

## Abstract

This project aimed to develop a laser based fast and reliable soil carbon measurement method. Soil carbon is of paramount importance for addressing carbon sequestration and climate change and it plays a crucial role in global carbon markets and agricultural subsidies. Conventional laboratory-based methods for soil carbon measurement are labor-intensive, costly, and time-consuming, hindering large-scale monitoring. The project's main objectives to optimize experimental parameters, design and development of a field-capable LIBS device for soil carbon measurements and conduct thorough testing and on-site demonstrations in field conditions.

A field-capable, compact, and robust LIBS device was successfully developed at Tampere University in timely manner and tested for hundreds of soil samples from various agricultural sites in Finland, in collaboration with carbon action partners. The device's overall dimensions are 60 cm × 45 cm × 19 cm, and it is designed as a closed box with a small accessible section for placing the samples. The device is powered by a battery and controlled through a custom in-house designed LabVIEW-based interface. Based on the measurements conducted on a substantial sample set (a total of 175 samples) collected from 28 different locations and different depths (up to 1 m) within a test agricultural field located in Maaninka region in eastern Finland, we've successfully formulated a calibration model tailored to silt loam soil type and we have derived 3-dimensional spatial variation of carbon content in that test field. The model was found robust in utilization to fresh and unprocessed samples from different fields from different geographical locations. On average, the measurement time was determined to be less than a minute per sample, and this duration can potentially be further shortened through optimized sample handling procedures. Comprehensive details of the measurement campaign have been published in an open-access scientific journal authored by Dwivedi *et al.*, *Geoderma*, 2023 for broader dissemination. Furthermore, the field trials demonstrated the device's capability for on-site soil carbon measurements.

The project promises simplified and fast soil carbon analysis, reducing the need for extensive laboratory work. It has the potential to enhance carbon farming and provide valuable insights for climate action planning. The project has successfully achieved its objectives, laying the groundwork for a rapid and reliable method for soil carbon measurement. The project shared its findings with diverse communities, including end users, farmers, and researchers, gathering valuable feedback. To deploy the device in the field, further on-site testing and developments towards the process automation is needed. Commercialization possibilities of the technology will be explored.

## Abstrakti

Hankkeen tavoitteena oli kehittää laserpohjainen nopea ja luotettava maaperän hiilen mittaussuunnitelma. Maaperän hiili on ensiarvoisen tärkeää hiilensidonnan ja ilmastomuutoksen torjunnassa, ja sillä on ratkaiseva rooli maailmanlaajuisilla hiilimarkkinoilla ja maataloustuissa. Perinteiset laboratoriopohjaiset maaperän hiilen mittaussuunnitelmat ovat työvoimavaltaisia, kalliita ja aikaa vieviä, mikä haittaa laajamittaista seuranta. Hankkeen päätavoitteet ovat kokeellisten parametrien optimointi, kenttäkelpoisen LIBS-laitteen suunnittelu ja kehittäminen maaperän hiilimittauksiin sekä perusteellisten testien ja paikan päällä tapahtuvien demonstraatioiden suorittaminen kenttäolosuhteissa.

Tampereen yliopistossa kehitettiin onnistuneesti kenttäkelpoinen, kompakti ja kestävä LIBS-laitte, jota testattiin sadoille maanäytteille Suomen eri maatalouskohteista yhteistyössä Carbon Action-kumppaneiden kanssa. Laitteen kokonaismitat ovat 60 cm × 45 cm × 19 cm, ja se on suunniteltu laitteeksi, jossa on pieni esteetön osa näytteiden sijoittamista varten. Laitte saa virtansa akusta ja sitä ohjataan mukautetun itse suunnitellun LabVIEW-pohjaisen käyttöliittymän kautta. Itä-Suomessa Maaningassa sijaitsevalta koepeltopelloilta 28 eri paikasta ja eri syvyydeltä (enintään 1 m) kerätyille laajalle näytesarjalle (yhteensä 175 näytettä) tehtyjen mittausten perusteella olemme onnistuneesti laatineet räätälöidyn kalibroitimallin ja osoittaneet kyseisen koekentän hiilipitoisuuden 3-ulotteisen spatiaalisen vaihtelun. Malli todettiin kestäväksi hyödynnettäessä tuoreisiin ja käsittelemättömiin näytteisiin eri aloilta eri maantieteellisiltä alueilta. Keskimäärin mittausaika määritettiin alle minuutiksi näytettä kohti, ja tätä kestoja voidaan mahdollisesti lyhentää edelleen optimoiduilla näytteenkäsittelymenetelmillä. Kattavat tiedot mittauskampanjasta on julkaistu avoimessa tieteellisessä lehdessä, jonka ovat kirjoittaneet Dwivedi *ym.*, Geoderma, 2023 laajempaan levittämiseen. Lisäksi kenttäkokeet osoittivat laitteen kykenevän paikan päällä tehtäviin maaperän hiilimittauksiin.

