

Rakeisten materiaalien kosteuden optinen mittaus

Turun yliopisto
Kone- ja materiaalitekniikan laitos
Materiaalitekniikka, Energiateknologian materiaalit
Diplomityö

Tekijä:
Viljo Pentti

Ohjaajat:
Emilia Palo, PhD, Turun yliopisto
Taisto Haavasoja, TkT, Teconer Oy

8.4.2025
Turku

Diplomityö

Oppiaine: Materiaalitekniikka, Energiateknologian materiaalit

Tekijä: Viljo Pentti

Otsikko: Rakeisten materiaalien kosteuden optinen mitta

Ohjaajat: Emilia Palo, PhD ja Taisto Haavasoja, TkT

Sivumäärä: 72 sivua

Päivämäärä: 8.4.2025

Kosteuden epätasainen jakautuminen rakeisissa materiaaleissa vaikuttaa kosteuden mittaamiseen. Optisten kosteusantureiden avulla materiaalien kosteutta on mahdollista mitata kosketuksettomasti eli ei-invasiivisesti. Optinen kosteuden mitta perustuu materiaalin pinnassa tapahtuvien valon muutosten analysoimiseen. Valonlähteenä optisissa kosteusantureissa käytetään pääsääntöisesti lähi-infrapunavalon aallonpituuksia käyttäviä LED-valoja tai hehkulamppua, jonka valo suodatetaan halutulle aallonpituudelle. Käytetty valon aallonpituus on lähi-infrapunavalon aallonpituusalueella, koska tällä alueella vesi on hyvin herkkä absorboimaan valoa veden molekyylien värähtely- ja pyörimisliikkeiden resonanssin takia.

Tämän tutkielman teoreettisessa osassa käsitellään erilaisia optisia kosteusantureita, niiden toimintaperiaatteita, käyttökohteita sekä antureiden toimintaan vaikuttavia materiaalien ominaisuuksia. Empiirisessä osassa tutkitaan kiviaineksen partikkelikoko, partikkelikokojakaumaa ja ominaispinta-alaa sekä pyritään selvittämään, miten nämä vaikuttavat optiseen kosteuden mittaamiseen. Kosteuden mittaamiseen käytettiin suomalaisen Teconer Oy:n optista kosteusanturia Water Content Monitor WCM411. Kokeellisessa tutkimuksessa mitattiin kuuden erikokoisen kiviainespartikkelin kosteuden absorptiokehitystä. Tämän jälkeen kiviainespartikkelit sekoitettiin yhdeksi seokseksi betonin valmistuksessa käytettävien standardien mukaisesti ja mitattiin seoksen kosteuden absorptiokehitys. Lisäksi tutkittiin, voidaanko optisen kosteusanturin mittaama absorptiokehityskäyrän kulmakertointa laskea matemaattisesti, kun tiedetään yksittäisten partikkelikokojen absorptiokehityksen kulmakertoimet sekä niiden massaosuudet seoksessa. Viimeiseksi tutkittiin, esiintyykö suurien kiviainespartikkeleiden pinnalla hiekkapölyä ja miten kiviainespartikkeleiden sekä hiekkapölyn massat ja ominaispinta-alat eroavat suhteessa toisiinsa.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että materiaalin partikkelikoko, partikkelikokojakauma ja partikkeleiden ominaispinta-ala vaikuttavat optiseen kosteuden mittaamiseen. Suurilla partikkeleilla anturin vaste reagoi kosteuden muutoksiin nopeammin kuin pienemmillä partikkeleilla, koska isoilla partikkeleilla ominaispinta-ala ja kosteuden absorptio on pienempi. Partikkelikokoja sekoitettaessa huomattiin, että absorboituneen kosteuden määrä riippui siitä, kuinka paljon seoksessa oli pinta-alaa, johon kosteuden oli mahdollista absorboitua. Lisäksi huomattiin, että anturin mittaaman absorptiokehityksen kulmakertoin on mahdollista laskea matemaattisesti, kunhan seoksen pinnan epätasaisuus säilytetään eikä seosta varta vasten tasoiteta. Suurissa partikkeleissa hiekkapölyä oli alle 1 % suhteessa niiden massaan, mutta hiekkapölylle laskettu ominaispinta-ala oli jopa 35,6 % suurien partikkeleiden ominaispinta-alasta. Hiekkapölyn ominaispinta-alan määrä voi vaikuttaa kosteuden absorptioon, jos hiekkapölyä esiintyy merkittävästi suurten partikkeleiden pinnassa.

Tutkielman tulokset tarjoavat tietoa siitä, miten materiaalien partikkelikoko, partikkelikokojakauma ja partikkeleiden ominaispinta-ala vaikuttavat optisen kosteusanturin toimintaan. Havainnot ovat hyödyllisiä esimerkiksi betoniteollisuudessa, jossa tarkka kosteudenhallinta vaikuttaa valmistetun betonin laatuun. Lisäksi tuloksia voidaan hyödyntää optisten kosteusantureiden kalibroinnin kehittämisessä eri materiaaleille ja antureiden asennuksessa siten, että mittaustarkkuus saadaan optimoitua eri toimintaympäristöille sopivaksi.

Avainsanat: kosteus, absorptio, reflektio, partikkelikoko, optinen kosteusanturi

Sisällysluettelo

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Johdanto | 5 |
| 2 | Optiset mittaussmenetelmät | 7 |
| 2.1 | Optisten mittaussmenetelmien edut ja haitat | 9 |
| 3 | Optiset kosteusanturit | 11 |
| 3.1 | Optisten kosteusantureiden rakenne | 11 |
| 3.2 | Optinen kosteuden mittaaminen | 12 |
| 3.3 | WCM411-kosteusanturi | 14 |
| 3.4 | NIR-7000-kosteusanturi | 16 |
| 3.5 | Kuituoptinen kosteusanturi | 17 |
| 3.5.1 | Fibre Bragg Grating | 17 |
| 3.5.2 | Vaimenevat aallot | 18 |
| 4 | Optisten kosteusantureiden käyttökohteita | 20 |
| 5 | Materiaalin ominaisuudet optisessa kosteuden mittauksessa | 24 |
| 5.1 | Partikkelikokojakauma | 24 |
| 5.1.1 | Valon heijastuminen materiaalin pinnasta | 26 |
| 5.1.2 | Ominaispinta-ala | 30 |
| 5.2 | Huokoisuus ja tiheys | 32 |
| 5.2.1 | Kosteuden absorptio | 33 |
| 5.2.2 | Pakkaustiheys ja huokoisuusaste | 36 |
| 6 | Empiirinen tutkimus | 39 |
| 6.1 | Tutkimuksen hypoteesit | 39 |
| 6.2 | Mittausjärjestelyt | 41 |
| 6.3 | Kokeelliset mittaukset | 43 |
| 6.3.1 | Partikkelikoko | 43 |
| 6.3.2 | Partikkelikokojakauma | 44 |
| 6.3.3 | Hiekkapölyn määrä suurissa kiviainespartikkeleissa | 44 |
| 7 | Tulokset ja pohdinta | 46 |
| 7.1 | Kiviainespartikkelien kosteus | 46 |
| 7.2 | Kiviainesseoksen kosteus | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 7.3 Hiekkapöly suurissa kiviainespartikkeleissa | 57 |
| 8 Johtopäätökset | 59 |
| Lähteet | 63 |
| Liitteet | 67 |
| Liite 1. 4–8 mm:n kiviaines | 67 |
| Liite 2. 2–4 mm:n kiviaines | 67 |
| Liite 3. 1–2 mm:n kiviaines | 67 |
| Liite 4. 0,5–1,2 mm:n kiviaines | 68 |
| Liite 5. 8–16 mm: kuvaaja | 68 |
| Liite 6. 4–8 mm: kuvaaja | 69 |
| Liite 7. 2–4 mm: kuvaaja | 69 |
| Liite 8. 1–2 mm: kuvaaja | 70 |
| Liite 9. 0,5–1,2 mm: kuvaaja | 70 |
| Liite 10. 0,1–0,6 mm: kuvaaja | 71 |
| Liite 11. Seoksen 1 kuvaaja | 71 |
| Liite 12. Seoksen 2 kuvaaja | 72 |
| Liite 13. Seoksen 3 kuvaaja | 72 |

1 Johdanto

Kosteus jakautuu epätasaisesti rakeisissa materiaaleissa, mikä vaikuttaa kosteuden mittaamiseen. Optiset kosteusanturit tarjoavat kosketuksettoman eli ei-invasiivisen vaihtoehdon materiaalien kosteuden mittaamiselle [1]. Mittaamisessa optiset kosteusanturit hyödyntävät lähi-infrapunavalon aallonpituuksia (800–2500 nm), koska vesi on niille herkkä veden molekyylien värähtely- ja pyörimisliikkeiden resonanssin takia [2,3]. Optisissa kosteusantureissa käytetään pääsääntöisesti LED-valoja, jotka on valmiiksi määritetty lähettämään lähi-infrapunavalon aallonpituuksia, tai hehkulamppua, joka osoittaa valonsa pyörivään kiekkoon. Pyörivään kiekkoon on asennettu suodattimia, jotka suodattavat hehkulampan valon aallonpituusalueesta halutut lähi-infrapunavalon aallonpituudet.

Optisissa kosteusantureissa mittaustekniikka perustuu valon absorption tai heijastumisen analysoimiseen mitattavan kohteen pinnasta. Tutkittavan kohteen kosteus mitataan usein pinnasta heijastuvan valon määrästä, kun pinnassa oleva kosteus imee itseensä valoa vähentäen heijastuvan valon määrää [4]. Kosteutta voidaan mitata myös optisissa kosteusantureissa käytettävällä optisella kuidulla. Kosteus vaikuttaa optisen kuidun ominaisuuksiin esimerkiksi venyttämällä sitä. Mittauksessa optiseen kuituun kohdistetaan valo, jonka ominaisuudet muuttuvat kuidun ominaisuuksien muuttuessa. Kosteuden tai muun tutkittavan parametrin muutoksia voidaan mitata kuituun kohdistetun valon muutosten perusteella.

Teollisuudessa kosteusantureita hyödynnetään esimerkiksi betonin valmistuksessa. Betonissa käytetty kiviaines absorboi itseensä kosteutta, mikä vaikuttaa valmistetun betonin vesi-sementtisuhteeseen ja sitä kautta valmiin betonin lujuuteen. Jotta valmiin betonin lujuus saadaan optimaaliseksi, kiviaineksen kosteus täytyy ottaa huomioon betonin suhteituksessa. Aikaisemmin kosteuden mittaaminen toteutettiin laboratoriossa kuivaamalla käytettyä kiviainesta ja vertailemalla kiviaineksen märkä- ja kuivapainoa. Nykyään kiviaineksen kosteutta voidaan mitata etänä optisilla kosteusantureilla juuri ennen valmistusprosessia.

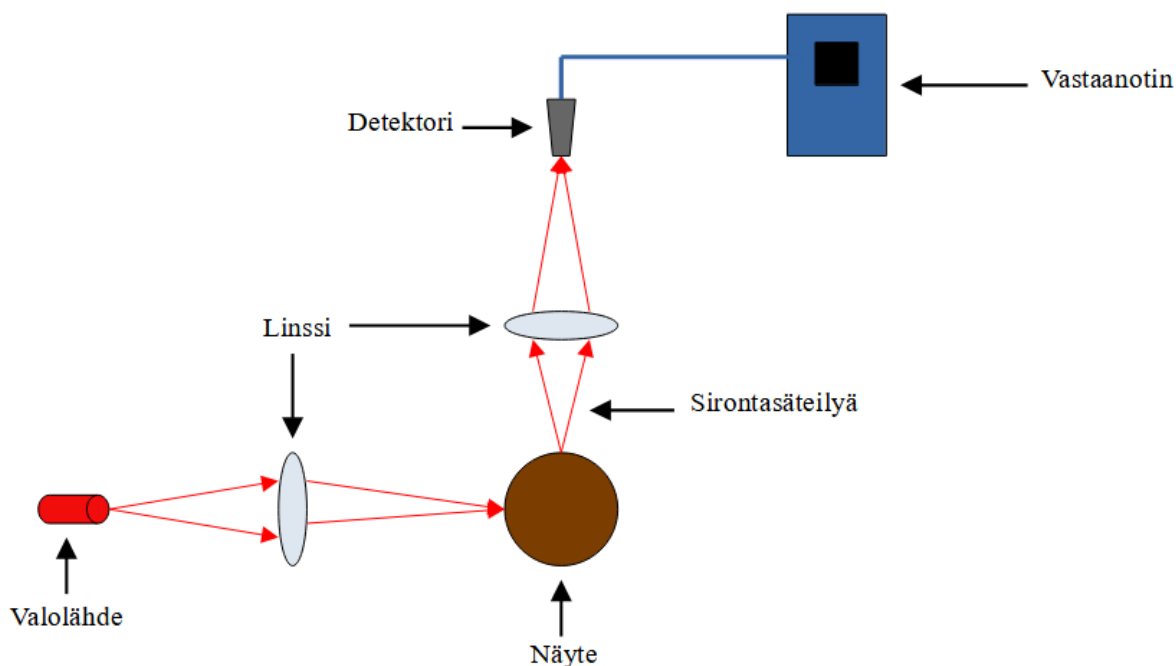
Tämän tutkielman tavoitteena on tutkia, miten materiaalin partikkelikoko, partikkelikokojakauma ja partikkeleiden ominaispinta-ala vaikuttavat optisen kosteusanturin toimintaan. Tutkielman empiirisessä osassa kosteuden mittaamiseen käytetään suomalaisen, optisia kosteusantureita valmistavan, Teconer Oy:n optista kosteusanturia Water Content Monitor WCM411.

Se miten materiaali imee eli absorboi kosteutta, riippuu materiaalin ominaisuuksista. Tutkimuksessa käytetään kuutta erikokoista kiviainesta. Kunkin kiviaineksen veden absorptiokehitys mitattiin partikkelikoko kerrallaan. Tutkimuksessa mitattu vesi sisältää sekä kiviainespartikkeleiden pintahuokosiin absorboituneen että kiviainespartikkeleiden pinnalle jääneen ylimääräisen veden. Tavoitteena oli ymmärtää, kuinka kosteusanturin vaste käyttäytyy erikokoisten partikkelien kanssa ja kuinka partikkeleiden koko vaikuttaa ominaispinta-alaan ja kosteuden absorboitumiseen. Seuraavaksi erikokoiset partikkelit sekoitettiin yhdeksi kiviainesseokseksi betonin valmistuksessa käytettävien standardien mukaisesti. Tämän tavoitteena oli ymmärtää, kuinka partikkelikojakauma vaikuttaa optisen kosteusanturin toimintaan, seoksessa olevien partikkeleiden muodostamaan ominaispinta-alaan ja sitä kautta myös lisätyn veden absorptioon. Viimeisenä tutkittiin hiekkapölyn määrää suurien partikkelikokojen pinnalla. Suurten partikkeleiden massaa ja ominaispinta-alaa verrattiin sen pinnassa olleiden hiekkapölypartikkeleiden massaan ja ominaispinta-alaan.

2 Optiset mittaamenetelmät

Optisissa mittaamenetelmissä hyödynnetään antureita, joiden mittaustekniikka perustuu valon vuorovaikutuksen analysoimiseen mitattavan kohteen pinnan kanssa [4]. Tyypillisesti optinen anturi sisältää valonlähteen, linssijä, detektorin ja vastaanottimen. Valonlähteenä anturissa voi toimia esimerkiksi LED tai laser. Anturissa linssien tehtävä on kohdistaa valonlähteen säde tutkittavaan näytteeseen ja näytteestä heijastunut valo detektoriin. Kun valonlähteestä tuleva signaali on ollut vuorovaikutuksessa tutkittavan pinnan kanssa, heijastuu signaali pinnasta takaisin detektoriin. Detektorilla analysoidaan pinnasta heijastuvan signaalin muutoksia, jotka voivat johtua esimerkiksi valon absorboitumisesta tai sirottumisesta. Detektorin tehtävänä on muuttaa saatu reflektiosignaali muotoon, jonka vastaanotin osaa muuttaa luettavaksi dataksi.

Kuvassa 1 on esimerkki optisen kosteusanturin rakenteesta. Anturissa voidaan käyttää valonlähteenä LED- tai laser-valoa. Linssien avulla lähetetty valo voidaan kohdistaa näytteen pintaan ja näytteen pinnasta heijastunut sirontasäteily detektoriin. Detektorina anturissa voidaan käyttää esimerkiksi fotodiodia, joka muuntaa valon sähköiseksi signaaliksi. Detektorin sähköinen signaali voidaan muuttaa luettavaksi dataksi vastaanottimella, joka voi olla esimerkiksi yleismittari.



Kuva 1. Optisen kosteusanturin rakennekuva.

Optisten mittausmenetelmien kasvava suosio perustuu eri valonlähteiden ja puolijohteiden kehittymiseen sekä datan varastoinnin paranemiseen [1]. Lisäksi mittauksissa käytetyt optiset anturit eivät vaikuta tutkittavaan materiaaliin, kuten monet muut käytössä olevat menetelmät. Tämä tuo monia eri soveltamismahdollisuuksia optiselle mittaukselle. Aluksi optista mittausta hyödynnettiin yksinkertaisissa laboratoriotutkimuksissa. Nykyisin optisia mittausmenetelmiä käytetään laajasti eri aloilla, kuten teollisuudessa, lääketieteessä ja geologiassa. Niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi 3D-mallinnuksessa, laserleikkauksissa, maan pinnan muotojen tutkimisessa ja pintojen sekä ilman kosteuden mittaamisessa.

Optisia mittareita suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon ulkoiset olosuhteet, joita anturin täytyy kestää ilman vaurioita. Olosuhteisiin vaikuttavia tekijöitä voivat olla lämpötila, paine, kosteus, likaantuminen, värinä tai anturiin kohdistuvat iskut. Nämä tekijät voivat aiheuttaa kohdistusvirheitä, valon taittumisen vääristymistä sekä mekaanisten osien rikkoutumista ja muodonmuutosta. [5]

Yleisesti myynnissä olevat anturit on suunniteltu kestäväksi normaalia huoneenlämpöä 20 celsiusastetta, kun taas esimerkiksi avaruudessa käytettävät anturit on suunniteltu kestäväksi äärimmäisiä lämpötiloja, jopa absoluuttista nolapistettä [5]. Käytettäviä materiaaleja ja osia suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon lämpötilavaihteluista johtuva mahdollinen lämpölaajeneminen, joka voi aiheuttaa osien mittojen vaihtelua ja johtaa kohdistusvirheisiin. Kasvava ilmanpaine tai ympäristön lämpötilan muutos voi aiheuttaa imuvaikutuksen, jolloin kosteutta ja likaa pääsee vuotokohdista sisään, kun taas alhainen paine voi heikentää liimapintoja, tiivisteitä ja muoviosia. Jotta anturit eivät altistuisi lialle tai kosteudelle, kootaan ne kuivassa ja puhtaassa ympäristössä ja vuotokohdat suojataan tiivisteillä. Lisäksi ulkoiset iskut ja värinät voivat vaikuttaa mittaustuloksiin, ja siksi anturi suojataan ulkopuolelta elastisilla ja helposti vaihdettavilla osilla. Näin myös anturissa olevia sisäisiä komponentteja on helpompi suojata vaurioitumiselta.

Mittauksia suoritettaessa määritetään ensimmäiseksi kohteen parametrit, joita halutaan tutkia, esimerkiksi lämpötila tai kosteus. Jotta voidaan valita mahdollisimman hyvä mittaustekniikka, tulee miettiä haluttua mittaustarkkuutta, mittauspisteiden aikaväliä, mitattavan kohteen kokoa sekä mittauksen kestoa. Lisäksi voidaan ottaa huomioon mittauslaitteiden hinta ja monimutkaisuus. Laitteet, jotka hyödyntävät valonlähteenään laseria ovat kalliimpia kuin LED-valoja käyttävät mittalaitteet, koska laservalot maksavat LED-valoja enemmän. Laser-valonlähteet ovat hyvin tehokkaita ja niiden säde voidaan kohdistaa hyvin tarkasti haluttuun

kohteeseen. Mittauslaitteiden hintaan ja monimutkaisuuteen vaikuttavat mittaustarkkuus sekä anturissa käytettävien komponenttien määrä ja laatu. [1]

Lämpötilaa ja kosteutta mitattaessa yleisimmin mittaustekniikkana käytetään valon reflektiota, joka muuttuu mitattavan pinnan absorboidessa lähetettyä valoa. Taulukkoon 1 on kerätty esimerkkejä optisista mittaustekniikoista ja niiden yleisimmistä käyttökohteista. Optiset mittausmenetelmät ovat yksi vaihtoehto, jolla materiaalien kosteutta ja lämpötilaa on mahdollista seurata reaaliajassa. Tästä on merkittävää etua esimerkiksi betoniteollisuudessa, kun valmistetun betonin lujuutta voidaan hallita mittaamalla käytettävän kiviaineksen kosteus ja säätelemällä vesi-sementtisuhdetta.

Materiaalien partikkelikokoa voidaan tutkia holografialla, jolloin mitattavasta kohteesta luodaan lasersäteiden avulla kolmiulotteinen kuva [1,6]. Mittaustekniikkana holografia on absorptioon perustuvaa tekniikkaa monimutkaisempi. Holografialla voidaan tutkia partikkeleita, jotka ovat tilavuudeltaan pienimmillään 1,5 mm³. Varsinaista ylärajaa tutkittavalle partikkelikoolle ei ole. Tuloksiin vaikuttavat kuitenkin mittausvälineiden tehokkuus, käytettävä aallonpituus sekä signaali-kohinasuhde, joka kuvaa halutun signaalin voimakkuutta suhteessa häiritsevän signaalin voimakkuuteen.

Taulukko 1. Esimerkkejä optisista mittaustekniikoista ja niiden yleisimmistä käyttökohteista. [1]

| Mittaustekniikka | Käyttökohte |
|------------------|--------------------------|
| Absorptio | Kosteus ja lämpötila |
| Holografia | Partikkelikoko ja -muoto |
| Pyrometri | Lämpötila |

2.1 Optisten mittausmenetelmien edut ja haitat

Optisten mittareiden käyttöön vaikuttavat ympäristö ja olosuhteet. Boss ym. tutkivat optisen anturin etuja ja haittoja tutkimuksessaan, jossa mitattiin sedimentin, eli veden mukana kulkeutuneen maa-aineksen, partikkelien kokoa ja jakaumaa [7]. Tutkimuksessa käytettiin optista mittausta, koska se mahdollisti mikrometrin kokoisten partikkelien tarkan mittaamisen lyhyillä mittauspisteiden aikaväleillä. Optinen mittaus mahdollisti myös pitkäkestoisen ja jatkuvan datankeräyksen, eikä vaikuttanut mitattavaan kohteeseen, koska optinen mittaus on ei-invasiivinen menetelmä.

Bossin ym. kokeessa partikkelijakauman ja partikkelikoon mittaamiseen käytettiin Laser In Situ Scattering and Transmission (LISST)-anturia [7]. Mittaustulokset partikkelijakauman ja

partikkelikoon suhteen LISST-menetelmällä olivat selkeät. Tutkimuksessa käytetty LISST-mittausväline on korkeudeltaan 2 metriä, mikä rajoittaa sen käyttöä ahtaissa tiloissa. Valitusta LISST-mittausvälineestä riippuen suurimmat mitattavat partikkelit voivat olla halkaisijaltaan 250–500 mikrometriä [8]. Mittaukset saattavat antaa vääränlaisia tuloksia, jos näytteessä on liian suuria partikkeleita.

Optisia antureita käytettäessä anturilla pitäisi olla selkeä näkyvyys mitattavaan kohteeseen, sillä esteet tai epätasaisuudet pinnassa heikentävät mittaustarkkuutta hajottamalla valonsädettä. Tämä ongelma huomattiin Bossin ym. kokeessa, jossa mittausolosuhteet olivat hyvin sameat [7]. Lisäksi kaikki optiset anturit ovat hyvin herkkiä ympäristöstä tulevalle valolle ja linssin pintaan kiinnittyneelle lialle. Virheitä ja vaihtelevia mittaustuloksia voi syntyä myös käytetyistä eri aallonpituuksista, jotka vaikuttavat säteen tulo- ja heijastuskulmaan. Näitä virheitä voidaan estää mittaamalla sama näyte useampaan kertaan, jolloin mittaustuloksia saadaan enemmän.

3 Optiset kosteusanturit

Määritelmän mukaan kosteusanturi on laite, joka mittaa kiinteille aineille kosteusprosentin tai kaasumaisille aineille suhteellisen kosteuden ja joka esittää tulokset luettavassa muodossa suoraan käyttäjälle [9]. Suhteellinen kosteus on mitta, joka kertoo vesihöyryn määrän ilmassa suhteessa siihen, kuinka paljon vesihöyryä kyseinen määrä ilmaa voisi enimmillään sisältää tietyssä lämpötilassa.

Kosteusanturit voidaan karkeasti jakaa elektronisiin, mekaanisiin ja optisiin kosteusantureihin [10]. Elektroniset anturit mittaavat kapasitanssia, joka perustuu sähkövaraukseen, tai impedanssia, joka kuvaa sähkövirran vastusta. Mekaaniset anturit mittaavat jännityksen tai massakuormituksen vaikutuksesta syntyviä muutoksia. Elektronisissa ja mekaanisissa kosteusantureissa on kuitenkin ongelmia. Elektronisissa antureissa kapasitanssia käytettäessä mittausetäisyys rajautuu vain kymmeneen millimetriin ja sähkö- tai lämmönjohtavuutta hyödyntävät anturit ovat hyvin herkkiä kemiallisille höyryille sekä lämpökaasuille. Mekaaniset anturit ovat herkkiä mekaanisille vaurioille, kulumiselle, tärinälle tai liialliselle kuormitukselle, jotka vaikuttavat mittaustuloksiin.

Optiset kosteusanturit ovat kehittyneet viime vuosikymmenten aikana. Kehitystä ovat tukeneet erilaisten materiaalien, kuten optisten kuitujen ja funktionaalisten materiaalien kehitys. Optisten kosteusantureiden mittaus perustuu reflektioon tai optiseen transmissioon. Optisten kosteusantureiden mittausherkkyyks on hyvin korkea, eivätkä niihin vaikuta lämpökaasut tai kemialliset höyryt. Optisista kosteusantureista on paljon hyötyä esimerkiksi kemianteollisuudessa, missä käsitellään paloherkkiä liuottimia. Elektronisia kosteusantureita käytettäessä sähkökipinöiden vaara on suurempi. [10]

3.1 Optisten kosteusantureiden rakenne

Optisissa kosteusantureissa on usein aktiivinen LED-valonlähde, joka lähettää ennalta valitun valon aallonpituutta haluttuun näytteeseen. Kosteuden mittaaminen perustuu näytteestä takaisin reflektoituvan valon määrään, jonka detektori havaitsee ja mittaa. Yleensä antureissa käytetään vähintään kahta valon aallonpituuskaistaa, joista toiseen vesi reagoi herkemmin [11]. Aallonpituuskaista, jolle vesi on herkempi, havaitsee näytteessä olevien vesimolekyylien absorboiman valon muutoksen, ja toista kaistaa käytetään referenssisignaalinä. Kosteuden mittaamisessa reflektoituneen valon määrää verrataan referenssisignaalin suuruuteen, kun osa mittaussäteen valosta on absorboitunut näytteen pintaan kosteuden vaikutuksesta.

