

**MAAN KOSTEUDEN JATKUVA MITTAAMINEN NIR-
MITTALAITTEISTOLLA**

Juuso Tuure
Maisterintutkielma
Helsingin Yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroteknologia
2012

HELSINGIN YLIOPISTO HELSINGFORS UNIVERSITET UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Tuure Juuso Väinö Vihtori			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Maan kosteuden jatkuva mittaaminen NIR-mittalaitteistolla			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year Toukokuu 2012	
		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 71	
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Oikein ajoitetulla kylvöllä on merkittävä vaikutus viljasatoon. Kylvöajan määräävinä tekijöinä ovat lämpö ja kosteus. Viljan siemenen optimaaliseen kosteuteen saattamisen todennäköisyyttä, olisi ainakin teoriassa mahdollista parantaa maan kosteuteen perustuvalla kylvösyvyyden säätelyllä. Kylvön aikainen, eli liikkeessä tapahtuva kosteusmittaus, vaatii jatkuvaan mittaukseen soveltuvan mittalaitteiston. Lupaavalta teknologialta maan kosteuden jatkuvaan mittaamiseen vaikuttaa NIR- eli lähi-infrapunaheijastukseen perustuva mittausteknologia, joka ei vaadi kosketusta mitattavaan materiaaliin.</p> <p>Materiaalin kosteuden NIR-mittaukset perustuvat heijastuneen ja absorboituneen säteilyn suhteen mittaukseen, josta kalibroinnin avulla saadaan selville materiaalin kosteus. Tämän työn tavoitteena onkin selvittää soveltuuko Visilab IRMA 7 D NIR-mittalaitte ominaisuuksiensa puolesta maan kosteuden jatkuvaan mittaamiseen pelto-olosuhteissa sekä lisäksi pohtia mittalaitteen hyödyntämismahdollisuutta maan jatkuvaan kosteuden mittaukseen perustuvassa automaattisessa kylvösyvyyden säädössä.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteen saavuttamiseksi laite kalibroitiin kolmelle eri maalajille. Lisäksi testattiin laitteen soveltuvuutta jatkuviin mittauksiin sisätiloissa stabiileissa olosuhteissa selvittämällä mittalaitteen aiheuttama hajonta, askelvaste sekä mitattavan pinnan kulman vaikutus. Jatkuvien mittausten suorittamiseksi rakennettiin työkone, jonka avulla mittalaitetta kyettiin vetämään traktorin perässä. Lisäksi perustettiin koekenttä, jolla jatkuvia mittauksia suoritettiin.</p> <p>Tulosten perusteella mittalaitte on kyllin nopea ja mittalaitteen aiheuttama hajonta on riittävän pieni jatkuviin pelto-olosuhteissa tapahtuviin mittauksiin. Suuri mittausetäisyys mitattavaan materiaaliin ja tästä johtuva mittausalueen suuri valokeila, vaativat laajan ja tuoreen pinnan, jolle ei saisi valua maata mittauksen aikana. Pienempi valokeila ja lyhempi mittausetäisyys antaisivat laitteistolle paremmat hyödyntämismahdollisuudet maan jatkuvassa kosteusmittaussovelluksissa, vähentämällä laitteiston häiriöherkkyyttä.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli suorittaa enemmän jatkuvia mittauksia pelto-olosuhteissa, joilla selvitettäisiin laitteen soveltuvuutta maan kosteuden jatkuviin mittaussovelluksiin. Mittauksia ei päästy suorittamaan haluttua määrää johtuen syksyn sateista ja koekentän pellon vettymisestä. Tehdyt mittaukset olivat pääosin laitteiston testaukseen ja kehittämiseen tähtäviä mittauksia.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords NIR-mittaus, lähi-infrapuna, maan kosteus, jatkuva, mitta			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasi Prof. Jukka Ahokas			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Tuure Juuso Väinö Vihtori			
Työn nimi — Arbetets titel — Title On-line NIR-measurement of soil moisture content			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agricultural Engineering			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis	Aika — Datum — Month and year May 2012	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 71	
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Timing has a significant influence on grain yield. Determining factors for sowing time are moisture and temperature. Automatic sowing depth control would at least theoretically increase the chance for the seed to get sown in optimal moisture. Depth control during sowing requires technology suitable for on-line measurement of soil moisture content. Acquisition of soil moisture by Near Infrared reflectance (NIR) - seems promising for on-line measurements. NIR moisture measurements of a material do not require contact between the NIR-sensor and the measured material.</p> <p>NIR-measurements of material moisture content are based on the relationship between the absorbed and reflected radiation, sent to the material from a light source and measured by the NIR-sensor. The main goals of the study were to determine the suitability of Visilab IRMA 7D-moisturemeter for in field on-line soil moisture measurements and to consider the applicability of the moisture meter for automatic sowing depth control. To achieve the goals of the study the moisture meter was calibrated for three different soil types. Moisture measurements were carried out indoors in stable conditions to determine the dispersion and step response of the moisture meter. Also the impact of the angle between the measured surface on the moisture meter was examined. To achieve the main goal of the study a tractor operated implement was built to carry out the infield on-line moisture measurements of soil moisture content. In addition a test field was established in order to complete the measurements.</p> <p>According to the results of this study the Visilab IRMA 7D-moisture meter is fast enough and the dispersion is small enough for infield on-line soil moisture measurements. Long measuring distance and large beam of light requires a large and fresh area on the measured surface. Any soil should not run over on the area of the light beam during moisture measurements to achieve accurate results. A smaller area beam and shorter measuring distance would provide better potential for usage in infield on-line soil moisture measurements, by reducing sensitivity to external disturbance.</p> <p>The goal of the study was to perform more infield measurements to more specifically determine the suitability of the moisture meter. The measurements were not however performed due to the heavy rainfall during the autumn. The measurements which were carried out aimed more for the development of the implement.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords NIR-measurement, Near Infra-red, soil moisture content, on-line measurement			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisor: Prof. Jukka Ahokas			

SISÄLLYS

LYHENTEET JA SYMBOLIT	7
1. JOHDANTO	9
2. KIRJALLISUUS	11
2.1 Maan kosteuden mittaaminen	11
2.1.1 Maan kosteusmittausten tulosten hyödyntäminen.....	11
2.1.2 Optimaalinen kylvöalusta ja kylvökosteus	14
2.2 NIR-Spektroskopia	19
2.2.1 NIR-Spektroskopia yleisesti	19
2.2.2 NIR-mittalaite.....	20
2.2.3 Erillisiin aallonpituuksiin perustuva NIR-mittausmenetelmä	23
2.2.4 Rividetektoreihin perustuva NIR-mittausmenetelmä	24
2.3 Maan kosteuden mittaaminen NIR-teknologialla.....	25
2.3.1 Maan jatkuva kosteuden mittaaminen NIR-teknologialla, aikaisempia tutkimuksia	26
3. TYÖN TAVOITTEET	31
4. AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT	32
4.1 Jatkuvassa mittauksessa käytettävä laitteisto, ohjelmisto ja kytkentä työkoneeseen	32
4.2 Laitteen kalibrointi ja vertailudatan keruu astiakokeista.....	38
4.2.1 Kosteuden termogravimetrinen määrittäminen maanäytteistä	38
4.2.2 Laitteen kalibrointi	40
4.3 Maan kosteusdatan keruu kenttäkokeella.....	41
4.3.1 Maan kosteuden vertailudatan keruu HH2-kosteusmittarilla	42
4.3.2 HH2-kosteusmittarin kalibrointi	43
5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	46
5.1 Mittaustulokset	46
5.1.1 Mittauskulman vaikutuksen ja valokeilan mittaaminen	46
5.1.2 Mittalaitteen askelvastekoe	50
5.1.3 Mittalaitteen aiheuttama hajonta	53
5.2 Jatkuvat mittaukset	55
5.2.1 Mittaustulosten suodatus	55
5.2.2 Mittattavan pinnan vaikutus.....	57

5.2.3	Mittaustulokset 1.....	57
5.2.4	Mittaustulokset 2.....	59
5.2.5	Mittaustulokset 3.....	60
5.2.6	Mittaustulokset 4.....	63
5.2.7	HH2 ja gravimetrinen mittauksen tarkistusmittaus.....	64
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	65
7	KIITOKSET.....	67
	LÄHTEET	68

LYHENTEET JA SYMBOLIT

A	Absorbanssi
As	Aitosavi
c_0	Valon nopeus tyhjiössä
He	Hiue
Hk	Hiekka
Hs	Hiesu
Ht	Hieta
HtMr	Hietamoreeni
Hz	Hertsi
I_0	Säteilyn intensiteetti
I_a	Näytteeseen absorboituneen säteilyn intensiteetti
I_r	Näytteestä heijastuneen säteilyn intensiteetti
I_t	Näytteen läpäisseen säteilyn intensiteetti
NIR	Lähi-infrapunaheijastus (Near Infra-red reflectance) aallonpituusalue 700–2500 nm
PLS	Osittainen pienemmän neliösumman regressioanalyysi (Partial Least Squares)
R	Heijastussuhde(Reflectance)
SWIR	Lyhyen aallonpituusalueen (1100–2500 nm) infrapunasäteily, (Short-wavelength infrared)
V	Voltti
VIR	Näkyvä infrapuna (400–1100 nm) (Visible infrared)
VIS	Näkyvä valo (400–700 nm) (Visible)
w	Materiaalin massaperusteinen kosteus
wb	Materiaalin märkäperusteinen kosteus (wet basis)
λ	Aallonpituus

- ϵ Dielektrinen vakio, jolla ilmaistaan väliaineen vaikutus sähkön johtumiseen
- θ Materiaalin tilavuusperusteinen kosteus

1. JOHDANTO

Viljan optimaalinen kylvöaika ajoittuu Suomessa hyvin lyhyelle ajanjaksolle. Kylvöajankohdan määräävinä tekijöinä ovat lämpö sekä maan kosteus. Tilakoon kasvaessa on kylvön oikea-aikainen ajoittaminen ja optimaalisen kylvösyvyyden valinta haasteellista johtuen lohkokohtaisista ja lohkonsisäisestä maan rakenne ja -laji vaihteluista. Viljan siemenen optimaaliseen kosteuteen saattamisen todennäköisyyttä, olisi ainakin teoriassa mahdollista parantaa maan kosteuteen perustuvalla kylvösyvyyden säätelyllä. Tällöin siemen pystyy parhaalla mahdollisella tavalla hyödyntämään maassa olevan kosteuden. Näin saavutetaan varmempi ja tasaisempi itäminen.

Kylvön aikainen, eli liikkeestä tapahtuva kosteusmittaus vaatii jatkuvaan mittaukseen soveltuvaa teknologiaa. Lisäksi mittalaitteiston tulee kestää pellolla vallitsevia vaativia olosuhteita, kuten pölyä, tärinää, iskuja ja kosteutta. Lupaavalta teknologialta maan kosteuden jatkuvaan mittaamiseen vaikuttaa lähi-infrapunaheijastukseen NIR-spektroskopiaan (Near-infrared reflectance) perustuva mittausteknologia, joka on jo käytössä useissa eri materiaalien jatkuvissa kosteusmittaussovelluksissa mm. paperi- ja selluteollisuudessa, elintarvike- ja lääketeollisuudessa sekä koetasolla myös maan kosteuden mittaussovelluksissa.

Maan kosteutta voidaan arvioida aistinvaraisesti maan tummuuden perusteella. Maan tummuus eli heijastus näkyvän valon aallonpituusalueella (noin 400–700 nm) riippuu maalajin ja multavuuden ohella kosteudesta, joten heijastusmittaus lienee yksi vanhimmista maanviljelyksessä käytetyistä kosteudenmittausmenetelmistä. Maan lähi-infrapunaheijastusmittauksessa mitataan maahan lähetetyn säteilyn heijastussuhdetta lähi-infrapunan aallonpituusalueella (noin 700–2500 nm). Mittaukset perustuvat aineiden taipumukseen absorboida säteilyä tietyllä aallonpituusalueella. Vesimolekyylit absorboivat säteilyä voimakkaasti noin 1450, 1950 ja 2950 nm aallonpituuksilla (Plamer ja Williams 1973, Järvinen ym. 2007), jolloin säteilyn energia muuttuu molekyylivibraatioksi säteilylle altistuvassa vesimolekyylissä (Walley ja Stafford 1992). Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää pääasiassa sellu- ja

paperiteollisuuden tarpeisiin suunnitellun NIR-mittalaitteen Visilab IRMA-7D soveltuvuus ja muunnettavuus maan jatkuviin kosteuden mittauksiin pelto-olosuhteissa.

2. KIRJALLISUUS

Katsauksella kirjallisuuteen on tarkoitus selvittää maan jatkuvan kosteusmittaustulosten hyödyntämismahdollisuuksia, sekä selvittää NIR-heijastusmittauksen toimintaperiaate ja lisäksi tarkastella mittaustavan soveltuvuutta maan kosteuden jatkuvaan mittaamiseen. Lisäksi tarkastelun alla on aikaisempia tutkimuksia, joissa maan kosteutta on mitattu jatkuvasti NIR-heijastusmittauksella.

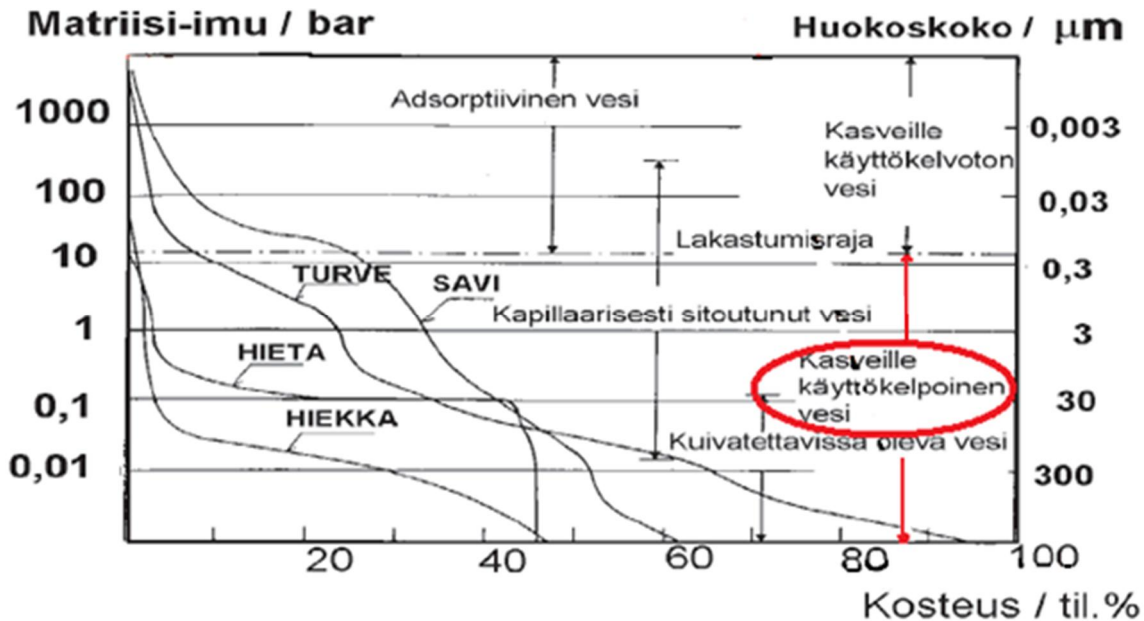
2.1 Maan kosteuden mittaaminen

Maan kosteuden mittaamenetelmät voidaan jakaa välittömiin (suora) ja välillisiin (epäsuora) menetelmiin. Välittömissä menetelmissä määritetään suoraan maan vesipitoisuus maaperästä otetusta näytteestä. Vesi poistetaan näytteestä joko fysikaalisesti tai kemiallisesti, ja poistuvan veden määrä mitataan.

Välillisissä menetelmissä ei mitata suoraan vesipitoisuutta, vaan jotain muuta maan kosteussuhteita ilmentävää ominaisuutta. Käytännössä maan vesipitoisuus saadaan empiirisen kalibroinnin avulla. Välillisiä menetelmiä ovat muun muassa: Tensiometrit, kipsiblokkit, kapasitiiviset menetelmät, elektromagneettiset menetelmät, elektromagneettinen induktio, neutronimittaus ja gammasädemenetelmä (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Lisäksi maan kosteutta voidaan myös mitata NIR-teknologialla (Near Infra Red, lähi-infrapuna). (mm. Morimoto ym. 2004, Mouazen ym. 2005, Hummel ym. 2001), jota myös tämä työ pääasiassa käsittelee.

2.1.1 Maan kosteusmittausten tulosten hyödyntäminen

Käytettäessä Heinosen (1983) mukaista optimaalisen kylvöalustan kosteutta, joka ilmoitetaan kasveille käyttökelpoisen veden muodossa (2–3 % pintakerroksessa ja pohjakerroksessa 6–10 %), tulee huomioida, että kasveille käyttökelpoinen vesi ei kata maan koko kosteuspitoisuutta. Kosteutta sitoutuu maahan myös kasveille käyttökeltvottomaan muotoon. Hienojakoisemmat maat kuten savimaat sitovat enemmän kasveille käyttökeltvotonta vettä (Kuva 1). Mitattava kosteus onkin siten, jotain muuta kuin maan kasveille käyttökelpoisen veden pitoisuus. (Heinonen 1992)



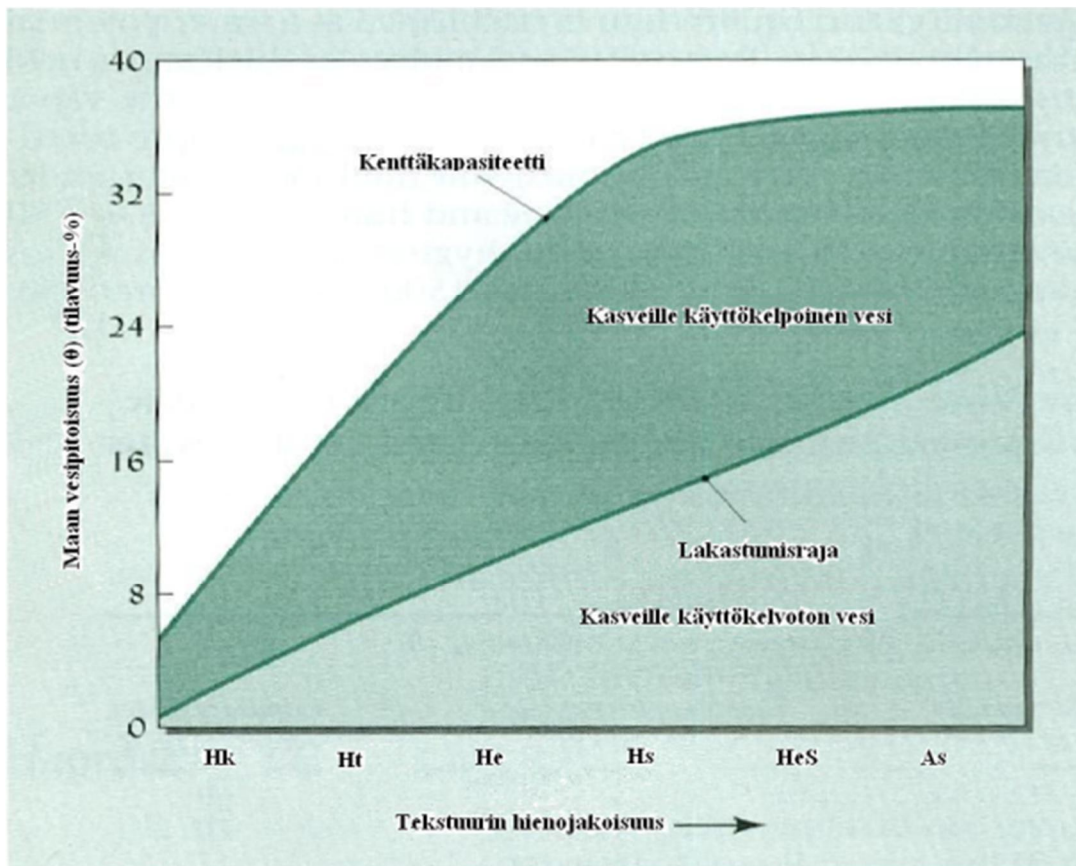
Kuva 1. Vedenpidätyskäyrä, veden pidättyminen kasveille käyttökelpoiseen ja -kelvottomaan muotoon eri maa-fraktioilla (Andersson ja Winkler 1972).

Kasveille käyttökelpoisen veden määrän ja maan kokonaiskosteuden suhteet vaihtelevat maalajista riippuen. Yleisesti ottaen maan hienojakoisuuden kasvaessa, lisääntyy myös maan kyky pidättää kasveille käyttökeltotonta vettä. Karkeilla mailla esiintyy runsaasti suuria huokosia, joista vesi helposti poistuu painovoiman vaikutuksesta. Hienoilla mailla kuten esimerkiksi savi ja hiesumailla suurien huokosten, joiden halkaisija on suurempi kuin 0,03 mm määrä riippuu maan rakenteesta. Tiivistyneellä maalla tällaisia huokosia on luonnollisesti vähemmän (Heinonen 1992). Lakastumisraja nousee maan muuttuessa hienojakoisemmaksi. Myös maan kenttäkapasiteetti kasvaa maan muuttuessa hienojakoisemmaksi. Kenttäkapasiteetti ei kuitenkaan kasva enää maan muuttuessa hiesua (Hs) hienojakoisemmaksi. Hiesun raekoko on 0,02–0,002. (Kuva 2) (Brady ja Weil 2002)

Savespitoisuuden ohella myös humuksen määrä vaikuttaa merkittävästi maan vedenpidätyskykyyn. Humuspitoisuuden kasvu lisää maan ominaispinta-alaa ja siten edesauttaa maan mururakenteen syntymistä ja luo maahan kasvien vedensaannin kannalta suotuisan huokoskoon (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Myös orgaanisella aineksella itsessään on korkea vedenpidätyskyky kivennäismaihin verrattuna (Brady & Weil 2002).

Vettä on maassa nestemäisessä muodossa sekä höyrynä maan huokosissa. Lisäksi vesimolekyylejä on adsorboitunut kolloidisten materiaalien, etenkin saveksen pinnoille. Vesimolekyylejä on myös sitoutuneena hydroksyyliyhmiin (-OH) kanssa saven hilarakenteiden väliin. Vesimolekyylin sitoutumista maahan, kutsutaan maan rakenteelliseksi vedeksi (structural water). Rakenteellinen vesi on maassa liikkumattomassa muodossa ja poistuu useimmissa tapauksissa maasta ainoastaan haihtumalla, kuumennettaessa maata lämpötiloihin, joita myös yleisesti käytetään maanäytteiden kuivaamiseen gravimetrisessä kosteuden määrittämisessä. (Smith ja Mullins 2000)

Kasville käyttökelpoisen veden mittaamista vaikeuttaa myös se, että käytännössä maalajit koostuvat useasta maafraktiosta (Heinonen 1992) ja usein myös viljellyn peltolohkon sisällä esiintyy vaihtelua maalajien välillä.

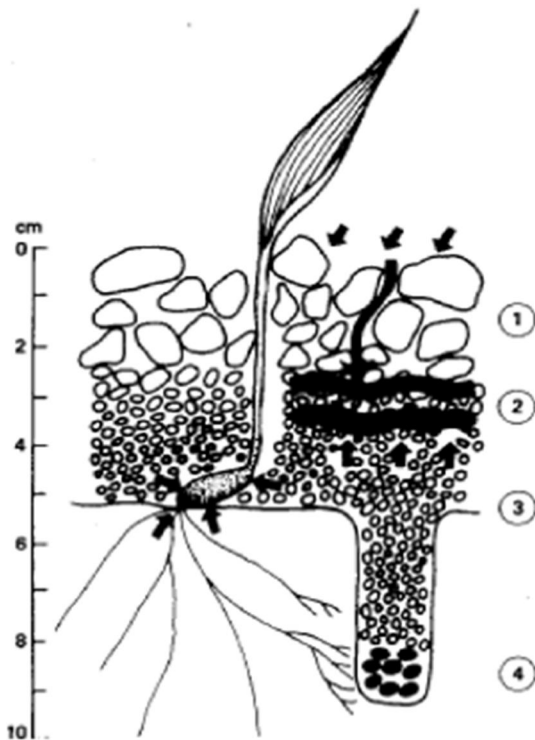


Kuva 2. Maan tekstuurin vaikutus maan vedenpidätyskykyyn (Brady ja Weil 2002). Maan kosteusmittauksista saatuja tuloksia voidaan viljelyksessä hyödyntää etenkin peltotöiden ajoituksessa. Kosteusmittaus tulokset antavat viitteitä siementen itävyyden ohella maan kantavuudesta ja käsiteltävyydestä.

