

Kristoffer Strømshoved

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Kristoffer Strømshoved

Fuktmåling i lettklinkerfylling

Juli 2020

Fuktmåling i lettklinkerfylling

Kristoffer Strømshoved

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juli 2020

Hovedveileder: Tore Kvande

Medveileder: Silje Kathrin Asphaug

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet våren 2020 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim ved studieretningen bygg- og miljøteknikk. Oppgaven, med et omfang på 30 studiepoeng, fordyper seg i bygnings- og materialteknikk og utgjør siste semester av et 5-årig løp.

Arbeidet er en videreføring av prosjektoppgaven høsten 2019 som hadde som hensikt å undersøke forskningslitteraturen om fuktmålemetoder for lettklinkerfylling og finne den mest egnede metoden for dette. Dette har vært et manglende kunnskapsområde i Norge og er av interesse for blant annet NTNU, SINTEF og LECA Norge. På grunn av tidsbegrensningen i høst og problemstillingens omfang, ble det på nytt utført en grundigere litteraturstudie under arbeidet med masteroppgaven.

Formålet med oppgaven var å teste den mest aktuelle fuktmålemetoden i laboratorium. Laboratorieforsøket skulle utgjøre store deler av oppgaven, men på grunn av smitteverntiltakene etter utbruddet av koronaviruset, COVID-19 i mars, ble det ikke mulig å gjennomføre et slikt laboratoriearbeid. På dette tidspunktet var planleggingen av laboratorieforsøket godt i gang og laboratorieoppsettet så godt som klartgjort. Dette medførte store endringer for masteroppgaven og gjorde det videre arbeidet krevende og lite motiverende, siden oppgaven i utgangspunktet ble valgt grunnet stor interesse for den praktiske tilnærmingen.

Sammen med hovedveileder ble det bestemt hvordan oppgaven kunne endres for å erstatte det planlagte laboratoriearbeidet. Dette innebar en grundigere gjennomgang av forskningslitteraturen og utarbeidelse av et testprogram i laboratorium for ulike måleinstrumenter. Hensikten er at denne oppgaven skal kunne være til hjelp for de som er interesserte i problemstillingen og for de som ønsker å gå videre og teste målemetoden som oppgaven kommer frem til.

Jeg vil rette en stor takk til hovedveileder Tore Kvande og medveileder Silje Asphaug for god hjelp og oppfølging under arbeidet med masteroppgaven.

7. juli 2020

Kristoffer Strømshoved

Sammendrag

Utfordringer knyttet til de fremtredende klimaendringene krever tilpassede løsninger for infrastruktur. Det er derfor blitt opprettet et senter for forskningsdrevet innovasjon som kalles Klima 2050. De forsøker å redusere samfunnsmessig risiko forbundet med klimaendringene, og legger vekt på blant annet blå-grønne-løsninger, overvannshåndtering og fuktsikre bygninger. Lettklinker er et lett materiale med drenerende og varmeisolerende egenskaper, og brukes i blant annet tilbakefylling mot kjellervegger, i grønne tak og i veg- og banekonstruksjoner. Problemet til nå har vært å måle fuktinnholdet i lettklinker. Kunnskap om ny teknologi og målemetoder har derfor stor nytteverdi for bygge- og anleggsnæringen, siden det reelle fuktinnholdet er en viktig faktor for optimalisert prosjektering. Derfor forsøker oppgaven å kartlegge hvilke målemetoder som finnes for jord og løs lettklinker, og å finne den mest egnede metoden for lettklinkerfylling. For å kunne svare på problemstillingen stilles to forskningsspørsmål: "I hvor stor grad er måling av fuktinnhold i jord og løs lettklinker behandla i forskningslitteraturen?" og "Hvordan kan vi best måle fuktinnholdet i løs lettklinker?"

For å finne svar på forskningsspørsmålene ble det gjort en grundig litteraturstudie ved bruk av søkemotorene Google Scholar og Science Direct. Det ble gjennomført 13 søk som genererte til sammen rundt 7 millioner treff. Søkene startet bredt på generell fuktmåling i jord og spisset seg videre inn mot lettklinkerfylling. For å avgrense arbeidet ble kun de 100 første titlene gjennomgått, og det ble i alt plukket ut 79 artikler fra litteratursøket. Deretter ble artiklene kategorisert etter innhold, før de ble grundigere undersøkt for videre utplukking. Av de totalt 79 artiklene ble 14 benyttet i oppgaven.

Resultater fra forskningslitteraturen ga oversikt over hvilke målemetoder som finnes, samt fordeler og ulemper med hver målemetode. Metoden som skilte seg ut var elektromagnetiske sensorer (EM-sensorer), som måler forskjellen i permittiviteten i jord. Fordeler som trekkes fram med denne metoden er: Høy målenøyaktighet og brukervennlighet i forhold til de andre metodene, samt lav helserisiko og kontinuerlige målinger i både tørr og mett jord. På grunn av disse fordelene er metoden godt utviklet, som igjen har ført til et økende antall EM-sensorer på markedet. Dette underbygges med kartleggingen av forskningslitteraturen hvor over halvparten av funnene omhandlet EM-sensorer, og tre av sensorerene (Trime Pico, CS616 og Wet-2) hadde i tillegg målt i lettklinker eller lignende granulære materialer. Trime Pico målte fuktinnholdet i ren lettklinker brukt i banekonstruksjon. CS616 ble benyttet i vekstlag i grønne tak bestående av 80 % lettklinker og i materialer som soyabønner, kaffe og mais. Wet-2 ble også brukt i vekstlag i grønne tak bestående av grovere tekstur. CS616 og Wet-2 har også vist god ytelse i andre studier, til forskjell for den ene, svake studien med Trime Pico. Derfor blir CS616 og Wet-2 anbefalt å se nærmere på ved valg av sensor til lettklinkerfylling.

Forfatteren har kommet frem til et forslag til testprogram i laboratorium for testing av ulike sensorer. Testprogrammet er spesielt designet for sensoren SDI-12, som allerede er tilgjengelig ved Byggteknisk laboratorium ved NTNU. Dette er også en EM-sensor, som i likhet med Trime Pico består av én lang sonde og måler et stort volum. Dette gir forhåpninger om at SDI-12 kan fungere i lettklinker også. Testoppsettet er laget slik at det vil være mulig å teste flere sensorer samtidig, for å finne den best egnede sensoren til feltmålinger i tilbakefyllinger mot kjellerkonstruksjoner, i grønne tak og veg- og banekonstruksjoner.

Videre arbeid med problemstillingen vil kunne være å utføre fuktmålinger i lettklinkerfylling i henhold til testprogrammet som er foreslått i denne oppgaven. Resultater fra testprogrammet vil kunne indikere om EM-sensorene anbefalt i denne oppgaven fungerer i lettklinkerfylling. Videre vil det være viktig å utlede gode kalibreringsfunksjoner slik at målenøyaktigheten blir så høy som mulig. Om ytelsen for sensorene viser gode måleresultater i laboratoriet, vil neste steg være å teste sensorene i felt, eksempelvis i tilbakefylling mot kjellervegger, grønne tak eller veg- og banekonstruksjoner.

Abstract

Challenges associated with prominent climate change require customized solutions for infrastructure. A center for research-based innovation, Klima 2050, has therefore been established in Norway. Their aim is to reduce societal risk due to climate change. Blue-green solutions, stormwater management and moisture-resilient buildings are the main focus of Klima 2050. Lightweight expanded clay aggregate (Expanded clay) is a light material with drainage and heat insulating properties. It is used in, among other things, backfill against basement walls, in green roofs and in road and railway structures. A key problem has been, and still is, the measurement of moisture content. Therefore, new technology and measurement methods have great utility for the construction industry, since the actual moisture content is an important factor for optimized design. This study seeks to identify measurement methods available for soil and expanded clay, and to find the most suitable method for measurement of moisture content in expanded clay fillings. To answer this, two research questions are raised: “ To what extent is measurement of moisture content in soil and expanded clay treated in the current literature? ” And “ What is the best method for measuring the moisture content of loose filling of expanded clay? ”

In order to answer the research questions, a thorough literature study has been conducted. The search engines used are Google Scholar and Science Direct. A total of 13 searches were conducted, generating roughly 7 millions of hits. The search process started broadly within general moisture measurement in soil, before focusing on filling of expanded clay. The first 100 titles were reviewed for the purpose and scope of the thesis, and a total of 79 articles were selected for further examination. Subsequently, the articles were categorized by content, before being thoroughly analyzed for further selection. 14 out of the 79 articles are used in the thesis.

Electromagnetic sensors (EM-sensors) were chosen as the preferred method based on several advantages, as well as disadvantages of the other measurement methods. Advantages highlighted are: High measurement accuracy and ease of use compared to the other methods, as well as low health risk and continuous measurements in both dry and saturated soil. Because of these advantages, the method is well developed, which in turn has led to an increasing number of EM-sensors available on the market. This is supported by the survey of the research literature, where more than half of the findings involve EM-sensors. However, the research literature reveals that only three sensors have been used on similar granular materials. First, Trime Pico measured the moisture content of pure expanded clay used in railway construction. Second, CS616 was used in green roof substrates consisting of 80 % expanded clay and in materials such as soybeans, coffee and corn. Third, Wet-2 was also used in green roof substrates of coarser texture. CS616 and Wet-2 have also performed well according to other studies, unlike Trime Pico, which is only conducted in one study. To summarise the literature survey, CS616 and Wet-2 are recommended when choosing sensor for filling of expanded clay.

Furthermore, this study proposes a laboratory test program for testing different sensors. The test program is customized for SDI-12, which is available at Byggteknisk laboratorium, NTNU. This is also an EM-sensor, which like Trime Pico consists of one long probe and measures a large sample volume. This makes the examination of SDI-12, in terms of being able to measure expanded clay, interesting. The test program is designed for testing of several sensors simultaneously, in order to find the most suitable sensor for field measurements in backfills against basement structures, green roofs and road- and railway structures. An interesting direction for further research could be performing moisture measurements in filling of expanded clay according to the proposed test program. Results from the program may indicate whether the EM-sensors recommended in this thesis will be suited for measuring moisture in such fillings. Furthermore, it is essential to derive reliable calibration functions to achieve a high measurement accuracy. If the laboratory tests yield good sensor performance, the next step will be to test the sensors in field, for example in backfill against basement walls, green roofs or road- and railway structures.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iv
Figurer	viii
Tabeller	viii
Forkortelser	ix
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Nytteverdi	1
1.3 Formål	1
1.4 Avgrensninger og avklaringer	2
1.5 Oppbygning av oppgaven	2
2 Teoretisk rammeverk	3
2.1 Lettklinker	3
2.2 Fukt i porøse materialer	5
2.3 Fuktmåling	7
2.4 Fukt i grunnen	8
2.5 Jord	8
2.6 Fukt og fuktmålinger i jord	10
2.7 Målenøyaktighet	12
3 Metode	13
3.1 Definerings av søkeord og valg av søkestrenger	13
3.2 Utvelgelse og kategorisering av artikler	15
3.3 Evaluering av metoden	15
4 Resultater	17
4.1 Målemetoder for jord, fordeler og ulemper	17
4.2 Sammenligningsstudier av EM-sensorer	19
4.3 Fuktmåling i lettklinker og lignende granulære materialer	30
4.4 Varmefluks-metoder	35
5 Diskusjon	37
5.1 Kartlegging av forskningslitteraturen	37
5.2 Valg av målemetode og sensor	38
5.3 Testprogram	42
6 Konklusjon	47
Referanser	49
Vedlegg A Utstyrliste for SDI-12	53
Vedlegg B Feltkalibrering av SDI-12 fra brukermanual	54

Figurer

1	Oppbygning av oppgaven	2
2	Usortert lettklinker	3
3	Rotérovnen inne på lettklinkerfabrikken på Rælingen	4
4	Definering av porestrukturer	5
5	Elektronmikroskop-bilde av en lettklinkerkule	5
6	Fuktopptak i porøse materialer	6
7	Karbidmetoden for måling av RF i betong	8
8	Vegg mot terreng av lettklinkerblokker med tilbakefylling av lettklinker	9
9	Jordarters bruksnavn etter innhold av leir, silt og sand	9
10	Skjematisk framstilling av jord-lysimeter og orientering av sensorene	20
11	Sensorene benyttet	23
12	Metode for testing av sensorene med målebeholdere	24
13	Sensor output fra TDR100, wet-2, 5TE og 10HS	25
14	Sensor output fra SM300, Theta Probe, Hydra Probe og CS616	25
15	Sammenligning av sensorer	29
16	Sensorer installert i jord	29
17	TDR-sensor TRIME PICO IPH T3 som ble brukt i prosjektet	31
18	Forsøksfelt	32
19	Snitt av testbed	32
20	SDI-12 Profile Probe Type SDI PR2/4 av Delta-T	42
21	Oppsett for testprogram med SDI-12, CS616 og Wet-2.	44

Tabeller

1	Bruksområder for lettklinker	4
2	Fraksjoner etter kornstørrelse	9
3	Kategori, ord og synonymer brukt i søkene	13
4	Oversikt over hvilke søkord som er benyttet og antall treff, samt utvalgte artikler fra søkemotorene Scholar og Science Direct	14
5	Kategorier funnene ble systematisert i, hvor mange artikler funnet innen hver kategori og antall artikler benyttet i oppgaven	15
6	Artikler plukket ut og benyttet for sammenligning og utvelgelse av målemetode	17
7	Artikler plukket ut og benyttet for sammenligning av EM-sensorer	19
8	Produktinformasjon om sensorene brukt i studien	20
9	Liste over hvilke målesensorer som var tilgjengelige i 2015	22
10	Teknisk informasjon for hver sensor benyttet	23
11	Målenøyaktighet for de ulike sensorene med krav fra leverandør og måleresultatene fra en studie	26
12	Artikler benyttet for fuktmåling i lettklinker og liknende granulære materialer	30
13	Fukttinnholdet målt med TDR-sensoren opp mot tørke/veie-metoden (T/V) for å verifisere kalibreringsfunksjonen	31
14	Artikler benyttet for HP- og DTS-metoden	35
15	Teknisk informasjon om sensorene brukt i forskningsartiklene presentert i resultatkapittelet	39

Forkortelser

- DPHP** Dual Prode Heat Pulse
DTS Distributed temperature sensing
FDR Frequency Domain Reflectometry
GMS Granular Matrix Sensor
GVS Grunnvannspeilet
LECA Light Expanded Clay Aggregate
RMSE Root Mean Square Error
SFI Senter for forskningsdrevet innovasjon
SPHP Single Prode Heat Pulse
TDR Time Domain Reflectometry
TDT Time Domain Transmission

Symboler

- θ Volumetrisk vanninnhold
 ε Permittivitet
 EC_b Bulk-elektrisk-konduktivitet
 T Temperatur
 P Periode
 V Volt, spenning

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Det forventes mer nedbør, flere intense og ekstreme nedbørsperioder og høyere temperaturer frem i tid. Dette er en konsekvens av de fremtredende klimaendringene. I takt med en økende nedbørsmengde og utbygging i byene i Norge, vil dette kunne føre til utfordringer knyttet til overvannshåndtering og for bygningsmassene fremover (Hauge, Å. L. et al., 2017).

For å imøtekomme disse utfordringene ble "Klima 2050" opprettet: Et senter for forskningsdrevet innovasjon (SFI) med mål om å styrke Norges innovasjonsevne og konkurransekraft innen klimatilpasning. Gjennom nært samarbeid med næringsliv og forskningspartnere, skal SFI forsøke å redusere samfunnsmessig risiko forbundet med økt nedbør og eksponering av flomvann. Klima 2050 legger vekt på blå-grønne løsninger, overvannshåndtering, vannutløste jordskred og fuktsikre bygninger (Time, 2014).

Lettklinker er et materiale som ofte brukes til klimatilpasning i overvannshåndtering og i infiltrasjonsløsninger, spesielt i grønne tak og utearealer som for eksempel fordrøyningsanlegg (Saint-Gobain, 2018). Materialet er også svært gunstig for reduisering av jordtrykk mot konstruksjoner i grunnen og forebygging av setninger i vei og bane. I tillegg til reduisering av jordtrykk vil en lettklinkerfylling ha drenerende og varmeisolerende egenskaper for vegg- og gulvkonstruksjoner i grunnen. For vei- og banekonstruksjoner kan lettklinker gi opptil 30-40 % slankere bærelag. Dette gir gode besparelser for bygge- og anleggsnæringen i form av både tid og penger, samt miljøet knyttet til transportering og deponering av løsmasser (Skoglund, 2019).

1.2 Nytteverdi

Som nevnt brukes blant annet lettklinker som tilbakefylling mot kjellervegger. Det er derfor av interesse å vite nøyaktig hvilke fukt påkjenninger en slik fylling utsetter kjellerveggen for, slik at reelle parametre kan brukes i dimensjonering av isolasjonstykkel i slike vegger. Når en lettklinkerfylling utsettes for nedbør vil vannet samles i luftlommer mellom kulene og på kulenes overflate. Dette er med på å gjøre fuktmåling i slike fyllinger krevende, da det heller ikke kan benyttes enkle RF-måler som generelt ikke tåler fritt vann. Ved flere forsøk i Norge har det i tillegg blitt brukt jordfuktmålere med dårlig resultat.

Det er behov for mer kunnskap om ny teknologi og målemetoder for å kunne utføre gode og pålitelige målinger av fuktinnholdet i lettklinkerfyllinger. Kunnskapen vil kunne gi et reelt bilde på fuktforholdet i fyllinger over tid gjennom oppfukting og uttørking. Dermed vil dette ha stor nytteverdi for bygge- og anleggsnæringen gjennom optimalisering av tidligere bruksområder, prosjektering og kostnadseffektivisering.

1.3 Formål

Formålet med oppgaven er å kartlegge hvilke metoder og instrumenter som finnes for fuktmåling i jord og løs lettklinker, og finne den mest egnede metoden for lettklinker spesielt. For å kunne svare på denne problemstillingen er det formulert to forskningsspørsmål:

1. I hvor stor grad er måling av fuktinnhold i jord og løs lettklinker behandlet i forskningslitteraturen?
2. Hvordan kan vi best måle fuktinnholdet i løs lettklinker?

Når mest egnet metode er funnet skal oppgaven resultere i et testprogram som kan benyttes i laboratorium for videre arbeid med problemstillingen og evaluering av metoden.

1.4 Avgrensninger og avklaringer

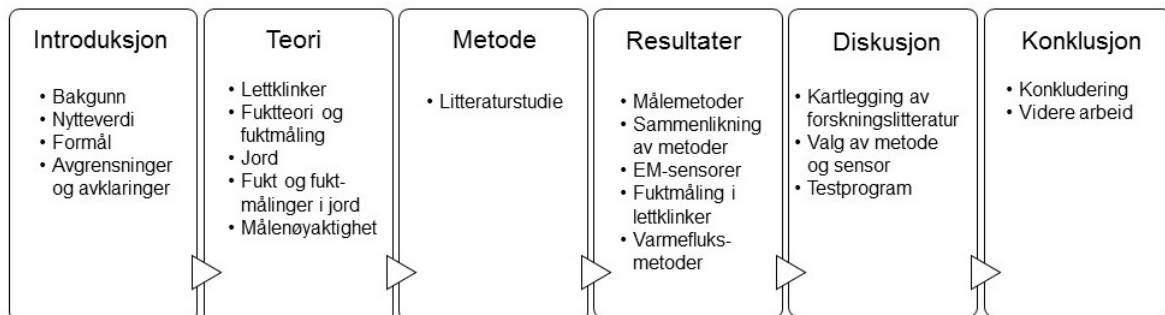
På grunn av oppgavens omfang og tidsbegrensning har det vært nødvendig med avgrensninger. Gjennom litteraturstudien ble det gjort mange søk som genererte til sammen flere millioner treff. Det var derfor nødvendig å begrense antallet som skulle vurderes for lesing. Kun de 100 første treffene har blitt gjennomgått for hvert enkelt søk, og utplukkingen videre er begrenset til et titalls artikler.

Det ble tidlig avdekket hvilken målemetode som var hyppigst benyttet for måling av fuktinnhold i jord og løs lettklinker, og det ble derfor mest fokus på denne metoden. Den viste seg å innebære mange forskjellige fuktsensorer, og videre arbeid har vært å kartlegge disse. Det ble derfor viet mindre oppmerksomhet til de andre metodene.

Oppgaven inneholder en del målestørrelser som avviker fra normen. Artiklene som er plukket ut bruker ofte centimeter som benevning, og oppgaven gjengir derfor også benevninger i samme format for å unngå risiko for feilgjengivelse.

1.5 Oppbygning av oppgaven

Figur 1 viser hvordan oppgaven er bygget opp og delt inn de fem kapitlene: Introduksjon, teori, metode, resultater, diskusjon og konklusjon. Teorikapittelet beskriver lettklinker som materiale, gir en kort innføring i fuktteori, og presenterer de ulike metodene for fuktmåling i materialer og jord. Metodekapittelet beskriver hvordan litteraturstudien er gjennomført, hvilke søkeord som er benyttet og antall treff for de ulike søkene, samt hvordan treffene ble kategorisert. Deretter blir resultater fra forskningslitteraturen presentert, og videre diskutert i diskusjonskapittelet. Diskusjonskapittelet avsluttes med et forslag til testprogram av mest egnet målemetode. Til slutt runder oppgaven av med en kort konklusjon som besvarer forskningsspørsmålene, og gir forslag til videre arbeid.



