



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

Metodutveckling av teknik för kontinuerlig mätning av fuktkvot i skogsmarkens ytbränsle



Metodutveckling av teknik för kontinuerlig mätning av fuktkvot i skogsmarkens ytbränsla

Emil Hallberg (RISE), Johan Sjöström (RISE) & Anders Granström (SLU).

RISE Research institutes of Sweden, Borås
SLU – Skogens ekologi och skötsel, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

Foto omslag: Johan Sjöström
Bilden visar en fuktsensor placerad i mossans övre skikt under mätningar i labbmiljö.

Publ nr: MSB1613 - juli 2020
ISBN: 978-91-7927-054-4

Abstract

Development of a measuring technique for continuous monitoring of moisture content in the fine fuel of the forest floor

Reliable measurements of moisture content in fine fuel and lower duff in forests are necessary for developing and validating forest fire danger models. Often this is done through manual sampling and gravimetric testing, which is destructive and very time consuming and therefore limits the sampling frequency. A technical solution for continuous measuring and logging of the moisture content would overcome these problems. This study assesses different techniques to log fuel moisture content, using parallel destructive testing for calibration

Our results suggest that measurements of the fine fuel moisture content (in this study represented by a moss layer with embedded litter) require a small sensor and we recommend a resistive gauge which probes the resistance of a reference material as a proxy for the moisture content of the surrounding moss/litter layer. This can be practically achieved by a small but robust sensor with electrode pins embedded in a reference material or with a reference material bridging between the poles of the sensor. It is recommended that the resistive measurements are conducted with an alternating polarity between the measurements to reduce corrosion on the electrodes. For thin low-density reference materials no substantial hysteresis was noticed, which minimises the number of calibration measurements needed.

As an alternative we suggest the development of a capacitive parallel plate sensor with a reference dielectricum of moss. However, this method has not been developed enough in this study and would need further development.

Probing the fuel moisture content of the lower duff (humus) does not require a reference material; instead it can be measured directly in the humus because it is typically more homogenous and always has a higher density than the fine fuels of the moss/litter layer, and usually a higher moisture content. Both resistive sensors and a commercially available sensor (Watermark 200SS) proved suitable for measuring the moisture content of humus.

Key words: Forest fires; fuel moisture content; logging; sensors; risk models

Innehåll

Innehåll.....	2
Sammanfattning	3
1 Bakgrund	4
1.1 Målsättning.....	5
2 Teoretisk bakgrund.....	6
2.1 Gravimetrisk- och volumetrisk fuktbas	6
2.2 Vattenpotential	6
2.3 Dielektrisk permittivitet	7
2.4 Elektrisk konduktivitet	8
3 Sensorer.....	9
3.1 Kapacitansmätare	9
3.2 Resistanssensor i Ciporex	10
3.3 Resistanssensor i Wettex	11
3.4 Watermark 200SS	11
3.5 DHT-11 Relativ luftfuktighet.....	12
4 Mätningar	13
4.1 Referensmätningar för olika sensorer	13
4.1.1 Resistanssensorer.....	13
4.1.2 Watermark SS200	14
4.1.3 Kapacitansmätare.....	15
4.2 Metodförsök med sensorer i mossblock.....	16
4.3 Uttorkningsserie 1 med sensorer i mossblock	17
4.4 Uttorkningsserie 2 med sensorer i mossblock.....	18
4.5 Uttorkningsserie 3 med sensorer i mossblock.....	19
4.6 Uttorkningsserie 4 med sensorer i mossblock.....	20
4.7 Uttorkningsserie 5 med sensorer i mossblock.....	21
4.8 Uttorkningsserie med sensorer i humus	22
4.9 Fältförsök.....	23
5 Resultat.....	24
5.1 Uttorkningsserie 1.....	25
5.2 Uttorkningsserie 2	26
5.3 Uttorkningsserie 3	27
5.4 Uttorkningsserie 4	27
5.5 Uttorkningsserie 5	28
5.6 Uttorkningsserie 6 - humus.....	29
5.7 Fältförsök.....	31
6 Slutsats och diskussion	32

Sammanfattning

För att kunna konstruera och validera brandrisksystem krävs täta mätningar över tiden av finbränslets fuktkvot. Gravimetriska mätningar är destruktiva och resurskrävande varför det finns behov av enkla mätsystem för fuktkvot. Denna studie utvärderar några olika tekniker för att kontinuerligt mäta och logga fuktkvoten i främst mossa/förnager. Kalibrering har gjorts via parallella gravimetriska provtagningar.

Resultaten visar att mätning av finbränslets fuktkvot kräver att sensorn är liten och vi rekommenderar en resistiv sensor där resistansen hos ett referensmaterial mäts som en proxy för den kringliggande mossans fukttinnehåll. Detta kan göras genom en liten men robust sensor med ledpinnar inbäddade i referensmaterialet, eller med referensmaterialet som en brygga mellan sensorns poler. Vi rekommenderar att resistiva mätningar görs med växelvis polaritet mellan mätningar, för att minska korrosionen vid polerna. För små sensorer med referensmaterial av låg densitet syns ingen tydlig hysteres, vilket minskar behovet av många kalibreringspunkter.

Som ett alternativ föreslås kapacitiva mätningar mellan två plattor fyllda med mossa. Referensmaterialet skulle då komma så nära det verkliga bränslet som möjligt. Metoden är dock inte tillräckligt utvecklad i denna studie och behöver utprovas vidare.

Mätningar av humuslagrets fuktkvot kräver däremot inget referensmaterial utan fukten kan mätas direkt, eftersom humuslagret vanligen är fuktigare och alltid har en högre densitet samt är mer homogent än mossa/förnaskiktet. Både resistiva sensorer och en kommersiell sensor (Watermark 200SS) fungerar väl för loggande av humusens fukttinnehåll.

1 Bakgrund

Brandspridning i skogsmark sker nästan uteslutande i finbränslet på marken. Brandens intensitet, spridningshastighet och till vilket djup bränslet konsumeras beror på en rad faktorer såsom vindhastighet, bränslets struktur samt markens lutning. Den viktigaste faktorn är dock bränslets fuktkvot, alltså bränslets vatteninnehåll uttryckt som andel av torrvikten hos detsamma. För de vanligaste typerna av markbränsle är gränsen för fuktkvoten under vilken en brand kan sprida sig omkring 20 - 25 %.

I Sverige prognosticeras brandrisk i skogsmark över hela Sverige med hjälp av en kanadensisk modell för brandrisk i slutna barrskog¹. Dagligen levereras en uppsättning index som beskriver olika aspekter på brandbeteende, vilka till stor del baseras på modelleringar av fuktkvoten i skilda bränsleskikt. Applicerat på svenska förhållanden ger modellen en bra indikation på brandrisken men de faktiska förhållanden som råder skiljer sig kraftigt från de som modellen är framtagen för². Den stora variationen som vanligen sker över dygnet modelleras inte heller väl av risksystemet³. Ett system med tätare uppdatering av riksnivåer kräver att svenska förhållanden studeras mer ingående, för att validera modellen eller en anpassad variant av den.

Studier av fuktkvot i förnan kräver mycket tid då fuktkvot oftast bestäms genom förstörande provtagning av bränslet i fält och vägning före och efter torkning i ugn. Ett loggande system som kontinuerligt mäter fuktkvoten i fält över en längre tid skulle ge kostnadseffektiv datainsamling för modellutveckling och validering. Problemet är att fuktkvot i sig är svår att mäta i luckra material eftersom loggande mätningar i praktiken alltid använder vattnets specifika elektriska egenskaper för att mäta vattenmängden (alltså vattenmängd per volymsenhet) i den volym av kringliggande bränsle som påverkar sensorn. Dessutom är kommersiellt tillgängliga sensorer anpassade att mäta fukt i tätare system än finbränsle, exempelvis jordlager⁴ eller sand⁵. Eftersom finbränslet (mossa/förna) har så mycket lägre densitet än exempelvis jord kommer den absoluta vattenmängden att vara mycket låg och kravet på sensorns känslighet blir därmed högre. Ett problem är vidare att det inte är fuktmängden per volymsenhet i bränslebädden som är relevant för brandbeteendet utan fuktmängden per viktenhet och att densiteten i ytbränslet är mycket variabel.

De sensorer som finns på marknaden är exempelvis Time-Domain-Reflectometry (TDR) för vilka direkt volymbaserat fukttinnehåll i flera olika material, inklusive organiska markskikt, kan mätas⁵. För jordar används också konduktivitetmätare⁶, kapacitans- och

¹ Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa: Canadian Forestry Service

² Granström, A. Skogsbrand – Brandbeteende och tolkning av brandriskindex. (Statens Räddningsverk).

³ Sjöström, J., Vermina Plathner, F., & Granström, A. (2019). Riskmodell för vegetationsbränder utanför normal brandsäsong. RISE Rapport 2019:97. ISBN: 978-91-89049-27-7. Borås: RISE Research institutes of Sweden.

⁴ IAEA (2008) Field Estimation of Soil Water Content. A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology, IAEA-TCS-30. ISSN 1018-5518

⁵ Persson, M. (2002) Evaluating the linear dielectric constant-electrical conductivity model using time-domain reflectometry, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47(2) 269-277.

⁶ Hillhorst, M. A. (2000) A Pore Water Conductivity Sensor, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1922-1925.

induktansmätare⁷, neutronprober⁸ samt galvaniska element⁹. Dessa sensorer mäter ofta fukten i olika skikt ner till någon meters djup och ibland med en upplösning på omkring 10 cm. Alltså, alldeles för stora volymer för de relativt tunna ytliga bränsleskikt som är av störst intresse när det gäller brandriskvärdering.

Humuslagrets fuktkvot är också relevant för brandriskvärdering eftersom den avgör bland annat omfattningen av glödbland och här finns portabla mätare för provtagning och manuell mätning av fuktkvot, utan behov att torka bränslet, som utnyttjar bland annat TDR¹⁰. Liknande system har nyligen även använts för finbränsle i gräslandskap¹¹ men detta system är också förstörande och kan inte logga kontinuerligt. Loggande system av fukt i relation till skogsbränder har använt TDR-prober i studier på bränd och obränd mark med en upplösning på 6 cm för fältexperiment i Alaska¹². Den mest finupplösta studien som vi hittat är på bränsleskikt i halvt nedbrutet tillstånd (strax under mossa/förnaskiktet) och för djupare skikt (humus och mineraljord)¹³. Dessa mätningar använde sig av parallella förstörande provningar för kalibrering tillsammans med ett loggande system och en s.k. Theta Probe¹⁴ vilket är en impedansmätare för att få volumetriskt vatteninnehåll i materialet.

Den här studien syftar till att hitta ett system för att göra liknande mätningar i det mycket lätta finbränslet som utgör det översta delen av mossa/förna-skiktet, som är typisk för svensk skogsmark. Studien är finansierad av Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB) och utförd vid RISE Research institute of Sweden och Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU)

1.1 Målsättning

Målet med studien är att utveckla och utvärdera teknik för att i fältförsök logga fuktkvoter i mossor och humus under en brandsäsong. Tekniken kan omfatta en kontinuerlig mätning som kompletteras med kalibrering bestående av ett antal gravimetriska, förstörande referensprovtagningar under säsongen samt en avslutande provning vid exakt den volym som påverkar den mätande sensorn. Vi har försökt hitta och/eller tillverka sensorer som kan ge en utsignal även om materialet är ”bränn-torr”, utvärdera sensorernas prestanda, robusthet samt eventuell förekommande hysteres. Studien ska ta fram kostnadseffektiva förslag för framtida fältförsök.

⁷ Bircher, A. *et al.* (2016) Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 5, 109–125.

⁸ Hodnet, M. G. (1986) The Neutron Probe for Soil Moisture Measurement, *Advanced Agricultural Instrumentation*, 148-192

⁹ Gaikwad P. *et al.* (2015) Galvanic Cell Type Sensor for Soil Moisture Analysis, *Anal. Chem.* 87, 7439–7445.

¹⁰ Robichaud, P. R. (2004) Measuring duff moisture content in the field using a portable meter sensitive to dielectric permittivity, *International Journal of Wildland Fire* 13, 343–353.

¹¹ McGranahan, D. A. (2019) A Device for Instantaneously Estimating Duff Moisture Content Is Also Effective for Grassland Fuels, *Fire*, 2, 12.

¹² Bourgeau-Chave, L. L. (2010) Development of calibration algorithms for selected water content reflectometry probes for burned and non-burned organic soils of Alaska, *International Journal of Wildland Fire* 19, 961–975.

¹³ Keith, D. M., Johnson, E. A., Valeo, C. (2010) Moisture cycles of the forest floor organic layer (F and H layers) during drying, *WATER RESOURCES RESEARCH*, 46, W07529.

¹⁴ <https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/ML3-user-manual-version-2.1.pdf> (besökt 2019-12-17).