Maan jatkuvasta kosteusmittauksesta saatujen tulosten välitön hyödyntäminen, olisi ainakin teoriassa mahdollista toteuttaa kytkemällä maan kosteuden mittaamiseen tarvittava laite kylvökoneen syvyydensäädön automatiikkaan ja näin toteuttaa maan kosteuden mukaan säätävä kylvösyvyys.

2.1.2 Optimaalinen kylvöalusta ja kylvökosteus

Heinosen (1983) mukaan optimaalinen itämisympäristö on karkeampimurusen maakerroksen alla oleva hienomurunen kerros. Hienomurunen kerros toimii suojanana haihtumista vastaan. Optimaalisessa kylvöalustassa hienomurudessa kerroksessa vettä olisi kasville käyttökelpoisessa muodossa 2–3 %. Onnistuneen muokkauksen jälkeen pohjakerroksessa käyttökelpoista vettä tulisi olla 6–10 % (Kuva 3).



Kuva 3. Optimaalinen kylvöalusta(Heinonen 1983)

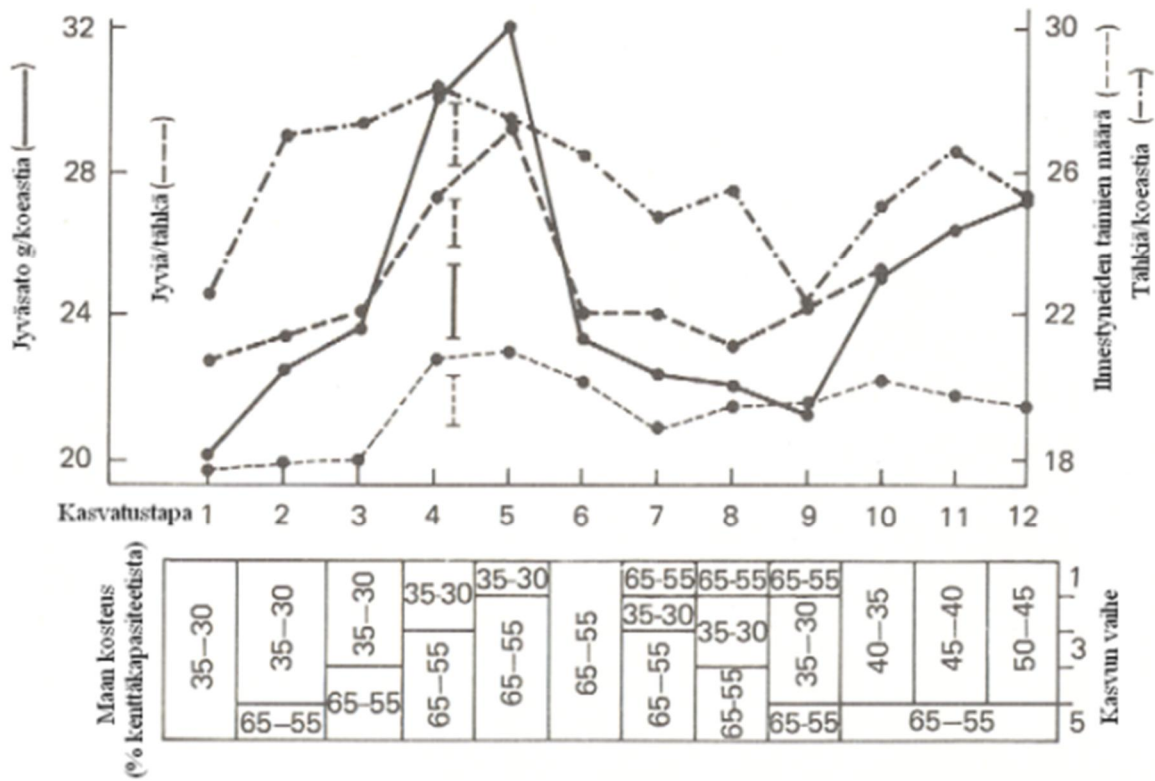
Hallerin (1984) mukaan maan kylvöhetkiselällä kosteudella ja ilmavuudella on selkeä ja kauaskantoinen vaikutus sadonmuodostuksessa, kuten orastumisessa ja siten myös pellon kasvipeitteisyydessä, tähkän jyväluvussa sekä lopullisen sadon määrässä. Maan

huono ilmavuus, joka usein johtuu liiallisesta kosteudesta tai muusta tekijästä sekä veden puute itävyyden alkuvaiheessa vähentävät sadon määrää.

Yleisesti ottaen 60 % kenttäkapasiteetista pidetään itämisen kannalta optimaalisena kylvökosteutena (Haller 1984).

Hallerin (1984) suorittamien astiakokeiden, joissa maalajit vaihtelivat eri hiekkaisen hiuemaisten (Sandy loam, loamy sand) välillä. Tulosten mukaan selkeästi (37,9 %) korkeammat sadon määrät saavutettiin kevätvehnällä maan kosteuden ollessa 30–35 % kenttäkapasiteetista itämisen alkaessa, kuin silloin kun maan kosteus oli 55–65 % kenttäkapasiteetista. Kuitenkin maan kosteuden ollessa koko kasvun ajan 30–35 % oli sato 6,2 % alhaisempi kuin silloin kun itämisen jälkeen maa kostutettiin 55–65 % kosteuteen. Näin ollen koko kasvukauden ajan pysyvä sama kosteus ei välttämättä takaa korkeinta satoa (Kuva 4). Kokeessa korkeimman sadon saavutuksen edellytyksenä oli kuitenkin maan kostutus kylvön jälkeen. Kasvien kasvun aikaisen vedensaannin ennustaminen viljanviljelyssä, jossa kastelua ei käytetä, on hankalaa. Näin ollen Hallerin ym. 1984 kokeen tulosten perusteella voidaan todeta, että varmin vaihtoehto on kylvää siemenet kosteuteen, joka vastaa 55–65 % maan kenttäkapasiteetista.

Itävää siementä ympäröivän maan kosteuteen ja ilmatilaan vaikuttavat merkittävästi siemenen päällä olevan maakerroksen fysikaaliset ominaisuudet. Maan irtotiheys sekä maan kosteus kylvöajankohtana ovatkin olennaisia tekijöitä tulevan viljasadon muodostuksessa. Hallerin (1984) kokeissa, kävi ilmi, että ohran ja kauran kylvön myöhästyessä, kasvaa siemenen päällä olevan maakerroksen irtotiheys ja sadon määrä laskee. Kokeessa todettiin, että sadon alentuminen ei niinkään johdu irtotiheydestä ja maan tiivyydestä itsessään, vaan siemenen hapenpuutteesta itämisvaiheessa. Korkean irtotiheyden omaavilla mailla siemenen vedensaanti on usein paremmin turvattu, kuin löyhemmillä mailla, jolloin maan irtotiheyden ja viljasadon määrä ovat toisiinsa nähden verrannollisia toisin kuin löyhemmillä mailla, joilla suhde oli käänteisesti verrannollinen.

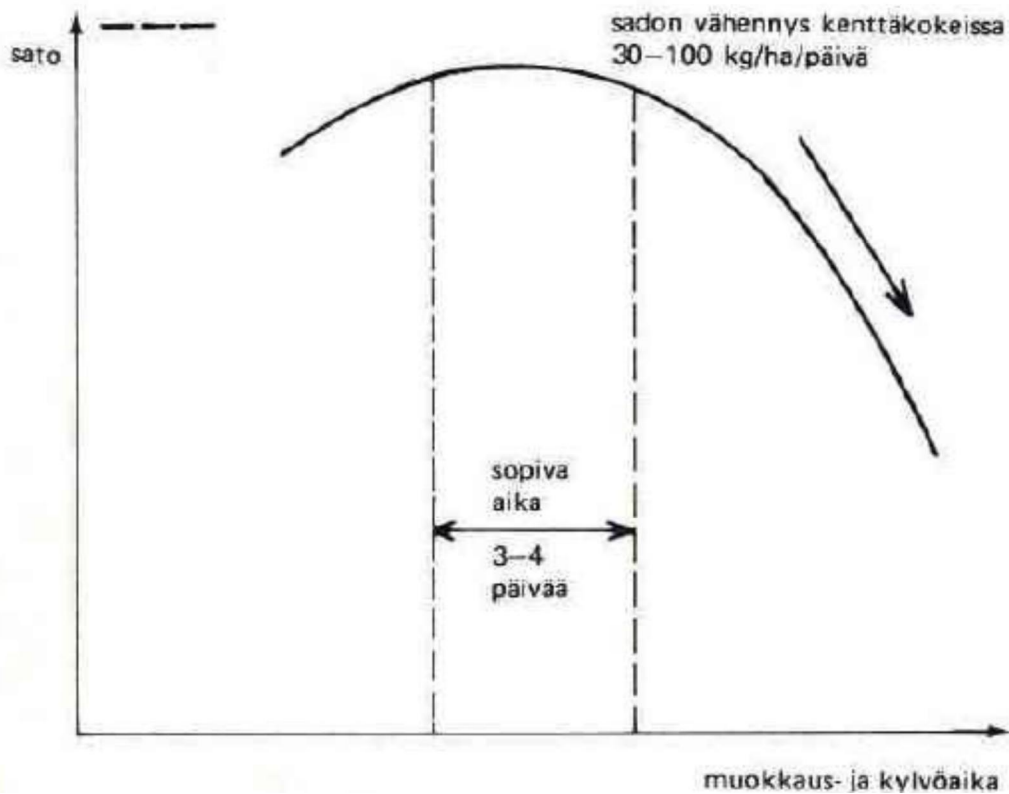


Kuva 4. Kosteuden vaikutus satoon ja satokomponentteihin vehnän kasvun eri vaiheissa astiakokeissa. Pystysuorat palkit kuvaavat keskivirhettä. Maan kosteus (% kenttäkapasiteetista) on merkitty kuvaajan alapuolelle, jokaiselle kasvukosteudelle viidessä eri kasvunvaiheessa: 1. Kylvämisestä itämiseen (Kasvatustavat 5, 7, 8, 9); 2. Itämisestä taimeentumiseen (Kasvatustapa 7); 3. Taimeentumisesta 2-sirkkaisten lehtien ilmaantumiseen. 4. 2-sirkka-asteelta 3-sirkka-asteelle, ja 5. 3-sirkka-asteelta sadonkorjuuseen. (Haller 1984)

Kylvön jälkeinen sadetus voi nostaa sadon määrää merkittävästi riippuen maan kosteudesta kylvöajankohtana. Tämä on havaittavissa etenkin kasvatustavassa 5 (Kuva 4). Kuitenkaan kylvöajankohtana vallinneista puutteellisista olosuhteista, kuten epätyydyttävistä vesi- ja ilmatilanteesta johtuviin satotappioita ei voida enää korjata parantamalla kasvuolosuhteita kasvun myöhemmässä vaiheessa. (Haller 1984)

Pienet siemenet kuten viljat ja rypsi tulisi saksalaisissa olosuhteissa kylvää 25–45 mm syvyyteen. Kylvösyvyyden hajonnan lisääntyessä kynnyksellä maalla, vähenee orastavuus. Kylvösyvyyden olisikin hyvä pysyä mahdollisimman tasaisena kylvön aikana (Heege 1993). Oraan kehittyminen mahdollisimman nopeasti tiheäksi ja aukottomaksi on avain hyvään ja tasalaatuiseen satoon ja samalla tärkeä keino rikkakasvin torjunnassa (Heinonen 1983).

Suotuisin kylvöaika kestää savimailla poutaisina keväinä vain 3–4 päivää (Kuva 5). Tämän jälkeen jokainen päivän myöhästyminen alentaa satoa tilanteesta riippuen 20–100 kg/ha. Liian aikaisin, liian kostealla maalla tehty kylvö voi kuitenkin tulla yhtä kalliiksi, mikäli kylvöalusta jää liian karkeaksi tai pyöränjäljet tiivistyvät haitallisesti. Epätavallisen aikainen kylvö voidaan kuitenkin tehdä onnistuneesti roudan päälle. Kosteaperäisillä hieta- ja multamailla on kylvöajan suhteen enemmän pelivaraa kuin poudanaroilla savimailla, joilla kevätkylvöjen orastuminen ja alkukehitys on usein kokonaan talven jäljeltä pidättyneen kosteuden varassa. Mikä johtuu siitä, että kevätkesän sademäärä on Suomessa melkein aina liian pieni. (Heinonen 1983)



Kuva 5. Sadon määrän muutos suhteessa kylvöaikaan (Heinonen 1983).

Alakukun (2006) suorittamien kokeiden kantavana teemana oli kevätiljakasvin (kaura, vehnä, ohra, rapsi) itävyys laajalla matriisipotentialalueella savi- ja hiekkamailla. Tutkimuksen tavoitteena oli myös tutkia väärin ajoitettuun kylvöön liittyvää satotappioriskiä. Kokeessa desinfioidut siemenet kylvettiin keskimäärin 1,0–1,3 cm syvyyteen. Kokeessa käytetyt matriisipotentialit olivat -0,25, -1,-3,-5 ja -10 kPa.

Kokeessa kosteuden vaikutus itävyyteen ilmoitettiin päivien lukumääränä jonka jälkeen suhteellinen prosentuaalinen osuus lopullisesta itävyydestä saavutettiin.

Alakukun (2006) tulosten mukaan savimailla jokainen kasvi saavutti 75 % lopullisesta itävyydestä neljän vuorokauden aikana kylvöstä maan kosteuden ollessa vähintään kenttäkapasiteetissa (matriisipotentiaali -10 kPa). Hiekkamaalla tulosten trendi oli samankaltainen kuin savimaalla, mutta rapsin itävyys märässä maassa (matriisipotentiaali -3 kPa tai enemmän) oli hitaampaa kuin muiden kasvien kohdalla. Lakastumisrajalla (matriisi potentiaali -1500 kPa) puolestaan jokaisen kasvin itävyys savimaalla, oli huomattavasti hitaampaa kuin hiekkamaalla. Kuivassa savimaassa siemenet itivät 2–4 päivää hitaammin kuin märässä maassa. Hiekkamaalla maan kuivuminen kenttäkapasiteetista lakastumisrajalle ei vaikuttanut itävyyteen merkittävästi.

Alakukun (2006) mukaan maan märkyys (matriisipotentiaali -3 kPa tai vähemmän) haittasi keväällä kylvettyjen ohran, kauran, vehnän ja rapsin itävyyttä enemmän hiekkamaalla kuin savimaalla. Savimaan kuivuminen lakastumisrajalle (matriisipotentiaali -1500 kPa) alensi selkeästi rapsin itävyysastetta. Matriisipotentiaalin ollessa -10 kPa tai korkeampi saavuttivat kaikki kasvit rapsia lukuun ottamatta 75 % lopullisen itävyyden noin neljässä vuorokaudessa kylvöstä. Rapsi iti hitaammin maan vesipotentiaalin ylittäessä -3 kPa. Lakastumisrajalla itäminen savimaalla oli selkeästi hitaampaa kuin itäminen hiekkamaalla.

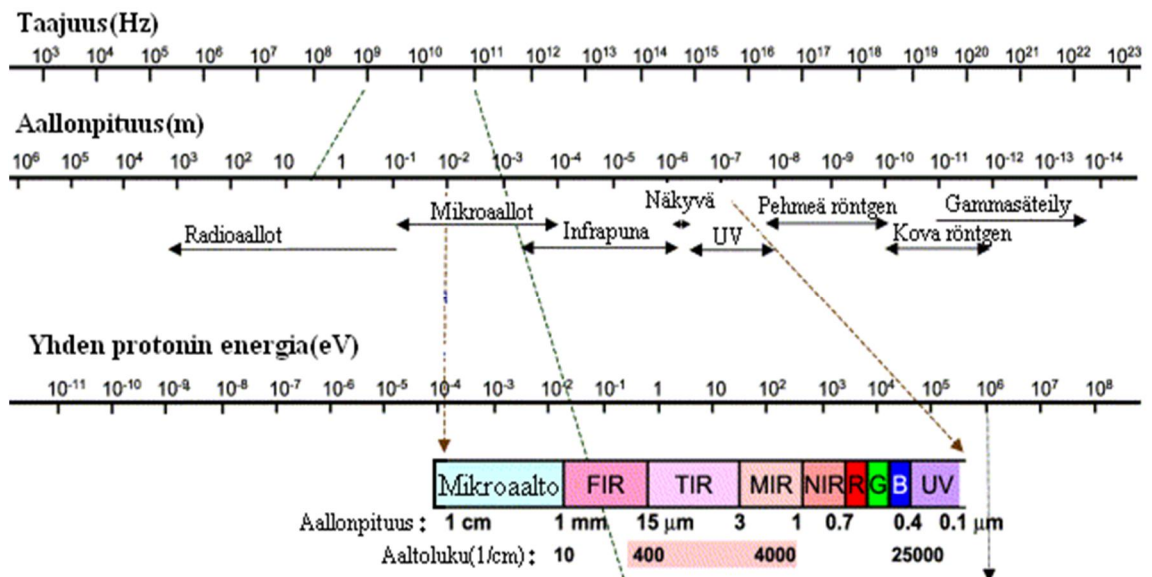
2.2 NIR-Spektroskopia

Spektroskopiolla tarkoitetaan mittausta aallonpituuden, taajuuden tai energian funktiona.

Spektrometria on spektroskooppinen mittausten menetelmä, jolla tutkitaan halutun aineen esimerkiksi veden määrää näytteessä. Spektroskopiassa mitataan absorboitunutta tai emittoitunutta energian intensiteettiä. Spektroskopiämittauksen tuloksena saadaan spektri.

2.2.1 NIR-Spektroskopia yleisesti

NIR-Spektroskopiolla eli lähialueen infrapunaspektroskopiolla tarkoitetaan mittausten menetelmää, jota käytetään selvittäessä materiaaliin absorboituneen tai materiaalista heijastuneen säteilyn määrää aallonpituuden funktiona. NIR-mittauksessa materiaaliin suunnattava sähkömagneettinen säteily on aaltopituudeltaan noin 700–2500 nm. Näkyvän valon aallonpituuden ollessa 400–700 nm (Kuva 6). Materiaalin heijastus-, absorptio- tai läpäisevyyskyvyn mittaaminen tarjoaa materiaalia vaurioittamattoman ja nopean tavan arvioida materiaalin ominaisuuksia (Adamchuck ym. 2004).



Kuva 6. Sähkömagneettinen spektri, jossa korostettuna näkyvä ja infrapunasäteily (McBartney ym. 2003)

Materiaalin heijastukseen elektromagneettisen spektrin NIR-alueella vaikuttaa voimakkaasti molekyylit, joilla on vahvat sidokset suhteellisen keveiden atomien välillä. Näillä sidoksilla on taipumus absorboida energiaa NIR-alueen korkeimmilla aallonpituusalueilla sekä mid-infrared alueen perusvärähelytaajuudella. Hallitsevat absorboijat NIR-alueella ovat C-H, N-H ja O-H-funktionaaliset ryhmät. Tämä tekeekin NIR-alueesta soveltuvan hiilen, typen sekä kosteuden mittauksiin (Naes ym. 2002). Vedellä on voimakas NIR-säteilyn absorptio. Yleensä NIR-spektroskopiolla mitattaessa käytetäänkin heijastus- tai läpäisy-spektrejä (Järvinen ym. 2007).

Maan kosteuden NIR-mittaukset perustuvat siihen, että vesi absorboi säteilyä voimakkaasti 1450, 1950 ja 2950 nm aallonpituuksilla (Plamer ja Williams 1973), joka johtuu molekyylibraatioissa säteilylle altistuvassa vesimolekyylissä (Walley ja Stafford 1992).

NIR-aallonpituuksille sijoittuvia absorptiomaksimeja ovat Järvisen ym. (2007) mukaan 1930, 1440, 1190 ja 970 nm mittalaitteissa. Heijastusmittauksissa käytetään usein 1930 nm absorptiokaistaa suurimman herkkyyden vuoksi. Läpäisygeometrialla käytetään sen sijaan 970 nm aallonpituusaluetta, koska alhainen absorptio mahdollistaa suuremman tunkeutumissyvyyden ja näytepaksuuden (Järvinen ym. 2007). 1900 nm:ä lähellä oleva absorbaatiokaista soveltuu paremmin maan kosteusmittauksiin kuin 1400 nm:ä lähellä oleva. Tämä johtuu siitä, että 1400 nm:ä lähellä olevaa säteilyä absorboi veden ohella myös hydroksidi-ionit (OH⁻), joita on muun muassa savimineraaleissa (Clark ym. 1990). Tämä saattaa vääristää maan kosteusmittaustuloksia.

2.2.2 NIR-mittalaite

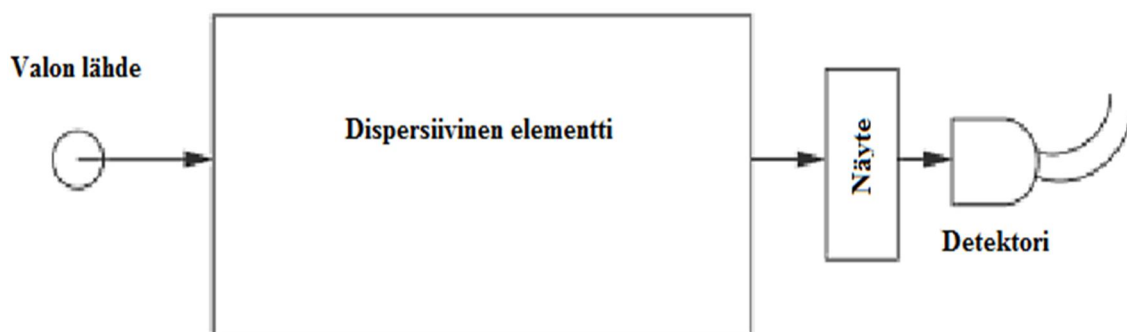
Ozakin ym. (2007) mukaan NIR-spektrometriassa käytettävä mittalaitteisto koostuu kolmesta peruselementistä; Valonlähteestä, dispersiivisestä elementistä, sekä detektorista (Kuva 7). Nykyään laitteistoon on yhä useammin liitetty myös tietokone.

Säteilyn- tai valonlähteenä hehku- ja halogeenilamput ovat yleisimmin käytettyjä. Myös ledejä käytetään yhä enemmän (Ozaki ym. 2007, Järvinen ym. 2007).

Dispersiivisen elementin tarkoituksena on puolestaan hajottaa säteily eri aallonpituuksille, jolloin spektri voidaan mitata (Ozaki ym. 2007).

Dispersiiviset elementit voivat olla esimerkiksi fotodiodirivejä, diodirivejä, laserdiodeja, kiinteitä suodattimia, kallistettuja suodattimia, kiilamaisia suodattimia, nestemäisiä kristallisuodattimia, viritettäviä akusto-optisia suodattimia, prismoja, hiloja tai ristikkoja. Dispersiiviset elementit voidaan korvata suoraan myös Fourier- tai Hadmard-muuntimella. (Ozaki ym. 2007)

Detektoreissa käytetään eri puolijohteisia vasteita riippuen mitattavasta aallonpituudesta. Käytettyjä ovat mm. Lyijysulfaatti (PbS)-, Indium Gallium Arsenidi (InGaAs)- sekä Pii(Si)-pohjaiset laitteet. Piipohjaiset detektorit ovat rajoittuneet spektrivasteestaan johtuen ultraviolettisäteilyyn, näkyvän valon ja lyhyen aaltopituuden NIR-säteilyyn (200–1000 nm) mittaukseen. (Ozaki ym. 2007)



Kuva 7. Periaatekuva NIR-spektrometrimittauksesta.