Hanke lupaa yksinkertaistettua ja nopeaa maaperän hiilianalyysiä, mikä vähentää laajojen laboratoriotöiden tarvetta. Se voi tehostaa hiiliviljelyä ja tarjota arvokasta tietoa ilmastotoimien suunnitteluun. Hanke on saavuttanut tavoitteensa onnistuneesti ja luonut perustan nopealle ja luotettavalle maaperän hiilen mittaussuunnitelmalle. Hanke jakoi havaintojaan erilaisille yhteisöille, mukaan lukien loppukäyttäjät, viljelijät ja tutkijat, keräten arvokasta palautetta. Laitteen käyttöönotto laajasti kentällä edellyttää lisätestausta paikan päällä ja kehitystä automatisoidumpaan suuntaan. Teknologian kaupallistamismahdollisuuksia selvitetään jatkossa.

## Abstrakt

Detta projekt syftade till att utveckla en laserbaserad, snabb och tillförlitlig metod för mätning av markkol. Kol i marken är av yttersta vikt för att ta itu med kolbindning och klimatförändringar och spelar en avgörande roll på de globala koldioxidmarknaderna och jordbrukssubventionerna. Konventionella laboratoriebaserade metoder för mätning av markkol är arbetsintensiva, kostsamma och tidskrävande, vilket hindrar storskalig övervakning. Projektets huvudmål är att optimera experimentella parametrar, design och utveckling av en fältkapabel LIBS-enhet för markkolsmätningar och genomföra grundliga tester och demonstrationer på plats under fältförhållanden.

En fältkapabel, kompakt och robust LIBS-enhet utvecklades framgångsrikt vid Tammerfors universitet i rätt tid och testades för hundratals jordprover från olika jordbruksobjekt i Finland, i samarbete med koldioxidåtgärdspartners. Enhetens totala mått är 60 cm × 45 cm × 19 cm, och den är utformad som en sluten låda med en liten tillgänglig sektion för placering av proverna. Enheten drivs av ett batteri och styrs via ett skräddarsytt LabVIEW-baserat gränssnitt. Baserat på de mätningar som utförts på en omfattande provuppsättning (totalt 175 prover) som samlats in från 28 olika platser och olika djup (upp till 1 m) inom ett testjordbruksfält i Maaninka-regionen i östra Finland, har vi framgångsrikt formulerat en kalibreringsmodell som är skräddarsydd för siltjordstypen och vi har härlett 3-dimensionell rumslig variation av kolinnehåll i det testfältet. Modellen visade sig vara robust i utnyttjande till färsk och obearbetade prover från olika fält från olika geografiska platser. I genomsnitt bestämdes mättiden till mindre än en minut per prov, och denna varaktighet kan potentiellt förkortas ytterligare genom optimerade provhanteringsprocedurer. Omfattande detaljer om mätkampanjen har publicerats i en vetenskaplig tidskrift med öppen tillgång författad av Dwivedi *et al.*, *Geoderma*, 2023 för bredare spridning. Dessutom visade fältförsöken enhetens förmåga att mäta kol i marken på plats.

Projektet utlovar förenklad och snabb kolanalys i marken, vilket minskar behovet av omfattande laboratoriearbete. Det har potential att förbättra kolinlagrande jordbruk och ge värdefulla insikter för planering av klimatåtgärder. Projektet har framgångsrikt uppnått sina mål och lagt grunden för en snabb och tillförlitlig metod för mätning av kol i marken. Projektet delade med sig av sina resultat till olika grupper, inklusive slutanvändare, jordbrukare och forskare, och samlade in värdefull feedback. För att kunna använda enheten i fält krävs ytterligare tester på plats och utveckling mot processautomatisering. Kommersialiseringsmöjligheter för tekniken kommer att undersökas.