Figur 1: Oppbygning av oppgaven

2 Teoretisk rammeverk

Dette kapittelet presenterer et teoretisk rammeverk om temaet i oppgaven. Først beskrives lettklinker som materiale ved å gjennomgå hvordan det produseres, hvilke bruksområder som finnes, samt om kulenes oppbygning og struktur. Videre gis en innføring i fuktteori og generelt fukt i materialer og jord. Til slutt presenteres ulike metoder som finnes for fuktmåling, og litt om målenøyaktighet for fuktsensorer.

2.1 Lettklinker

Lettklinker er lett, ekspandert leire med form som små porøse kuler med hard overflate. Dette er vist i Figur 2. I Norge produseres lettklinker av det franske selskapet "Saint-Gobain" som har virksomhet i 12 europeiske land med produktnavnet LECA (Lightweight Expanded Clay Aggregate) . Siden 1950-tallet har lettklinker vært en vesentlig del av norsk byggehistorie- og kultur. Lettklinker har gjennom tidene blitt brukt i Leca-blokker som fundament i hundretusener av norske boliger, og blant annet til elementer, piper og rensing av drikkevann (Saint-Gobain, 2019).



Figur 2: Usortert lettklinker (Thue, 2019)

Lettklinker produseres i over 20 forskjellige land med forholdsvis lik framstillingsprosess, men har forskjellige produktnavn etter hvor det produseres. I Sverige, Kina, Polen og Russland blir det kalt "Keramzite", mens blant annet i Spania og Sør-Afrika henholdsvis "Liapor" og "Argex" (Rashad, 2018).

Lettklinker blir bakt i store rotérovner ved temperaturer mellom 1100-1300 °C. Figur 3 viser en slik roterende ovn. Det er på grunn av roteringen at kulene får sin runde og potetliknende form. Ren leire blir hentet opp fra jorda og varmet opp og tørket før den sendes inn i ovnen. Den høye temperaturen gjør at leiren ekspanderes til porøse kuler hvor gass blir fanget inne i kulene under nedkjølingen. Kulene får en hard, keramisk overflate og får fem til seks ganger opprinnelig volum (Rashad, 2018).



Figur 3: Rotérovnen inne på lettklinkerfabrikken på Rælingen. Bildet er tatt av forfatteren under besøket ved fabrikken

Bruksområder

Løs lettklinker er et anvendelig materiale og utgangspunkt for alle Leca-produktene (Saint-Gobain, 2019). Etter framstillingen sorteres kulene i forskjellige fraksjoner etter hva de skal brukes til. 2-4 mm brukes blant annet i Leca-piper og finblokk, og 4-10 og 10-20 mm brukes som tilslagsmateriale i lettbetong. I tillegg brukes de to sistnevnte fraksjonene ved siden av uisolert 0-32 mm som tilbakefyllingsmasse. 10-20 mm fraksjonen produseres også med overflatebehandling, kalt Leca Iso 10-20, som brukes kapillærbrytende, isolerende og drenerende lag. Flere av bruksområdene og produktene listes opp i tabell 1.

Tabell 1: Bruksområder for lettklinker (Saint-Gobain, 2019)

Løs lettklinker	Blokker og elementer
<ul style="list-style-type: none"> • Drenering og isolering for konstruksjoner mot grunnen • Rensing av drikkevann og forurenset vann i jordbruk • Drenering og frostsikring i vei og bane • Lydisolering i etasjeskiller • Tilslag i lettbetong • Blomsterbed • Grønne tak 	<ul style="list-style-type: none"> • Fundamentblokker • Veggelementer • Fasadeblokker • Piper

Materialelegenskaper

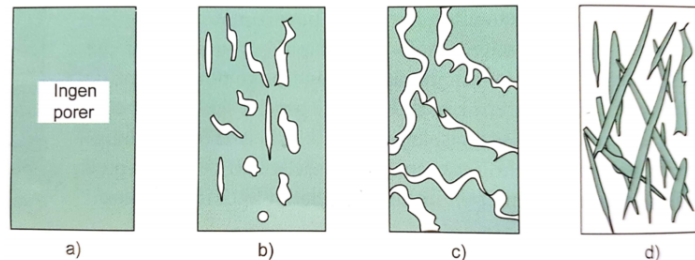
Lettklinker er et lett materiale og veier rundt 20 % av vanlige jordmasser, noe som resulterer i en fordelaktig reduksjon av jordtrykk. Romvekten for tørr, løs lettklinker varierer med korngraderingen og er henholdsvis $300\text{-}400\text{ kg m}^{-3}$ og ca. 600 kg m^{-3} for 0-32 mm og 0-2 mm. For fuktig lettklinker er den termiske konduktiviteten 0.15 W mK^{-1} og 0.11 W mK^{-1} for tørr. På grunn av skallet er kulene vannavvisende, men trekker likevel fukt stående i fritt vann. Kulene tåler derimot frost og kjemikalier, er lydisolerende, ubrennbare og er bestandig mot råte, sopp og skadedyr (Saint-Gobain, 2019).

Når lettklinker nedsenkes i vann tar de raskt opp fukt og etter 3 uker er fuktinnholdet målt til å være 27-40 vekt% i laboratoriet. I tillegg er det gjort flere feltmålinger i Norge som viser at langtidsfuktinnholdet er fra 20 til 40 vekt% avhengig av sted og forhold (Saint-Gobain, 2000).

2.2 Fukt i porøse materialer

Porøsiteten bestemmer mengden vann et materiale kan inneholde. Derfor er kunnskap om poreform, porestørrelse og porefordeling et viktig grunnlag for å forstå fukttransport og fuktbinding i materialer (Thue, 2016).

Figur 4 viser hvordan poresystem defineres ut fra materialets struktur (Thue, 2016):

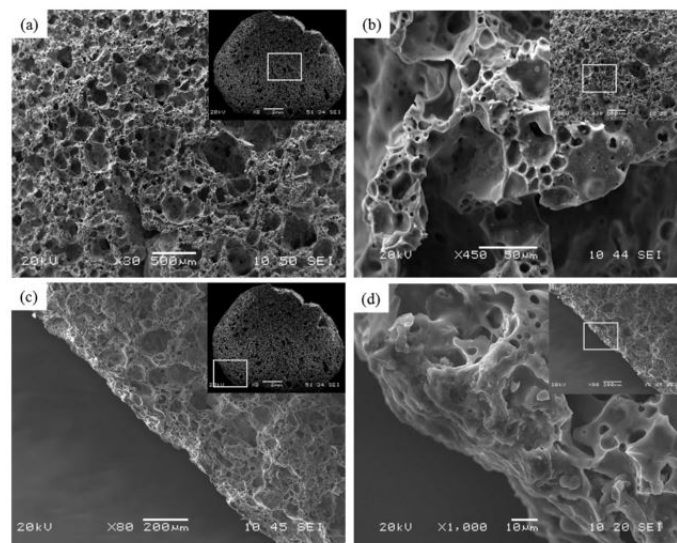


Figur 4: Defineringsdiagrammer for poresystemer (Thue, 2016)

- (a) Kompakte materialer, ikke-porøse
Glass, metall og noen plastmaterialer
- (b) Kontinuerlig faststoff med diskontinuerlig, lukket poresystem
Skumglass og lettklinker
- (c) Diskontinuerlig faststoff og porestruktur
Tre, betong og lettbetong
- (d) Diskontinuerlig faststoff med kontinuerlig poresystem
Mineralull, sand og sement

Materialer med porestruktur b, c og d betegnes som hygroskopiske materialer, de trekker til seg fuktighet fra omgivelsene og binder fukt i poresystemet.

Figur 5 viser ideell porestruktur for én lettklinkerkule. Den høye porøsiteten i kjernen ses i Figur 5a, og Figur 5b viser et forstørret bilde av kjernen hvor porene danner omtrent sfæriske former med størrelser fra 1 μm til 50 μm . Figur 5c og d viser at porestørrelsen blir mindre nærmere kuleoverflaten som utgjør det harde, keramiske skallet (Ayati, B. et al., 2018).



Figur 5: Elektronmikroskop-bilde av en lettklinkerkule (Ayati, B. et al., 2018)

Definering av fuktinnhold

Mengden fukt et materiale inneholder defineres som absolutt fuktinnhold og kan angis på forskjellige måter (SINTEF Byggforsk, 2018). Ligning 1, 2 og 3 angir henholdsvis fuktmengde per mengde tørrstoff, u [kg/kg], fuktmengde per volumenhet tørrstoff, w [kg/m³] og volum fritt vann per volumenhet tørrstoff θ [m³/m³]. Det er også normalt å angi fuktinnholdet som vekt- eller volumprosent, hvor u og θ multipliseres med 100 % og benevnes som henholdsvis [vekt%] og [vol%].

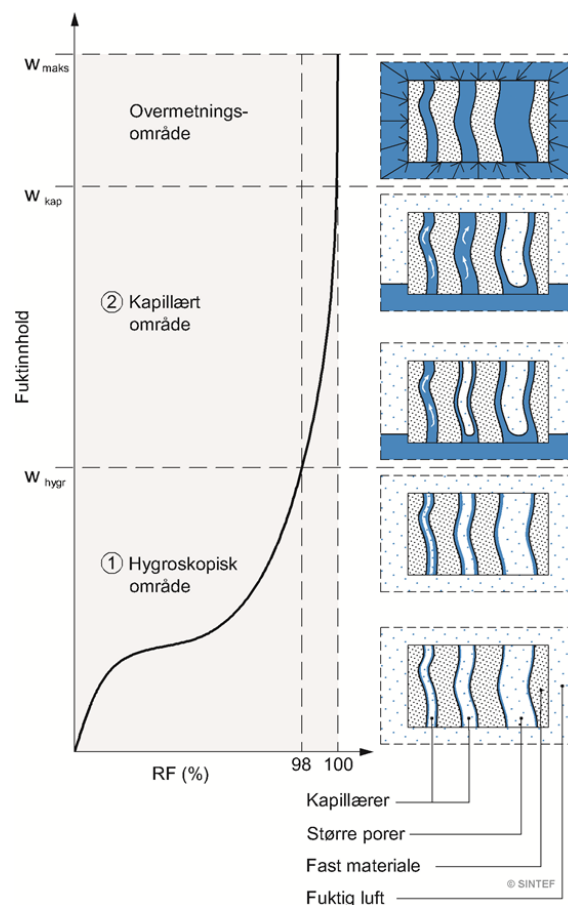
$$u = \frac{m_w}{m_0} \quad (1)$$

$$w = \rho_0 \cdot \frac{m_w}{m_0} = \rho_0 \cdot u \quad (2)$$

$$\theta = \frac{w}{1000} \quad (3)$$

der m_w er fuktmengde [kg], m_0 er mengde tørrstoff [kg] og ρ_0 er densitet av tørrstoff [kg/m³].

Hvordan materialer tar opp fukt avhenger av fuktpåvirkning, materialtype og egenskaper ved poresystemet. Figur 6 illustrerer en sorpsjonskurve og hvordan fuktighet opptrer i det hygrokroskopiske området ($0 < RF < 98\%$), ved kapillært område ($98 < RF < 100\%$) og ved overmetningsområde ($RF > 100\%$). Ved siden av sorpsjonskurven vises en poremodell hvor porene gradvis binder vannmolekyler til poreveggen når RF øker.



Figur 6: Fuktinntak i porøse materialer (SINTEF Byggforsk, 2018)

Når materialet lagres ved $RF < 98\%$ vil materialet og lufta inne i porene innstille seg denne og oppnå likevektsfuktighet. For videre oppfukning må materialet være i kontakt med fritt vann hvor de små og mellomstore porene fylles opp ved hjelp av kapillærkrefter (SINTEF Byggforsk, 2018).

2.3 Fuktmåling

For måling av fuktinnhold i materialer finnes forskjellige metoder og instrumenter som kan deles inn i tre hovedgrupper (SINTEF Byggforsk, 2015a):

- *Fuktindikatorer* som måler forskjeller i absolutt fuktinnhold.
- *Motstandsmålere og tørke/veie-metoden* som måler absolutt fuktinnhold.
- *RF-målere* som måler luftens relative fuktighet.

Fuktindikatorer

Fuktindikatorer kan brukes for alle porøse materialer og måler kun forskjellen i absolutt fuktinnhold ved overflaten eller 10-30 mm dypt. De brukes i materialer hvor overflaten ikke kan skades, eller til søk av områder med forhøyet fuktighet. Instrumentene måler kapasitansen, som forklares i delkapittel 2.6 (SINTEF Byggforsk, 2015a).

Motstandsmålere

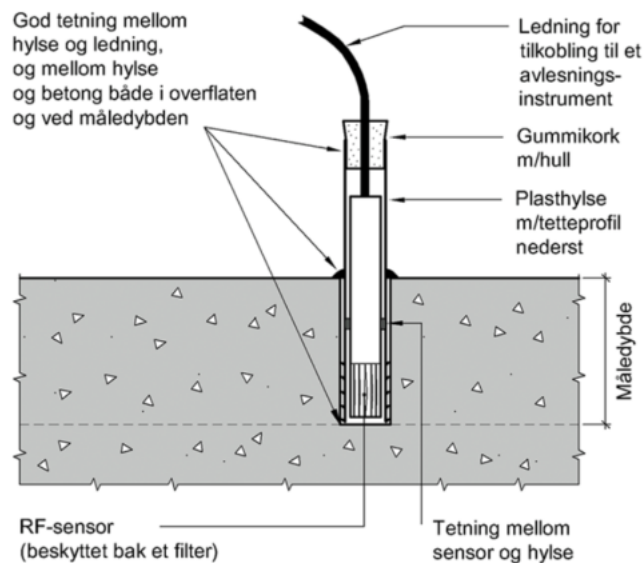
Motstandsmålere måler den elektriske motstanden mellom elektrodene som stikkes inn i materialet. Slike målere egner seg godt til trematerialer, og det finnes derfor mange dedikerte trefuktmålere av denne typen. Den kan også måle i andre porøse materialer, men gir da kun en indikasjon på forskjeller i absolutt fuktinnhold, og brukes derfor kun til søk av fuktige områder.

Tørke/veie-metoden

Tørke/veie-metoden er den mest nøyaktige metoden og brukes derfor ofte som standard målemetode og til referansemål opp mot andre målemetoder. Det er en destruktiv (ødeleggende) metode på lik linje med motstandsmålere, og gir et mål på absolutt fuktighet hvor prøvestykker blir tatt ut, veid, tørket og veid på nytt. Tørketemperaturen er vanligvis ca. $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, men for materialer sensitive for nedbrytning ved høye temperaturer bør tørkingen skje ved $40\text{-}70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nøyaktigheten for tørke/veie-metoden avhenger av vektens nøyaktighet og eventuell uttørking før veiing av våt prøve samt nedbryting av materialet hvis tørketemperaturen er for høy.

RF-målere

Måling av RF gjøres i romluft eller i hulrom i konstruksjoner. Sensoren består som regel av en hygroskopisk polymerfilm eller elektrolytt med størrelse på noen millimeter. Den måler endringen av kapasitansen i polymerfilmen eller elektrolytten ved forandring i luftfuktighet. Sensorene er ikke store nok til å plasseres inne i materialporer, men benyttes for eksempel i karbidmetoden for måling av fuktighet i betong. Som Figur 7 illustrerer, bores et hull i betongen, hvor en hylse plasseres og tettes rundt overflaten. En RF-måler plassert i hylsen innstiller seg fuktigheten til betongen og måler likevektsfuktigheten.



Figur 7: Karbidmetoden for måling av RF i betong (SINTEF Byggforsk, 2015a)

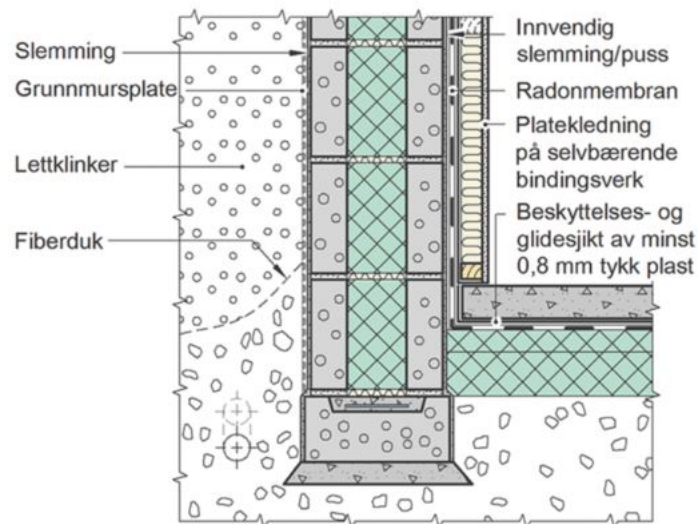
2.4 Fukt i grunnen

Den relative fuktigheten i grunnen kan antas å være ca. 100 %100, spesielt i jord over grunnvannspeilet (GVS) hvor vann trekkes opp av kapillærkreftene (Thue, 2016). Under GVS er jorda som regel mettet med vann og gir derfor direkte vanntrykk. For å unngå stående vanntrykk mot konstruksjoner i grunnen skal det derfor gjøres nødvendige tiltak for å lede bort sigevann og hindre at fukt trenger inn i konstruksjonene (Dibk, 2017). Som vist i Figur 8, kan de nødvendige tiltakene gjøres med drenerende og trykkbrytende lag med lettklinker. Lettklinker skilles fra stedlige masser med fiberduk for å unngå forslamming av drensaget og drensøret. Grus og pukkk kan også benyttes som drenerende masser. For å hindre oppsug av vann så legges det et kapillærbrytende sjikt av grunnmursplate eller drenerende isolasjonsplater på vegg.

2.5 Jord

Jord er et trefasesystem bestående av faststoff, luft og vann. Mengden vann i jorda betegnes som jordfuktighet og har stor innvirkning på de hydrologiske og biologiske prosessene i materialet. Dette påvirker bygnings- og geoteknisk prosjektering, jordbruk og overvannshåndtering (Dobriyal, P. et al., 2012).

Jordarter inndeles etter karakteristiske egenskaper som kornfordeling, sortering, lagdeling, pakking og materialets rundhet (Jørgensen, P., Sørensen, R. & Prestvik, O., 2013). Klassifisering av jord skjer vanligvis etter sammensetning av jordarter. Mineraljord og organisk jord er de to hovedgruppene som jordarter klassifiseres innenfor. Mineraljord deles ofte inn etter kornstørrelsessammensetning - jordartens kornfordeling. Dette bestemmes med en kornfordelingsanalyse ved bruk av en siktesats med kvadratiske maskevidder på 63, 2, 0,063 og 0,002 mm. De forskjellige kornfraksjonene etter størrelse er gitt i tabell 2.

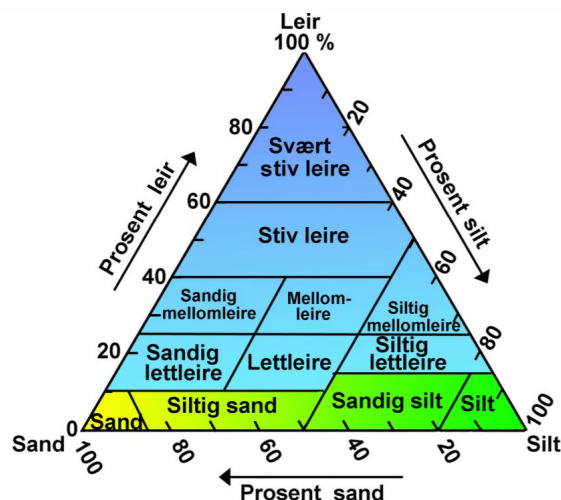


Figur 8: Vegg mot terreng av lettklinkerblokker med tilbakefylling av lettklinker (SINTEF Byggforsk, 2015b)

Tabell 2: Fraksjoner etter kornstørrelse (Jørgensen, P., Sørensen, R. & Prestvik, O., 2013)

Fraksjon	Kornstørrelse
Blokk	> 63 mm
Grus	63 mm - 2 mm
Sand	2 mm - 0,063 mm
Silt	0,063 mm - 0,002 mm
Leir	< 0,002 mm

Fordelingen av innholdet for de tre fineste fraksjonene utgjør hvilken jordart det er snakk om. Figur 9 illustrerer et klassifiseringssystem som gir bruksnavn på de ulike jordartene etter innhold av sand, silt og leir. Når jorda inneholder mindre enn 10 % leir, bestemmes bruksnavnet av mengdeforholdet mellom sand og silt (Jørgensen, P., Sørensen, R. & Prestvik, O., 2013).



Figur 9: Jordarters bruksnavn etter innhold av leir, silt og sand (Jørgensen, P., Sørensen, R. & Prestvik, O., 2013)

2.6 Fukt og fuktmålinger i jord

Fuktinnholdet i jorda avhenger av struktur, faststoff, topografi, vegetasjon og menneskeskapt infrastruktur, og varierer fra tørr til mett tilstand. Jordfuktigheten kan deles inn i tre former (Briggs, 1897):

- *Gravitasjonsfuktigheten* er fritt vann som dreneres gjennom jordlaget ved hjelp av gravitasjon. Dette vannet renner gjennom i makroporene, som er større hulrom mellom jordpartiklene, og dreneres normalt bort etter 2-3 dager etter nedbørsperioder, avhengig av jord- og porestruktur.
- *Kapillærfukt* er vann som suges opp ved hjelp av kapillærkreftene gjennom mikroporene i jorda. Det er kapillærfukten som ene og alene er ansvarlig for de forskjellige samhandlingene mellom jord og miljø.
- *Hygroskopisk fukt* er en tynn vannfilm rundt overflaten på jordpartiklene. Vannmolekylene som utgjør vannfilmen er bundet til jordpartiklene av de sterke adhesjonskreftene. Leire vil kunne inneholde mye hygroskopisk fukt grunnet et mye større overflateareal enn for eksempel sand.