NIR-mittauksessa materiaaliin kohdistetun säteilyn intensiteetti I_0 on näytteestä heijastuneen I_r , koko näytteen läpäisseen I_t ja absorboituneen I_a säteilyn intensiteetin summa (Kaava 1) (Ayalaew ja Ward 2000, Räsänen 1999). Kuitenkin läpinäkymättömillä aineilla kuten turpeella läpäisy on usein nolla (Ayalew ja Ward 2000).

$$I_0 = I_r + I_t + I_a$$

(1)

Valon intensiteetillä tarkoitetaan valaistuksen tehoa pinta-alayksikköä kohden (Kaava 2).

$$I = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Heijastusmittauksessa NIR-spektroskopiasta saatava mittaustulos on heijastussuhde (R, Reflectance). Heijastussuhde on näytteestä heijastuneen säteilyn intensiteetin (I) ja standardinäytteestä heijastuneen säteilyn intensiteettiin (I_0) suhde.

Mitattaessa heijastusta NIR-spektroskopiolla on saatava mittaustulos heijastussuhde (R). Heijastussuhteella tarkoitetaan mitattavasta materiaalista heijastuneen säteilyn intensiteetin (I) ja standardinäytteestä heijastuneen säteilyn intensiteetin (I_0) suhdetta (Kaava 3). (Räsänen 1999)

$$\begin{aligned} R &= \frac{I}{I_0} \\ A &= r^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Yleisin tapa linearisoida saatu detektorivaste on laskea ns. näennäinen absorbanssi (A) heijastussuhteen perusteella (Kaava 4). (Räsänen 1999, Hummel 2001)

$$A = \log_{10} \left(\frac{1}{R} \right) \quad (4)$$

Heijastussuhde ja absorbanssi ovat laaduttomia suureita, jotka ilmoitetaan tietylle aallonpituudelle (nm). Säteilyn aallonpituus (λ) saadaan jakamalla valon nopeus tyhjiössä (c_0) värähtelyn taajuudella (f) (kaava 5). (Räsänen 1999)

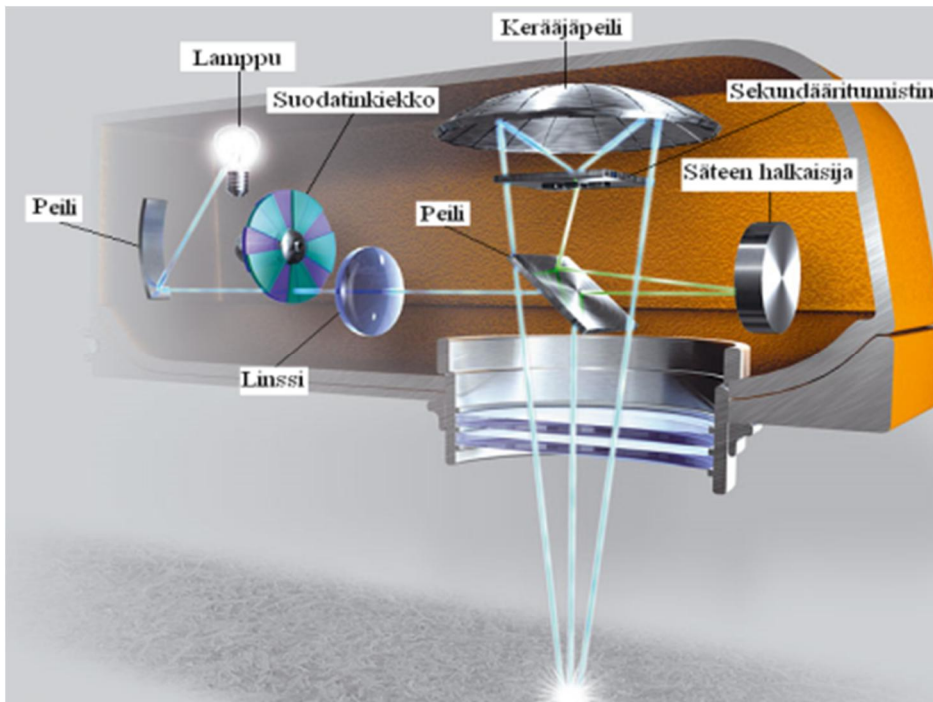
$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (5)$$

Säteilyn ja mitattavan materiaalin ollessa vuorovaikutuksessa toistensa kanssa, kuluttaa molekyylien sidosten värähtely säteilyn sisältämää energiaa. Mittauksessa ja mittaustuloksissa tämä näkyy säteilyn intensiteetin laskuna. NIR-mittauksessa lähtevän ja palaavan säteilyn intensiteettien eron oletetaan johtuvan energian absorboitumisesta mitattavaan materiaaliin (Kaava 1). Säteilyn intensiteettiin vaikuttaa kuitenkin myös monet muut tekijät mittausmenetelmästä, tekniikasta ja mitattavasta materiaalista riippuen. NIR-mittauksella saatu absorbanssi on siten vain näennäinen absorbanssi (Kaava 4). Todellista absorbanssia on käytännössä hyvin vaikea mitata. (Räsänen 1999)

2.2.3 Erillisiin aallonpituuksiin perustuva NIR-mittausmenetelmä

Tyypillisellä erillisiin aallonpituuksiin perustuvilla NIR-mittalaitteilla voidaan mitata 2–8 eri aallonpituutta. Yksinkertaisimmillaan mitataan yhtä aallonpituutta, joka on veden absorbaatioaallonpituuskaista ja kahta referenssiaallonpituutta molemmin puolin absorbaatioaallonpituuskaistaa (Järvinen ym. 2007). Referenssiaallonpituuksia käytetään sironnan aiheuttaman pohjaviivan vaihtelun kompensointiin. Lisääaallonpituuksilla voidaan kompensoida muiden heijastuskykyyn vaikuttavien tekijöiden aiheuttamia mittaustulosten vääristymisiä pois lukien vesimolekyylien kemiallisten sidosten absorptio vaihteluja (Edgar ja Hindle 1971).

Erillisiin aallonpituuksiin perustuvan mittaustekniikan (Kuva 8) rajallisuus ilmenee mitattaessa aallonpituuksia ajallisesti peräkkäin, jolloin näytteen liikkeessa nopeasti eri aallonpituudet kohdistuvat näytteessä eri kohtiin ja mittaustulosten hajonta lisääntyy. Myös materiaalin suuret vaihtelut asettavat rajoituksia erillisiin aallonpituuksiin perustuvan NIR-menetelmän soveltamiseen, johtuen eri aallonpituuksien osumisesta eri materiaaleihin näytteissä. Erillisillä materiaaliakohtaisilla kalibroinneilla voidaan saada aikaan tarkempia mittaustuloksia mitattavien materiaalien vaihdellessa suuresti. (Järvinen ym. 2007)



Kuva 8. Pyörivään suodatinkiekkotekniikkaan perustuva NIR-kosteusmittari (Grecon 2010)

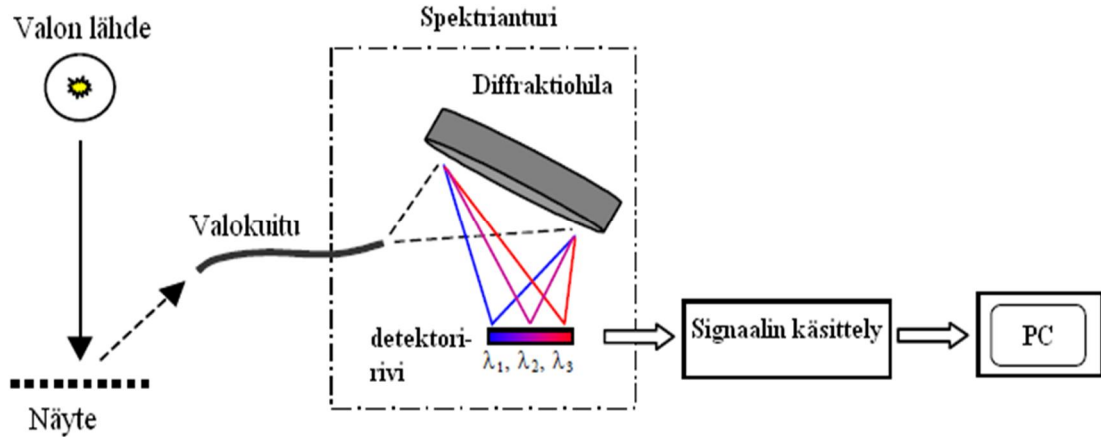
2.2.4 Rividetektoreihin perustuva NIR-mittausmenetelmä

Pii (Si)-detektoriin perustuvat moduulit kattavat tyypillisesti aallonpituusalueen 400–1100 nm ja Indiumgalliumarsenidi (InGaAs)-detektoriin perustuvat moduulit taas 900–1700 nm. Potentiaalisimmalle absorptiokaistalle on tarjolla laajennettuun InGaAs riviin perustuvia spektrometrimoduuleja, mutta näiden suorituskyky ei ole toistaiseksi ollut riittävä vaativimpiin sovelluksiin (Lindström ym. 2004).

Rividetektoriin perustuvan spektrometrin (Kuva 9) etuna erillisiin aallonpituuksiin perustuvaan mittausmenetelmään on koko spektrin mittaus täysin rinnakkaisesti 128-, 256- tai 512 aallonpituudella. Si-detektoriin perustuvat moduulit käyttävät aallonpituutenaan 400–1100 nm. InGaAs-detektoriin perustuvat moduulit käyttävät aallonpituutenaan 900–1700 nm. Saatavilla on myös Extended InGaAs-detektori, joka käyttää alueenaan 900–2600 nm. (Järvinen ym. 2007)

Koko spektri mittaamalla aikaansaadaan aikaisempaa huomattavasti kattavammin informaatiota mitattavasta materiaalista. Lisäinformaatiota voidaan käyttää joko

ainekoostumuksen kattavampaan monitorointiin tai tehokkaampaan häiriötekijöiden kompensointiin. Laajemman spektridatamäärän tehokas hallinta ja kalibrointi edellyttävät kuitenkin kehittyneiden mallinnus- ja kalibrointimenetelmien hyödyntämistä. (Järvinen ym. 2007)



Kuva 9. Periaatekuva rividetektoriin perustuvasta mittausmenetelmästä (Järvinen 2007)

2.3 Maan kosteuden mittaaminen NIR-tekniikalla

Lähi-infrapunasäteilyn heijastuskyvyn spektroskopiaan perustuva kosteudenmittausmenetelmä on mittausmenetelmä, joka ei vaadi kosketusta anturin ja mitattavan materiaalin välillä. Menetelmällä on mahdollista saada tietoa materiaalin fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista. Maasta tämä tarkoittaa maan kosteuden lisäksi orgaanisen aineksen pitoisuutta, typpipitoisuutta, kalium pitoisuutta, fosforin pitoisuutta, pH:ta, hiukkaskokoa sekä mineraalikoostumusta (Mouzaen ym. 2005). Maan kosteuden NIR-mittaukset perustuvat siihen, että vesi absorboi säteilyä 1450, 1950 ja 2950 nm aallonpituuksilla (Plamer ja Williams 1973), joka johtuu molekyyli-vibraatioissa säteilylle altistuvassa vesimolekyylissä (Walley ja Stafford 1992).

Maan pinnasta heijastuneen energiamäärän määrittäminen tietyllä aallonpituusalueella, halutusta mitattavasta ominaisuudesta riippuen, on käytetyin optisen mittauksen sovellus maataloudessa. Kuten myös elektromagneettisiin anturien saatuihin mittaustuloksiin, niin myös optisiin antureihin vaikuttaa yhdistelmä maaperän ominaisuuksia. Vaste eri aallonpituuksilla riippuu maan eri ominaisuuksista eri

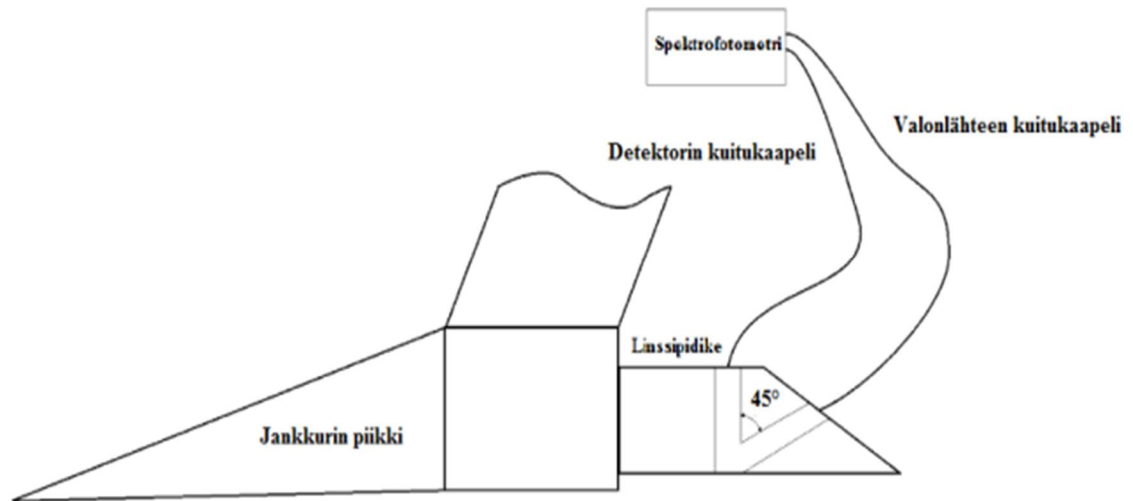
mittakaavassa, mikä mahdollistaa useiden ominaisuuksien mittaamisen yhdellä signaalivasteella (Adamchuck ym. 2004). Baumgardnerin ym. 1985 mukaan kosteus, orgaanisen aineksen pitoisuus, hiukkaskoko, rautaoksidit, maan mineraalikoostumus, liuenneet suolat sekä maan lajitekoostumus vaikuttavat maan heijastusominaisuuksiin. Maan heijastavuus vähenee maan kostuessa (Baumgardner ym. 2005, Lobell ja Asner 2002). Ben-Dor ym. (2003) mukaan maan heijastusominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi myös maan pinnan karheus ja kuorettuminen. Lisäksi Vincentin ja Huntin (1968) mukaan maan heijastuskykyyn vaikuttavat edelleen säteilyn voimakkuus, säteilyä absorboivien sidosten konsentraatio, lähetetyn säteilyn ja heijastuneen säteilyn kulmat sekä mittauksen väliaineen luontainen taitekerroin. Näihin nojaten voidaan todeta, että heijastuneen säteilyn mittaaminen vain yhdellä aaltopituudella ei voi useimmissa tapauksissa tarjota luotettavaa mittaustulosta. Mitattaessa maan tai muun materiaalin kosteutta on syytä huolehtia, että mitattava pinta on tuore, eikä pintaan ole päässyt muodostumaan kuorettumaa.

Lobellin ja Asnerin (2002) tutkimuksessa, jossa selvitettiin maan heijastusominaisuuksia, vaihtelevissa kosteusolosuhteissa todettiin, että SWIR (Short-wavelength infrared) (1100–2500 nm)-alueen infrapunasäteily, antaa vasteen maan kosteusarvoilla 50 % (θ) asti, VIR (Visible Infrared) (400–1100 nm)-alueen infrapunasäteily oli kapasiteettinsa äärirajoilla 20 % (θ) kosteusprosentissa. 0–50 % (θ) kosteusalue kattaa suurimman osan pelto-olosuhteista. Tutkimuksessa todettiin, että SWIR-alueen infrapunasäteily soveltuu toiminnallisiin sovelluksiin VIR-alueen infrapunasäteilyä paremmin.

2.3.1 Maan jatkuva kosteuden mittaaminen NIR-teknologialla, aikaisempia tutkimuksia

Mouazen ym. (2005) tutkimuksessa maan kosteuden (w_{wb}) jatkuvan mittauksen perustana käytettiin VISNIR-infrapunaspektrofotometria VIS (näkyvä valo) ja NIR (lähi-infrapuna). Optinen anturi asennettiin jankkurin piikkiä muistuttavaan terään siten, että optinen anturi oli laitteen perässä ja näin mittasi heijastusta tuoreesta maan pinnasta, jankkurin piikin tekemän vaon pohjalta, noin 15 cm syvyydeltä. Valon lähteenä toimi 20 W halogeenilamppu, joka valaisi mitattavaa maata. Spektrometrin

detektorissa käytettiin kahta eri puolijohdetta InGaAs-diodirividetektoria NIR-alueelle sekä Si-diodirividetektoria näkyvälle valolle ja lyhyen aaltopituuden NIR-alueelle. Detektorin ja valonlähteen kuitukaapelit olivat linssinpidikkeeseen sijoitettuna toisiinsa nähden 45° kulmassa. Linssinpidike oli suojattu rautakuorella (Kuva 10).



Kuva 10. Periaatekuva spektrofotometrin ja linssinpidikkeen kiinnityksestä jankkuriin (Mouazen ym. 2005)

Laitteiston nopeussensorin mittaustaajuus oli 200 Hz. DGPS-paikkatietojen, joiden avulla maanäytteet kyettiin yhdistämään NIR-kosteusmittaustuloksiin, tallennusnopeus oli 1 Hz. Spektrin signaalia mitattiin sekä tallennettiin 0,255 Hz taajuudella. Jokainen mitattu spektri oli viiden onnistuneesti mitatun spektrin keksiarvo.

Mittauksia suoritettiin toisiinsa nähden samansuuntaisissa linjoissa 10 metrin etäisyydellä toisiinsa nähden. Mittaukset suoritettiin 1,2 km/h nopeudella. Maanäytteet kerättiin kaivannon pohjalta työkonetta perässä seuraten. Näytteet otettiin välittömästi mittauksen jälkeen siten, että etäisyys jankkuriin oli noin kymmenen metriä. Maanäytteitä käytettiin maan NIR-kosteusmittausten varmennukseen. Maanäytteistä mitattiin kosteus termogravimetrisellä menetelmällä.

Kalibrointimallin kehittämisessä käytettiin PLS-analyysiä, eli osittaisen pienimmän neliösumman regressioanalyysiä. Mallin kehittämiseen käytettiin 744:ää NIR-mittalaitteella mitattua spektriä ja termogravimetrisesti määritettyä kosteuslukemaa

käyttäen. Malli validoitiin käyttämällä ristivalidointia, jolloin osa kalibrointiaineiston näytteistä korvattiin mallin avulla lasketuilla ennustearvoilla. Näin saavutettiin pieni tehollisarvonvirhe (root mean square error of cross validation) 0,0175 kg/kg ja korkea korrelaatiokerroin 0,978. Samoja tilastollisia menetelmiä käytettiin edelleen tarkennettaessa kalibrointimallia 84 mitatulla spektrillä, jolloin vastaaviksi luvuiksi saatiin 0,0165 kg/kg ja 0,982. Nämä tarkkuuskertoimet kuitenkin pienenevät peltoolosuhteissa tehdyissä mittauksissa, mutta paikalliset vaihtelut termogravimetrisesti määritetyn kosteuden sekä NIR-mittalaitteella mitatun kosteuden välillä olivat hyvin samankaltaisia; 0,0250 kg/kg ja 0,7450. Lisäksi Gravimetrisesti ja NIR-mittalaitteella määritettyjen kosteuksien välisten virheiden normaalijakauman keskihajonta oli varsin pieni: 0,0103 kg/kg. (Mouazen ym. 2005)

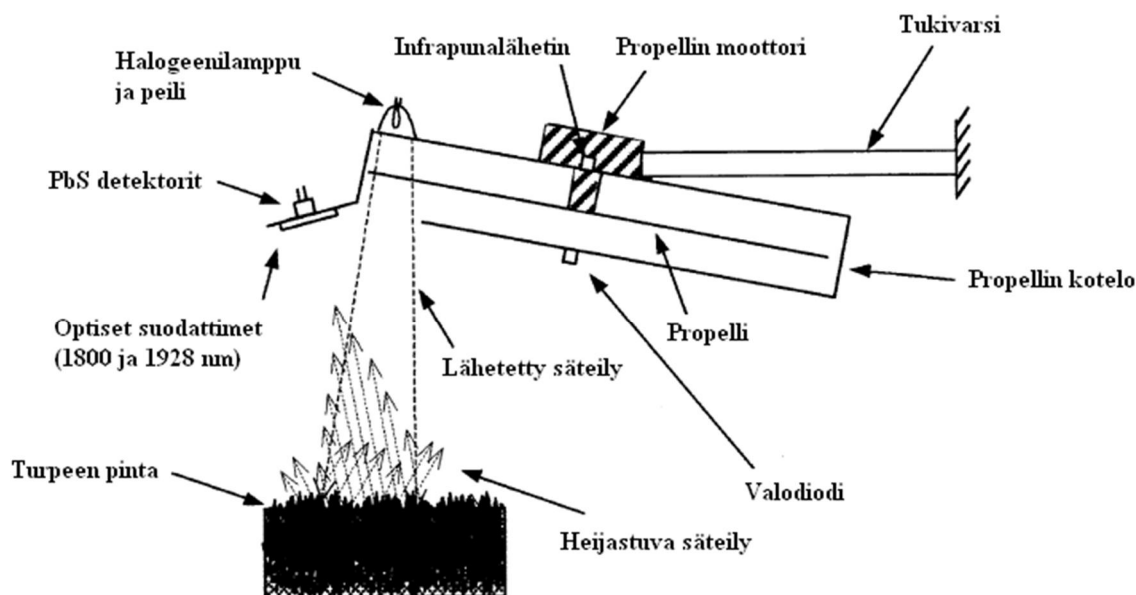
Mittalaitteen suorituskykyä voidaan parantaa edelleen Mouazen ym. 2005 mukaan ajamalla mittalaitetta vetävää traktoria pellolla ajourien suuntaisesti, jolloin ajo on tasaisempaa ja tärinä vähenee. Samalla vähenee myös maan ja mittalaitteen välisen etäisyyden vaihtelu. Pienempi etäisyyden vaihtelu antaa luotettavamman mittaustuloksen. Tarkkuuden parantamiseksi tulisi myös huomioida muutkin mittaustulokseen vaikuttavat parametrit, kuten orgaanisen aineksen määrä sekä maan tiheys. Haluttaessa laajentaa mittalaitteen käyttöaluetta edelleen useammalle maalajille, kuin kokeessa käytetyille, tulisi tehdä lisää laboratoriomittauksia, joissa mitataan spektrejä usealle eri maalajille ja tehdään näiden pohjalta maalajikohtaiset kalibroinnit. Kuitenkin tutkimuksessa käytettyä NIR-spektrofotometrianturi-PLS-mallinnusjärjestelmää voidaan suositella maan kosteuden jatkuvaan mittaukseen savi-, hietasavi-, hiesusavimaille. Haluttaessa tehdä laitteesta käyttäjäystävällisempi tulisi laitteeseen sisällyttää yleinen kalibrointimalli eri maalajeille, maan tiiveyksille sekä orgaanisen aineksen pitoisuuksille. (Mouazen ym. 2005)

Mittauksissa selvisi, että mitä kosteampi ja siitä johtuen myös tummempi, maan pinta on, sitä vähemmän säteilyä heijastuu. Korkeimmat heijastumat mitattiin kuivimmalla maalla (Mouazen ym. 2005).