LED-valojen lisäksi kosteusanturit voivat käyttää valonlähteenään esimerkiksi hehkulamppua. Hehkulampan valo on laajakaistaista, eli se sisältää useita eri aallonpituuksia. Hehkulamppua käytettäessä anturiin täytyy asentaa kiekko, jossa on sarja suodattimia, jotka määrittelevät käytetyn valon aallonpituuden. Kyseisellä teknologialla on mahdollista hyödyntää useita valon eri aallonpituuksia samanaikaisesti, mikä mahdollistaa tarkemman mittauksen eri materiaaleille. Tällä hetkellä kyseistä teknologiaa hyödyntävät kosteusanturit ovat kuitenkin hyvin kalliita verrattuna yksinkertaisempiin LED-valonlähteitä käyttäviin kosteusantureihin [11]. Lisäksi LED-valonlähteiden energian kulutus ja vasteaika ovat pienempiä ja käyttöikä pidempi verrattuna hehkulamppuun.

3.2 Optinen kosteuden mittaaminen

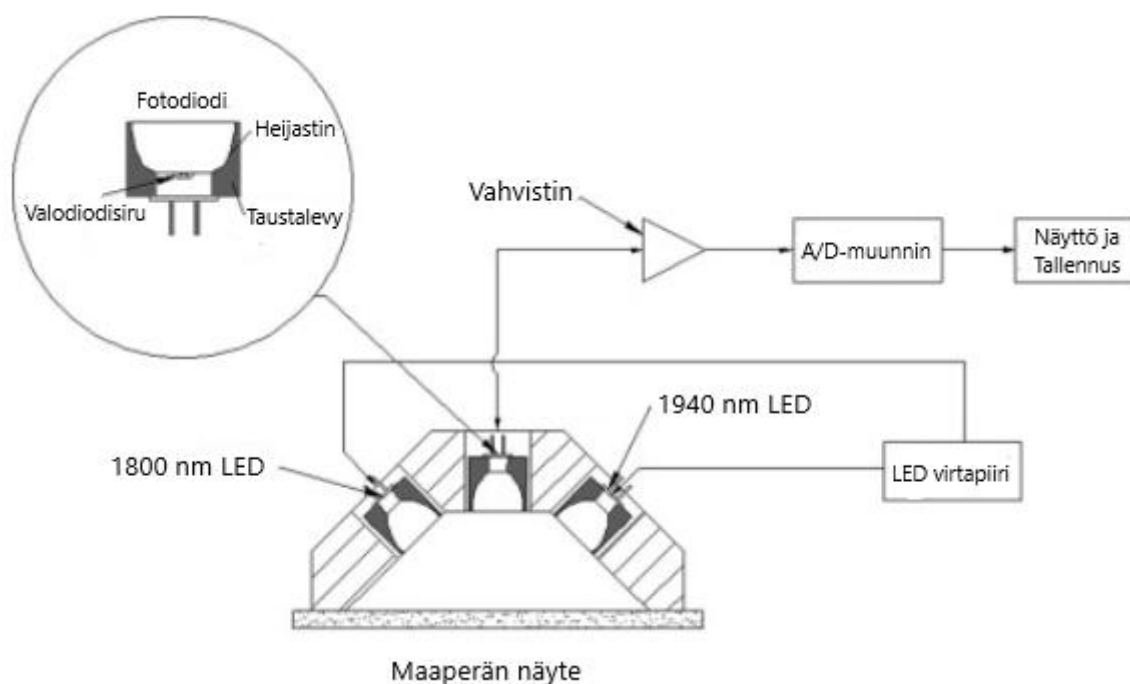
Optiset kosteusanturit hyödyntävät lähi-infrapunavalon aallonpituuksia (800–2500 nm) materiaalien kosteuden mittaamiseen [2]. Käytetyt valon aallonpituuskaistat ovat lähi-infrapuna-alueella, koska vedellä on siellä absorptiopiikkejä, jotka perustuvat veden molekyylien värähtely- ja pyörimisliikkeiden resonanssiin [3].

Near infrared (NIR) -kosteusanturiteknnologiaa hyödyntäviä lähi-infrapunavalon aallonpituuksilla toimivia kosteusantureita on suunniteltu moniin eri tarkoituksiin [2,12,13]. Joillakin materiaaleilla kosteuden imeytyminen on epätasaista. Siksi olisikin tärkeää pystyä mittaamaan kosteus materiaalin eri kohdista materiaalin kokonaiskosteuden sijaan. Kosteuden on huomattu vaikuttavan auto- ja sähköteollisuudessa käytettäviin polymeerikomponentteihin esimerkiksi piirilevyjen pinnoitteiden kautta [12]. Begušin ym. kokeessa tavoitteena oli suunnitella NIR-anturiteknnologiaa hyödyntävä kosteusanturi, joka mittaisi geometrisesti monimutkaisten polymeerikomponenttien pinnan ja lähipinnan kosteutta [12]. Käytetyn teknologian vuoksi koetta varten suunnitellun kosteusanturin mittaussyvyys rajoittui noin 0,7 mm:n syvyyteen. Koe kuitenkin osoitti, että vastaavanlaisilla antureilla on mahdollista mitata geometrialtaan hankalien polymeerikomponenttien pinnan kosteutta ilman kosketusta.

Yin ym. ja Bowers ym. käyttivät kokeissaan lähi-infrapunavalon aallonpituuksia hyödyntäviä antureita [2,3]. Yin ym. suunnittelivat kuvassa 2 näkyvän 1940 nm:n (mittaussäde) ja 1800 nm:n (referenssisäde) lähi-infrapunavalon aallonpituutta hyödyntävän optisen kosteusanturin mitatakseen maaperästä kerättyjen näytteiden kosteutta [2]. Samoin Bowers ym. käyttivät näytteissään maa-ainesta, mutta mittaamiseen käytettävät aallonpituusalueet erosivat [3]. Kokeessaan heillä oli käytössä kaksi spektrofotometriä, joista ensimmäisen (Beckman DK-2A) aallonpituusalue oli 185–3500 nm ja toisen (Beckman DU) 210–1000 nm.

Kokeessa referenssinä käytettiin magnesiumoksidia, jonka reflektio näytteistä oli melkein 100 prosenttia jokaisella käytetyllä aallonpituudella.

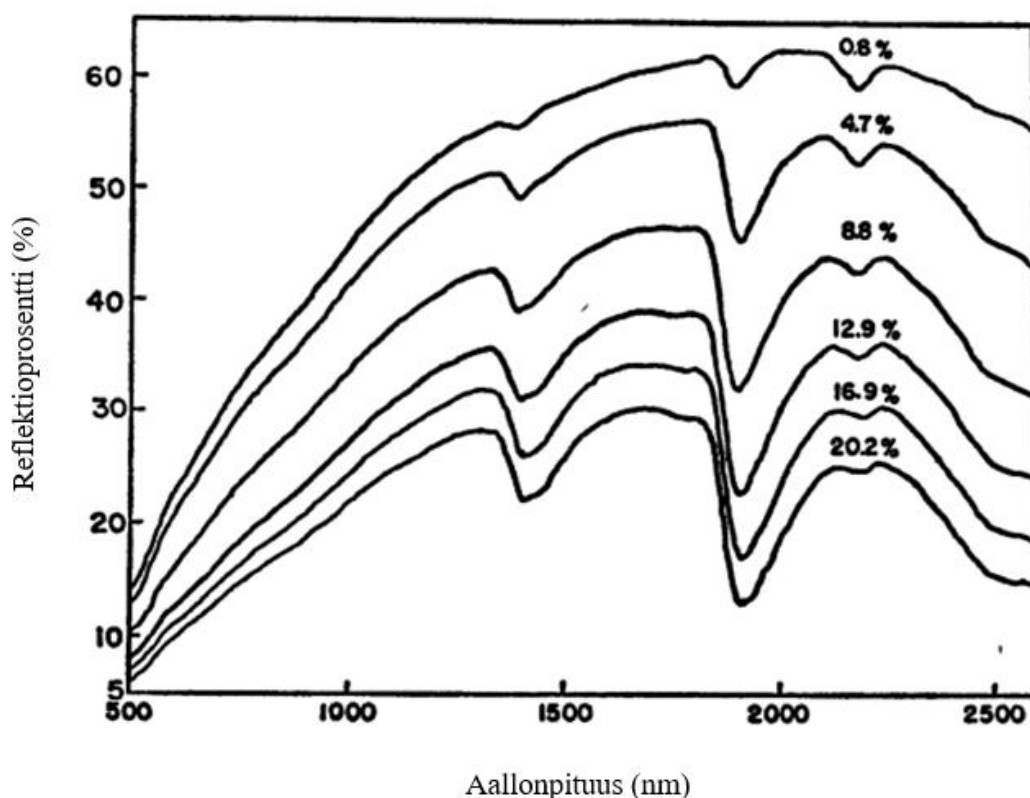
Yinin ym. kokeessa käytetty kuvan 2 anturi koostuu kuudesta LED-valonlähteestä, jotka on sijoitettu ympyrän muotoisesti fotodiodidetektorin ympärille [2]. LED-valonlähteet on asetettu 45 asteen kulmaan, jolloin ne muodostavat näytteeseen halkaisijaltaan 8 mm:n säteilyalueen. Ympäröivältä valolta suojattu detektori mittaa näytteestä refleктоituvan valon määrää. Kosteus mitataan 15 mm:n etäisyydeltä näytteestä kahdella eri aallonpituudella. Näistä ensimmäinen 1800 nm:n referenssisäde ei ole herkkä veden absorptiolle, kun taas toinen 1940 nm:n mittaussäde reagoi näytteessä olevaan veteen, jolloin kahden säteen mittaustuloksia vertaillen saadaan näytteen kosteusprosentti. Anturissa prosessi toistetaan kerran sekunnissa, mikä mahdollistaa tarkan ja reaaliaikaisen kosteuden mittauksen.



Kuva 2. NIR-kosteusanturin rakennekuva. Kuva lähteestä Yin Zhe ym. Tekijänoikeudet Elsevier 2013 [2].

Bowers ym. tutkivat kokeessaan lähi-infrapunavalon aallonpituuksien reflektion määrän muutosta kosteuden muuttuessa [3]. Kokeiltujen aallonpituuksien reflektion muutos eri kosteusprosentteilla nähdään kuvasta 3. Koetuloksista voidaan päätellä, että kosteusprosentin kasvaessa valon reflektio näytteestä pienenee. Toisin sanoen pinnan kosteuden kasvaessa pinnan säteilyenergian absorptio kasvaa, jolloin säteilyn reflektio mitattavasta pinnasta vähenee. Tuloksista huomataan myös, että aallonpituudet 1440 nm ja 1900 nm absorboituvat

voimakkaasti kosteuden vaikutuksesta. Nämä aallonpituudet osuvat optisissa kosteusantureissa yleisesti käytetyille lähi-infrapunavalon aallonpituuksille. Vaikka optisissa kosteuden mittauksissa voidaan käyttää kaikkia valon aallonpituuksia, tulosten mukaan tarkimmat mittaustulokset saavutettaisiin käyttämällä noin 1900 nm:n aallonpituutta, koska se absorboituu kosteuden vaikutuksesta herkimmin.



Kuva 3. Reflektioprosentti aallonpituuden funktiona useilla eri kosteusprosentteilla. Kuva lähteestä Bowers ja Hanks, Tekijänoikeudet The Williams and Wilkins Co. 1965 [3].

3.3 WCM411-kosteusanturi

Kuvassa 4 näkyy suomalaisen Teconer Oy:n valmistama optinen kosteusanturi Water Content Monitor WCM411. Kyseisellä kosteusanturilla mitataan betonin valmistuksessa käytettävän kiviaineksen kosteutta betonin laadun varmistamiseksi. Mittauksen tavoitteena ei ole kiviainekseen absorboituneen kosteuden määrän selvittäminen, vaan ensisijaisesti kiviainespartikkelien pinnalle jäävän vesimäärän mittaaminen. Tämä pinnalle jäävä ylimääräinen vesi osallistuu veden ja sementin kemialliseen reaktioon ja on otettava huomioon betonin suhteituksessa. Anturissa on mikroprosessoria, jotka LED-valojen avulla määrittävät kosteusprosentin heijastuneen valon muutoksista [14].



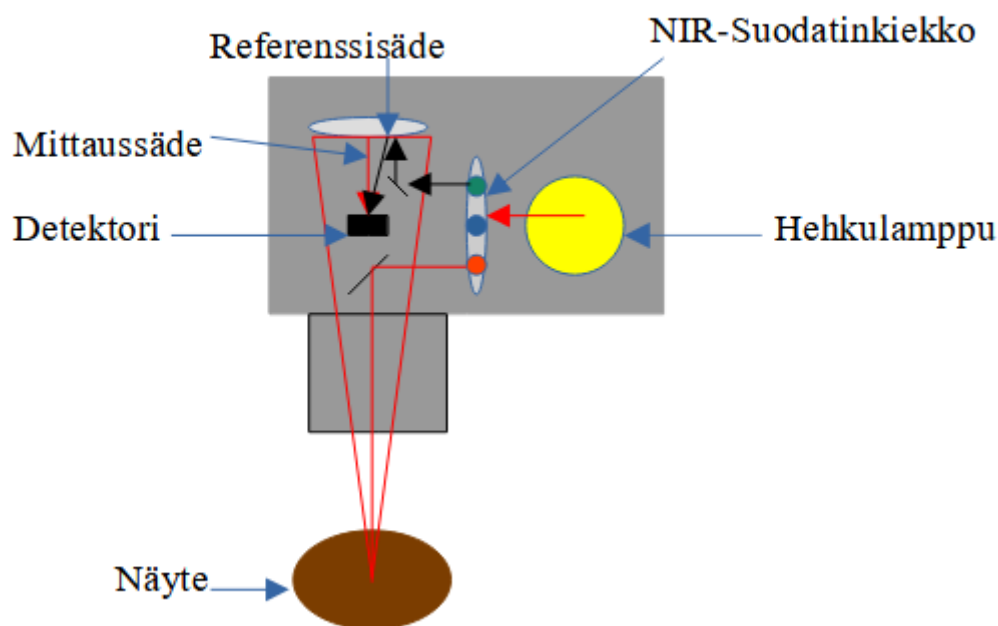
Kuva 4. Optinen kosteusanturi WCM411. Kuva lähteestä Teconer Oy, Tekijänoikeudet Teconer Oy 2025 [14].

Mahdollisimman tarkkojen arvojen saavuttamiseksi WCM411-kosteusanturi täytyy kalibroida. Kalibrointi sekä mittaustulosten tarkastelu tapahtuu etäohjelmalla, jonka Teconer Oy on kehittänyt. Yhtiö on suorittanut WCM411-kosteusanturilla kokeen, jonka tarkoituksena oli tutkia WCM411:n mittaustarkkuutta kalibroinnin kautta. Teconer Oy:n toimitusjohtajan Taisto Haavasojan mukaan WCM411-kosteusanturin kalibroinnissa paras tulos saavutetaan, kun kalibrointi aloitetaan kiviaineksella, jonka kosteus on 1–2 % [11]. Kiviainesta pidetään sekoittimessa, johon lisätään vettä portaittain, kunnes kosteus on noin 5 %. Vettä lisätään aina, kun kosteusanturin tulos vakioituu tiettyyn prosenttiin. Jos kalibrointi suoritettaisiin liian kostealla kiviaineksella, saattaisi kiviaineksesta tulla sekoituksen myötä taikinamaista ja möykkyistä. Kuivalla kiviaineksella suuremmat kivipartikkelit saattavat erottua pinnalta, jolloin anturin tulos ei ole tarkka.

Kokeessa WCM411-kosteusanturilla saavutettiin mittaustuloksia jopa 0,1 prosenttiyksikön tarkkuudella [11]. Tämä mittaustarkkuus ei kuitenkaan ole realistinen, koska koe suoritettiin lyhyellä aikavälillä, eikä ulkoisia vaikutustekijöitä otettu huomioon. Paras koetulos saavutettaisiin, jos kalibrointi suoritettaisiin pidemmällä aikavälillä ja ulkoiset tekijät, kuten sää ja mittausympäristö otettaisiin huomioon. Realistisesti anturilla voidaan saavuttaa noin 0,3 prosenttiyksikön mittaustarkkuus [14].

3.4 NIR-7000-kosteusanturi

Kuvassa 5 on yhdysvaltalaisen KPM Analyticsin valmistama optinen kosteusanturi NIR-7000. Kosteusanturissa valonlähteenä on hehkulamppu. Hehkulamppu lähettää valoa pyörivän NIR-suodatinkiekkon läpi. Kiekkon suodatimet valitsevat läpi menevän valon halutulle lähi-infrapunavalon aallonpituudelle [15]. Hehkulampusta kiekon läpi menevä valo kohdistetaan näytteen pintaan ja refleктоitunut valo keskitetään takaisin sulfidista valmistettuun detektoriin. Detektoriin tulleen mittaussäteen (punainen nuoli kuvassa 5) arvoa verrataan referenssisäteeseen (musta nuoli kuvassa 5) ja niiden suhde muutetaan kosteusprosentiksi. NIR-7000-kosteusanturia voidaan hyödyntää monien erilaisten materiaalien, esimerkiksi sementin, puun, muovien, paperin ja mineraalien, kosteuden mittaamisessa.



Kuva 5. NIR-7000-kosteusanturin rakenne.

Edellä esitetyt kosteusanturit WCM411 ja NIR-7000 eroavat toisistaan huomattavasti sekä rakenteellisesti että hinnassa. NIR-7000-anturi perustuu monimutkaisempaan rakenteeseen, jossa keskeisiä osia ovat hehkulamppu sekä kallis, valoa suodattava pyörivä kiekko. Hehkulampun käyttöikä on huomattavasti lyhyempi kuin WCM411-anturissa käytettävien LED-valojen. Lisäksi NIR-7000 anturissa käytettävät sähköiset komponentit, kuten hehkulamppu ja pyörivä kiekko, ovat alttiita kulumiselle ja vaativat säännöllistä vaihtoa ja

huoltoa, mikä lisää anturin kokonaiskustannuksia. WCM411-anturi on rakenteeltaan yksinkertaisempi ja energiatehokkaampi, mikä tekee siitä myös huomattavasti edullisemmän vaihtoehdon.

3.5 Kuituoptinen kosteusanturi

Kuituoptiset anturit, Optical Fibre Sensors (OFS), ovat kehittyneet viimeisten vuosikymmenten aikana, ja niiden käyttö on lisääntynyt monilla eri tutkimusaloilla [16]. Kuituoptisten antureiden etuina ovat pieni koko ja keveys, taipuvuus, hyvä korroosion kestävyys ja korkea mittausherkkyyys sekä -tarkkuus [17]. Antureissa kuituosuus rakennetaan piidioksidilasista eli kvartsilasista, koska sillä on korkea veto- ja taivutuslujuus. Optiset kuidut valmistetaan kuumentamalla kvartsilasia ja vetämällä se hyvin ohuiksi kuiduiksi. Venytyksen jälkeen kuidut suojataan elastisilla suojakerroksilla, jotka tekevät kuiduista joustavia ja kestävämpiä. Valmistusprosessi vaatii tarkkuutta, jotta kuidun pinnasta saadaan mahdollisimman tasainen ja puhdas, valon häviön minimoimiseksi. Kuituoptisissa antureissa valo on kohdistettu kulkemaan kuidussa. Kosteutta mitataan analysoimalla valon ominaisuuksien muutosta kuidussa. Kuituoptisia antureita käytetään esimerkiksi rakenteiden kuntosurannassa ja elintarviketeollisuudessa [18].

3.5.1 Fibre Bragg Grating

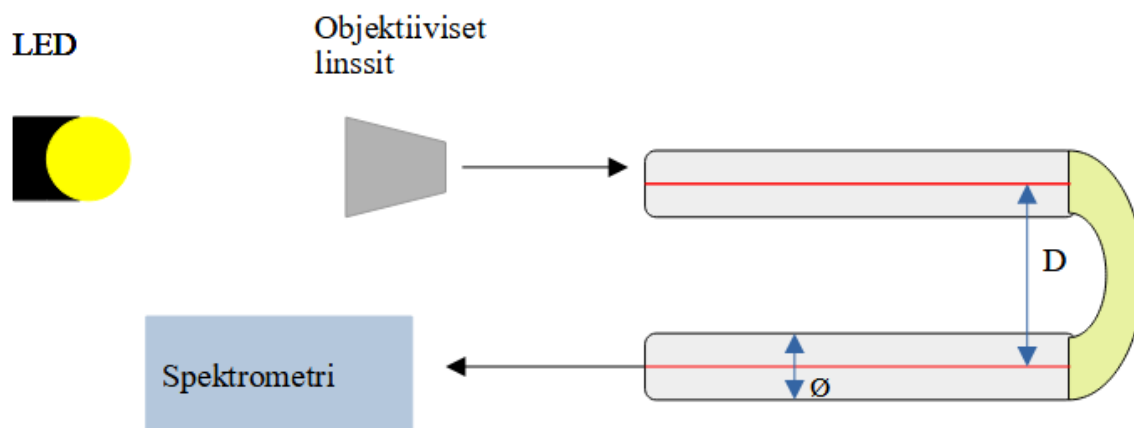
Fibre Bragg Grating (FBG) -anturit ovat käytetyimpiä kuituoptisia antureita [17]. Niitä voidaan hyödyntää muun muassa lämpötilan, paineen tai kosteuden mittaamisessa. Näiden antureiden etuina ovat pitkä, jopa satojen metrien, mittausetäisyys sekä alhainen hinta. Anturin toiminta perustuu laservaloon, joka kohdistetaan kulkemaan kuidun sisällä oleviin hilioihin. Kuidussa olevat hilat refleктоivat vain tiettyä valon aallonpituutta ja päästävät muut aallonpituudet lävitseen. Kun kuidussa tapahtuu muutoksia, esimerkiksi kuidun laajenemista, muuttaa se hilan reflektiota, jonka kautta mitattavan parametrin muutoksia voidaan tutkia. Ainoana haittana on, että hiloja voi olla kuidussa vain kymmeniä. Tämä rajoittaa mittauspisteiden määrää, kun mitattavaa dataa saadaan vain hilojen kautta tapahtuvista muutoksista. FBG-kosteusanturitekniologiaa on kokeiltu esimerkiksi betonin ja maaperän kosteuden mittaamisessa [19,20].

3.5.2 Vaimenevat aallot

Kuituoptisissa antureissa voidaan hyödyntää vaimenevia aaltoja (Evanecent waves) [16]. Anturin toimintaperiaate perustuu vaimeneviin aaltoihin, joita syntyy, kun valo reflektoituu kokonaisuudessaan kuidun pinnalta. Reflektoituva valo ei poistu kuidusta, mutta syntyneet aallot ulottuvat hyvin pienelle alueelle kuidun ulkopuolelle, jossa ne ovat vuorovaikutuksessa mitattavan ympäristön kanssa. Tätä aluetta kutsutaan vaimenevien aaltojen alueeksi, ja sen ominaisuuksia voidaan hyödyntää kosteuden mittauksessa.

Yleisin kuituoptinen anturi vaimenevien aaltojen havaitsemisessa on muovilla päällystetty optinen kuitu, josta muovipäällyste on osin poistettu [21]. Tämä mahdollistaa vaimenevien aaltojen ulottumisen kuitupinnan ulkopuolelle, jotta ne voivat olla vuorovaikutuksessa mitattavan ympäristön kanssa. Vaimenevien aaltojen avulla voidaan havaita ympäristön ominaisuuksia, kuten taitekertoimen, absorptiokyvyn ja sirontasäteilyn muutoksia [16]. Ympäristö voi esimerkiksi imeä osan vaimenevista aalloista, mikä vaikuttaa kuidun läpi kulkevan valon voimakkuuteen. Samoin ympäristön taitekerroin voi muuttaa valon kulkua, mikä puolestaan vaikuttaa takaisin heijastuvan valon ominaisuuksiin. Nämä vaikutukset havaitaan valon määrän ja ominaisuuksien muutoksina, joilla voidaan mitata ympäristössä tapahtuvia muutoksia. Vaimenevia aaltoja voidaan hyödyntää esimerkiksi ympäristön kosteuden, lämpötilan ja paineen mittaamiseen.

Käytettyä kuitua voidaan myös taivuttaa U-kirjaimen muotoiseksi, jolloin vaimenevien aaltojen matka reflektoiwaan rajapintaan kasvaa. Tämä laajentaa samalla vuorovaikutusaluetta mitattavan ympäristön kanssa. Gowri ym. kokeilivat valmistaa U-taivutetun kuituoptisen anturin mahdollisimman optimaalisilla mittasuhteilla kuvassa 6 esitetyllä tavalla [21]. He valmistivat neljä erilaista kuitua polymetyylimetakrylaatista, joka tunnetaan myös akryylinä. Kuitujen halkaisijat (\emptyset) olivat 250, 500, 750 ja 1000 μm , ja näille vastaavat U-taivutuksen halkaisijat (D) 1,25; 1,5; 1,75 ja 3 mm. Objektiivisten linssien läpi LED-valonlähteestä saatu valo ohjattiin kokeessa kuidun sisälle, ja kuidun toisesta päästä ulos tullut valo mitattiin spektrometrillä. Kuidun muovipäällyste on poistettu kuvassa 6 näkyvän keltaisen alueen osalta.



Kuva 6. U-kirjaimen muotoiseksi taivutettu kuituoptinen kosteusanturi. \varnothing kuvaa käytetyn kuidun halkaisijaa ja D taivutuksen halkaisijaa.

Kokeessa huomattiin, että paras mittausherkkyyys saavutettiin, kun taivutushalkaisija on 2–3 kertaa kuidun halkaisijan kokoinen [21]. Parhaimmat tulokset antoi kuitu, jonka halkaisija oli $500\ \mu\text{m}$ ja taivutuksen halkaisija oli $1,25\ \text{mm}$. Optiset kuituanturit, jotka hyödyntävät vaimenevia aaltoja ja jotka taivutetaan U-kirjaimen muotoiseksi, tarjoavat toimivan ja kustannustehokkaan vaihtoehdon perinteisesti piidioksidista valmistetuille antureille. U-kirjaimen muotoista kuituoptista anturia on kokeiltu monien eri materiaalien kosteuden mittaauksessa [16].