Andre forhold som har innvirkning på fuktinnholdet i jord er blant annet jordpartikkelgradering og komprimeringsgrad, jordstruktur, porøsitet og porevæskeegenskaper for å nevne noen.

Hydrologiske- og biologiske prosesser på jorda er av stor betydning for blant annet jordbruket gjennom planlegging av vanning, gjødsling og dyrking av avlinger (Vaz, C.M.P. et al., 2013). På grunn av dette har det blitt utviklet mange forskjellige målemetoder og -instrumenter. Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S. (2014) kategoriserer metodene i klassiske og moderne måleteknikker. Tørke/veie-metoden og kalsiumkarbidmetoden betegnes som klassiske måleteknikker. Måling av jordas vannpotensial og permittivitet og radioaktive måleteknikker derimot ansees som moderne teknikker.

Tørke/veie-metoden

Tørke/veie-metoden er standard målemetode for bestemmelse av fuktinnhold i jord (Robinson, D. A. et al., 2008), og innebærer samme prinsipp som for måling i materialer. Normalt tas prøver på 100 g eller mindre, veies og tørkes ved 105 °C. For organisk jord og jord som inneholder mye gips (kalsiumsulfat) senkes tørketemperaturen til rundt 70 °C. Prøvene tørkes helt til det ikke er noe videre, signifikant vektneidgang. Dette er normalt fra 10 til 24 timer.

Måling av vannpotensial

For måling av vannpotensial brukes ofte et tensiometer, som består av en tett, hul sylinder fylt med vann. Nederst i sylindere er det en fuktig, keramisk kopp og i toppen er det festet en vakuummåler. Vakuummåleren måler undertrykket som oppstår når instrumentet plasseres i jorda og vannet i den keramiske koppen likestilles vanntrykket i porene (Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S., 2014).

Måling av permittivitet med EM-sensorer

Permittivitet, ϵ er forholdet mellom elektrisk flukstetthet (dielektrisk forskyvning), D og feltstyrke, E , hvor $\epsilon = D/E$. Permittiviteten i tomt rom er $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ betraktes som en naturkonstant (Grøn, 2018).

Det er den relative permittiviteten, ϵ_r , forholdet mellom permittiviteten for tomt rom og fast stoff som måles av dielektriske måleteknikker. ϵ_r er 1 for luft og rundt 80 for vann og 5 for de fleste mineraljordtyper. Dermed varierer ϵ_r mye med fuktinnholdet i jorda og det er denne egenskapen som benyttes for elektromagnetiske sensorer (EM-sensorer) (Robinson, D. A. et al., 2008).

EM-sensorer er en samlebetegnelse for alle sensorer med dielektrisk måleteknikk nevnt ovenfor. De benytter kapasitans, impedans og overføringslinjemetoder. TDR (Time Domain Reflectometry) er godt brukte metoder for måling av fuktinnhold i jord. Siden TDR opererer i et høyere frekvensområde ($>0,5\text{GHz}$) og måler både fuktinnhold og elektrisk konduktivitet, har denne metoden fått mer oppmerksomhet og blitt tidligere utviklet enn de andre kapasitanssensorene. Både TDR og TDT (Time Domain Transmission) består av en sonde med én eller flere elektroder, som installeres i jorda. En elektromagnetisk puls sendes gjennom elektrodene og den relative permittiviteten kan måles etter hvor lang tid pulsen bruker gjennom elektroden.

Kapasitans- og impedanssensorer opererer normalt i 100 MHz-området og fungerer på omtrent samme måte. Kapasitanssensorer blir også omtalt som FDR (Frequency Domain Reflectometry). Den elektriske kapasitansen for en kondensator er avhengig av dielektrikumet, som i dette tilfellet er jord liggende mellom to elektroder eller mellom et ledningsnett plassert nede i jorda. "Kondensatoren" blir koblet til en oscillator og danner en elektrisk krets. En elektromagnetisk puls sendes gjennom kretsen, og frekvensen eller spenningen som måles kan relateres til fuktinnholdet (Dobriyal, P. et al., 2012).

Radioaktive måleteknikker

Ved radioaktive måleteknikker brukes nøytron- eller gammastråling. Nøytronpartikler har ingen ladning og blir derfor ikke påvirket av elektromagnetiske felt. Når partiklene sendes ut går de i en rett linje så fremt de ikke kolliderer med nukleonene i atomkjerner. En direkte kollisjon med nukleoner i hydrogenatomene vil termalisere nøytronene slik at de mister all sin energi. Til sammenligning, mister nøytronene henholdsvis 22, 14, 13 og 7 % av energien ved kollisjon med oksygen, silisium, aluminium og jern. Kollisjonene fører også til at nøytronene skifter retning, og det er dermed mulig å telle antall termaliserte nøytroner som returnerer. Dette gir et godt estimat på antall hydrogenkjerner i jorda, som igjen kan relateres og kalibreres opp mot fuktinnholdet (Robinson, D. A. et al., 2008).

Gamma-metoden baserer seg på måling av absorpsjon av gammastråling i jorda, som er avhengig av fuktinnholdet. Denne metoden er begrenset til en dybde på rundt 25 mm, har høy nøyaktighet, men i likhet med nøytronsonder kan være helseskadelig å jobbe med på grunn av radioaktiv stråling (Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S., 2014).

2.7 Målenøyaktighet

RMSE

Målenøyaktighet for de ulike måleteknikkene oppgis ofte som [%] eller [m^3/m^3] av RMSE (Root Mean Square Error), som er et forhold på hvor mye måledata avviker fra reelle verdier - ofte målt med tørke/veie-metoden. RMSE gitt ved ligning 4 angir altså nøyaktigheten til de målte verdiene i forhold til reelle verdier, og beregnes ut fra denne formelen:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (y_n - x_n)^2}{n}}, \quad (4)$$

der y_n er reelle verdier, x_n er observert, målt verdi og n er totalt antall målte verdier.

Tørke/veie-metoden kan normalt ha et avvik på 1% eller $0,01 m^3/m^3$ avhengig av utførelse og nøyaktigheten på vekta. For elektromagnetiske sensorer blir et måleavvik på 2% eller mindre sett på som veldig bra (Robinson, D. A. et al., 2008).

Repeterbarhet

Ved siden av RMSE, er tallet på repeterbarhet vel så viktig med tanke på evaluering av ytelse. Repeterbarhet angir hvor godt en serie med måledata stemmer overens med hverandre når betingelsene er mest mulig like. Målingene gjøres med samme utstyr, av samme person, av samme materiale og i samme laboratorium. Repeterbarhetsundersøkelser gjøres ofte for å validere en målemetode, og ved å uttrykke måleusikkerheten ved metoden (Halbo, 2016).

Repeterbarhet angis ofte som et spredningsmål ut fra spredningen i funnene, enten som middelavvik, m gitt ved ligning 5 eller standardavvik, s^2 gitt ved ligning 6 (snl.no, 2017).

$$m = \frac{\sum_{n=1}^n |x_n - \bar{x}|}{n} \quad (5)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{n=1}^n (x_n - \bar{x})^2}{n} \quad (6)$$

der x_n er observert verdi fra målingene, \bar{x} er gjennomsnittet og n er totalt antall målte verdier.

R-kvadrat

R-kvadrat, gitt ved ligning 7 blir også brukt til å bestemme hvor godt måledata stemmer overens med reelle verdier.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n (y_n - x_n)^2}{\sum_{n=1}^n (y_n - \bar{y})^2}, \quad (7)$$

der y_n er reelle verdier ved n -te måling, x_n er målte verdier, \bar{y} er gjennomsnittet av de reelle verdiene og n er antall målinger.

R^2 - verdier som nærmer seg 1 indikerer god korrelasjon mellom målte og reelle verdier, mens verdier som går mot 0 indikerer dårlig korrelasjon.

3 Metode

Dette kapittelet beskriver metoden som ble benyttet i arbeidet med oppgaven. Tyngden ligger i et omfattende litteratursøk for utvelgelse av relevant forskningslitteratur knyttet til problemstillingen. Fremgangsmåten for litteraturstudien presenteres nedenfor.

Det ble gjennomført en omfattende og systematisk litteraturstudie med mål om å svare på forskningsspørsmålene beskrevet i kapittel 1. Den systematiske litteraturstudien baserer seg på prinsipper beskrevet av O'Brien, A.M. & Mc Guckin, C. (2016). Metoden som følges har en vitenskapelig og bestemt fremgangsmåte slik at oppgaven kan la seg replikere og sjansene for bias minimeres. Bias beskrives her som skjevhet i form av forventning og vurderingsgrunnlag hos forfatteren.

Databasene som ble brukt i denne litteraturstudien er søkemotorene Google Scholar og Science Direct. Dette er store søkemotorer som genererer mange treff, og utvelgelsen av artikler måtte dermed begrenses. Derfor ble kun de 100 første treffene lest og undersøkt og videre plukket ut etter grad av relevans i tittel, nøkkelord og abstrakt.

3.1 Definerings av søkeord og valg av søkestrenger

Det første steget i metoden var å definere hvilke søkeord som skulle benyttes og hvordan de burde kombineres til en søkestreng som ga det maksimale antall relevante treff. Utvelgelsen av de første søkeordene ble gjort med bakgrunn fra prosjektoppgaven og med hjelp fra medveileder. Det ble videre gjort noen overordnede testsøk, og søk nr. 1, 2 og 3 i Tabell 4 er eksempler på dette. Nr. 1 og 2 ble gjort helt i startfasen, hvor treffene ga en pekepinn på hvilke ord som gikk igjen i "tittel" og "nøkkelord".

Siden oppgaven omhandler fuktmåling i jord og løs lettklinker, ble det valgt ut ord i tre kategorier; fukt, måling og materiale. Materiale ble delt inn i jord, granulære materialer og lettklinker. Tabell 3 viser hvilke ord og synonymer som ble brukt i søkene.

Tabell 3: Kategori, ord og synonymer brukt i søkene

Kategori	Nøkkelord og synonymer
Fukt	Moisture, moisture content, water content
Måling	Measure, measurement, monitor, monitoring, track
Jord, masser	Soil, gravel, crushed gravel, crushed rock, granular fill material, loose fill
Granulære, porøse materialer	Granular material, Porous aggregate, Coarse aggregate
Lettklinker	LECA, Light Weight Clay Aggregate, Exclay, Liapor, Argex

For å komme frem til de søkestrengene som ga flest og mest relevante treff, ble det gjort flere enkeltsøk med ulike søkeord og kombinasjoner. Søk nr. 3 er et eksempel på dette. Dette søket ga en god indikasjon på hvilke ord som gikk igjen, og ga i tillegg sju utvalgte artikler som ble gransket nærmere. I tillegg ble det observert at Science Direct ikke godtok flere enn åtte søkeord, og de neste søkene ble derfor begrenset til dette antallet ord i søkestrengene for å gjøre arbeidet mer effektivt og oversiktlig. Derfor måtte de ordene som viste seg å gi færrest treff sorteres ut plukket ut.

Tabell 4 viser alle de systematiske søkene, hvor søkestreng nr. 4 blir kombinert med de påfølgende søkestrengene. Første kombinasjon består av to strenger, mens de resterende tre strenger. Med denne fremgangsmåten favner søkene i første iterasjon bredt og spisser seg videre inn på de forskjellige kategoriene. Med 3 millioner treff i Scholar på "Moisture AND (Measurement OR Monitor)" indikerer

Tabell 4: Oversikt over hvilke søkord som er benyttet og antall treff, samt utvalgte artikler fra søkemotorene Scholar og Science Direct

Søkeord		Scholar		ScienceDirect		NR
		Treff	Utvalgt	Treff	Utvalgt	
"Soil moisture" AND "Measurement"		132 000	2	27 152	1	1
"State of the art" AND "Soil water content" AND "Moisture measurement" AND "Moisture monitoring"		232	2	-	-	2
Moisture AND (Measurement OR monitor OR Track) AND (Soil OR "Granular material" OR "Granular fill material" OR "Porous aggregate" OR "Loose Fill" OR "Coarse aggregate" OR Gravel OR "Crushed gravel")		1 770 000	7	-	-	3
Moisture AND (Measurement OR Monitoring)		3 090 000	-	538 934	-	4
AND	"Moisture sensor"	37 100	-	3 013	4	5
AND	Soil	2 680 000	5	155 011	-	6
	AND "Moisture sensor"	18 300	6	2 179	-	7
AND	("Granular material" OR Gravel OR "Crushed rock")	176 000	4	22 431	-	8
	AND "Moisture sensor"	2190	20	297	2	9
AND	("Granular fill material" OR "Porous aggregate" OR "Loose Fill")	4450	-	937	-	10
	AND "Moisture sensor"	66	2	7	-	11
AND	(Leca OR "Light expanded clay aggregate" OR "Expanded clay" OR Liapor)	5100	-	1 232	6	12
	AND "Moisture sensor"	71	1	17	1	13
SUM UTVALGTE			49		14	

dette at det finnes mye forskninglitteratur på fuktmåling generelt, og nesten tilsvarende mye på jordfuktmåling spesielt. Tabellen viser også at det finnes en god del litteratur på lettklinker, men treffene var i hovedsak av ikke-relevant betydning for oppgaven, da majoriteten blant annet omhandlet lettbetong.

3.2 Utvalgelse og kategorisering av artikler

Artiklene ble plukket ut etter relevans i tittel, nøkkelord og abstrakt. Det ble totalt plukket ut 79 artikler, 63 direkte fra søkene, 16 via kjedesøk frem- og bakover i tid gjennom artiklenes referanseliste og hvilke artikler som hadde sitert. Artiklene ble deretter kategorisert etter hvilken type studie den omhandlet, og hvilke type målemetoder som ble benyttet i studien. Tabell 5 viser kategoriseringen.

Tabell 5: Kategorier funnene ble systematisert i, hvor mange artikler funnet innen hver kategori og antall artikler benyttet i oppgaven

Kategori	Plukket ut	Benyttet
Sammenligningsstudier av alle fuktmålemetoder i jord	4	3
Sammenligning av EM-sensorer og sensorer generelt	30	5
Fuktmålinger gjort i lettklinker og liknende materialer	15	4
DTS og HP-metode	12	2

Artiklene som ble plukket ut og benyttet i oppgaven ble vurdert og kvalitetsjekk etter blant annet troverdighet og etterprøvbarhet. Metod delen og hvor godt denne var beskrevet var derfor et viktig element i utvalgelsesprosessen, spesielt for denne oppgaven som potensielt skal etterprøve metodene. Grad av troverdighet ble blant annet vurdert etter hvilke journaler som hadde publisert artiklene, og noen av de anerkjente journalene var:

- Journal of International Measurement Confederation
- Journal of Hydrology
- Applied Engineering in Agriculture
- American Society of Agricultural and Biological Engineers
- Vadose Zone Journal
- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement
- Journal of Geophysical Research
- Journal of Irrigation and Drainage Engineering

3.3 Evaluering av metoden

Fordelene ved denne metoden er at den ikke bare sikter på å svare på forskningsspørsmålene, men også å identifisere all relevant forskning knyttet til temaet i oppgaven. Dette oppnås ved nøye utvalgte søkeord, som igjen kombineres i søkestrenger benyttet i søkedatabasene.

Ulempen ved metoden er at forfatterens kunnskap og erfaring på området er begrenset, og viktige artikler kan derfor ha uteblitt. I tillegg ble kun de 100 første artiklene vurdert, som igjen gir en risiko for at de treffene som ikke ble vurdert inneholdt relevante studier. Men det generelle inntrykket fra søkene indikerer at det finnes lite forskning på fuktmåling i lettklinkerfylling, da treffene ble gradvis mindre relevante lenger ut i lista. Sannsynligheten for at høyest relevante artikler har uteblitt er forholdsvis liten.

4 Resultater

Dette kapittelet presenterer litteraturen som er funnet relevant for problemstillingen. Delkapittel 4.1 beskriver fordeler og ulemper ved bruk av ulike måleteknikker i jord og delkapittel 4.2 presenterer de relevante forskningsartiklene som omhandler EM-sensorer og måling i felt. Det er utarbeidet korte resymeer for hver artikkel der det viktigste og mest relevante fra formål, metode og resultater blir gjengitt. Til slutt presenteres HP- og DTS-metoden i delkapittel 4.4.

4.1 Målemetoder for jord, fordeler og ulemper

Det ble funnet 15 sammenligningsstudier av de totalt 79 utvalgte artiklene fra litteraturstudien. 4 av disse 15 beskriver og sammenligner de mest vanlige målemetoder som finnes for fuktmåling i jord. Tabell 6 viser de tre artiklene som ble plukket ut og som benyttes i dette delkapittelet.

Tabell 6: Artikler plukket ut og benyttet for sammenligning og utvelgelse av målemetode

Tittel	Kilde
Application of soil moisture sensors in agriculture: A review	(Garg, A., Munoth, P. & Goyal, R., 2016)
A critical review of soil moisture measurement	(Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S., 2014)
A review of the methods available for estimating soil moisture and it,s implications for water resource management	(Dobriyal, P. et al., 2012)

Garg, A., Munoth, P. & Goyal, R. (2016) beskriver noen av fuktmålemetodene som finnes for jord, og påpeker viktigheten av nøyaktige, kontinuerlige målinger av avlinger med vanningsanlegg i jordbruket. Siden metodene har forskjellige fordeler og ulemper i knyttet til det tiltenkte bruksområdet, ble det i denne oppgaven forsøkt å kartlegge dette for å gjøre valget av målemetode enklere.

Både Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S. (2014) og Dobriyal, P. et al. (2012) sammenlignet også ulike målemetoder, hvor formålet var henholdsvis å gi en kritisk vurdering av alle metodene og å sammenligne og identifisere de metodene som finnes for fuktmåling i skogkledde områder. Begge studiene evaluerte metodene etter måleeffektivitet og -nøyaktighet, og så på påvirkningen av jordspesifikke parametere som mineralogi, saltholdighet, porøsitet, temperatur, innhold av organisk materiale og jordstruktur.

4.1.1 Tørke/veie - metoden

Tørke/veie - metoden anses som standard målemetode og blir derfor ofte brukt som referansemål og til kalibrering av ulike målesensorer. Den er den mest nøyaktige metoden i tillegg til å være enkel og kostnadseffektiv. Målingene påvirkes heller ikke av jordstruktur og saltholdighet. Ulempene ved metoden er at prosessen er tidkrevende, destruktiv og passer dårlig for kontinuerlige, parallelle målinger av større områder ute i felt (Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S., 2014).

4.1.2 Tensiometer

Med tensiometer kan vannpotensialet eller vanntrykket i jorda måles. Det er en kostnadseffektiv metode, men er ubrukbar i tørr jord og har behov for regelmessig tilsyn/vedlikehold (Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S., 2014). Metoden har en responstid på 2-3 timer, kan brukes i automatiserte vanningsanlegg og er derfor også en mye brukt metode innen jordbruk (Garg, A., Munoth, P. & Goyal, R., 2016).

4.1.3 GMS

GMS (Granular Matrix Sensor) er en videreutvikling av tensiometere hvor automatisering i felt også kan oppnås. Den består av en sensor som måler resistansen mellom to elektroder. Metoden er nokså nøyaktig, men har høy sensitivitet for jordtype og har dårlig respons på tørr jord. I tillegg er den lite nøyaktig i sandig jord. Metoden er ofte brukt i avlinger for bomull, løk, poteter og mais (Garg, A., Munoth, P. & Goyal, R., 2016).

4.1.4 EM-sensorer

EM-sensorer er den meste brukte teknikken for måling av fuktighet i jord, og det finnes derfor mange forskjellige leverandører og typer sensorer. Sensorene benytter seg av forskjellen i jordas permittivitet, og deles inn etter hvordan denne måles. TDR-sensorer måler tiden en elektromagnetisk puls bruker langs en sonde installert i jorda, mens kapasitans- og impedanssensorer måler spennings- og frekvensrespons.

Dobriyal, P. et al. (2012) konkluderer med at TDR-sensorer er økonomiske og gir nøyaktige og øyeblikkelige målinger. Samtidig påpeker de at sensorene er relativt uavhengig av mineralkomposisjon, temperatur og saltholdighet, men at de trenger jordspesifikk kalibrering for å oppnå pålitelige målinger. Siden TDR-sensorene har høy nøyaktighet blir de ofte brukt for måling av referansefuktverdier for sammenligning og evaluering av billigere kapasitans- og impedanssensorer.

Kapasitans- og impedanssensorer er ikke like uavhengig som TDR-sensorene for jordspesifikke parametre, temperatur og saltholdighet siden de opererer i et lavere frekvensområde.

4.1.5 Nøytronsonder

Nøytronsonder gir raske og nøyaktige målinger og har en responstid på bare 1-2 minutter (Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S., 2014). I tillegg måler det et større jordvolum enn EM-sensorer og kan gi dybdeprofil på fuktinnholdet. Denne metoden er den mest nøyaktige etter tørke/veie-metoden. Den høye innkjøpsprisen og helserisikoen forbundet med radioaktiv stråling har derimot bregrenset bruken av nøytronsonder. Utstyret er i tillegg vanskelig å flytte rundt og derfor lite portabel.