Mouazen ym. 2007 suorittamassa samoin laitteistoin ja menetelmin toteutetussa jatkotutkimuksessa, jossa selvitettiin maan eri fysikaalisten (kosteus ja tiivistyminen)

sekä kemiallisten (C, P pitoisuudet ja pH) kävi ilmi, että Mouazen ym. 2005 tutkimuksessa käytettyä mittalaitteistoa voidaan käyttää arideilla- ja semiarideilla mailla gravimetrinen kosteuden määrittämiseen. 2005 tutkimuksessa tutkittiin kosteuden mittausta yhdellä lohkolla. 2007 suoritetun tutkimuksen tuloksia tarkasteltiin NIR-mittalaitteen ja uunikuivauksen samankaltaisuuden selvittämiseksi peltolohkon alueellisista vaihteluista huolimatta. Tuloksista kävi ilmi, että kosteutta voidaan mitata laajoilla alueilla yhtä yleistä kalibrointimallia käyttäen. Keskimääräinen virhe NIR-mittalaitteella mitatun kosteuden ja termogravimetrisesti määritetyn kosteuden (w_{wb}) välillä oli 0,374 %. Tämä osoittaa, että menetelmä on riittävän tarkka, ei ainoastaan peltolohkon kosteuskartoitukseen vaan myös kylvön- ja kastelun jatkuviin säätösovelluksiin (Mouazen ym. 2007).

Ayalewin ja Wardin (2000) tutkimuksessa selvitettiin jyrshinturpeen kosteuden mittaamista NIR-mittalaitteella. Tutkimuksessa rakennettiin ja kalibroitettiin lähi-infrapunakosteusmittariprototyyppi, jota testattiin laboratorio-olosuhteissa. Lähi-infrapunamittalaitteella saatuja mittaustuloksia verrattiin gravimetrisesti näytteistä määritettyihin kosteuksiin. Tutkimuksessa käytettiin kahta eri aallonpituutta. 1928 nm veden absorbaatiokaistana ja 1800 nm referenssiaallonpituutena. Detektoreina laitteessa käytettiin kahta valoa johtavaa PbS-detektoria (absorbaatiokaistalle ja referenssiaallonpituudelle) sekä niiden vastaavia suodattimia. Detektorit asennettiin messinkisaranalle, jolloin detektorien lämpötila pysyi samana, eikä tästä aiheutuisi mittaustuloksen väärentymää. Ympäristön valon aiheuttamien häiriöiden eliminoimiseksi on laitteessa potkuri, jonka lavat katkovat valoa. Valon lähteenä on 12 V/50 W halogeenilamppu, joka on 10 ° kulmassa (Kuva 11).



Kuva 11. Periaatekuva turpeen mittaukseen soveltuvasta NIR-mittalaitteesta (Ayalew ja Ward 2000)

Laitetta testattiin kolmella eri turvetyypillä, jotka oli luokiteltu tiheyden mukaan kolmeen luokkaan: alhaiseen, keskitasoiseen ja korkeaan tiheysluokkaan. Mitattujen turpeiden kosteus vaihteli noin 33–63 % (w_{wb}) välillä. Lähi-infrapunamenetelmällä mitattuja tuloksia verrattiin maanäytteisiin.

Ayalewin ja Wardin (2000) mukaan kalibrointidatan kovarianssin analyysi osoittaa, että kolmen eri turvetyypin korrelaatiot eroavat toisistaan 5 % merkitsevyystasolla. Estimaatin keskivirheeseen (joka kuvaa regressiomallin virhetermien keskijajontaa) pohjautuen laskettu 95 % luottamusväli olivat $\pm 2,75$ % alhaisen-, keskitasaisen $\pm 1,75$ % ja $\pm 3,2$ % korkean tiheysluokan turpeelle. Kuitenkin yhdistettäessä tiheysluokat 95 % luottamusväli kasvoi $\pm 5,3$ %. Turveteollisuudessa vaatimuksena on, että häiritsemättömän kosteusmittarin tarkkuus tulisi olla noin $\pm 3,0$ %. Näin ollen on eri turvelajeille käytettävä eri kalibrointeja, jotta vaadittu tarkkuus saavutetaan.

3. TYÖN TAVOITTEET

Tämän työn tavoitteena oli rakentaa työkone, jonka avulla mittalaitetta kyettiin vetämään traktorin perässä ja siten selvittää soveltuuko Visilab IRMA 7 D- mittalaite ominaisuuksiensa puolesta maan kosteuden jatkuvaan mittaamiseen pelto-olosuhteissa sekä lisäksi pohtia mittalaitteen hyödyntämismahdollisuutta maan jatkuvaan kosteuden mittaukseen perustuvassa, automaattisessa kylvösyvyyden säädössä. Tarkastelun alla on erityisesti laitteen tärinän ja heilunnan kesto ja niiden vaikutus mittaustuloksiin sekä valokeilan osuminen maahan tavalla, joka antaa mahdollisimman edustavan mittaustuloksen, eli mielellään kohtisuoraan mahdollisimman tasaiselle tuoreelle pinnalle.

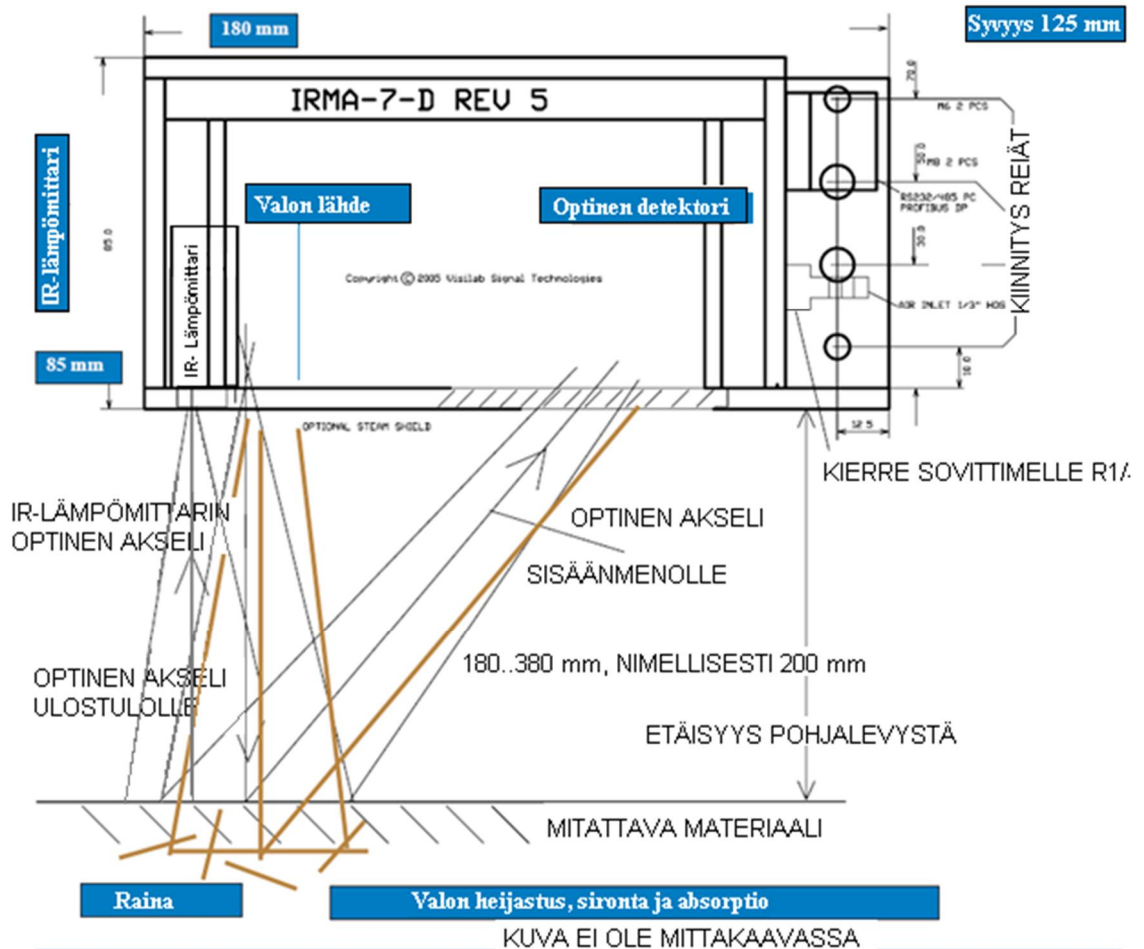
4. AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT

4.1 Jatkuvassa mittauksessa käytettävä laitteisto, ohjelmisto ja kytkentä työkoneeseen

Kosteuden mittaus IRMA 7 D mittarilla (Kuva 12) perustuu NIR (Near-Infra red reflectance), eli lähi-infrapuna-alueen-säteilyn absorptioon ja heijastukseen eli säteilyn suhteiden mittaukseen, mitattavasta materiaalista. Valokeila lähetetään materiaalin pintaan valolähteestä, jona toimii 2 W lamppu. Mitattavaan materiaaliin lampun säteilytehosta päätyy arviolta 20–50 mW. Osa valosta hajaantuu sekä absorboituu materiaaliin ja osa säteilystä heijastuu optiseen tunnistimeen. Vertaamalla heijastuneen ja absorboituneen säteilyn määrää saadaan selville materiaalin kosteus. Korkein absorptio saavutetaan säteilyn aaltopituuden ollessa 1950 nm. (Visilab 2010)

Laitteen korkein mittaustaajuus on 400 Hz mikä tarkoittaa 2,5 millisekunnin välein tapahtuvaa näytteenottoa. Laitteen näytteenottoväliä voidaan kuitenkin säätää 2,5 millisekunnista 32000 sekuntiin. (Visilab 2010)

IRMA 7D mittalaite ei vaadi kosketusta mitattavaan materiaaliin vaan mittaetäisyys on 180–380 mm, valonlähteestä mitattavaan materiaaliin. Nimellinen mittausetäisyys on noin 200 mm (Visilab 2010). Vaikka IRMA 7D on pintakosteutta mittaava kosteusmittari, omaa se 150 mikrometrin tunkeutumiskyvyn, ainakin monissa kuitupohjaisissa materiaaleissa (Launonen ja Stenlund 2007).



Kuva 12. IRMA 7 D anturin toimintaperiaate (Visilab 2010)

Visilab IRMA 7-D mittalaite käyttää 1950 nm aaltopituuskaistaa, soveltuen nopeaan mittaukseen ja ollen immuuni mitattavan materiaalin vaihtelulle. 1950 nm aallonpituus omaa veden absorbaatioaallonpituuksista parhaimman signaali-häiriösuhteen ja on yleisesti käytössä lähi-infrapunatekniikalla tehtävissä kosteudenmittaussovelluksissa. Laitteessa on myös infrapunälämpömittari, pintalämpötilan mittaamiseen. (Launonen ja Stenlund 2007)

Tyypillisiä sovelluskohteita IRMA 7D mittalaitteelle ovat sellu- ja paperiteollisuuden vaiheet, joissa materiaalin kosteuspitoisuus vaihtelee ja joissa on mahdollista kontrolloida prosessia manuaalisesti tai automaattisten tarkistussilmukoiden avulla. IRMA 7 D käyttötarkoituksena onkin kohdennettu erityisesti sellun ja paperin tuotannon laadunvalvontaan sekä nopeaan datan välitykseen perustuvaan laitteiston ohjaamiseen. IRMA 7 D kosteusmittaria voidaan kuitenkin käyttää kosteuden mittaamiseen myös useista eri materiaaleista kuten sahajauhosta, biopoltoaineista, puulastuista,

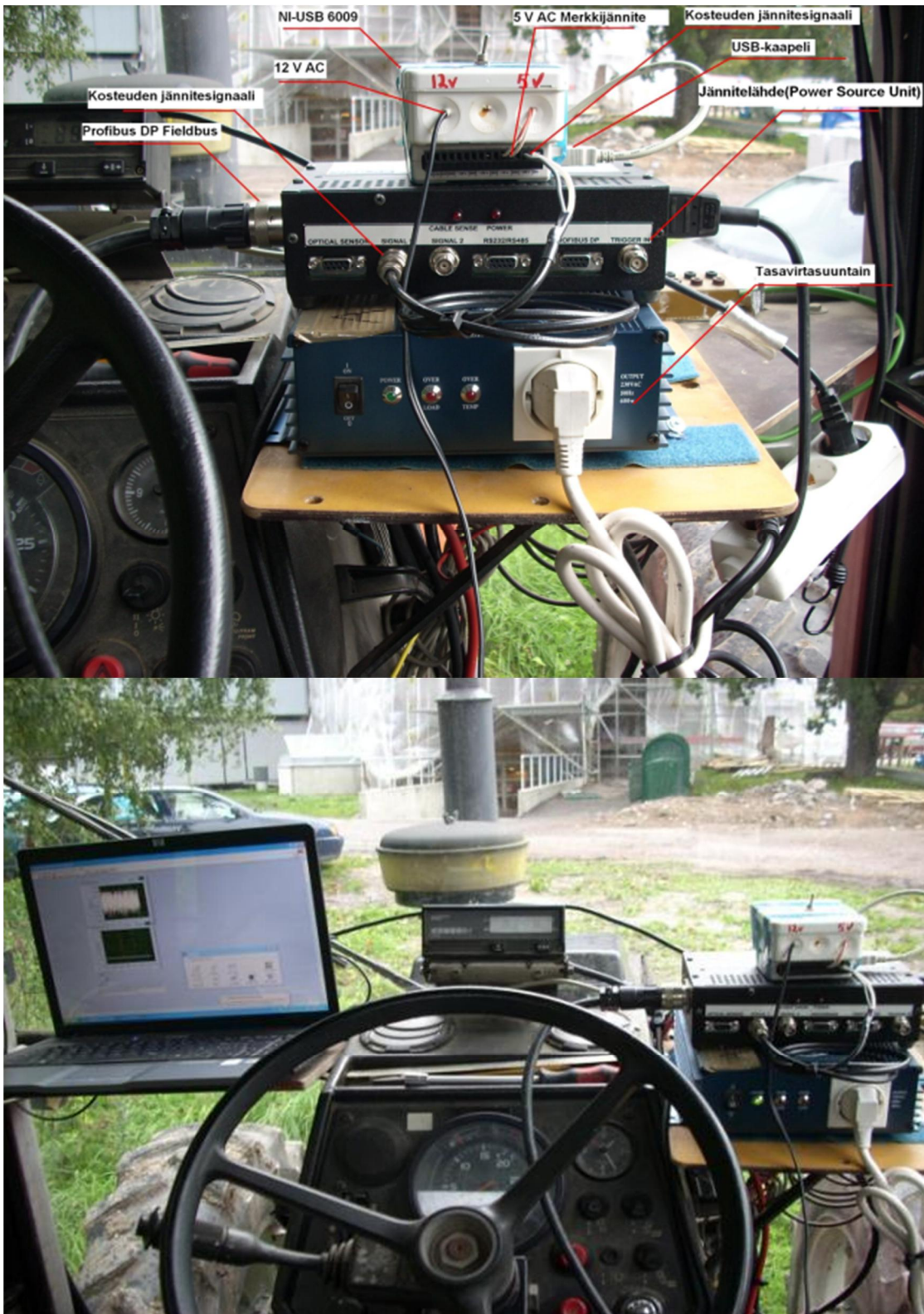
kierrätyspaperista, tekstiilijätteestä, lukuisista kuitupohjaisista materiaaleista, paperista sekä kartonkijätteestä. (Launonen ja Stenlund 2007)

IRMA 7 D (Kuva 12 ja 13) liitetään jännitelähteeseen (Power Source Unit) (Kuva 14) Profibus DP fieldbus liitännällä, jonka kautta mittalaite saa tarvitsemansa virran ja jota pitkin myös mittasignaali kulkee. Mittalaite liitetään edelleen jännitelähteessä olevan liitännän kautta tietokoneeseen tai tiedonkeruulaitteeseen mittaustulosten tallentamiseksi tai hyödyntämiseksi suoraan esimerkiksi prosessin ohjauksessa. Jännitelähteeltä on mittaustulona mahdollisuus käyttää RS232-sarjaporttiliitää tai jännitesignaalia. Mittalaite tukee 38400 baudin tiedonsiirtonopeutta (yleisesti 9600 baudia). IRMA 7 D mittalaitteen virtalähteessä on kaksi jänniteulostuloa kosteudelle ja pinnan lämpötilalle, jotka päivittyvät täydellä 400 Hz nopeudella, joka myös on laitteen korkein mittaustaajuus. Laitteisto antaa ulostulojännitteenä 0–10 V. 0 V vastaa 0 kosteusprosenttia ja 10 V vastaa 100 kosteusprosenttia. (Visilab 2010)

Kenttäkokeissa työkoneeseen (Kuva 13) kiinnitetty mittalaite IRMA 7D oli kytkettynä jännitelähteeseen (Power Source Unit) Profibus DP liitännällä ja jännitelähteeltä mittasignaali kulki jännitteenä Coax-kaapelia pitkin NI-USB 6009 tiedonkeruulaitteelle, joka puolestaan oli kytkettynä kannettavan tietokoneen USB-porttiin. NI-USB 6009 laitteeseen oli lisäksi kytkettynä merkkijännitekytkin, joka koostui jänniteregulaattorista ja on/off-kytkimestä. Regulaattorin tehtävänä oli reguloida traktorin tupakan sytyttimeltä tuleva 12 V DC jännite 5 V DC jännitesignaalksi. Merkkijännitteen tarkoituksena oli merkitä IRMA 7D laitteella mitatun kosteuden siltä väliltä, miltä vertailukosteusdataa kerättiin. Jännitelähde (Power Source Unit) sai virran traktorin akkuun kytketyltä tasavirtasuuntaimelta, joka muuntaa traktorin akun 12 V DC jännitteen 230 V AC 50 HZ. Varsinaista mittalaitetta lukuun ottamatta mittauksessa tarvittava laitteisto sijaitsit traktorin ohjaamossa. (Kuvat 13 ja 14)



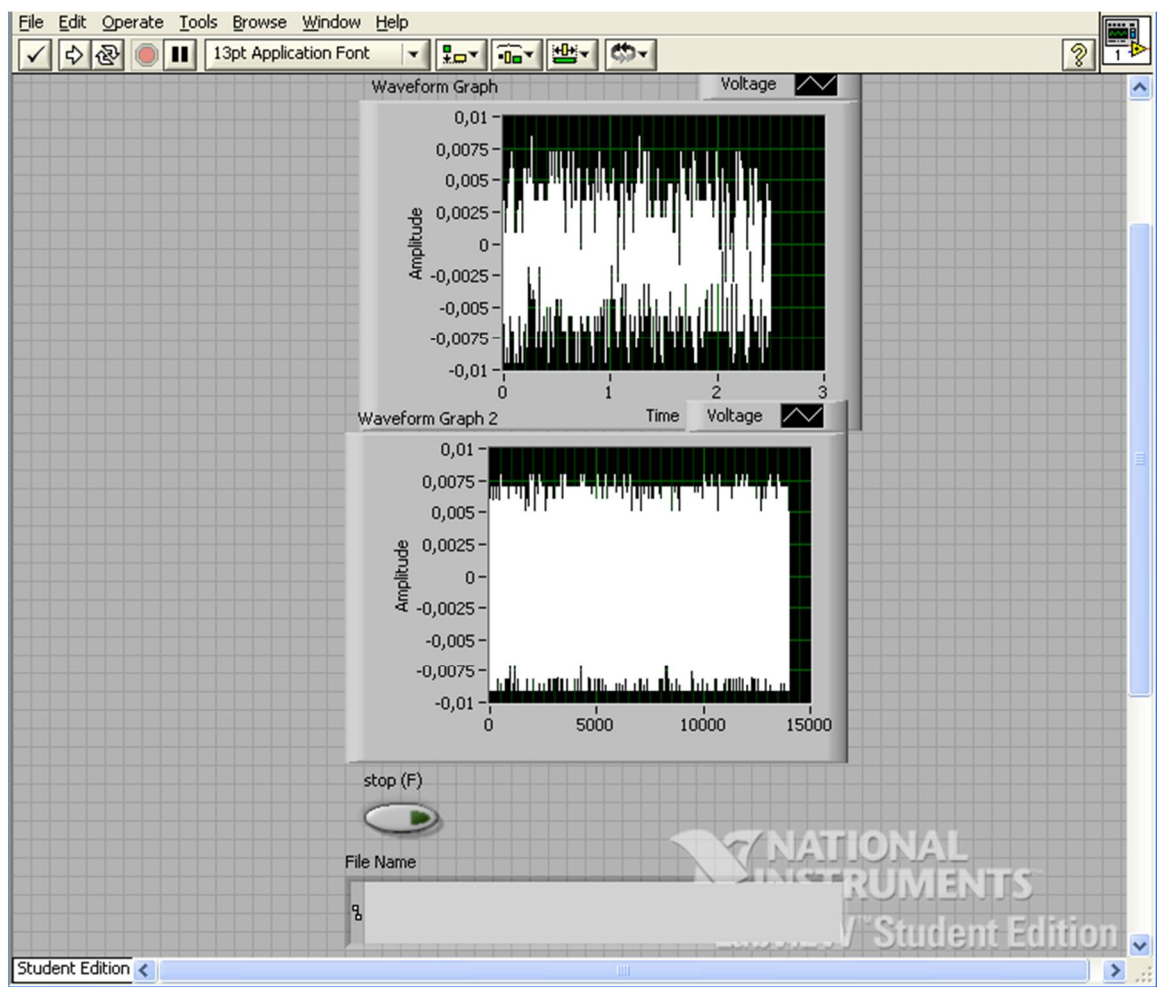
Kuva 13. Traktorin kolmipistekiinnitykseen kytketty työkonne sekä IRMA 7D-mittalaite



Kuva 14. Mittalaitteisto traktorin ohjaamossa.

Mittausdatan tallennukseen käytettiin LabView 7.1 ohjelmalla toteutettua, jännitettä jatkuvasti mittaavaa ja tulostavaa ohjelmaa. Mittauksen päätyttyä ohjelma tallentaa mittausdatan (Kuva 15). Jänniteulostulon kautta voidaan mitata jatkuvalla mittauksella laitteen korkeimmalla mittaustaajuudella, toisin kuin RS232-sarjaportin kautta (Visilab 2010).

Laitteen materiaaliikohtaisen kalibroinnin säätelyyn käytetään laitteiston omaa ohjelmaa IRMA 7 Basic. Materiaaliikohtaisten kalibrointien tekemiseksi laite on kytkettävä RS232-Sarjaportin kautta tietokoneeseen.



Kuva 15. LabView:llä toteutettu jännitteenmittausohjelma

4.2 Laitteen kalibrointi ja vertailudatan keruu astiakokeista

Vertailua ja kalibrointia varten kerättiin maanäytteitä. Maanäytteitä otettiin neljältä eri maalajilta. Maanäytteiden otto tapahtui kaivamalla kuoppa, jonka syvyys oli noin 20 cm. Tämän jälkeen näytteeseen tarvittava maa viistettiin kuopan reunoilta ja laitettiin ämpäriin. Maata otettiin noin 8 litraa irtotiheytenä. Savimaata otettaessa kaivettu kuoppa ulottui muokkauskerroksen alapuolelle, josta savea viistettiin kuopan pohjalta sekä reunoilta. Maanäytteitä kerättiin neljältä eri maalajilta Viikin koetilan pelloilta seuraavanlaisesti: Aitosavea (As), muista näytteistä poiketen muokkauskerroksen alapuolelta, Hiusesavea (HeS) (runsas multaista), Hietamoreenia (HtMr) (multaista), Karkeaa hietaa (KHt) (runsas multaista).

4.2.1 Kosteuden termogravimetrinen määrittäminen maanäytteistä

Maan vesipitoisuudella tarkoitetaan yleensä vettä, joka poistuu maasta haihtumalla kuumennettaessa maata 100 ja 110 °C välillä, kunnes maan massa vakioituu. Tämä toimii myös pohjana termogravimetriselle kosteuden määrittämiselle. (Smith ja Mullins 2000).

Termogravimetrinen kosteuden määrittäminen on yksinkertainen. Maanäyte sijoitetaan lämpökestävään näyteastiaan. Maanäytteen massa punnitaan. Punnituksen jälkeen maanäyte asetetaan uuniin, jossa on 105 °C lämpötila. Veden haihduttua maasta maanäyte poistetaan uunista ja asetetaan eksikaattoriin jäähtymään huoneen lämpötilaan, jolloin näyte punnitaan uudelleen (ISO 1993). Vesipitoisuus (w_{wb}) maanäytteestä on maan sisältämän veden massa jaettuna märänmaan massalla (Kaava 6).

$$w = \frac{M_{märkä} - M_{kuiva}}{M_{märkä}}$$

(6)

Usein maanäytteiden termogravimetrisessä kosteuden määrittämisessä käytetään 105 ± 5 °C lämpötilaa ja 24 tunnin kuivausaikaa. Suositellut maanäytteiden koot ovat kokoluokaltaan 50 ja 100 gramman väliltä. (Smith ja Mullins 2000). Maanäytteen kuivuus voidaan varmistaa varsinaisen kuivauksen jälkeen punnitsemalla näyte ja kuivaamalla näytettä edelleen neljän tunnin ajan. Mikäli uudelleen kuivatun näytteen massan muutos ei ylitä 0,1 % ennen neljän tunnin kuivauksen massaa, voidaan näyte katsoa kuivaksi (Smith ja Mullins 2000).

Paljon orgaanista ainesta sisältäviä maita kuivatessa voivat massan muutokset johtua veden haihtumisen ohella, orgaanisten yhdisteiden hapettumisesta ja hajoamisesta (Smith ja Mullins 2000).

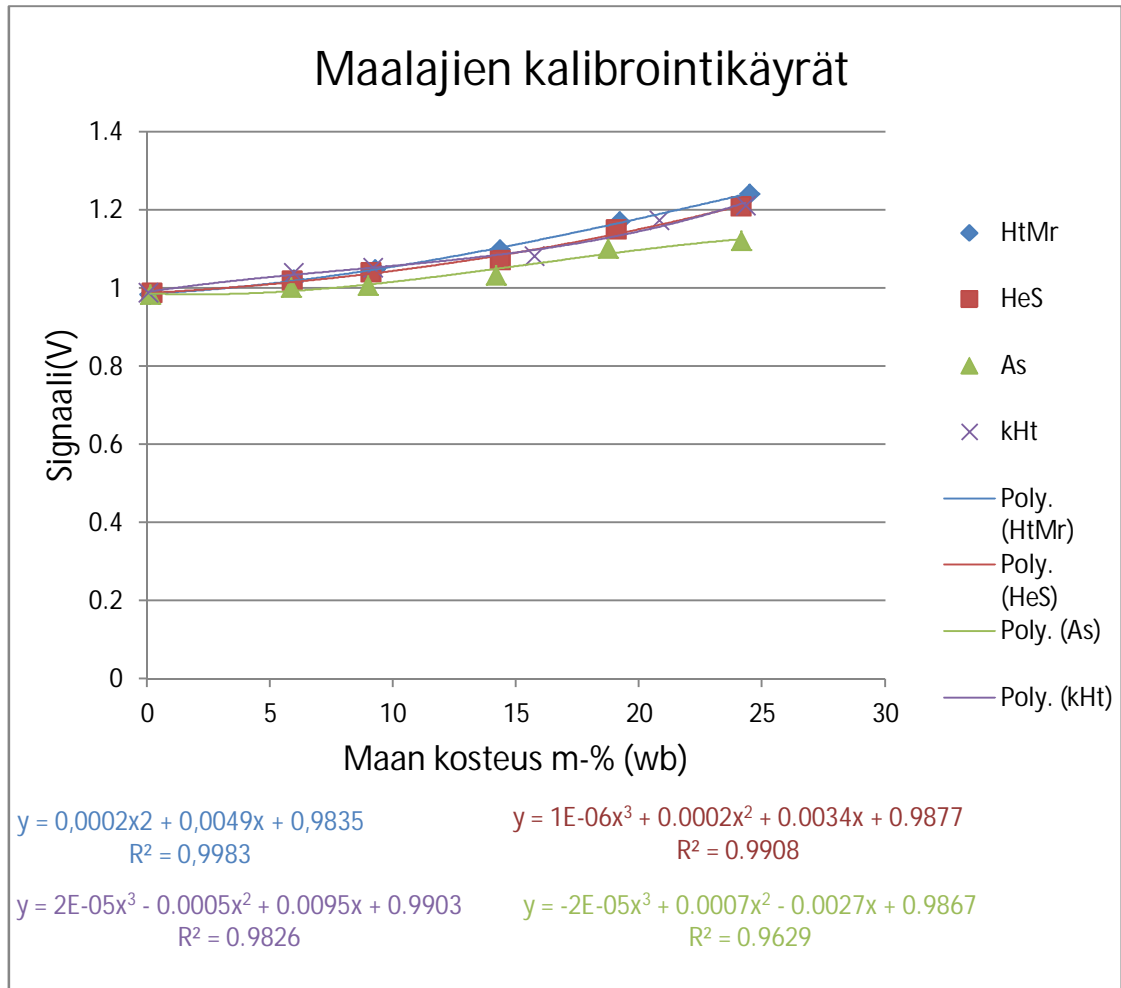
Kosteuden määrittämistä ja kalibrointia varten kuivattiin aikaisemmin ilmakehässä hienonnettuja ja lajiteltuja (oljet ja pienet kivet poistettu) maanäytteitä uunissa 105 °C 24 tunnin ajan. Tämän jälkeen maanäytteiden annettiin jäähtyä eksikaattorissa vuorokauden ajan, jolloin ilmassa oleva kosteus ei kostuttanut maanäytteitä niiden jäähtyessä huoneen lämpötilaan. Kuumat maanäytteet saattavat vääristää punnitustulosta johtuen kuumuuden aiheuttamasta ilmavirrasta, joten maanäytteiden jäähtyttäminen on perusteltua. Jäähtyneistä maanäytteistä punnittiin edelleen kuivaa maata kuusi 200 gramman näytettä, kutakin maalajia merkittyihin mittalaseihin, joiden massat olivat aikaisemmin punnittu. Nämä maanäytteet kostutettiin haluttuun kosteuteen 0, 5, 10, 15, 20, 25 % (w_{wb}). Kunkin maan kenttäkapasiteetti on lähellä 30 %, joten maata ei käytännössä kannata kostuttaa enemmän, koska pelto-olosuhteissa, etenkin peltotöitä tehtäessä on hyvin poikkeuksellista, että maa on kenttäkapasiteettia kosteampaa. Lisäksi veden kyllästämissä tai lähellä kyllästyspistettä olevissa maanäytteissä saattaa kosteus painovoiman vaikutuksesta painua näytteen pohjalle, ja siten vääristää näytteen pinnasta saatavaa heijastusmittaustulosta (Hummel ym. 2001). Kostutetut maanäytteet sekoitettiin ja suojattiin kelmulla. Kosteuden annettiin tasoittua maanäytteissä 2 vuorokauden ajan. Tänä aikana maanäytteitä sekoitettiin, kosteuden nopeamman tasoittumisen vuoksi. Lisäksi sekoittamisella ehkäistiin korkeimpien kosteuksien pintaan muodostuva vesikerros, joka aiheuttaa pelimäistä heijastusta (Hummel ym. 2001) ja siten vääristää mittaustulosta.

4.2.2 Laitteen kalibrointi

Kalibrointi suoritettiin Visilab IRMA7 mittalaitteen kalibrointitoiminnolla, jossa laitteella luetaan materiaalin kosteus ja saadaan tälle vastaava signaali. Toistettaessa tämä usealla eri kostesuksisella materiaalinäytteellä saadaan materiaalille kalibrointikäyrä. Maanäytteiden todellinen kosteus varmistettiin vielä ennen varsinaista kalibrointimittausta, koska kelmupäällysteestä huolimatta kosteutta saattaa haihtua maasta. Kosteuden varmistaminen tehtiin punnitsemalla maanäytteet ja vähentämällä punnitustuloksesta kuivan maan massa (200 g). Tämän jälkeen maanäyte asetettiin pyöreään muoviasiaan, jonka halkaisija oli 19,5 cm, jolloin laitteen koko valokeila osuu maanäytteen alueelle. Muoviasia asetettiin telineeseen, jossa sen etäisyys valonlähteen ja detektorin tasoon oli 22,5 cm.

Kalibrointitoiminto mittaa maanäytteen kosteutta vastaavan signaalin kertaluontoisesti. Tästä johtuen kullekin maanäytteelle mitattiin useampi lukema, mittausten välissä maata metallisauvalla sekoittaen. Maanäytteen sekoittamisella pyrittiin varmistamaan koko maanäytteen ja mitattavan maanäytteen pinnan yhtäläinen kosteus. Edustavan lukeman todettiin olevan sellainen, joka toistui useamman kerran sekoituksesta huolimatta. Sekoittaminen mittausten välillä voidaan perustella myös sillä, että laitteen optiikkaa jäähdyttävä tuuletin aiheuttaa ilmavirran, joka kuivattaa mitattavan materiaalin pintaa.

Kullekin maalajille saatiin muodostettua kalibrointikäyrä (Kuva 16). Huomattavaa on kuitenkin, että Aitosaven kalibrointikäyrä on muista näytteistä poikkeava. Tämä johtuu siitä, että aitosavi oli selkeästi vaaleampaa kuin muita maalajeja edustaneet maanäytteet. Vaaleus johtuu ainakin osittain orgaanisen aineksen vähyydestä. Hietamoreenin, hivesaven sekä karkean hiedan kalibrointikäyrät olivat toistensa kaltaisia. Voidaan todeta, että maan väri (tummuus/vaaleus) vaikuttaa maan heijastavuuteen ja siten myös kosteusmittaustulokseen NIR-mittalaitteella.



Kuva 16. Kalibrointikäyrät eri maalajeille

4.3 Maan kosteusdatan keruu kenttäkokeella

Maan kosteusdataa kerättiin jatkuvalla mittauksella kenttäkokeella. Koekenttä perustettiin elokuussa 2011 puidulle ja muokatulle pellolle. Mittauksissa käytetty koekenttä koostui seitsemästä neljä metriä leveästä ja 40 metriä pitkästä koeruudusta. Ruudut merkittiin auraskepin. Lisäksi auraskepin merkittiin alue, jolta kerättiin kosteuslukemia paikallisesti HH2-mittalaitteella sekä maanäytein, joista kosteus määritettiin termogravimetrisesti.

Koekentän sijainti Viikin museopellolla ja pelto oli maalajiltaan runsasmultaista hietamoreenia (HtMr).

4.3.1 Maan kosteuden vertailudatan keruu HH2-kosteusmittarilla

ThetaProbe kosteusmittari (Kuva17) mittaa maan tilavuusperusteista kosteutta (θ). Kosteuden mittaus perustuu epäsuoraan mittaukseen, jossa mitataan maan dielektrisen vakion muutosta. Kosteusmittari muuntaa dielektrisen vakion muutokset tasavirtasignaaliksi, joka on verrannollinen maan kosteuden muutoksiin (Delta-T Devices 1999).



Kuva 17. Thetaprobe anturi ja HH2-kosteusmittari(Delta-T Devices 2012)

Veden dielektrisyysvakio on 80 (20 °C) ja kuivan hiekan 2,5 ja kuivan saven ja hiueen 3,5 ja kuivan ilman 1,0006 (Taulukko 1) ja (Noborio 2001). Näin ollen maan dielektrisyysvakio määräytyy hyvin pitkälle sen kosteuden mukaan ja siten maan kosteuden määrittäminen dielektrisen vakion avulla on perusteltua.

Taulukko 1. Eri materiaalien dielektrisiä vakioita (Noborio 2001)

Materiaali	Dielektrinen vakio
Ilma	1
Vesi	80 (20 °C)
Jää	3 (-5 °C)
Baslaatti	12
Graniitti	7–9
Hiekkakivi	9–11
Kuiva hiue	3,5
Kuiva hiekka	2,5

Thetaprobe tuottaa 100 MHz sinimuotoisen signaalin, joka johdinta pitkin kulkeutuu anturiin, jonka päässä on neljä teräspiikkiä. Järjestelmän impedanssi muuttuu maan impedanssin mukaan, joka muodostuu kahdesta komponentista; dielektrisyysvakioista ja ionisesta johtokyvystä. Käytettäväksi signaaliksi on valittu 100 MHz, jolloin ionisen johtokyvyn vaikutus saadaan minimoitua ja maan impedanssin muutokset johtuvat lähestulkoon kokonaan maan dielektrisen vakion muutoksista (Delta-T Devices 1999).

Anturin impedanssi vaikuttaa 100 MHz signaalin heijastukseen ja nämä heijastukset yhdistyvät sovellettuun signaaliin ja muodostavat seisovan jänniteaallon siirtolinjalle. Thetaproben ulostulona saadaan analoginen jännite, joka on kahdessa pisteessä verrannollinen seisovan aaltoliikkeen amplitudille. Näin voidaan mitata maan kosteusvaihteluita tarkasti. (Delta-T Devices 1999)

Maan dielektrisen vakion on useilla maalajeilla todettu korreloivan lähes lineaarisesti maan tilavuusperusteiseen kosteuden kanssa. (Delta-T Devices 1999)

Laitteen ulostulosignaali on 0 ja 1 V välillä, joka vastaa dielektrisiä vakioita välillä 1 ja 32. Näin voidaan kivennäistyypisillä mailla mitata kosteuksia, jotka ulottuvat $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$. (Delta-T Devices 1999)

4.3.2 HH2-kosteusmittarin kalibrointi

Laitteen kalibrointia varten kerättiin kolme kappaletta häiriintymättömiä maanäytteitä koekentältä. Näytteet otettiin 200 ml ruostumattomiin näytesylintereihin. Näytteet punnittiin ja näistä mitattiin dielektrisyysvakiot. Tämän jälkeen näytteitä kuivattiin 105°C 24 tunnin ajan, kosteuden poistamiseksi. Kuivatut näytteet punnittiin uudelleen ja lisäksi dielektrisyysvakiot mitattiin.

Maan dielektrisyysvakion neliöjuuren ja kosteusmittarin ulostulojännitteen suhde voidaan kuvata kolmannen asteen polynomilla jännitteen ollessa välillä 0 - 1V (Kaava7).

$$\sqrt{\varepsilon} = 1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3 \quad (7)$$

Moniosaisen taittokertoimen (joka vastaa dielektrisyysvakion neliöjuurta $\sqrt{\varepsilon}$) ja tilavuusperusteisen kosteuden suhde on muodoltaan kaavan 8 mukainen.

$$\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1 \times \theta \quad (8)$$

Tarvittavat komponentit ovat a_0 ja a_1 . Komponentti a_0 vastaa kuivan maan dielektrisyysvakion neliöjuurta eli $\sqrt{\varepsilon_0}$. Komponentti a_1 voidaan puolestaan laskea jakamalla märän ja kuivan maan dielektrisyysvakioiden neliöjuuret $\sqrt{\varepsilon_w}$ ja $\sqrt{\varepsilon_0}$ kostean maan punnituksella selvitettyllä tilavuusperusteisella kosteudella (Kaava 9).

$$a_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_0}}{\theta_w} \quad (9)$$

$$\theta_w = \frac{(M_w - M_0)}{V} \quad (10)$$

Kolmelle eri maanäytteelle saatiin näiden keskiarvoksi a_1 -arvon osalta 6,24 ja a_0 -arvon osalta 1,35 (Taulukko 2).

Kaavasta 8 saadaan yhtälö, jolla voidaan laskea maan tilavuusperusteinen kosteus laitteen ulostulojännitteen signaalien perusteella (V) (Kaava 10).

$$\theta = \frac{(1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3) - \alpha_0}{\alpha_1} \quad (11)$$

Taulukko 2. HH2-kosteusmittarin kalibrointia varten mitattuja sekä näiden perustalta laskettuja lukuja.

	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Keskiarvo
Tilavuus (ml)	200,0	200,0	200,0	200,0
$M_{\text{märkä}}$ (g)	335,8	295,3	552,0	394,4
$V_{\text{märkä}}$ (mV)	590,0	562,0	552,0	568,0
M_{kuiiva} (g)	265,9	298,8	225,5	263,4
V_{kuiiva} (mV)	265,9	231,3	225,5	240,9
Poistunut vesi (g ja ml)	69,9	64,1	73,2	69,1
Kuiva irtotiheys (g/cm ³)	1,3	1,2	1,1	1,2
Märkä irtotiheys (g/cm ³)	3,0	2,8	2,8	2,8
$\sqrt{\epsilon_{\text{märkä}}}$	3,6	3,5	3,4	3,5
$\theta_{\text{märkä}}$ (m ³ /m ³)	0,4	0,3	0,4	0,4
$\sqrt{\epsilon_{\text{kuiiva}}}$ (a_0)	1,4	1,4	1,4	1,4
a_1	6,4	6,6	5,7	6,2
θ (m ³ /m ³)	0,4	0,3	0,4	0,4
Maan kosteus(m-%(wb))	0,2	0,2	0,3	0,2

5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

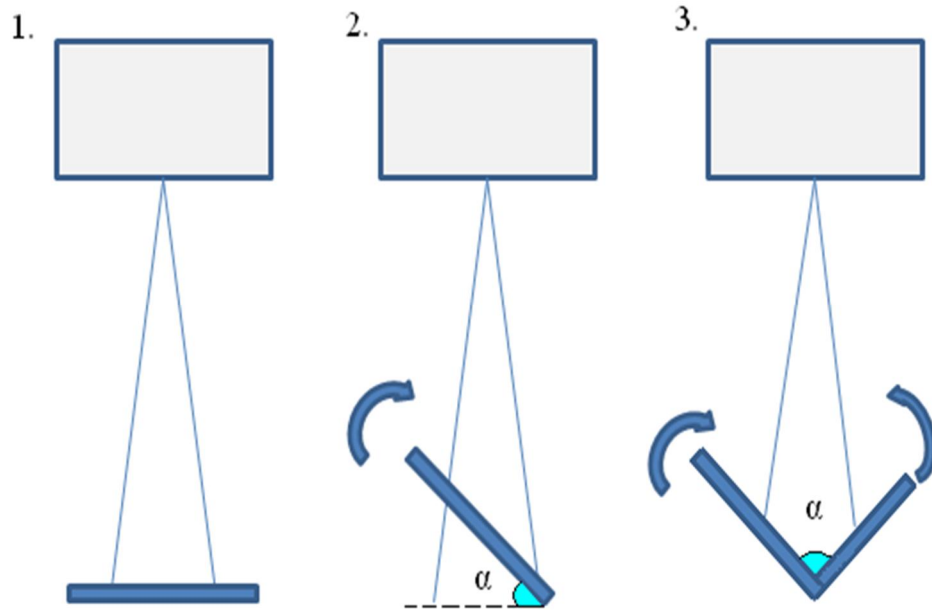
5.1 Mittaustulokset

5.1.1 Mittauskulman vaikutuksen ja valokeilan mittaus

Heijastusmittauksessa, mitattavan näytteen kulmalla suhteessa valokeilaan on vaikutusta mittaustulokseen. Tästä johtuen oli tulevia peltomittauksia ajatellen selvitettävä kulmien vaihtelun vaikutus mittaustulokseen. Peltomittauksissa maahan aukaistavan vaon muodon ja siihen tarvittavan työkoneen suunnittelua silmällä pitäen, selvitettiin valokeilan koko sekä miten näytteen vain osittainen sijainti valokeilassa vaikuttaa mittaustulokseen.

Mittaukset suoritettiin kiinnittämällä mittalaite reunoista kahteen lankunpätkään, jotka puolestaan asetettiin metallikehikon päälle. Mittalaitteen alapuolelle asetettiin kovalevystä tehty taso. Tason etäisyys mittalaitteen optiikkaan oli 22,2 cm. Tasoon kiinnitettiin mittausta varten kostutettu käsipyyhepaperi, joka kostutettiin mahdollisimman tasaisesti. Taso on kiinnitetty saranoilla toiseen kovalevyn, jolloin tason (johon käsipyyhepaperi on kiinnitetty) kulmaa voidaan muuttaa (Kuva 18).

Mittaukset suoritettiin viiden sekunnin jatkuvina mittauksina. Mittaustaajuutena käytettiin 200 Hz, jolloin näytteenottoväli oli 0,005 s. Mittauksissa kalibrointina käytettiin laitteen omaa sellulle tarkoitettua tehdaskalibrointia. Häiriöpiikkien suodattamiseksi mittaustulosta, käytettiin mittaushjelman (Visilab IRMA7- basic) omaa ”Special” suodatinta. Mittausaika oli kullekin kulmalle viisi sekuntia. Mittausajan lyhyenä pitäminen oli perusteltua sillä, mittalaitteen jäähtymisestä vastaava tuuletin aiheuttaa mitattavaan pintaan kohdistuvaa ilmavirtaa. Ilmavirta nopeuttaa näytteen pinnan kuivumista ja tästä johtuen mittausajat pyrittiin pitämään lyhyinä, näytteen pinnan kuivumisen estämiseksi ja siten tulosten mahdollisimman hyvän vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi.



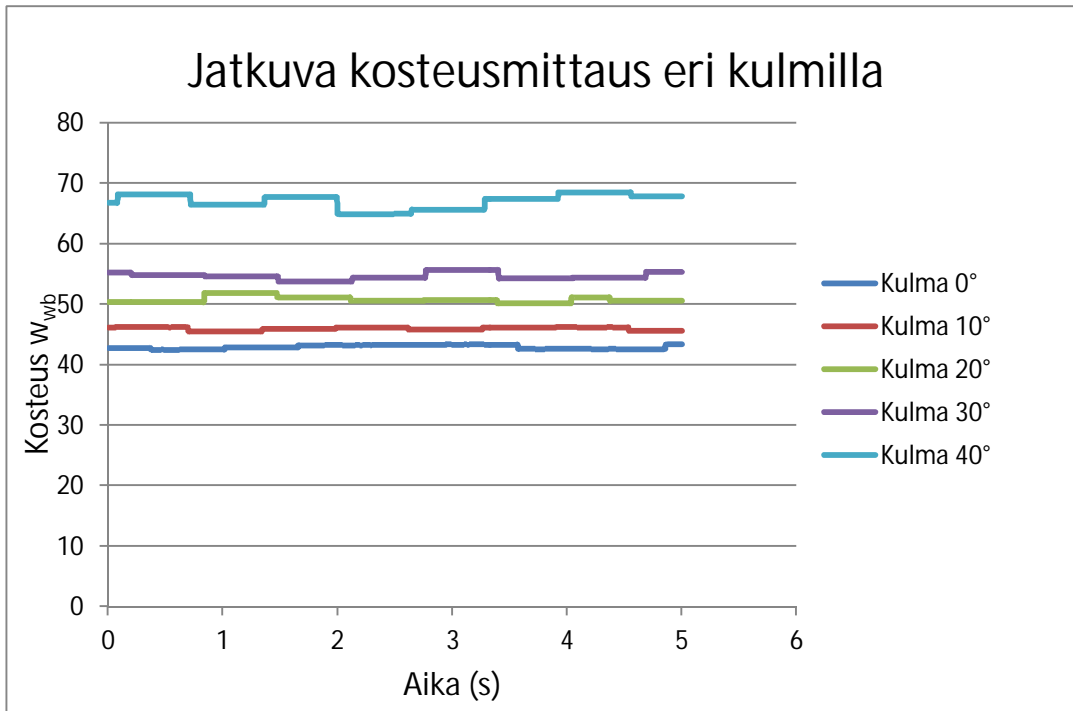
Kuva 18. Periaatekuva kulmien mittauksesta. 1. Näytteen ja vaakatason välinen kulma on 0° , 2. Näytteen ja vaakatason välinen kulma on α , 3. Kahden pinnan muodostaman vaon kulma on α .

Mittauksia suoritettiin kymmenen asteen välein viidellä eri kulmalla, joissa valokeilan ja näytteen väliset kulmat olivat noin 0 , 10 , 20 , 30 ja 40° . Tarkkojen kulmien toteuttamisongelmista johtuen todelliset kulmat olivat 0 , $9,9$, $20,1$, $30,2$ ja $40,3^\circ$. Näille kulmille mitattujen kosteuksien keskiarvot olivat järjestyksessä $42,9$, $46,0$, $50,8$, $54,6$, ja $67,0$ %.

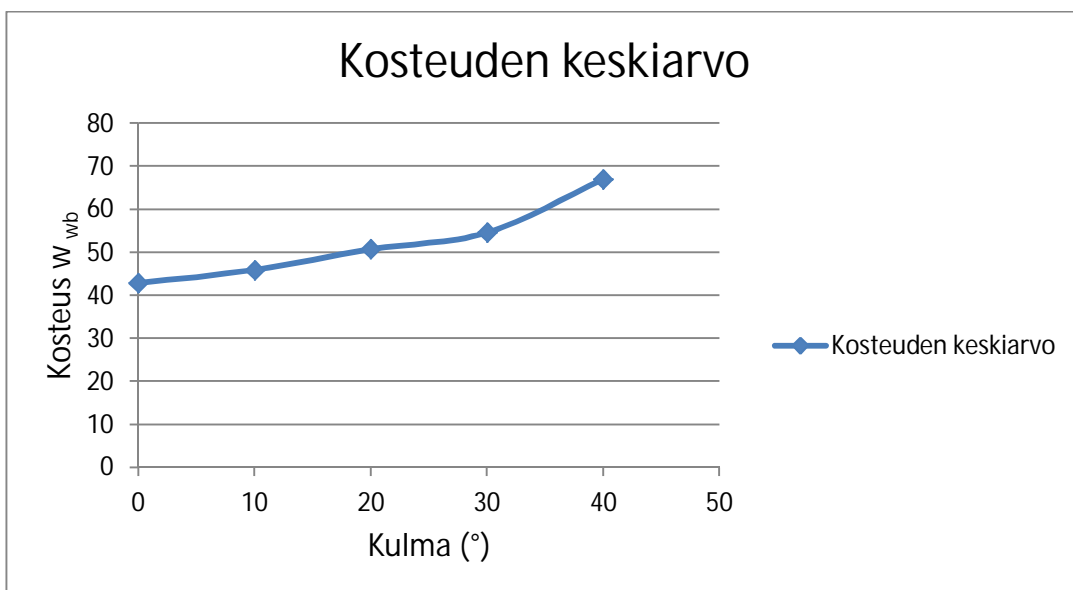
Mittausta, jossa näyte oli vaakatasossa (kulma 0°), voidaan pitää vertailukohtana muille kulmille. Näin ollen eroa vertailukohtaan syntyi kulmien 10 , 20 , 30 ja 40° kosteuksien keskiarvojen osalta $3,1$, $7,9$, $11,7$ ja $24,1$ kosteusprosenttiyksikköä. Prosentuaalista eroa syntyi $7,1$, $18,3$, $27,3$ ja $56,2$ % (Taulukko 3, Kuvat 19 ja 20). Mittaustuloksen keskihajonta ja varianssi kasvoi kulman kasvaessa (Taulukko 3, Kuva 21)

Taulukko 3. Mittauskulman vaikutuksen selvittämiseksi tehtyjen kosteusmittausten tulokset eri kulmille

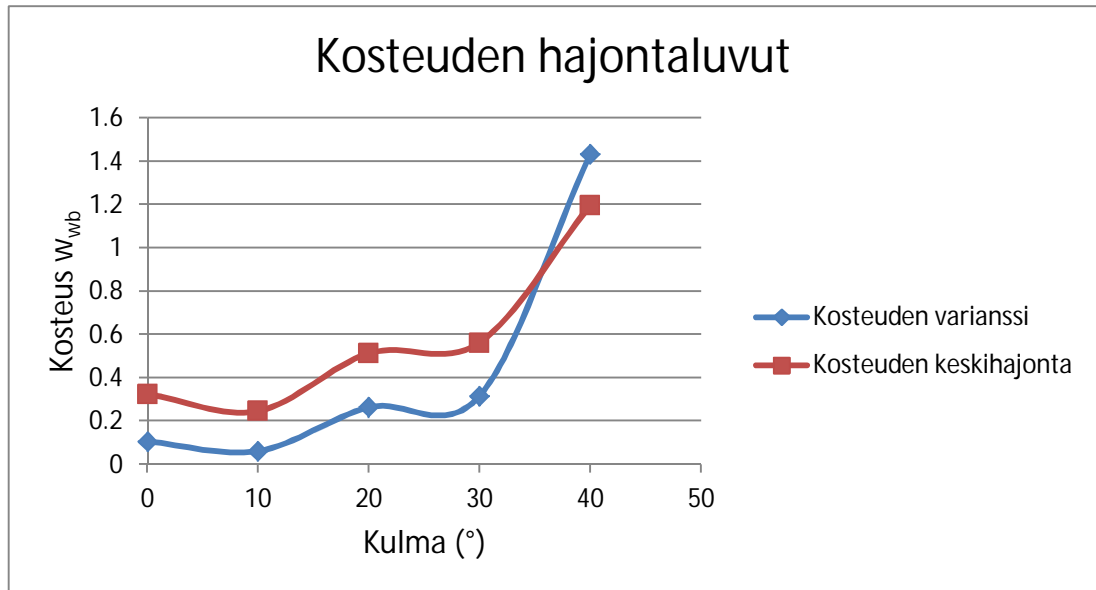
Kulma	0°	10°	20°	30°	40°
Keskiarvo	42,91	45,95	50,77	54,62	67,04
Keskiarvojen erotus	0	3,05	7,87	11,71	24,13
Varianssi	0,11	0,06	0,26	0,32	1,43
Keskihajonta	0,32	0,25	0,51	0,56	1,20



Kuva 19. Mittauskulman vaikutuksen selvittämiseksi tehtyjen kosteusmittauksien tulokset eri kulmille



Kuva 20. Kosteuden keskiarvon muutos mittauskulmaa muutettaessa



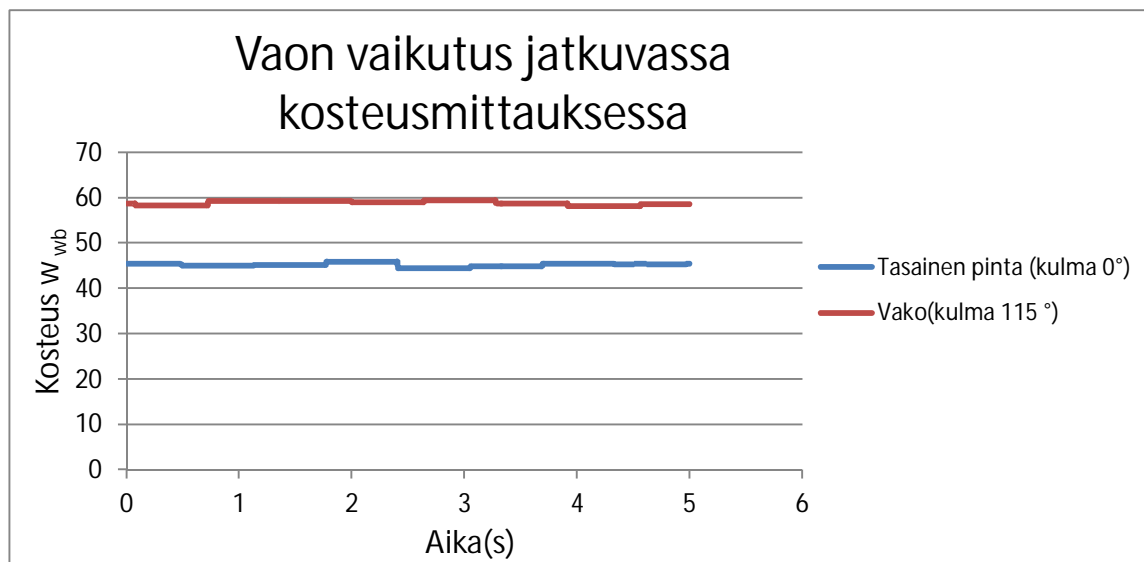
Kuva 21. Kosteuden hajonta mittauskulmaa muutettaessa

Vakomittauksessa mitattiin vaon vaikutusta mittaustulokseen tasaiseen pintaan verrattuna (Kuva 22). Vaon muodostama kulma oli mittauksessa 115° ja vaon pohja oli samalla tasolla kuin mitattu tasainen pinta. Valokeila kohdistettiin vakoon siten, että valokeilan keskilinja kulki vaon keskilinjalla. Vakomittaus suoritettiin kalibrointien, mittausajan ja suodatuksen osalta samoin kuin kulmamittaus.

Vakomittauksen jatkuvan kosteusmittauksen keskiarvo oli 58,9 % tasaisen pinnan mittauksen keskiarvon ollessa 45,3 %. Erotus oli siten 13,6 kosteusprosenttiyksikköä eli 30,18 % (Taulukko 4, Kuva 21).

Taulukko 4. Mittatavan pinnan vaikutuksen selvittämiseksi tehtyjen kosteusmittausten tulokset.

Mitattava pinta	Tasainen pinta (kulma 0°)	Vako (kulma 115°)
Keskiarvo	45,25	58,90
Varianssi	0,17	0,21
Keskihajonta	0,41	0,46



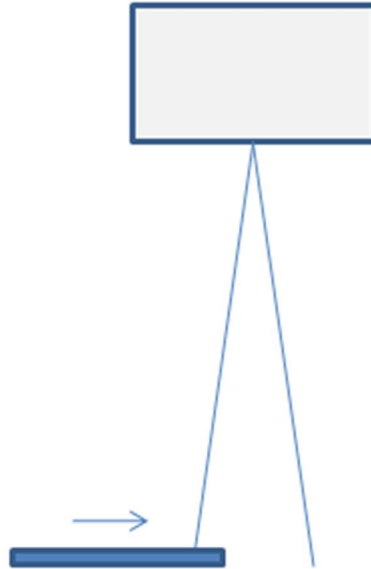
Kuva 22. Kosteusmittaus vaosta ja tasaiselta pinnalta

Valokeila mitattiin pimeässä huoneessa etäisyydeltä 22,2 cm mitattavasta tasosta. Tällä pyrittiin olemaan mahdollisimman lähellä pelto-olosuhteissa käytettävää mittausetäisyyttä (20 - 25cm) Valokeila oli suorakaiteen muotoinen. Pituussuunnassa valokeila oli 19,0 cm ja leveysuunnassa 10,5 cm ja valokeilan pinta-ala oli siten 199,5 cm².

Mittauksen havaittiin olevan epätarkka, mikäli valokeilassa oli muutakin kuin varsinainen mitattava näyte, esimerkiksi koemittausten tapauksessa kovalevyn pintaa. Tarkan ja edustuskelpoisen mittaustuloksen saavuttamiseksi tulisikin valokeilassa olla mitattavaa näytettä koko valokeilan pinta-alalla.

5.1.2 Mittalaitteen askelvastekoe

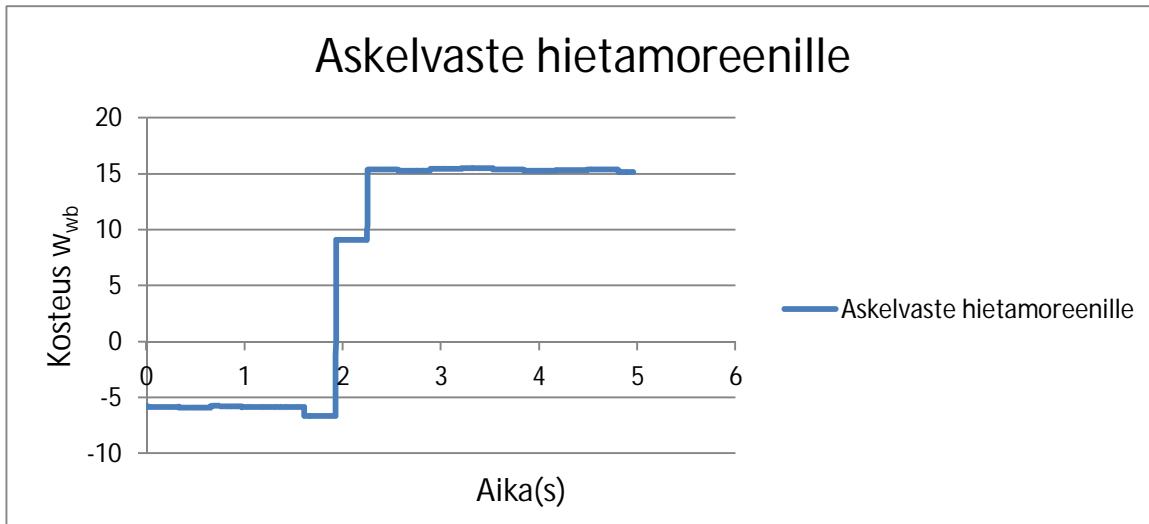
Askelvasteella tutkitaan ilmiön y muutosnopeutta asetusarvon x muuttuessa. Askelvastekokeella tutkittiin mittalaitteen reaktionopeutta kosteuden vaihteluun. Koe suoritettiin siten, että mittalaitteen valokeila oli aluksi kovalevyn pinnan päällä, jonka jälkeen valokeilaan työnnettiin nopeasti mitattava näyte, joka oli kostutettu huomattavaan kosteuteen (Kuva 23).



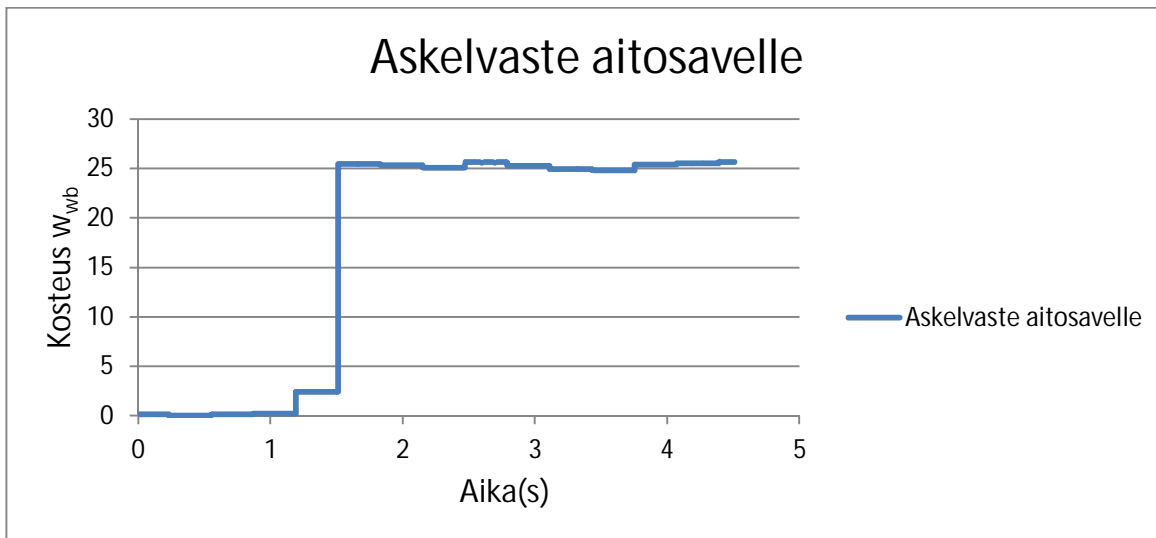
Kuva 23. Periaatekuva askelvastekokeen suorittamisesta

Kokeessa tarkoituksena oli mitata laitteen nousuaikaa, eli kuinka nopeasti signaali nousee lähtötasosta ja tasaantuu näytteen todelliseen kosteuteen. Askelvastekokeessa käytettiin kolmea eri kosteuteen kostutettua maata, jotka kaikki olivat eri maalajeja (HtMr, KHt ja As). Näytteiden todellista kosteutta ei selvitetty termogravimetrisesti, koska tarkoitus oli mitata laitteen reagointinopeutta kosteusmuutokseen. Mittaustaajuus oli laitteen suurin mahdollinen mittaustaajuus eli 400 Hz, jolloin näytteenottoväli oli 0,0025 sekuntia. Kokeessa käytetyt kalibroinnit olivat kullekin maalajille aikaisemmin tehty kalibrointi. Häiriöpiikkien suodatukseen käytettiin mittausohjelmistossa valittavissa olevaa ”Special” suodatinta.

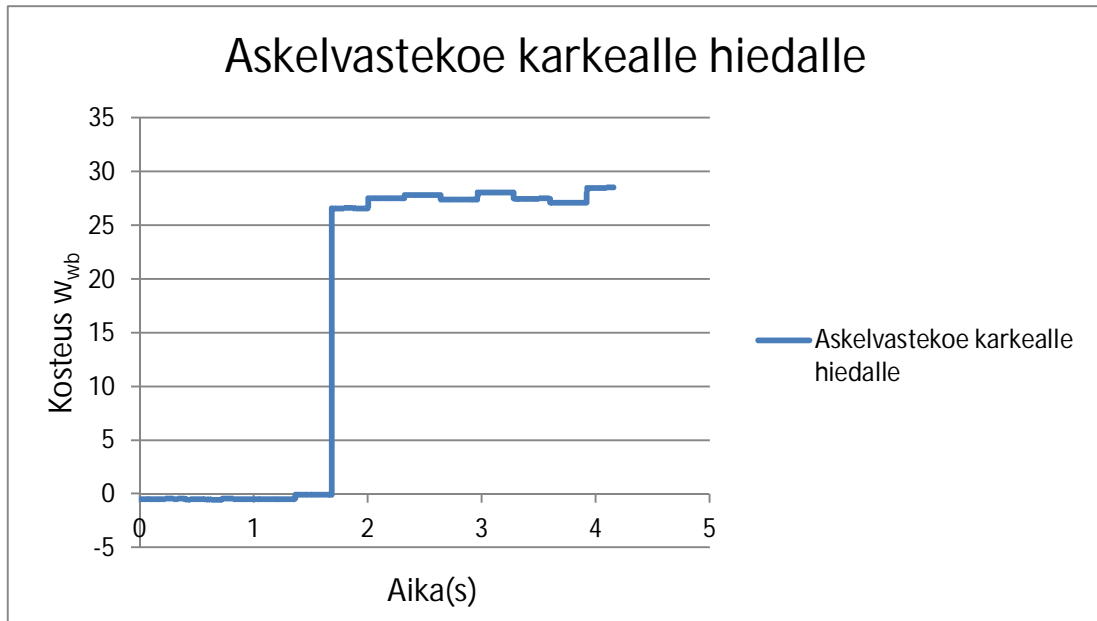
Askelvastekokeessa havaittiin, että mittalaitteen signaali reagoi nopeasti ja samalla nopeudella (0,3225 sekuntia) kosteusmuutoksiin, maalajista ja kosteuden vaihtelusta huolimatta (Taulukko 5, Kuvat 24, 25 ja 26). Askelvastekokeessa mitattiin kosteusvaihteluita, jotka olivat huomattavasti suurempia kuin pelto-olosuhteissa on odotettavissa. Suoritetun askelvastekokeen perusteella voidaan todeta, että kosteusvaihtelut, joita pelto-olosuhteissa on odotettavissa, eivät vaikuta mittalaitteen signaalin muutosnopeuteen.



Kuva 24. Askelvastekoe hietamoreenimaalle



Kuva 25. Askelvastekoe aitosavelle



Kuva 26. Askelvastekoe karkealle hiedalle.

Taulukko 5. Askelvastekokeet eri maalajeille

Maalaji	Näyte valokeilan alle (s)	Signaali alkaa nousta (s)	Signaali tasaantuu (s)	Nousuaika (s)
Hietamoreeni	1,9275	1,9300	2,2500	0,3225
Aitosavi	1,1900	1,1925	1,5125	0,3225
Karkea hieta	1,3625	1,3650	1,6850	0,3225

5.1.3 Mittalaitteen aiheuttama hajonta

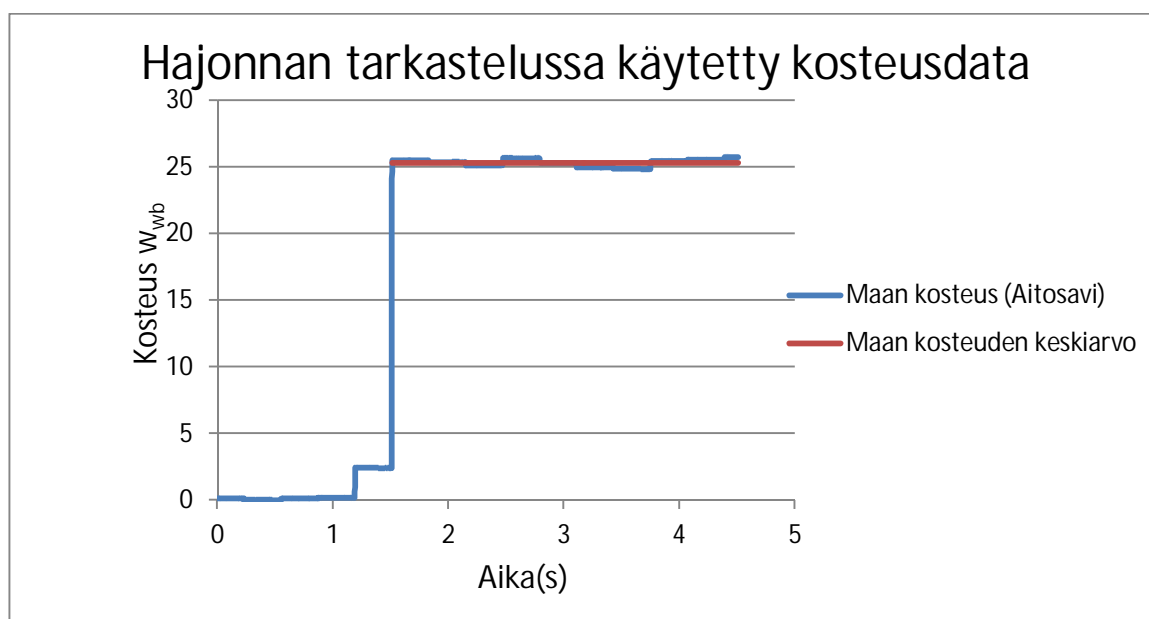
Koska pelto-olosuhteissa tapahtuvissa dynaamisissa mittauksissa mitattava suure ja olosuhteet vaihtelevat jatkuvasti, mitattiin mittalaitteen aiheuttama hajonta, mittaamalla vakiona pysyvää suuretta. Vakiona pysyvänä suurena toimi ennakkoon tiettyyn kosteuteen kostutettu maa. Mittausepävarmuuden laskemisessa käytettiin samaa mittausdataa kuin askelvastekokeessa (Kuva 27), jossa olosuhteet eivät muuttuneet toisin kuin pellolla tapahtuneissa dynaamisissa mittauksissa.

Mittalaitteen aiheuttama hajonta on laskettu kolmelle eri maalajin kosteudelle.

Mittausepävarmuus on laskettu mittavirheelle 95,4 % luottamustasolla, jonka raja-arvot

saadaan kertomalla keskiarvon keskihajonta kahdella (Kaava 12). 95 % luottamusväli on yleisimmin käytetty luottamusväli epävarmuuksien tilastollisessa arvioinnissa.

$$m = \pm 2 \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (12)$$



Kuva 27. Mittalaitteiston hajonnan laskemisessa käytetty askelvastekokeesta saatu maan kosteusdata ja maan kosteuden keskiarvo

Tuloksena saatiin mittalaitteiston aiheuttamaksi hajonnaksi pienimmillään 0,104 % ja suurimmillaan 0,61 % (Taulukko 6). Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että mittalaitteiston mittaasepävarmuus on riittävän pieni pelto-olosuhteissa siementen itävyyden kannalta merkityksellisten kosteuserojen mittaamiseen.

Kuitenkin kasvien käyttökelpoisen veden mittaaminen saattaa asettaa laitteistolle ja kalibrointiohjelmille lisävaatimuksia joiden selvittäminen vaatii lisää tutkimuksia. Nämä voivat vaikuttaa heikentävästi laitteiston mittaasepävarmuuteen.

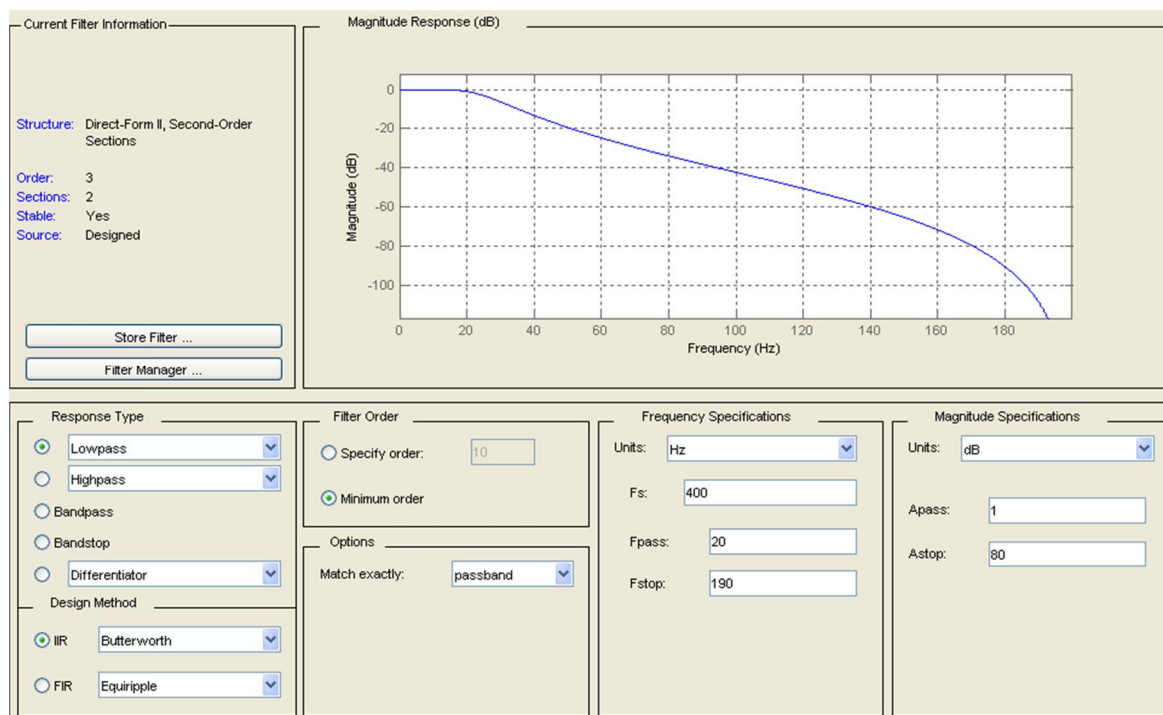
Taulukko 6. Laitteiston mittausepävarmuus eri maalajeille

Maalaji	Hietamoreeni	Karkea hieta	Aitosavi
Keskiarvo (Kosteus m-% (wb))	15,37	27,54	25,34
Keskihajonta (Kosteus m-% (wb))	0,09	0,53	0,27
95,4 % luottamusväli (Kosteus m-% (wb))	15,73 ± 0,18	27,54 ± 1,05	15,37 ± 0,53
Mittausepävarmuus (Kosteus m-% (wb))	0,10	0,61	0,31

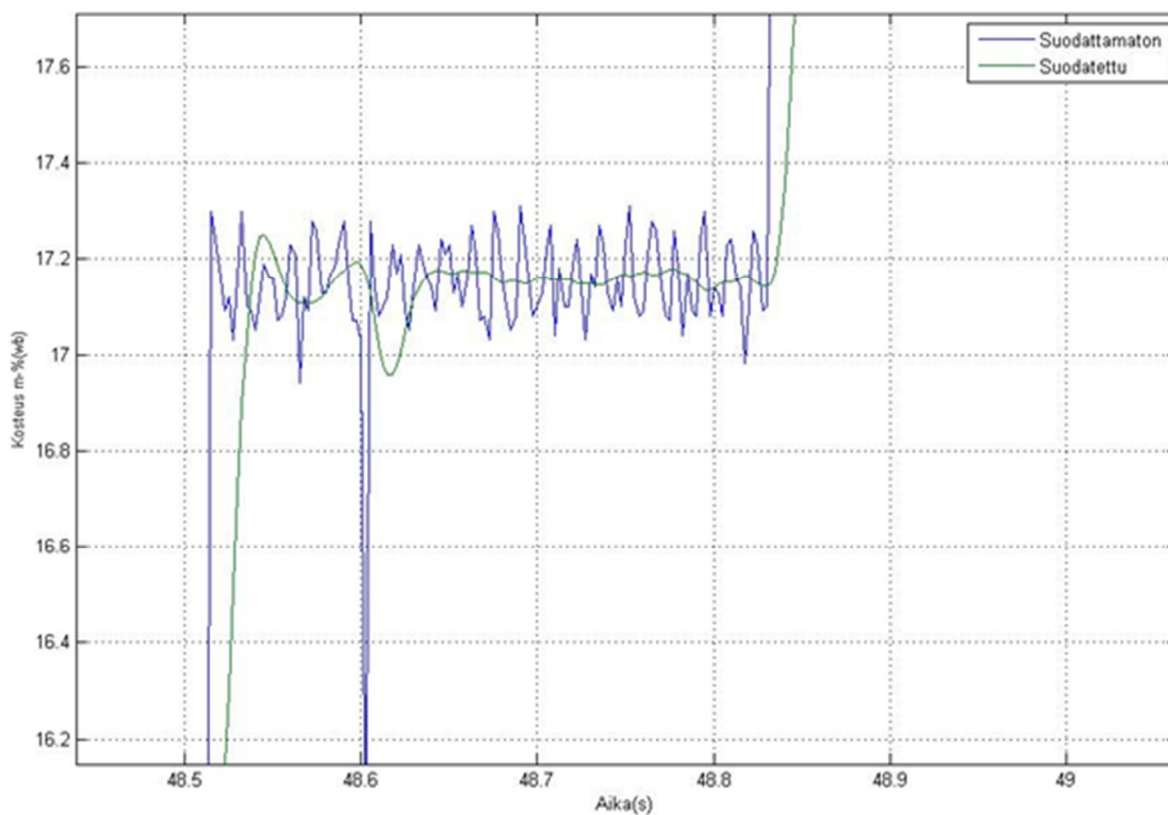
5.2 Jatkuvat mittaukset

5.2.1 Mittaustulosten suodatus

Pelto-olosuhteissa suoritettujen mittausten datan suodattamiseen käytettiin Matlab-ohjelman signaalinkäsittelytyökalulla luotua Butterworth-alipäästösuodatinta. Päästökaistana käytettiin 20 Hz (Kuva 28). Suodatuksen tarkoituksena oli poistaa datasta korkeataajuisia kohinaa sekä poistaa datapiikkejä, jotka eivät johdu maan kosteusvaihteluista. Kosteusvaihteluista johtumattomia häiriöpiikkejä esiintyy pääasiassa korkeilla taajuuksilla. Lisäksi suodattamalla aikaansaadaan mittauksen tulosignaalin loivempi käyttäytymien maankosteusvaihteluihin, mikä on edullisempi ajatellen säätöautomaatiikkaan yhdistämistä. (Kuva 29)



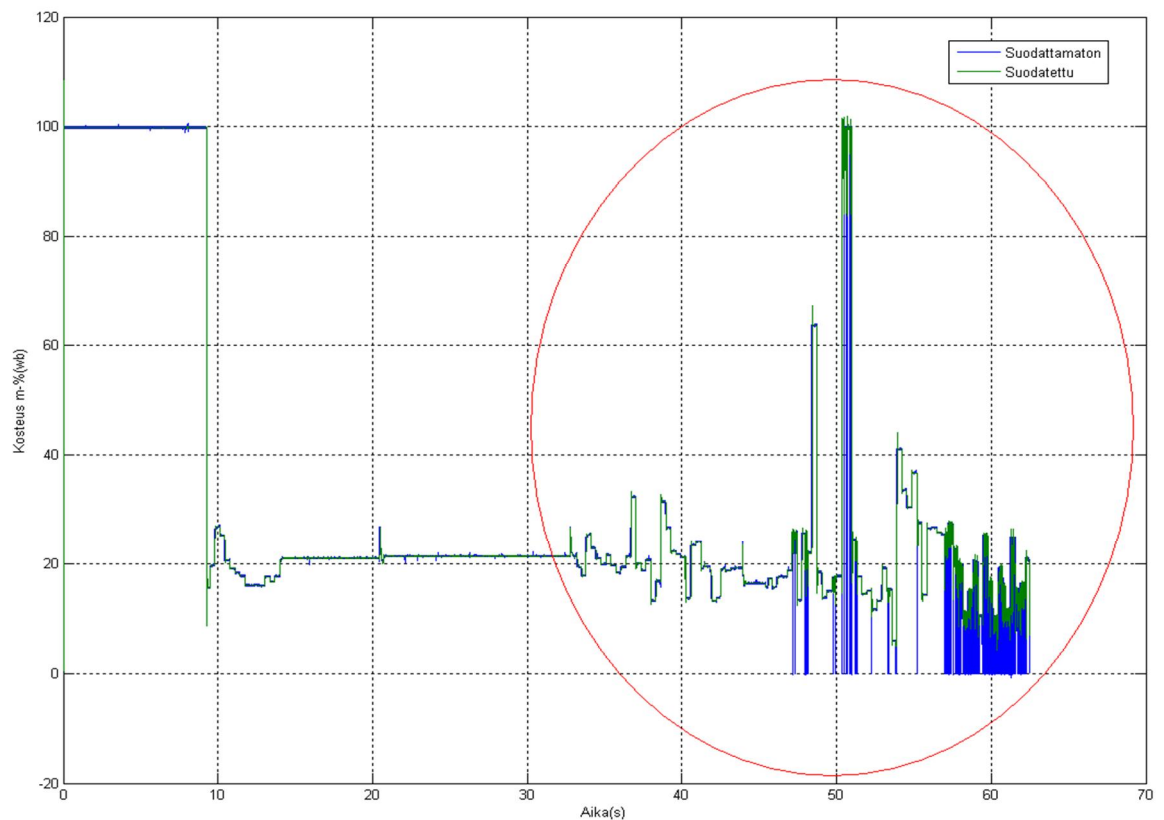
Kuva 28. Signaalin suodattamisessa käytetty matlabin signaalinkäsittelytyökalulla (sptool) luotu alipäästösuodatin ja käytetyt arvot



Kuva 29. Butterworth suodattimella suodatettua (vihreä) ja suodattamatonta (sininen) maan kosteusmittausdataa

5.2.2 Mitattavan pinnan vaikutus

Alue, jolta kosteus mitataan, on oltava tuore ja tasainen. Mitattavalle alueelle ei saa jatkuvan mittauksen aikana valua maata mitattavan alueen ulkopuolelta. Heijastusmittauksen valokeilan alueelle valuva maa, aiheuttaa tulosignaalin ”sahaamista” (Kuva 30). ”Sahaamista tai korkealla taajuudella tapahtuvaa suurta vaihtelua voi, jossain määrin lieventää mittauksen tulosignaalin suodatuksella, mutta on kuitenkin selvää, että maa-aineksen valuminen mittaavan valokeilan alueelle heikentää mittaustulosta merkittävästi.



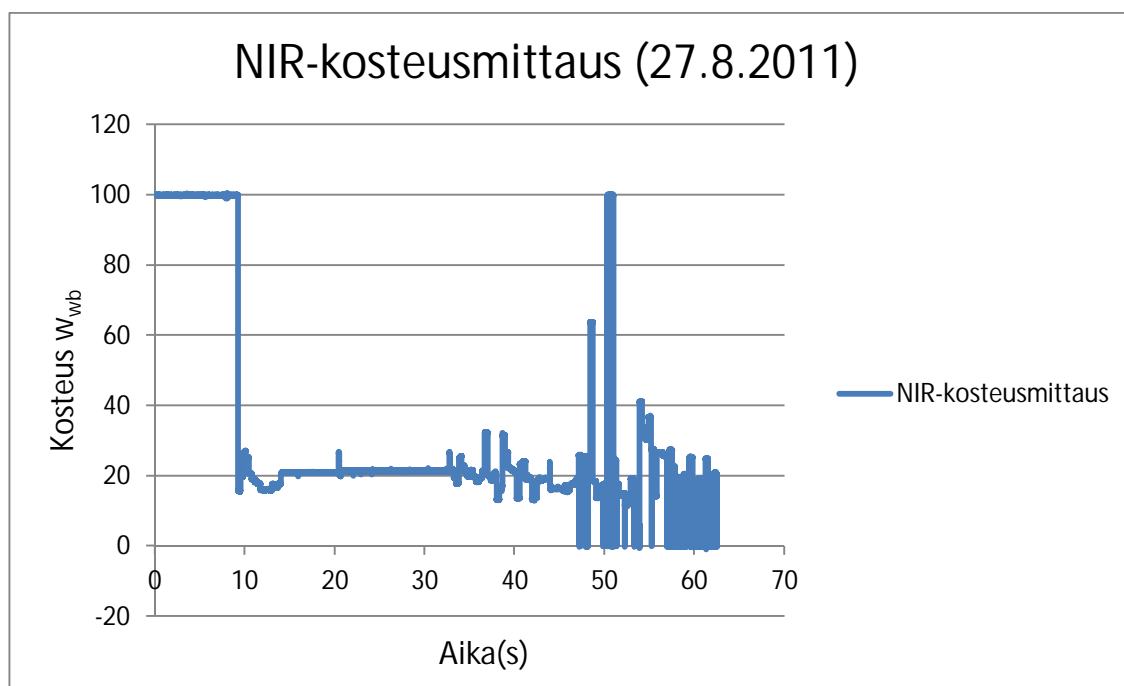
Kuva 30. Esimerkki jatkuvasta kosteusmittauksesta, jossa mittausalueelle pääsi valumaan maata alueen sivuilta. Tämä on havaittavissa tulosignaalin ”sahaamisena”, jota esiintyy ympyröidyllä alueella

5.2.3 Mittaustulokset 1

Ensimmäiset koemittaukset suoritettiin 27.8.2011 museopellon loholla Viikissä. Mittausten tarkoituksena oli kokeilla mittalaitteiston toimivuutta. Kosteusmittauksen ”harjoittelun” jälkeen suoritettiin ajokerta, joka onnistui tyydyttävällä tasolla. Datassa on havaittavissa selvät kosteuden muutokset mittauksen aikana. Datassa voidaan havaita kosteusmittauslaitteen käynnistys, joka tapahtuu noin 10 sekuntia mittausohjelmiston

käynnistämisen jälkeen. Lisäksi havaittavissa on myös laitteen maata auraavan levyn kääntyminen 90° (tämä johtui kiinnityspulttien heikosta kiristämisestä), joka alkaa 35 sekunnin jälkeen näkyä epätasaisempaan ja ”piikikkäämpään” datana. Levyn kääntyä ei avattu maan pinta ollut tasainen vaan levy teki ohutta vakoa, jonne pääsi valumaan maata vaon sivuilta, mikä johti datan epätasaisuuteen. (Kuva 31)

Mittauksen perusteella voidaan siis todeta, että tarkan mittaustuloksen saavuttamiseksi mitattavalle pinnalle ei tulisi päästä valumaan maata sivuilta. Mittaustaajuus oli 400 Hz. Työkoneen ja mittalaitteen tasaisemman kulun saavuttamiseksi kiinnitettiin työkoneeseen tukipyörä.

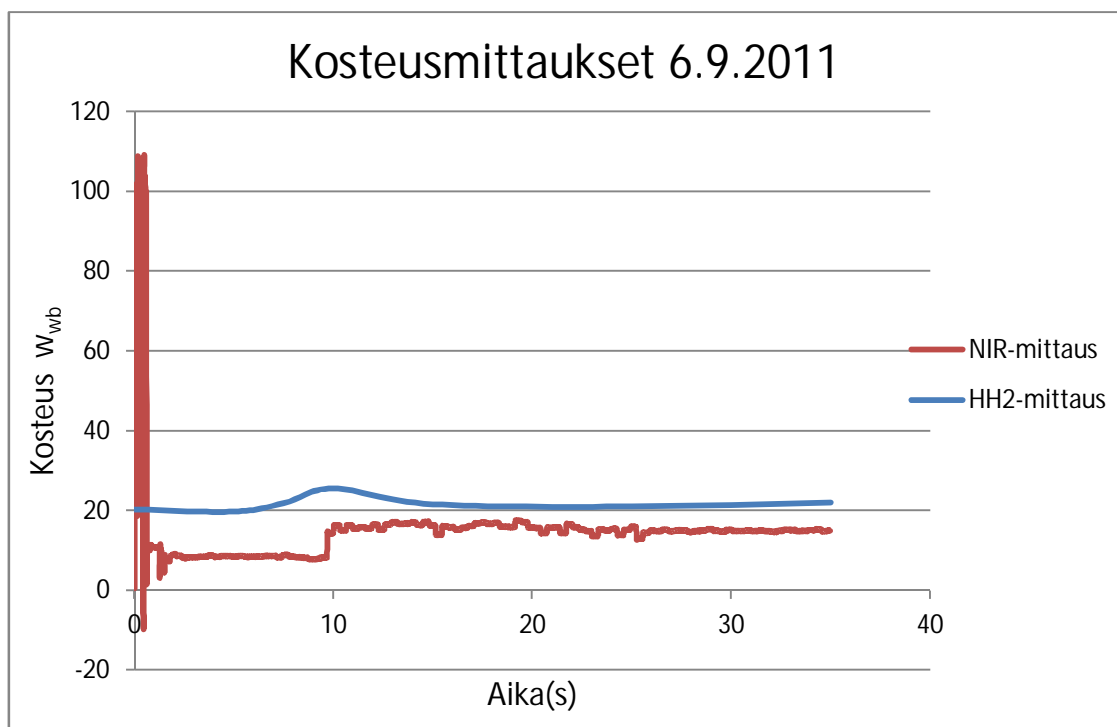


Kuva 31. Kosteusmittaus 27.8.2011

5.2.4 Mittaustulokset 2

6.9.2011 suoritetussa mittauksessa tarkoituksena oli kokeilla työkoneseen asennetun tukipyörän (Kuva 13) vaikutusta mittausetäisyyden tasaisena pysymiseen. Lisäksi mittauksen tavoitteena oli HH2-mittalaitteella kerättävän vertailudatan mittausalueen merkitseminen hiekkapuhallushiekalla. Tämä ei kuitenkaan onnistunut, koska mittalaitteen maata avaava komponentti työnsi syrjään hiekan. Täten HH2-mittalaitteella mitattiin maan kosteutta koko NIR-mittalaitteella mitatulta alueelta. Kosteuslukemat HH2-mittalaitteella kosteuslukemat 0, 5, 7,5, 10, 15, 25, 35 metrin kohdalta. Mitatun matkan kokonaispituus oli 35 metriä (Kuva 32).

Saatujen tulosten pohjalta kehiteltiin mittalaitteistoon merkkijänniteyksikkö, jolla saatiin merkittävä vertailudatan keruualue NIR-kosteusmittausdataan.



Kuva 32. Kosteusmittaus 6.9.2011

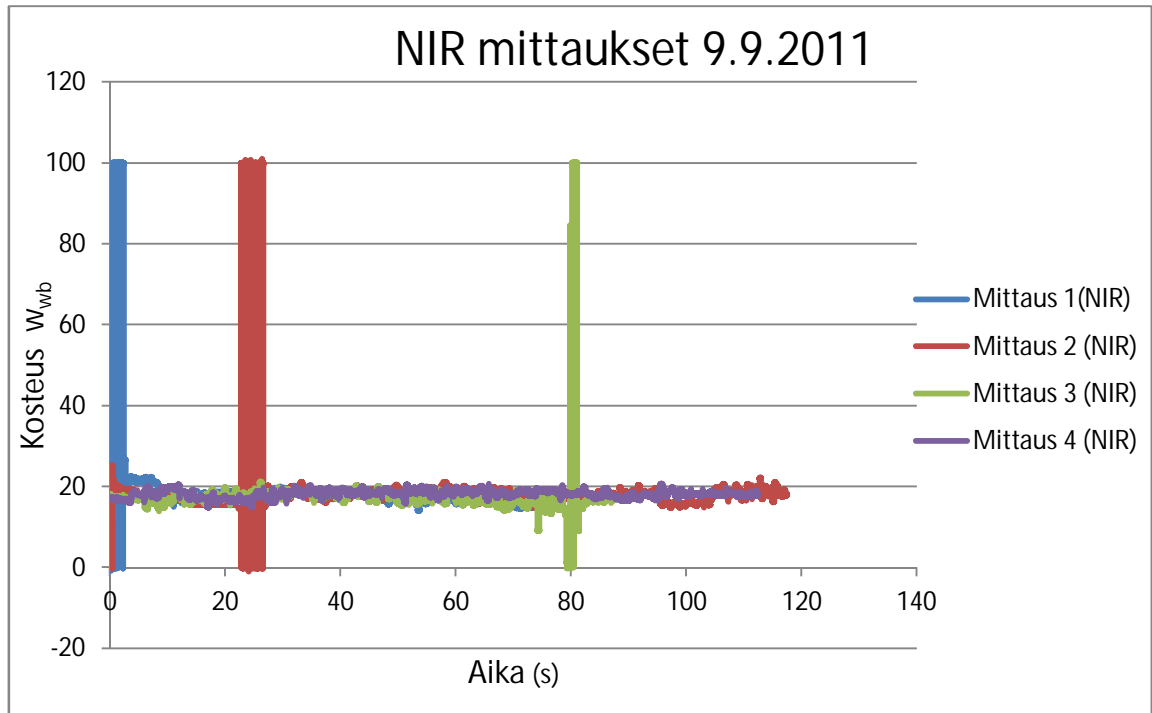
5.2.5 Mittaustulokset 3

Mittauksia suoritettaessa oli koekenttä kauttaaltaan sateen kostuttama. Maamassa oli pinnankosteuden osalta silmin tarkasteluna homogeenistä, eikä kuivempia kohtia esiintynyt. Tämä vaikuttanee siihen, että mittaustulokset on hyvin tasaista, eikä datassa esiinny piikkejä korkeasta mittaustaajuudesta (400 Hz) huolimatta.

NIR-mittauksissa maata avaava työkone avasi maata 0–5 cm syvyyteen pellon pinnan muodosta riippuen. HH2-mittauksissa mittaussyvyys oli laitteen anturin piikkien mitta eli noin 5 cm.

Koko matkan NIR-mittauksissa ensimmäisessä ja toisessa mittauksessa on havaittavissa selkeitä piikkejä (Kuva 33). Piikit johtuivat siitä, että työkoneen maata avaava levy oli säädetty liian syväälle, jolloin maata pääsi valumaan mittaustilanteen valokeilaan.

