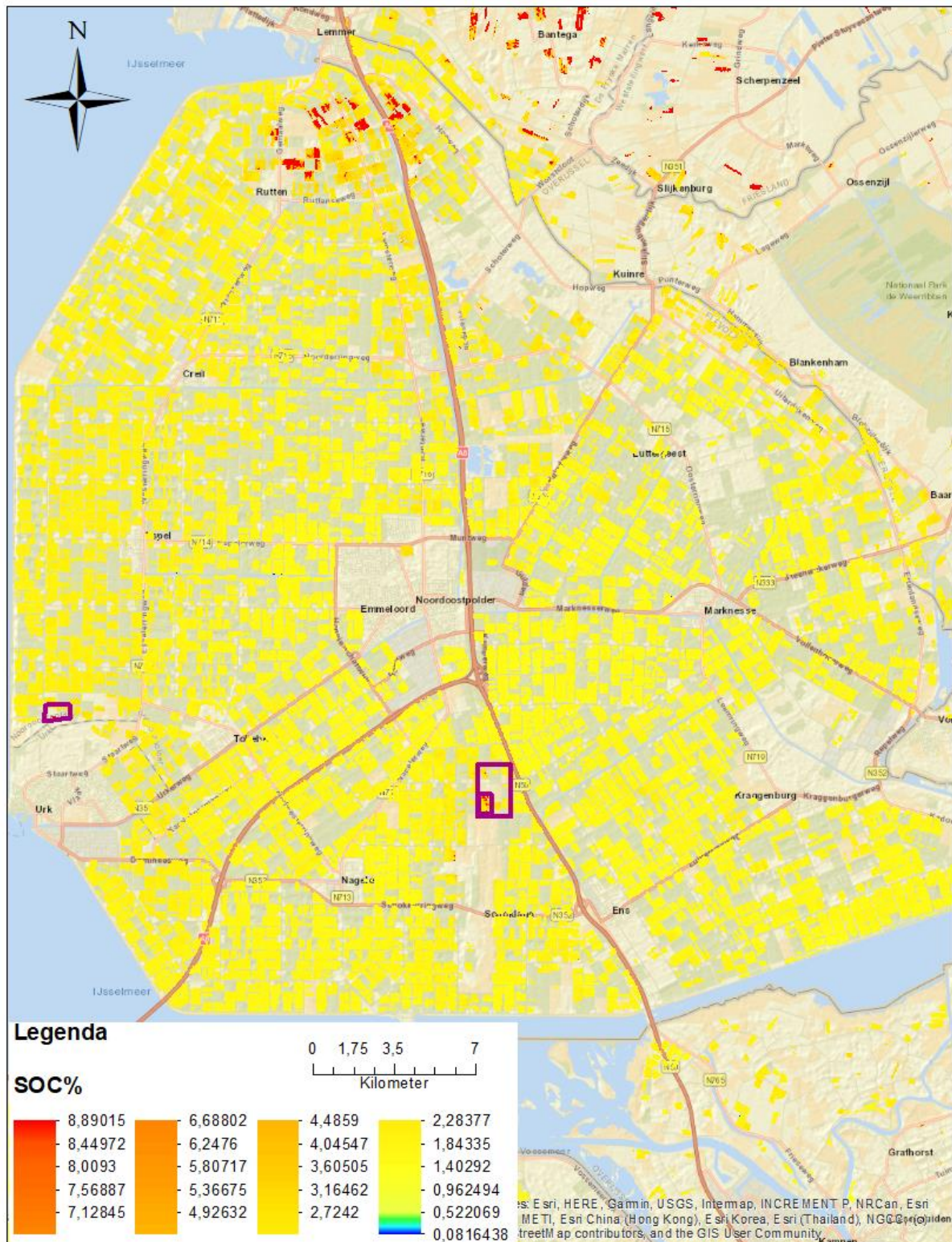
Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) treeMap contributors, and the GIS User Community

Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noord-Holland.



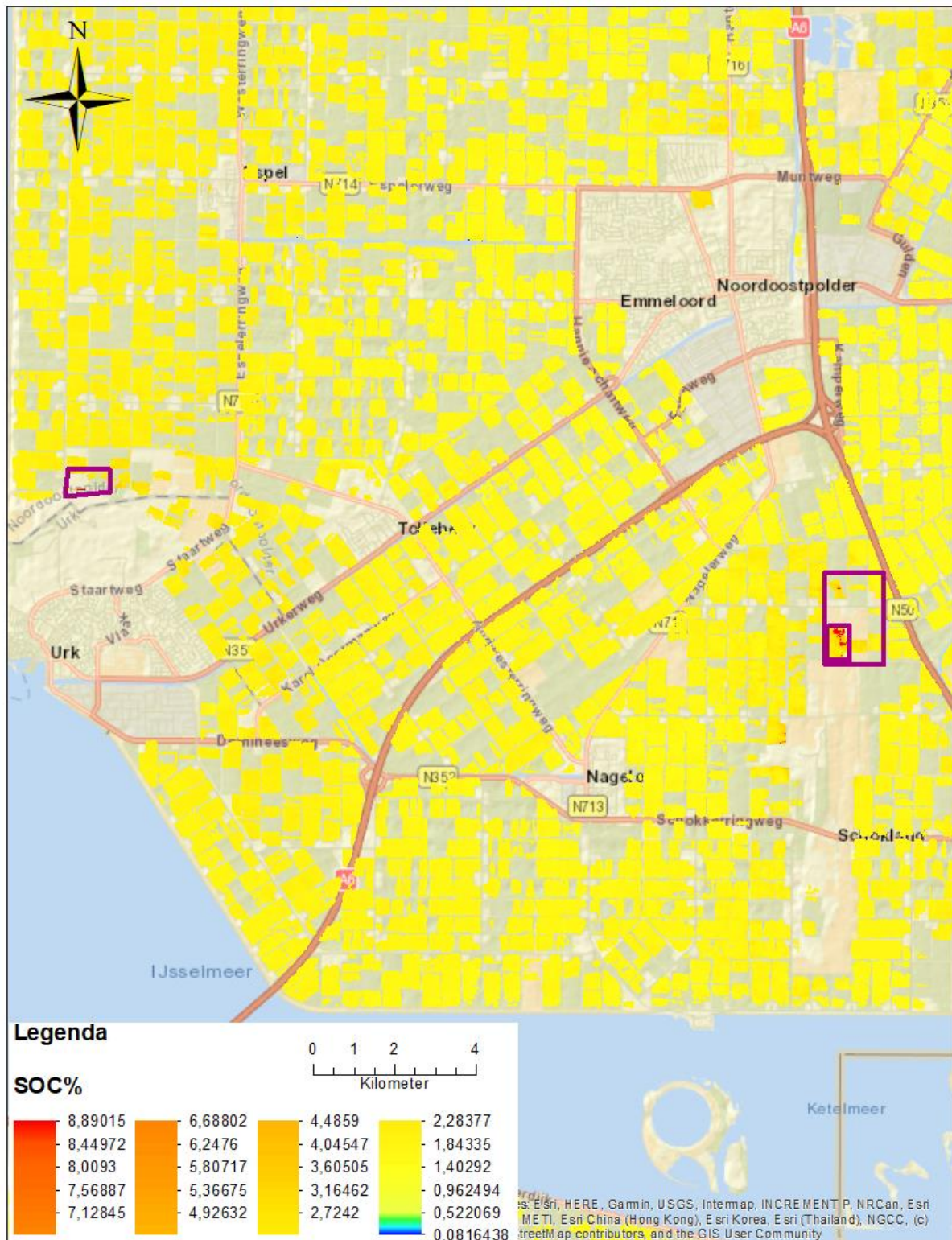
Figuur 22: Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noord-Holland. De polygonen getekend in de afbeelding zijn de geselecteerde percelen voor validatie van de voorspelling van organische koolstofpercentage door Sentinel-2. In deze afbeelding zijn niet alle geselecteerde percelen voor validatie opgenomen.

Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noordoostpolder.



Figuur 23: Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noordoostpolder. De polygonen getekend in de afbeelding zijn de geselecteerde percelen voor validatie van de voorspelling van organische koolstofpercentage door Sentinel-2.

Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noordoostpolder.



Figuur 24: Voorspelling SOC% door Sentinel-2, Noord-Holland. De polygonen getekend in de afbeelding zijn de geselecteerde percelen voor validatie van de voorspelling van organische koolstofpercentage door Sentinel-2.