4.2 Sammenligningsstudier av EM-sensorer

11 av de 15 sammenligningsstudiene sammenligner EM-sensorer opp mot hverandre. Spesielt sammenlignes de billigere FDR- og kapasitanssensorene mot en dyrere TDR-sensor. Studiene evaluerer instrumentene etter målenøyaktighet, brukervennlighet, styrker og svakheter. Dette delkapittelet tar utgangspunkt i artiklene plukket ut i Tabell 7 av de 11 studiene som sammenligner EM-sensorer. Artiklene gjengis etter formål, metode og resultater.

Tabell 7: Artikler plukket ut og benyttet for sammenligning av EM-sensorer

Tittel	Kilde
Time-Domain and Frequency-domain reflectometry type soil moisture sensors performance and soil temperature effects in fine- and coarse -textured soils	(Zhu, Y. et al., 2019)
Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors	(Vaz, C.M.P. et al., 2013)
Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland	(Mittelbach, H., Lehner, I. & Seneviratne, S. I., 2012)
Soil moisture monitoring for climate research: Evaluation of a low-cost sensor in the framework of the Swiss Soil Moisture Experiment (SwissSMEX) campaign	(Mittelbach, H., Casini, F. et al., 2011)
Soil Moisture Measurements: Comparison of Instrumentation Performances	(Francesca, V. et al., 2010)

4.2.1 Ytelse og temperatureffekter for TDR- og FDR-sensorer

Formål

Zhu, Y. et al. (2019) så på seks forskjellige TDR- og FDR-sensorer for måling av volumetrisk fuktinnhold i to forskjellige jordtyper. Sensorene ble sammenlignet med referanse-fuktinnhold målt med en nøytronsonde. Formålet med studien var å kvantifisere ytelsen og utvikle kalibreringsparametere som kan benyttes i lignende jordtyper. Studien så i tillegg på temperaturavhengighet og repeterbarhet. Nullhypotesen til studien var at sensorene målte likt med nøytronsonden og at jordtemperaturen ikke hadde noen påvirkning på måleresultatene.

Metode

Det ble benyttet seks forskjellige målesensorer:

- 5TE (Decagon, 2016b)
- 10HS (Decagon, 2016a)
- SM150 (Delta-T, 2016)
- CS616 og CS620 (Campbell, 2016)
- TDR300 (Spectrum, 2009)

Alle målingene ble sammenlignet med nøytronsonden, Troxler model 4302 Depth Moisture Gauge. Sensorene er listet opp i Tabell 8 med teknisk informasjon, og Figur 10 viser hvordan målingene ble gjort. Dataloggere som ble benyttet var EM50, DL6 og CR10X. For at repeterbarheten kunne evalueres ble det gjort målinger hver time og eksperimentet ble utført to ganger, siden det kun ble benyttet én sensor av hver type.

Tabell 8: Produktinformasjon om sensorene brukt i studien (Zhu, Y. et al., 2019)

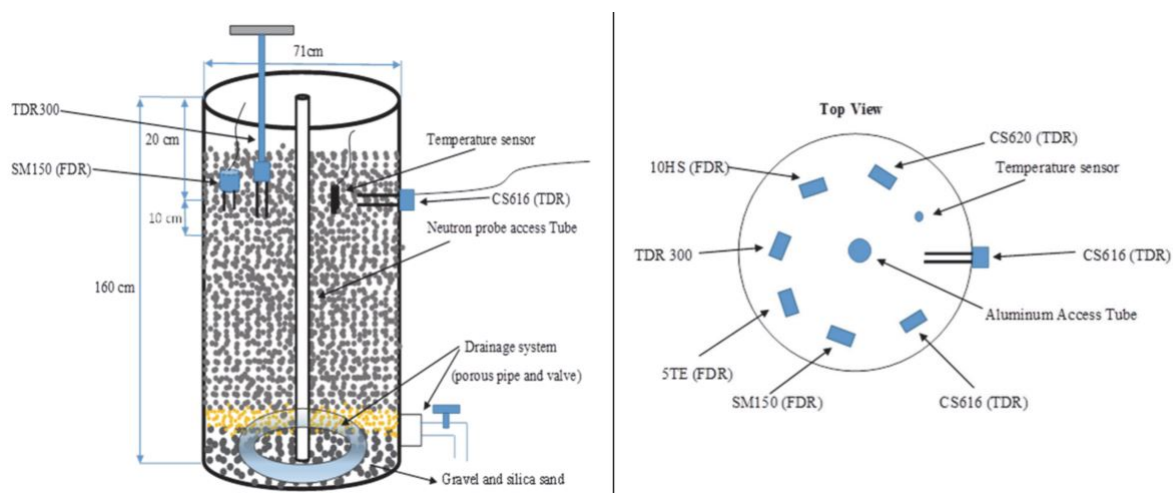
Sensor	Sondelengde [cm]	Nøyaktighet [vol%]	Oppløsning [m ³ /m ³]	Måleradius [cm]
5TE	5,0	±3,0	0,08	5,0
10HS	10	±3,0	0,08	5,0
SM150	5,0	±3,0	Utilgjengelig	5,0
TDR300	3,75-20	±3,0	0,1	3,0
CS616	30	±2,5	0,1	5,0
CS620	20	±3,0	1,0	3,0

Det ble målt i to forskjellige jordtyper:

- Siltig leire med 31 % sand, 17 % leire og 52 % silt
- Siltig sand med 77 % sand, 7 % leire og 16 % silt

Metningspunkt og bulkdensitet var på henholdsvis 0,49 m³/m³ og 1,35 g/cm³ for siltig leire og 0,42 m³/m³ og 1,54 g/cm³ for siltig sand. Det ble brukt to 1,6 m høye sylindriske lysimetre med diameter på 0,71 m.

Som vist i Figur 10 ble det laget et dreneringssystem i bunnen av et kveilet drensrør som ble koblet til et utløp. Utløpet bestod av en kontrollventil slik at det var mulig å kontrollere dreneringen. For å sikre god drenering ble det i bunnen over røret lagt et 17,5 cm tykt lag med grus og 7,5 cm lag med sand. I midten av lysimeteret ble det plassert et tilgangsrør av aluminium for nøytronsonden. Sensorene ble installert vertikalt 20-30 cm under overflaten, bortsett fra den ene CS616 som ble plassert horisontalt på samme nivå.



Figur 10: Skjematiske framstillinger av jord-lysimeter og orientering av sensorene (Zhu, Y. et al., 2019)

Fuktmålinger ble gjort i to tørkesykluser for hver jordtype. For hver syklus ble lysimetrene vannet til nær metningspunkt, og repetert to til tre ganger for å sikre en uniform fordeling av fuktinnholdet i prøvene. Målingene ble deretter utført når lysimetrene naturlig tørket ut.

Resultater

Måleresultatene viste at de ulike måleinstrumentene var signifikant forskjellig fra nøytronsonden i forhold til målenøyaktighet. Den beste sensoren i siltig leirjord var 5TE sensoren som hadde en RMSE på $0,041 \text{ m}^3/\text{m}^3$ fra nøytronsonden. Videre ble sensorene rangert fra høy til lav ytelse: TDR300 (Leirmodus), CS616 og 10HS, SM150, TDR300 (Standard modus). For leirig sand kom CS616 best ut med en RMSE på $0,014 \text{ m}^3/\text{m}^3$, for så 5TE, CS616 (V), TDR300 (Standard modus), SM150, og 10HS.

Når det volumetriske fuktinnholdet var nær feltkapasiteten, sank ytelsen for de fleste sensorene. Alle sensorene underestimerte fuktinnholdet ved høye temperaturer. Videre fant de at TDR sensorene var mer sensitive til jordtemperatur enn FDR-sensorene. Resultatene påpeker viktigheten av spesifikk jordkalibrering for hver sensor.

4.2.2 Evaluering av åtte EM-sensorer i syv forskjellige jordtyper i laboratorium

Formål

Vaz, C.M.P. et al. (2013) har med sin litteraturstudie kartlagt flere av EM-sensorene som finnes. Tabell 9 gir informasjon om de ulike sensorene, samt antall artikler som inkluderer de ulike typene. Med dette viser de at det finnes mye forskning som ser på én enkelt sensor testet i forskjellig jord, men påpeker videre at det mangler studier som sammenligner ytelsen for de ulike måleinstrumentene ved bruk av leverandørkalibrering. Formålet med denne studien var derfor å evaluere standard leverandørkalibrering for åtte kommersielle EM-sensorer i syv forskjellige velkarakteriserte og teksturvarierende jordtyper. I tillegg sammenligner de leverandørkalibrering mot jordspesifikkalibrering.

Ytelsen for åtte veletablerte sensorer ble testet i sju jordtyper. Både evaluering av leverandørkalibrering og påvirkning av jordegenskaper for EM-målingene ble undersøkt. Utfordringen knyttet til denne studien var å utvikle en metode som kunne brukes for alle måleinstrumentene i alle de forskjellige jordprøvene, da sensorene har forskjellig geometri, antall og lengde på sondene og ulikt målevolum, som Tabell 10 og Figur 11 viser.

Metode

Måleinstrumenter benyttet i studien er listet opp i Tabell 10. Alle målingene ble gjort i laboratorium med en omgivende temperatur på $22,3 \pm 0,9^\circ\text{C}$. EM-sensorene ble koblet til en CR1000 datalogger fra Campbell Scientific, med unntak av TDR100-sensoren hvor dataen ble overført med PCTDR-software på en PC, og for wet-2 en GP1-datalogger fra Delta-T.

Tabell 9: Liste over hvilke målesensorer som var tilgjengelige i 2015 (Vaz, C.M.P. et al., 2013)

Sensor	Leverandør	Prinsipp	f[GHz]	Sensor outputs	Artikler
TDR 100	Campbell	TDR	1,450	ε, EC_b	–
CS616	Campbell	TLO	0,175	P	17
ThetaProbe	Delta-T	I	0,100	V	39
SM300	Delta-T	I	0,100	V, T	2
wet-2	Delta-T	C	0,020	ε, EC_b, T	13
5TE	Decagon	C	0,070	e, Ecb, T	9
10HS	Decagon	C	0,070	V	4
Hydra Probe	Stevens	I	0,050	ε, EC_b	21
EC-5	Decagon	C	0,070	V	12
CS650/655	Campbell	TLO	0,175	ε, EC_b, T	-
PR1/6;PR2/6	Delta-T	C	0,100	V	6
Trime	Mesa	TLO	1,000	V	10
Diviner2000	Santek	TDR	0,25-0,29	count	9
EnviroSCAN	Santek	C	0,10-0,15	count	17
EasyAg	Santek	C	-	-	2
Watermark	Irrrometer	R	-	R	26
Aqua-Pro	-	C	-	V	-
Digital TDT	Acclima	TDT	1,230	ε, EC_b, T	10
Gro-Point	ESI	TDT	-	Current	1
TDT Aquaflex	-	TDT	-	V	-
Virrib AMET	-	-	-	-	5
EC-20	Decagon	C	0,005	V	11
EC-10	Decagon	C	0,005	V	4
CS615	Campbell	TLO	0,044	P	15
SM200	Delta-T	I	0,100	V	3
LOM/RS	Easy Test	TDR	-	-	2

Tabell 10: Teknisk informasjon for hver sensor benyttet i Vaz, C.M.P. et al. (2013)

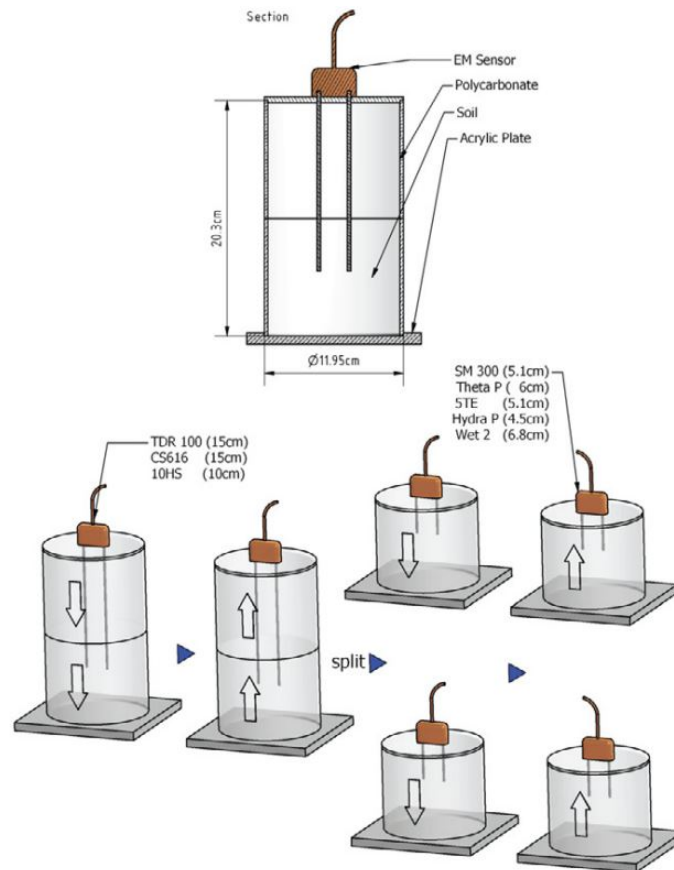
Sensor	Antall son- der	Sondelengde [cm]	Målevolum [cm ³]	Målediameter [cm]	Brukermanual
TDR100	3	15,0	-	4,4	(Campbell, 2015)
CS616	2	30,0	3740	12,6	(Campbell, 2016)
Theta P.	4	6,0	75	4,0	(Delta-T, 2017)
Hydra P.	4	4,5	32	3,0	(Stevens, 2018)
SM300	2	5,1	100	5,0	(Delta-T, 2014)
wet-2	3	6,8	500	9,7	(wet-2)
5TE	3	5,2	300	8,6	(Decagon, 2016b)
10HS	2	10,0	1100	11,8	(Decagon, 2016a)



Figur 11: Sensorene benyttet Vaz, C.M.P. et al. (2013)

Det ble gjort målinger i syv forskjellige jordtyper som varierte fra sand- til leirjord. Jorda ble nøye kompaktet i prøvebeholderen ved forskjellige fuktinnhold, fra ovenstørr til våt ($0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$) og bløtlagt trinnvis på $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ om gangen. En tørr, referanse-bulkdensitet ble bestemt før prøvene ble bløtlagt.

Det ble utført et eksperiment for å bestemme størrelsen på målebeholderen. Beholderdiameteren ble bestemt etter sensoren med størst målediameter, CS616. Det ble derfor lagd 10,15 cm høye målebeholdere med innvendig diameter på 12 cm. For sensorene med lengst sonder ble to beholdere lagd oppå hverandre og tapet sammen slik at høyden ble 20,3 cm (Figur 12). TDR100, CS616 og 10HS ble satt inn i prøvestykket og installert fra begge ender. Deretter ble prøvestykket delt i to og de resterende sensorene testet i begge prøvestykkene fra begge ender. Dermed ble det utført hele fire individuelle målinger totalt for sensorene med kortest sonder.



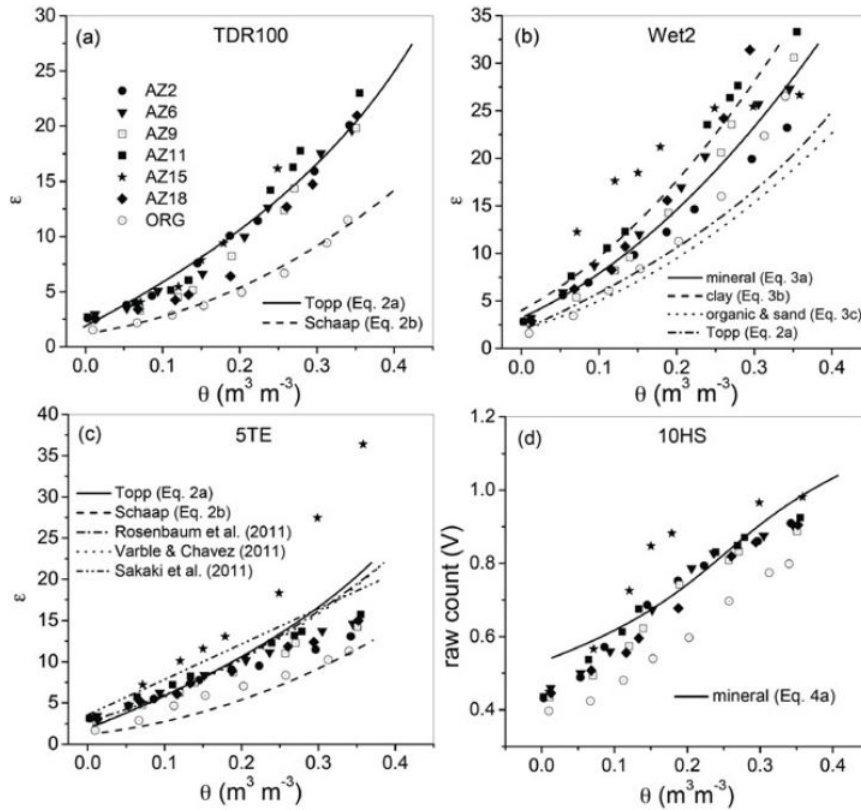
Figur 12: Metode for testing av sensorene med målebeholdere (Vaz, C.M.P. et al., 2013)

Sensorene ble testet en av gangen slik prosedyren over beskriver. Sensorene ble forsiktig installert i jordprøvene og det ble unngått å sette de der tidligere sensorer var brukt. Verdier for dielektrisk permittivitet, spenning eller periode ble plottet mot målt volumetrisk vanninnhold, θ , for å evaluere ytelsen for hver sensor.

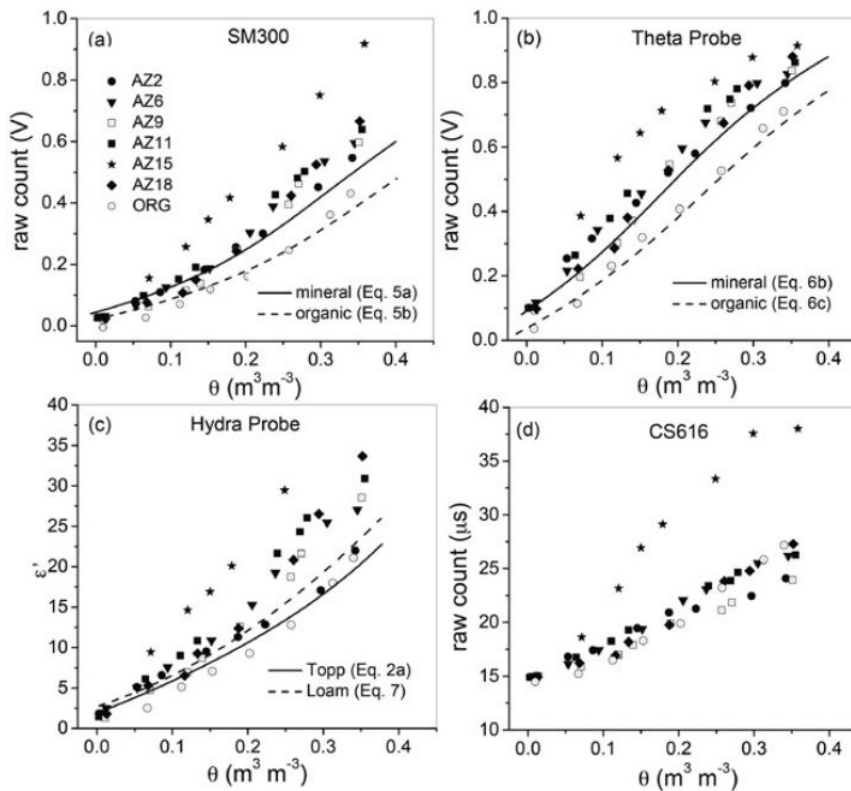
Resultater

Fra forskningslitteraturen gjennomgått av Vaz, C.M.P. et al. (2013), trekkes EM-sensorer fram som fordelaktige måleinstrumenter på grunn lav helseisiko sammenlignet med nøytron- og gammasonder. I tillegg gjør de kontinuerlige målinger i både tørr og mett jord og kan måle i de fleste jordtyper med god målenøyaktighet. Disse fordelene har ført til stor utvikling og distribuering av et økende antall EM-sensorer. Nyere sensorer kan også måle temperatur, i tillegg til permittivitet og volumetrisk fuktinnhold. De fleste FDR- og kapasitanssensorer måler i et lavere frekvensområde enn TDR-sensorene. Dette bidrar til å gjøre slike lavfrekventseosorer billigere, men også mer sensitive for blant annet saltholdighet, temperatur og variasjoner i jordstrukturen (Vaz, C.M.P. et al., 2013).

Figur 13 og 14 viser permittiviteten, ϵ , perioden eller spenningen, V , som en funksjon av fuktinnholdet, θ for de syv forskjellige jordtypene. Linjene representerer kjente kalibreringsfunksjoner fra litteraturen og fra leverandør. Den organiske jordtypen (ORG) og jorda med høyest resistivitet (AZ15) ga signifikante måleavvik i forhold til mineraljorda (AZ2, AZ6, AZ9, AZ11 og AZ18). For Wet-2 og HydraProbe var avviket omtrent neglisjerbar mellom ORG, AZ15 og sandjorda (AZ2), og for C616 var det omtrent ingen forskjell mellom den organiske jorda og mineraljorda. De største måleavvikene kom fra TDR100, 10HS, ThetaProbe, SM300 og 5TE.