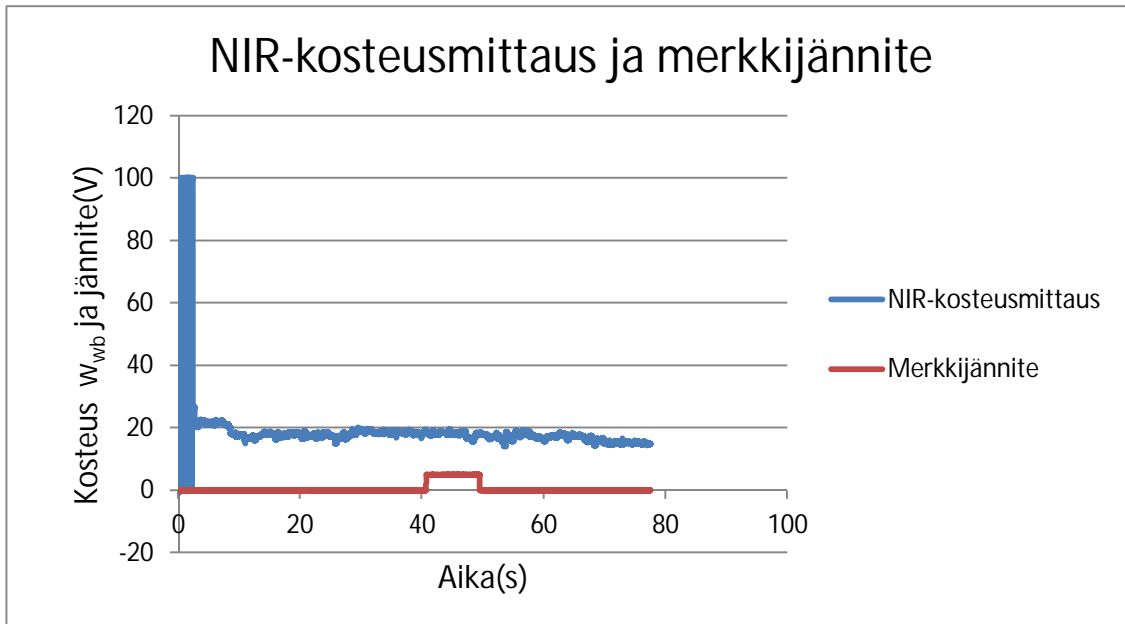
Kolmannessa mittauksessa on mittauksen lopussa havaittavissa piikki. Piikkiä vastaavassa kohdassa oli mittaushetkellä levitetty vaaleaa hiekkapuhallushiekkaa. Hiekka oli ollut maassa useamman päivän ja oli kosteudeltaan muuta maata vastaavaa. Korkean datapiikki johtunee siitä, että myös hiekkapuhalluksessa käytettävä hienojakoinen, vaalea hiekka heijastaa NIR-säteilyä voimakkaammin kuin tummempi HtMr-maa.



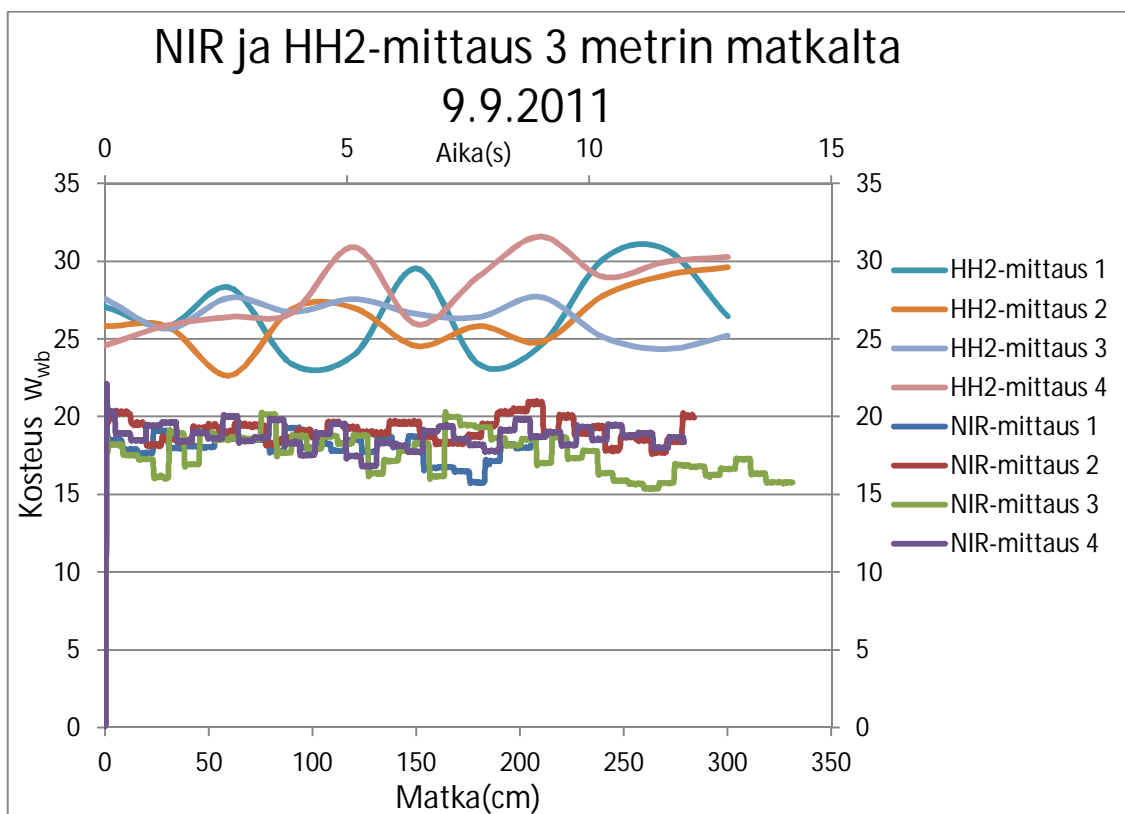
Kuva 33. NIR mittaukset neljällä eri mittausväylällä.

Kosteuden vertailudata kerättiin siten, että lohkolta rajattiin kolmen metrin pituinen alue kahdella auraskeppiparilla. Ajettaessa ensimmäisen auraskeppiparin kohdalle painettiin ”merkkijännite”-kytkin päälle ja ajettaessa toisen auraskeppiparin kohdalle painettiin ”merkkijännite”-kytkin pois päältä. Näin pystyttiin erottelemaan kolmen metrin mittauskohta ajan funktiona mitatusta NIR-kosteusdatasta. Merkkijännite on pois-asennossa 0 voltia ja päällä asennossa 5 voltia (Kuva 34).

Huomattavaa on, että kolmen metrin matkalta kerätystä kosteusmittausdatojen käyrissä on samankaltaisuuksia muotojen osalta. Käyrät eivät kuitenkaan mene yksi yhteen vaan NIR-kosteusdata liikkuu karkeasti välillä 15–20 % ja HH2-mittauksin kerätty kosteusdata puolestaan välillä 25–30 % (Kuva 35).



Kuva 34. Esimerkkikuva NIR-kosteusmittaus ja merkijännite



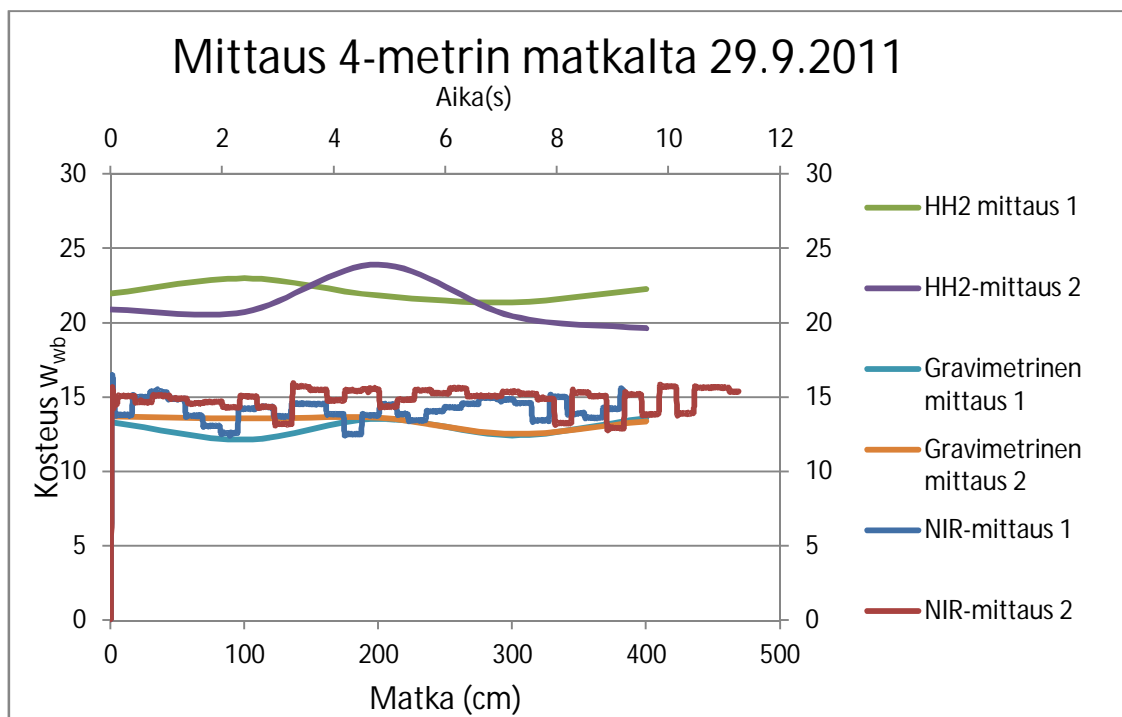
Kuva 35. Kolmen metrin matkalta jatkuvana NIR-mittauksena kerätty kosteusmittausdata ja vertailu HH2-mittalaitteella staattisesti mitattuun kosteuteen. 9.9.2011 suoritettujen mittausten jälkeen oli tarpeellista selvittää HH2 ja NIR-mittaustapojen välinen ero.

5.2.6 Mittaustulokset 4

29.9 ja 30.9.2011 suoritettiin kaksi mittausta NIR-laitteella neljän metrin matkalta, jolta myös kerättiin vertailudataa mittaamalla kosteuskokema HH2-mittalaitteella sekä keräämällä samasta mittauskohdasta maanäyte 200 ml näytelieriöön. Maanäytteiden keräämisen tarkoituksena oli selvittää 9.9 suoritetuissa mittauksissa ilmennyt NIR-mittauksen ja HH2-mittauksen välinen ero.

29.9 mittaukset suoritettiin kuten 9.9; Ensin suoritettiin NIR-mittaus, neljän metrin auraskepin merkatun alueen ylitse. Alue merkittiin mittaustietoon merkkijännitteellä. NIR-mittauksen suorittamisen jälkeen merkatulta alueelta kerättiin metrin välein kosteuskokemat HH2-mittalaitteella sekä maanäytteet 200 ml lieriöihin. Maanäytteistä määritettiin kosteus gravimetrisesti. Mittauksessa käytettiin korkeampaa ajonopeutta kuin 9.9 suoritetulla mittauskerralla. Mittaukset suoritettiin noin metrin etäisyydellä toisistaan. Tällä pyrittiin mahdollisimman samankaltaisiin olosuhteisiin.

Mittaustulosten vertailu osoittaa, että gravimetrisen ja NIR-kosteusmittaus kulkevat samassa suuruusluokassa, kun taas HH2-laitteella mitattu kosteus on selkeästi korkeampi. (Kuva 36)

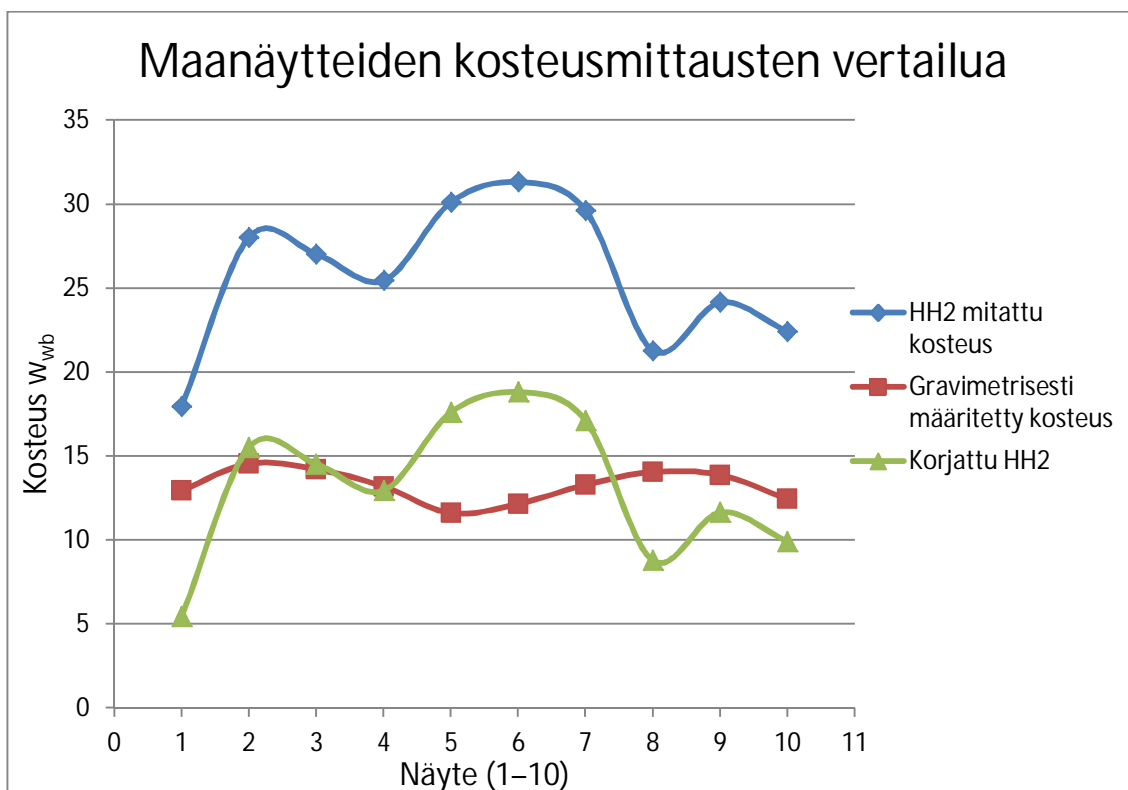


Kuva 36. NIR, HH2-kosteusmittauslaitteella sekä gravimetrisesti mitatut maan kosteudet

5.2.7 HH2 ja gravimetrisen mittauksen tarkistusmittaus

Koska gravimetrisesti määritetty kosteus ja NIR-mittalaitteella mitattu kosteus olivat suuruusluokaltaan samanlaisia, tutkittiin edelleen tarkemmin HH2- ja gravimetrisen kosteusmittausmenetelmien eroja ottamalla kymmenen satunnaista mittalukemaa museopellon koekentältä. Data kerättiin mitattaamalla HH2-anturilla kosteuslukema ja tämän jälkeen ottamalla maanäyte 200 ml teräslieriöllä siten, että HH2-anturin piikkien painamat reiät maahan olivat lieriön keskikohdassa. Maanäytteistä määritettiin kosteudet termogravimetrisesti.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että HH2-mittauksessa on enemmän vaihtelua, kuin gravimetrisesti määritetyssä kosteudessa (Kuva 37). Vaihtelu voi johtua esimerkiksi maan tiiviyyden vaihtelusta.



Kuva 37. HH2- ja gravimetrisesti mitattujen maan kosteuksien vertailua kymmenestä satunnaisesti valitusta mittapistestä museopellon koekentällä

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

NIR-mittalaite on riittävän tarkka ja nopea hyvissä mittausolosuhteissa. Suurin haaste on luoda mittauslaitteistolle riittävän hyvät olosuhteet, joissa saavutetaan riittävä tarkkuus. Laitteen suuri mittausetäisyys mitattavaan materiaaliin (Mittausetäisyys: 180–380 mm (nimellisesti 200 mm)) ja mittausalueen suurehko valokeila (225 mm etäisyydeltä 190 x 105 mm) vaativat suuren ja tuoreen pinnan, jolle ei saisi valua maata mittauksen aikana. Mittausalueelle valuva maa aiheuttaa tulosignaaliin merkittäviä häiriöitä ja voi, tehdä signaalista hyödyntämiskelvotonta. Lisäksi mittauskulma vaikuttaa mittaustulokseen, jolloin mitattavan pinnan tulee olla tasainen edustavan mittaustuloksen aikaansaamiseksi.

Tarkan kosteuden määrittämiseksi olisi myös hyvä tuntea maan orgaanisen aineksen pitoisuus eli maan multaisuus. Maan orgaanisen aineksen pitoisuus vaikuttaa maan väriin ja siten myös NIR-heijastusmittauksella mitattaviin kosteusmittaustuloksiin. Lisäksi maan orgaanisen aineksen määrä vaikuttaa myös lisäävästi maan vedenpidätyskykyyn.

Suodattamalla voidaan poistaa mittauksesta kohinaa, mutta mittauspinnan ollessa epätasaista tai mittausalueelle valuessa maata ”sahaa” signaali liikaa (Kuva 29). Pienempi valokeila ja lyhyempi mittausetäisyys antaisivat NIR-heijastusmittaukselle paremmat hyödyntämismahdollisuudet maan jatkuvassa kosteusmittauksessa. Mittalaitteiston toteuttaminen siten, että valonlähde ja valokenno sijoitetaan maan pinnan tasoon maata avaavaan komponenttiin valokuitukaapelin avulla, tarjoisivat lyhyemmän mittausetäisyyden lisäksi myös pienemmän mittalaitteiston rikkoutumisriskin, koska varsinainen mittalaitteisto voitaisiin sijoittaa kauemmas maasta. Näin voitaisiin vähentää laitteistoon kohdistuvan tärinän, iskujen ja pölyn määrää.

Myös rividetektoriiin perustuvan NIR-tekniikan, jolla kyetään mittaamaan useampaa absorptiokaistaa, käyttö antaisi etuja suhteessa vain yhteen mitattavaan absorptiokaistaan. Näin olisi kosteuden ohella mahdollista mitata muitakin ominaisuuksia. Esimerkiksi orgaaninen aine vaikuttaa maan kykyyn sitoa vettä ja

orgaanisen aineksen määrän tunteminen mahdollistaisi tarkempien kosteusmittausten kalibrointien toteuttamisen.

7 KIITOKSET

Haluaisin osoittaa kiitokseni professori Jukka Ahokkaalle työn ohjaamisesta ja tuesta sekä tutkimusteknikko Marko Kajoskivelle avusta työkoneen rakentamisessa. Kiitos lisäksi Visilab Signal Technologies Oy:n Henrik Stenlund neuvoista ja laitteiston vuokraamisesta.

LÄHTEET

Adamchuck, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 44: 71–91.

Alakukku, L. 2006. Emergence of small grain cereals at different water potentials of clay and sandy soil. *Advances in geoecology* 38: 175–180.

Andersson, S., Winkler, P. 1972. Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. *Grundförbättring* 25: 53–143.

Ayalew, G., Ward, S.M. 2000. Development of a prototype infrared reflectance moisture meter for milled peat. *Computers and Electronics in Agriculture* 28: 1–14.

Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Beihl, L.L., Stoner, E.R., 1985. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy* 38: 1–44.

Ben-Dor, E., Goldshleger, N., Benyamini, Y., Agassi, M., Blumberg D.G. 2003. The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2 to 2.5 μ m spectral region. *Soil Science Society of America Journal* 67: 289–299.

Brady, N.C., Weil, R.R., 2002. *The Nature and Properties of Soil*. 13th ed: 121–175 ja 176–218

Clark, R. N., King, T. V. V., Klejwa, M., Swayze, G. A., Vergo, N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *J. Geophys. Res.* 95:12653–12680.

Delta-T Devices. 1999. *Thetaprobe Soil Moisture Sensor, Type ML2X-UM-1.21 User Manual*.

Delta-T Devices 2012. *Thetaprobe Soil Moisture Sensor*. <http://www.deltat.co.uk/product-display.asp?id=ML2x%20Product&div=Soil%20Science>. Julkaistu 2012, viitattu 15.5.2012

Dirksen, C. 1999 *Soil Physics measurements*. Reiskirchen: Catena Verlag. 154 s.

- Edgar, R.F., Hindle, P.H., 1971. Infrared gauging. *Optics & Laser Technology* 3: 5–9.
- Grecon. 2010. Inline moisture measurement with infrared technology. http://www.grecon.de/grecon_product_ir_5000_en.php. Julkaistu 2010. Viitattu 15.12.2012
- Haller, E. 1984. Effect of the Germinating Seed Environment on Crop Yields. II. Effect of the Water and Air Regime During Germination on Cereal Yields. *Experimental Agriculture* 20: 235–243.
- Heege, H.J. 1993. Seeding Methods Performance for Cereals, Rape, and Beans. *Transactions of the ASAE* 36: 653–661
- Heinonen, R. (toim.) 1992. Maa, viljely ja ympäristö. 334 s.
- Heinonen, R. 1983. Maan muokkaus. Julkaisussa: Kasvinviljelyoppi 1: s. 199–230. Toim. Pekka Köppä.
- Hummel, J.W., Sudduth, K.A., Hollinger, S.E. 2001. Soil moisture and organic matter prediction of surface soils using an NIR soil sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 32: 149–165.
- Järvinen, T., Malinen, J., Tiitta, M., Teppola, P. 2007. State of art-selvitys puun kosteusmittauksesta. VTT tutkimusraportti Nro. VTT-R013325-07. 90 s.
- Lobell, D.B., Asner, G.P. 2002. Moisture effects on Soil Reflectance. *Soil Science Society of America Journal* 66: 722–727.
- Launonen, U., Stenlund, H., 2007. Better Moisture Management With New NIR Moisture Gauges. 61 st Annual Appita Conference. Gold Coast 2007
- McBartney, B., Mendonca Santos, M.L., Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3–52

Morimoto, E., Shibusawa, S., Kaho, T., Hirako, S. 2004. Soil properties prediction for real-time soil sensor based on neural network. Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 7–8 October 2004 Conference. Kyoto, Japan.

Mouazen, A.M., Maleki, M.R., De Baerdemaeker, J., Ramon, H. 2007. On-line prediction of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. Soil & Tillage Research 93: 13–27.

Mouazen, A.M., De Baerdemaeker, J., Ramon, H. 2005. Towards development of on-line moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer. Soil & Tillage Research 80 (2005): 171–183.

Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., Davies, T., 2002. Multivariate Calibration and Classification. NIR Publications, West Sussex, UK.

Noborio, K. 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Computers and Electronics in Agriculture 31: 213–237.

Ozaki, Y., McClure, W.F., Christy, A.A. 2007. Near-Infrared spectroscopy in food science and technology. John Wiley & Sons, inc. Hoboken, New Jersey.

Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P., Äijö, H. 2009. Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojajyhdistys. Helsinki.

Plamer, K.F., Williams, D., 1974. Optical properties of water in the near infrared. J. Opt. Soc. Am. 64: 1107–1110.

Räsänen, E. 1999. Kosteuspitoisuuden määrittäminen leijukerrosrakeistusprosessissa NIR-menetelmällä. Seminaariyhteenveto. Teknologian osasto. Farmasian laitos. Helsingin Yliopisto. <http://www.pharmtech.helsinki.fi/seminaarit/vanhat/eeturasanen.pdf>. Julkaistu 1999, Viitattu 15.5.2012.

Slaughter, D.C., Pelletier, M.G., Upadhyaya, S.K. 2001. Sensing soil moisture using NIR spectroscopy. *Applied Engineering in Agriculture* Vol. 17: 241–247.

Smith, K.A., Mullins, C.E. 2000. *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*, Second edition. Marcel Dekker, Inc. New York. 2000

Soil Moisture Equipment Corp. 2008. Soil TDR Measurement. <http://www.soilmoisture.com/PDF%20Files/tdrtrase.pdf>. Julkaistu 2008 viitattu 15.5.2012.

Topp, G.C, Davis, J.L., Annan, A.P. 1980 Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*. 16: 574–582.

Whalley, W.R., Stafford, J.V., 1992. Real-time sensing of soil water content from mobile machinery: options for sensor design. *Computers and Electronics in Agriculture*. 7: 269–284.

Vincent, R.K., Hunt, G.R. 1968, Infrared reflectance from mat surfaces. *Applied Optics* 7: 53-58.

Visilab 2010. Visilab Model D. <http://www.visilab.fi/modeld.pdf>. Julkaistu 2010, viitattu 15.5.2012