2 Teoretisk bakgrund

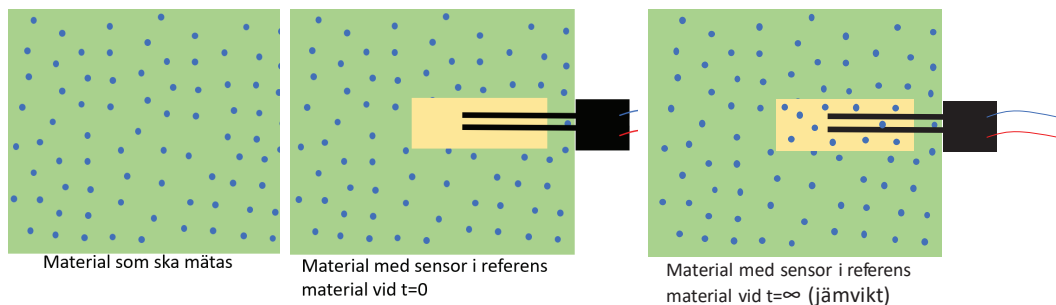
2.1 Gravimetrisk- och volumetrisk fuktbas

Mängden fukt kan uttryckas i "gravimetrisk" eller i "volumetrisk" bas. Fuktkvot (FK) betecknar fukttinnehåll på gravimetrisk bas och beskriver vattenmassan per torrviktenhet, alltså $FK = \frac{m_{fuktig} - m_{torr}}{m_{torr}}$, där *fuktig* och *torr* representerar fuktigt respektive torrt bränsle. Fuktkvoten fås genom att torka materialet i 105 °C enligt ISO 8190:1992 och är en destruktiv metod.

Volymfuktighet är volymen vatten per volymenhet torrt material och beräknas $VF = \frac{V_{vatten}}{V_{tot}}$ som kan skrivas $VF = \frac{m_{vatten}}{\rho_{vatten}} / \frac{m_{torr}}{\rho_{torr}} = \frac{FK * \rho_{torr}}{\rho_{vatten}}$. Volymfuktighet går att mäta in-situ på flera sätt. Sensorer som mäter volymfuktighet utnyttjar ofta den höga dielektriska permittiviteten hos vatten; och därmed att olika mediers elektriska egenskaper varierar med deras vatteninnehåll.

För att beräkna gravimetrisk fuktkvot behövs information om materialets vikt i torrt och fuktigt tillstånd eller information om volymfuktigheten samt densiteten på det torra materialet. Problem uppstår när densiteten varierar som det gör i jord och i ännu högre utsträckning i växtlighet såsom mossor. För många mätmetoder har man därför upprättat referenstabeller för olika material, för att översätta utsignal till fuktkvot.

För att underlätta mätningar där referensmätningar används så kan mätningar ske på ett känt sensormaterial som alltid har samma materialegenskaper, med känd volym och densitet. Med sensorn inbäddad i detta material kan exakta värden på vattenpotentialen erhållas. Vattenpotentialen kommer att vara i jämvikt, dvs vattenpotentialen i sensormaterialet kommer vara samma som i materialet där fuktkvot ska mätas (Figur 1).



Figur 1. Vattendiffusion till sensor. Det gröna blocket är material som ska mätas, de blåa prickarna representerar vatten, det gula blocket är sensormaterialet med inbäddad sensor.

Denna metod, med ett sensormaterial som med hjälp av diffusion får samma vattenpotential som omgivningen är fokus i denna studie.

2.2 Vattenpotential

Enligt termodynamikens andra lag så kommer sammankopplade system med olika energinivåer att röra sig mot jämvikt. Diffusion sker från hög till låg vattenpotential.

Vattenpotentialen består av 4 komponenter, om γ_t är den totala vattenpotentialen så består den av:

$$\gamma_t = \gamma_p + \gamma_g + \gamma_o + \gamma_m$$

Där γ_p är beroende på tryck, γ_g är beroende av gravitationen, γ_o är den osmotiska potentialen och γ_m kommer ifrån matrisen eller materialets struktur. Notera att samma vattenpotential inte nödvändigtvis innebär samma fuktkvot i referensmaterialet som i omliggande bränsle, annat än om deras materialegenskaper är identiska.

Vattenpotentialen mäts med en så kallad vattenpotentiometer, vilket är en sensor som anger potentialen som ett tryck (ofta används kPa som enhet). När en vattenpotentiometer kommer i kontakt med fuktig mark så driver energiskillnaden mellan sensor och mark mot jämvikt. När jämvikt nås är vattenpotentialen i marken samma som i sensorn och med referenstabeller så omvandlas vattenpotential till fuktkvot. För att få så bra värden som möjligt vill man ha ett sensormaterial där vatten lätt kan diffundera. Vattenpotentialspannet som en sensor kan användas i beror på, porstorleken, vilken avgör inom vilket tryckområde som diffusion sker, inom rimliga tidsramar. Vattenpotentiometrarna mäter inte vattenpotentialen direkt utan oftast någon elektrisk egenskap. Oftast är det den dielektriska permittiviteten eller den elektriska resistansen. Vattenpotentialen kan också skattas via tryckskillnaden, med en såkallad tensiometer.

Vattenpotential i luft och den relativa fuktigheten har ett samband som är beroende av temperatur och skrivs:

$$\gamma_t = \frac{RT}{M} \ln(rh)$$

där R är gaskonstanten, T är temperaturen, M är molekylmassan av vatten och rh är den relativa fuktigheten.

2.3 Dielektrisk permittivitet

Dielektrisk permittivitet, ϵ , är den fysikaliska storhet som beskriver hur ett elektriskt fält påverkar och påverkas av ett elektriskt isolerande material. Det faktum att luft har permittiviteten 1 medan vatten har 80^{15} gör att det är lätt att mäta skillnad i fukt då bulkvattens permittivitet är en funktion av vattnets permittivitet. Ett sätt att mäta permittivitet på är att mäta kapacitansen (C), eftersom den hos en homogen kondensator är proportionell mot permittivitet av det dielektriska mediet. För två parallella plattor är $C = \epsilon \frac{A}{d}$ där ϵ är permittiviteten, A är arean av plattorna och d är distansen mellan plattorna.

¹⁵ Dessa värden gäller den reella delen av permittiviteten, som beskriver ett materials förmåga till polarisation. Den imaginära delen beskriver energiförluster av ett oscillerande elektriskt fält.

2.4 Elektrisk konduktivitet

Den elektriska konduktiviteten är, precis som den dielektriska permittiviteten, starkt påverkad av mängden vatten i ett material. Utsignalen från konduktivitetmätare är spänning (Volt) vilket påverkas av resistansen i bulkmaterialet som i stort är en funktion av det så kallade porvattnet, dvs det vattnet som finns i bulkmaterialets håligheter. I torrt material finns det inget vatten som tillåter elektronförflyttning vilket i teorin innebär att den elektriska konduktiviteten är marginell för torrt biologiskt material vars torra matris brukar utgöra mycket dåliga ledare.

Oftast ligger en konstant likspänning över sensorn för konduktivitetmätare vilket underlättar elektrolys av ledpinnarna. Detta medför att de rostar väldigt fort vilket kan undvikas genom att sänka samplingstiden eller att istället använda oscillerande växelström. Med kortare samplingstid tar det mycket längre tid för sensorn att rosta och med växelspanning så polariseras inte sensorn eller materialet mellan ledpinnarna.

3 Sensorer

Det system som valts för loggning är en mikrokontroller betecknad Arduino Uno med en ATmega328-processor. Arduino är baserat på öppen källkod med både digitala och analoga ingångar.

De krav som sensorerna har är att de ska vara energisnåla då de ska kunna mäta över en lång tid. De ska vara underhållsfria för att de ska kunna placeras varsomhelst. De ska klara av att vara ute i en lång tid, dvs de ska inte påverkas av korrosion och fukt. Dessa krav tar bort tensiometrarna som, om de torkar ut, måste fyllas på med vätska igen. Det tar även bort kommersiella konduktivitetmätare som är gjorda av icke rostbeständigt material.

Fyra olika typer av sensorer testas

- Elektrisk konduktivitetmätare med rostbeständiga ledpinnar och varierande referensmaterial
- Kapacitansmätare
- Watermark 200SS resistansmätare¹⁶
- En mätare för relativ luftfuktighet och temperatur.

För samtliga sensorer används ett sensormaterial som drivs till vattenpotential-jämvikt och via en referenstabell ger ett mått på fuktkvoten.

Sensorerna ger analoga signaler och eftersom Arduino har en 10-bitars analog-till-digital konverterare kommer värdena vara mellan 0–1023.

3.1 Kapacitansmätare

De kapacitansmätarna som används för testerna är 'Seedstudios Grove Capacitive moisture sensor' (Figur 2).



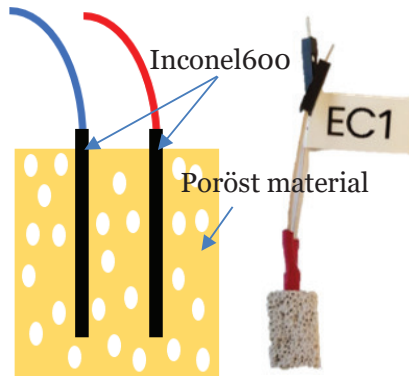
Figur 2. Seedstudios Kapacitansmätare. Sensorns längd/bredd är 92/23 mm. Tjockleken på själva sensorn är ca 2 mm.

Kapacitanssensorn drivs med 5 volt, har ett inbyggt kretskort med en signalförstärkare och är anpassat för Arduino. Mätelementet är inbyggt och skyddat i plast vilket minskar risken för korrosion. För att förstärka signalen vid låga fuktkvoter så placeras en Wettexbit på sensorns framsida. Wettexbiten suger åt sig vatten till dess att den är i jämvikt med omgivningen. Se Appendix figur 3 för bilder på ombyggda kapacitansmätare.

¹⁶ <https://www.irrometer.com/sensors.html#wm>

3.2 Resistanssensor i Ciporex

Sensorn består av ett ciporexblock om 1,5 x 1,5 x 1 cm. Ciporex är en vanlig beständig lättviktsbetong. Som ledare används pinnar av Inconel600 mellan vilka resistansen mäts. Avstånden mellan Inconel600-ledarna är 5 millimeter (Figur 3).



Figur 3. Vänster: Skiss på tvärsnitt på en resistanssensor. Höger: Resistanssensor 1 med omliggande ciporex.

För att minska risken att mätarnas vikt och volym skulle påverka omgivningen så tillverkades så små mätare som möjligt. Eftersom porositeten och porernas storlek i ciporexblocken inte är kontrollerade så måste varje enskild mätare kalibreras för sig. Detta görs dels för att bekräfta att fukt verkligen kan tränga in mellan ledpinnarna, samt att ta fram den individuella sensorns samband mellan fukt och resistans. Enligt Hilhorst¹⁷ så finns det ett linjärt samband mellan fukt, eller i detta fall vatten i materialets porer, och elektrisk konduktivitet. Detta stämmer med de tester vi gjorde på EC-sensorerna i ciporexblocken. När 3 stycken sensorer kalibrerades mot en känd fuktkvot fick vi ett R^2 -snitt på 0.99, se Appendix Figur 1. Sensorerna betar sig likartat men med en liten bias relativt varandra.

En anledning till att signalen varierar för de tre EC-sensorerna i Appendix Figur 1 är att den totala sträckan som vattnet knyter ihop ledpinnarna med varierar något. Därför måste varje EC sensor kalibreras för sig. En relativt stor felkälla för resistanssensorerna är referensresistorn som används. Om skillnaden mellan referensresistorn och resistansen i sensorn är stor så ökar osäkerheten. För att undvika detta mäts signalen istället i spänning. En annan felkälla är att signalen påverkas i varierande grad om sensorn flyttas under mätning. Läggs en kraft på ledpinnarna så att de trycks in i ciporexblocket så ökar signalen markant och när kraften tas bort är det inte säkert att signalen sjunker tillbaka till utgångsvärdet. Detta borde gå att åtgärda genom att göra en robust sensordesign så att ledpinnarna fixeras i ciporexblocket.

¹⁷ Hilhorst, M. A.. (2000). A Pore Water Conductivity Sensor. Soil Science Society of America Journal 64 (6), p. 1922-1925. 64. 10.2136/sssaj2000.6461922x.

3.3 Resistanssensor i Wettex

Wettex är ett cellulosabaserat material som har god upptagningsförmåga av vatten och låg densitet, vilket gör att det krävs lite vatten för att ändra fuktkvoten. Tester visade att både resistanssensorn och framförallt kapacitanssensorn ger mycket högre utslag vid låga fuktkvoter jämfört med ciporex. En Wettexbit med 2 x 1.5 x 0.2 cm, med en vikt 0.1 gram användes för att omsluta ledpinnarna (Figur 4).



Figur 4. Resistansmätare med Wettex som referensmaterial. Vänster: Med ledpinnar. Höger: Med Wettexstrimla

Ett problem med Wettex-sensorerna är att när materialet suger åt sig vatten så sväller det och dess egenskaper ändras. När Wettex sväller upp och blir mjukt så påverkas avståndet mellan ledpinnarna som även kan röra sig och i värsta fall lossna. Detta kan gå att åtgärda i sensor-designen genom att använda en tunn Wettexstrimla med känd längd, vilken kopplas samman med plus- och minuspoolen, istället för att ha ledpinnarna i Wettex. På så sätt bör materialets goda ledningsförmåga vid låga fuktkvoter kunna utnyttjas utan att signalen uppvisar för mycket brus. Prototyper till båda Wettex-varianterna visas i Figur 4.

3.4 Watermark 200SS

Watermark 200ss är en kommersiell resistanssensor som används för att mäta vattenpotentialen i jord. När vattenpotentialen ändras så ändras även resistansen i sensorn. Den är designad för att vara underhållsfri och har rostfria ledpinnar omgivna av en gipsliknande matris. Kostnaden för denna sensor är 46.35 EUR/sensor.



Figur 5. Watermark 200 SS. Storleken på sensorn är längd/diameter 83/22 mm.