Figur 13: Sensor output fra TDR100, wet-2, 5TE og 10HS som en funksjon av volumetrisk vanninnhold for de forskjellige jordtypene (Vaz, C.M.P. et al., 2013)



Figur 14: Sensor output fra SM300, Theta Probe, Hydra Probe og CS616 som en funksjon av volumetrisk vanninnhold for de forskjellige jordtypene (Vaz, C.M.P. et al., 2013).

Resultatene viste også at repeterbarheten for de ulike målesensorene mest sannsynlig ble påvirket av målefrekvensen for de ulike sensorene. Spredningen på målingene for repeterbarheten var 0,4 og 1,3 % for henholdsvis TDR100 og CS616 (høy målefrekvens), mens den var 8,4 og 8,6 % for SM300 og Hydra Probe (lav målefrekvens).

Leverandørene lover en målenøyaktighet fra $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ for CS616 og SM300 og $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ for wet-2 og Theta Probe med leverandørkalibrering målt i mineraljord (Tabell 11). Etter at målingene var gjort viste derimot θ -RMSD å være fra 0,029 til $0,129 \text{ m}^3/\text{m}^3$ for mineraljord.

Med dette indikerer Vaz, C.M.P. et al. (2013) at det er behov for en forbedret leverandørkalibrering, hovedsaklig for CS616, 10HS og Hydra Probe. Unntaket er med TDR100, wet-2 og Theta Probe hvor måleresultatene ga en høyere nøyaktighet enn hva som ble lovet i databladene. Med jordspesifikk kalibrering for gjennomsnittet av all mineraljord var θ -RMSD målt til å være 0,013 til $0,028 \text{ m}^3/\text{m}^3$, som er innenfor hva leverandørene lover.

Tabell 11 viser at TDR100, Theta Probe, wet-2, SM300 og 5TE er de mest nøyaktige sensorene med måleavvik under $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mens CS616, 10HS og Hydra Probe ga θ -RMSD over dette. Studien indikerer videre at Hydra Probe, 5TE, wet-2, CS616 og TDR100 er mer følsom for blant annet variasjoner i jordtekstur, leireinnhold, mineralogi og spesifikk overflateareal enn de tre andre sensorene (10HS, SM300 og Theta Probe), på grunn av en dårligere målenøyaktighet.

Tabell 11: Målenøyaktighet for de ulike sensorene med krav fra leverandør (†) og måleresultatene for denne studien (‡) (Vaz, C.M.P. et al., 2013)

Sensor	Leverandør † θ -nøyaktighet [m^3/m^3]	Jordspes. † θ -nøyaktighet [m^3/m^3]	Leverandør ‡ θ -RMSD [m^3/m^3]	Jordspes. ‡ θ -RMSD [m^3/m^3]
wet-2	$\pm 0,050$	$\pm 0,030$	0,034	0,025
5TE	$\pm 0,030$	$\pm 0,020$	0,040	0,026
10HS	$\pm 0,030$	$\pm 0,020$	0,073	0,013
SM300	$\pm 0,025$	-	0,037	0,014
Theta P.	$\pm 0,050$	$\pm 0,020$	0,029	0,015
Hydra P.	$\pm 0,030$	-	0,048	0,028
CS616	$\pm 0,025$	-	0,129	0,025
TDR100	$\pm 0,030$	$\pm 0,020$	0,023	0,022

Studien viser også at det ikke er noen signifikante indikasjoner på at målenøyaktigheten påvirkes av målefrekvensen. De peker på måleprinsipp (kapasitans, impedans, eller TLO), elektronikk, strømkrets, og sondestørrelse og -design som mulige faktorer for måleavvik. For ThetaProbe med målefrekvens på 100 MHz vises det til tidligere studier som ga gode måleresultater med jordspesifikk kalibrering i vekstmedium som blant annet bark, perlitt og vermikulitt.

Ved å teste de ulike sensorene med både leverandør- og jordspesifikk kalibrering i forskjellige jordtyper, og sammenligne resultatene med hva leverandørene lover, gir resultatene en indikasjon på et behov for en standardisert kalibreringsmetode fra leverandørens side. De antok at dette arbeidet ville sette lys på problemstillingen og føre fram til en slik standardisering. Dette spesielt rettet mot leir- eller sandholdig jord.

4.2.3 Sammenligning av fire sensorer i felt

Formål

Mittelbach, H., Lehner, I. & Seneviratne, S. I. (2012) ser to FDR-sensorer og én kapasitanssensor opp mot TDR-referansemålinger ved bruk av leverandørkalibrering. Formålet var å evaluere ytelsen for sensorene etter målenøyaktighet og -avvik, og i tillegg se på temperaturavhengighet. Studien sammenlignet sensorene ute i felt over en lengre periode, siden dette ble påpekt som et manglende forskningsområde.

Metode

Sensorene benyttet i denne studien var:

- 10HS (Decagon, 2016a)
- CS616 (Campbell, 2016)
- SISOMOP (Brukermanual ikke funnet)
- Trime Pico-IT/-EZ(IMKO, 2017)

Målingene ble gjennomført over en to-årsperiode og var en del av "Swiss Soil Moisture Experiment" (SwissSMEX) i Sveits. I tillegg til sensorene ble det brukt 107-L-temperaturmåler, CR1000- datalogger fra Campell Scientific og SiSOMOP-datalogger benyttet.

TRIME-IT/EZ, 10HS og CS616 sensorene ble installert side om side i dybder på 5, 15, 25, 35, 55, 80 og 110 cm sammen med en temperaturmåler på hvert nivå. SISOMOP-sensoren ble installert i dybder på 5, 15, 35, 55 og 80 cm. Det ble gjort målinger i to år fra 1. juni 2009 til 31. mai 2011 i intervaller på 10 min.

Jorda som ble målt i var leirjord med 25,6 - 30,8 % leire, 31,0 - 35,9 % silt og 33,5 - 41,7 % sand, og bulkdensitet og organisk innhold varierte med henholdsvis 1,08-1,50 g/cm^3 og 1,7 - 4,7 %.

Resultater

Referansemålingene fra TDR-sensoren viste at fuktinnholdet varierte mest på 5 og 15 cm dybde, og at fuktforholdet var omtrent stabilt under 25 cm under hele måleperioden. Fuktinnholdet varierte fra 0,25 til 0,47 m^3/m^3 . Resultatene viste at målingene gjort med 10HS-sensoren sviktet når fuktinnholdet overgikk 0,40 m^3/m^3 , i tillegg sank sensitiviteten med økende fuktinnhold. CS616- og SISOMOP-sensorene målte variasjonene i fuktinnholdet bedre, men CS616 hadde en tendens til å overestimere for høyt fuktinnhold.

Resultatene viste videre at både 10HS- og SISOMOP-sensorene hadde en økende grad av underestimering med økende fuktinnhold med et absolutt avvik på opp mot -0,16 m^3/m^3 . CS616 overestimerte fuktinnholdet med et avvik på opp mot 0,15 m^3/m^3 .

Mittelbach, H., Lehner, I. & Seneviratne, S. I. (2012) konkluderer med at det er behov for jord/sted-spesifikk kalibrering for FDR-sensorene, som igjen stemmer godt med tidligere studier som også brukte 10HS og CS616. Resultatene viser at det finnes signifikante svakheter ved slike sensorer, som mangel på sensitivitet i forhold til oppsamling av større mengder vann og temperaturavhengigheten.

Resultatene for studien viser at det er behov for et måleinstrument som kombinerer høy nøyaktighet og lav kostnad, og påpeker viktigheten av å evaluere og sammenligne måleinstrumenter med forskjellige jordegenskaper og fuktforhold.

4.2.4 Evaluering av 10HS brukt i SwissSMEX-prosjektet

Mittelbach, H., Casini, F. et al. (2011) ser nøyere på 10HS-sensoren brukt i SwissMEX-prosjektet beskrevet ovenfor. De evaluerer sensoren i både laboratorium og felt opp mot TDR-sensoren TRIME-EZ/IT. Formålet med evalueringen var å utlede feilestimater og se på korrelasjonen mellom målingene i laboratoriet og i felt, samt ytelsen for å gjengi korrekte, gjentatte målinger av volumetrisk og absolutt fuktinnhold ved bruk av kapasitanssensoren. Målet med laboratoriemålingene var å estimere forskjellen i volumetrisk fuktinnhold mellom TRIME-IT/EZ og 10HS, i tillegg estimere variasjoner og følsomhet for 10HS.

I laboratorieforsøket ble det utført fem uavhengige kalibreringer av sensoren, og for hver kalibrering ble det brukt tre plastikkbeholdere (26,6 cm x 36,6 cm x 23 cm) med forskjellig fuktinnhold. Rett etter målingene ble det tatt ut prøver der sondene var plassert. Prøvene ble målt med tørke/veie-metoden for referansepunkter og korreksjon for kalibreringen.

Det ble benyttet to forskjellige jordtyper under kalibreringen, hvor fuktinnholdet varierte fra 5,2 til 30,2 vol% og fra 3,2 til 55,4 vol%. Målinger ble tatt over ett år i forskjellige dybder ned mot 120 cm.

Resultatene fra felt- og laboratoriemålingene viste seg å gi god sammenheng mellom 10HS TRIME-EZ/IT under lavt fuktinnhold. Målenøyaktigheten sank derimot med økende fuktinnhold for 10HS, og syntes å bli insensitiv for fuktverdier over 40 vol%. Feltemålingene avslørte at ytelsen til 10HS-sensorene er avhengig av jordtype, og dermed begrensning i laboratoriekalibreringen. Men med felt-spesifikk kalibrering fra parallelle 10HS- og TDR-målinger, ble avvikene mellom 10HS og TDR mindre for fuktinnhold opp mot 30 vol% og dag-til-dag variasjon i fuktinnholdet. De konkluderer at 10HS-sensoren er en god målemetode ved bruk av jordspesifikk kalibrering, spesielt for kompakt jord med lav til middels volumetrisk fuktinnhold.

4.2.5 Jordfuktmåling: sammenligning av instrumenter og ytelse

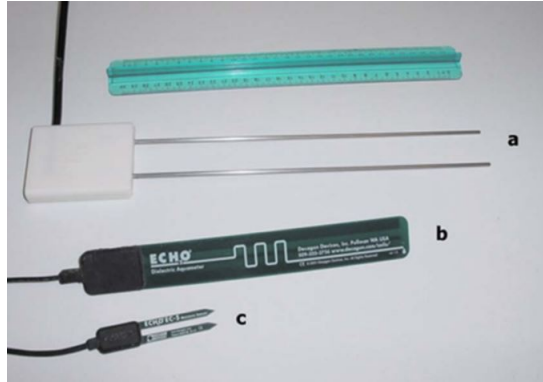
Formål

Francesca, V. et al. (2010) sammenligner to kapasitanssensorer ECH20 og EC-5 (Decagon, 2010) og TDR-sensoren, CS616 (Campbell, 2016) opp mot tørke/veie-metoden i sentral-Italia. De påpeker at det finnes få studier som sammenligner ulike sensorer i felt. Formålet var å utvikle jordspesifikke kalibreringsfunksjoner for målesensorene, og videre sammenligne de med leverandørkalibrering og ytelse.

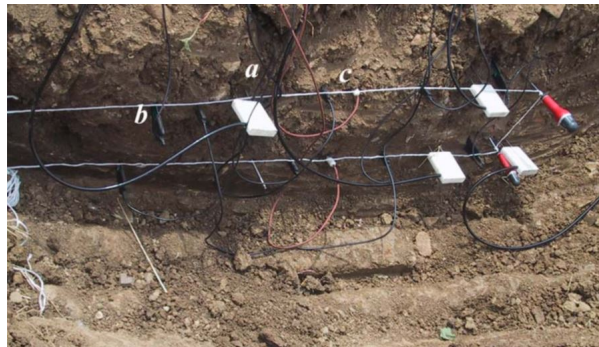
Metode

Figur 15 og 16 viser henholdsvis hvilke sensorer som ble brukt og hvordan de ble installert i jorda. Både EC-5 og EC-20 er kapasitans-sensorer, men med ulik utforming av sondene. EC-20 har en sonde på 20 cm, mens EC-5, som er en videreutvikling, har to mindre sonder på 8,9 x 1,8 cm. Med leverandørkalibrering lover leverandøren en nøyaktighet på henholdsvis $\pm 4\%$ og $\pm 3\%$ for EC-20 og EC-5, samt $\pm 1 - 2\%$ for jordspesifikk kalibrering. TDR-sensoren, CS616 lover en nøyaktighet på $\pm 2.5\%$ med leverandørkalibrering. Lengden på sondene for denne er 30 cm med en diameter på 0,32 cm og avstand på 3,2 cm. Tørke/veie-metoden ble benyttet for å verifisere målingene. Dette ble gjort ved å ta prøvestykker på 50 gram, som ble lagt i poser og fraktet til laboratoriet hvor de ble veid, tørket ved 105 grader og veid på nytt.

Det ble utført målinger i to forskjellige jordtyper, leirjord og siltjord. Der sensorene skulle installeres ble det for hånd gravd 1,5-2 m lange grøfter på 30-50 cm. Sensorene ble plassert i to nivåer, to av hver sensor i hvert nivå, som Figur 16 viser. De ble varsomt installert under urørt jord.



Figur 15: Sensorene sammenlignet av Francesca, V. et al. (2010): (a) CS616, (b) EC-20, (c) EC-5.



Figur 16: Sensorene (a) CS616, (b) ECH₂O og (c) EC-5 installert i jorda (Francesca, V. et al., 2010)

Resultater

Formen til de ulike sensorene ga forskjellige utfordringer knyttet til kontinuerlig jordkontakt mot sondene. De poengterer at god kontakt mellom jord og sonde er viktig, siden lufthulrom har stor påvirkning på målingene. På grunn av dette mener Francesca, V. et al. (2010) at EC-5 er den mest pålitelige. Samtidig måler EC-5 et mindre volum enn de andre, som igjen øker sjansen for avvik i forhold til ikke-homogene jordstrukturer. Dette begrunnes med målinger gjort i to forskjellige jordtyper, hvor den homogene jordtypen ga mer nøyaktige målinger.

Resultatene fra studien viste at målenøyaktigheten for sensorene varierte med en RMSE fra 3,6 % til 1,6 % for henholdsvis EC-20 og CS616. De påpeker også at jordspesifikk kalibrering gir bedre målenøyaktighet enn leverandørkalibrering.

4.3 Fuktmåling i lettklinker og lignende granulære materialer

Det ble kun funnet én studie som måler i ren, løs lettklinker, der Pieš, J. & Môcová, L. (2019) måler fukttinnholdet i Liapor (lettklinker) med en TDR-sensor. Det ble derfor gjort søk etter fuktmåling i lignende granulære materialer, som blant annet grus og pukkk. Dette resulterte i 14 treff på studier som bruker grovere, granulære materialer i blant annet veg- og banekonstruksjoner og i grønne tak. Av disse ble fire plukket ut og benyttet i dette delkapittelet. Tabell 12 viser artiklene benyttet og hvilket materiale det ble målt i.

Tabell 12: Artikler benyttet for fuktmåling i lettklinker og liknende granulære materialer

Tittel	Kilde	Materiale
Application of TDR Test Probe for Determination of Moisture Changes of Railway Substructure Materials	(Pieš, J. & Môcová, L., 2019)	Liapor, sand og pukkk
Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics	(Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V., 2014)	Vekstlag, grønne tak
Moisture Content Measurements of Green Roof Substrates Using Two Dielectric Sensors	(Kargas, G., Ntoulas, N. & Nektarios, P. A., 2013)	Vekstlag, grønne tak
TDR Moisture Estimation for Granular Materials: An Application in Agro-Food Industrial Monitoring	(Cataldo, A. et al., 2009)	Soyabønner, mais, maismel, kli og kaffe

4.3.1 Bruk av TDR-sensor for måling av fuktendring i jernbanefylling

Formål

Pieš, J. & Môcová, L. (2019) beskriver fremgangsmåten for kalibrering av TDR-måleinstrumentet brukt i forskningsprosjektet DRETM (Department of Railway Engineering and Track Management) ved universitetet i Zilina i Slovakia. DRETM har i lang tid monitorert frost og fukt i jernbanefylling med mål om å bestemme de reelle verdiene for fukt og temperatur i de forskjellige lagene i fyllingen. De reelle verdiene er viktige parametre for numerisk modellering av de termiske forholdene i fyllingen. Formålet med dette prosjektet var at resultatene skulle være en del av en planlagt oppdatering for dimensjonering av jernbanefyllinger.

Metode

Figur 17 viser TDR-sensoren som ble brukt, TRIME PICO IPH T3 (IMKO, 2017). Denne sensoren baserer seg på TDR-metoden og måler i frekvensområdet på 1 GHz. Sammen med sensoren ble det brukt en HD2-leserenhet og datalogger, som måler tiden den elektromagnetiske pulsen bruker på å reflekteres i sonden. Siden sensoren primært er designet for måling i fingradert jord, ble den kalibrert opp mot de grovere materialene benyttet i fyllingen, 1-8 mm liapor, sand og 31,5 mm pukkk. Kalibreringen ble gjort i laboratorium ved bruk av bøtter som prøvebeholdere. Bøttene ble fylt med de respektive materialene, lagvis og komprimert, etter at tilgangsrøret for TDR-sensoren var plassert. De ble gjort fire målinger med forskjellig posisjonering av TDR-sensoren i hver prøve for to ulike fuktforhold, tørr og mett tilstand. Av disse målingene ble det automatisk definert kalibreringskurver av første orden i HD2-enheten.



Figur 17: TDR-sensor TRIME PICO IPH T3 som ble brukt i prosjektet (Pieš, J. & Môcová, L., 2019)

Resultater

Pieš, J. & Môcová, L. (2019) konkluderer med at TDR-sensoren gir nøyaktig og enkel monitorering av fuktinnholdet. Ved kontrollering av kalibreringsfunksjonen for de ulike materialene gitt i Tabell 13, viste TDR-målingene å ha et avvik fra 0,02 % til 0,49 %, noe som er innenfor det leverandøren lover i brukermanualen på $\pm 0,5$ %. De påpeker viktigheten av tilstrekkelig kompaktering av materialet for å unngå lufthulrom mellom kornene som kan føre til feilmålinger. I tillegg må fuktinnholdet i materialet være under metningspunktet og TDR-sensoren fullstendig installert i materialet.

Tabell 13: Fuktinnholdet, w_m [%] målt med TDR-sensoren opp mot tørke/veie-metoden (T/V) for å verifisere kalibreringsfunksjonen (Pieš, J. & Môcová, L., 2019)

Fukt	Liapor T/V	Liapor TDR	Sand T/V	Sand TDR	Pukk T/V	Pukk TDR
Tørr prøve	0,02	0,00-0,33	2,85	2,94-2,98	1,93	1,85-1,99
Mettet prøve	15,03	14,66-14,97	14,89	14,65-15,1	6,64	6,60-6,69
Miks	7,13	6,95-7,37	8,74	8,93-9,23	3,47	3,25-3,61

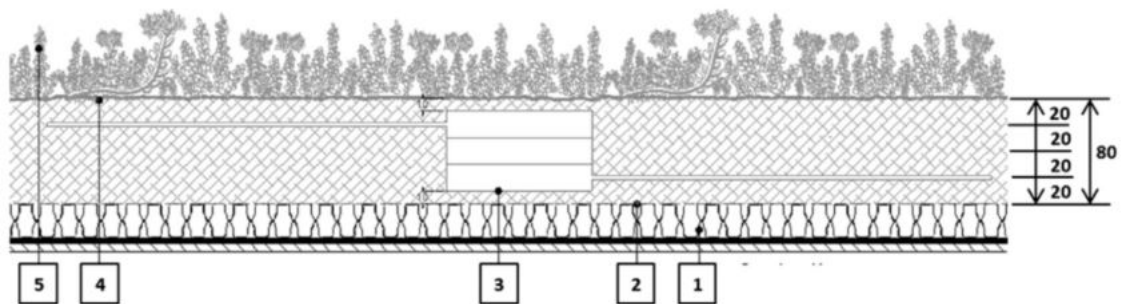
Selv om TDR-sensoren i utgangspunktet er beregnet for jord, viser Pieš, J. & Môcová, L. (2019) at TRIME PICO IPH T3 er i stand til å måle i grovere materialer som liapor, sand og pukk med god nøyaktighet. Dette oppnås med materialsesifikk kalibrering, fuktinnhold under metningspunktet og tilstrekkelig kompaktering av materialet og installering av sonden.

4.3.2 Fuktforhold i ekstensive grønne tak under tørre perioder

Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V. (2014) undersøkte hvordan fuktinnholdet i vekstlag for ekstensive grønne tak varierte i tørre perioder på grunn av evapotranspirasjon (fordamping og utdunsting av vann fra planter). Det ble gjort kontinuerlige målinger i løpet av 29 måneder i fire forskjellige testbed på 3x1m med tre typer vekstlag. Figur 18 viser forsøksfeltet og testbedene som det ble målt i. Vekstlagene bestod av 80 % LECA, 10 % leire og 10 % kompost. Måleinstrumentet som ble brukt var TDR-sensoren, CS616 (Campbell, 2016), som ble plassert i midten av hvert testbed med tre sonder på ulikt nivå: 20, 40 og 60 mm over filterduken. Figur 19 illustrerer tverrsnittet til testbedet og hvordan sensorene ble plassert.



