

umiddelbare omgivelser. Med den valgte hammer og traktorens vægt kunne vi udføre boreringer ned til 15 m u.t. i ler og 10 m u.t. i sand.

Boresystemet er designet til at blive betjent af en enkelt person, der vil fungere som traktorfører og boremand samtidigt. En feltablet med *Environmental Site Model* installeret tillader at navigere til de forskellige målepunkter, og et display viser hvordan sonden bliver skubbet ned i jorden, sådan at der ikke er behov for at nedstige fra traktoren, i tilfælde at der måles redox eller andre parametre ned til 2 m – den antagne rodzone –, med henblik på at øge produktiviteten. Hvis undersøgelsen er dybere end 2 m, eller hvis der skal tages vand eller jordprøver, er nedstigning uundgåeligt, da der skal skrues borerør på, eller prøverne skal håndteres. Der blev opnået en produktion på op til 60 boreringer ned til 2 m og 30 boreringer ned til 5 m inden for en markareal på 30 ha på en arbejdsdag.

Environmental Site Model

Der er udviklet en feltversion af Ejlskovs in-house software *Environmental Site Model*, som kan bruges til planlægning af kortlægningsundersøgelser, hvor GIS data indlæses, og borepunkter kan indtastes hjemme fra kontoret, sådan at føreren nemt kan køre hen til punkterne ved at navigere på kortet. GPS-nøjagtigheden på systemet kan tilpasses projektets behov og de økonomiske rammer. I T-Rex's tilfælde var det tilstrækkeligt med 60 cm.

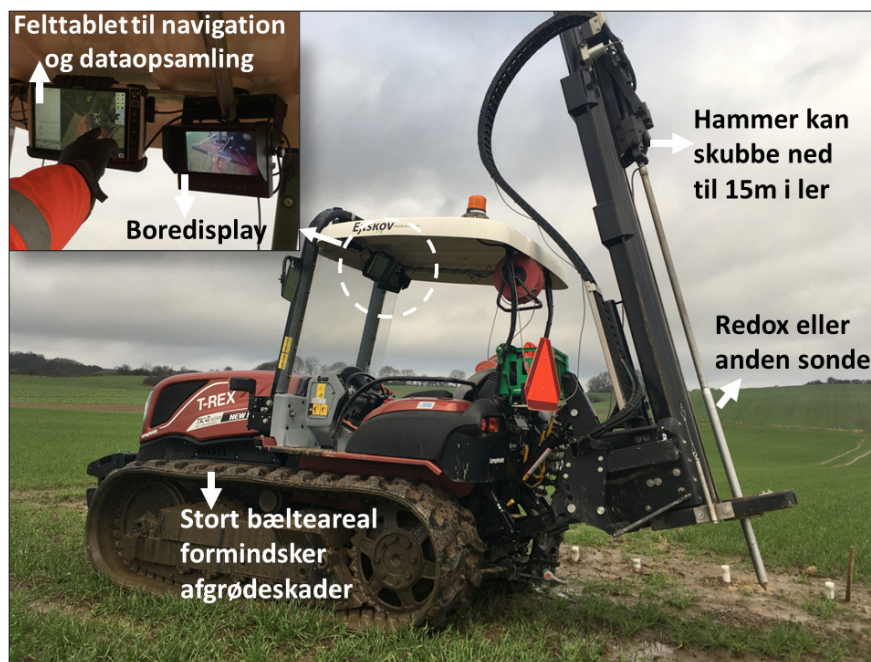
På tablet vises de målte parametre i dybden og i realtid. Figur 4 viser redoxmålinger, men der kunne også være tale om enhver anden parameter, som kan måles ved hjælp af en sonde, som for eksempel ledningsevne, induceret polarisation, vandtryk eller gas til kortlægning af forureningsstoffer.

Softwaren tilbyder live support på mobilnetværket, sådan at projektlederen kan følge med fra basen og lave ændringer i projektet hvis nødvendigt.

Videreudvikling af redoxmåleteknologi

Redoxsonden blev omdesignet til at rumme platinelektroden i et 2,25 tommer rør, sammenlignet med 3,25 tommer ved den første prototype. På den måde blev borefriktionen formindsket markant, og der kunne bores dybere med et lettere køretøj.

Redoxmålemetoden og sonden skulle bruges intensivt for første gang, hvor projektet havde til formål at måle redox i omtrent 60 punkter om måneden. Denne måleintensitet satte teknikken på prøve, og udfordringerne opstod tidligt i forløbet. Den første udfordring var sondens holdbarhed, da sonden aldrig tid-



Figur 2. Billede af det udviklede boresystem med dets væsentligste karakteristika. På billedet ses også en af de piezometerreder fra T-Rex projektet

ligere var brugt i markjord. Der viste sig at være mange sten i de øvre 2 m af jorden, og da sonden ramte dem, bøjede metallet, og kablerne i sonden gik i stykker. Derefter blev der fremstillet en nye sonde med en højere godstykkeelse og en anden stållegering for at imødekomme udfordringerne med marksten. Til gengæld opstod en ny udfordring på målefronten vedrørende platinelektrodens tæthed.

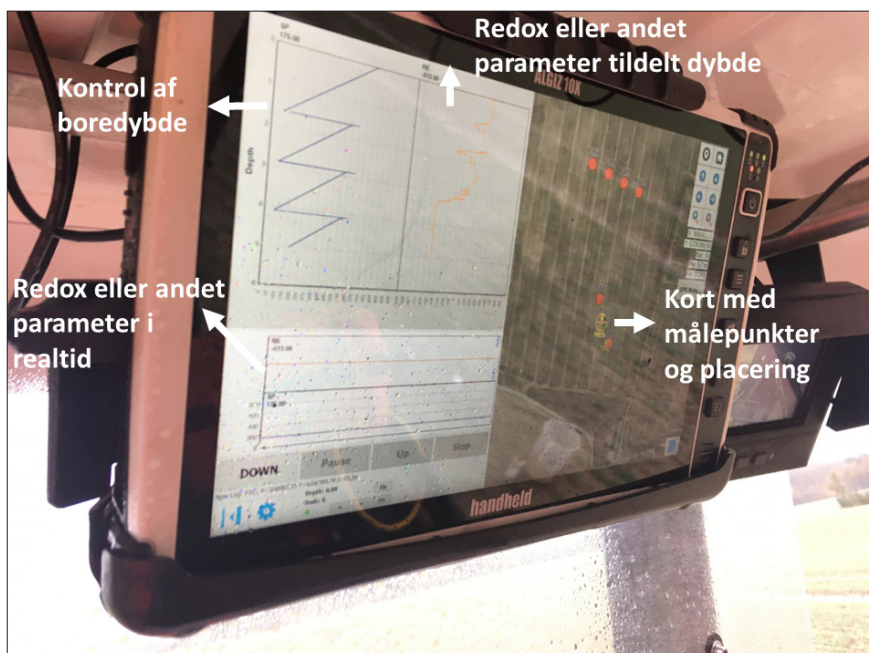
Udfordringen med at måle redox kontinuerligt i undergrunden viste sig at være, at det eneste, der må være i kontakt med formationen, er platinelektroden. Hvis det kabel, der forbinder platinelektroden til overfladen, kommer i kontakt med formationen, så indgår selve kablets materiale (normalt kobber, aluminium eller stål) i redoxreaktionen, og platinen måler en falsk værdi. Med henblik på at gøre platinelektroden tæt under påvirkning af den voldsomme g-kraft, som sonden bliver udsat for under boringen, gik der rigtig mange timer i værkstedet og laboratoriet, og der var mange forgæves feltture.

Alle udviklingstimerne resulterede i en række kvalitetskontrolprocedurer til anvendelse på forskellige tidspunkter under sondens levetid: under fremstilling, før målinger, i løbet af målinger og efter målinger. På den måde kan man være mere sikker på, at platinelektroden måler korrekt hele tiden. Et af resultaterne af at lave disse kontrolprocedurer blev dual-redox; sonden fik koblet en ekstra platinelektrode til sig, som fungerer som kontrolmåling. Da det var fysisk umuligt at anvende kvalitetskontrol på platinelektroden, mens den var i undergrunden, blev der tilføjet

en ekstra platinelektrode i samme sonde. Hvis der er stor forskel mellem de to læste potentialer i løbet af en sondering, vil det være ensbetydende med, at en af de to elektroder er utæt, og den anvendte sonde vil have nået enden på sin levetid. Boringen/sonderingen ville skulle gentages med en frisk, kvalitetstjekket sonde. Udviklingen af dual-redox udvikling krævede få ændringer på det stykke elektronik, som måler spændingen mellem reference elektrode på overfladen og de to platinelektroder. Da der alligevel skulle bruges timer på ombygning af elektronikken, blev der også tilføjet et jordtermometer til placering ved siden af referenceelektroden, da redoxpotential er afhængig af referenceelektrodens temperatur. Tilføjes af en tredje



Figur 3. Billede af traktorspor efterladt af det udviklede boresystem.



Figur 4. Billede af felttablet med softwaren Environmental Site Model, hvor de væsentligste egenskaber vises.

platinelektrode i sonden ville være optimalt for at kunne vide, hvilken platinelektrode der potentielt fejler under målingen, men der var ikke plads indenfor sondens 1,5 tommers indvendige diameter.

Alle disse kvaliteter gør redoxsonden til det eneste instrument i verden, som kan måle redoxpotential i undergrunden på en kontinuerlig måde.