4 Optisten kosteusantureiden käyttökohteita

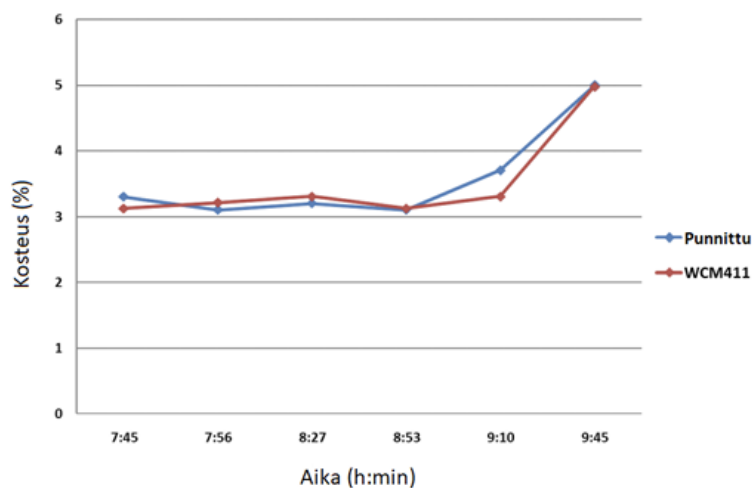
Nykyään kosteuden mittaaminen on tärkeä osa-alue monilla eri aloilla, esimerkiksi elintarvike- ja rakennusteollisuudessa [18–20]. Elintarviketeollisuudessa kosteuden seuraamisella on suuri merkitys hedelmien ja vihannesten säilytyksessä sekä kuljetuksessa. Elintarviketeollisuudessa ilman suhteellinen kosteus on tärkeämpää kuin itse tuotteiden kosteuspitoisuus. Säilytys liian kuivassa aiheuttaa vihannesten ja hedelmien kuivumista, kun taas liian kosteat olosuhteet voivat aiheuttaa homehtumista. Suhteellinen kosteus on yhteydessä siihen, miten mikrobit saavat vettä. Yli 75 prosentin kosteudessa tuotteet ovat alttiita homehtumiselle [18].

Toinen kosteusantureiden tärkeä käyttökohde on rakennusteollisuus ja erityisesti rakenteiden kuntoseuranta [19,22,23]. Siltojen, teiden ja rakennusten rapautuminen on osoittanut, että vuosien aikana rakenteissa tapahtuvien muutosten tehokas seuranta anturijärjestelmien avulla on tärkeää. Betonista valmistettua infrastruktuuria voidaan rakentaa hyvin ankariin luonnonolosuhteisiin. Betonin lujuutta lisätään usein terästangoilla. Betonin emäksisessä ympäristössä terästankojen pintaan syntyy korroosiota estävä oksidikerros. Betonirakennelmia heikentävät kuitenkin erilaiset ulkoiset tekijät, kuten ilmassa oleva hiilidioksidi sekä teiden suolaus. Kun betonin kalsiumhydroksidit reagoivat ilmassa olevan hiilidioksidin kanssa, alkaa betonin karbonatisoituminen. Karbonatisoitumisessa betoni muuttuu happamaksi, mikä vähentää teräsosia suojaavaa oksidikerrosta ja johtaa teräksen korroosioon. Lisäksi suola reagoi veden kanssa vapauttaen kloridi-ioneja, jotka ajan myötä pääsevät betonirakennelmien halkeamiin edistämään oksidikerroksen hajottamista. Teräsosien korroosio johtaa osien laajenemiseen, mikä aiheuttaa rakennelmiin sisäisiä vaurioita.

Betonin kiviaineksen kosteuden seuranta aloitetaan jo valmistusvaiheessa. Betonitehtaissa käytettävä kiviaines kastuu, kun sitä säilytetään ulkona. Ulkoa kiviaines siirretään kannellisiin siiloihin, jolloin kiviaineksessa oleva kosteus jakautuu epätasaisesti kiviainekseen ennen sen käyttöä. Betonin lujuutta säädellään vesi-sementtisuhteella. Halutun vesi-sementtisuhteen saavuttamiseksi on tiedettävä kiviaineksen kosteus. Kiviaineksen kosteuden reaaliaikainen seuranta on tärkeää tuotantoprosessin laadun varmistamiseksi.

Kosteuden mahdollinen nopea muutos nähdään kuvassa 7, jossa kosteus nousee noin 3 %:sta lähes 5 %:iin. Syynä nopealle nousulle oli muutaman päivän takainen rankkasade. Kuvassa 7

kuvaajan sininen kosteuskäyrä on mitattu punnitsemalla kiviaineksen märkä- ja kuivapaino. Punainen käyrä on kosteusanturin WCM411 mittaama kosteusprosentti.



Kuva 7. Kosteuden muutos sateen vaikutuksesta. Kuva lähteestä Taisto Haavasoja, Tekijänoikeudet Taisto Haavasoja 2011 [11].

Bremer ym. esittelevät artikkelissaan kaksi kuituoipista kosteusanturia rakennelmien kuntosurantaan [22]. Esitetyistä antureista ensimmäinen Single-point humidity sensing (SPHS) mittaa kosteutta vain yhdestä kohdasta, kun taas toinen Distributed moisture sensing (DMS) pystyy havaitsemaan kosteuden muutokset useasta eri kohdasta. SPHS-anturin mittaus perustuu aikaisemmin kerrottuun Fibre Bragg Grating (FBG) -kosteusanturitekologiaan, kun taas jälkimmäisen DMS-anturin mittaus perustuu anturissa olevaan laitteeseen, joka heikentää kuidun läpi kulkevaa valoa kosteuden kasvaessa.

Yeo ym. suorittivat kokeen, jossa kuituoipisella anturilla seurattiin valmistetun betonin kosteuden muutoksia [19]. Aikaisemman artikkelin lisäksi Bremer ym. ovat kokeilleet kuituoipisen kosteusanturin toimivuutta viemäritunnelien liitoskohdissa tapahtuvien vuotojen havaitsemiseen [23]. Molemmissa kokeissa käytettiin SPHS-kosteusanturia, joka mittaa kosteuden yhdestä kohdasta FBG-kosteusanturitekologiaa käyttäen [19,23]. Kokeissa anturi päällystettiin kosteudelle herkällä polymeerillä, polyimidillä, jonka tarkoituksena oli absorboida kosteus aiheuttaen turpoamista. Turpoaminen saa optisen kuidun venymään, mikä vaikuttaa hilojen refleктоiman valon aallonpituuteen. Hilojen refleктоimat aallonpituudet kalibroitiin vastaamaan tiettyä suhteellista kosteusprosenttia. Molemmissa kokeissa aallonpituuden muutokset mitattiin spektrometrillä ja tulkittiin kosteuden muutokseksi. Lisäksi Bremerin ym. kokeessa tutkittiin DMS-anturin toimivuutta viemäriverkoston vuotojen

havaitsemiseen [23]. Anturin kosteudenmittaus perustuu PVA-hydrogeelin turpoamiseen, jolloin kuidussa kulkeva valo vaimenee.

Bremer ym. asettivat kokeessaan SPHS-anturin viemäriputkien liitoskohtiin, koska anturilla oli mahdollista mitata vain yhtä kohtaa kerrallaan [23]. Koska DMS-anturilla on mahdollista mitata kosteutta useasta eri kohdasta, asetettiin kokeessa kosteutta mittaava kuitu kulkemaan viemäriputken sisäpintaa pitkin. Yeo ym. valmistivat koetta varten sylinterin muotoisia betoninäytteitä, joiden vesi-sementtisuhteet (v/s) olivat 0,5; 0,6 ja 0,7 [19]. Näytteiden annettiin kovettua muotissaan 24 tuntia, minkä jälkeen ne asetettiin seitsemäksi päiväksi 20 celsiusasteen lämpöiseen vesialtaaseen. Vesialtaista ne nostettiin kuivumaan ja kovettumaan noin kuukaudeksi 16 celsiusasteiseen laboratorioon. Kuukauden kestäneen kuivumisen jälkeen näytteiden keskelle porattiin reikä, johon kosteusanturi asetettiin, ja reikä tiivistettiin nestemäisellä vahalla veden tihkumisen ja huoneen lämpötilan vaikutuksen estämiseksi. Anturin annettiin olla näytteen sisällä yli tunnin ennen mittausten aloittamista, jotta anturi ehti saavuttaa tasapainotilan.

Kaikissa kolmessa kokeessa todistettiin, että kuituoptisella anturilla on mahdollista mitata kosteutta betonirakennelmissa [19,23]. SPHS-anturille kosteus mitattiin useilla eri kosteusarvoilla sekä lisäksi se upotettiin veteen. Eri kosteusprosentit toteutettiin erilaisten kyllästettyjen suolaliuosten avulla, joista jokainen vastasi tiettyä kosteusprosenttia. Tuloksista huomattiin, että anturin vaste nousi kalibroitujen aallonpituuksien mukaisesti. Myös DMS-anturilla huomattiin valon vaimenemista kuidussa, kun kosteus kasvoi. Kun DMS-anturi peitettiin vielä huopahöyhenillä, huomattiin anturin mittauksen herkkyyden ja tarkkuuden paranevan [23]. Tämä johtuu siitä, että huopahöyhen vaimentaa kuidussa kulkevaa valoa kostuessaan.

Yeon ym. kokeessa huomattiin, että kuukauden jälkeen 0,5 v/s:n näytteessä kosteusprosentti oli edelleen hyvin korkea 92 % [19]. Kosteus laski 79 %:iin 24 tunnin kuivauksella 80 °C uunissa ja 62 %:iin 48 tunnin kuivauksella 95 °C uunissa. Tiheydeltään pienempi 0,7 v/s:n näyte saavutti hieman alle 20 %:n kosteuden 48 tunnin kuivauksen jälkeen 95 °C uunissa. Harvemmassa 0,7 v/s:n näytteessä anturin lukeman muutokseen meni 240 min ja 0,5 v/s:n näytteellä 250 min. Näytteiden 10 minuutin vaste-eron voidaan olettaa johtuvan siitä, että 0,5 v/s:n betoninäyte on tiheämpää kuin 0,7 v/s:n betoninäyte, mikä hidastaa veden kulkeutumista.

Koetulokset todistavat, että betonirakennelmien kuntoseuranta on mahdollista kuituoptyisilla kosteusantureilla. Niillä on mahdollista seurata rakennelmien sisällä tapahtuvia kosteuden muutoksia, kuin myös pinnassa esiintyvää kosteutta. Kun kosteus rakennelmien sisältä on mahdollista mitata, voidaan betonissa olevien teräsosien korroosiota estää tehokkaammin. Lisäksi rakennelmiin, kuten viemäriputkiin, syntyvät vuotokohdat on mahdollista havaita ajoissa, jolloin rakennelmien korjauskuluja saadaan vähennettyä. [19,23]

Optisia kosteusantureita voidaan hyödyntää myös teiden talvikunnossapidossa [24]. Kosteusantureiden ansiosta teiden suolausta voidaan optimoida, jolloin ajoturvallisuus lisääntyy, ympäristörasitus pienenee, tiesääennusteet paranevat ja kustannukset laskevat. Kuvassa 8 esitetty Teconer Oy:n Road Weather Sensor 10 (RWS10) toimii infrapunavaloa tienpintaan lähettävällä anturilla. Koska vesi- ja jääkerros vaikuttavat refleктоituvan valon aallonpituuteen vaimentavasti, voidaan refleктоituvan valon muutokset havaita anturissa olevien mikroprosessorien avulla. Mikroprosessorit hoitavat anturissa mittauksen ja datan käsittelyn. Tiesääasema RWS10 voidaan asentaa tien varrella sijaitsevaan pylvääseen, josta tien reaaliaikaisia olosuhteita voidaan seurata. RWS10-anturilla voidaan myös mitata vesi- ja jääkerroksen paksuus kymmenesosamillimetreinä 5 mm:iin saakka. Saatuja vesi- ja jääkerroksen paksuuden mittaustietoja voidaan käyttää kitkakertoimen laskemiseen, minkä avulla saadaan tietoon myös tienpinnan liukkaus ja mahdollinen hiekoituksen tai suolauksen tarve.



Kuva 8. Tiesääasema RWS10 asennettuna tien varrella olevaan pylvääseen. Kuva lähteestä Teconer Oy, Tekijänoikeudet Teconer Oy 2025 [24].

5 Materiaalin ominaisuudet optisessa kosteuden mittauksessa

Materiaalien ominaisuudet vaikuttavat optiseen kosteuden mittaamiseen. Keskeisimpiä ovat materiaalin partikkelikoko ja -muoto, pinnan laatu, huokoisuus ja tiheys. Nämä ominaisuudet vaikuttavat valon käyttäytymiseen materiaalin pinnalla ja materiaalin kykyyn absorboida ja varastoida kosteutta.

Materiaalin partikkelikoko ja -muoto vaikuttavat paljon valon reflektoitumiseen materiaalin pinnasta. Samalla materiaalin pinnan laatu, kuten epätasaisuus ja väri, vaikuttavat mittauksen herkkyyteen ja tarkkuuteen. Pinnan epätasaisuus lisää valon hajontaa, ja pinnan väri vaikuttaa pinnan kykyyn absorboida valoa. Lisäksi partikkelikoko määrittää rakeisen aineen pinta-alan, johon mahdollinen kosteus voi absorboitua. Materiaalin huokoisuus ja tiheys vaikuttavat materiaalin kykyyn imeä ja varastoida kosteutta itseensä. Materiaalin huokoisuuden takia kosteuden jakautuminen voi olla materiaalin sisällä epätasaista, jolloin materiaalin pintakosteus ei välttämättä vastaa kokonaiskosteuspitoisuutta.

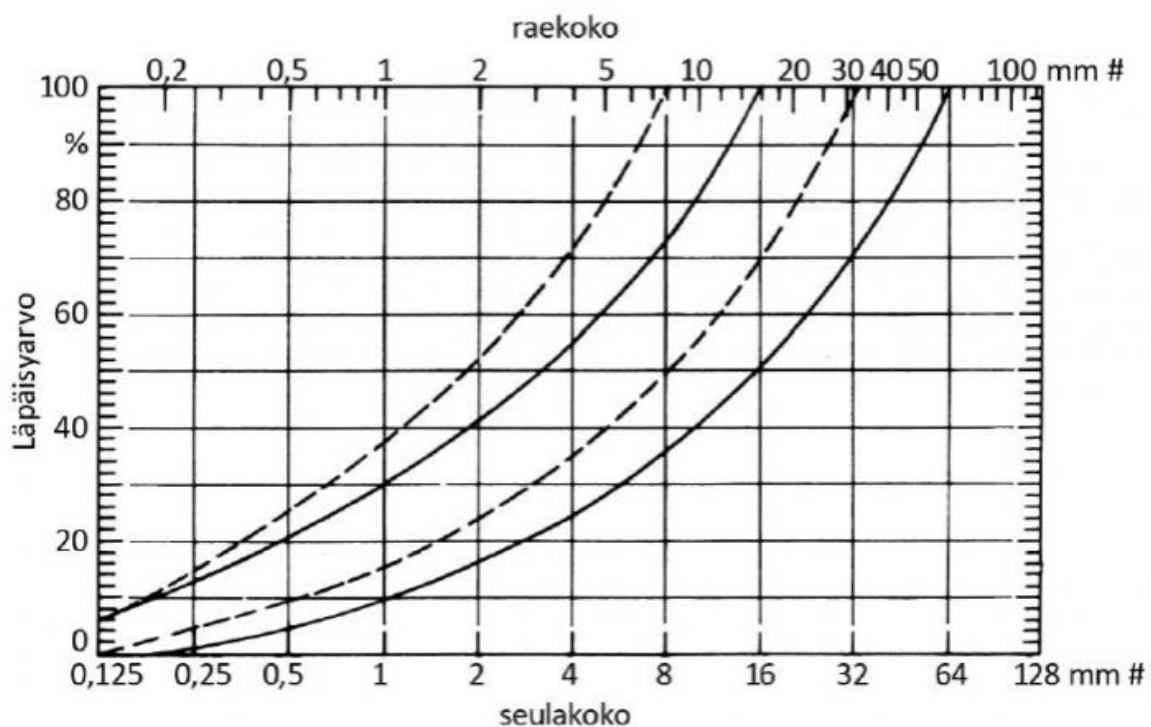
Materiaalien optisen kosteuden mittaustarkkuus ja luotettavuus riippuvat siis monista eri tekijöistä, jotka vaikuttavat materiaalin kykyyn reflektoida valoa ja absorboida kosteutta. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksen ymmärtäminen on tärkeää, jotta mittaukset saadaan mahdollisimman tarkoiksi ja luotettaviksi.

5.1 Partikkelikokojakauma

Partikkelikokojakauma on fysikaalinen ominaisuus kaikille rakeisille materiaaleille. Esimerkiksi maaperän kiviaineksille partikkelikokojakaumaa syntyy eroosiossa. Materiaalin partikkelikokojakauma vaikuttaa sen mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten läpäisevyyteen ja huokoisuuteen. Optisessa kosteudenmittauksessa partikkelikokojakauma vaikuttaa lisäksi käytössä olevaan pinta-alaan, johon kosteus voi sitoutua, sekä valonsäteiden heijastumiseen ja sirottumiseen. Rakeisten materiaalien partikkelikokojakaumaa voidaan kuvata monilla eri matemaattisilla kaavoilla ja kuvaajilla [25]. Tilanteeseen sopivin tapa on se, jossa ennustetun ja lasketun kuvaajan välinen ero on mahdollisimman pieni.

Kiviaineksella tarkoitetaan rakentamiseen käytettävää rakeista materiaalia, kuten hiekkaa, soraa tai kalliomursketta [26]. Kiviaineksen ominaisuuksilla on suuri vaikutus rakentamisessa. Esimerkiksi betonissa 60–80 % tilavuudesta on kiviainesta. Kiviaineksen partikkelikokojakaumalla eli rakeisuudella on suuri merkitys valmistetun betonin

kestävyyteen ja lujuuteen. Rakeisuus kuvaa kiviaineksessa olevien erisuuruisten rakeiden määrien painosuhdetta. Betoniteollisuudessa kiviaineksen rakeisuus määritellään standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti: erikokoiset partikkelit erotellaan seulontalaitteella ja niistä lasketaan eri raekokojen läpäisyprosentit [27]. Seulontatulokset esitetään rakeisuuskäyränä raekokojen ja läpäisyarvojen avulla. Kuvassa 9 on esitetty kiviainesseoksen optimaalinen suhteitus raekokojen ja läpäisyarvojen mukaan. Kiviainekset nimetään raekoon halkaisijan mukaan. Kiviainesseosta valmistettaessa kiviainesten läpäisyarvojen prosentit voidaan myös muuttaa seoksessa olevien partikkelikokojen massaprocenteiksi.



Kuva 9. Yhdistetyn kiviaineksen suhteituksen raja-arvokäyrät. Kuva lähteestä Betonitieto, Suhteitukseen vaikuttavat tekijät. Tekijänoikeudet Suomen Betoniyhdistys ry [27].

Betonin valmistuksessa on yhdistettävä vähintään kahta erikokoista kiviainesta, jotta saavutettaisiin käyttökelpoinen rakeisuus betonin kestävyyden ja lujuuden kannalta. Lisäksi partikkelikokojakaumaan valitut kiviaineskoot vaikuttavat kiviainesten segregatioon. Segregaatiossa suuret kiviainekset kasautuvat vain tietylle alueelle, kun betonia valmistetaan. Tämä vaikuttaa betonin lujuuteen ja kestävyyteen. Segregaatiota voidaan hallita säätelämällä käytetyn kiviaineksen partikkelikokojakaumaa betonin valmistusvaiheessa. Todennäköisyyttä, että suuret partikkelit pakkautuvat seoksessa, voidaan vähentää valitsemalla pienempiä ja epäsäännöllisemmän muotoisia partikkeleita. Silloin suuret painavat kiviainekset eivät painu

pohjaan ja nosta sementtimassaa pinnalle. Lisäksi epäsäännöllisen muotoiset partikkelit kiinnittyvät toisiinsa helpommin kuin pyöreät ja sileäpintaist partikkelit. Tämä vähentää partikkelien erottumista. [27,28]

5.1.1 Valon heijastuminen materiaalin pinnasta

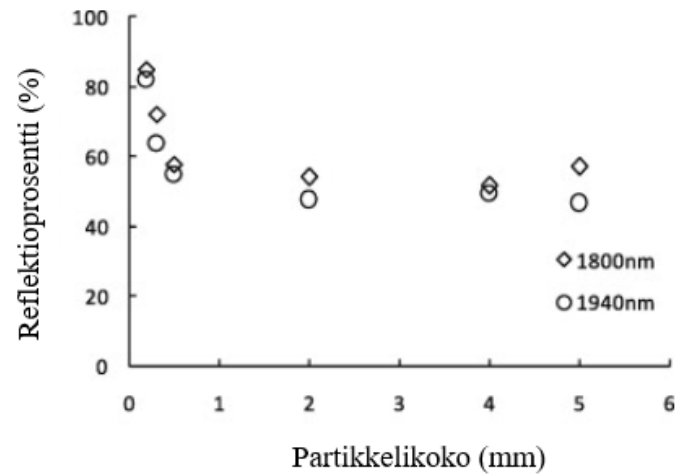
Partikkelikokojakaumasta aiheutuva pinnan epätasaisuus johtaa valon epätasaiseen heijastumiseen mitattavan materiaalin pinnasta ja vaikuttaa sitä kautta optiseen kosteuden mittaamiseen. Sironateorian mukaan karkeammat partikkelit materiaalin pinnalla lisäävät todennäköisyyttä, että yhden partikkelin heijastama säde osuu toiseen partikkeliin, mikä vähentää pinnan kokonaisheijastavuutta [29]. Karkeammilla partikkeleilla anturin säteen mittausetäisyys siis vaihtelee. Vaikka mittausetäisyyden vaihtelu onkin vain millimetrien luokkaa, on sillä merkitystä valonsäteen takaisin heijastumiseen ja sitä kautta anturin mittaukseen.

Partikkelikoon vaikutuksesta valon sirottumiseen materiaalin pinnasta on suoritettu useita tutkimuksia [2,3,29]. Jokaisessa kolmessa tutkimuksessa mittaukseen sekä vertailuna käytetyt valon aallonpituudet erosivat toisistaan. Yinin ym. kokeessa käytettiin kappaleessa 3.2 kerrottua NIR-kosteusanturia, joka käytti referenssisäteenään 1800 nm:n sädettä ja mittaussäteenään 1940 nm:n sädettä [2]. Bowers ym. käyttivät kosteuden mittaamiseen kahta spektrofotometriä (Beckman DK-2A ja Beckman DU), joiden mittausalueet olivat 185-3500 nm ja 210-1000 nm [3]. Kolmannessa Wun ym. suorittamassa kokeessa näytteiden mittaamiseen käytettiin spektroradiometriä, jonka toiminta-alue oli 350–2500 nm [29].

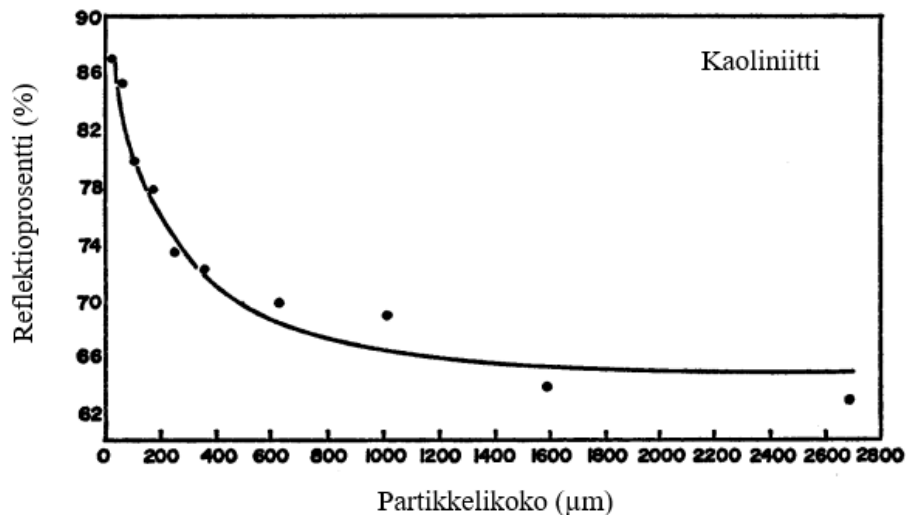
Yinin ym. kokeessa maa-ainesnäytteet kerättiin eri puolilta Kiinaa [2]. Näytteiden partikkelikokojen halkaisijat vaihtelivat 5–0,18 mm välissä. Vastaavasti Wun ym. kokeeseen kerättiin neljä mineraaliainesta ja yksi orgaaninen aines eri puolilta New Yorkin osavaltiota [29]. Jokaisesta viidestä näytteestä otettiin kahdeksan eri partikkelikokoa, jotka vaihtelivat 8 mm:n ja 0,044 mm:n välillä, ja ne nimettiin keräämisalueen mukaan. Bowers ym. käyttivät kokeessaan vain yhden mineraalin, kaoliniitin, erikokoisia partikkeleita [3].

Kaikki kolme tutkimusta osoittivat, että materiaalin partikkelikoko vaikuttaa optisen kosteusanturin valon reflektoitumiseen. Yin ym. sekä Bowers ym. saivat kokeissaan täysin samankaltaisia kuvan 10 ja 11 mukaisia tuloksia reflektioprosentin kehityksestä partikkelikoon funktiona [2,3]. Yinin ym. kokeen tulokset kuvassa 10 näyttävät suurimman, halkaisijaltaan 5 mm:n kokoisen partikkelin, ja pienimmän, alle 1 mm:n kokoisen partikkelin

välisen reflektioprosenttieron olevan 35 %-yksikköä, kun vastaavasti Bowersin ym. (kuva 11) tuloksista nähdään reflektioprosentin laskevan 16 %-yksikköä partikkelikoon kasvaessa 1 mm:n [2,3]. Lisäksi kuvan 10 mukaan 4 mm:n kasvu partikkelikoon halkaisijassa vähentää yli 40 %-yksikköä reflektoituneen valon määrää.



Kuva 10. Valon reflektioprosentti maaperän partikkelikoon funktiona. Kuva lähteestä Zhe Yin ym. Tekijänoikeudet Elsevier 2013 [2].