Figur 18: Forsøksfeltet for Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V. (2014)



Figur 19: Snitt av testbed med drenering(1), filterduk(2), fuktsensorer(3), vekstlag(4) og vegetasjon(5) (Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V., 2014)

Resultatene fra studien viste at måledataene ga konsistente fuktverdier i tørre og våte perioder som dermed var en god indikasjon på at sensorene ga pålitelige målinger. Mer enn dette ble det ikke nevnt om selve ytelsen for sensoren.

4.3.3 Fuktmåling i grønne tak ved bruk av to EM-sensorer

Formål

Det finnes lite kunnskap og erfaring om målenøyaktigheten for EM-sensorer i vekstlaget i grønne tak (Kargas, G., Ntoulas, N. & Nektarios, P. A., 2013). Formålet med denne studien var derfor å utvikle kalibreringsfunksjoner for FDR- og TDR-sensorer for måling i slike vekstlag med grovere struktur, og se hvordan dette påvirket målingene. Resultatene fra studien ville kunne sikre en forbedret monitorering av grove, porøse vekstlag i grønne tak.

Metode

Sensor benyttet i studien:

- wet-2 (FDR-sensor)
- TDR300 (TDR-sensor)

Denne studien sammenligner sensorerene, wet-2 (Delta-T, 2019b) og TDR300 (Spectrum, 2009), i seks forskjellige grove vekstlag i grønne tak. wet-2 er en relativt ny og billig sensor i forhold til TDR300, og har tre 68 mm lange metallsonder på 3 mm diameter. Mellomrommet mellom sondene er 15 mm. Målevolumet er sylindrisk og er på ca. 500 cm^3 . Sensoren måler både kapasitans og konduktans av jorda. TDR-sensoren består av to rustfrie stålsonder med lengde på 78 mm og har et målevolum på ca. 220 cm^3 .

Det ble målt i seks forskjellige vekstlag, som bestod av håndmikset organisk og uorganisk materiale. Det organiske materialet utgjorde 20 % og bestod enten av torv eller kompost. Resterende 80 % uorganisk materiale, som sandig leirjord, pimpstein, perlitt og zeolitt, med forskjellig andel i hvert vekstlag. Bulkdensiteten varierte fra 0,665 til 0,876 g/cm³ og porøsiteten fra 44,56 til 46,08 %.

Kalibreringen av sensorene til hvert vekstlag ble gjort i laboratorium ved en temperatur på $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Vekstlagene ble tørket ved 60°C i 48 timer. Deretter ble vekstlagene lagt i bokser på $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}$ for å oppnå konstant bulkdensitet for hvert vekstlag. Målingene ble gjort i steg på $0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ med deionisert vann. Prøvene ble håndrørt i flere minutter for å oppnå en homogen fordeling av fuktinnholdet.

Resultat

For wet-2 var forholdet mellom målt permittivitet, $\sqrt{\epsilon}$ og vanninnholdet, θ sterkt lineært med høy R^2 for alle de testede vekstlagene. For hvert vekstlag var det nødvendig med en jordspesifikk kalibrering. Dette gjaldt også for TDR300-sensoren, hvor forholdet mellom tiden estimert for målingene og fuktinnholdet var kvadratisk for alle vekstlagene.

Det ble konkludert med at de mest pålitelige målingene ble gjort med jordspesifikk kalibrering for hver av sensorene.

4.3.4 TDR-fuktestimering i matindustrien

Formål

Måling av fuktinnhold i porøse og granulære materialer er av stor interesse for flere felt, blant annet matindustrien. Monitorering kan optimalisere industrien i forhold til konservering og energisparing. På grunn av manglende forskning på $\theta - \epsilon$ for å avlede vanninnhold ut fra målt permittivitet i slike forhold, har (Cataldo, A. et al., 2009) utført en studie der formålet var å se på ytelsen for en TDR-sensor. Målet var å finne en funksjonssammenheng mellom dielektriske egenskaper og fuktinnholdet (Cataldo, A. et al., 2009).

Metode

Måleinstrumentet som ble brukt var en TDR100-enhet og en CS610 (Campbell, 2016) med 30 cm lange sonder. Prøvebeholderen var 2000 ml plastsylindere av polypropylene med høyde og diameter på 37,5 cm og 9,3 cm.

Materialene som ble målt i var: Soyabønner, mais, maismel, kli og kaffe.

Resultater

Metoden som ble presentert i denne studien viste å være et godt alternativ til gamma- og nøytronsonder som er mest brukt i matindustrien. Med korrekt kalibrering, som er nøye beskrevet i artikkelen, ga det meget gode måleresultater ut fra nøyaktighet og repeterbarhet for denne typen sensor.

De poengterer at individuelle kalibreringer opp mot det spesifikke materialet er nøkkelen for å oppnå nøyaktige måleresultater.

4.4 Varmeflaks-metoder

I tillegg til metodene og sensorene beskrevet i delkapittel 4.1 og 4.2, ble HP- og DTS-metoden funnet interessant. Det ble derfor gjort et forsøk på å undersøke disse nærmere. Artikkene som benyttes oppgis nedenfor i Tabell 14.

Tabell 14: Artikler benyttet for HP- og DTS-metoden

Tittel	Kilde
Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements	(He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Ren, T. et al., 2018)
Chapter Five - Distributed Temperature Sensing for Soil Physical Measurements and Its Similarity to Heat Pulse Method	(He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Li, M. et al., 2018)

4.4.1 HP-metoden

He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Ren, T. et al. (2018) presenterer en omfattende litteraturstudie av HP-metoden til måling av jordfysiske egenskaper og en rekke andre egenskaper i frossen og ufrossen jord. Artikkelen beskriver teorier bak varmekonduksjon og praktiske problemer og utfordringer ved bruk av metoden. HP-metoden kan deles inn i to typer, "Single Probe Heat Pulse" (SPHP) og "Dual Probe Heat Pulse" (DPHP).

SPHP kan bestå av lange eller korte sonder, og dermed ha forskjellige målevolumer. SPHP er en robust målemetode med meget god nøyaktighet for bestemmelse av termisk konduktivitet. For at SPHP skal være en god metode for måling av andre egenskaper, trengs en forbedret forståelse av varmeledningen mellom jorda og sonden.

Stor utvikling av DPHP-metoden de siste 30-årene har ført til at metoden kan måle alle tre termiske egenskaper, jordfuktinnhold og potensielt bulkdensiteten. Metoden har også blitt brukt til å måle jordfuktfluks og varmekonduksjon, i tillegg til mengde is i jorda. DPHP er begrenset i forhold til lite målevolum, men kan kombineres med et TDR-instrument og dermed muliggjøre måling av flere jordegenskaper i samme jordvolum på samme tid.

He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Ren, T. et al. (2018) peker på noen viktige områder som trenger ytterligere forskning. Blant annet forbedring av sondene i forhold til målenøyaktighet, presisjon og levetid, lavere energiforbruk og trådløse sensorer, samt forbedring av datatolkning.

Fullstendig kontakt mellom sonde og jord er også en utfordring for HP-metoden, som for TDR- og nøytronsensorer. Det er umulig å unngå, men kan minimeres ved ekstra forsiktighet ved installering av sondene.

Det er i tillegg liten kunnskap om den termiske motstanden mellom jorda og sonden, som avhenger av sondens geometri og størrelse, samt kompaktheten av jorda - bulkdensitet, partikkelstørrelsesfordeling, jordstruktur og partikkelform. Derfor er en kvantitativ beskrivelse av forholdet mellom den målte motstanden og bulkdensiteten, kornstørrelse og kornfordeling, samt jordstruktur og jordfuktinnhold nødvendig for videre utvikling av SPHP-teknikker.

4.4.2 DTS-metoden

DTS (Distributed temperature sensing) er en raskt utviklende metode som kan gjøre målinger fra meter- til kilometerskala. Temperaturmålingene kan avlede jordtermiske egenskaper og volumetrisk fuktinnhold (He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Li, M. et al., 2018)

He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Li, M. et al. (2018) beskriver teorier og prinsipper bak DTS, oppbygningen av systemet, bruksområder og begrensninger, samt likheter og ulikheter med HP-metoden. Jordfysiske og termiske egenskaper (temperatur, jordfuktinnhold, termisk konduktivitet, spesifikk varmekapasitet, termisk diffusitet) varierer med tid, dybde og utstrekning, som er primærfaktorene som påvirker masse og energitransport i den kritiske sonen i jorda. Det finnes mange metoder for punktmålinger, TDR, HP-metoden, Termo - TDR og Remote Sensing, men en metode for samtidig måling av større områder mangler, med unntak av COSMOS (cosmic -ray neutron soil moisture observing system) gir målinger av jordfuktinnhold, men kun ned til 20 cm.

DTS er en optoelektronisk målemetode som måler temperatur i bestemte tidsintervaller. Den baserer seg på endring av karakteristikken i temperaturavhengige lystransmisjoner i en fiberoptisk kabel begravd i jorda. DTS-systemet består av en kontrollør (lasergenerator, detektor, optisk modul, mottaker og mikroprosessor) og en fiberoptisk kabel. Systemet er utviklet i England på 1980-tallet, men ble først benyttet innenfor jordfysiske målinger i starten av midten av 2000-årene.

Nylig har forbedringer av systemet gjort DTS-systemet til et kraftfullt instrument som kan måle temperaturfordelingen over meter til kilometer lange strekninger med høy oppløsning og presisjon. Måleinstrumentet kan plasseres både horisontalt, vertikalt og skråstilt og koster lite.

Det finnes tre typer DTS:

- aktiv-DTS: actively heated fiber optic DTS AHFO-DTS hvor en oppvarmet fiberoptisk kabel måler termisk respons under oppvarming og nedkjølingsperioden.
- Passiv-DTS, standard metode for måling av temperaturer langs en optisk fiberkabel uten oppvarming.
- Aktiv-passiv-DTS (kombinert) måler jordtemperatur som funksjon av tid $\Delta T(t)$. Slike temperaturmålinger kan brukes til å avlede og estimere jordtermiske egenskaper

DTS-systemet kan for tiden oppnå god temperatur-, romlig- og tidsoppløsning på målingene med henholdsvis $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$, 0,1-2 m og 1-60 s, i tillegg blir metoden stadig utviklet og forbedret. Likevel er det mange begrensninger som trenger ytterligere fokus for at metoden skal bli kommersiell.

5 Diskusjon

Som beskrevet i kapittel 1.3 er formålet med oppgaven å 1) kartlegge hvilke metoder og instrumenter som finnes for fuktmåling i jord og løs lettklinker, og 2) finne den mest egnede metoden for måling av fuktinnhold i lettklinkerfylling. Det ble derfor stilt to forskningsspørsmål:

1. I hvor stor grad er måling av fuktinnhold i jord og løs lettklinker behandlet i forskningslitteraturen?
2. Hvordan kan vi best måle fuktinnholdet i lettklinkerfylling?

Dette kapittelet skal prøve å besvare forskningsspørsmålene og komme med en mulig løsning for hvordan den mest lovende fuktmålemetoden kan testes ut. Først blir en oppsummering av litteraturstudien presentert, hvor forskningslitteraturen på området blir kartlagt. Videre blir resultatene analysert og diskutert for å komme frem til den mest egnede metoden for måling av fuktinnhold i lettklinkerfylling. Til slutt presenteres et forslag utarbeidet av forfatteren til testprogram for metoden i laboratorium som er .

5.1 Kartlegging av forskningslitteraturen

Tabell 4 i kapittel 3 viser at det finnes mye forskningslitteratur om generell fuktmåling og fuktmåling i jord med rundt 3 millioner treff i Scholar og henholdsvis 538 934 og 155 011 treff i ScienceDirect for søk nr. 4 og 6. Videre ble søkestrengene spisset mot fuktmåling i lettklinker via granulære materialer som grus og pukkk med henholdsvis 176 00 og 22 431 treff i Scholar og ScienceDirect. Søk etter porøse materialer og løs fylling ga henholdsvis 4450 og 937 treff, og det mest spesifikke søket på fuktmåling i lettklinker ga henholdsvis 5100 og 1232 treff i Scholar og ScienceDirect.

Litteraturstudien genererte 63 utvalgte artikler og 16 fra kjedesøk. Rundt halvparten av de totalt 79 artiklene handlet om EM-sensorer eller forsøk gjort med EM-sensorer. Av disse igjen handlet 17 artikler om TDR alene benyttet i felt eller laboratorium og 18 handlet om sammenligning og evaluering av flere sensorer og metoder. Den andre halvdel var artikler om lettklinker, HP- og DTS-metoden, og noen få enkeltartikler om resterende målemetoder.

Ved nærmere gjennomgang av treffene for det mest spesifikke søket etter lettklinker, søk nr. 12 og 13, viste de fleste artiklene seg å handle om lettklinker brukt som tilslag i lettbetong. Det var kun 8 artikler som ble utvalgt for videre undersøkning og kun 2 av disse igjen var relevant for problemstillingen. Den ene studien omhandlet fuktmåling i grønne tak med 80 % LECA som vekstlag (Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V., 2014) og den andre om fuktmåling i jernbanefylling ved bruk av Liapor, sand og pukkk (Pieš, J. & Môcová, L., 2019).

Det høye antallet treff på fuktmåling i jord indikerer at det finnes veldig mye forskning gjort på området. Blant artiklene som ble studert var det også flere oversiktsstudier og sammenligningsstudier, der forskjellige målemetoder og -instrumenter har blitt undersøkt. I tillegg referer mange av artiklene til utallige studier som også har sett på jordfuktmåling, og de ti mest refererte har fra 200 til 5600 siteringer på Scholar. Dette igjen tyder på at jordfuktmåling har vært, og fortsatt er, et viktig og stort forskningsområde.

De mer spesifikke søkene rettet mot lettklinker og lignende granulære materialer ga også relativt mange treff, men få relevante artikler knyttet til problemstillingen. Det lave antallet med relevante artikler gir en indikasjon på at det eksisterer lite forskning på fuktmåling i lettklinkerfylling. Relevante artikler kan allikevel ha uteblitt som følge av at kun de 100 første treffene fra hvert søk ble vurdert. Ved gjennomgang av treffene ble det for øvrig observert at relevansen på studiene sank gradvis, og at de mest relevante studiene konsekvent var blant de 40 – 60 første. Sannsynligheten for at høyest relevante artikler har uteblitt som følge av denne begrensningen er derfor forholdsvis lav.

5.2 Valg av målemetode og sensor

Som beskrevet i kapittel 1.2 er en lettklinkerfylling komplekst å måle i, på grunn av fukt i selve kulene, fukt på overflaten og fukt i luftlommer mellom kulene. Det vil dermed ikke være aktuelt å bruke RF-sensorer, siden slike sensorer ikke er stabile over tid og det er usikkerhet om de får med seg det riktige fuktinnholdet. Motstandssensorer brukt i tre vil heller ikke være et godt alternativ siden kulene kun er 0-32 mm i diameter. Elektrodene kan få plass i de store kulene, men sensoren vil da bare måle i den ene kulen og ikke av et større volum av fyllingen. For videre vurdering av metoder for fuktmåling i lettklinkerfylling har det derfor blitt brukt mye tid på å sette seg inn i måleteknikker- og instrumenter brukt i jord og granulære, grovere materialer.

5.2.1 Best egnet målemetode

De mest vanlige metodene for fuktmåling i jord er beskrevet av Garg, A., Munoth, P. & Goyal, R. (2016), Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S. (2014) og Dobriyal, P. et al. (2012): Tørke/veiemetoden, tensiometere, GMS, EM-sensorer og nøytronsonder. De fremhever EM-sensorer som den mest brukte og anvendelige metoden for fuktmåling i jord, på grunn av høy målenøyaktighet, kontinuerlige målinger og brukervennlighet i forhold til de andre metodene. Ved siden av EM-sensorer virket også varmekuldekkingsensorer som et godt alternativ ved først øyekast. Stor utvikling av DPHP-metoden de siste 30-årene har ført til at metoden kan måle alle tre termiske egenskaper: jordfuktinnhold og potensielt bulkdensiteten. Metoden har også blitt brukt til å måle jordfukt- og varmekuldekkings (He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Ren, T. et al., 2018). Derfor ble DPHP-metoden undersøkt nærmere, men viste seg etter hvert å ha flere begrensninger. Metoden måler blant annet et lite volum, har lav målenøyaktighet og lav levetid. DTS-metoden ble også vurdert, men har i likhet med DPHP-metoden flere begrensninger. Det er en nyere, lite utviklet metode som enda ikke har blitt kommersiell, men har derimot et stort potensiale.

Andre metoder som virket interessante var tensiometere, GMS og radioaktive målemetoder. Tensiometere og GMS er mye brukt i jordbruk med gode erfaringer, men måler vannpotensialet og er ubrukt i tørre forhold. Derfor vil slike målere muligens ha problemer med lettklinker, siden lettklinker drenerer bort vann og stående vanntrykk vil sjeldent oppstå. Fyllingen vil mest sannsynlig også tørke raskt og forbli forholdsvis tørr. Radioaktive metoder som gamma- og nøytronstråling er heller ikke et godt alternativ, da slike metoder krever mer varsomhet med tanke på helserisikoen. Dette påpekes også av Vaz, C.M.P. et al. (2013), som også trekker fram EM-sensorer som mer fordelaktige måleinstrumenter på grunn den lave helserisikoen, kontinuerlige målinger i både tørr og mett jord, samt at metoden ikke er destruktiv. Disse fordelene har dermed ført til et økende antall EM-sensorer. Dette igjen underbygges med kartleggingen av forskningslitteraturen hvor over halvparten av funnene omhandler EM-sensorer.

EM-sensorer peker seg ut som den mest aktuelle metoden for fuktmåling i løs lettklinker, og blir derfor valgt som metode til testprogrammet. Dette begrunnes med fordelene som trekkes frem av de ulike forskningsartiklene og ulempene ved de andre metodene. EM-sensorer er i tillegg den eneste metoden som måler i ren lettklinker fra forskningslitteraturen. Selv om slike sensorer virker å være best egnet, viser funnene at de også kan by på utfordringer. Resultatene påpeker at luftlommer og utilstrekkelig installering av sensorene vil kunne gi målefeil, og samtlige studier påpeker viktigheten av jordspesifikk kalibrering for å oppnå gode måleresultater. Siden en lettklinkerfylling vil gi luftlommer mellom kulene, spesielt for 10-20 mm fraksjonen, kan dette være et problem for sensorene. Til gjengjeld er slike fyllinger meget homogene, da de utelukkende består av lettklinker framstilt av én type leire.

Tabell 15 gir en oversikt over EM-sensorene med tilhørende tekniske egenskaper funnet gjennom litteraturstudien. Den er inspirert av Tabell 10 av Vaz, C.M.P. et al. (2013), og teknisk informasjon er hentet fra brukermanualene utgitt av leverandør. Tabellen viser også om de har blitt brukt i lettklinker eller vekstlag i grønne tak.

Tabell 15: Teknisk informasjon om sensorene brukt i forskningsartiklene presentert i resultatkapittelet

Sensor	Leverandør	Måle- prinsipp	Outputs	f [GHz]	Sonder		Måle-		Nøyaktighet		Materialer målt i utenom jord (resultater fra oppgaven)		Brukermanual
					Antall	Lengde [cm]	volum [cm ³]	diameter [cm]	L.kal. [± vol%]	J.s.kal. [± vol%]	Lettlinker	Vekstlag	
CS616	Campbell	TLO	P	0,175	2	30,0	3740	12,6	2,5	-	X	X	(Campbell, 2016)
TDR100	Campbell	TDR	ϵ_r, EC_b	1,450	3	15,0	230	4,4	3	2			(Campbell, 2015)
5TE	Decagon	K	ϵ_r, EC_b, T	0,070	3	5,6	300	8,6	3,0	2,0			(Decagon, 2016b)
10HS	Decagon	K	V	0,070	2	10,0	1100	11,8	3,0	2,0			(Decagon, 2010)
EC-5	Decagon	K	V	0,070	2	8,9	-	-	3,0	2,0			(Decagon, 2010)
EC-20	Decagon	K	V	0,005	1	20,0	-	-	4,0	2,0			(Decagon, 2010)
Wet2	Delta-T	K	ϵ_r, EC_b, T	0,020	3	6,8	500	9,7	5,0	3,0		X	(Delta-T, 2019b)
SM150	Delta-T	I	V, T	0,100	2	5,1	100	5,0	3,0	-			(Delta-T, 2016)
SM300	Delta-T	I	V, T	0,100	2	5,1	100	5,0	2,5	-			(Delta-T, 2014)
ThetaProbe	Delta-T	I	V	0,100	4	6,0	75	4,0	5,0	2,0			(Delta-T, 2017)
SDI-12	Delta-T	I	V	0,100	1	40,0	4000	20,0	6,0	4,0			(Delta-T, 2019a)
Trime Pico	IMKO	TLO	V	1,000	1		3000	18,0	3,0	2,0	X		(IMKO, 2017)
TDR300	Spectrum	TDR	ϵ_r, EC_b	1,000	2	7,8	220	6,0	3,0	-		X	(Spectrum, 2009)
HydraProbe	Stevens	I	ϵ_r, EC_b	0,050	4	4,5	32	3,0	3,0	-			(Stevens, 2018)

L.kal., leverandørkalibrering; J.s.kal., jordspesifikk kalibrering; ϵ_r , permittivitet; TLO, transmission line oscillation; V, volt; TDR, time domain reflectometry;
 EC_b , bulk-elektrisk-konduktivitet; TDT, time domain transmission; T, temperatur; K, kapasitans; P, periode for resonnsfrekvensen i sensorretsen

5.2.2 Sammenligningsstudier

Det meste av forskningslitteraturen benytter fuktsensorene i forskjellige typer jord. Selv om jord og lettklinker har forskjellig karakteristikk, vil sammenligningsstudiene i jord gi en pekepinn på hvordan de ulike sensorene yter i forhold til hverandre. Sammenligningsstudiene vil derimot ikke gi gode indikasjoner på hvor godt de vil fungere i lettklinker, men blir tatt med for å få oversikt over hvilke sensorer som finnes og hvordan de fungerer.