Foreløbige resultater

Der blev udført 20 punktmålinger i Gedved og 22 i Fensholt ned til 2 m.t., fordelt over otte omgange mellem november 2019 til december 2020. På begge lokationer var alle målepunkter ca. 2 m fra hver piezometerransect. Resultater ned til 2 m.t. viste, at der var mange steder, hvor det målte redoxpotential var i nærheden eller under

de 100mV, som mange i litteraturen anser som den værdi i redoxgradienten, hvor nitratreduktion kan begynde at opstå /3,4,5,6/. Sidst i projektet blev der brugt kræfter på at gentage målepunkterne i Fensholt, denne gang ned til 5 m.t.. Resultaterne viste, for stort set alle punkter, en klar redoxgrænse under de 2 meters oprindelige dybdehorisont. Dette resultat er i overensstemmelse med de konklusioner opnået i et andet projekt på nabomarken /7/. Figur 5 viser tre eksempler på en redoxsondering, hvor der både vises en klar redoxgrænse samt en mulig nitratreduktion over redoxgrænsen. Ved T-Rex projektet er der ikke nået en konklusion, om hvorvidt der er betydelig nitratfjernelse/denitrifikation i rodzonen. Som ovennævnt blev der målt redox tæt på piezometerrør, hvorfra nitratkoncentrationen også blev målt løbende. Et af de

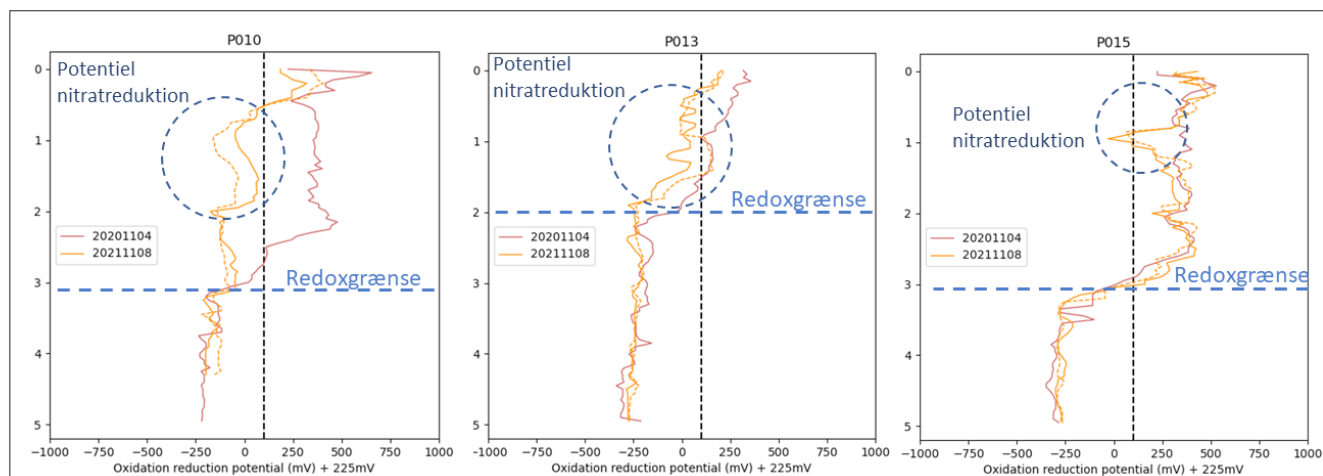
oprindelige formål med projektet var at sammenligne disse nitratmålinger med sondens målte redoxværdier. Da projektet var midtvejs, blev projektet ramt af personaleskift, og det medførte, at redox og nitrat sammenligning blev tilsidesat. Opgivelsen af sammenligningen blev også forstærket af, at der opstod tvivl, om hvorvidt disse nitratmålinger kunne bruges grundet de hydrologiske forhold på de to marker.

Der arbejdes på en peer reviewed publikation om redoxsonden. En rapport med alle redoxrelaterede resultater fra T-Rex projektet kan blive afleveret efter aftale med Ejlskov.

Referencer:

- /1/ Ernsten, V., Ejlskov, P. og Vela, I.Y. 2019. Ny feltmetode til kortlægning af redoxgrænsen. Vand og Jord 26(1): 23-25.
- /2/ Beskrivelsen af T-Rex projektet fra GUDPs hjemmeside.
- /3/ Sabine Fiedler, Michael J. Vepraskas, J.L. Richardson (2007) Soil Redox Potential: Importance, Field Measurements, and Observations. Advances in Agronomy, Volume 94, Pages 1-54,
- /4/ Husson, O. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. Plant Soil 362, 389–417 (2013).
- /5/ N. K. Fageria, G. D. Carvalho, A. B. Santos, E. P. B. Ferreira & A. M. Knapp (2011) Chemistry of Lowland Rice Soils and Nutrient Availability, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 42:16, 1913-1933,
- /6/ Jakobsen R, Hansen AL, Hinsby K, Postma D, Refsgaard JC. Reactive nitrogen in a clay till hill slope field system. Ambio. 2019 Nov;48(11):1240-1251.

IVAN YÉLAMOS VELA (iyv@ejlskov.com) er R&D teamleder og PALLE EJLSKOV (pej@ejlskov.com) er stifter og CEO begge ved EJLSKOV A/S



Figur 5. Redoxsonderinger for punkter nr. 10, 13 og 15 i Fensholt. Sonderinger fra november 2020 er markeret i rød og sonderinger fra november 2021 med dual-redox er markeret i orange. De målte redoxgrænser samt de potentielle reduktionslommer i de øverste 2 m er markeret hhv. med en blå og mørkeblå stiplet linje.