3.5 DHT-11 Relativ luftfuktighet

DHT11 är en vanlig sensor som används för att mäta luftfuktighet (rh) och temperatur. Den består av en kapacitiv fuksensor och en termistor. DHT-11 kan mäta en relativ luftfuktighet om 0-90% med en säkerhet på 5% och kan mäta temperaturer mellan 0-50 °C med 2 °C säkerhet. Det finns en nyare generation som kallas DHT-22 som har högre upplösning, säkerhet och kan mäta både temperatur och rh över ett större spann.



Figur 6. DHT11 RH-T-sensor. Storleken på sensorn är (längd x bredd x höjd) 16 x 13 x 6 mm.

I dessa tester används sensorn som antingen inbäddad i mossan eller liggandes på mossan med en uppochnervänd plastbägare (100 ml) ovanför sig.

4 Mätningar

Fyra typer av tester genomfördes. (i) Referensmätningar, där sensorernas utsignal studerades mot en känd fuktkvot på referensmaterialet sensorerna använder sig av; (ii) Proof of concept, där sensorerna stoppades i mossa för att se om det gick att få ut vettiga signaler från systemet; (iii) Labbtester med stora block med mossa som torkades och återfuktades; (iv) Fältförsök, där sensorerna placerades ut i skogsförna.

4.1 Referensmätningar för olika sensorer

För att utvärdera sensormaterialens beteende vid olika fuktkvoter (och därmed olika vattenpotential) så torkades sensormaterialet i 105 °C i 2 timmar och vägdes. Därefter tillsattes vatten till olika kända fuktkvot för sensormaterialet mellan $FK = 0$ och 100% vilket ger tabulerade data för signal-fuktkvot för varje sensor.

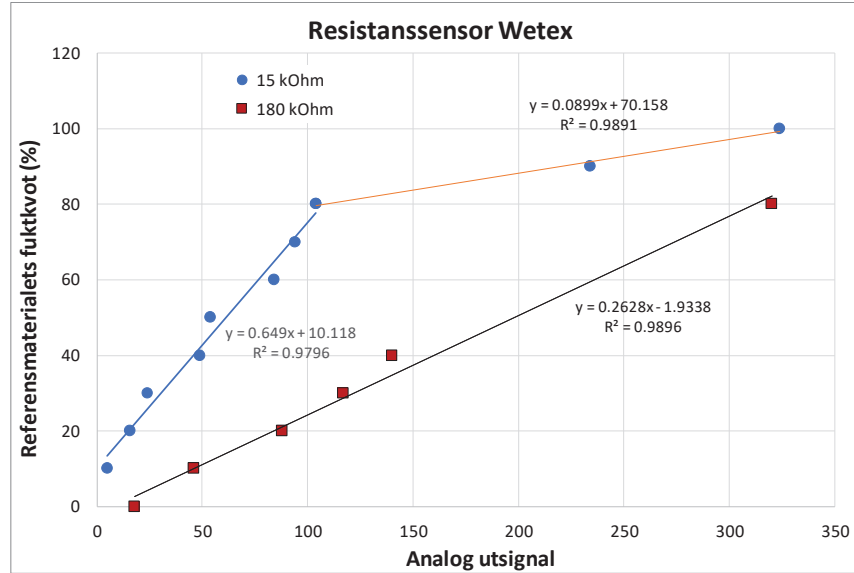
4.1.1 Resistanssensorer

De sensorer som användes, utöver de som nämns i kapitel 4.2, var Inconel ledpinnar i Wettex respektive i Ciporex (stavas även *Siporex* i vissa sammanhang). Risken med resistanssensorer är att om det sker korrosion så kan mätvärdena driva. De referensresistorerna som användes hade resistansen 15 och 180 k Ω .

4.1.1.1 Wettex

Wettexsensorn är liten och väger bara 0.08 gram, vilket ger 8 mg vatten per mätpunkt (10 procentenhets fuktkvot). Den lilla mängden vatten är svår att få exakt och kan ge upphov till viss spridning i resultatet. Resistansmätarens referensmätning i Wettex med 15 k Ω samt 180 k Ω visas i Figur 7.

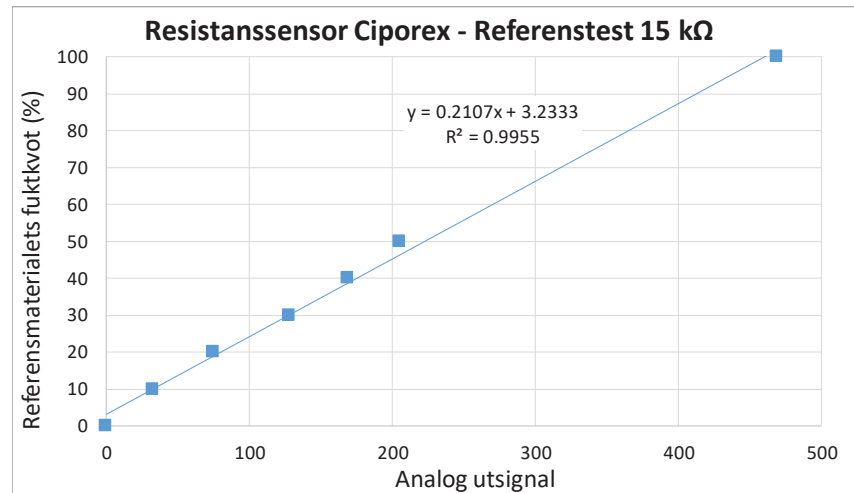
Resistanssensorerna med Wettex om 15 k Ω kan delas in i två regioner. Under en fuktkvot på 80% var sambandet mellan utsignal och fuktkvot linjärt, med en viss lutning. Över 80% fuktkvot så ändrades lutningen på linjen kraftigt (Figur 7). Samma figur, med en trendlinje i form av en potenslag, finns i Appendix figur 2. Wettexsensorn med ett referensmotstånd på 180 k Ω gav också ett linjärt samband mellan fuktkvot och utsignal upp till en fuktkvot av 80%. Det högre referensmotståndet gav en högre känslighet vid låga fuktkvoter.



Figur 7. Referenstester: Resistanssensor Wettex. Sambandet mellan fuktkvot och utsignal, med två olika referensmotstånd, 15 samt 180 kΩ.

Ciporex

Ciporexblocket som ledpinnarna satt i var litet, ca 1 x 0.5 x 2 cm, och vägde 0.82 gram. Före varje mätning droppades 0.08 gram vatten på ciporexblocket som stoppas i en tät plastpåse för att stabiliseras i 2 timmar innan mätningen gjordes. Utsignalen hade ett linjärt samband med fuktkvoten för Ciporex med 15 kΩ (Figur 8).

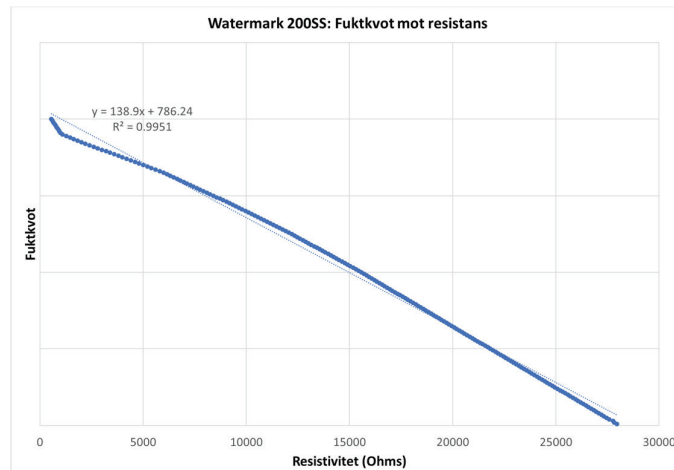


Figur 8. Referensmätningar för Ciporex med 15 kΩ motstånd. Sambandet mellan referensmaterialiets fuktkvot och utsignalen. Detta är ett av resultaten i Appendix Figur 1.

4.1.2 Watermark SS200

Matrisvikten på Watermark SS200-sensorn är okänd, men tabulerade data ifrån tillverkarens hemsida visar på en linjär minskning av resistansen med ökad fuktkvot

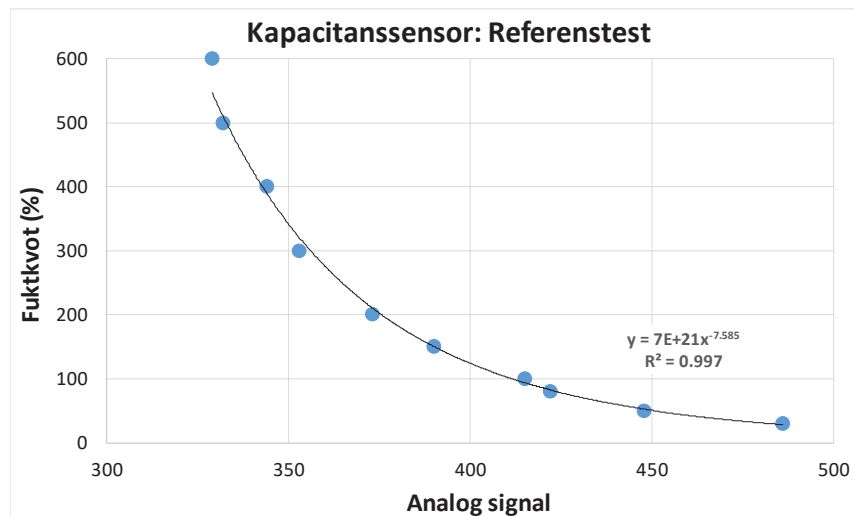
(Figur 9). Eftersom utsignalen är omvänt proportionell mot resistansen minskar utsignalen med minskad fuktkvot.



Figur 9. Resistanskurva för Watermark 200SS plottad från tabulerade data från tillverkaren¹⁸. Fuktkvoten är en relativ utsignal som sedan modifieras mot en referenstabell för olika material (olika jordar). För mer info se tillverkarens hemsida.

4.1.3 Kapacitansmätare

Enbart ciporex som referensmaterial på den kapacitiva sensorn gav lite till inget utslag vid låga fuktkvoter men med Wettex så kunde en skillnad i utsignalen noteras även vid fuktkvoter under 50 % (Figur 10).



Figur 10. Kapacitanssensorns respons med sensorn intill ett referensmaterial av Wettex (se Appendix figur 2), 600 – 30 % fuktkvot.

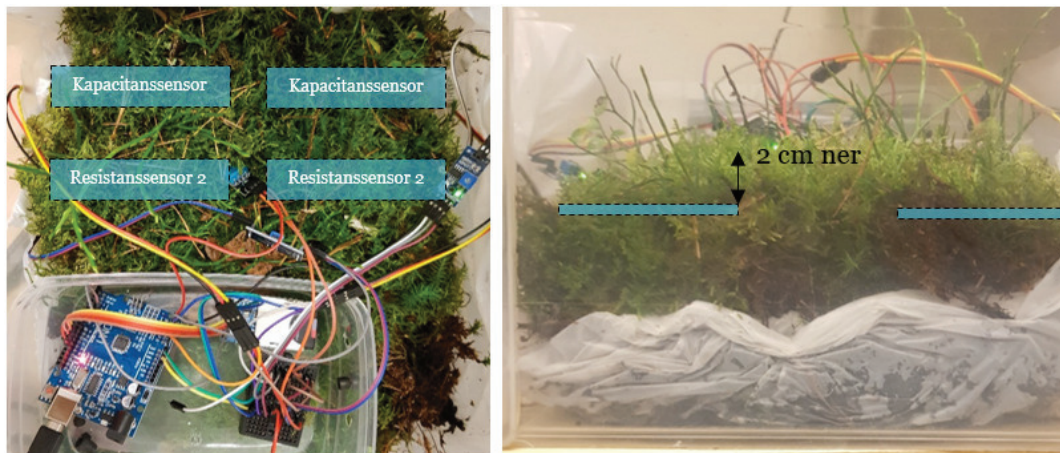
¹⁸ <https://www.irrometer.com/200ss.html> (besökt 2019-12-17)

4.2 Metodförsök med sensorer i mossblock

Metodförsöket var ett proof of concept på de utvalda sensorerna. Sensorerna var:

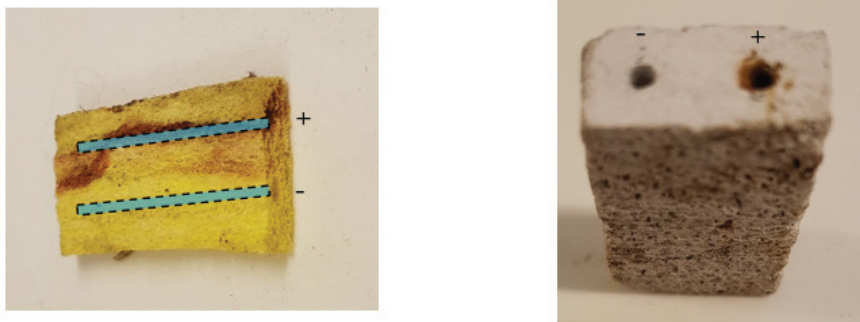
- EC sensorer med rostfritt stål som ledpinnar i Wettex och i större ciporexblock
- Kapacitanssensorer i Wettex och i Ciporexblock
- Temperatur- och relativ fuktighet-sensor

Ett block mossa på 28 x 36 x 8 cm, inklusive mossa och humuslager, omgavs av en plastpåse längs sidorna och placerades i en plastlåda för att minska torkningen i horisontell riktning. Mossan hade initialt en fuktkvot på ca 150 % i de översta två centimetrarna och pågick i omgångar under två veckors tid då mossan torkat till ca 40 %. Sensorerna placerades 2 centimeter ner i mossan (Figur 11).