Zhu, Y. et al. (2019), Vaz, C.M.P. et al. (2013), Mittelbach, H., Lehner, I. & Seneviratne, S. I. (2012) og Francesca, V. et al. (2010) har sammenlignet henholdsvis seks, åtte, fire og to EM-sensorer i jord. Zhu, Y. et al. (2019) testet seks sensorer og rangerte dem etter hvor nøyaktig de var i forhold til referansemålinger gjort med en nøytronsonde. Resultatene viste at 5TE-sensoren var mest nøyaktig av samtlige sensorer for siltig leirjord og ble kun slått av CS616 i leirig sand. Sensorene som kom dårligst ut i forsøket var 10HS og SM150. Vaz, C.M.P. et al. (2013) viser derimot med sine resultater at 10HS, SM300 og ThetaProbe hadde den høyeste målenøyaktigheten på under $0,015 \text{ m}^3/\text{m}^3$, i tillegg var minst følsomme for variasjoner i jorda. De andre sensorene benyttet av Vaz, C.M.P. et al. (2013): 5TE, CS616, HydraProbe, Wet-2 og TDR100 var mer sensitive, og ga en nøyaktighet på rundt $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3$. De forskjellige resultatene fra disse to studiene viser at det kan være mange faktorer som spiller inn på målenøyaktigheten, og at det derfor er vanskelig å sammenligne ulike sensorer.

De fleste kapasitanssensorer måler i et lavere frekvensområde, som fremkommer av tabell 15. Vaz, C.M.P. et al. (2013) viser til tidligere forskning som har vist at dette bidrar til å gjøre slike lavfrekventseensorer billigere, men også mer sensitive for blant annet saltholdighet, temperatur og variasjoner i jordstrukturen. Med sin studie, avkrefter derimot Vaz, C.M.P. et al. (2013) påstanden, og indikerer at det ikke er noen signifikant sammenheng mellom målenøyaktighet og målefrekvens. De peker derimot på måleprinsipp (kapasitans, impedans, eller TLO), sondestørrelse og -design som mulige faktorer for måleavvikene. Dette blir underbygget med funn av tidligere studier hvor blant annet ThetaProbe, med målefrekvens på 100 MHz, ble brukt i vekstlag i grønne tak. Vekstlaget bestod av bark, perlitt og vermikulitt, og sensoren ga gode måleresultater.

Ved å sammenligne de billigere sensorene; CS616, 10HS og SISOMOP mot den dyrere TDR-sensoren, Trime Pico i felt, viser Mittelbach, H., Lehner, I. & Seneviratne, S. I. (2012) at disse sensorene kan være et godt alternativ. Selv om de påpeker noen svakheter med sensitivitet for oppsamling av større mengder vann og temperaturavhengighet, vil jordspesifikk kalibrering og temperaturkorleksjon kunne føre til tilstrekkelig gode målinger. Francesca, V. et al. (2010) indikerer også med sin studie at CS616 gir gode måleresultater, i tillegg til EC-20 og EC-5, hvor ytelsen mellom de tre ikke var nevneverdig forskjellig.

5.2.3 Sensorer brukt i lettklinker og lignende granulære materialer

Fra forskningslitteraturen er det kun CS616 og Trime Pico som har blitt benyttet i ren lettklinker. Trime Pico ble brukt av Pieš, J. & Mõcová, L. (2019) som viser at det er mulig å gjennomføre fuktmålinger ved bruk av TDR-sensoren i grovere materialer. De velykkede målingene i både 1-8 mm Liapor (lettklinker) og 0-31,5 mm pukk gir indikasjoner på at denne sensoren også kan fungere i grovere lettklinker, som er tiltenkt denne oppgaven (usortert 0-30 mm og 10-20 mm).

CS616 ble brukt av Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V. (2014) til fuktmåling i grønne tak, hvor vekstlaget blant annet bestod av 80 % LECA. I tillegg til LECA bestod vekstlaget av finere gradert materiale som vil fylle mye av luftlommene og dermed minske de potensielle måleavvikene forbundet med denne utfordringen. Det eneste som blir nevnt om ytelsen for sensoren var at den ga konsistente fuktverdier både i tørre og fuktige perioder over 29 måneder. I tillegg har Kargas, G., Ntoulas, N. & Nektarios, P. A. (2013) også målt i grønne tak, hvor vekstlaget bestod av 20 % organsik materiale

og resterende sandig leirjord, pimpstein, perlitt og zeplitt. Studien sammenlignet Wet2 og TDR300, som begge ga gode måleresultater.

CS616 har også blitt brukt i matindustrien hvor det er viktig å ha kontroll på fuktinnholdet under konserveringen. Cataldo, A. et al. (2009) testet CS616 (som er en tidligere versjon av CS616) i soyabønner, mais, maismel, kli og kaffe. De utviklet kalibreringskurver for de ulike materialene, og viste at CS616 var et godt alternativ til gamma- og nøytronsonder, som har vært mest brukt i matindustrien til nå.

Pieš, J. & Môcová, L. (2019), Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V. (2014), Kargas, G., Ntoulas, N. & Nektarios, P. A. (2013) og Cataldo, A. et al. (2009) viser dermed at det er kan være mulig å gjøre fuktmålinger med CS616, Trime Pico, Wet2 og TDR300 i grovere, granulære materialer - som for en fylling av lettklinker.

5.2.4 Anbefaling av EM-sensorer for fuktmåling i lettklinkerfylling

I starten av arbeidet med masteroppgaven ble det gjort kjent at en jordfuktmålesensor var tilgjengelig i laboratoriet til SINTEF. Sensoren er av typen SDI-12 «Profile Probe Type SDI PR2/4» (Delta-T, 2019a), og er også listet opp i Tabell 15. Dette er en impedanssensor som opererer under 0,1 GHz med én 40 cm lang sonde. Den måler ved fire dybder (10, 20, 30 og 40 cm) og gir dermed dybdeprofil på fuktinnholdet. Måleradius og -volum for hvert målepunkt er på henholdsvis 20 cm og 1000 cm^3 , og målenøyaktigheten oppgis til å være på henholdsvis 6,0 og 4,0 vol% med leverandør- og jordspesifikk-kalibrering. SDI-12 blir derfor valgt ut til testprogrammet siden den allerede er tilgjengelig. Den kan minne om TDR-sensoren benyttet av Pieš, J. & Môcová, L. (2019), Trime Pico, som også har én lang sonde med stort målevolum. Dette gir forhåpninger til SDI-12, siden Trime Pico ga gode måleresultater i lettklinker. I tillegg er sensoren fra samme leverandør som ThetaProben, bruker samme måleprinsipp og operer under samme målefrekvens (Delta-T, 2019a). ThetaProben har i tillegg blitt brukt i tidligere studier med gode måleresultater for fuktmåling i grovere vekstlag i grønne tak Vaz, C.M.P. et al. (2013).

Funnene fra sammenligningsstudiene indikerer at ytelsen for de ulike sensorene ikke er signifikant forskjellig. Det er derfor vanskelig å være sikker på hvilken som kan være best i lettklinker - spesielt når de fleste studiene måler i jord. Det kan antas at sensorer med enten korte sonder eller flere sonder som sitter veldig tett samlet, ikke vil være et godt alternativ for lettklinker. For det første måler de et mindre volum enn de andre lengre sensorene, og den lille avstanden mellom sondene vil gjøre det vanskelig for grovere lettklinker å få plass i mellom. Dermed kan større luftlommer oppstå, og som funnene fra forskningslitteraturen indikerer, fører dette ofte til måleavvik. Et større målevolum vil også være å foretrekke, da små luftlommer mellom sonde og lettklinker vil relativt sett utgjøre et mindre volum og potensielt føre til mer nøyaktige målinger. Ut fra dette resonneret plukkes de sensorene med størst målevolum (volum $\geq 500 \text{ cm}^3$) ut fra Tabell 15: CS616, 10HS, Trime Pico og Wet-2.

Selv om Trime Pico er den eneste sensoren som har blitt brukt i ren lettklinker, har studien til Pieš, J. & Môcová, L. (2019) noen svakheter. Studien måler kun ved tre forskjellige fuktinnhold: tørr, mellomvåt og mettete prøve, og har en lite beskrevet metodedel. CS616 på den andre siden, er blitt brukt i flere av de utplukkede artiklene, og har gode måleresultater i samtlige, bortsett fra studien til Vaz, C.M.P. et al. (2013) hvor den kom dårligst ut iforhold til målenøyaktighet med leverandørkalibrering. Denne har også blitt benyttet i lettklinker i grønne tak, hvor ytelsen er lite beskrevet, men nok til å konkludere med at den ga gode nok resultater. I tillegg viste Cataldo, A. et al. (2009) med sin studie om fuktmåling i materialer som blant annet soyabønner, mais og kaffe, at CS616 også kunne måle fuktinnholdet i granulære materialer med lav tetthet i likhet med lettklinker. Wet-2 kom forholdsvis godt ut i sammenligningsstudien til (Vaz, C.M.P. et al., 2013) og viste og gi gode målinger i vekstlag i grønne tak med studien til (Kargas, G., Ntoulas, N. & Nektarios, P. A., 2013).

Flere av sensorene som måler størst volum, er også de få som har blitt brukt i fuktmåling i lettklinker og lignende granulære materialer. Dette kan tyde på at slike sensorer er best egnet i fylling av lettklinker, og oppgaven anbefaler derfor valg av CS616 og Wet-2 for testprogrammet. Trime Pico og 10HS anbefales ikke, grunnet henholdsvis svakheter ved studien og at sensor ikke har blitt brukt i lettklinker eller lignende granulære materialer i forskningslitteraturen.

5.3 Testprogram

Dette kapittelet beskriver en metode og framgangsmåte utarbeidet av forfatteren, for testing av ulike måleinstrumenter. Oppsettet er spesielt designet for SDI-12 vist i vedlegg 20, som allerede er tilgjengelig på Byggeteknisk laboratorium. Denne framgangsmåten vil også være egnet for andre sensorer, siden SDI-12 måler størst volum av alle de vurderte sensorene, og den samme prøvebeholderen og oppsettet kan derfor benyttes. Som beskrevet i kapittel 5.2.4, vil CS616 og Wet-2 være gode alternativer for måling av fuktinnhold i lettklinkerfylling.



Figur 20: SDI-12 Profile Probe Type SDI PR2/4 av Delta-T (Delta-T, 2019a)

5.3.1 Utstyrliste

- Sensor, og de delene som følger med, gitt i vedlegg A (Delta-T, 2019a)
- Tilgangsrør for installering av sensor
- Vekt for tørke/veie-metoden
- Tørkerom
- Sylindrisk prøvebeholder i form av en dunk eller lignende
- Datalogger/PC

Størrelsen på prøvebeholderen må være så stor at det elektromagnetiske feltet sendt ut av sensoren ikke forstyrres av beholderen. I brukermanualen anbefales en avstand 15 cm ut fra sentrum av sonden. Dermed må beholderens diameter være mer enn 30 cm, og høyden mer enn 55 cm siden sonden er 40 cm lang. Ligning 8 gir minimumsvolumet for sylindren.

$$V_{min} > \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot 20^2 \cdot 55 = 69115 \text{ cm}^3 \approx 70L \quad (8)$$

Lettklinker

I fyllinger av lettklinker brukes ofte usortert 0-32 mm og sortert 10-20 mm, som nevnt i kapittel 2.1. Derfor vil det være fordelaktig å teste sensorene i begge fraksjonene. 0-32 mm vil muligens gi bedre måleresultater, siden den blir mer kompakt og vil inneholde færre lufthulrom enn 10-20 mm.

5.3.2 Valg av kalibreringsmetode

Målet med kalibreringen er å finne sammenhengen mellom sensor-output og fuktinnhold. Dette gjøres ved å bestemme to koeffisienter (a_0 og a_1) som kan brukes i den lineære ligningen 9 som konverterer output og fuktinnhold.

$$\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1 \cdot \theta \quad (9)$$

Brukermanualen foreslår tre kalibreringsmetoder (Delta-T, 2019a):

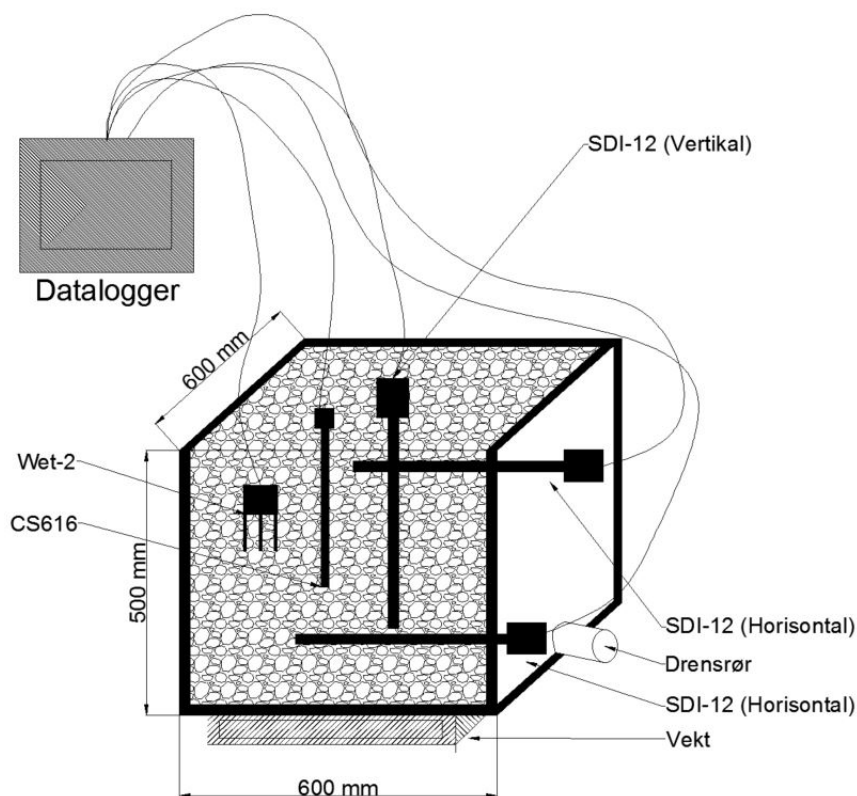
1. Laboratoriekalibrering av vekstmedie og ikke-leirig jord
2. Laboratoriekalibrering for leire
3. Feltkalibrering

Alle metodene foreslås ved bruk av en ThetaProbe for referansemål. Metode 1 er den enkleste, men er ikke egnet for jord som kryper eller blir veldig hard ved uttørking. Siden lettklinker er et hardt og keramisk materiale, vil denne metoden muligens ikke være den beste. Metode 2 er spesielt egnet for leire og må også i følge brukermanualen gjøres ved bruk av ThetaProbe. Metode 3 er tiltenkt feltkalibrering og bemerkes som den sikreste metoden for å oppnå gode måleresultater. Den kan også gjøres ved bruk av enten ThetaProbe, en annen referansesensor som for eksempel nøytronprobe eller ved bruk av tørke/veie-metoden. Sensoren installeres i jorda og måler over en viss periode hvor fuktinnholdet endres, og referansemålinger tas samtidig og parallelt ved hver dybdeprofil. Her er det viktig at endringen i fuktinnholdet endres tilstrekkelig slik at sensoren kalibreres for hele fuktområdet for materialet.

Ut fra hva som anbefales i brukermanualen virker metode 3: feltkalibrering, som det beste alternativet. Siden lettklinker er et homogent materiale, vil en fylling konstruert i laboratoriet ikke avvike mye fra en reell fylling ute i felt. Dermed kan kalibrering med metode 3 like gjerne gjøres i et laboratorium, og vedlegg B angir fremgangsmåten for dette.

5.3.3 Testing

For å teste sensoren bør det måles ved ulike fuktforhold - fra mettet til tørr, drenert tilstand. Metoden er inspirert av Zhu, Y. et al. (2019) og figur 10 i kapittel 4.2.1. En prøvebeholder fylt med lettklinker fuktes opp til ønsket fuktinnhold, og målinger tas kontinuerlig mens lettklinkeren tørker ut. I tillegg er det interessant å se på forskjellen mellom horisontal og vertikal installering av sonden. Da vil det være nødvendig med en større målebeholder hvor bredden eller diameteren er 55 cm eller lengre. Det kan benyttes en større boks eller sylindere med fall i bunnen og et drenshull, slik at vannet som dreneres gjennom fyllingen ikke blir stående på bunn. Figur 21 viser et forslag til oppsett for testingen, hvor tre SDI-12, én CS616 og én Wet-2 testes. To av SDI-12-sensorene plasseres vertikalt ved dybder på 10 og 30 cm. Sensorene plasseres med avstand minst 15 cm fra hverandre. Det antas at fuktinnholdet ikke vil variere mye med dybden, derfor kan Wet-2 og CS616 plasseres med en dybde på rundt 10 cm.



Figur 21: Oppsett for testprogram med SDI-12, CS616 og Wet-2.

Forberedelse

1. Først tas tørke/veie-prøver av lettklinkeren for å bestemme $\theta_{tørr}$
2. Lettklinker fylles deretter i beholderen og tilgangsrørene plasseres før det kompakteres tilstrekkelig rundt vegger, hjørner og tilgangsrørene
3. Beholderen settes på en vekt som måler tyngden, $m_{tørr}$ til beholderen fylt med tørr lettklinker
4. Drensrøret/utløpet stenges før beholderen fylles med vann for å fukte opp lettklinkeren opp til metningspunktet. For at lettklinkeren ikke skal flyte opp, monteres en finmasket netting i toppen av beholderen
5. Når beholderen er fylt med vann slik at det blir et vannspeil ved nettingen, pakkes beholderen inn i plast, og beholderen står slik til den oppnår metningspunktet - etter tre uker med fuktinnhold på mellom 27-40 vekt% (Saint-Gobain, 2000). Vann etterfylles slik at lettklinkeren konstant står under vann
6. Etter tre uker åpnes utløpet slik at vannet som ikke er absorbert og ligger mellom kulene dreneres vekk. Når det ser ut til at alt vannet er drenert bort, tas platen og nettingen av, og beholderen veies på nytt og m_{mettet} leses av
7. Fuktinnholdet, θ_{mettet} kan dermed beregnes ut fra ligning 10

$$\theta_{mettet} = \theta_{tørr} + \frac{m_{mettet} - m_{tørr}}{\rho_w \cdot V} \quad (10)$$

der V = volumet av beholderen - volum av to tilgangsrør.

Når θ_{mettet} er bestemt kan sensorene installeres i tilgangsrørene og fuktmålinger kan tas kontinuerlig hver time. De målte verdiene kan videre sammenlignes med endring i m_w målt med vekten når lettklinkeren tørker ut. Volumetrisk fuktinnhold ved tid n kan dermed beregnes etter ligning 11:

$$\theta_n = \theta_{mettet} - \frac{m_{mettet} - m_n}{\rho_w \cdot V} \quad (11)$$

Målenøyaktighet

Når lettklinkeren har tørket ut og vekten stabiliseres ned mot $m_{tørr}$ kan ytelsen for målesensorene beregnes ut fra ligningene beskrevet i kapittel 2.7. Verdiene plottes og målenøyaktigheten gitt ved RMSE og ligning 4 kan omskrives til ligning 12.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (\theta_n - \theta_s)^2}{n}} \quad (12)$$

der θ_n er målt verdi med vekten, θ_s er målt verdi med sensor og n er totalt antall målte verdier.

I tillegg til målenøyaktighet gitt ved RMSE, er det interessant å se hvor presise målingene er med tanke på repeterbarhet. Dette kan gjøres ved å regne ut standardavviket for målingene gitt ved ligning 13.

$$s^2 = \frac{\sum_{n=1}^n (x_n - \bar{x})^2}{n} \quad (13)$$

der x_n er målt verdi med sensor, \bar{x} er gjennomsnittet av målte verdier med sensoren og n er totalt antall målte verdier.

For å få et bedre bilde av repeterbarheten over hele målespekteret fra våt til tørr lettklinker, kan R-kvadratet regnes ut gitt ved ligning 14.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n (y_n - x_n)^2}{\sum_{n=1}^n (y_n - \bar{y})^2} \quad (14)$$

der y_n er målt verdi med vekten, x_n er målte verdier med sensor, \bar{y} er gjennomsnittet av de reelle verdiene målt med vekten og n er antall målinger.