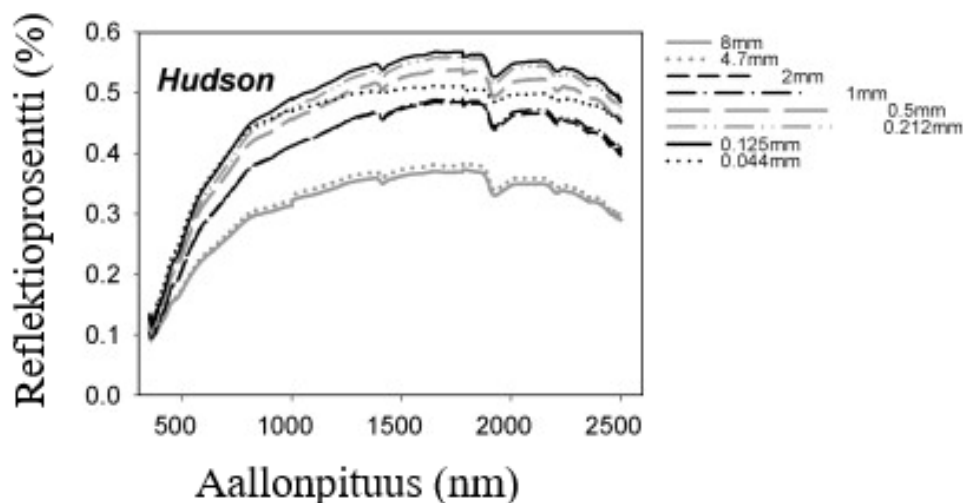


Kuva 11. Kaoliniitti-mineraalin reflektioprosentti partikkelikoon funktiona. Kuva lähteestä Bowers ja Hanks, Tekijänoikeudet The Williams and Wilkins Co. 1965 [3].

Kuvassa 12 on esitetty Wun ym. suorittamassa kokeessa saadut reflektioprosenttimuutokset erikokoisille partikkeleille aallonpituuksien funktiona [29]. Jokaisesta kuvien 10, 11 ja 12

tuloksista nähdään, kuinka reflektioprosentti vähenee partikkelikoon kasvaessa.

Reflektioprosentin väheneminen partikkelikoon kasvaessa johtuu siitä, että suuremmat partikkelit sirottavat valoa pieniä partikkeleita enemmän sirontateorian mukaisesti.

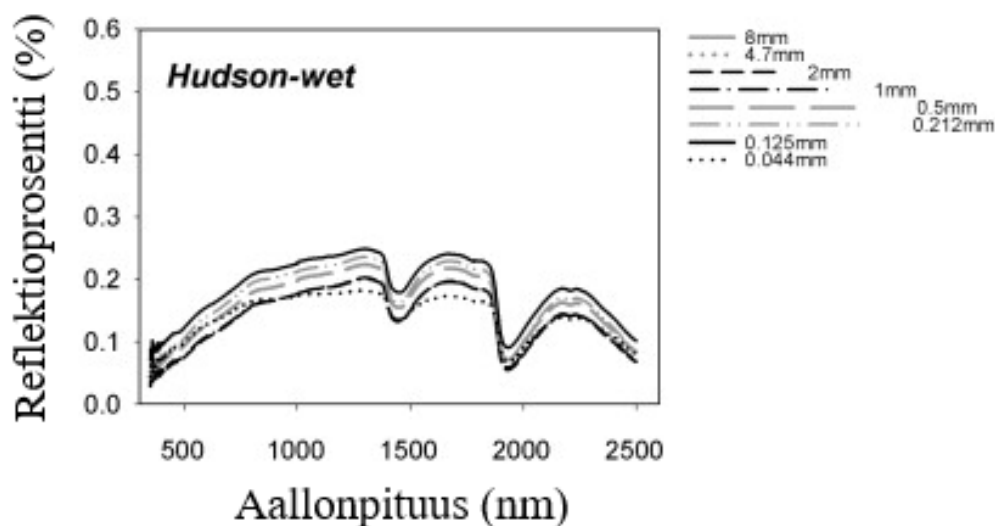


Kuva 12. Ilmakuivattujen Hudson-kiviainesnäytteiden reflektioprosentti aallonpituuden funktiona. Kuva lähteestä Chun-Yu Wu ym. Tekijänoikeudet Elsevier 2009 [29].

Merkittävä ero tutkimuksissa esitettyjen tulosten välillä on se, että kuvista 12 ja 13 voidaan havaita myös aallonpituuden vaikutus reflektoituneen valon määrään. Kaikilla viidellä ilmakuivalla kiviainesnäytteellä reflektioreaktio valon eri aallonpituuksille oli suhteellisen samanlainen [29]. Kuvassa 12 nähdään ilmakuivattujen Hudson-kiviainesnäytteiden reflektioprosentti aallonpituuden funktiona erikokoisille kiviaineksille. Hudsonilla, kuten myös muilla kiviainesnäytteillä, reflektio oli pienintä, noin 10 prosenttia, lyhyillä aallonpituuksilla ja kasvoi aallonpituuden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että maaperänäytteet absorboivat valoa näkyvän valon aallonpituuksilla. Aallonpituuden kasvaessa maaperän absorboima valon määrä vähenee, mikä johtaa reflektioprosentin kasvuun.

Kuvan 12, 13 ja aikaisemmin esitetyn kuvan 3 tuloksissa huomattiin reflektioprosentin pudotus kolmella eri aallonpituudella 1470 nm, 1900 nm ja 2350 nm [3,29]. Kahden ensimmäisen aallonpituudesta johtuvan pudotuksen oletettiin johtuvan mineraaleissa sekä vedessä esiintyvistä hydroksyyliiryhmistä, koska ne ovat erityisen herkkiä infrapunasäteilylle ja siten myös absorboivat valoa tehokkaasti. Viimeinen havaittavissa oleva pudotus 2350 nm:n kohdalla ei ole niin selkeä kuin kaksi ensimmäistä, mutta sen uskotaan syntyvän mineraaleissa esiintyvän metyleenimolekyylin reagoiessa kyseisen aallonpituuden kanssa [29].

Tulokset kostealle Hudson-kiviainesnäytteelle on esitetty kuvassa 13 [29]. Saadut tulokset ovat odotuksen mukaiset: reflektioprosentti verrattuna ilmakeivään näytteeseen on huomattavasti pienempi. Reflektioprosentin lasku johtuu näytteeseen lisätystä kosteudesta, joka muuttaa pinnan väriä tummemmaksi ja voimistaa nyt myös lisätyssä vedessä esiintyvien hydroksyyliyhymien valon absorptiota. Tummemmat pinnat absorboivat valoa enemmän kuin vaaleat pinnat. Lisäksi pinnassa oleva kosteus muuttaa valon heijastuskulmaa taitekertoimen muuttuessa, mikä myös vähentää heijastuneen valon määrää. Myös Yinin ym. kokeen tuloksista kuvassa 10 huomattiin, että partikkelikoon kasvaessa tietyn rajan yli, pysyy reflektio lähes vakiona [2]. Tämän havainnon uskotaan viittaavan siihen, että partikkelikoon kasvaessa tämän tietyn rajan yli, sen vaikutus valon säteilyenergian absorptioon vähenee.



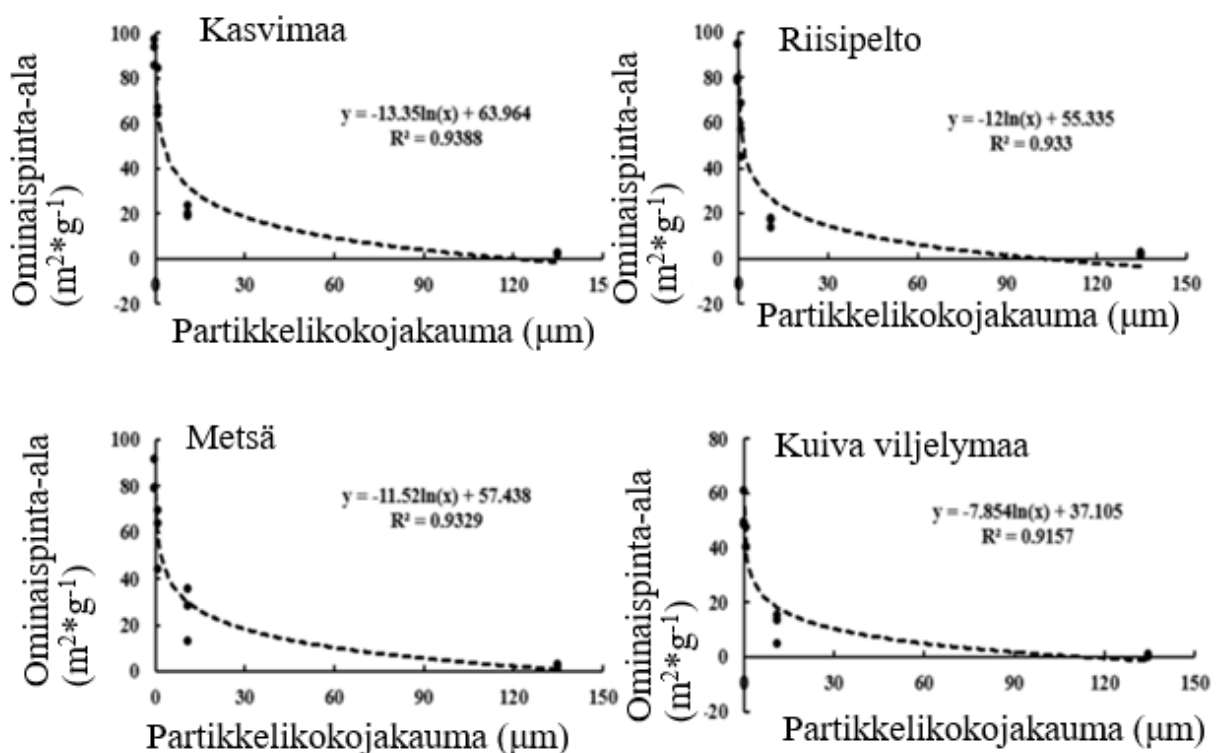
Kuva 13. Kosteiden Hudson-kiviainesnäytteiden reflektioprosentti aallonpituuden funktiona. Kuva lähteestä Chun-Yu Wu ym. Tekijänoikeudet Elsevier 2009 [29].

Kuvasta 13 nähdään, kuinka näytteiden kastelu vähensi reflektioprosentin eroavaisuuksia eri partikkelikokojen välillä, koska kosteus näytteiden pinnassa vähensi pinnan epätasaisuutta. Kokeessa kuitenkin huomattiin, että joillakin maa-aineisnäytteillä kosteuden lisäys ei vaikuttanut pinnan epätasaisuuseroihin millään tavalla. Syy tähän ilmiöön ei kuitenkaan selvinnyt tutkimuksessa. Tämän havainnon johdosta NIR-teknologiaa voitaisiin kuitenkin käyttää myös rakeisissa materiaaleissa olevien partikkelikokojen tunnistamiseen kosteuden määrästä riippumatta, jos materiaalinäytteen kosteus ei vaikuta pinnan epätasaisuuteen. [29]

5.1.2 Ominaispinta-ala

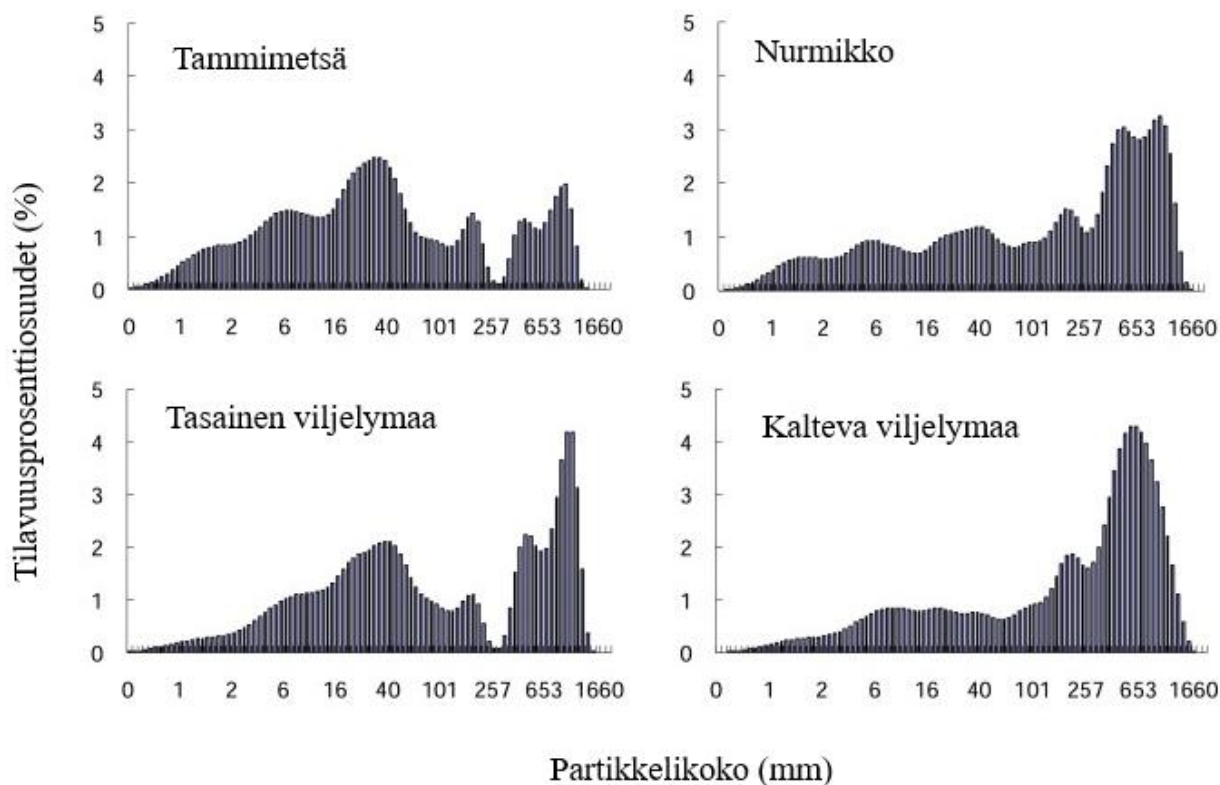
Rakeisten materiaalien partikkelikokojakauma vaikuttaa myös partikkeleiden ominaispinta-alaan, johon mahdollinen kosteus voi absorboitua. Kiviaineksen ominaispinta-alalla tarkoitetaan kiviaineksessa olevien partikkeleiden massan ja kokonaispinta-alan välistä suhdetta [28]. Materiaalin ominaispinta-ala kasvaa, kun rakeiden partikkelikoko pienenee massan pysyessä vakiona. Ominaispinta-alaa voidaan arvioida, kun partikkelit jaetaan halkaisijoiden perusteella erillisiin astioihin ja niiden ajatellaan olevan muodoltaan pallomaisia.

Partikkelikokojakauman vaikutusta ominaispinta-alaan ja partikkelien tilavuuteen ovat tutkineet Bi ym. sekä Qi ym. [30,31]. Molemmissa kokeissa kerättiin näytteet neljästä erilaisesta maaperästä. Bin ym. kokeessa maa-ainenäytteet kerättiin kolmesta eri syvyydestä (0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm) ja Qin ym. kokeessa 20 cm:n syvyydestä [30,31]. Kokeissa huomattiin partikkelien ominaispinta-alan sekä tilavuuden muuttuvan partikkelikokojen funktiona. Bin ym. kokeessa huomattiin ominaispinta-alan pienenevän logaritmisesti partikkelikokoon funktiona [30]. Kuvan 14 kuvaajien korrelaatiokertoimet R^2 osoittavat johdonmukaisen tuloksen jokaiselle neljälle maa-ainekselle.



Kuva 14. Neljän maa-ainenäytteen ominaispinta-ala partikkelikokojakauman funktiona. Kuva lähteestä Xiaoqian Bi ym. Tekijänoikeudet Scientific reports 2023 [30].

Vertailtaessa ominaispinta-alojen eroja erikokoisille partikkeleille halkaisijaltaan 2–20 µm:n ja 20–250 µm:n ominaispinta-aloissa ei ollut merkittävää eroa. Kun näitä verrattiin halkaisijaltaan kahteen pienimpään eli alle 0,2 µm:n ja 0,2–2 µm:n partikkelikokoon, ero oli jo merkittävä. Ominaispinta-alat jakautuivat erikokoisille partikkeleille eri maa-aineksissa seuraavanlaisesti: 0,2–2 µm (38,3–65,2 %) > 2–20 µm (10,4–39,4 %) > alle 0,2 µm (10,1–22,1 %) > 20–250 µm (2,6–8,2 %). [30] Vastaavasti kuvan 15 Qin ym. kokeen tuloksista nähdään, kuinka partikkeleiden tilavuusprosenttiosuudet vaihtelevat partikkelikokoon kasvaessa [31]. Tuloksista voidaan huomata viljelymaiden olevan karkeampia kuin nurmikon tai tammimetsän. Lisäksi tammimetsällä voidaan olettaa olevan suurin ominaispinta-ala kokeen näytteistä, koska siinä esiintyvä partikkelikokojakauma on tasaisin. Muissa näytteissä suuria partikkelikokoja esiintyy enemmän, mikä pienentää näytteiden ominaispinta-alaa.



Kuva 15. Partikkeleiden tilavuusprosenttiosuudet partikkelikokojen funktiona. Kuva lähteestä Fei Qi. Tekijänoikeudet Elsevier 2018 [31].

Tutkimuksissa huomattiin, että maa-aineksen ominaispinta-ala kasvaa maakerroksen syventyessä. Yleensä maaperän suuret partikkelit ovat maanpinnalla, kun pienemmät partikkelit ovat pinnan alapuolella. Maanviljelyssä maaperän muokkaaminen johtaa kuitenkin

eri partikkelikokojen tasaisempaan jakautumiseen syvyyden suhteen. Lisäksi viljelyssä käytettävä vesi muokkaa maaperää ja vie valuessaan maaperän hienoimman maa-aineksen mukanaan. Tämä huomataan varsinkin kaltevan viljelymaan maaperän koostumuksessa: partikkelikokojakaumassa suurin osa partikkeleista on kooltaan suuria. Ilmiö voidaan huomata myös tasaisen viljelymaan maaperän koostumuksessa. Metsissä maaperän muokkaaminen on harvinaisempaa, jolloin partikkelit pienenevät ja ominaispinta-ala kasvaa mentäessä syvemmälle maaperässä. Lisäksi metsissä maaperän partikkelikokojakauma on tasaisempaa. Alimmassa 20–30 cm syvyydessä maata muokataan harvemmin, mikä johtaa hiukkasten tiivistymiseen ja hienontumiseen lisäten ominaispinta-alaa. Taulukossa 2 on esitetty, kuinka kuvan 14 metsästä otetun maa-ainenäytteen partikkelikokojen ominaispinta-alat vaihtelevat ja miten niiden suhteelliset prosenttiosuudet muuttuvat sen mukaan, mistä syvyydestä maa-ainenäyte on otettu. [30,31]

Taulukko 2. Metsän maaperänäytteen ominaispinta-alan arvot sekä niiden suhteelliset prosenttiosuudet eri partikkelikokoissa ja maaperän syvyyskerroksissa. [30]

| Metsän maaperänäyte | | | | |
|---------------------------|---------------------|----------------------------------|---|---------------------------------|
| Maakerroksen paksuus (cm) | Partikkelikoko (µm) | Partikkelikokojen keskiarvo (µm) | Ominaispinta-ala (m ² *g ⁻¹) | Suhteellinen prosenttiosuus (%) |
| 0–10 | 20–250 | 135 | 1,6 | 3,9 |
| | 2–20 | 11 | 36 | 33 |
| | 0,2–2 | 1,1 | 64 | 50,7 |
| | <0,2 | 0,1 | 79,3 | 12,4 |
| 10–20 | 20–250 | 135 | 3,2 | 6 |
| | 2–20 | 11 | 28,3 | 39,4 |
| | 0,2–2 | 1,1 | 44 | 44,5 |
| | <0,2 | 0,1 | 79,3 | 10,1 |
| 20–30 | 20–250 | 135 | 2,8 | 4,3 |
| | 2–20 | 11 | 13,2 | 16,6 |
| | 0,2–2 | 1,1 | 69,8 | 62,5 |
| | <0,2 | 0,1 | 91,6 | 16,6 |

5.2 Huokoisuus ja tiheys

Huokoisuus ja tiheys vaikuttavat materiaalin kykyyn absorboida ja kuljettaa kosteutta. Tiheys määrittää materiaalin massan sen tilavuuteen verrattuna ja on usein käänteinen materiaalin

huokoisuuden arvoon. Huokoisemmat materiaalit absorboivat ja varastoivat vettä enemmän kuin tiheet materiaalit, jotka vastustavat kosteuden absorptiota. Kosteuden käyttäytymiseen materiaalissa vaikuttavat tiheyden ja huokoisuuden lisäksi huokosten koko ja jakautuminen sekä se, ovatko huokokset yhteydessä toisiinsa [32].

Huokoisissa materiaaleissa kosteus voi absorboitua joko painovoiman tai kapillaarivoimien avulla. Pienemmät ja yhtenäisemmät huokokset edistävät kosteuden etenemistä kapillaarivoimien avulla, jolloin kosteus etenee kapeissa huokosissa seinämien ja nesteen välisten voimien seurauksena ilman ulkoista vaikutusta [32]. Suuremmissa huokosissa kapillaarivoimien vaikutus on heikompaa, jolloin kosteuden absorboituminen perustuu enemmän painovoimaan. Hyvin tiheissä materiaaleissa kosteuden absorptio voi jäädä hyvinkin vähäiseksi ja kosteus voi jäädä materiaalin pintaan adsorboituneeksi kosteudeksi.

Rakeisissa materiaaleissa rakeiden pakkaustiheys vaikuttaa siihen, kuinka kosteus kulkeutuu rakeiden välissä [33]. Pienet ja epäsäännöllisen muotoiset partikkelit pakkautuvat tiheämmin kuin suuret partikkelit, mikä vaikuttaa niiden absorptiokykyyn sekä kosteuden kulkeutumiseen tyhjiissä tiloissa. Kosteuden kulkeutuminen materiaalin pinnan alle vaikuttaa myös optiseen kosteuden mittaamiseen, koska yleensä optisesti kosteutta voidaan havaita luotettavasti vain materiaalin pinnalta [34].

5.2.1 Kosteuden absorptio

Huokoisten materiaalien veden absorptiokykyä voidaan mitata kapillaarihuokosiin absorboituneen kosteuden avulla [32]. Kapillaarivedellä tarkoitetaan materiaalin huokosissa ja rakenteissa olevaa vettä, jonka liikkuminen perustuu kapillaarivoimiin. Kapillaarivoimat syntyvät nesteen ja kapeiden seinämien välisten vetovoimien takia, jolloin neste voi liikkua ilman ulkoisia voimia.

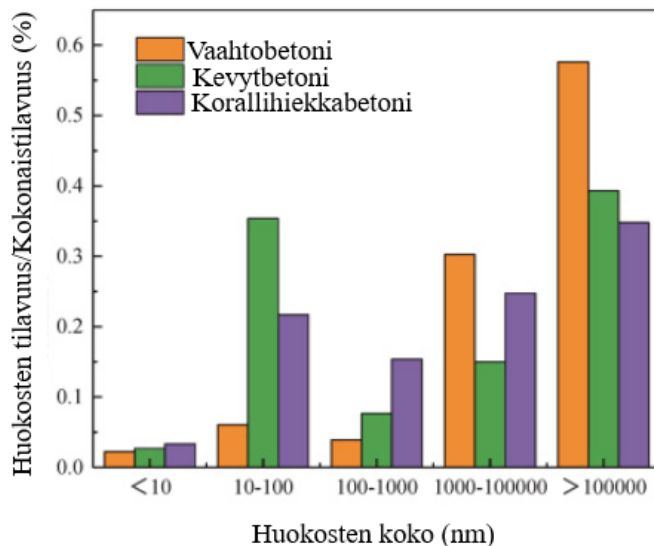
Partikkeli- ja huokoskoon vaikutusta kosteuden absorptioon on tutkittu useilla kokeilla [32–34]. Wang ym. tutkivat, kuinka huokosten koko ja koeolosuhteet vaikuttivat vaahtobetonin, kevytbetonin ja korallihiekasta valmistetun betonin absorptiokykyyn ja kapillaariveden absorptioon [32]. Kokeessa betoninäytteiden painot ja huokoisuusprosentit jakautuivat huokoisimmasta tiheimpään seuraavasti: vaahtobetoni 0,2141 g ja 87,86 %, kevytbetoni 0,3832 g ja 59,16 % ja korallihiekasta valmistettu betoni 0,7442 g ja 19,28 %. Kalmanin ym. ja Meladan ym. tutkimuksissa materiaaleina käytettiin useita partikkelikooltaan erikokoisia

materiaaleja, kuten marmoria, mäntyä, kipsiä, laastia, vehnänjyviä, bakeliittia ja styroksia [33,34].

Kaikkien kolmen tutkimuksen tavoitteena oli selvittää erilaisten materiaalien kykyä absorboida kosteutta. Tutkimusten mittausjärjestelyt erosivat hieman toisistaan. Wangin ym. ja Kalmanin ym. kokeissa kosteuden absorptioon tutkimiseen käytettiin kuivausmenetelmää, jossa näytteen kuiva- ja märkätainoa verrataan keskenään [32,33]. Wang ym. kuivasivat vesialtaassa olleet näytteet 105 °C uunissa ja punnitsivat ne 12 tunnin välein 3 kertaa, kunnes mitattu massan muutos ei ylittänyt 1 %:a [32]. Kalman ym. käyttivät kokeessaan Mettler Toledo HB43-kosteusanalysointilaitetta, joka automaattisesti punnitsee ja vertailee näytteen kuiva- ja märkätainoa [33]. Ensimmäiseksi näytteisiin sumutettiin vähitellen vettä niin kauan, että ne saavuttivat kylläisyyden, jolloin kosteus alkoi valua näytteissä. Kastelun jälkeen märät näytteet asetettiin Mettler Toledo -mittauslaitteeseen, jonka kuivauslämpötilaksi oli asetettu 120 °C. Haluttu kosteuden muutos saatiin selville, kun laite punnitsi näytteen painon muutosta sen kuivuessa.

Toisin kuin kahdessa edellisessä tutkimuksessa Melada ym. käyttivät kosteuden absorboitumisen tutkimiseen 970 nm:n lähi-infrapunavaloa ja piistä valmistettua detektoria [34]. Mittauslaitteistossa käytettiin optista kuitua, jolla hehkulampusta tuleva valo kohdistettiin näytteeseen ja siitä reflektoitunut valo takaisin detektoriin. Detektoriin oli asennettu mittaustuloksia tarkentava suodatin, joka päästi lävitseen vain haluttua 970 nm:n lähi-infrapunavaloa.

Kaikkien kolmen kokeen tulokset osoittivat partikkelikoon ja materiaalin huokoisuuden vaikuttavan kosteuden absorptioon ja kulkeutumiseen näytteen sisällä [32–34]. Kuvasta 16 nähdään kuinka Wangin ym. kokeessa vaahbetonilla oli eniten suurimpia yli 100 000 nm:n kokoisia huokosia, jotka näkyivät myös selvästi näytteen pinnassa [32]. Kevytbetonilla ja korallihiekasta valmistetulla betonilla huokokset olivat näkymättömämpiä mikrohuokosia. Huokosten koot tukevat myös näytteille laskettuja huokoisuusarvoja, joiden mukaan vaahbetoni oli näytteistä huokoisin.



Kuva 16. Vaahabetonin, kevytbetonin ja korallihiekasta valmistetun betonin huokosten kokojakauma. Kuva lähteestä Yingying Wang ym. Tekijänoikeudet Elsevier 2021 [32].

Vaahabetonin suurissa huokosissa kosteuden absorboitumisen huomattiin johtuvan enemmän painovoimasta, jolloin kapillaari-ilmiö jäi vähäiseksi. Kaksi muuta betoninäytettä olivat herkempiä kosteuden absorptiolle, koska betoninäytteissä huokokset olivat pienempiä, jolloin kapillaari-ilmiö sekä kosteuden absorboituminen oli suurempaa. Sekä kevytbetoni että korallihiekasta valmistettu betoni sisälsivät pieniä huokosia. Korallihiekasta valmistettu betoni oli kevytbetonia tiheämpää, eivätkä pienet huokokset siinä olleet yhteydessä toisiinsa. Koska kevytbetonissa olleet huokokset olivat yhteydessä toisiinsa suuremman huokoisuuden ansiosta, tarjosivat huokokset paremman mahdollisuuden veden kulkeutumiselle ja siten kevytbetoni absorboi kosteutta eniten. [32]

Kalmanin ym. ja Meladan ym. kokeissa huomattiin näytteissä olleiden rakeiden sekä pintahuokosten koon vaikuttavan kosteuden absorptioon [33,34]. Näytteiden absorptiokykyyn vaikuttivat huokosten koon lisäksi myös huokosten pinnalla olevien pintahuokosten määrä, kun lisätyn kosteuden huomattiin absorboituvan ensimmäiseksi näytteiden pintahuokosiin [33]. Suuremmissa partikkeleissa pinta on tasainen eli pintahuokosten lukumäärä on pieni, mikä vähentää absorboituneen kosteuden määrää. Saman huomasi myös Melada ym. kokeessaan, kun tiheä ja vähän pintahuokosia omaava marmori absorboi kokeessa vähiten kosteutta [34]. Enemmän kosteutta absorboivat jauhomaiset ja hyvin huokoiset materiaalit kuten laasti ja kipsi. Eniten kosteutta kokeessa absorboivat kuitenkin puunäytteet, joiden pintahuokokset laajenivat kosteuden kasvaessa, mikä edisti kosteuden absorptiota.

Kun näytteet kuivuivat tietyn saturaatioasteen alapuolelle, ei Meladan ym. kokeessa käyttämä detektori enää havainnut materiaaleissa kosteuden muutosta [34]. Tämä viittaa siihen, että huokoiset materiaalit pidättävät kosteuden huokosissaan sekä kapillaareissaan, jolloin haihtuminen tapahtuu materiaalin sisällä. Lisäksi huomattiin, että reflektioarvoissa materiaalien välillä oli eroja, vaikka olosuhteet olisivat olleet vakioita. Tämä johtuu materiaalien väri- ja karkeuseroista ja tästä syystä optinen kosteusanturi kannattaa kalibroida jokaiselle materiaalille erikseen.

5.2.2 Pakkaustiheys ja huokoisuusaste

Rakeisissa materiaaleissa pakkaustiheys määrää materiaalin kokonaistiheyden ja huokoisuuden, jotka vaikuttavat kosteuden kulkeutumiseen ja sen vaikutuksiin materiaalissa. Huokoisuusaste kuvaa, kuinka paljon tyhjää tilaa materiaalin partikkeleiden välillä on suhteessa kokonaistilavuuteen. Tyhjä tila mahdollistaa kosteuden kulkeutumisen partikkeleiden välissä. Kosteus voi vaikuttaa partikkelien välisiin vuorovaikutuksiin, jolloin materiaalin huokoisuusaste voi muuttua. Pienillä partikkeleilla kosteus voi vaikuttaa partikkelien koheesivoimiin, jotka sitovat partikkeleita kiinni toisiinsa, kun taas isommilla partikkeleilla kosteus voi vähentää partikkelien välistä kitkaa kasvattaen huokoisuusastetta [33]. Pakkaustiheys kuvaa partikkelien massan jakautumista kokonaistilavuuden suhteen. Betonia valmistettaessa kiviainespartikkeleiden pakkaustiheys vaikuttaa betonin notkeuteen, lujuuteen ja kestävyYTEEN [35].

Kosteuden absorption lisäksi Kalman ym. tutkivat kokeessaan myös pakkaustiheyttä ja huokoisuusastetta [33]. Huokoisuusastetta eli tyhjien tilojen määrää partikkeleiden välillä tutkittiin nestepyknometrillä, missä materiaalit asetettiin partikkelikoon mukaan 250 ja 500 ml:n kokoiisiin säiliöihin. Kokeessa seurattiin, kuinka pyknometriin lisätty vesi täytti partikkeleissa olevat pintahuokokset ja sen jälkeen partikkelien väliset tyhjät tilat. Li ym. tutkivat kokeessaan, kuinka eri materiaaleista (polypropeeni, hiili ja basaltti) valmistetut kuidut vaikuttavat betonin kiviaineksen pakkaustiheyteen betoniseoksessa [35]. Pakkaustiheys tutkittiin sekä kuivalle, että märälle betoniseokselle. Seoksessa käytetyt materiaalit sekoitettiin astiassa tasaisesti, jonka jälkeen laskettiin kuivan sekä märän seoksen pakkaustiheys.

Tutkimuksissa huomattiin partikkelikoon ja -muodon sekä materiaalin huokoisuuden vaikuttavan pakkaustiheyteen, huokoisuusasteeseen ja kosteuden käyttäytymiseen materiaalissa. Suuret partikkelit jättävät väleihinsä suurempia huokostiloja kuin pienemmät partikkelit. Kosteus voi myös vähentää suurempien partikkelien välillä olevaa kitkaa, jolloin

partikkeleiden järjestys voi muuttua ja partikkeleiden väliin voi syntyä enemmän tyhjiä tiloja, jolloin huokostilavuus kasvaa. Betoniseoksissa lisätty vesi menee aluksi partikkeleiden väleihin työntäen partikkeleita pois päin toisistaan ja pienentäen pakkaustiheyttä. Pienemmät ja epäsäännöllisen muotoiset kiinteät partikkelit luovat tiiviimpiä rakenteita ja niiden partikkeleiden välillä on enemmän kosketuspinta-alaa verrattuna suuriin partikkeleihin. Kun betoniseokseen lisätyn veden määrä kasvaa, sitoo kosteus partikkelit toisiinsa kosteudesta syntyvien koheesivoimien takia. Tämä johtaa seoksessa pakkaustiheyden kasvuun ja huokoisuusasteen pienenemiseen. [33,35]

Kalmanin ym. kokeessa huomattiin tiiviisti pakkautuneiden materiaalien absorboivan heikommin kosteutta kuin löyhemmin pakkautuneiden materiaalien [33]. Löyhemmin pakkautuneessa materiaalissa on enemmän huokostilavuutta, jolloin partikkeleiden väliin mahtuu enemmän vettä. Tiiviisti pakkautuneissa materiaaleissa kapillaarivoimat edistävät kosteuden kulkeutumista, mutta kulkeutuminen hidastuu kosteuden lisääntyessä. Seoksissa partikkelit pakkautuvat usein niin, että suuremmat partikkelit ovat seoksen pinnalla ja pienemmät partikkelit seoksen pohjalla [30,33]. Kun kosteutta lisätään seokseen, pyrkii kosteus absorboitumaan ensimmäiseksi yleensä sinne, missä pinta-ala on suurin. Tämä tarkoittaa sitä, että ensin kosteutta absorboivat seoksen pohjalla olevat pienet partikkelit, koska niillä on suuri ominaispinta-ala, ja tämän jälkeen vasta pinnalla olevat suuremmat partikkelit.

Kalmanin ym. kokeessa joidenkin huokoisten materiaalien, kuten zeoliitin, bakeliitin ja vehnän, huomattiin käyttäytyvän eri tavalla verrattuna muihin huokoisiin materiaaleihin [33]. Zeoliitilla ja bakeliitilla kosteuden absorboituminen tapahtui normaalisti pintahuokosiin, kuten muillakin materiaaleilla. Pintahuokosten absorboidessa myös partikkelitiheys kasvoi. Näissä materiaaleissa pintaan kerääntyneen veden ei kuitenkaan huomattu vaikuttavan huokoisuusasteeseen, vaikka koheesivoimien odotettiin tiivistävän partikkeleita. Zeoliitin ja bakeliitin huokosrakenne ja kosteuden kulkeutumismekanismit poikkeavat siis muista huokoisista materiaaleista ja kosteuden vaikutus ilmenee lievemmin. Vehnässä kosteuden lisääntyminen kasvatti huokoisuutta, ja samalla jyvien pakkaustiheys pieneni. Tämä voidaan selittää jyvien paisumisella kosteuden kasvaessa. Paisumisen seurauksena jyvien väliin syntyy suurempia välejä, jolloin myös huokoisuusaste jyvien välillä kasvaa.

Tuloksista voidaan myös päätellä, että pakkaustiheys ja huokoisuusaste voivat vaikuttaa optisen kosteudenmittauksen tuloksiin. Optinen kosteuden mittaaminen perustuu pinnalta

mitattuun kosteuteen, joten partikkeleiden huokosiin sekä pinnan alle kulkeutunutta kosteutta on vaikea havaita. Lisäksi esimerkiksi vehnän tapauksessa jyvien turpoaminen voi vaikuttaa valon sirontaan ja siten vääristää saatuja mittaustuloksia. Kuten karkeuserojen ja värin vaikutuksesta, myös vehnän turpoamisesta johtuen optiset kosteusanturit tulisi kalibroida erikseen jokaiselle materiaalille, jotta saadut mittaustulokset vastaisivat todellista kosteutta, olivat materiaalin ominaisuudet mitkä tahansa [33–35].

6 Empiirinen tutkimus

Tutkielman empiirisessä osassa tutkitaan materiaalien ominaisuuksia, jotka vaikuttavat optiseen kosteuden mittaamiseen. Tutkimuksen kokeelliset mittaukset suoritettiin optisia kosteusantureita valmistavan Teconer Oy:n toimitiloissa. Näyttemateriaalina kokeellisissa mittauksissa käytettiin betonin erikokoisia kiviaineksia. Käytetty materiaali on rakeinen, joten saadut tulokset vastaavat parhaiten rakeisten materiaalien ominaisuuksia.

Kokeiden avulla pyrittiin löytämään vastaus siihen, kuinka partikkelikoko, partikkelikokojakauma ja partikkeleiden ominaispinta-ala vaikuttavat optiseen kosteuden mittaukseen. Tavoitteena oli ymmärtää optisen kosteusanturin toimintaa ja ominaisuuksia paremmin, mikä auttaa kehittämään anturia ja sen kalibrointia. Tulosten analysoinnissa ja vertailussa käytetään apuna teoriaosuudessa esitettyjä referenssilähteiden tuloksia.

6.1 Tutkimuksen hypoteesit

Partikkelikokoja tarkasteltaessa **hypoteesina 1** oletetaan, että näytteiden kylläisyysprosentti, eli maksimikosteus, jonka partikkelit absorboivat itseensä, saavutetaan sitä aikaisemmin, mitä suurempi näytteen partikkelikoko on. Teoriaosiossa käytettyjen kirjallisuuslähteiden pohjalta osataan odottaa, että suuremmat partikkelit saavuttavat kylläisyyden jo 0-2 kosteusprosentin kohdalla, kun taas pienemmät partikkelit voivat absorboida kosteutta yli kymmenen kosteusprosenttia [11]. **Hypoteesina 2** odotetaan partikkelien karkeuserojen vaikuttavan optisen kosteusanturin vasteeseen, kun refleктоituneen valon määrä muuttuu sirontasäteilyn ja mittausetäisyydessä tapahtuvien vaihteluiden vuoksi [2,29,33].

Jokaiselle eri kiviaineskoon näytteelle voidaan tehdä kuvaaja, jossa anturin mitaama kosteus on todellisen kosteuden funktiona. Todellisia kosteusarvoja vastaavat ruiskulla lisätyt kosteudet, joiden määrät mitataan tarkasti. Saatujen kuvaajien oletuksena on, että käyrien kulmakertoimet kertovat anturin vasteen määrän, eli kuinka paljon anturi reagoi näytteissä tapahtuviin kosteuden muutoksiin. **Hypoteesin 3** mukaisesti kosteusanturin odotetaan reagoivan nopeammin suurempien partikkelikokojen kosteuden muutokseen, jolloin vastetta kuvaavasta kulmakertoimesta pitäisi tulla suurempi. **Hypoteesina 4** vastetta kuvaavan kulmakertoimen käänteisluvun oletetaan kuvaavan partikkelikoon ominaispinta-alaa, kun käänteisluku tekee suurien partikkelikokojen suuresta kulmakertoimen arvosta pienen ja päinvastoin.

Lisäksi saadut käänteisluvut voidaan yhdistää samaan kuvaajaan, jossa partikkelikokojen kulmakertoimien käänteisluku on partikkelikokojen funktiona. **Hypoteesina 5** ominaispinta-alan odotetaan kasvavan partikkelikoon pienentyessä teoriaosiossa esitettyjen kuvien 10, 11 ja 14 mukaisesti, jolloin näytteiden reflektioprosentti ja ominaispinta-ala pienenee partikkelikoon kasvaessa. Hypoteesia tukevat myös Bin ym. tutkimuksessa saadut taulukon 2 tulokset, joiden mukaan pienien ($<0,2 \mu\text{m}$) partikkelikokojen ominaispinta-ala on suurempi kuin suurempien ($0,2\text{--}2 \mu\text{m}$), vaikka pienien partikkelikokojen massaosuus näytteessä on vain 10,1 % verrattuna suurempien partikkelikokojen 44,5 massaprosenttiosuuteen [30].

Kun jokaiseen näytteeseen lisätty todellisen kosteuden määrä sekä partikkelien koko tiedetään, voidaan kaavalla 1 laskea yhden partikkelin pinnalle kertyneen vesikerroksen paksuus. Kosteuden oletetaan jakautuvan tasaisesti partikkeleiden kesken ilman, että kosteutta haihtuisi pois tai absorboituisi partikkeleissa oleviin huokosiin. **Hypoteesina 6** odotetaan suurempien partikkeleiden ympärille kerääntyvän paksumpi vesikerros, kun lisätyn veden määrä pysyy vakiona. Kaavassa 1 t_p on lasketun kosteuden kerroksen paksuus partikkelissa, V_l lisätyn kosteuden tilavuus, m_n näytteen kokonaismassa, V_k yhden kiviainespartikkelin tilavuus, A_k yhden kiviainespartikkelin pinta-ala ja ρ_g kiviainespartikkeleille käytettävä graniitin tiheys.

$$t_p = \frac{V_l}{\frac{m_n}{V_k * \rho_g} * A_k} \quad (1)$$

Partikkelikokojakaumaa tarkasteltaessa kiviaineskoot sekoitetaan yhdeksi näytteeksi. Sekoitetulle näytteelle voidaan muodostaa samanlainen kuvaaja kuin yksittäisille näytteille aikaisemmin. Nyt voidaan tutkia, kuinka optinen kosteusanturi toimii, kun mitattavana on useampaa eri partikkelikokoa. Seokselle saadun kosteusanturin vasteen kulmakertoimen käänteisluvun odotetaan vastaavan seoksen ominaispinta-alaa samalla tavalla kuin yksittäisten partikkelikokojen näytteissä. **Hypoteesina 7** seokselle saadun vasteen kulmakertoimen oletetaan sijoittuvan yksittäisten partikkelikokojen kulmakertoimien väliin, koska mukana on pieni osa jokaista partikkelikokoa. Jos seoksesta poistetaan suurimmat tai pienimmät partikkelikoot ja ne korvataan tasaisesti muun kokoisilla partikkeleilla, oletetaan **hypoteesina 8** seoksen ominaispinta-alan muuttuvan. Kun suurin partikkelikoko poistetaan, ominaispinta-ala todennäköisesti kasvaa pienempien partikkelikokojen tullessa tilalle ja päinvastoin, kun pienin partikkelikoko korvataan suuremmilla [30]. Seoksille voidaan luoda

taulukon 2 mukainen taulukko, josta nähdään partikkelikokojen suhteelliset prosentit ja niiden ominaispinta-alat.

Kuvaajien kulmakertoimet kuvaavat kosteusanturin mittaustarkkuutta verrattuna seoksessa vallitsevaan todelliseen kosteuteen. Saatujen tuloksien pohjalta halutaan tutkia, voiko saadun kiviainesseoksen kulmakertoimen laskea matemaattisesti kaavalla 2, jossa k_s on seoksen kulmakerroin, N partikkelikokojen lukumäärä, m_p yksittäisen partikkelikoon massaosuus koko seoksen massasta ja k_v yksittäisen partikkelikoon anturin vastetta kuvaavan käyrän kulmakerroin.

$$k_s = \sum_{n=1}^N \left(\frac{m_p}{100} * k_v \right) \quad (2)$$

Hypoteesina 9 kaavalla 2 saadun tuloksen oletetaan vastaavan mahdollisimman tarkasti kiviainesseoksen kuvaajan kulmakerrointa. Kyseisen tapaista tutkimusta ei löydettyjen kirjallisuuslähteiden perusteella ole aikaisemmin suoritettu. Tutkimuksen avulla optisen kosteusanturin toimintaa ymmärrettäisiin paremmin ja edellä esitettyä laskukaavaa voitaisiin hyödyntää kosteusanturin etäkalibroinnissa.

Joissain olosuhteissa, kuten betonitehtaissa, käytetyt kiviainekset ovat pölyisiä. Hiekkapölyn määrä kiviaineksissa vaihtelee ja usein hiekkapölyä voi kerääntyä enemmän suurimpien partikkelikokojen pintaan. Vaikka suurien partikkeleiden massa voi olla paljon suurempi verrattuna hiekkapölyn massaan, odotetaan **hypoteesina 10** ominaispinta-alojen eron olevan kuitenkin merkittävästi pienempi [30]. Hiekkapölyn suuri ominaispinta-ala voi vaikuttaa merkittävästi kosteuden absorptioon suurissa partikkeleissa.

6.2 Mittausjärjestelyt

Kokeissa käytettiin seuraavia kuutta erikokoista betonin kiviainesta 0,1–0,6; 0,5–1,2; 1–2; 2–4; 4–8; ja 8–16 mm. Pienin käytetty kiviaineksen partikkelikoko (0,1–0,6 mm) ja suurin käytetty kiviaineksen partikkelikoko (8–16 mm) on esitetty kuvassa 17. Kuvat lopuista käytetyistä kiviainekoista ovat liitteissä 1–4.



Kuva 17. Kokeessa käytetty halkaisijoiltaan 0,1–0,6 ja 8–16 mm:n kokoinen kiviaines.

Suoritettussa kokeessa kosteuden mittaamiseen käytettiin kuvassa 4 esitettyä optista kosteusanturia WCM411. Kyseinen kosteusanturi on tarkoitettu betonin kiviaineksen kosteuden mittaamiseen, mitä tässäkin kokeessa mitattiin. Mittauksia suoritettaessa WCM411-kosteusanturi asetettiin kuvan 18 mukaisesti putken yläpäähän ja kohdistettiin näytteen pintaan. Pyöreään muotoisessa leivonta-astiassa oleva näyte punnittiin pöytävaaka'alla, kasteltiin vedellä 10 ml:n kokoisella ruiskulla tarkan kosteusprosentin saavuttamiseksi ja kosteusanturin havaitsema kosteudenmuutos mitattiin. WCM411 liitettiin kiinni tietokoneeseen, josta saadut mittaustulokset luettiin Teconer Oy:n kehittämällä tietokoneohjelmalla.



Kuva 18. Kokeissa käytetty mittalaitteisto. WCM411 kuvan yläreunassa mustan putken yläpäässä osoittaen pyöreää leivonta-astiaa, johon näytteet laitettiin.

6.3 Kokeelliset mittaukset

6.3.1 Partikkelikoko

Kokeelliset mittaukset suoritettiin kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin partikkelikokoa, toisessa vaiheessa partikkelikokojakaumaa ja kolmannessa vaiheessa hiekkapölyn määrää suurissa partikkeleissa. Ensimmäisen vaiheen kokeessa pyrittiin selvittämään, kuinka partikkelikoosta riippuva ominaispinta-ala vaikuttaa kosteuden absorboitumiseen. Kokeessa kosteusanturi asetettiin kuvassa 18 näkyvällä tavalla. Tämän jälkeen jokaisen partikkelikoon kosteuden absorptiokehitys mitattiin yksi kerrallaan.

Mittaaminen aloitettiin punnitsemalla yksi kerrallaan yhden kilogramman kuiva näyte jokaisesta kiviaineksesta pyöreään vuokaan. Jokaiselle kuivalle näytteelle mitattiin kosteusanturilla lähtöarvo ja sen jälkeen näytteitä kasteltiin 10 ml:n ruiskulla. Tarkoituksena oli kastella näytteitä yhden kosteusprosenttiyksikön verran kerrallaan verrattuna näytteen kuivapainoon. Kokeita tehdessä kuitenkin huomattiin suurempien kiviainesten saavuttavan kylläisyyden hyvin nopeasti. Siksi kasteluväliä muutettiin ja 8–16 mm:n kiviainekselle kasteluväliksi valikoitui 0,25 % sekä molemmille 4–8 mm:n ja 2–4 mm:n kiviaineksille 0,5 %. Muissa kokoluokissa toteutettiin alun perin suunniteltu yhden prosentin kasteluväli. Kosteuden lisäämisen jälkeen näytettä sekoitettiin lusikalla tasaisen kosteuden jakautumisen varmistamiseksi ja pinta tasoitettiin mittaustarkkuuden varmistamiseksi. Lisäksi mitattaessa näytettä pyöritettiin alustalla, jotta mitattava kohta näytteessä vaihtui. Kun näytteeseen oli lisätty kosteutta, odotettiin anturin lukeman vakioitumista ennen kuin mittauspisteitä otettiin talteen. Mittaus keskeytettiin aina kosteuden lisäämisen sekä sekoituksen ja tasoittamisen ajaksi.

Anturissa mittauspisteiden aikaväli oli 1 sekunti, ja jokaiselle kosteudelle kerättiin 10 mittapistettä. Jokaista näytettä kasteltiin siihen asti, kunnes näyte oli kylläinen eli kosteus valui kivipartikkelien pinnalta eivätkä partikkelit enää absorboineet kosteutta itseensä. Jokaiselle kosteusprosentille kerätyistä kymmenestä anturin mittaamasta mittapistestä laskettiin keskiarvo, joka merkittiin tuloksiin vastaamaan anturin mittaamaa kosteuden arvoa. Tuloksien avulla yhden partikkelin ympärille kerääntynyt vesikerroksen paksuus laskettiin kaavalla 1.

6.3.2 Partikkelikokojakauma

Kokeen toisessa vaiheessa tarkoituksena oli tutkia partikkelikokojakauman vaikutusta kosteuden absorboitumiseen, kulkeutumiseen ja optisen kosteusanturin kosteuden havaitsemiseen. Nyt ero ensimmäiseen vaiheeseen oli, että kiviainekset sekoitettiin kokonaismassaltaan yhden kilogramman näytteeksi kuvan 9 osoittamalla tavalla. Kuvassa 9 esitetään kiviainesseoksien seulontatuloksia kiviaineskoon funktiona. Kokeessa käytettiin kuvassa 9 näkyvää 16 mm:iin päättyvää käyrää, joka on toinen vasemmalta, koska suurin käytössä ollut kiviaineskoko oli 8–16 mm.

Myös tässä kokeessa mittausasetelma järjestettiin kuvasta 18 ilmenevällä tavalla ja mittausvaiheet sekä anturin mittausasetukset toteutettiin samalla tavalla kuin edellisessä kokeessa. Jokaiselle seosnäytteelle kerättiin 10 mittapistettä, joista anturin mittaamalle kosteudelle laskettiin keskiarvo. Kun seoksessa olleiden partikkeleiden massat sekä partikkelikoot tiedettiin, laskettiin lopuksi seoksien kokonaispinta-alat.

Ensimmäisessä seoksessa suhteutukset toteutettiin kuvan 9 käyrän mukaisesti. Ensimmäisen seoksen lisäksi tehtiin vielä kaksi muuta seosta, joiden tarkoituksena oli mitata kosteuden absorboitumisen käyttäytymistä, kun seoksesta puuttui kokonaan suurin tai pienin kiviaines. Puuttuvien kiviaineskokojen massaosuus seoksissa jaettiin tasan muiden kiviaineskokojen kesken. Seoksissa kiviaineksien suhteutukset jakautuivat taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Seoksien kiviaineskokojen massaprosentit seoksen kokonaismassan suhteen.

| Kiviaineskoko (mm) | Seoksien massaprosentit (%) | | |
|--------------------|-----------------------------|--------|--------|
| | Seos 1 | Seos 2 | Seos 3 |
| 8–16 | 28 | 0 | 32,4 |
| 4–8 | 17 | 22,6 | 21,4 |
| 2–4 | 13 | 18,6 | 17,4 |
| 1–2 | 12 | 17,6 | 16,4 |
| 0,5–1,2 | 8 | 13,6 | 12,4 |
| 0,1–0,6 | 22 | 27,6 | 0 |

6.3.3 Hiekkapölyn määrä suurissa kiviainepartikkeleissa

Saadut kiviainekset olivat puhtaita, eikä niiden pinnassa havaittu paljaalla silmällä hiekkapölyä. Mahdollisen hiekkapölyn ominaispinta-ala verrattuna suuriin kivipartikkeleihin voi kuitenkin olla merkittävä niiden massoihin nähden. Tästä syystä viimeisellä kokeella

haluttiin varmistaa, ettei suurimpien kivien pinnalla ollut merkittävää määrää hiekkapölyä, joka olisi voinut vaikuttaa saatuihin mittaustuloksiin. Betonitehtaissa ja muussa rakentamisessa käytetyt kiviainekset ovat tämän kokeen kiviaineksia pölyisempiä.

Kokeessa valittiin yhden kilogramman näyte 8–16 mm:n kokoista kiviainesta. Otettu kiviainesnäyte kasteltiin täysin niin, että vettä saattoi nähdä selvästi leivontavuoan pohjalla. Kun kastellut kivet poistettiin vuoasta, kaadettiin ylimääräinen vesi suodatinpussiin, jonka kuivapaino oli etukäteen punnittu. Kaadetun veden annettiin valua pois suodatinpussista, jolloin suodatinpussin pohjalle ja reunoille jäivät hyvin pienet hiekkapölypartikkelit, jotka olivat olleet suurempien kivien pinnalla. Tämän jälkeen suodatinpussi punnittiin, jolloin pystyttiin laskemaan hiekkapölyn massa. Kun suurien partikkelien sekä hiekkapölyn massat ja halkaisijat tiedettiin, laskettiin niiden ominaispinta-alat.

7 Tulokset ja pohdinta

Kokeissa näytteisiin lisättiin kosteutta niiden kylläisyysprosentin yli, jolloin absorboitumaton ylimääräinen vesi valui näytteiden pohjalle. Liitteissä 5–10 esitetyissä kuvaajissa rajan ylitys näkyy kosteuskäyrän loivenemisena, kun todellinen kosteus kasvaa, mutta anturin mittaama kosteus pysyy lähes samana. Lisäksi joissain partikkelikokoluokissa havaittiin pieni pudotus nollan ja ensimmäisen kosteusprosentin välillä anturin mittaamissa kosteusarvoissa, vaikka todellisuudessa näytteen kosteus kasvaa. Syinä tähän voivat olla pinnan värin muutos, käytetty partikkelikoko tai kosteuden kulkeutuminen näytteessä, mutta varmaa syytä ilmiölle ei tutkimuksissa löydetty.

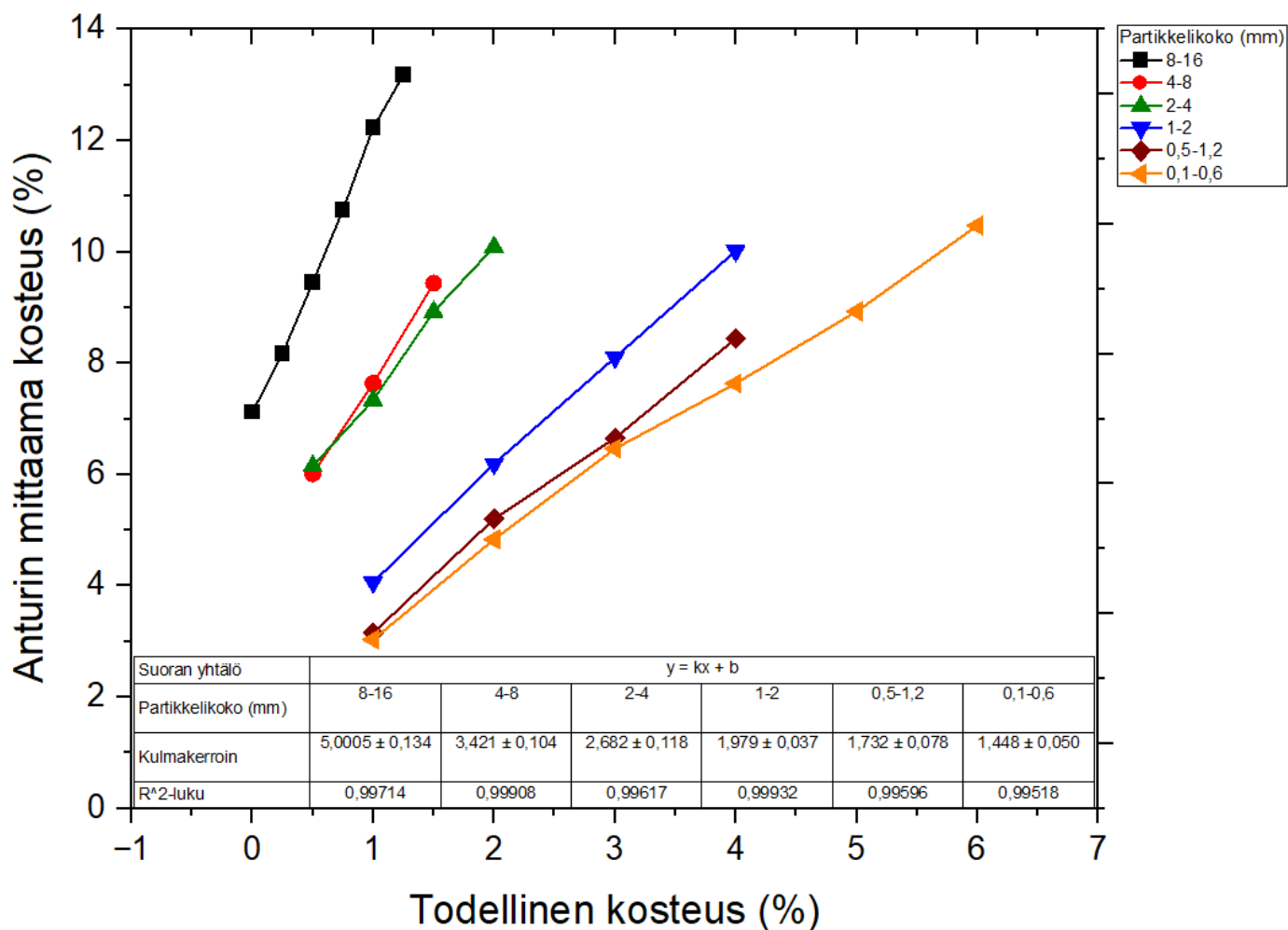
Teoriaosuudessa esitetyt kosteusanturien tulokset esitetään osittain reflektioprosentin muutoksena, jossa skaalaus on nollassa sataan prosenttiin. Tutkielman kokeessa käytetty WCM411-kosteusanturi laskee kosteusprosentin muutokset valon reflektiossa tapahtuvien muutoksien perusteella, mutta itse kosteusanturin mittaamat arvot eivät suoraan vastaa reflektioprosentin muutoksia. Lisäksi anturin mittaamat kosteusarvot eivät lähde nollassa, jotta anturi ei näyttäisi negatiivisia lukemia ja välttyttäisiin väärinkäsityksiltä. Tällä ei ole vaikutusta kokeen tuloksiin tai tulosten vertailuun.

7.1 Kiviainespartikkelien kosteus

Kokeiden ensimmäisessä vaiheessa mitattiin erikseen jokaisen partikkelikoon kosteuden absorption kehitys (kuva 19). Mittauspisteistä on otettu huomioon vain ne, jotka kuvaavat parhaiten partikkelikoon absorptiokykyä, anturin vasteen kehitystä ja siten myös partikkelikoon ominaispinta-alaa. Kuvan 19 tuloksista on jätetty huomioimatta nollan ja ensimmäisen kosteusprosentin välillä tapahtuva pudotus sekä ne mittauspisteet, jotka menevät kylläisyysprosentin yli. Liitteissä 5–10 on esitetty kaikki kokeessa mitatut mittauspisteet jokaiselle partikkelikoolle erikseen.

Kokeessa huomattiin suurimman partikkelikoon 8–16 mm saavuttavan kylläisyysprosentin jo 1,25 kosteusprosentin jälkeen, kun vastaavasti pienin partikkelikoko 0,1–0,6 mm ei saavuttanut varsinaista kylläisyyttä vielä 17 kosteusprosentinkaan kohdalla. Saatua tulos on hypoteesin 1 mukainen: suuremmat partikkelikoot saavuttavat kylläisyyden 0–2 kosteusprosentin kohdalla, kun taas pienemmät partikkelit voivat absorboida kosteutta yli kymmenenkin kosteusprosenttia. Koska suuremmilla partikkelikokoluokilla kylläisyys saavutetaan aikaisemmin, tulee kosteutta kuvaavasta käyrästä myös jyrkempi, kuten kuvasta

19 huomataan. Vaikka pienin partikkelikoko absorboi kosteutta yli 10 %, on kuvan 19 absorptiokehityksen käyrään otettu mukaan vain kosteusprosentit 1–6, koska betonissa käytettävien kiviainesten pinnalle jäävän kosteuden määrä on yleensä 2–5 %. Tämä on myös yleensä se kosteusprosenttimäärä, joka kosteusanturilla tyypillisesti mitataan.



Kuva 19. Anturin mittaama kosteus todellisen kosteuden funktiona jokaiselle partikkelikoolle. Kuvaajassa otettu huomioon partikkelikokojen absorptiokehitystä parhaiten kuvaavat mittauspisteet.

Joissakin partikkelikokoluokissa tapahtuva lasku anturin mittaamassa lukemassa nollan ja ensimmäisen kosteusprosentin välillä voi johtua useasta eri tekijästä. Syynä voivat olla kosteuden käyttäytyminen ja kulkeutuminen erikokoisissa partikkeleissa eri tavalla, näytteen pinnassa tapahtuvat värin muutokset tai anturista tulevan valon käyttäytyminen näytteen pinnassa. Tähän kokeissa ei kuitenkaan löydetty varmaa selitystä.

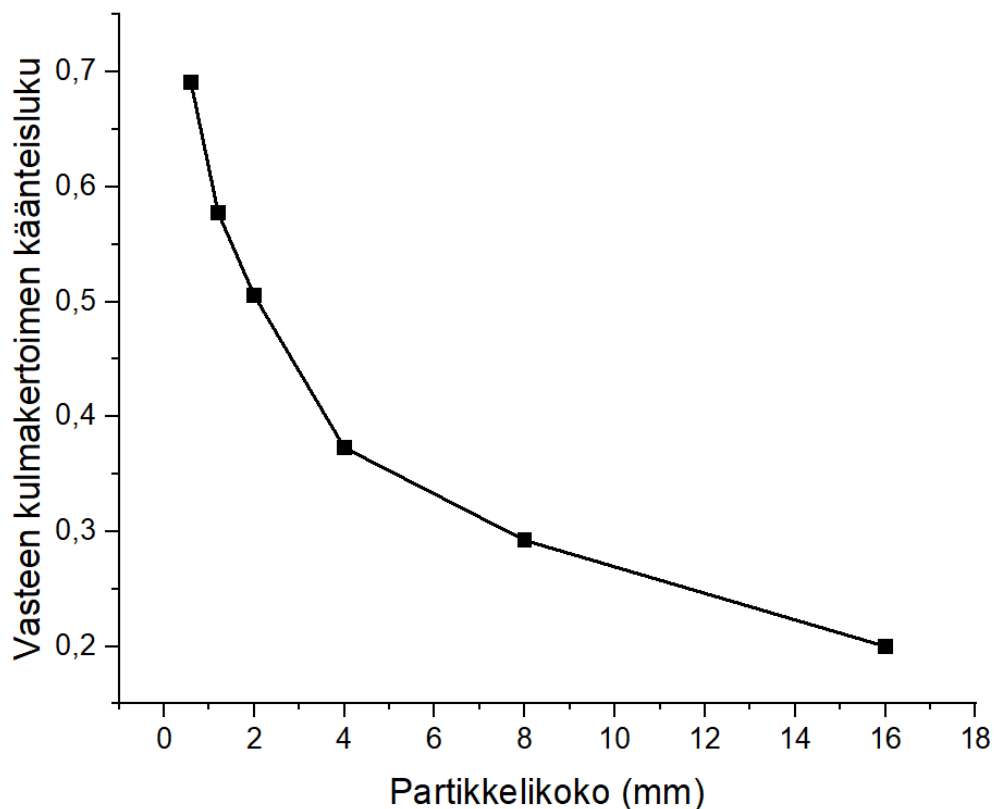
Taulukossa 4 esitetään anturin vastetta kuvaavat kulmakertoimet ja niiden käänteisluvut partikkelikokojen mukaan. Anturin huomattiin reagoivan hypoteesin 2 mukaisesti partikkelikokojen karkeuseroihin. Kun suurimpien partikkelikokojen näytettä pyöritettiin,

huomattiin anturin mittaamissa arvoissa pientä vaihtelua, joka johtuu millimetrin alueella tapahtuvasta mittausetäisyyden vaihtelusta. Lisäksi hypoteesien 2 ja 3 mukaisesti taulukon tuloksista nähdään anturin vasteen reagoivan partikkelikokojen karkeuteen sekä vasteen kulmakertoimen pienenevän partikkelikoon pienentyessä. Tämä näkyy myös kuvasta 20, kun kiviainesnäytteiden ominaispinta-alat pienenevät partikkelikoon kasvaessa. Kuvan 20 kuvaajassa on käytetty taulukon 4 vasteen kulmakertoimien käänteislukuja ja x-akselilla näkyvissä partikkelikoissa on käytetty partikkelikokoluokkien ylärajaa.

Taulukko 4. Kiviainesnäytteiden partikkelikoot, vasteiden kulmakertoimet, vasteiden kulmakertoimien käänteisluvut ja vesikerroksen paksuudet yhdessä partikkelissa.

| Partikkelikoko (mm) | Vasteen kulmakerroin | Vasteen kulmakertoimen käänteisluku | Vesikerroksen paksuus yhdessä partikkelissa (μm) |
|---------------------|----------------------|-------------------------------------|---|
| 8–16 | 5 | 0,2 | 52 |
| 4–8 | 3,42 | 0,29 | 26 |
| 2–4 | 2,68 | 0,37 | 13 |
| 1–2 | 1,98 | 0,51 | 6,5 |
| 0,5–1,2 | 1,73 | 0,58 | 3,7 |
| 0,1–0,6 | 1,45 | 0,69 | 1,5 |

Kiviainesnäytteiden ominaispinta-alaa voidaan tarkastella kulmakertoimen käänteisluvusta hypoteesin 4 mukaisesti, jolloin hypoteesin 5 mukaan kuvan 20 ominaispinta-alan arvot kasvavat partikkelikoon pienentyessä. Kuvan 20 tulokset vastaavat Yinin ym. (kuva 10), Bowersin ym. (kuva 11) sekä Bin ym. (kuva 14) kokeiden tuloksia [2,3,30]. Saadun käänteisluvun voidaan ajatella vastaavan myös anturin havaitsemaa partikkeleista reflektoituneen säteilyn määrää. Suurilla partikkeleilla takaisin reflektoituneen säteilyn määrä on vähäisempää sirontateorian sekä hypoteesin 2 kohdalla mainitun sirontasäteilyn takia. Sirontateorian mukaan suuremmat partikkelit lisäävät todennäköisyyttä, että yhden partikkelin heijastama säde siroaa ja osuu toiseen partikkeliin, mikä vähentää pinnan kokonaisheijastavuutta.



Kuva 20. Vasteen kulmakertoimien käänteisluvut (ominaispinta-alat) partikkelikokojen funktiona.

Taulukon 4 tuloksista voidaan laskea, että suurimman partikkelikoon ominaispinta-alaa kuvaava käänteisluku on 71 prosenttia pienempi kuin pienimmän partikkelikoon käänteisluku. Yinin ym. kokeessa suurimman 5 mm:n kokoisen partikkelin reflektioprosentti on 35 %-yksikköä pienempi kuin pienimmän alle 1 mm:n kokoisen partikkelin reflektioprosentti [2]. Tuloksissa nähtävä ero johtuu siitä, että tämän tutkielman kokeessa suurin käytetty partikkelikoko vaihteli kuitenkin 8–16 mm:n välillä verrattuna huomattavasti pienempään 5 mm:n partikkelikokoon. Lisäksi Yin ym. huomasivat partikkelikoon kasvun nollassa 4 mm:iin vähentävän reflektiota 40 % kun taas tässä kokeessa vasteen käänteisluku pienenee 32 %, kun partikkelikoko kasvaa 4–8 mm:stä 8–16 mm:iin [2].

Jos satunnaisen kokoinen partikkeli, joka on kuution tai pallon muotoinen, leikataan tasaisesti koordinaattien X, Y ja Z suunnassa, voidaan partikkelin ominaispinta-alan kasvussa havaita säännöllisyys. Kuutiossa leikattavat partikkelit säilyttävät muotonsa, mutta pallon muotoisten partikkelien tapauksessa ajatellaan leikkauksesta syntyvien osien säilyttävän pallon muotonsa halkaisijan puolittuessa. Partikkeleiden lukumäärä kasvaa tasaisesti 8^k mukaisesti ja pinta-ala verrattuna alkuperäiseen pinta-alaan säännön $A_0 \cdot 2^k$ mukaan, kun A_0 on alkuperäinen pinta-ala ja k halkaisujen lukumäärä $k=0, 1, 2, 3, \dots$

Taulukossa 5 on esitetty kuution (särmä $S_0=1$ cm) sekä pallon (säde $r_0=1$ cm) muotoisen partikkelin pinta-alan kehitys, kun partikkelit on halkaistu kolmesta koordinaatin suunnasta viisi kertaa. Taulukon tuloksista voidaan havaita partikkeleiden sekä pinta-alan nopea kasvu partikkelien pienentyessä. Koska pallon muotoisten partikkeleiden alkuperäinen pinta-ala A_0 on hieman suurempi, on pinta-alan kasvu myös nopeampaa. Ilmiötä voidaan hyödyntää, kun halutaan laskea partikkeleiden ominaispinta-alaa tai kun halutaan ymmärtää partikkeleissa tapahtuva ominaispinta-alan kasvu partikkelikoon muuttuessa.

Taulukko 5. Kuution muotoisten sekä pallon muotoisten partikkeleiden pinta-alan kasvu, kun alkuperäinen partikkeli halkaistaan koordinaattien X, Y ja Z suuntaisesti viisi kertaa.

| Halkaisujen lukumäärä k | Kuutioiden määrä 8^k | Yhden kuution särmä $s/2^k$ (cm) | Kuutioiden yhteenlaskettu pinta-ala $A_0 \cdot 2^k$ (cm ²) | Pallojen määrä 8^k | Yhden pallon säde $r/2^k$ (cm) | Pallojen yhteenlaskettu pinta-ala $A_0 \cdot 2^k$ (cm ²) |
|-------------------------|------------------------|----------------------------------|--|----------------------|--------------------------------|--|
| 0 (alkuperäinen) | 1 | 1 | 6 | 1 | 1 | 12,566 |
| 1 | 8 | 0,5 | 12 | 8 | 0,5 | 25,132 |
| 2 | 64 | 0,25 | 24 | 64 | 0,25 | 50,265 |
| 3 | 512 | 0,125 | 48 | 512 | 0,125 | 100,530 |
| 4 | 4096 | 0,0625 | 96 | 4096 | 0,0625 | 201,060 |
| 5 | 32 768 | 0,03125 | 192 | 32 768 | 0,03125 | 402,120 |

Kuvan 20 tuloksista huomataan, että yllä esitetty laskusääntö ominaispinta-alan kaksinkertaistumiselle partikkelikoon puolittuessa ei päde tämän tutkielman tuloksiin. Jos sääntö pätsisi, kuvan 20 tuloksissa ominaispinta-alan pitäisi laskea lineaarisesti partikkelikoon kasvaessa. Ero tuloksien ja esitetyn säännön välillä voidaan kuitenkin perustella, koska käytetyt kiviainespartikkelit olivat epäsäännöllisen muotoisia. Tästä syystä partikkeleiden väliin on jäänyt tyhjiä tiloja, jotka ovat vaikuttaneet anturin vasteesta laskettuun ominaispinta-alaan.

Hypoteesin 3 mukaisesti suuremmilla partikkeleilla kosteusanturin vaste reagoi kosteudenkehityksen kasvuun nopeammin kuin pienillä partikkeleilla, koska kosteus jakautuu näytteisiin eri tavalla. Kun tarkastellaan partikkelikokojen ominaispinta-alaa, jakautuu sama määrä kosteutta pienemmälle alueelle suurissa partikkelieissa verrattuna pieniin partikkeleihin. Tästä syystä suuremmissa partikkeleissa kosteusanturin vaste on suurempi, mikä tekee vasteen käyrästä jyrkemmän ja samalla kulmakertoimesta suuremman.

Kun partikkelikoot sekä lisätyn veden määrä nyt tiedetään, voidaan kaavalla 1 laskea, kuinka paksu vesikerros yhden partikkelin ympärille kerääntyy. Laskuissa kiviainespartikkelien halkaisijana käytettiin partikkelikokojen keskiarvoa, tiheytenä graniitin tiheyttä 2600 kg/m^3 ja lisätyn veden määränä 10 ml :aa. Lisäksi kosteuden oletetaan jakautuvan tasaisesti partikkeleiden kesken ilman, että kosteutta haihtuisi pois tai absorboituisi partikkeleissa oleviin huokosiin.

$$t_{8-16} = \frac{1 * 10^{-5} \text{ m}^3}{\frac{1 \text{ kg}}{\frac{4}{3} * \left(\frac{8 \text{ mm} + 16 \text{ mm}}{2}\right)^3} * 2600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4 * \pi * \left(\frac{8 \text{ mm} + 16 \text{ mm}}{2}\right)^2} = 52 \mu\text{m}$$

Taulukosta 4 nähdään, että vesikerros ohenee partikkelikoon pienentyessä hypoteesin 6 odotusten mukaisesti. Vesikerrokselle lasketuissa tuloksissa huomataan myös matemaattinen säännöllisyys $1-2 \text{ mm}$ kokoisista partikkeleista ylöspäin. Kun partikkelikoko kasvaa tasaisesti aina 2 kertaa suuremmaksi edelliseen partikkelikokoon verrattuna, kasvaa vesikerroksen paksuus säännön $h_0 * 2^n$ mukaisesti, missä h_0 on alkuperäisen partikkelin ympärillä olevan vesikerroksen paksuus ja n ilmoittaa määrän, kuinka monta kertaa partikkelikoko on kaksinkertaistunut. Kiviaineksille $0,5-1,2$ ja $0,1-0,6 \text{ mm}$ sääntö ei päde, koska partikkelikoon kasvu ei ole tasainen. Aikaisemmista tuloksista voidaan todeta paksumman vesikerroksen suuremmissa kiviaineksissa johtavan suurempaan vasteeseen kosteusanturissa. Tämä johtuu anturissa käytettävästä lähi-infrapunavalon aallonpituudesta, jota vesi on hyvin herkkä absorboimaan, mikä johtuu vesimolekyylien värähtely- ja pyörimisliikkeiden resonanssista.

Kosteuden absorboitumiseen ja kulkeutumiseen näytteissä vaikuttavat myös partikkeleiden pintahuokokset ja huokoisuusaste. Wang ym. ja Kalman ym. tutkivat kokeissaan partikkeleissa olevien huokosten sekä huokoisuusasteen vaikutusta kosteuteen [32,33]. Heidän mukaansa pienemmät epäsäännölliset partikkelit pakkautuvat paljon tiiviimmin kuin suuremmat tasapintaiset partikkelit. Tiiviimmin pakkautuneet partikkelit kuljettavat kosteutta helpommin pinnan alapuolelle suuremman kosketuspinta-alan vuoksi sekä sirottavat vähemmän valoa, sirontateorian mukaisesti. Lisäksi pienemmissä partikkeleissa on enemmän kosteutta absorboivia pintahuokosia, mikä johtuu eroosiosta.

Näiden havaintojen voidaan todeta vaikuttaneen myös tämän tutkielman kokeellisiin tuloksiin. Suuremmat partikkelit ovat pakkautuneet pieniä partikkeleita löyhemmin, jolloin partikkeleiden välillä on vähemmän kosketuspinta-alaa. Tästä johtuen lisätty kosteus ei kulkeudu niin helposti näytteen pohjalle, joten anturin on helpompi havaita pinnalle jäänyt kosteus. Pienissä partikkeleissa pintahuokosia on myös enemmän, jolloin ne absorboivat itseensä enemmän kosteutta. Pintahuukokset ovat kooltaan pieniä, joten kapillaari-ilmion vuoksi ne absorboivat kosteutta hyvinkin tehokkaasti.

Kiviainesnäytteille saadut vasteen kulmakertoimet voivat antaa käyttäjälleen monenlaista tietoa, ja sen avulla voidaan ymmärtää paremmin kosteusanturin toimintaa. Kulmakertoimesta voidaan tutkia käytettävän materiaalin partikkelikokoa, näytteestä reflektoituneen valon määrää, kosteuden absorboitumista sekä partikkeleiden ominaispinta-alaa. Tämä tekee anturin vasteen kulmakertoimista tärkeän menetelmän rakeisten materiaalien ominaisuuksien analysoinnissa ja tutkimisessa. Kulmakertoimia voidaan hyödyntää esimerkiksi materiaalien laadunvalvonnassa tai määriteltäessä sopivuutta eri käyttökohteisiin. Kosteuden kulmakertoimet tarjoavat paljon hyödyllistä tietoa, jota voidaan käyttää sekä tutkimuksissa että materiaalitekniikan käytännön sovellutuksissa.

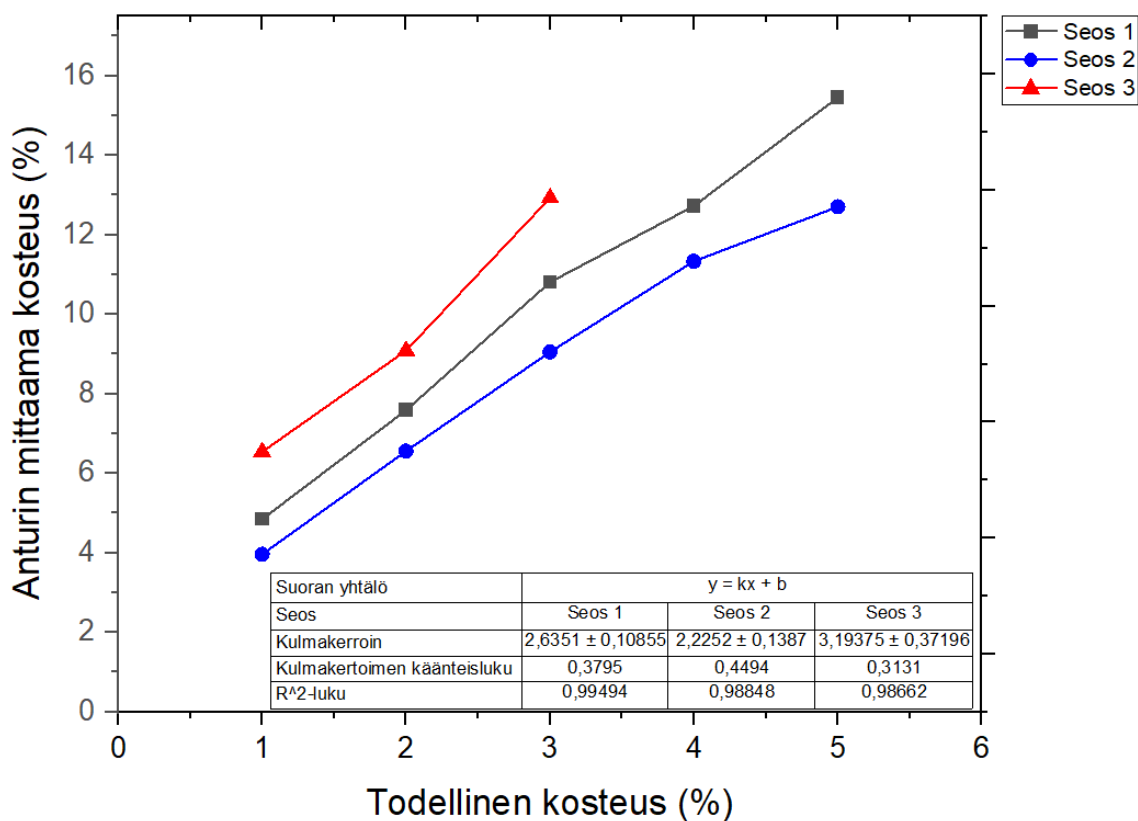
7.2 Kiviainesseoksen kosteus

Kokeiden toisessa vaiheessa yksittäisten partikkelikokojen sijaan tutkittiin kosteuden kehitystä, kun eri partikkelikoot sekoitettiin keskenään. Bin ym. kokeessa todettiin, että yleensä suuret kiviainespartikkelit nousevat kiviainesseosten pinnalle ja pienemmät partikkelit pinnan alapuolelle [30]. Sama ilmiö huomattiin tässä työssä, kun kuivassa kiviainesseoksessa suuret partikkelit näkyvät selkeästi seoksen pinnalla, mutta kastelun jälkeen seos tiivistyy ja suuret partikkelit jäävät pienien partikkeleiden alle kuvan 21 mukaisesti. Kiviainesseoksen tiivistyminen ja pinnan tasoittuminen johtuu kosteuden aiheuttamista koheesivoimista partikkeleiden välillä, jolloin pienet partikkelit sitoutuvat suurien partikkeleiden välissä oleviin tyhjiin tiloihin tehden seoksesta tiiviimmän. Lisäksi kosteus myös pyrkii kulkeutumaan ensimmäiseksi partikkeleihin, joilla on suurin ominaispinta-ala. Tämä tarkoittaa, että kosteudesta aiheutuvien koheesivoimien takia seoksessa pohjalla olevat pienet partikkelit absorboivat kosteutta ensimmäisenä edistäen seoksen tiivistymistä.



Kuva 21. Seos 1 kuivana sekä kastelun ja sekoituksen jälkeen, kun pienet partikkelit ovat sitoutuneet suurten partikkeleiden väleihin ja seos on tiivistynyt.

Seoksien massasuhteet toteutettiin aikaisemmin esitetyn taulukon 3 mukaisesti. Seoksien 1, 2 ja 3 tulokset on esitetty kuvassa 22. Kuvasta nähdään absorptiokehitystä, anturin vasteen määrää sekä ominaispinta-alaa parhaiten kuvaavat mittauspisteet. Kulmakertoimen käänteisluvusta on mahdollista tarkastella seosten ominaispinta-alaa samalla tavalla kuin aikaisemmassakin kokeessa. Kaikki mittauspisteet, jotka seoksille mitattiin on esitetty liitteissä 11–13.



Kuva 22. Anturin mittaama kosteus todellisen kosteuden funktiona jokaiselle seokselle.

Kuvasta 22 nähdään, että seoksella 2, josta suurin partikkelikoko poistettiin, on pienin kulmakerroin ja seoksella 3, josta pienin partikkelikoko poistettiin, on suurin kulmakerroin. Hypoteesin 7 mukaan seoksen 1, jossa on mukana kaikkia partikkelikokoja, kulmakertoimen arvo menee seoksien 2 ja 3 kulmakertoimien väliin. Lisäksi taulukosta 4 nähdään, että seokselle 1 saatu kulmakerroin menee mediaanipartikkelikokojen 2–4 mm ja 1–2 mm kulmakertoimien väliin.

Saatu tulos vastaa hypoteesia 7, jonka mukaan seoksen 1 kulmakertoimen pitäisi mennä johonkin yksittäisten partikkelikokojen kulmakertoimien väliin, koska seoksessa on mukana kaikkia partikkelikokoja. Yllättävää on kuitenkin se, että seoksen 1 kulmakertoimen arvo menee sopivasti juuri mediaanipartikkelikokojen väliin. Seoksen 2 tulos sijoittuu samaan väliin kuin seoksen 1 tulos, vaikka seoksesta 2 puuttuu kokonaan suurin partikkelikoko. Seoksen 2 tuloksen odotettiin sijoittuvan alemmaksi, mutta koska pieniä partikkelikokoja lisättiin tasaisesti, ei pinta-alan kasvu ollut niin suurta kuin odotettiin. Seoksen 3 kulmakerroin vastaavasti sijoittui odotusten mukaisesti korkeammalle toiseksi ja kolmanneksi suurimman partikkelikoon kulmakertoimien väliin.

Seoksien kulmakertoimien tulokset tukevat myös aikaisemmin esitettyjä tuloksia ominaispinta-alan suhteen. Kun seoksien kulmakertoimista tehdään käänteisluku, tulee seokselle 2 suurin arvo ja seokselle 3 pienin arvo. Seokselle 3 odotettiin pienintä ominaispinta-alan arvoa, koska seoksesta puuttui eniten pinta-alaa omaava pienin partikkelikoko. Seoksesta 2 puuttui suurin partikkelikoko, jolloin seokseen lisätyt pienemmät partikkelikoot lisäsivät ominaispinta-alaa. Partikkelikojakauman muutos seoksissa johti hypoteesin 8 mukaisesti ominaispinta-alan muutoksiin. Seoksen 1 tuloksen odotettiin sijoittuvan seosten 2 ja 3 väliin, koska partikkelikojakauma oli tasaisempi. Lisäksi seoksissa kosteus ja pienet partikkelit tiivistävät sekä pienentävät huokoisuusastetta seosnäytteissä, jolloin seoksen suuretkin partikkelit sirottavat vähemmän valoa.

Taulukkoon 6 on kerätty taulukon 2 mukaisesti seoksissa olevien partikkelikokojen suhteelliset massaprosenttiosuudet ja niiden ominaispinta-alat. Ominaispinta-alat pallon muotoisille partikkeleille on laskettu tilavuuden, graniitin tiheyden (2600 kg/m^3) ja seoksen kokonaimmassan (1 kg) avulla.

Bin ym. kokeen tuloksiin pohjautuvassa taulukossa 2 huomattiin pienempien partikkeleiden ominaispinta-alan olevan suurempi, vaikka niiden suhteellinen massaprosenttiosuus

verrattuna suurempiin partikkeleihin olisi ollut pienempi [30]. Sama tulos saatiin taulukossa 6 esitetyille arvoille. Esimerkiksi seoksessa 1 on 0,5–1,2 mm:n partikkeleita 20 prosenttiyksikköä vähemmän kuin suurimpia 8–16 mm:n partikkeleita, mutta silti pienemmän partikkelikoon ominaispinta-ala on 16,32 dm² suurempi. Seoksessa 3 suurinta partikkelikokoa on suhteessa muihin eniten, mutta sillä on kaikista partikkelikoista pienin ominaispinta-ala. Taulukon 2 ja 6 tuloksista voidaan siis huomata, että vaikka pientä partikkelikokoa seoksessa olisi massaltaan vähemmän verrattuna suurempiin partikkelikokoihin, voi sillä suuren ominaispinta-alansa takia olla kuitenkin huomattava merkitys esimerkiksi kosteuden imeytymisessä.

Taulukko 6. Seoksissa olevien partikkelikokojen suhteelliset prosenttiosuudet sekä niiden ominaispinta-alat, kun seoksen kokonaismassana on yksi kilo.

| Seoksen numero | Partikkelikoko (mm) | Keskiarvollinen halkaisija (mm) | Ominaispinta-ala (dm ²) | Suhteellinen prosenttiosuus (%) |
|--|---------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8–16 | 12 | 5,38 | 28 |
| | 4–8 | 6 | 6,54 | 17 |
| | 2–4 | 3 | 10 | 13 |
| | 1–2 | 1,5 | 18,5 | 12 |
| | 0,5–1,2 | 0,85 | 21,7 | 8 |
| | 0,1–0,6 | 0,35 | 145 | 22 |
| Ominaispinta-alojen summa (dm ²) | | | 207,12 | |
| 2 | 8–16 | 12 | 0 | 0 |
| | 4–8 | 6 | 8,70 | 22,6 |
| | 2–4 | 3 | 14,3 | 18,6 |
| | 1–2 | 1,5 | 27,1 | 17,6 |
| | 0,5–1,2 | 0,85 | 37 | 13,6 |
| | 0,1–0,6 | 0,35 | 182 | 27,6 |
| Ominaispinta-alojen summa (dm ²) | | | 269,1 | |
| 3 | 8–16 | 12 | 6,23 | 32,4 |
| | 4–8 | 6 | 8,23 | 21,4 |
| | 2–4 | 3 | 13,4 | 17,4 |
| | 1–2 | 1,5 | 25,2 | 16,4 |
| | 0,5–1,2 | 0,85 | 33,7 | 12,4 |
| | 0,1–0,6 | 0,35 | 0 | 0 |
| Ominaispinta-alojen summa (dm ²) | | | 86,76 | |

Seoksille saatuja kulmakertoimia tarkasteltiin vielä matemaattisesti kaavan 2 avulla. Kulmakertoimet laskettiin kaavan 2 mukaisesti yksittäisten partikkelikokojen vasteen

kulmakertoimilla (taulukko 4) sekä seoksissa olevien partikkelikokojen suhteellisilla prosenttiosuuksilla (taulukko 6). Alla on esitetty kaavalla 2 saatu tulos seokselle 1. Seoksille 2 ja 3 saadut tulokset on esitetty taulukossa 7.

$$k_{s1} = \left(\frac{28}{100} * 5,001\right) + \left(\frac{17}{100} * 3,421\right) + \left(\frac{13}{100} * 2,682\right) + \left(\frac{12}{100} * 1,979\right) + \left(\frac{8}{100} * 1,732\right) + \left(\frac{22}{100} * 1,448\right) = 3,025$$

Taulukko 7. Seoksien anturin vasteen kulmakertoimet, kaavalla 2 lasketut kulmakertoimet sekä kulmakertoimien ero prosentteina.

| Seos | Anturin vasteen kulmakerroin | Laskettu kulmakerroin | Kulmakertoimien ero (%) |
|------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 2,635 | 3,025 | 12,9 |
| 2 | 2,225 | 2,255 | 1,33 |
| 3 | 3,194 | 3,358 | 4,89 |

Laskukaavan 2 pätevyyttä tutkittiin hypoteesin 9 mukaisesti vertailemalla kaavalla 2 saatuja arvoja anturin vasteen kulmakertoimiin. Taulukon 7 tuloksista huomataan, että kaavalla 2 laskettu tulos seokselle 1 on lähes 13 prosenttia suurempi kuin anturin vasteen kulmakerroin. Seokselle 3 ero on hieman maltillisempi, noin 5 prosenttia, ja seokselle 2 ero on vain prosentin luokkaa. Tuloksissa nähtävät erot voidaan selittää seoksissa esiintyvillä partikkelikokojakaumilla, ja sillä miten ne vaikuttavat anturin vasteeseen.

Seoksessa 1 oli mukana tasaisesti betonin kiviainesstandardin mukaisesti kaikkia saatavilla olleita kiviaineksien partikkelikokoja. Koetta tehdessä huomattiin kuvan 20 mukaisesti seoksen tiivistyvän, kun seokseen lisättiin kosteutta. Kokeissa näytteet pyrittiin tasoittamaan mahdollisimman hyvin jokaisen kastelun jälkeen, pinnan epätasaisuudesta johtuvien virheiden minimoimiseksi. Kuivana seoksessa 1 suuret partikkelit olivat näytteen pinnassa, jolloin anturin vaste kasvoi pinnan epätasaisuuden takia. Kun seosta kasteltiin, nousivat seoksen pienet partikkelit näytteen pinnalle. Jokaisen kastelun jälkeen seosta vielä tasoitettiin, jolloin anturin vaste pinnan tasoittuessa väheni verrattuna todelliseen vasteeseen. Kaavan 2 laskelmassa otetaan huomioon seoksen kaikki partikkelikoot eikä vain pinnassa näkyviä partikkeleita, jolloin saatu tulos on seoksen 1 anturin vastetta suurempi.

Seoksella 3 laskettu kulmakerroin on noin 5 % suurempi kuin anturin vasteen kulmakerroin. Seoksesta 3 oli poistettu pienin partikkelikoko, jolloin mittauksen alussa pinnassa olivat suurimmat 8–16 mm:n partikkelit. Anturi havaitsi aluksi suurista partikkeleista aiheutuvan pinnan epätasaisuuden, mutta kun kosteutta lisättiin, tiivistyi seos 3 samalla tavalla kuin seos 1. Tästä syystä pinnan epätasaisuus väheni ja anturin havaitsema vaste on laskettua vastetta pienempi. Seokselle 2 saatiin paras tulos (kulmakertoimien ero pienin), kun seoksesta oli poistettu suurin partikkelikoko. Suurimman partikkelikoon puuttuessa pinnan epätasaisuus ei muutu niin paljoa verrattuna seoksiin 1 ja 3, vaikka kosteus ja pienet partikkelit tiivistävät seosta.

Kokeessa seoksien pinnan tasoittaminen osoittautui siis virheeksi, varsinkin seoksen 1 osalta. Kaavan 2 voidaan kuitenkin todeta toimivan, kunhan seosta ei varsinaisesti tasoitettaisi kosteuden lisäämisen välissä, vaan annettaisiin pinnan epätasaisuuksien säilyä sekoittamisen jälkeen, varsinkin jos partikkelikokojakauma on suuri. Anturin vasteen kulmakerroin kuvaa anturin mittaustarkkuutta. Tämän tutkielman tulosten mukaan kaavaa 2 voidaan tarvittaessa käyttää anturin etäkalibroimiseen, jos tiedetään seoksessa olevien kiviainespartikkeleiden koot ja suhteelliset massaprosentit. Jos kalibrointi on kuitenkin mahdollista suorittaa paikalla tehtävien mittausten avulla, on se etäkalibrointia parempi, jotta virheitä vältetään.

7.3 Hiekkapöly suurissa kiviainespartikkeleissa

Standardi SFS-EN 12620+A1 määrittelee ominaisuudet betonissa käytettävälle kiviainekselle [36]. Standardi määrittelee hyvin hienon kiviaineksen kooksi 0,063 mm, jota käytämme tämän tutkielman hiekkapölyn partikkelikokona. Kokeessa käytettiin 8–16 mm:n kokoista kiviainesta. Taulukossa 8 on esitetty kokeessa käytettyjen partikkelikokojen massat ja niille lasketut ominaispinta-alat, kun partikkeleiden ajatellaan olevan pallon muotoisia. Ominaispinta-alaa 8–16 mm:n kiviainekselle laskettaessa on käytetty keskiarvollista halkaisijaa, joka on 12 mm.

Taulukko 8. 8–16 mm:n partikkelikoon ja hiekkapölyn ominaismassat ja -pinta-alat.

| Partikkelikoko (mm) | Massa (kg) | Ominaispinta-ala (m ²) |
|---------------------|------------|------------------------------------|
| 8–16 | 1 | 0,192 |
| 0,063 | 0,00373 | 0,0683 |

Kokeessa hiekkapölyn massa oli vain 0,373 % verrattuna suuremman partikkelikoon massaan, mutta silti hiekkapölyn ominaispinta-ala (0,0683 m²) oli 35,6 % suuremman partikkelikoon

ominaispinta-alasta (0,192 m²). Saatu tulos on hypoteesin 10 mukainen. Vaikka hiekkapölypartikkeleiden massa on pieni, on niillä huomattavan suuri ominaispinta-ala, joka absorboi kosteutta ollessaan suurempien partikkelien pinnalla. Tämän kokeen tuloksiin hiekkapölyn ominaispinta-alan määrällä ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta, koska määrä oli noin yksi kolmasosa suurien partikkeleiden ominaispinta-alasta. Hiekkapölyn ominaispinta-alan määrällä voidaan kuitenkin arvioida olevan merkitystä kosteuden absorptioon, jos hiekkapölyllä on vähintään lähes sama ominaispinta-ala kuin suurilla partikkeleilla. On myös mahdollista, että hiekkapölyn ominaispinta-ala on suurempi kuin suurien partikkeleiden ominaispinta-ala, johon hiekkapöly on kiinnittynyt.

Tässä kokeessa käytetyt kiviainekset olivat valmiiksi puhtaita, mutta luonnonolosuhteissa hiekkapölyä on partikkeleiden pinnalla sitä enemmän mitä suurempi kiviaineksen partikkelikoko on. Tämä johtuu suurten partikkelikokojen suuresta ominaispinta-alasta yhden partikkelin ympärillä. Teollisuudessa käytettyjen kiviaineksien pinnassa esiintyvää hiekkapölyn määrää voidaan mahdollisesti säädellä erinäisten suodattimien avulla tai pesemällä kiviaines ennen käyttöä. Tämä voi kuitenkin olla vaikeaa esimerkiksi betonitehtaissa, joissa käytetty kiviaines säilötään suuriin silloihin. Silloista kiviaines kulkeutuu automaattisesti betonimyllyyn kuljetushihnan kautta. Betoniteollisuudessa hiekkapölyn suuri määrä voi vaikuttaa rakennetun betonin lujuuteen, jos kosteutta absorboivaa pinta-alaa on kivissä luultua enemmän. Betonitehtaissa hiekkapölyn määrää voitaisiin tutkia tarvittaessa laboratorioissa ja ottaa saadut tulokset huomioon betonin vesi-sementtisuhteessa.

8 Johtopäätökset

Kun kosteutta mitataan optisella kosteusanturilla, on tärkeää ymmärtää, kuinka materiaalin ominaisuudet vaikuttavat kosteuden absorboitumiseen ja anturin mittaukseen. Tässä tutkielmassa tutkittiin partikkelikoon, partikkelikokojakauman ja partikkeleiden ominaispinta-alan vaikutusta kosteuden absorboitumiseen.

Tutkimuksessa havaittiin partikkelikoon vaikuttavan kosteuden absorptioon sekä partikkeleiden ominaispinta-alaan. Kokeissa käytetyn WCM411-kosteusanturin vaste sekä kosteuden absorptiota kuvaava kulmakerroin olivat sitä suurempia mitä suurempi partikkelikoko oli. Näin ollen ominaispinta-ala kuvaavan vasteen kulmakertoimen käänteisluku oli pienin suurimmalle partikkelikoolle ja suurin pienimmälle partikkelikoolle. Tämä osoittaa partikkelikoon merkittävän vaikutuksen optisten kosteusantureiden toimintaan, joten on tärkeää tietää käytetyn materiaalin partikkelikokojakauma. Mittaustuloksia tarkasteltaessa pitää huomioida, ettei suurempi anturin vaste aina välttämättä tarkoita suurempaa kosteuspitoisuutta. Tämän tiedon hyödyntäminen parantaa anturin mittaustarkkuutta, kun osataan huomioida partikkelikoon vaikutus ja kalibroida anturit tarkasti.

Kosteusanturin vaste-ero johtui partikkelikokojen karkeuseroista sekä siitä, että lisätty vesi kerääntyi paksummaksi vesikerrokseksi suurempien partikkeleiden ympärille niiden ominaispinta-alan takia. Koska kosteusanturissa käytettävä lähi-infrapunavalon aallonpituus on herkkä veden absorptiolle (vesimolekyylien värähtely- ja pyörimisliikkeiden resonanssin takia), oli vaste suurempi paksummalle vesikerrokselle. Pienemmän ominaispinta-alan takia suurin partikkelikoko 8–16 mm saavutti myös kylläisyysprosentin jo 1,25 kosteusprosentin kohdalla, kun pienin partikkelikoko 0,1–0,6 mm absorboi kosteutta vielä 17 kosteusprosentin kohdalla.

Kiviainesseoksia tarkasteltaessa huomattiin, että suurin ominaispinta-ala (269,1 dm²) oli seoksella 2, josta puuttui suurin 8–16 mm:n partikkelikoko. Pienin ominaispinta-ala oli seoksella 3 (86,76 dm²), josta oli poistettu suurimman ominaispinta-alan omaava pienin partikkelikoko 0,1–0,6 mm. Koska seoksen 1 partikkelikokojakauma oli tasainen eikä seoksesta ollut poistettu partikkelikokoja, sijoittui ominaispinta-ala (207,12 dm²) kahden edeltä mainitun seoksen väliin.

Seoksissa olevien partikkelikokojen ominaispinta-aloja laskettaessa huomattiin, kuinka suuri vaikutus partikkelien koolla on ominaispinta-aloihin. Seoksessa 1 oli 0,1–1,2 mm:n kokoista partikkelia 20 prosenttiyksikköä vähemmän kuin suurinta 8–16 mm:n partikkelia, mutta silti pienemmän partikkelikoon ominaispinta-ala oli 16,32 dm² suurempi kuin suurimman partikkelikoon ominaispinta-ala. Seoksessa 3 taas suurinta partikkelikoko oli eniten suhteessa muihin partikkelikokoihin, mutta sillä oli pienin ominaispinta-ala. Absorboituvan kosteuden määrää ei siis määrittele kiviainesseoksen massa, vaan partikkelikoot, joita seoksessa käytetään. Lisäksi suurien partikkeleiden pintaan jääneen hiekkapölyn ominaispinta-alaa laskettaessa huomattiin, että suurien partikkeleiden pinnalla olevan hiekkapölyn ominaispinta-ala (0,0683 m²) on 35,6 % suurien partikkeleiden ominaispinta-alasta (0,192 m²), vaikka hiekkapölyä oli vain 0,373 % suuremman partikkelikoon kokonaismassasta (1 kg).

Partikkelikokojen ominaispinta-alan nopea kasvu partikkelikoon pienentyessä huomattiin myös, kun laskettiin X-, Y- ja Z-koordinaattien suunnassa halkaistujen partikkeleiden pinta-alojen kasvua. Leikattujen partikkeleiden yhteenlasketun ominaispinta-alan huomattiin kasvavan säännön $A_0 \cdot 2^k$ mukaan, kun A_0 on alkuperäisen partikkelin pinta-ala ja k halkaisujen määrä. Eli partikkeleiden yhteenlaskettu pinta-ala kaksinkertaistuu aina edellisen leikkauksen yhteenlaskettuun pinta-alaan nähden. Tässä tutkimuksessa sääntö ei kuitenkaan pätenyt, koska partikkelit olivat epäsäännöllisen muotoisia, jolloin partikkeleiden väliin jäi tyhjiä tiloja.

Seoksessa olevat partikkelikoot vaikuttavat myös seoksien pakkaustiheyteen ja huokoisuusasteeseen. Kun seoksessa on mukana pienempiä partikkelikokoja, täyttävät ne suurempien partikkelien väliin jäävät tyhjät tilat lisäten partikkelien välistä kosketuspinta-alaa. Suuri kosketuspinta-ala auttaa veden kulkeutumisessa ja pienissä partikkeleissa olevat pintahuokoset kosteuden absorboitumisessa. Tiiviimmin pakkautuneissa seoksissa valo myös siroaa sironateorian mukaisesti vähemmän.

Tietoa seoksissa olevista ominaispinta-aloista ja niiden vaikutuksesta voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi betoniteollisuudessa. Kiviainesseoksien partikkelikokojakautuman optimoinnilla sekä laskemalla suurten partikkelien pinnassa olevan hiekkapölyn määrä voidaan saavuttaa tarkemmin halutut betonin ominaisuudet. Lisäksi maataloudessa käytettävän maaperän koostumus vaikuttaa esimerkiksi maaperän kasteluun. Kun maaperän koostumus tutkitaan, voidaan kasteluveden määrää säädellä tarkemmin.

Kiviainesseoksille esitetyn kaavan 2 todettiin toimivan seoksien kulmakertoimille, kunhan seoksien pinnan epätasaisuus säilytetään eikä pintaa varta vasten tasoiteta.

Partikkelikokojakaumasta johtuen seos 1 tiivistyi kosteuden kasvaessa, kun pinnassa olleet suuret partikkelit pintaa tasoitettaessa jäivät tiivistyneiden partikkeleiden alle. Ensimmäisessä seoksessa 12,9 %:n ero kaavalla 2 saadun tuloksen ja anturin vasteen välillä johtui siitä, että laskelma ottaa huomioon kaikki epätasaisuudet, kun taas anturin mittaama pinta oli lisätyn kosteuden jälkeen todellisuutta tasaisempi.

Seoksien 2 ja 3 osalta prosentuaalinen ero kuitenkin pieni, koska seoksista puuttui suurimmat tai pienimmät partikkelit. Kun toinen partikkeli kokojen ääripäistä poistettiin, eivät pinnan epätasaisuuserot seoksen tiivistyessä verrattuna alun tilanteeseen olleet niin selkeitä. Lisäksi kaavaa 2 voidaan tarvittaessa käyttää kosteusanturin mittaustarkkuuden parantamisessa, jos kalibroitu mittaustarkkuus heikkenee. Jos mitattavan materiaalin partikkelikokojakauma tiedetään, voidaan kaavalla 2 laskea anturin vasteen kulmakerroin ja muuttaa sitä tarvittaessa etäohjelmalla. Virheiden minimoimiseksi kosteusanturin ensimmäinen kalibrointi kannattaa kuitenkin suorittaa paikalla tehtävillä mittauksilla. Kaavan 2 avulla voidaan ymmärtää optisten kosteusantureiden toimintaa paremmin.

Saatujen tutkimustulosten pohjalta voidaan todeta partikkelikoolle ja partikkelikokojakaumalla olevan suuri vaikutus rakeisten materiaalien ominaispinta-alaan. Ominaispinta-ala taas vaikuttaa materiaalin kykyyn absorboida kosteutta ja sitä kautta myös kosteusanturin mittaukseen. Pienen partikkelikoon ominaispinta-alalla voi olla merkittävä vaikutus kosteuden absorptioon, vaikka sen massa olisikin pieni suhteessa muiden partikkelikokojen massaan. Esimerkiksi betoniteollisuudessa partikkelikokojakauman optimoinnilla voidaan hallita partikkeleiden ominaispinta-alaa ja sitä kautta myös kosteuden absorboitumista. Anturit voidaan myös kalibroida jokaiselle kiviainekselle erikseen, jolloin antureiden mittaustarkkuus ja luotettavuus paranee. Tämä puolestaan parantaa betonin laadunvalvontaa ja valmistetun betonin laatua.