Figur 11. Uppsättning test 1

Metodförsöket visade att det inte gick att använda likström över längre tid i resistanssensorerna. Både ciporex- och Wettexsensorn korroderade (Figur 12). Korrosion skapar ett tunt oxidskikt på ledpinnarna vilket ökar resistansen. Utöver problemet med korrosion så polariseras materialet om det går en likström igenom sensorn, vilket minskar resistansen. Med växelspanning löstes detta problem utan att ha någon inverkan på signalen i sig.



Figur 12. Spår av korrosion i Wettexmaterialet (vänster) och ciporexblock (höger).

4.3 Uttorkningsserie 1 med sensorer i mossblock

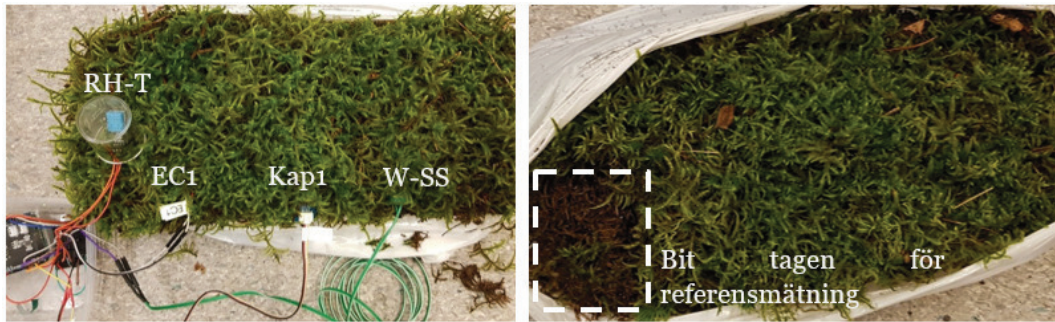
Uttorkningsserie 1 hade uppgraderade sensorer och programvara jämfört med metodförsöket. Sensorerna som användes var:

- En sensor för relativ fuktighet som placerades på mossytan med en liten skyddande bägare över sig. Benämns RH-T (Figur 14).
- Resistanssensorer med mindre ciporexblock samt Inconel600 som ledpinnar
- Watermark 200SS resistanssensor vilken har gips som omslutande matris
- Kapacitanssensor i ciporex

Mossan för test 2 togs från ett synbart homogent block som var 42 cm långt, 38 cm brett och 11 cm högt, (Figur 13). Moss- och humuslagret var ca 3-4 cm respektive 4-5 cm djupt. Under humusen fanns mineraljord. Mossblocket delades i två delar: sensorblock och referensblock. Sensorblocket användes för sensorerna (Figur 14 - Figur 15). Referensblocket användes för förstörande provning. Vid varje förstörande provning togs två prov från referensblocket. Dessa prover utgjorde mossan från dess övre gräns till ett djup på 2 cm. Båda mossblocken låg i samma rum med kontrollerad labbmiljö på 23 °C och en relativ fuktighet på 50 %. Fuktkvoten i referensmossan gick från 400 % till 34 % under provserien, som varade i 7 dagar. Vid avslut gjordes en gravimetrisk bestämning av fuktkvoten i materialet som omgav respektive sensor.

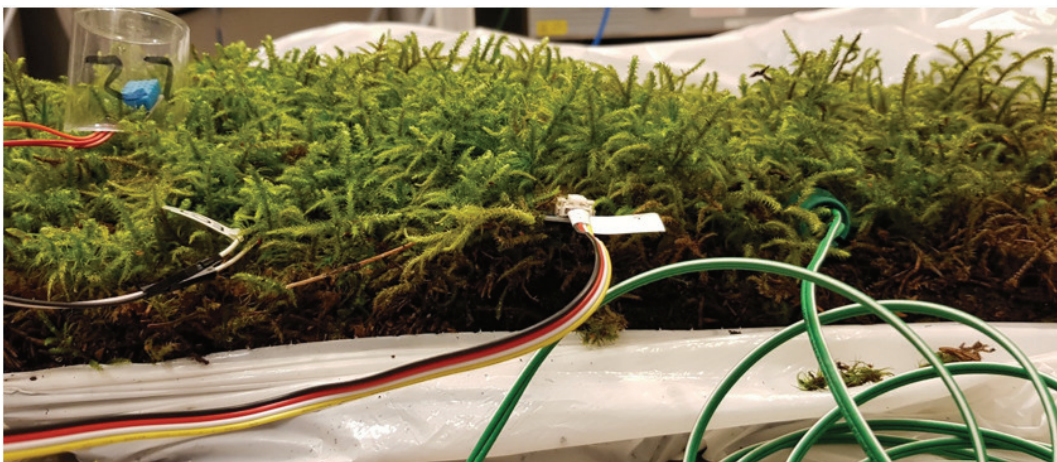


Figur 13. Mossblock 1. Vänster: Hela blocket. Höger: Blocket uppdelat i provdel och referensdel.



Figur 14. Vänster bild: Mossblock 1 med sensorer. RH-T – Temperatur och relativ fuktighetsmätare; EC1 – Resistansmätare med referensmaterial av Wettex; Kap1 – Kapacitansmätare; W-SS – Watermark SS-mätare. Högra bilden: Mossblock för förstörande referensprover.

Sensorerna placerades 2 cm ner i mossan (förutom RH-T som lades på mossan under en platskopp), ovanför humuslagret, på ett jämnt fördelat avstånd (Figur 15).



Figur 15. Sensorernas placering i mossan. Från vänster: RH-T-sensor, resistanssensor (ciporex), kapacitanssensor (ciporex), Watermark SS.

4.4 Uttorkningsserie 2 med sensorer i mossblock

Uttorkningsserie 2 hade liknande sensorer och programvara som föregående uttorkningstest men med en referensresistor på 180 k Ω för att få högre signalstyrka vid låga fuktkvoter. Sensormaterialet för resistanssensorn byttes till Wettex. För kapacitanssensorn användes Wettex men med en utanpåliggande bit av ciporex för stabilitet. Sensorerna som användes var:

- RH-T sensor med täckande bågare
- Resistanssensorer med Wettex och Inconel600 som ledpinnar
- Watermark 200SS resistanssensor med gips som omslutande matris
- Kapacitanssensor i Wettex med utanpåliggande ciporex

Innan mätningarna påbörjades fick mossblocken torka i labbmiljö vid 22 °C och en relativ luftfuktighet på 50% under 6 dagar för att kunna starta serien vid en lägre fuktkvot. Under provtagningsserien sjönk fuktkvoten från 55 till 34 %. Vid avslut gjordes en gravimetrisk bestämning av fuktkvoten i materialet som omgav respektive sensor.



Figur 16. Sensorplacering för test 3, mossblocket i uttorkningsserie 2.



Figur 17. Sensorplaceringsdjup i mossan. Mossblocket i uttorkningsserie 2

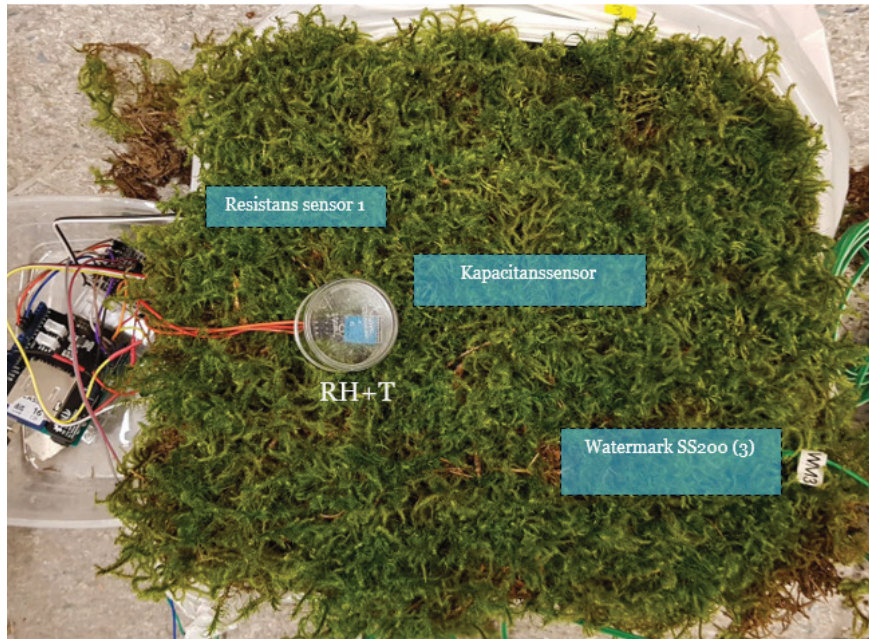
4.5 Uttorkningsserie 3 med sensorer i mossblock

Uttorkningsserie 3 hade samma uppsättning av sensorer som tidigare, förutom att referensmaterialet hos resistanssensorn (även nu med ett 180 k Ω referensresistor) var ciporex. Serien pågick parallellt med uttorkningsserie 2. Under provtagningsserien sjönk fuktkvoten från 50 till 34 %. Sensorerna som användes var:

- RH-T sensor men täckande bågare
- Resistanssensorer med ciporex och Inconel600 som ledpinnar

- Watermark 200SS resistanssensor, vilket har gips som omslutande matris
- Kapacitanssensor i Wettex med utanpåliggande ciporex

Vid avslut gjordes en gravimetrisk bestämning av fuktkvoten i materialet som omgav respektive sensor.



Figur 18. Sensorplacering Test 4, mossblock 3



Figur 19. Sensorplaceringsdjup för test 4, mossblock 3

4.6 Uttorkningsserie 4 med sensorer i mossblock

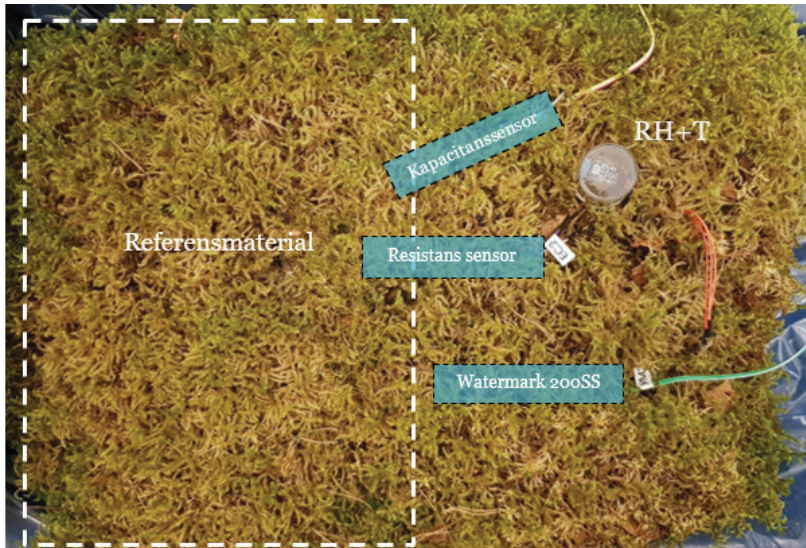
Här användes inget nytt sensormaterial utan syftet med testet var att samla in data vid fuktkvoter under 40%. Efter 3 dagar testades också sensorernas hysteres då hela blocket ställdes ut 2 timmar i duggregn (0.8 mm/h enligt SMHI) för att återfuktas, varefter det åter fick torka ut.

Sensormaterialet för resistanssensorn var ciporex. För kapacitanssensorna användes Wettex med ciporex. Sensorerna som användes var:

- RH-T sensor men täckande bägare
- Resistanssensorer med ciporex och 180 k Ω referensmotstånd
- Kapacitanssensor i Wettex med utanpåliggande ciporex
- Watermark 200 SS med 15 k Ω referensmotstånd

Till skillnad från de tidigare testerna så delades inte blocket upp i ett mätblock och ett referensblock. Istället placerades sensorerna på ena halvan av blocket och referensmätningar togs från motsatt sida (Figur 21). Mossblock 4 placerades före mätningar i en ugn vid 55 °C i 3 timmar för att få ner fuktkvoten.

Vid avslut gjordes en gravimetrisk bestämning av fuktkvoten i materialet som omgav respektive sensor.



Figur 20. Mossblocket i uttorkningsserie 4 med placerade sensorer

4.7 Uttorkningsserie 5 med sensorer i mossblock

Under serien användes inget nytt sensormaterial. Precis som vid serie 4 så var syftet med denna serie att samla in data vid fuktkvoter under 40%. Efter 3 dagar testades sensorernas hysteres genom att återfuktas utomhus (på samma sätt som serie 4), för att sedan torka inne igen.