6 Konklusjon

For å finne ut hva som er blitt gjort tidligere om fuktmåling i jord og løs lettklinker, har oppgaven gjort en omfattende litteraturstudie og kartlagt forskningslitteraturen på området. Søkene startet bredt med overordede søk på fukt og jord, og spisset seg videre inn mot lettklinker. Antall treff viser at det finnes mye forskning gjort på fuktmåling i jord med rundt 3 millioner treff på Scholar. Videre viste treffene at det er gjort mindre forskning på fuktmåling i granulære, samt porøse materialer og lettklinker, med henholdsvis rundt 200 000 og 5000 treff i Scholar. Av de 5000 treffene for lettklinker var det kun én studie som hadde målt i ren lettklinker og én studie som hadde målt i vekstlag for grønne tak bestående av 80 % lettklinker. Dermed kan det konkluderes med at fuktmåling i jord er godt behandlet i forskningslitteraturen, mens det for lettklinker og lignende materialer er et begrenset forskningsområde. Dette understreker kunnskapsbehovet på problemstillingen oppgaven prøver å løse.

Som det fremkommer av litteraturstudien er måling av permittivitet med EM-sensorer i jord godt behandlet i forskningslitteraturen, og resultatene i denne oppgaven tyder på at det er en velfungerende metode. EM-sensorene kan måle i mange forskjellige jordtyper og vekstmedier av forskjellig slag. De varierer i måleprinsipp, utforming og størrelse, er brukervennlige og gir raske, kontinuerlige og nøyaktige målinger av fuktinnholdet. Til forskjell fra andre vurderte metoder er den ikke-destruktiv, ikke helseskadelig og er anvendelig og en godt utviklet målemetode. Det har også blitt vist at EM-sensorer har blitt brukt i lettklinker og lignende granulære materialer som grus, pukk og vekstmedier som bark, perlitt og vermikulitt. Dette indikerer at slike sensorer kan være et godt alternativ for bruk i lettklinkerfylling tiltenkt denne oppgaven. Derfor blir EM-sensorer valgt som metode til testprogrammet, og videre valg av sensor blir gjort med utgangspunkt i erfaringer fra forskningslitteraturen. Sensorene som trekkes frem som de mest nøyaktige og med generelt god ytelse, er blant annet Trime Pico, CS616, 10HS og Wet-2. Disse fire er også de som måler størst volum, og det er kun 10HS som ikke har blitt benyttet i lettklinker eller lignende granulære materialer. Siden studien med Trime Pico har svakheter og 10HS ikke er testet i lettklinker eller lignende granulære materialer, anbefaler oppgaven å velge CS616 og Wet-2 til testprogrammet, ved siden av den allerede tilgjengelige SDI-12.

Som en del av videre arbeid med denne problemstillingen, kan målinger av fukt i lettklinkerfylling utføres i henhold til testprogrammet som er foreslått i denne oppgaven. Resultater fra laboratorieforsøket vil kunne avgjøre om slike sensorer fungerer i en lettklinkerfylling. Om sensoren presterer dårlig, kan det vurderes å benytte en dyrere TDR-sensor for et lignende laboratorieforsøk. TDR-sensorer skal i mindre grad være sensitive for materialstruktur og materialspesifikke parametere. Da kan Trime Pico eller TDR100 være gode alternativer å se nærmere på.

Når egnet sensor er funnet kan hovedutfordringen bli å utlede gode nok kalibreringsfunksjoner slik at forholdet mellom θ - ϵ blir korrekt, og pålitelige målinger kan utføres. Videre bør det gjennomføres forsøk i felt for å teste sensoren i reelle forhold, og se hvordan temperatur og fritt vann påvirker sensoren. Målinger i eksempelvis tilbakefyllinger mot kjellervegger, i grønne tak eller i veg- og banefyllinger vil være aktuelt. Feltemålinger vil også kunne si litt mer om levedyktigheten for sensoren, om forsøket blir gjennomført over en lengre periode.

Referanser

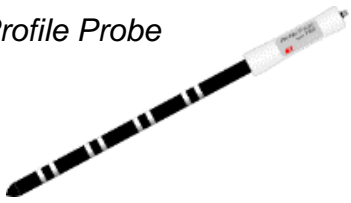
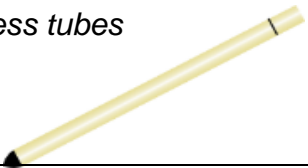





- Ayati, B. et al. (2018). «Use of Clay in the Manufacture of Lightweight Aggregate». I: *Construction and Building Materials* 162, s. 124–131. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018.
- Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V. (2014). «Moisture Content Behaviour in Extensive Green Roofs during Dry Periods: The Influence of Vegetation and Substrate Characteristics». I: *Journal of Hydrology* 511, s. 374–386. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.036>.
- Briggs, J. L. (1897). *The Mechanics of Soil Moisture*. U. S. Dept. of Agriculture. Division of Soils 10. Washington DC.
- Campbell (2015). *INSTRUCTION MANUAL: TDR100. Revision:5/15*. URL: <https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/tdr100.pdf>.
- (2016). *INSTRUCTION MANUAL: CS616 and CS625 Water Content Reflectometers Revision: 2/16*. URL: <https://s.campbellsci.com/documents/af/manuals/cs616.pdf>.
- Cataldo, A. et al. (aug. 2009). «TDR Moisture Estimation for Granular Materials: An Application in Agro-Food Industrial Monitoring». en. I: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 58.8, s. 2597–2605. ISSN: 0018-9456, 1557-9662. DOI: 10.1109/TIM.2009.2015636.
- Decagon (2010). *EC-20, EC-10, EC-5 Soil Moisture Sensors. User's Manual Version 10*. URL: [http://manuals.decagon.com/Retired%5C%20and%5C%20Discontinued/Manuals/EC-20-EC-10-EC-5-Soil-Moisture-Sensor-Operators-Manual-\(discontinued\).pdf](http://manuals.decagon.com/Retired%5C%20and%5C%20Discontinued/Manuals/EC-20-EC-10-EC-5-Soil-Moisture-Sensor-Operators-Manual-(discontinued).pdf).
- (2016a). *10HS User Manual*. URL: http://manuals.decagon.com/Manuals/13508_10HS_Web.pdf.
- (2016b). *5TE Water Content, EC and Temperature sensor*. URL: http://manuals.decagon.com/Retired%5C%20and%5C%20Discontinued/Manuals/13509_5TE_Web.pdf.
- Delta-T (2014). *User Manual for the SM300*. URL: https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/SM300_Manual_version_1.3.pdf.
- (2016). *User Manual for the SM150*. URL: https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/SM150_Manual_version_1.2.pdf.
- (2017). *User Manual for the ML3 ThetaProbe*. URL: <https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/ML3-user-manual-version-2.1.pdf>.
- (2019a). *User Manual for the SDI-12 Profile Probe Type SDI PR2/4 and SDI PR2/6*. URL: https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2016/09/PR2_SDI-12-_User_Manual_version_4_1.pdf.
- (2019b). *User Manual for the WET Sensor type WET-2*. URL: https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2019/06/WET-User_Manual_v1.6.pdf.
- Dibk (2017). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning: VI Fukt, våtrom og rom med vanninstallasjoner. § 13-10. Fukt fra grunnen*. URL: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- Dobriyal, P. et al. (2012). «A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and Its Implications for Water Resource Management». I: *Journal of Hydrology* 458-459, s. 110–117. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>.
- Francesca, V. et al. (feb. 2010). «Soil Moisture Measurements: Comparison of Instrumentation Performances». en. I: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136.2, s. 81–89. ISSN: 0733-9437, 1943-4774. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2010)136:2(81).

- Garg, A., Munoth, P. & Goyal, R. (2016). «APPLICATION OF SOIL MOISTURE SENSORS IN AGRICULTURE: A REVIEW». en. I: s. 12.
- Grøn, Ø. (2018). *Permittivitet i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 7. juni 2020 fra. URL: <https://snl.no/permittivitet>.
- Halbo, L. (2016). *Repeterbarhet i Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 23. juni 2020 fra. URL: <https://snl.no/repeterbarhet>.
- Hauge, Å. L. et al. (2017). *KLIMATILPASNING AV BYGNINGER OG INFRASTRUKTUR - Samfunnsmessige Barrierer Og Drivere*. Tekn. rapp. 4. Trondheim: Klima 2050, s. 92.
- He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Li, M. et al. (2018). «Chapter Five - Distributed Temperature Sensing for Soil Physical Measurements and Its Similarity to Heat Pulse Method». I: red. av Donald L. Sparks. Bd. 148. *Advances in Agronomy*. Academic Press, s. 173–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.003>.
- He, H., Dyck, M.F., Horton, R., Ren, T. et al. (2018). «Development and Application of the Heat Pulse Method for Soil Physical Measurements». I: *Reviews of Geophysics* 56.4, s. 567–620. DOI: 10.1029/2017RG000584. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2017RG000584>.
- IMKO (2017). *User Manual TRIME® -PICO T3/IPH44 and T3/IPH50*. URL: https://www.imko.de/wp-content/uploads/2018/12/Manual_TRIME-PICO-IPH.pdf.
- Jørgensen, P., Sørensen, R. & Prestvik, O. (jan. 2013). *Norske jordarter*. URL: http://www.jordforeningen.no/wp-content/uploads/2018/05/Norske_jordarter.pdf.
- Kargas, G., Ntoulas, N. & Nektarios, P. A. (apr. 2013). «Moisture Content Measurements of Green Roof Substrates Using Two Dielectric Sensors». en. I: *HortTechnology* 23.2, s. 177–186. ISSN: 1063-0198, 1943-7714. DOI: 10.21273/HORTTECH.23.2.177.
- Mittelbach, H., Casini, F. et al. (2011). «Soil Moisture Monitoring for Climate Research: Evaluation of a Low-Cost Sensor in the Framework of the Swiss Soil Moisture Experiment (SwissSMEX) Campaign». I: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116.D5. DOI: 10.1029/2010JD014907. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2010JD014907>.
- Mittelbach, H., Lehner, I. & Seneviratne, S. I. (2012). «Comparison of Four Soil Moisture Sensor Types under Field Conditions in Switzerland». I: *Journal of Hydrology* 430-431, s. 39–49. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydro.2012.01.041>.
- O'Brien, A.M. & Mc Guckin, C. (mar. 2016). *The Systematic Literature Review Method: Trials and Tribulations of Electronic Database Searching at Doctoral Level*. London. DOI: 10.4135/978144627305015595381.
- Pieš, J. & Môcová, L. (2019). «Application of TDR Test Probe for Determination of Moisture Changes of Railway Substructure Materials». I: *Transportation Research Procedia* 40, s. 74–81. ISSN: 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.013>.
- Rashad, A. M. (2018). «Lightweight Expanded Clay Aggregate as a Building Material - An Overview». en. I: s. 19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009.
- Robinson, D. A. et al. (feb. 2008). «Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review». en. I: *Vadose Zone Journal* 7.1, s. 358–389. ISSN: 15391663. DOI: 10.2136/vzj2007.0143.
- Saint-Gobain (2000). *Teknisk informasjon Leca Lettklinker - 12.604. Mekaniske egenskaper*. no. Tekn. rapp., s. 2.

- Saint-Gobain (2018). *LECA® OVERVANNSHÅNTERING*. Tekn. rapp., s. 7. URL: <https://leca.no/sites/default/files/2018-02/Leca%5C%20overvannsha%5C%CC%5C%8Andtering%5C%20NO%5C%20ORIGINAL%5C%20oppslag.pdf>.
- (2019). *Produkter — Leca Norway*. <https://leca.no/produkter/>.
- SINTEF Byggforsk (2015a). *474.531 Fuktmåling i bygninger. Instrumenter og metoder*. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/226/fuktmaaling_i_bygninger_instrumenter_og_metoder.
- (2015b). *523.111 Yttervegger mot terreng. Varmeisolering og tetting*. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/3304/yttervegger_mot_terreng_varmeisolering_og_tetting.
- (2018). *421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag.
- Skoglund, J. (sep. 2019). *Ny forskning anbefaler å redusere tykkelsen på frostsikring i vei*. no. <https://www.veier24.no/artikler/ny-forskning-anbefaler-a-reducere-tykkelsen-pa-frostsikring-i-vei/473476>.
- snl.no (2017). *Målefeil i Store norske leksikon på snl.no. Hentet 23. juni 2020 fra*. URL: <https://snl.no/m%5C%C3%5C%A5lefeil>.
- Spectrum (2009). *TDR 300 Soil Moisture Meter PRODUCT MANUAL*. URL: [https://www.specmeters.com/assets/1/22/6430TDR300_\(web\).pdf](https://www.specmeters.com/assets/1/22/6430TDR300_(web).pdf).
- Stevens (2018). *HydraProbe Soil Sensor, User Manual*. URL: https://www.stevenswater.com/resources/documentation/hydraprobe/HydraProbe_Manual_Jan_2018.pdf.
- Susha L., Singh, D.N. & Baghini, M. S. (2014). «A Critical Review of Soil Moisture Measurement». I: *Measurement* 54, s. 92–105. ISSN: 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>.
- Thue, J. V. (2016). *BYGNINGSFYSIKK*. Trondheim: Fagbokforlaget.
- (jul. 2019). «Lettklinker». no. I: *Store norske leksikon*.
- Time, B. (2014). *Klima 2050 — Risk reduction through climate adaptation of buildings and infrastructure*. Prosjektbeskrivelse for et Senter for Forskningsbasert Innovasjon (SFI), SINTEF Byggforsk – 102009978, Norges Forskningsråd 237859 (internt dokument).
- Vaz, C.M.P. et al. (mai 2013). «Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors». en. I: *Vadose Zone Journal* 12.2, vj2012.0160. ISSN: 15391663. DOI: 10.2136/vzj2012.0160.
- Zhu, Y. et al. (2019). «Time-Domain and Frequency-Domain Reflectometry Type Soil Moisture Sensor Performance and Soil Temperature Effects in Fine- and Coarse-Textured Soils». en. I: *Applied Engineering in Agriculture* 35.2, s. 117–134. ISSN: 1943-7838. DOI: 10.13031/aea.12908.

Vedlegg A Utstysrliste for SDI-12

(Delta-T, 2019a)

Part	Sales Code	Description
 Profile Probe	PR2/4-SDI-12 or PR2/6-SDI-12	4 or 6 sensor SDI-12 Profile Probe supplied in protective tube, with spare o-rings and centring springs
Access tube spacer	SPA1	Corrects PR2 depths when access tubes are mounted flush with soil surface
Spares kit	PR2-SP	
Cleaning kit	AT-CR1-	Cleans access tubes
Bag	PR-CB2	Carrying bag for PR2
 Access tubes	ATS1 or ATL1	Short or long fibreglass tubes suitable for PR2/4 or PR2/6, including cap, bung and collar.
Auguring equipment	-	See Auguring Manual
Insertion equipment	-	See Auguring Manual
Extraction equipment	-	See Auguring Manual
 GP2	GP2	General purpose logger controller
 SDI-12/5W-HH2	SDI-12/5W-HH2	1.5 m cable PR2 SDI-12 to HH2
 GP2-NPC	GP2-NPC	SDI-12 Network Power Cable – to supply power via a GP2-NTP and/or EXT/5W-xx cabling
 GP2-NTP	GP2-NTP	3-way network T- Piece for connection to PR2 SDI-12 and EXT/5W-xx cables
 EXT/5W-01 EXT/5W-05 EXT/5W-10 EXT/5W-25	EXT/5W-01 EXT/5W-05 EXT/5W-10 EXT/5W-25	1 m, 5 m, 10 m and 25 m extension cables with 5-way M12 connectors for connecting PR2 SDI-12 Profile Probes to a logger via an SDI-12 sensor network

Vedlegg B Feltkalibrering av SDI-12 fra brukermanual

(Delta-T, 2019a)

Field calibration of soil

Field calibration is the surest method of calibration. We strongly recommend it for *Profile Probe* installations featuring high water content (usually high-clay-content) and high conductivity, as it is the only technique likely to give good results. However it is typically far more time consuming and requires access to considerably more equipment than laboratory calibration.

General principle

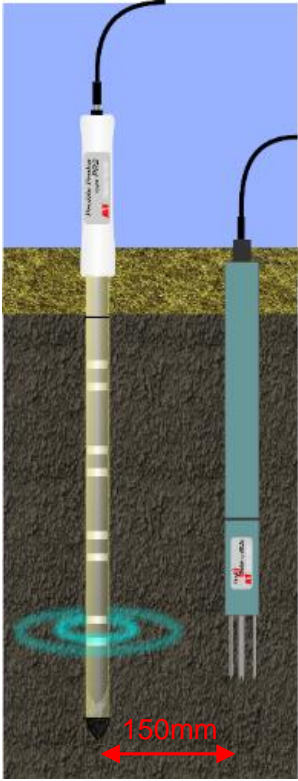
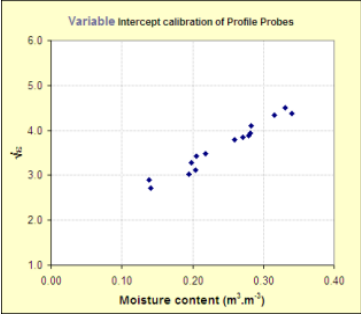
Install access tubes and take *Profile Probe* measurements (as voltages) over a period of time when the soil moisture content is changing. Over the same period, measure the water content at appropriate depths and spacing around the access tubes either by gravimetric sampling or using a Neutron Probe or using ThetaProbes. These comparison readings can then be used to construct a calibration for the *Profile Probe*.

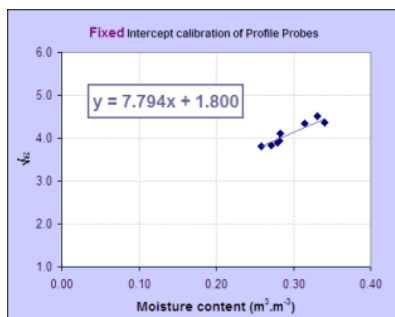
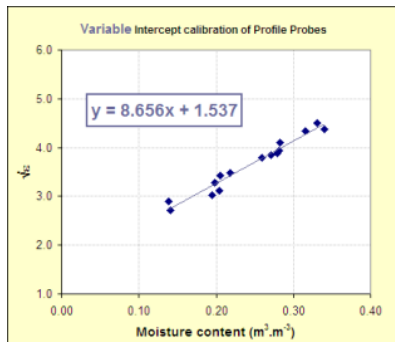
For best results this approach requires comparison readings over a significant range of soil moisture contents. If the changes in water content over the measurement period are small, the calibration becomes very sensitive to any measurement errors. The extreme case of this occurs when readings are only available at a single soil moisture content. It is still possible to calibrate the *Profile Probe* in these cases - by assuming a default value for the intercept coefficient, a_0 .

Equipment you will need:

- Installed *Profile Probe* access tubes, and *Profile Probe* with either meter or data logger
- Either **installed ThetaProbes**, ~150mm from the access tubes at the appropriate depth
 - Or **Neutron Probe** access tubes installed ~300mm from the Profile Probe tubes
 - Or **gravimetric sampling** equipment (see previous methods)
 - Or a **portable ThetaProbe** attached to a suitable length extension rod and a suitable auger for sampling at depth

The gravimetric and portable ThetaProbe methods both require essentially destructive measurements, which limit their re-use at the same site, so they may require a number of similar sites. But see below for fixed intercept calibration.

Process	Notes and example						
	<p>Take <i>Profile Probe</i> readings as voltages over a period of time as the soil moisture content changes. Ideally this would include 3 or more distinct soil moisture levels covering a change $> 0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.</p> <p>At the same time, take several independent soil moisture readings spaced around the <i>Profile Probe</i> access tube. These could be taken either with ThetaProbes or a Neutron Probe or by gravimetric sampling.</p> <p>The number of samples required depends on the uniformity of the soil and the size of the sampling volume.</p> <p>If it is difficult to take readings over a range of moisture levels, it is still possible to calibrate the <i>Profile Probe</i> using a single soil moisture comparison using the fixed intercept method below.</p>						
<table border="1" data-bbox="331 1238 662 1400"> <tbody> <tr> <td>V</td> <td>$\rightarrow \sqrt{\epsilon}$</td> </tr> <tr> <td>0.462</td> <td>2.31</td> </tr> <tr> <td>0.577</td> <td>2.78</td> </tr> </tbody> </table>	V	$\rightarrow \sqrt{\epsilon}$	0.462	2.31	0.577	2.78	<p>Convert the <i>Profile Probe</i> measurements into $\sqrt{\epsilon}$ using its calibration equation [2].</p>
V	$\rightarrow \sqrt{\epsilon}$						
0.462	2.31						
0.577	2.78						
	<p>Graph these $\sqrt{\epsilon}$ readings against the soil moisture measurements.</p> <p>(This illustration and the following procedures are taken from Excel, but the principles can also be applied within other graphing or spreadsheet programs)</p>						



Variable Intercept

Fit a linear trend line to the data, and in the Options tab choose to display the equation. You may need to adjust the number format for the equation to 3 decimal places.

The calibration coefficients can then be read off directly. In the example shown, $a_0 = 1.537$ and $a_1 = 8.656$.

Fixed Intercept

Fit a linear trend line as above, but in the Options also choose "Set intercept =".

We suggest you use the following default intercept values:

Organic soil	1.4
Mineral soil	1.6
Heavy clay	1.8

In this example the intercept has been set to $a_0 = 1.8$, and the calculated value for $a_1 = 7.794$.