Kosteusantureita käytettäessä on kuitenkin muistettava, että tekniset viat ovat aina mahdollisia ja antureiden toimintaa sekä mittaustarkkuutta on seurattava säännöllisesti. Suurissa partikkeleissa esiintyvää hiekkapölyn määrää tulisi myös seurata säännöllisesti, jotta betonin vesi-sementtisuhde saadaan mahdollisimman optimaaliseksi.

Tulosten pohjalta voidaan todeta optisten kosteusantureiden toimivan sekä rakeisille että kiinteille materiaaleille, kunhan kosteus on mahdollista mitata materiaalin pinnasta. Lisäksi

optinen kosteusanturi tulisi kalibroida erikseen jokaiselle materiaalille, koska materiaalin omat ominaisuudet vaikuttavat mittaustarkkuuteen.

Lähteet

- [1] F. Mayinger, *Optical Measurements: Techniques and Applications*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] Z. Yin, T. Lei, Q. Yan, Z. Chen, Y. Dong, A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement, *Computers and Electronics in Agriculture* 99 (2013) 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.029>.
- [3] S.A. Bowers, R.J. Hanks, REFLECTION OF RADIANT ENERGY FROM SOILS, *Soil Science* 100 (1965) 130–138. <https://doi.org/10.1097/00010694-196508000-00009>.
- [4] N. Sabri, S.A. Aljunid, M.S. Salim, R.B. Ahmad, R. Kamaruddin, Toward Optical Sensors: Review and Applications, *J. Phys.: Conf. Ser.* 423 (2013) 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/423/1/012064>.
- [5] P.R. Yoder, *Mounting Optics in Optical Instruments*, Bellingham, Wash., 2008.
- [6] D. van Grootheest, T. Agbana, J.-C. Diehl, A. van Diepen, V. Bezzubik, G. Vdovin, Large volume holographic imaging for biological sample analysis, *J Biomed Opt* 26 (2021) 016502. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.26.1.016502>.
- [7] E. Boss, C.R. Sherwood, P. Hill, T. Milligan, Advantages and Limitations to the Use of Optical Measurements to Study Sediment Properties, *Applied Sciences* 8 (2018) 2692. <https://doi.org/10.3390/app8122692>.
- [8] E.J. Davies, W.A.M. Nimmo-Smith, Y.C. Agrawal, A.J. Souza, LISST-100 response to large particles, *Marine Geology* 307–310 (2012) 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.03.006>.
- [9] S. Sikarwar, B.C. Yadav, Opto-electronic humidity sensor: A review, *Sensors and Actuators A: Physical* 233 (2015) 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.05.007>.
- [10] S. Nikitin, N. Gordon, C. Mou, K. Zhou, (PDF) Toward a New Generation of Photonic Humidity Sensors, *ResearchGate* (2014) 3986–4013. <https://doi.org/10.3390/s140303986>.
- [11] T. Haavasoja, Optical Moisture Measurement in Concrete Aggregates, *Nordic Concrete Research* 44 (2011) 45–54.
- [12] S. Beguš, G. Begeš, J. Drnovšek, D. Hudoklin, A novel NIR laser-based sensor for measuring the surface moisture in polymers, *Sensors and Actuators A: Physical* 221 (2015) 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.10.032>.

- [13] L. Lin, Y. He, Z. Xiao, K. Zhao, T. Dong, P. Nie, Rapid-Detection Sensor for Rice Grain Moisture Based on NIR Spectroscopy, *Applied Sciences* 9 (2019) 1654. <https://doi.org/10.3390/app9081654>.
- [14] Teconer Oy, Kosteusanturin WCM411 esite, (2025). <https://www.teconer.fi/kiviaineksen-kosteuden-mittaus/> (viitattu 8.1.2025).
- [15] KPM Analytics, NIR-kosteusanturi NIR-7000 esite, (2025). <https://www.kpmanalytics.com/products/moisture-compositional/nir-7000-online-moisture-sensor#resources> (viitattu 8.1.2025).
- [16] T.L. Yeo, T. Sun, K.T.V. Grattan, Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement, *Sensors and Actuators A: Physical* 144 (2008) 280–295. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.01.017>.
- [17] I. Floris, J.M. Adam, P.A. Calderón, S. Sales, Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review, *Optics and Lasers in Engineering* 139 (2021) 106508. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106508>.
- [18] L. Alwis, T. Sun, K.T.V. Grattan, Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress, *Measurement* 46 (2013) 4052–4074. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.030>.
- [19] T.L. Yeo, D. Eckstein, B. McKinley, L.F. Boswell, T. Sun, K.T.V. Grattan, Demonstration of a fibre-optic sensing technique for the measurement of moisture absorption in concrete, *Smart Mater. Struct.* 15 (2006) N40. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/2/N03>.
- [20] M. Leone, (INVITED)Advances in fiber optic sensors for soil moisture monitoring: A review, *Results in Optics* 7 (2022) 100213. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100213>.
- [21] A. Gowri, V.V.R. Sai, Development of LSPR based U-bent plastic optical fiber sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical* 230 (2016) 536–543. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.02.074>.
- [22] K. Bremer, M. Wollweber, F. Weigand, M. Rahlves, M. Kuhne, R. Helbig, B. Roth, Fibre Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Building Structures, *Procedia Technology* 26 (2016) 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.065>.
- [23] K. Bremer, M. Meinhardt-Wollweber, T. Thiel, G. Werner, T. Sun, K.T.V. Grattan, B. Roth, Sewerage tunnel leakage detection using a fibre optic moisture-detecting sensor system, *Sensors and Actuators A: Physical* 220 (2014) 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.018>.

- [24] Teconer Oy, Tiesääsema RWS10 esite, (2024). <https://www.teconer.fi/keli-ja-kitkanmittaus/> (viitattu 8.1.2025).
- [25] H. Bayat, M. Rastgo, M. Mansouri Zadeh, H. Vereecken, Particle size distribution models, their characteristics and fitting capability, *Journal of Hydrology* 529 (2015) 872–889. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.067>.
- [26] Suomen Betoniyhdistys ry, Kiviaines, (2018). <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/kiviaines.html> (viitattu 20.1.2025).
- [27] Suomen Betoniyhdistys ry, Suhteitukseen vaikuttavat tekijät, (2018). <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-koostumuksen-maarittaminen/suhteitukseen-vaikuttavat-tekijat.html> (viitattu 20.1.2025).
- [28] I. Navarrete, M. Lopez, Understanding the relationship between the segregation of concrete and coarse aggregate density and size, *Construction and Building Materials* 149 (2017) 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.185>.
- [29] C.-Y. Wu, A.R. Jacobson, M. Laba, P.C. Baveye, Accounting for surface roughness effects in the near-infrared reflectance sensing of soils, *Geoderma* 152 (2009) 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.002>.
- [30] X. Bi, H. Chu, M. Fu, D. Xu, W. Zhao, Y. Zhong, M. Wang, K. Li, Y. Zhang, Distribution characteristics of organic carbon (nitrogen) content, cation exchange capacity, and specific surface area in different soil particle sizes, *Sci Rep* 13 (2023) 12242. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38646-0>.
- [31] F. Qi, R. Zhang, X. Liu, Y. Niu, H. Zhang, H. Li, J. Li, B. Wang, G. Zhang, Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region, *Soil and Tillage Research* 184 (2018) 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.06.011>.
- [32] Y. Wang, W. Wang, D. Wang, Y. Liu, J. Liu, Study on the influence of sample size and test conditions on the capillary water absorption coefficient of porous building materials, *Journal of Building Engineering* 43 (2021) 103120. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2021.103120>.
- [33] H. Kalman, D. Portnikov, Analyzing bulk density and void fraction: B. Effect of moisture content and compression pressure, *Powder Technology* 381 (2021) 285–297. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.019>.

- [34] J. Melada, P. Arosio, M. Gargano, I. Veronese, S. Gallo, N. Ludwig, Optical reflectance apparatus for moisture content determination in porous media, *Microchemical Journal* 154 (2020) 104627.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104627>.
- [35] L.G. Li, H.X. Zhuo, J. Zhu, A.K.H. Kwan, Packing density of mortar containing polypropylene, carbon or basalt fibres under dry and wet conditions, *Powder Technology* 342 (2019) 433–440. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.005>.
- [36] Suomen Standardit, SFS-EN 12620 + A1 standardi, (2009).
<https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/123294.html.stx> (viitattu 18.2.2025).

Liitteet

Liite 1. 4–8 mm:n kiviaines

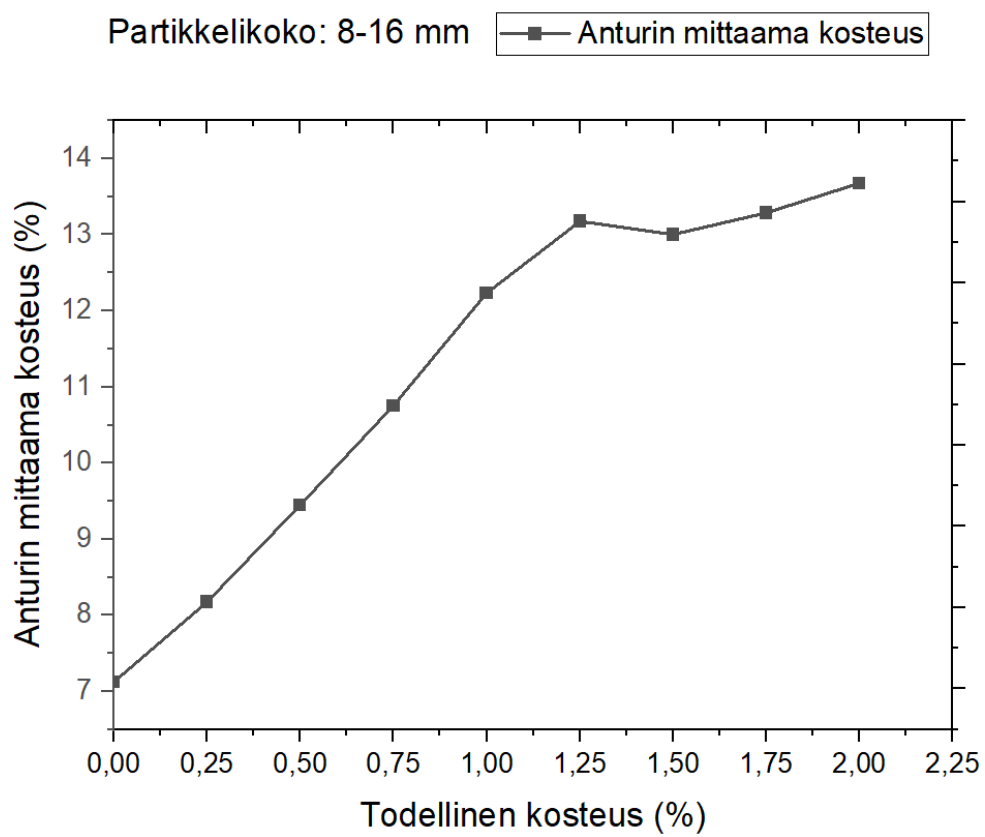


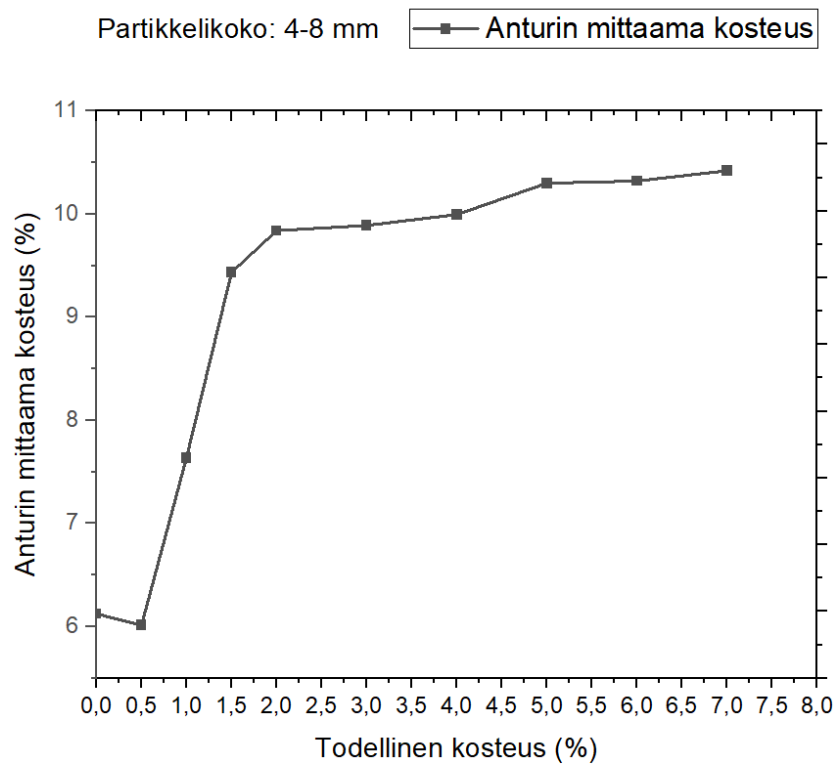
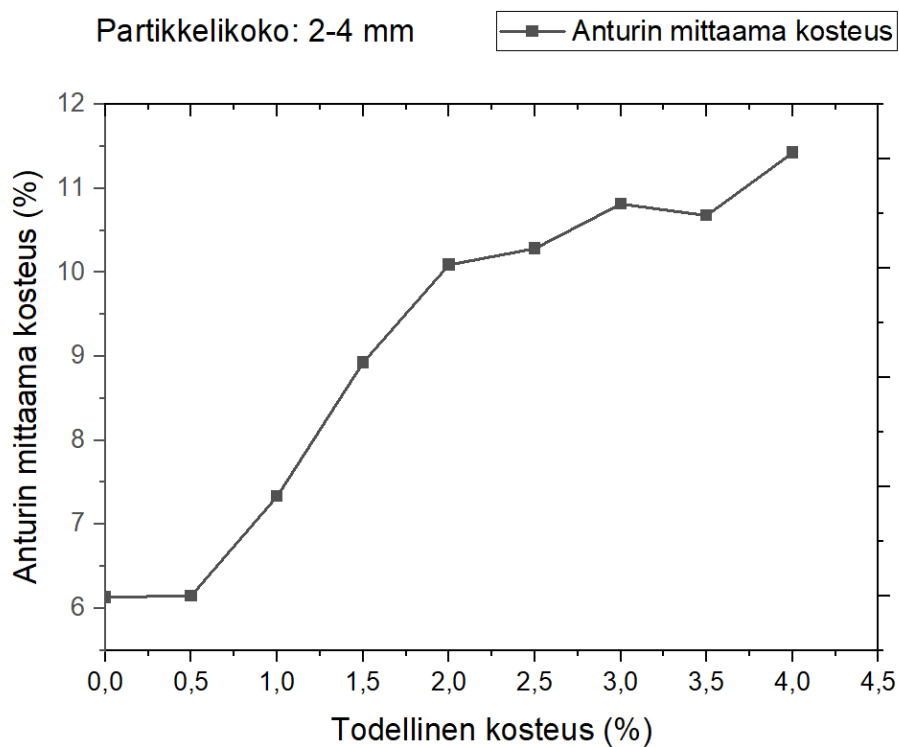
Liite 2. 2–4 mm:n kiviaines

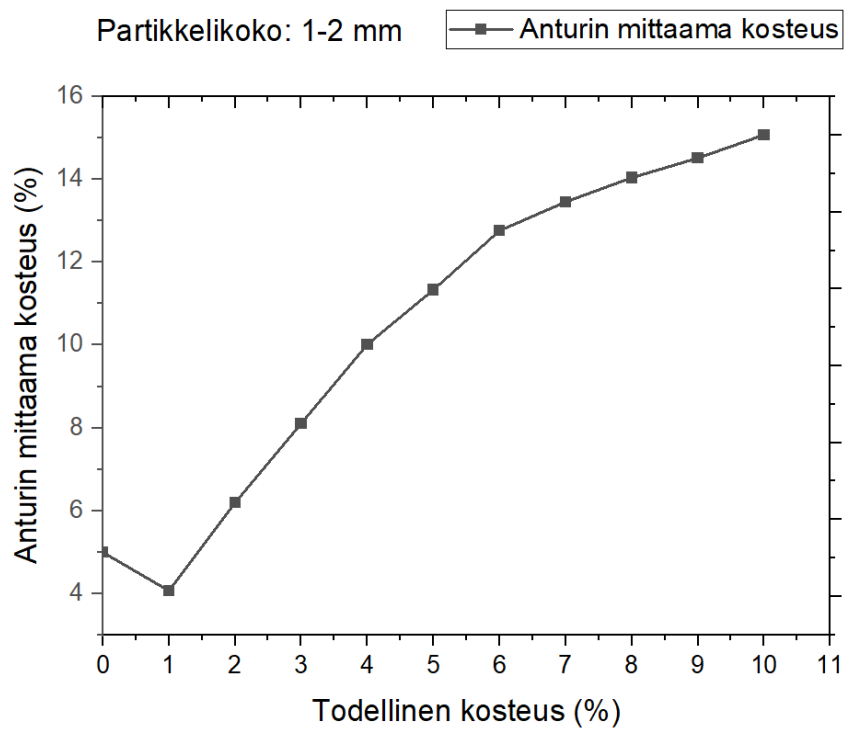
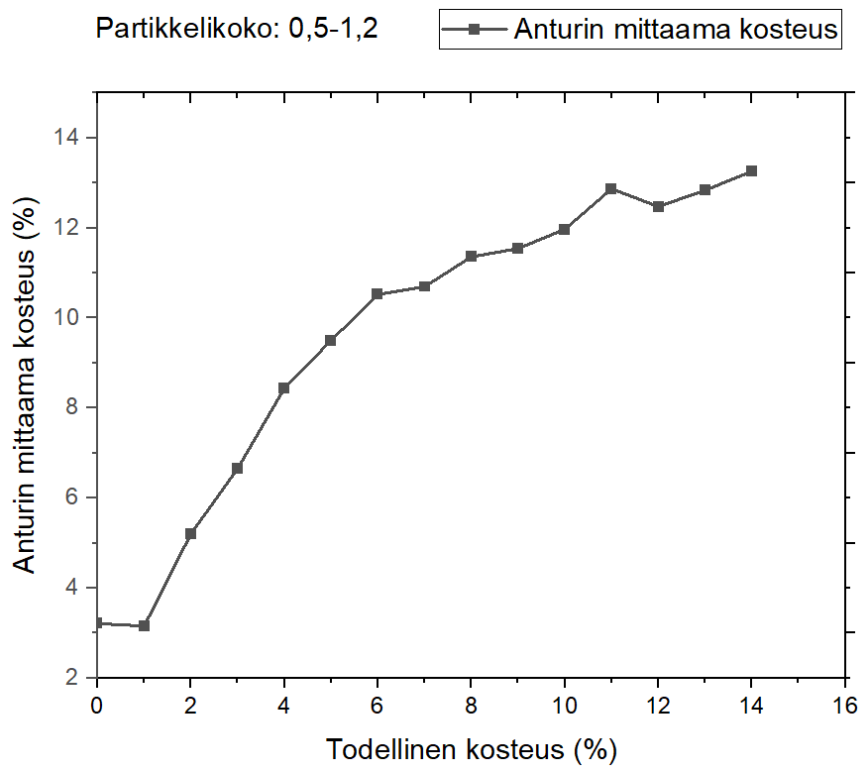


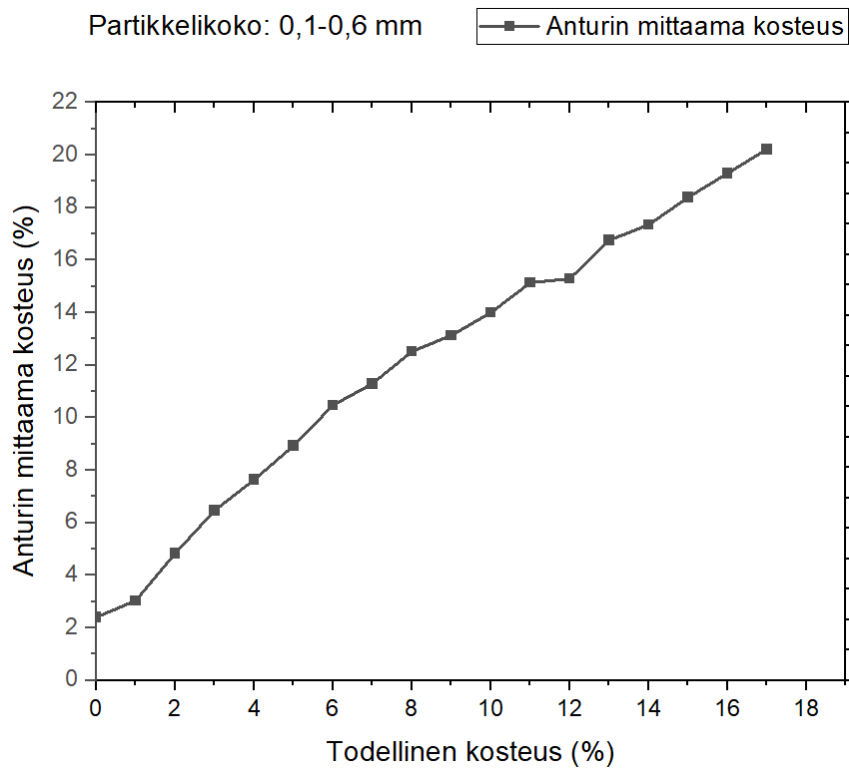
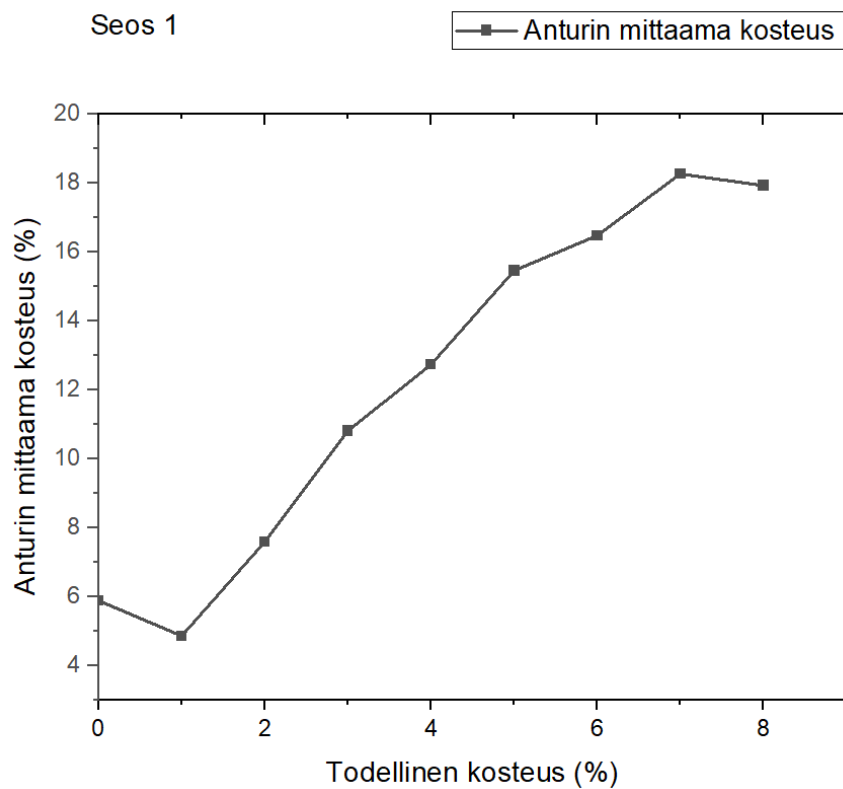
Liite 3. 1–2 mm:n kiviaines

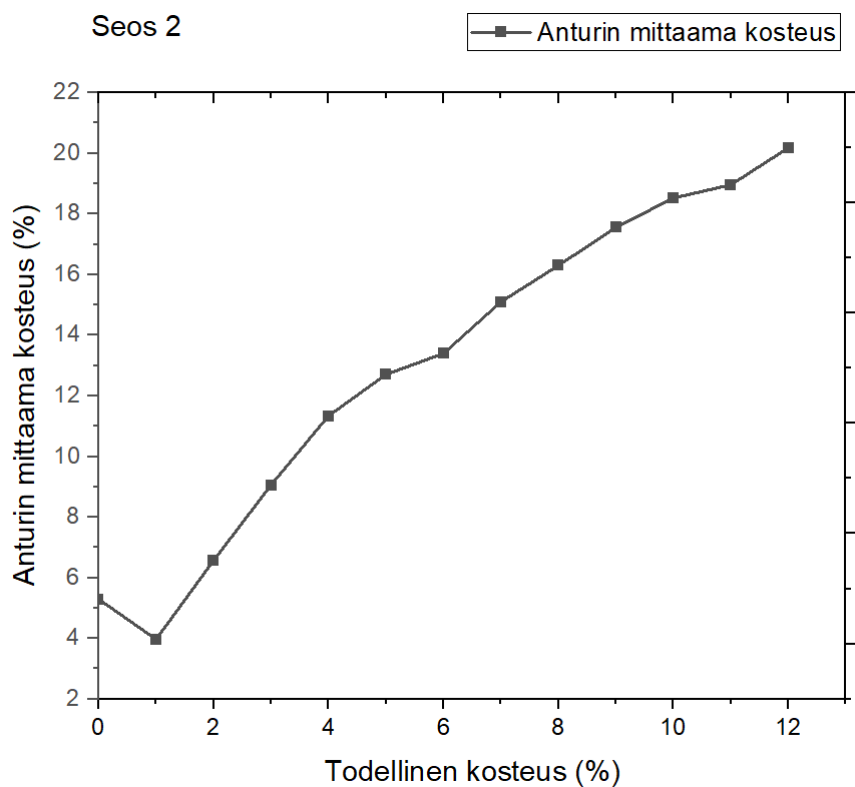


Liite 4. 0,5–1,2 mm:n kiviaines**Liite 5. 8–16 mm: kuvaaja**

Liite 6. 4–8 mm: kuvaaja**Liite 7. 2–4 mm: kuvaaja**

Liite 8. 1–2 mm: kuvaaja**Liite 9. 0,5–1,2 mm: kuvaaja**

Liite 10. 0,1–0,6 mm: kuvaaja**Liite 11. Seoksen 1 kuvaaja**

Liite 12. Seoksen 2 kuvaaja**Liite 13. Seoksen 3 kuvaaja**