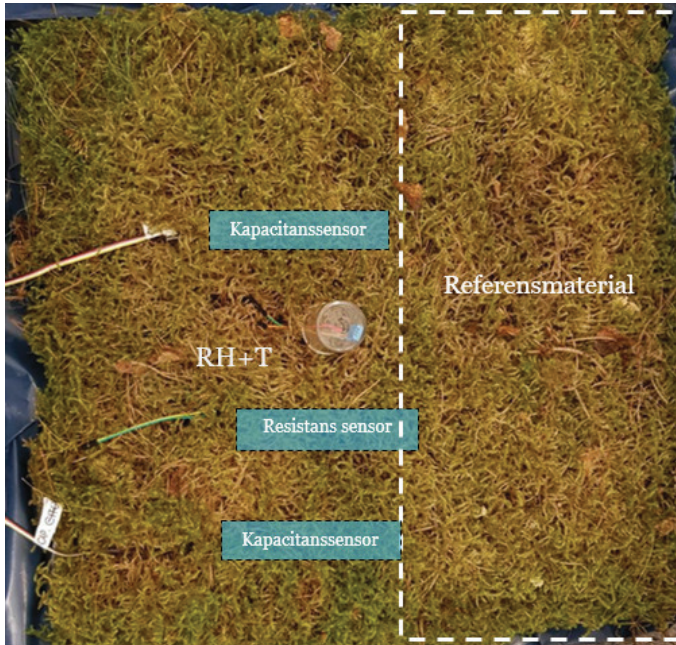
Sensormaterialet för resistanssensorn var Wettex Dock hade inte resistanssensorn några ledpinnar utan en ren Wettex-remsa var fastspänd mellan plus- och minuspol (Figur 4). För kapacitanssensorna användes Wettex som referensmaterial.

Sensorerna som användes var:

- RH-T sensor men täckande bägare

- Resistanssensor med Wettex-remsa och 180 k Ω referensmotstånd
- 2 stycken kapacitanssensorer i Wettex med utanpåliggande ciporex

Mossblocket torkades före mätningar i en ugn vid 55 °C i 3 timmar för att få ner fuktkvoten och precis som för mossblock 4 så delades inte blocket upp i ett mätblock och ett referensblock. Blocket (Figur 21) återfuktades efter 3 dagar genom att ställas ut i duggregn i 2 timmar. Vid avslut efter 6 dagar gjordes en gravimetrisk bestämning av fuktkvoten i materialet som omgav respektive sensor.



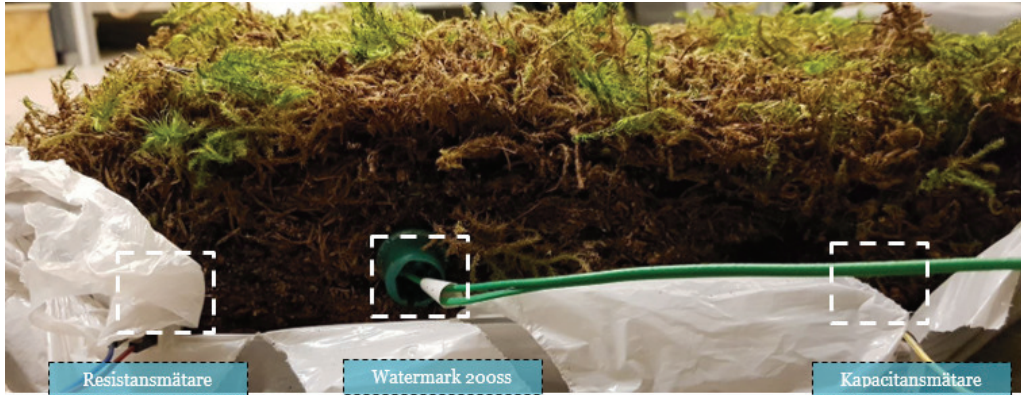
Figur 21. Mossblocket i uttorkningsserie 5 med utplacerade sensorer.

4.8 Uttorkningsserie med sensorer i humus

Humus har högre densitet och har nästan alltid högre fuktkvot än mossan och därför bör sensorerna ge bättre signaler, speciellt vad gäller kommersiella mätare som är framtagna för att mäta i relativt fuktig jord. De sensorer som användes för humustestet var:

- Resistansmätare med ledpinnar utan referensmaterial med 180 k Ω referensmotstånd.
- Watermark200SS med 15 k Ω referensmotstånd
- Kapacitanssensor utan referensmaterial

Eftersom humus har vissa egenskaper som liknar den jord som Watermark 200SS och kapacitanssensorn ursprungligen avsetts för, så användes inget referensmaterial. Resistansmätaren bestod av 2 rostfria ledpinnar med ett inbördes avstånd på 6.7 mm. För sensorplacering se Figur 22.



Figur 22. Sensorplacering i humustestet

4.9 Fältförsök

En resistanssensor med Wettexstrimla, en RH-T-sensor och en Watermark användes även i ett fältförsök under en 13-dagarsperiod. Sensorerna placerades i en sluten planterad granskog med mosstäcke, ca 15 år gammal. I mossan placerades även en parallell temperaturmätare och i luften placerades en RH-T-sensor till.

Under de 13 dagarna gjordes fem förstörande provtagningar på närliggande mosstäcke. Perioden startade under relativt fuktiga omständigheter. De första dagarna var det kraftig dimma på morgonen. Succesivt blev det torrare väder och tillslut kom nederbörd.

Sensorernas signaler korrigerades för temperaturen i mossan till en referenstemperatur på 20 °C eftersom resistansen inte bara varierar med fuktkvoten utan även med temperatur. Från de fem förstörande provningarna gjordes sedan en kalibreringskurva för fuktkvot baserad på signalen från de tre sensorerna.

5 Resultat

För varje test presenteras resultaten för sensorerna var för sig. De analoga värdena varierar för varje enskild sensor och två olika sensorer kan därför inte jämföras direkt. Inte heller kan samma sensor jämföras med sig själv om referensmotståndet förändrats. Vi har här inte räknat ut fuktkvoten i mossan baserat på sensorernas utsignal utan studerar istället variationen i sensorns utsignal (mellan extremvärdena 0 och 1023) med mossans fuktkvot. Det intressanta är alltså trenderna i utsignal och fuktkvot, samt effekten av hysteres.

Notera att kurvan för fuktkvot och utsignal inte behöver följa varandra parallellt eller proportionellt för att sensorerna ska kunna användas i fält eftersom en icke-linjär kalibreringskurva kan etableras, om man tar upprepade förstörande referensprover under hela mätperioden.

5.1 Uttorkningsserie 1

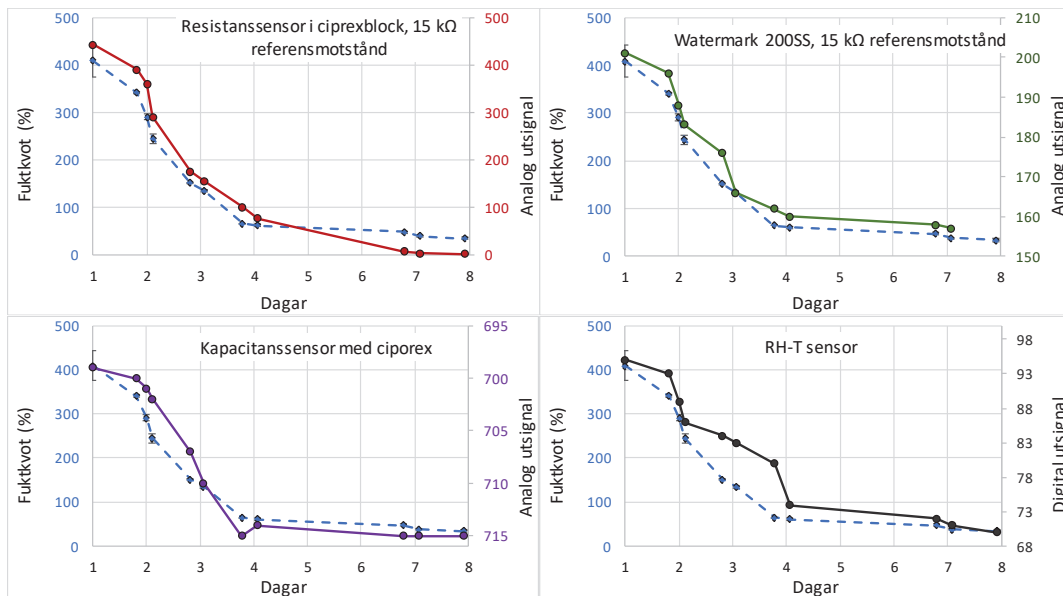
Serien varade i 7 dagar och fuktkvoten sjönk från 408 % till 65 % under de 3 första dagarna och från 65 % till 34 % under de resterande 4 dagarna (Figur 23).

Resistanssensorn i ciporexblocket varierade till synes linjärt ner till en fuktkvot om ca 60 % då den har 76 av 1023 i signalstyrka (7 %). Vid fuktkvoterna 47 % samt 34 % var utsignalen endast 7 respektive 2 (Figur 23). Detta innebär att den lägsta mätbara fuktkvoten med ett 15 k Ω motstånd är ca 30 %. Även vid en fuktkvot kring 40 % är upplösningen begränsad.

Watermark 200SS visade en tydlig nedgång parallell med sjunkande fuktkvot (Figur 23). Ett 15 k Ω referensmotstånd användes vilket ger en utsignal på 155 vid en fuktkvot på 39 %. Detta bör ge en fortsatt mätförmåga vid låga fuktkvoter.

Kapacitanssensorn i ciporex gav relativt små ändringar i utsignal även om värdet verkar följa fuktkvoten ganska linjärt (Figur 23). Den ökade ifrån 699 vid en fuktkvot på 400 % till 715 vid en fuktkvot på 60 %. En utsignal på 715 är ungefär vad kapacitanssensorn ger i torrt tillstånd.

Utsignalen från RH-sensorn varierar monotont med fuktkvoten och har mycket signal kvar att spela med för torrare material. Notera att Sensorn var placerad direkt på mossan med en plastkupol som omslöt ovan men var öppen ner mot mossan.



Figur 23. Uttorkningsserie 1. Fuktkvot från förstörande provning (blå-streckad, vänster axel) samt sensorers utsignal (höger axel) mot tid för de fyra testade sensorerna. Felmarginerna på fuktkvoten indikerar värdena från de två mätningarna vid varje tidpunkt.

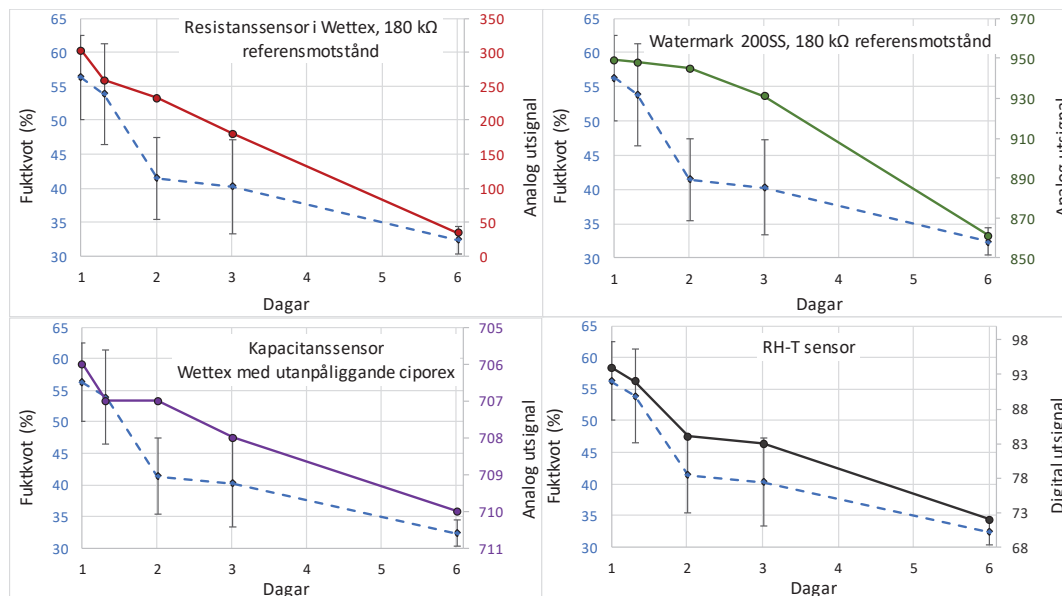
5.2 Uttorkningsserie 2

Testerna löpte över 5 dagar och fuktkvoten sjönk ifrån 55 % till 41 % de första 2 dagarna för att sen avta i hastighet de resterande 4 dagarna då fuktkvoten sjönk ifrån 41 % till 32 % (Figur 24). Notera att skillnaden mellan de två upprepningarna för fuktkvotsbestämningen är 10 – 15 procentenheter, utom för sista mätpunkten (<4 %-enheter). Resistanssensorn i Wettex, nu med 180 k Ω referensmotstånd, gav snabbast respons med mycket utrymme för att kunna sjunka i fuktkvot. Utsignalen sjönk kraftigt efter 40 % fuktkvot, från 180 till 34 i utsignal. 34 är utsignalen hos sensorn när ingen kontakt till referensmaterialet finns. För just denna sensor noterades att signalen fladdrade när Wettexmaterialet svälde upp av fukten, vilket kan tyda på att kontakten mellan ledpinnar och referensmaterialet var glapp.

Watermark 200SS i mossblock 2 sjönk ifrån 948 till 861 i signal när fuktkvoten sjönk ifrån 56 % till 32 %. Watermark 200SS hade ett stort spann per procentenhet fuktkvot (87 på 24 %-enheter fuktkvotsändring).

Kapacitanssensorn med Wettex gav bättre signal än med enbart ciporex. Signalen gick ifrån ca 706 till 710 medan fuktkvoten sjönk ifrån 55 % till 32 % (Figur 24). Utsignalerna ifrån kapacitanssensorn är stabila och inte fladdriga som resistanssensorn i detta försök.

Den relativa fuktigheten, mätt i en nedåtvänd behållare ovanför mossa, följer fuktkvoten väldigt linjärt för mossblock 2.



Figur 24. Uttorkningsserie 2. Fuktkvot från förstörande provning (blå-streckad, vänster axel) samt sensor-signal (höger axel) mot tid för de fyra testade sensorerna. Spridningsmättet på fuktkvotkurvan indikerar värdena från de två mätningarna vid varje tidpunkt.

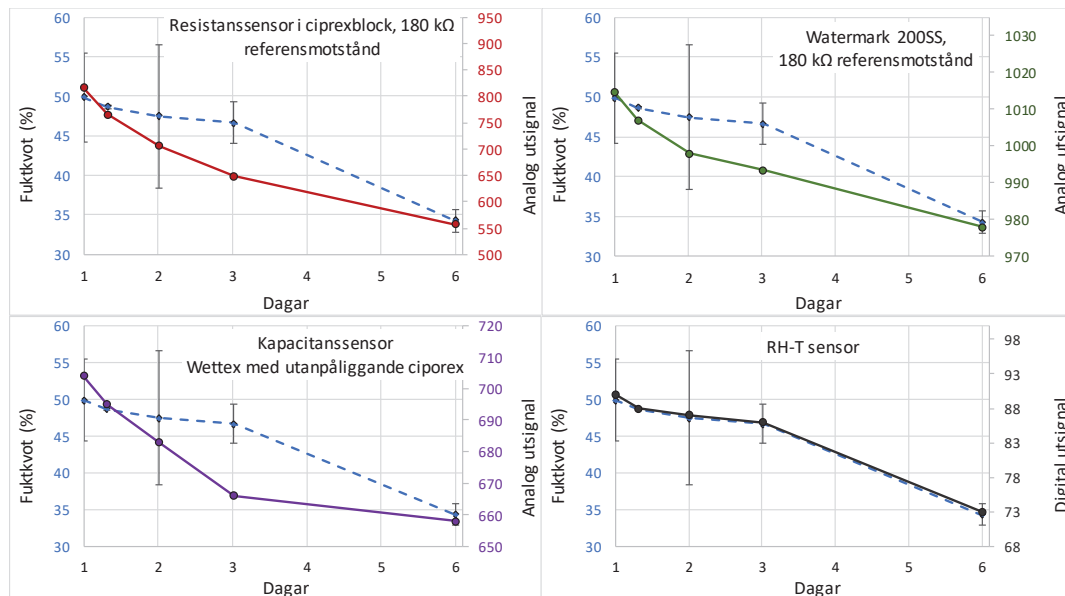
5.3 Uttorkningsserie 3

Mätningarna gjordes över 6 dagar under samma tidsperiod som test 3. Fuktkvoten sjönk ifrån 50% till 47% de första 2 dagarna för att sen sjunka snabbare de resterande 3 dagarna då fuktkvoten sjönk ifrån 41% till 32% (Figur 25)

Resistanssensorn i test 4 hade ledpinnarna i ciporexblock med ett referensmotstånd på 180 k Ω . Utsignalen var stabil under mätningen men om sensorn berördes fysiskt så började signalen fladdra.

I detta test har utsignalen från kapacitanssensorn omvandlats till 1024 minus analog utsignal. Därmed minskar värdet på y-axeln med minskad fuktkvot istället för att öka, som egentligen är beteendet för kapacitansen.

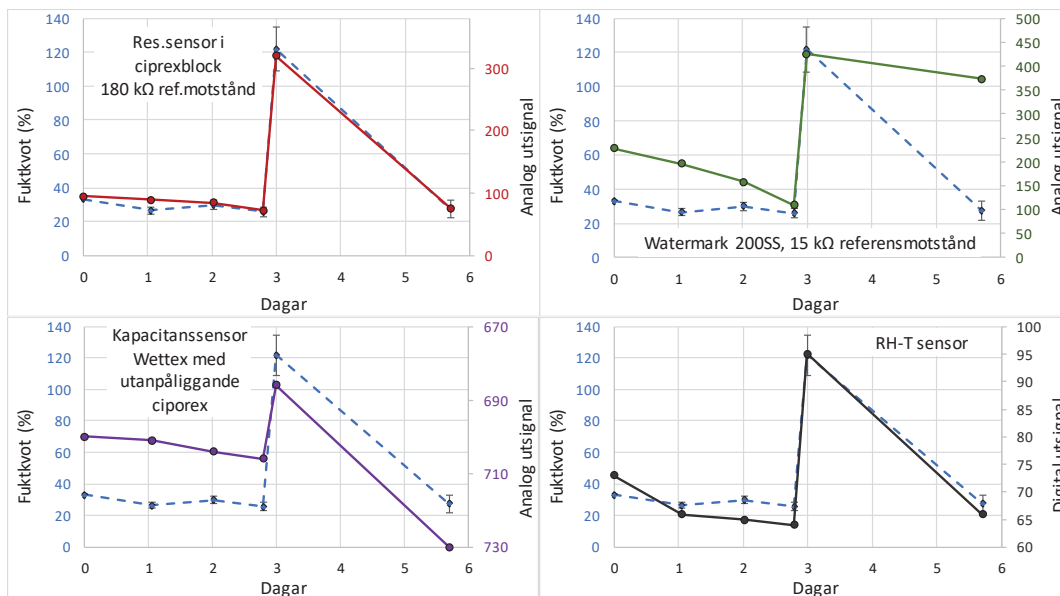
Den relativa fuktigheten i koppen placerad precis över mossan följer liksom i tidigare test fuktkvoten linjärt.



Figur 25. Uttorkningsserie 3. Fuktkvot från förstörande provning (blå, vänster axel) samt sensor-signal (höger axel) mot tid för de fyra testade sensorerna. Spridningsmåttet på fuktkvotskurvan indikerar värdena från de två mätningarna vid varje tidpunkt.

5.4 Uttorkningsserie 4

Serien löpte över 6 dagar då fuktkvoten sjönk ifrån 33% till 25% de första 3 dagarna. Efter 3 dagar ställdes mossblocket ut för att återfuktas. Efter återfuktningen steg fuktkvoten till 122% för att sen sjunka till 27% (Figur 26).



Figur 26. Uttorkningsserie 4. Fuktkvot från förstörande provning (blå, vänster axel) samt sensorer-signal (höger axel) mot tid för de fyra testade sensorerna. Spridningsmåttet på fuktkvotskurvan indikerar värdena från de två mätningarna vid varje tidpunkt.

Resistanssensorns utsignal sjönk ifrån 95 till 72 när fuktkvoten sjönk ifrån 33% till 26%. Vid återfuktning till 122% steg sensorns utsignal till 320. Efter att ha torkat igen så hamnar utsignalen på samma nivå som innan återfuktningen. Sensorn visar mycket bra linearitet mot fuktkvotsmätningarna.

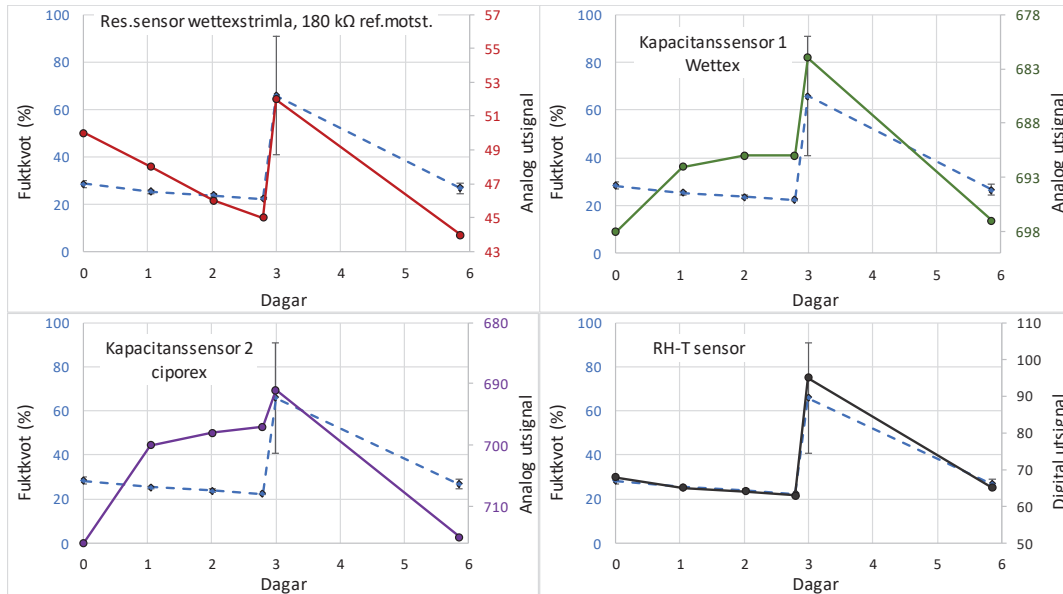
Watermark 200SS (WM2) med ett 15 kΩ referensmotstånd hade en stabil signal men efter återfuktning så sjönk inte signalen ner till tidigare nivåer i takt med att fuktkvoten sjönk (Figur 26).

Kapacitanssensorn med referensmaterial av Wettex och utanpåliggande ciporex reagerade först som förväntat. Men under den andra torkperioden återgick inte värdet till motsvarande fuktkvot innan återfuktningen.

Den relativa fuktigheten, i ett upp och nedvänt kärl, varierar som förväntat mot fuktkvoten.

5.5 Uttorkningsserie 5

Under test 6 gjordes ett nytt försök med återfuktning. Denna gång var nederbörden mindre än i test 5. Resistanssensorn, med en wettexstrimla kopplad mellan + och - poolen (Figur 4), fladdrade mycket mindre än tidigare wettexsensorer men hade en lägre analog signal eftersom den totala längden på wettexstrimlan var ca 1 cm. Variationerna mellan varje observationspunkt går åt rätt håll men värdet före och efter återfuktning stämmer inte överens (Figur 27).



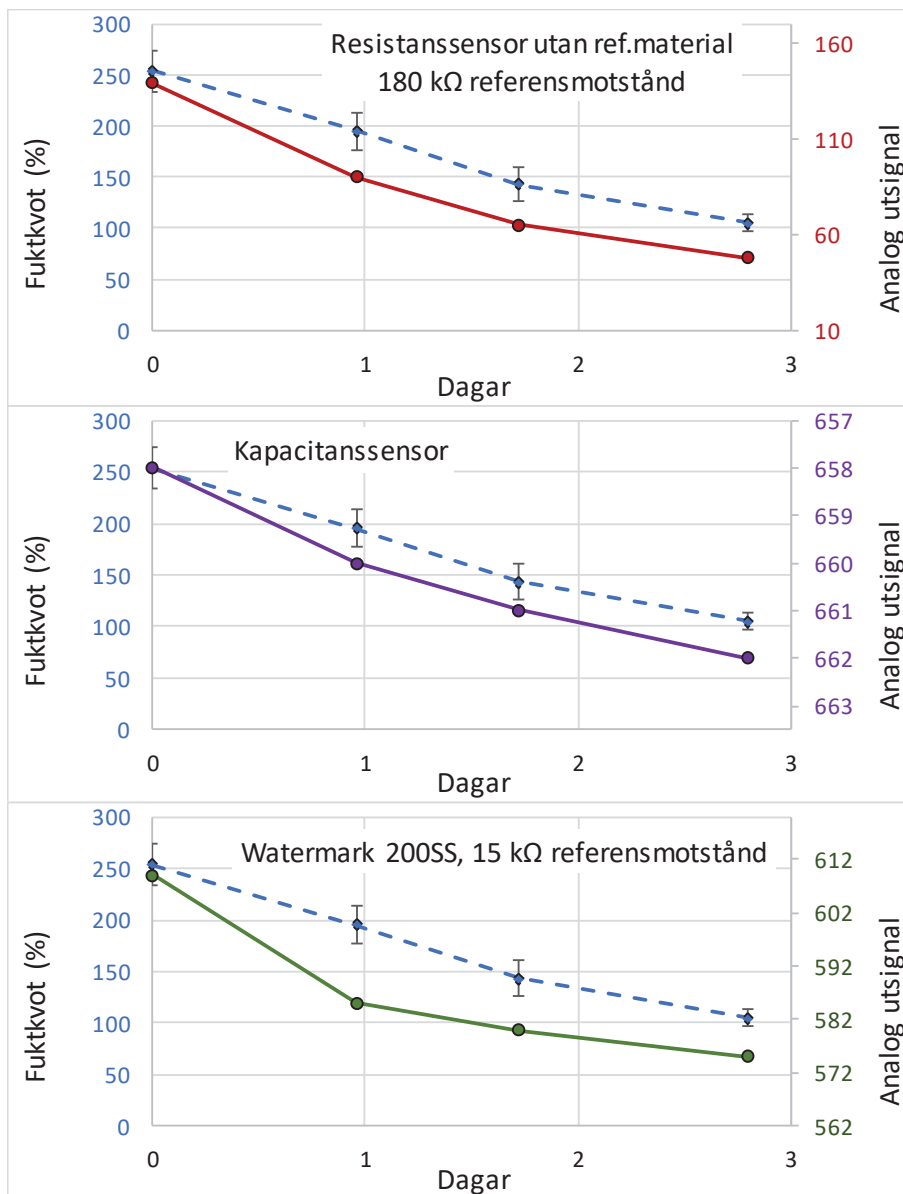
Figur 27. Uttorkningsserie 5. Fuktkvot från förstörande provtagning (blå, vänster axel) samt sensorers utsignal (höger axel) mot tid för de fyra olika sensorer, varav två var varianter av kapacitanssensorer (med wettex respektive ciporex som referensmaterial).

Kapacitanssensor 1 (med wettex som referensmaterial), har fortsatt små spann att variera på vilket gör att små ändringar påverkar resultaten mycket. Kapacitanssensorn, följde inte fuktkvoten men återfuktning syns markant och signalen återgick till liknande värden som för tidigare fuktkvoter. Kapacitanssensor 2 (med ciporex som referensmaterial), beter sig likt den första kapacitanssensorn, Kap 1, i mossblock 5. Signalen följer inte fuktkvoten i början och det är små ändringar i utsignalen.

Den relativa luftfuktigheten, i ett upp och nedvänt kärl ovanför mossan (RH-T) beter sig linjärt liksom den gjort i tidigare test.

5.6 Uttorkningsserie 6 - humus

Humusen hade hög fuktkvot och torkade långsamt (Figur 28), över 3 dagar sjönk den från 254 % till 105 % i 50 % RH och 23 °C. Eftersom humusens torrdensitet är många gånger högre än mossans är mängden vatten per volymenhet högre vilket gör att sensorerna får större utslag på utsignalen då det finns mer vatten kring dem.



Figur 28. Uttorkningsserie humus. Fuktkvot från förstörande provtagning (blå, vänster) och sensorernas utsignal (höger axel).

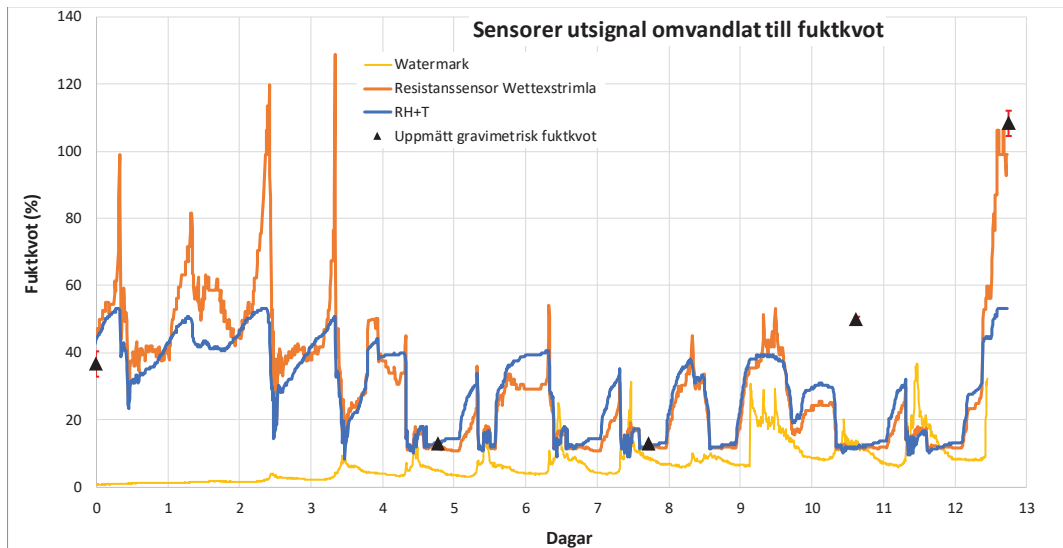
Resistansmätaren, med 2 ledpinnar, gav stabila signaler och utan referensmaterial fanns det ingen normaliseringstid utan den gav konstant signal direkt. Vid 254 % fuktkvot var utsignalen 149 och sedan sjönk till 50 vid en fuktkvot av 105 % (Figur 28). Resistansmätarens respons var nära linjär och sjönk i takt med fuktkvoten.

Kapacitanssensorn hade en utsignal på 658 vid en fuktkvot på 254 % och 662 vid 105 %. Däremot så var signalspannet väldigt lågt, med en fuktkvotsminskning på 149% så var signalspannet 4.

Watermark 200SS gav en analog signal på 658 vid en fuktkvot på 254% för att till dag 2 sjunka kraftigt till 585. De följande dagarna sjönk signalen mer moderata nivåer med ett linjärt samband ner till 575 vid en fuktkvot på 105% ().

5.7 Fältförsök

Mätningarna med tre sensorer gjordes kontinuerligt över en period av 13 dagar och med destruktiv provtagning av mossans fuktkvot vid fem tillfällen. Det bör nämnas att en mätpunkt på tionde dagen, inte stämmer väl in med väderbeteendet. De fyra första dagarna var det kraftig dimma på morgonen och den 12:e dagen kom nederbörd, totalt ca 1 mm enligt SMHI's närmaste mätstation. Fuktkvoten beräknad från resistans- (korrigerade för mossans temperatur), Watermark- samt RH-T-sensorns ut signaler, visar på tydliga dygnsvariationer (Figur 30).



Figur 29. Test 8 – Fältförsök. Fuktkvot från de tre sensorerna i fältförsöket samt fem förstörande referensprover. De vertikala gridlinjerna markerar midnatt.

Watermarksensorn lyckades aldrig nå jämvikt med omgivningen då den var helt torr när den placerades i mossan. Över hela mätperioden närmade den sig långsamt de andra sensorernas värden. RH-T-sensorn verkade bottna på de höga värdena under natten (sensorn är en billig variant begränsad till 95 % RH). Resistanssensorn hade ett större spann även om det inte helt går att utröna dess kapacitet för de torraste eftermiddagarna.

6 Slutsats och diskussion

Flera av de testade sensorerna gav utsignal även vid låga fuktkvoter i mosslagret, vilket tyder på att de är kapabla att ge information även i den region där mossan är brännbar (under ca 25% fuktkvot), och där små skillnader är avgörande för eldens spridningshastighet.

Fältförsöket brister på grund av alldeles för få referensprover. Ett lyckat fältförsök hade krävt minst tio referenspunkter för kalibrering av sensorerna plus en tätare serie med referensprover tagna varje timme för att plocka upp sensorernas svar på dygnsvariationen. Till sist skulle det varit önskvärt med en period av torka, nederbörd och sedan ytterligare torka för att verkligen kunna utesluta hysteres. Detta är arbete som kvarstår.

Nedan följer en diskussion kring var sensor för sig och i Tabell 1 sammanfattas för- och nackdelar med de olika sensorerna.

Resistanssensorer

Resistanssensorerna ger stabila värden och går relativt lätt att anpassa till vilka fuktkvoter de ska mäta genom att styra referensmotståndet. Med Wettex som referensmaterial verkar dock ett 180 k Ω -motstånd kunna ge bra upplösning både inom det brännbara området och för fuktkvoter på flera hundra procent. Dessa sensorer är billiga att tillverka och skräddarsy samt lätta att använda. En betydande risk för korrosion föreligger dock och sensorn är känslig både för ändringar i pH och för salter. Korrosionsrisken går att minska genom att använda rostfritt material för ledpinnarna samt undvika konstant aktiverad mätning. Alternativt kan man eliminera polariseringen genom att skifta plus- och minuspolerna mellan varje mätning. De flesta problem (såsom korrosion, signalens brusnivå samt deras känslighet för yttre krafter) som uppstått med resistansmätarna går att åtgärda genom att modifiera sensordesignen. Resistanssensorerna måste använda en parallell temperaturmätning i bränslet för att kompensera resistansen för temperaturvariationen, vilken motsvarar ungefär 1.8 % per grad¹⁹. Val av referensmotstånd är ett problem som är svårt att komma bort ifrån. Sensorns resistivitet måste vara känd för att kunna göra rätt val av referens motståndet och om man väljer ett motstånd för torra miljöer så blir fuktigare mätningar osäkra och vice versa. Alltså krävs mindre tester innan sensorer med ett specifikt referensmaterial placeras för att anpassa referensmotståndet till fuktintervallet av intresse.

Resistansmätare med cyporex gav en stabil signal men vid test med en ugnstorkad sond tog upp till 48 timmar innan signalen stabiliserades. Gissningsvis tog det så lång tid för fukten i cyporexen att nå jämvikt med fukten i omgivande material (appendix Figur 4). När cyporexen väl är i jämvikt med mossan så följer den fuktjämvikten utan en lång fördröjning (uttorkningsserie 4) och torkar och återfuktas i samma takt som mossan. Cyporexsensorerna var känsliga för små ändringar i kontakten mellan ledpinnarna och cyporexen, förmodligen eftersom det påverkar den kortaste vägen som strömmen kan ta, och därmed ändrar resistiviteten.

¹⁹ Arduino-based system for soil moisture measurement, <https://www.researchgate.net/publication/313720615> (besökt 2019-12-17).

Resistansmätarna med wettex gav en mer instabil signal, jämfört med ciporex, men de kom snabbare i jämvikt med mossan. Eftersom Wettex är cellulosebaserad suger den åt sig fukt bra och bör kunna ge högre signaler vid låg fuktkvot på mossan och därmed vara bättre för låga fuktkvoter jämfört med motsvarande för ciporex. Å andra sidan sväller och mjuknar Wettex-materialet när det blir fuktigt. Detta kan leda till att ledpinnarna lätt flyttar på sig, vilket markant ändrar signalen och det är svårt att få tillbaka samma signalnivå om ledpinnarna har flyttats.

Ett sätt att minska den fladdrande signalen och framförallt att bli av med spikarna som uppstår när Wettexen sväller är att inte använda ledpinnar utan att koppla Wettexen direkt till plus- och minuspolen. Detta gjordes med en strimla på 1 mm x 1 mm som var 1 cm lång. Den typen av sensor gav mindre fladder men var framför allt opåverkad av beröring under testerna., Det är också positivt med ett tunnare referensmaterial då det inte påverkar mossan i samma utsträckning. Detta gjordes i Uttorkningsserie 5 (Figur 28) samt fältförsöket (Figur 29). I Serie 5 gav inte sensorn den väntade signalen vid återfuktningen. Fuktkvoten i mossan ökade till 66% och sensorn gav en signal på 52, jämfört med en signal på 50 vid en fuktkvot på 26%. Dvs något har hänt med sensorn eller så har den kraftig hysteres. En tänkbar anledning är att den sensorn, som tyvärr var tvungen att plockas ut under återfuktningen, inte placerades på exakt samma sätt som innan. I fältförsöket varierade sensorn tillsynes utan hysteres men tyvärr saknas en del referensmätningar för utvärderingen.

Watermark 200SS

Watermark 200SS är en kommersiell sensor som är designad för att mäta vattenpotentialen i centibars via en direkt mätning av resistansen vilken omvandlas till vattenpotential genom en överföringstabell. Det innebär att watermark i praktiken är en resistanssensor där ledpinnarna sitter i en matris av gips som beroende på omgivningen ger ifrån sig eller suger åt sig fukt. Watermark ger stabila signaler och har ett relativt stort spann även vid låga fuktkvoter (gips har god ledningsförmåga även vid mycket låga fuktkvoter på grund av fria laddningar). Sensorn är ganska stor jämfört med de andra sensorerna, och kan suga åt sig mycket vatten. Detta innebär att det kan ta lång tid innan den har kommit i jämvikt med omgivande mossan. Watermark 200SS är designad för att mäta i jord där vattentillgängligheten är mycket större. Kontakten mellan jord och sensormaterialet är också betydligt bättre än mellan den luckra mossan och sensorn. För mätning i humus bör dessa problem vara mindre. Konceptet skulle dock kunna utnyttjas för att specialtillverka en mindre sensor för låga fuktkvoter. Watermark är den dyraste av alla sensorer och precis som de andra resistanssensorerna krävs åtgärder för att inte korrosion ska ske.

Kapacitanssensor

Ett problem med den kommersiella kapacitanssensorn är att det referensmotstånd som används inte går att justera och är anpassat för tätare material så som jord. Det gör att den inte är känslig nog att användas utan någon sorts referensmaterial, och även här användes ciporex och Wettex. Kapacitanssensorn har ett inbyggt kretskort som är optimerat för en viss fuktighet i vilket det finns ett referensmotstånd som styr känsligheten, precis som med resistanssensorerna. Som det är nu så har de för dålig känslighet för att kunna ge bra mätvärden. Även om signalerna är stabila så har de bara ett spann på runt 60 för fuktkvoter under 60 %

Kapacitanssensorerna med enbart ciporex som material gav nästan ingen utsignal alls. Användes enbart Wettex så ökades signalens spann men materialets benägenhet att svälla gjorde det svårt att hålla det på plats. För att lösa detta så placerades en ciporex-skiva ovanför Wettexen, vilket gav ett bättre signalspann än enbart ciporex men sämre än enbart Wettex. En specialtillverkad kapacitanssensor hade kunnat skräddarsys för att mäta vid låga fuktkvoter och teoretiskt sett även kunna inkludera vattnet i mossans blad. Istället för att mäta kapacitansen kring ena sidan av sensorn så skulle en specialtillverkad sensor kunna mäta kapacitansen mellan två plattor. Då skulle allt vatten, inklusive det i mossan påverka signalen. Som de kommersiella sensorerna ser ut nu, utan modifikation och med ett referensmaterial så har de begränsade möjligheter att mäta låga fuktkvoter i mossa.

Relativ luftfuktighet

Den relativa luftfuktigheten, i ett upp-och-nedvänt kärl, placerad precis ovanför mossan gav bäst korrelation med mossans fuktkvot och även bäst repeterbarhet av alla sensorer. Även placerad direkt nere i mossan, utan täckande kopp ger sensorn förvånande bra resultat. Metoden verkar vara speciellt lämplig för riktigt torra förhållanden men fungerar inte alls om det är för fuktigt, eftersom max relativ luftfuktighet är 100%. Labmätningarna skedde dock i en kontrollerad miljö på 22 °C och 50 % RH. Därmed behövde inga kompenseringar göras för variation i temperatur och luftfuktighet i omgivande luft och det blev aldrig mättat med fukt i koppen (ingen kondens uppstår på insidan).

Sensorn testades dock i fältförsöket och gav även där förvånande bra resultat. Med fler referensmätningar så kan även detta vara en lämplig kandidat. Det finns sensorer som är något dyrare (ca 50 SEK) och som mäter i hela spannet (0 – 100 % RH) med en upplösning på 0.1 %-enhet. Dessa sensorer hade förmodligen inte bottnat lika lätt vid högre fuktkvoter och kunnat plocka upp variationerna under dagen. Fördelen med sensorn är också att den automatiskt mäter temperaturen i exakt samma mätpunkt, för att justera om exempelvis solstrålar träffar marken. Den är dessutom väldigt snabb och har inget referensmaterial som måste justera sig till omgivningen eller påverka densamma med sitt eget vatteninnehåll. Sensorernas för- och nackdelar sammanfattas i Tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning över sensorernas egenskaper.

Sensortyp	Plus	Minus	Åtgärder
Resistans-sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Billig • Lätt att tillverka och skräddarsy • Lätt att använda • Ger stabila värden • Går lätt att styra mot vilken fuktkvot som ska mätas • Liten storlek 	<ul style="list-style-type: none"> • Måste ha ett referensmaterial • Korrosion • Påverkas av pH och salter • Måste korrigeras mot temperatur • Kan lätt påverkas om resistansen ändras, vid tex beröring 	<ul style="list-style-type: none"> • En mer robust design utan ledpinnar. • Val referensmaterial är viktigt
Kapacitans-sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Billig • Finns kommersiellt • Lätt att använda • Ger stabila värden • Borde kunna mäta vatten som finns i mossan 	<ul style="list-style-type: none"> • De kommersiella lösningarna är styrda mot en högre fuktkvot • Vid låga fuktkvoter har den ett litet span i utsignal • Bör inte användas vid låga fuktkvoter 	<ul style="list-style-type: none"> • Special tillverka kapacitanssensor som är designad för läger fuktkvoter • En specialtillverkad sensor behöver inget referensmaterial

Sensortyp	Plus	Minus	Åtgärder
Watermark 200SS	<ul style="list-style-type: none"> • Finns kommersiellt • Lätt att använda • Ger stabila värden • Klarar mäta vid låga fuktkvoter • Har en gipsmatris vilket sänker påverkan av pH/salter 	<ul style="list-style-type: none"> • Störst av sensorerna – därmed långsamt stegsvar • Dyr • Måste korrigeras mot temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensorn är designad att logga i CentiBar, men det som mäts är en voltsignal.
Relativ luftfuktighet	<ul style="list-style-type: none"> • Väldigt billig • Lätt att använda • Ger även temperatur • Klarar att mäta låga fuktkvoter • Ger stabila värden • Snabb reaktion 	<ul style="list-style-type: none"> • DHT11 har en felmarginal på 5% • Kan lätt påverkas av vind och regn • Fungerar inte vid mycket höga fuktkvoter • Behöver mest utveckling i form av sensordesign och hållare för att bygga bort de problem som kan uppstå • Kräver troligtvis många referensmätningar. 	<ul style="list-style-type: none"> • En bättre sensor med hela spannet 0 – 100 % bör användas och med högre upplösning (ca-pris: 50 SEK)

Slutsatser

Fuktkvot i finbränsle

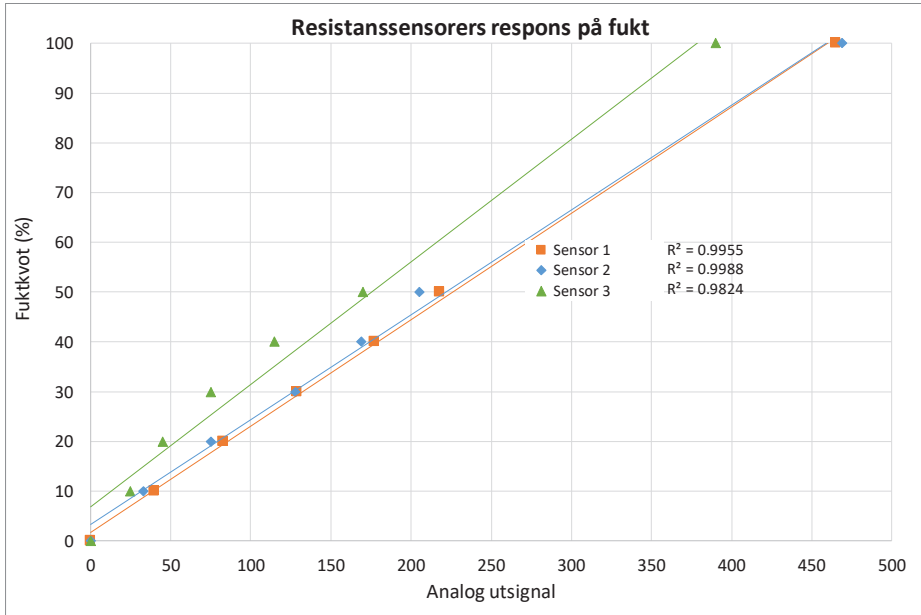
- För att mäta finbränslets fuktkvot fungerar inte den kommersiella sensorn Watermark 200SS. Den har för stor massa vilket ger en tröghet som inte matchar de snabba fuktvariationerna i finbränslet.
- Kapacitansmätare fungerar och är enkla och billiga att använda men är inte robusta nog för att ge tillförlitliga mätningar. En variant av kapacitiv sensor, som ännu inte provats i dessa mätningar, vore att mäta kapacitans mellan två plattor som fylls med mossa av ungefär samma densitet som omliggande material. Fördelen hade varit att sensorns mätningar kommit närmare den faktiska storhet vi är intresserade av och utmaningen vore att få noggrannheten tillräckligt hög vid låga fuktkvoter.
- Resistiva sensorer fungerar väl. För ett längre fältexperiment skulle en sensor med ledpinnar i ett referensmaterial (såsom Wettex) kunna användas men själva sensordesignen och dess inkapsling skulle behöva en något mer robust design för att tåla en hel säsong i fält. En annan lösning är en resistiv sensor utan ledpinnar där referensmaterialet självt utgör kopplingen mellan elektroderna och inbäddas i mossmatrisen. Denna skulle svara väldigt snabbt och robust nog för att mäta under en lång period.
- Mätningar med enbart en sensor för temperatur och relativ luftfuktighet liggandes på mossan under en skyddande behållare med enda öppningen nedåt har visat sig idealisk i labbklimat. Lösningen är kanske inte lika lämplig i fält. Men, sensorn placerad precis som övriga sensorer, 2 cm ner i mossan, visade sig under fältförsöket vara lovande. En sensor med något bättre prestanda än den som använts här är dock nödvändig.

Fuktkvot i humuslagret

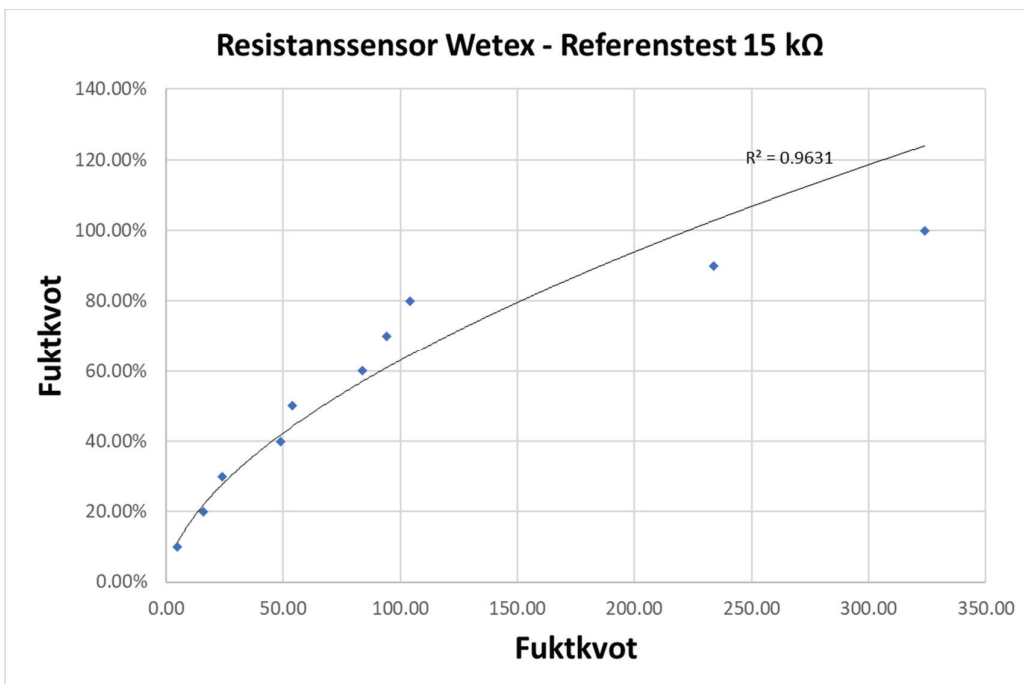
- Resistanssensorn samt watermark200 SS skulle fungera bra att använda i humuslagret.

- Kapacitanssensorn hade för litet signalspann för att vara användbar för mätning i humus.
- Inget referensmaterial krävs för humusmätningar med kapacitans eller resistanssensorer; de kan stoppas rakt in i humusen och ger en omedelbar respons.
- Att mäta i humus är lättare och ger stabilare signaler och därmed bättre noggrannhet än i mossa.

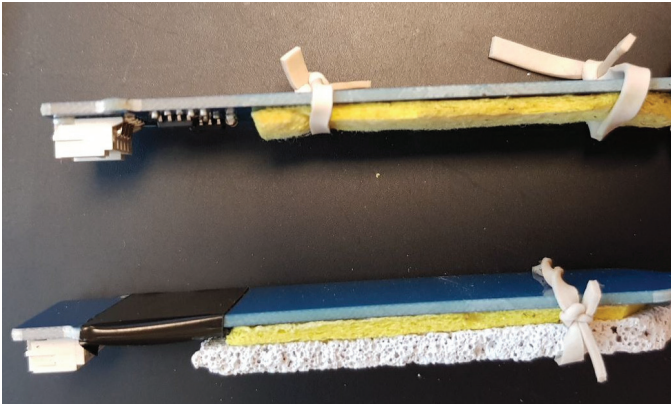
Appendix



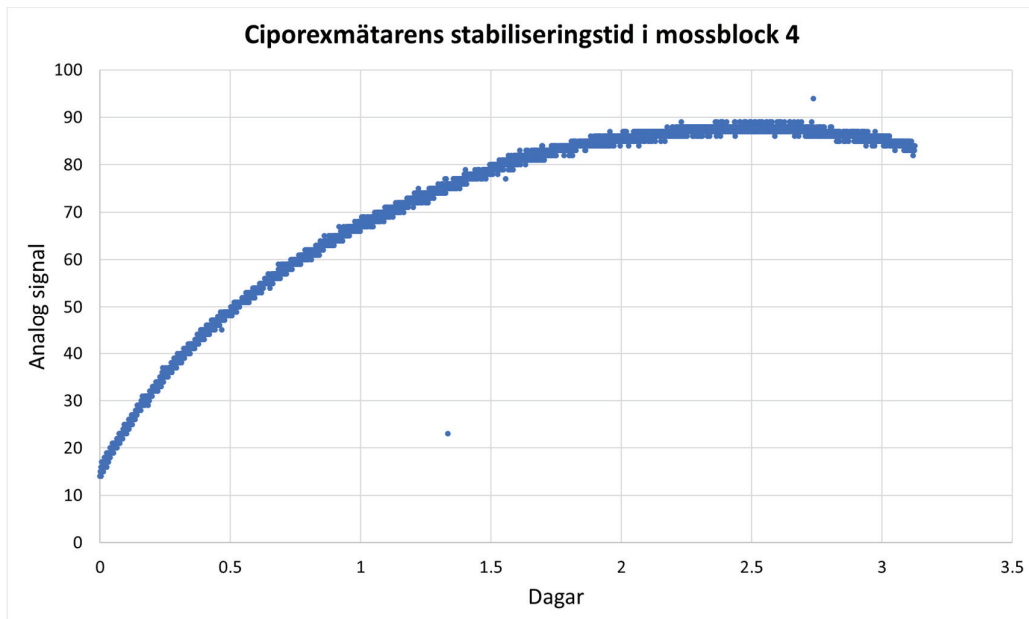
Appendix figur 1. Kalibrering av EC sensorer visar ett linjärt samband mellan referensmaterialets (ciporex) fuktkvot och sensorns utsignal - Referenstest 15 k Ω .



Appendix figur 2. Resistanssensor Wettex - Referenstest 15 k Ω med ett exponentiellt samband



Appendix figur 3. Kapacitansmätare med referensmaterial. Övre: enbart med wettex. Undre: Med wettex och ciporex



Appendix figur 4. Responstiden för ciporexsensorerna. Först efter 2 - 2.5 dagar så har ciporexet normaliserat sig med mossan och börjar torka.



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap