

Moreenien geotekniset ominaisuudet Suomessa

Pro gradu-tutkielma
Olli Heikkilä
Oulu Mining School
Teknillinen tiedekunta
Oulun Yliopisto
2018

Tiivistelmä

Tässä pro gradu-työssä on tutkittu Suomen moreenien geoteknisiä ominaisuuksia. Työssä on tutkittu näytteitä ympäri Suomea, niin että ne edustavat kattavasti Suomen moreeneja. Tutkittuja näytteitä oli 11 kappaletta ja ne oli kerätty kuudelta eri paikkakunnalta. Erityisinä mielenkiinnon kohteina tutkielmassa oli moreenien kapillaarisuusominaisuudet sekä moreenien käyttökelpoisuus patorakenteiden eristävänä kerroksena tai vastaavana georisteenä sekä muissa rakennuskohteissa rakennusmateriaalina. Kapillaarisuuden suhteen mielenkiintona on se, että aiheuttaako moreenissa tapahtuva kapillaarinen nousu metalli- ja muiden ionien rikastumista moreenipatjan tai muun tyyppisen maaperän pintaosiin.

Kerätyistä näytteistä tutkittiin niiden rakeisuus, tiivistyvyys, vedenjohtavuus, ominaispinta-ala, kapillaarisuus, ja niiden konsistenssirajat. Tutkimusmenetelminä käytettiin kullekin ominaisuudelle yleisesti Suomessa käytössä olevia tutkimusmenetelmiä.

Tutkielman perusteella tutkittavat näytteet edustavat lajitepitoisuudeltaan pääsääntöisesti sangen hienorakeisia hiekkamoreeneja. Kaikissa näytteissä oli saviainesta vähintään 5%. Niiden tiivistyvyysarvot ovat moreeneille tyypilliset. Vedenläpäisevyydeltään näytteet olivat huonosti vettä läpäiseviä. Näytteiden vedenläpäisevyys vaihteli 92%-tiiviydessä $1,82 \times 10^{-7}$ m/s:ta $5,32 \times 10^{-10}$ m/s:n. Näytteiden kapillaarisuuden arvot olivat suuret. Noin puolelle näytteistä kapillaarisuutta ei saanut tarkasti mitattua, koska kapillaarimetrillä ei saatu tarpeeksi korkeita arvoja. Näytteiden ominaispinta-alat olivat moreeneiksi varsin pieniä. Keski-Lapin rapakalliomoreeneilla sekä Pyhäsalmityyppistä moreenia edustaneella hiekkaisella siltimoreenilla oli muihin tutkielman näytteisiin verrattuna suuremmat ominaispinta-alan arvot. Tutkielman näytteet eivät olleet Pyhäsalmityyppistä moreenia lukuun ottamatta plastisia.

Tutkielman perusteella moreenien käyttöä vaikeuttaa niiden routivuus, joten tämän perusteella niitä ei voi sellaisenaan käyttää kohteissa, jotka vaativat routimatonta materiaalia. Vedenläpäisevyyden puolesta siltimoreeni kelpaavat mahdollisesti patorakenteisiin eristäväksi kerrokseksi. Kapillaarisuuden tutkimustulosten perusteella on mahdollista, että metallit nousevat mineralisaatiosta sitä peittävässä moreenikerroksessa. Näin ollen se on moreenien puolesta mahdollinen malminetsinnän väline.

Avainsanat: Geotekniset ominaisuudet, moreeni, rakeisuus, tiivistyvyys, ominaispinta-ala, vedenjohtavuus, kapillaarisuus, konsistenssirajat, Suomi

Sisältö

1. JOHDANTO	1
2. GEOLOGINEN TAUSTA	2
2.1 Moreenien synty	2
2.2 Pohjamoreenit	3
2.3 Ablaatiomoreenit	4
2.4 Moreeniaineksesta koostuvat maaperämuodot	5
2.5 Moreenien ominaisuuksista	6
2.6 Moreenien käytettävyys kiviaineksena	7
3. AINEISTO	10
3.1 Espoon Turunväylän turvesolmun eritasoliittymän tieleikkaus	10
3.2 Iisalmi Iimäki	12
3.3 Siilinjärvi YARA:n kaivoksen avolouhoksen maaleikkaus	14
3.4 Pyhäsalmen kaivoksen avolouhos	15
3.5 Sodankylän Vuotson lentokentän leikkaus	16
3.6 Sodankylä Mäkärän tutkimuskaivannon moreenileikkaus	17
4. TUTKIMUSMENETELMÄT	18
4.2 Indeksiominaisuudet	21
4.2.1 Rakeisuus	22
4.2.1.1 <i>Seulonnat</i>	24
4.2.2 Konsistenssirajat, plastisuus- sekä juoksuraja	28
4.2.3 Tiivistyvyys	33
4.2.4 Huokoisuus, huokoisuusluku ja huokoskokojakauma	37
4.2.5 Ominaispinta-ala	37
4.3 Hydrauliset ominaisuudet	39
4.3.1 Vedenläpäisevyys	39
4.3.2 Kapillaarisuus	44
4.3.3 Eroosioherkkyys	47
5. TULOKSET	49
5.1 Näytteiden rakeisuus	49
5.2 Tiivistyvyys	52
5.3 Vedenläpäisevyys	53
5.4 Kapillaarisuudet	54

5.5 Konsistenssirajat	55
5.6 Ominaispinta-ala	56
5.7 Eroosioherkkyys	57
7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA KÄYTTÖKOHTEET	58
7.1 Johtopäätökset	58
7.2 Käyttökohteet	61
KIITOKSET	65
VIITELUETTELO	66
LIITTEET	69
Liite 1. Rakeisuuskäyrät	70
Liite 2. Tiivistävyyskäyrät	82
Liite 3. Kartiokokeet	94

1. JOHDANTO

Tämän tutkielman tarkoitus on selvittää eri moreenityyppien geoteknisiä ominaisuuksia Suomessa. Tutkimuksessa on käytetty 11 tyyppimoreeninäytettä kuudelta tunnetulta näytepaikalta. Näytepaikkojen stratigrafia tunnetaan ja niistä on olemassa aiempaa tutkimustietoa. Näin ollen tässä tutkimuksessa ei tarvitse tutkia näytteiden syntyolosuhteita tai metodeja, vaan niistä voi keskittyä tutkimaan kunkin näytteen edustamalle moreenille tyypillisiä geoteknisiä ominaisuuksia. Näytteet on otettu kattavasti ympäri Suomea erityyppisistä moreeneista (Kuva 1). Tutkielmassa on edustettuna Etelä, Keski- ja Itä-Suomelle, Pohjanmaalle sekä Keski-Lapille tyypilliset moreenit. Osa näytteistä on kaivosympäristöistä ja osa leikkauksista tai koekuopista. Näytteen valikoitu niin, että ne edustavat mahdollisimman kattavasti Suomen eri alueiden moreeneja ja moreenityyppejä.

Näytteistä selvitettiin niiden rakeisuus, vedenläpäisevyys, kapillaarisuus, tiivistymiseen liittyvät ominaisuudet, eroosioherkkyys, konsistenssirajat sekä ominaispinta-ala. Nämä ominaisuudet määritettiin, koska ne ovat merkittävimmät geotekniset ominaisuudet, jotka kuvastavat parhaiten maa-ainesten geoteknistä käyttäytymistä.

Tutkielman tavoite on selvittää moreenien geoteknisten ominaisuuksien perusteella moreenien käyttökelpoisuus erityyppisiin tarkoituksiin, kuten kaivosympäristöjen infrastruktuurirakentamiseen mukaan lukien patorakenteet ja rikastusaltaiden peittomateriaalit ja muun muassa moreenien kapillaarisen nousun vaikutusta pintamaan mineralisaatioon.

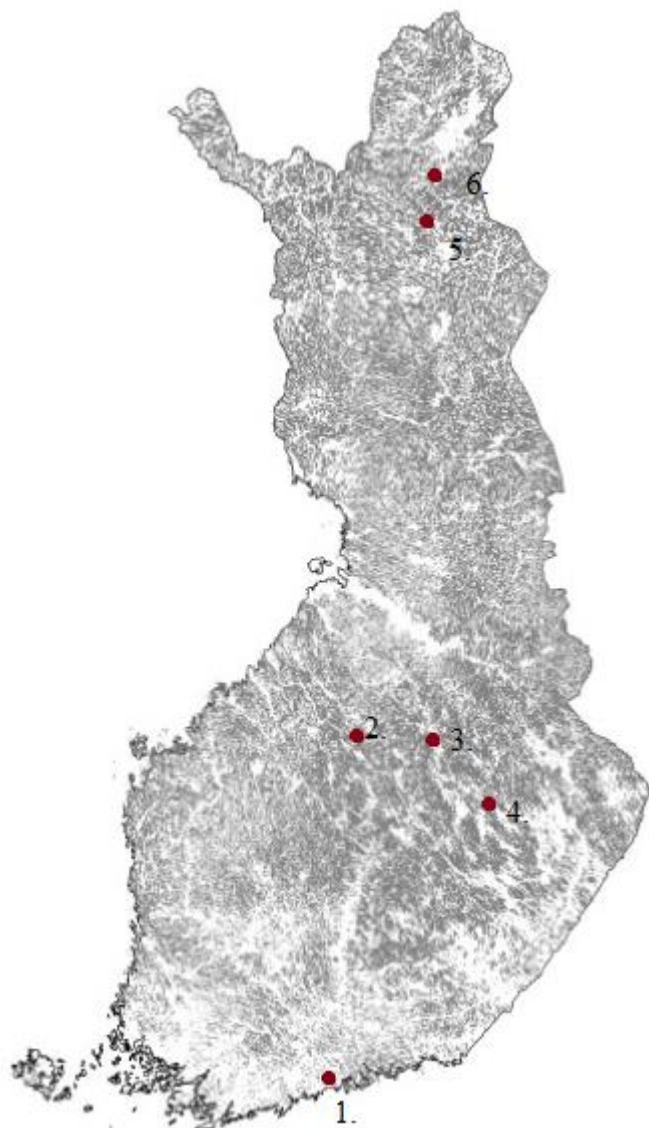
2. GEOLOGINEN TAUSTA

2.1 Moreenien synty

Erityyppiset moreenit ovat jäätikön kerrostamia lajittumattomia maalajeja, jotka myös muodostavat geomorfologisia muodostumia. Moreeni on jäätikön toiminnan tuloksena syntynyt maalaji, jonka aines on peräisin kiinteästä tai rapautuneesta kalliosta ja/tai kallion päällä olleesta maaperästä (GTK 2005). Moreeni on Suomen yleisin maalaji ja moreenimaalajista koostuvat erityyppiset geomorfologiset muodostumat, kuten esimerkiksi drumliinit ja ribbed-moreenit, ovat Suomessa hyvin yleisiä (GTK 2005). Lisäksi moreenia on muiden maalajien alla, koska moreeni on ensimmäinen kallioperän päälle kasautuva maalaji mannerjäätikön sulaessa.

Suomen moreenit ovat syntyneet pääosin viimeisen jääkauden, Veikselin (noin 115 000-11 500 vuotta sitten), eri vaiheissa (GTK 2005), ja valtaosa moreeneista kerrostui viimeisen deglasiaation aikana noin 13 000 – 10 000 vuotta sitten (Lunkka *et al.* 2014). Myös Veiksel-vaihetta varhaisemman Saale-jääkauden moreeneja on paikoin säilynyt. Mannerjäätikkö vetäytyi Suomen osalta viimeistään runsas 10 000 vuotta sitten, jolloin viimeisetkin moreenimuodostumat kasautuivat (Stroeven *et al.* 2016).

Suurin osa Suomen moreeneista on joko pohjamoreeneja tai ablaatiomoreeneja. Pohjamoreenit ovat kerrostuneet jäätikön pohjasta kerrostumisalustalleen kiteisen kallioperän päälle. Ablatiomoreenit ovat puolestaan kerrostuneet jäätikön supra- ja englasiaalisesta kiviaineksesta, joka jään sulettua on kerrostunut alustalleen. Pintamoreenimuodostumia on Suomessa korkeimman rannan tasossa ja sen yläpuolella, etenkin Pohjois ja Itä-Suomen supra-akvaattisilla alueilla.



Kuva 1. Mineraalimaalajien esiintyvyys Suomessa. Moreenien peittämä alue on merkitty harmaalla. Kartalla myös tutkielman näytepisteiden sijainnit. 1. Espoon Turvesolmun tieleikkauksen näytteet, 2. Pyhäsalmen avolouhoksen näytteet, 3. Iisalmen Iimäen näyte, 4. Siilinjärven kaivoksen avolouhoksen näytteet, 5. Mäkäran koelouhoksen näyte ja 6. Vuotson näyte (GTK.)

2.2 Pohjamoreenit

Pohjamoreenit ovat muodostuneet mannerjätikön pohjalla pohjajään kuljettamasta kiviaineksesta tai jään pohjan alla olleen aineksen deformaation kautta. Pohjamoreenit syntyvät pääosin kolmella eri tavalla (subglasiaalisen deformaation, lodgement-prosessin ja basal melt-out-prosessin tuloksena (Benn & Evans 1998)), jonka takia erityyppisten pohjamoreenien fysikaaliset ja geotekniset ominaisuudet vaihtelevat. Kiviaines jätikön pohjalla on peräisin jätikön louhimasta ja irrottamasta kallio- tai

maaperästä. Aktiivisesti liikkuvan jään pohjan painesulamisen kautta syntyy pohjamoreeni, jota kutsutaan lodgement-moreeniksi, kun taas basal melt-out moreeni syntyy pohjajäätissä olevan kiviaineksen kerrostuessa alustalleen tai lodgement-moreenin päälle sulavasta pohjajäätistä. Jäätikön pohjan alla oleva kiviaines, joka koostuu deformaatiomoreeniksi, on puolestaan peräisin jäätikön deformaatiosta ja uudelleenkerrostamista sedimenttikerrostumista. Pohjamoreenin kiviaines on melko paikallista eikä se ole kulkeutunut pitkää matkaa jään mukana. Eritoten lodgement-moreenin kiviaines on varsin paikallista (Bennet & Glosser 2009). Yleensä pohjamoreenit ovat massiivisia ja rakennepiirteettömiä (Bennet & Glosser 2009), mutta varsinkin deformaatiomoreeneissa saattaa esiintyä lajittuneita linssejä tai kerroksia deformaatiomoreenin pohjaosassa.

Pohjamoreenit ovat luonteeltaan yleensä huomattavasti tiiviimpää kuin ablaatiomoreenit, koska ne ovat muodostuneet jäätikön pohjalle kovan paineen alaisena (Bennet & Glosser 2009). Pohjamoreenit esiintyvät monin paikoin niin sanottuina peitemoreeneina. Peitemoreenit ovat yleensä paksuudeltaan varsin ohuita, keskimäärin 1-2m ja peittävät maan kamaraa kattavasti. Ohuuden vuoksi ne ovat usein subakvaattisilla alueilla huuhtoutuneet paikoitellen pois, muodostaen kalliopaljastumien kanssa vaihtelevan maaston (GTK 2005). Ne ovatkin Suomen yleisin maanpeite, peittäen noin 48% Suomen maa-alasta (Kujansuu & Niemelä 1984). Useat moreenimuodostumat kuten drumliinit, ribbed-moreenit ja de Geer-moreenit sekä osa reunamoreeneista ovat ainekseltaan pohjamoreenia eroten peitemoreenista, joka tyypillisesti peittää ohuena kerroksena kallioperää.

Pohjamoreenit ovat usein ainekseltaan hiekkamoreeneja tai hienoainesmoreeneja ja ne ovat materiaaliltaan usein pintamoreeneja hienorakeisimpia. Suurin osa tutkielman näytteistä edustaa erilaisia pohjamoreeneja.

2.3 Ablatiomoreenit

Ablatiomoreenit ovat muodostuneet jäätikön sulamisvaiheessa materiaalista, joka on kasautunut jäätikön pinnalta (supraglasiaalinen debris) tai jäätikön sisältä (englasiaalinen debris) kerrostumisalustalleen. Ablatiomoreeni on yleensä löyhempää kuin pohjamoreeni (GTK 2005). Ablatiomoreenit ovat yleensä materiaaliltaan pohjamoreeneja karkearakeisempia, johtuen siitä, että niiden kasaututtua on niihin

kohdistunut huuhtoutumista (Rantamäki *et al.* 1979). Ablaatiomoreeneja on yleisesti kattavasti peittona vanhempien pohjamoreenien ja muiden muodostumien päällä. Paksuudeltaan ablaatiomoreenit ovat useimmin ohuita, 0-1m paksuja, mutta kerrostumisolosuhteista riippuen ne voivat olla myös hyvinkin paksuja. Ablaatiomoreenien materiaali ei ole yleensä yhtä kulunutta kuin pohjamoreeneissa (Bennet & Glosser 2009). Ablaatiomoreeneissa näkyy usein jäätikön sulamisen jälkiä kerrosrakenteissa ja muodostumissa. Esimerkiksi jäätikön reunalta liukuneesta kiviaineksesta on voinut muodostua liukomoreeneja, joille tyypillistä ovat viistot kerrosrakenteet (GTK 2005). Ablaatiomoreenimuodostumissa on myös usein näkyvissä muita sulamisen merkkejä, kuten suppia. Ablaatiomoreenien materiaali on usein vaihtelevaa ja se saattaa sisältää kaukokulkeutuneitakin aineksia (Bennet & Glosser 2009).

Suomessa ablaatiomoreeneja esiintyy korkeimman rannan tasossa tai sen yläpuolella supra-akvaattisilla alueilla (GTK 2005). Tutkielman näytteissä ei ole pintamoreeneja edustettuna.

2.4 Moreeniaineksesta koostuvat maaperämuodot

Reunamoreenit, joiden aines on pääosin moreenia, ovat muodostuneet nimensä mukaisesti jäätikön reunalle. Ne ovat kasautuneet kohtisuoraan jäätikön kulkusuuntaan nähden. Ne ovat luonteeltaan löyhiä ja paikoitellen melko lajittuneita, huuhtoutumisesta johtuen (Rantamäki *et al.* 1996). Reunamoreeneja esiintyy eritoten reunamuodostumien yhteydessä. Ne sisältävät vaihtelevasti pohja- ja pintamoreenia sekä jäätikön edustalla olleita lajittuneita maalajeja (GTK 2005). Moreeniaineksesta koostuvat reunamoreenit ovat usein pienempinä reunamoreenivalleina. De Geer-moreeniharjanteet koostuvat myös pääosin pohjamoreenista ja ne ovat syntyneet jäätikön reunan suuntaisiksi valleiksi jäätikön päättyessä matalaan veteen (GTK 2005).

Drumliinit ovat puolestaan pohjamoreenista koostuvia pitkulaisen muotoisia mäkiä ja kohoumia. Ne ovat muodostuneet siten, että jäätikön maa-aines on kasautunut pitkittäin kalliossa olevan kohouman molemmille puolille. Materiaaliltaan ne ovat pohjamoreenia ja sisältävät myös lajittuneita osia (GTK 2005). Niitä tavataan alueella, jossa jäätikkö on

ollut voimakkaasti virtaava, kuten Suomessa eritoten Kuusamon ja Järvi-Suomen alueilla (GTK 2005). Drumliinit esiintyvät usein parvissa.

Ribbed-moreenit ovat geomorfologisia muodostumia, jotka ovat syntyneet aktiivisen jään aikaansaannoksena. Ne ovat jäätikön liikkeeseen nähden poikittaisia suuria valleja. Ribbed-moreeneja esiintyy laajasti jäätiköityneillä alueilla, kuten Pohjois-Euroopassa, Kanadassa ja Brittein saarilla. Suomessa niitä esiintyy suurina yhtenäisinä kenttinä (Mäkelä 1996).

Kumpumoreenit ovat syntyneet kuolleen jään vaiheessa, eli silloin kun jäätikön vetäytyminen on pysähtynyt ja se sulaa paikalleen. Kumpumoreenikentällä olevat yksittäiset moreenikummut ovat suuntautumattomia, vaihtelevan kokoisia ja muotoisia (GTK 2005). Kumpumoreenimaastossa on usein myös suppia ja muita kuolleen jään muodostumia. Ne ovat materiaaliltaan ablaatiomoreenia. Materialtaan kumpumoreenit ovat pohjamoreenia löyhempää ja lohkareisempaa. Niissä on myös usein karkeampi rakeisuus kuin pohjamoreeneissa.

2.5 Moreenien ominaisuuksista

Moreenin ominaisuuksiin vaikuttaa se, että moreeni koostuu sekä karkeista että hienoista maalajitteista. Moreeni on sekalajitteinen maalaji, jonka lajittuneisuus on huono. Yleensä moreeni on väriltään harmaata, mutta väritys riippuu sen mineraalikoostumuksesta ja rapautuneisuudesta (GTK 2005). Moreenin kiviaineksen koostumus riippuu suuresti siitä, minkälainen moreenikerrostuma on kyseessä ja siitä mistä jäätikkö on kerännyt tulevan moreenin kiviaineksen (Bennet & Glosser 2009). Esimerkiksi pohjamoreenit ovat luonteeltaan hienorakeisempia sekä ylikonsolidoituneita, pintamoreeneihin verrattaessa. Jos moreenin maa-aines on peräisin uudelleenlajittuneista muodostumista, voi niissä olla mukana lajittunutta materiaalia linsseinä (GTK 2005). Moreenimateriaalin rapautuneisuus kertoo yleensä siitä, onko materiaali suoraan kalliosta irronnutta tervettä kiviainesta, vai rapautumakerroksesta erodoitunutta. Jos materiaali on rapautumatonta, niin todennäköisesti aiemmat jäätiköitymiset ovat puhdistaneet kallion päältä rapautuneen aineksen, jolloin viimeisin jäätiköitymisvaihe on irrottanut vain tervettä kallioperää (GTK 2005).

Moreenit voidaan luokitella materiaalinsa mukaan kolmeen kategoriaan, soramoreeniksi, hiekkamoreeniksi ja hienoainemoreeneiksi. Suomen moreeneista 70-

80% on hiekkamoreeneja, 10%-15% hienoainesmoreeneja ja 5-10% soramoreeneja (Saarelainen & Nenonen 1995). Samassa leikkauksessa voi olla kuitenkin rakeisuudeltaan useampaa eri moreenityyppiä, riippuen moreenin muodostumistavasta ja -tyypistä. Usein luonnossa moreenikerrokset vaihettuvat toisiksi leikkauksissa epäselvästi ja paikoitellen, jonka takia esimerkiksi hiekkamoreeniksi nimetyssä muodostumassa voi olla sisällä hienoainesmoreeniosueita. Lisäksi moreenimuodostumat voivat sisältää lajittuneita osioita, esimerkiksi lajittuneen aineksen jäätikön uudelleen kerrostamana linssinä moreenimuodostuman sisällä.

Moreenien kiviaines on usein luonteeltaan pyöristymätöntä ja jopa särmikästä (Rantamäki *et al.* 1996). Tämä johtuu siitä, että kiviaineksen kulkeutumismatka pohjajäällä on ollut lyhyt eikä abraasio ole vaikuttanut tarpeeksi kauan kiviainekseen. Pohjamoreenin kiviainekselle on tyypillistä, että klastit ovat silitysraudan muotoisia, sekä että niillä on selvä pituusakseli (Bennet & Glasser 2009). Moreenikiviainekselle tyypillistä on myös se, että se on likaantunutta, eritoten sen pyöristymättömällä puolella.

Moreenin kiviaineksen rapautuneisuus vaikuttaa sen ominaisuuksiin. Rapautuneisuus johtuu siitä, että puhdas kallion pinta rikkoutuu ja rikkoutunut pinta reagoi ympäristössä olevien suolojen kanssa (GTK 2005). Esimerkiksi rikkoutuminen voi johtua pakkasen aikaansaamasta kallion pinnassa olevien halkeamien kasvusta. Sitä kutsutaan pakkasrapautumiseksi (GTK 2005). Suomessa oli ennen viimeisiä jääkausia yhtenäinen rapaumakerros, johtuen siitä että Fennoskandian kilpi oli ollut aikanaan lämpimämmillä leveyspiireillä, joka mahdollisti rapaumakerroksen synnyn. Viimeiset jääkaudet kuitenkin kuluttivat suurimman osan rapaumakerroksesta. Rapakalliota ja rapaumaa on löydettävissä Suomessa vielä eritoten Keski-Lapissa jäänjakajavyöhykkeellä, mutta niitä löytyy myös muultakin, paikoista jotka säästyivät suuremmilta jäätikön kulutusvoimilta (GTK 2005).

2.6 Moreenien käytettävyys kiviaineksena

Moreenin käytettävyyteen kiviaineksena vaikuttaa eniten sen rakeisuus, tiivistyvyys, vesipitoisuus ja sen sisältämän eloperäisen aineksen määrä. Myöskin esimerkiksi rakennettavuutta varten tulee tietää moreenin vedenläpäisevyys, routivuus, kerrosjärjestys, kantavuus ja kaivettavuus. Myös pohjaveden pinnankorkeus ja sen vaihtelut tulee tuntea, jos moreenimuodostuman päälle on suunniteltu rakennettavaksi

jotain, tai jos sitä kaivetaan (GTK 2005). Moreenit ovat pääsääntöisesti hankalasti käytettäviä materiaaleja ja niiden käytettävyys vaihtelee suuresti riippuen niiden lajitepitoisuudesta. Yleensä moreeneja, joissa on vähän hienoainesta voi käyttää esimerkiksi teiden rakennekerroksina. Hienoaineksisia moreeneja voidaan hyödyntää kohteissa, joissa pienestä vedenläpäisevyydestä on hyötyä, kuten pato- ja peiterakenteissa (GTK 2005). Ongelma moreenien käytettävyydessä on se, että niissä on käytännössä aina ainakin jonkin verran hienoainesta, määrän vaihdellessa noin viidestä prosentista jopa 70%:n (Nieminen 1985).

Hienoaineksen ja eritoten savilajitteen määrä on myös yksi eniten moreenin käytettävyyteen vaikuttavista tekijöistä. Hienoainesta sisältäviä moreeneja on eniten Lounais-Suomessa, subakvaattisella alueella niin sanotulla Laatokka-Perämeri vyöhykkeellä (Lintinen 1995). Moreenin hienoainespitoisuuteen vaikuttaa merkittävästi jäätikön kuljettaman materiaalin lähtöalue, kuljetusmatka ja moreenien kerrostumistapa. Jos jäätikön mukana, tai sen alla, on kulkeutunut tai ollut aiemmin kerrostunutta hienoainespitoista maalajia, kuten savikoita, niin kerrostuva moreeni on savespitoinen (Lintinen 1995). Myös alueen rapautuneisuus ja rapautumisalttius vaikuttaa moreenien hienoaineksen määrään ja laatuun. Alueilla, joissa kallioperä on rapautunutta, näkyy rapautuneisuus myös moreenien hienoaineksessa. Hienoaineksen ominaisuudet vaikuttavat sitten moreenin ominaisuuksiin (Lintinen 1995). Hienoaines vaikuttaa geoteknisistä ominaisuuksista eniten moreenin routivuuteen, vedenläpäisevyyteen, kapillaarisuuteen ja muihin hydraulisiin ominaisuuksiin.

Yleensä geoteknisissä kohteissa käytetään rakenteissa materiaalina kalliomurskettä tai glasifluviaalista soraa ja hiekkaa. Soraa on käytetty paljon monissa käyttökohteissa, mutta nykyään jäljellä olevat soramuodostumat ovat usein suojeltuja, joten niiden käyttö ei ole kestävä.

Moreeni on soveltuvaa käyttömateriaaliksi silloin kun kalliomurskeen saaminen kohteeseen on vaikeaa tai moreenimateriaalin erityisen helppoa. Moreenin käyttö kalliomurskettä korvaavana materiaalina voi vähentää kiviaineksen oton ympäristövaikutuksia ja säästää kustannuksissa. Paikallisen materiaalin käyttö vähentää myös kuljetuksista aiheutuvia haittoja ja kustannuksia (Korkiala-Tanttu *et al.* 2008). Infrarakentamisessa potentiaalisimmat käyttökohteet moreenille ovat teiden eri rakennekerrosten materiaali ja meluvallit (Korkiala-Tanttu *et al.* 2008).

Yleisesti voi todeta, että mitä enemmän moreeniaineksessa on kiviä ja mitä vähemmän siinä on hienoainesta, sen parempaa se on käyttömateriaalina. Moreenin kelpoisuutta eri käyttötarpeisiin voi myös parantaa murskaamalla moreenissa olevia kiviä ja lohkareita sekä poistamalla moreenin hienoainesta. Moreenien käyttöä huonontavia ominaisuuksia ovat korkea hienoainepitoisuus sekä kosteudesta aiheutuva paakkuuntuminen. Paakkuuntuminen voi aiheuttaa murskan liiallista täyttymistä ja jumittumista, mikä vaikeuttaa murskan toimintaa (Tielaitos 1996). Tämän takia parhaimmat ajankohdat moreenin otolle on kesäisin, kuivina ajankohtina. Lisäksi moreeneissa on usein se huono puoli, että materiaali vaihtelee moreenimuodostumien sisällä. Esimerkiksi kivisyys on usein suurempaa moreenien pintaosissa. Moreenimuodostumissa maa-aines saattaa vaihdella erittäin paljon, sillä muodostumissa voi olla erilaisia ja eri-ikäisiä yksiköitä. Tielaitoksen selvityksen (1996) mukaan eritoten Rogen-moreenit, reunamoreenit ja kumpumoreenit ovat käyttökelpoisia murskattavaksi materiaaliksi. Yleensä käyttökelpoiset moreenit ovat hyvin lohkar ja kivipitoisia. Vettä läpäisemättömiin kohteisiin, kuten tiivistekerrokseen, käytettäväksi materiaaliksi parhaita ovat hienoainesmoredit

Moreenin materiaalin käytettävyyttä parantavat menetelmät on jaoteltu kolmeen kategoriaan: mekaaniset, kemialliset ja edellä mainittuja yhdistävät menetelmät (Korkiala-Tanttu *et al.* 2008). Mekaanisia menetelmiä ovat menetelmät, jossa materiaalia parannetaan sen rakeisuutta muokkaamalla. Esimerkkinä tämän tyyppisistä menetelmistä ovat murskaus, seulonta ja muut rakeisuuteen vaikuttavat parannuskeinot. Kemiallisia menetelmiä ovat menetelmät, joissa materiaaliin sekoitetaan erilaisia aineita, kuten esimerkiksi bentoniittia tai muita sideaineita ominaisuuksien parantamiseksi. Yhdistelmämenetelmäksi voidaan lukea pelletointi, jota käytettiin eritoten 1990-luvun puolessavälissä. Käyttökelpoisimpia menetelmiä ovat moreenin hienoaineksen poistoon liittyvät menetelmät ja muut mekaaniset menetelmät. Hienoaineksen poistolla moreenista saadaan routimatonta ja muiltakin ominaisuuksiltaan käytettävämpää. Rakeisuutta parantamalla materiaalista saadaan soveltuvampaa aiottuun käyttötarkoitukseen. Se voidaan tehdä esimerkiksi sekoittamalla moreenimaahan toista materiaalia, kuten kalliomurskettä tai hiekkaa. Sekoitettava materiaali voi olla myös moreenista seulottua lajitetta (Korkiala-Tanttu *et al.* 2008).

3. AINEISTO

Tätä työtä varten kerättiin 11 näytettä kuudelta paikkakunnalta. Paikkakunnat ja näytteenottokohteet valikoituivat sen perusteella, että niistä saatiin näytteitä edustamaan kattavasti Suomessa yleisesti esiintyviä moreeneja (Taulukko 1).

Taulukko 1. Näytteiden ottopaikat, näytteistä tutkielmassa käytetyt koodit, näytteiden ottosyvyys, näytteiden massa sekä näytteenottajat.

Näyte	Näytteen koodi	Näytteenottoaika	Ottosyvyys	Näytteen koko	Näytteenottaja
Espoon turvesolmun näyte 1	E1	Turvesolmun leikkaus	1,5 m	12554g	K. Nenonen
Espoon turvesolmun näyte 2	E2	Turvesolmun leikkaus	1,5 m	16398g	K. Nenonen
Iisalmen Iimäen näyte	I1	Iimäki	0,9-1,2 m	20282g	A. Kiiskinen
Sodankylän Mäkärän tutkimusmontun näyte	M1	Mäkärän tutkimusmonttu	0,6 m	18720g	J. Valkama
Pyhäsalmen kaivoksen avolouhoksen näyte 1	P1	Avolouhoksen leikkaus	7 m	9124g	Nenonen, Kujala, Mäki & Kurtén
Pyhäsalmen kaivoksen avolouhoksen näyte 2	P2	Moreenin läjityskasa	1 m	9624g	Nenonen, Kujala, Mäki & Kurtén
Pyhäsalmen kaivoksen avolouhoksen näyte 3	P3	Avolouhoksen leikkaus	2 m	9654g	Nenonen, Kujala, Mäki & Kurtén
Pyhäsalmen kaivoksen avolouhoksen näyte 4	P4	Avolouhoksen leikkaus	12 m	14178g	Nenonen, Kujala, Mäki & Kurtén
Siiinjärven kaivoksen avolouhoksen näyte 1	S1	Avolouhos	1,2-1,7 m	17968g	A. Kiiskinen
Siiinjärven kaivoksen avolouhoksen näyte 2	S2	Avolouhos	3,5-4,0 m	17268g	A. Kiiskinen
Vuotson tieleikkauksen näyte	V1	Vuotson lentokenttä	0,7 m	20484g	J. Valkama

3.1 Espoon Turunväylän turvesolmun eritasoliittymän tieleikkaus.

Espoo on Etelä-Suomessa pääkaupunkiseudulla oleva kaupunki. Geologialtaan kaupungin alue on vaihtelevaa. Mäet ovat pääosin kallio-moreenimäkiä, joissa näkyy pieniä rantakerrostumia. Painumissa ja laaksoissa on täytteenä savimaita sekä turpeita (Haavisto-Hyvärinen 1994). Espoon maaperään on vaikuttanut merkittävästi se, että eteläinen Suomi oli jäätikön vetäytymisen jälkeen subakvaattista aluetta (Haavisto-Hyvärinen 1994). Vedellä on ollut muotoja tasoittava ja muun muassa mäkiä huuhteleva vaikutus. Moreeni on alueen yleisin maalaji. Sitä löytyy alueelta kattavasti ohuena patjana niin kalliorinteiden päältä, että alaviin osiin veden aikoinaan huuhtelevana (Haavisto-Hyvärinen 1994). Pääosin moreenit ovat ohuita pohjamoreeneja, jotka ovat ainekseltaan hiekkamoreeneja. Ne peittävät kalliota ohuena patjana, jonka syvyys on

keskimäärin metristä kolmeen metriin. Espoo on hyvin rakennettua aluetta. Tämän takia siellä ei ole voitu kartoittaa maaperää yhtä tehokkaasti kuin vähemmän rakennetullaseudulla. Geologisen tutkimuskeskuksen 1:20000 maaperäkartan mukaan alue josta näyte on otettu, on hiekka- ja hienoainesmoreenia.

Näytteenottopaikasta on kaksi näytettä. Leikkauksessa, josta näytteet on otettu, on kaksi selvästi toisista erotettavaa moreenia. Ylempi moreeni edustaa hiekkamoreenia (näyte E1, Taulukko 1). Moreenipatja on kerrostunut moreenin kivien suuntauslaskun perusteella jäätikön virratessa alueen yli luoteesta kaakkoon. Näyte on otettu 1,5 metrin syvyydeltä. Moreeni on sen alapuolella olevaan moreeniin verrattuna tiiviydeltään löyhempää. Alempi näyte on hienoainesmoreenia (Näyte E2, Taulukko 1), joka on kerrostunut pohjoisesta etelään. Leikkauksen pinnalla on rantahuuhtoumaa sekä ohut rantakerrostuma. Moreenit ovat pohjamoreenia (Hirvas *et al.* 1995). Eritoten ylempi moreeni, jota näyte E1 edustaa, on hyvin yleinen moreenityyppi Salpausselkien eteläpuolisella alueella.

Turvesolmun leikkauksen kerrosjärjestys kahden ylimmän moreenipatjan osalta on saman tyyppinen, kuin Helsingin Vuosaaresta kuvatussa moreenileikkauksessa. Vuosaaren leikkaus edustaa parhaiten Etelä-Suomen pleistoseenin moreenistratigrafiaa, jossa on havaittavissa kolme moreenipatjaa, ja moreenipatjojen väliset lajittuneet siltti- ja hiekkakerrokset (Hirvas *et al.* 1995).



Kuva 2. Espoon Turvesolmun moreenileikkaus.

3.2 Iisalmi Iimäki

Iisalmi on kaupunki Pohjois-Savossa. Iisalmen alueen yleisin maanpeite on moreeni (Kukkonen ja Sahala 1988). Näyte I1 (ks. Taulukko 1) on otettu kaupungin keskustan pohjoispuolella sijaitsevalta Iimäeltä. Iimäki on Geologian tutkimuskeskuksen julkaiseman maaperäkartan 1:20000 mukaan hienoainesmoreenista koostuva. Mäen liepeillä on myös saraturpeista suota sekä kalliopaljastumia. Mäen lähellä sijaitsee

lentokenttä. Iimäki ja sen lähellä olevan Sopenkylän mäet ovat jyrkkiä ja korkeita. Ne ovat kokonaan moreenia (Kukkonen ja Sahala 1988). Karttalehtiselitteen mukaan savespitoisuus mäkien moreeneissa on yli 10%. Sen mukaan Iimäellä on myös veden huuhtelun vaikutuksesta syntyneitä rantakerrostumia.

Geologian tutkimuskeskuksen tutkimusten (Kukkonen ja Sahala 1988) mukaan alueen pohjamoreeneista suurin osa on hienoainesmoreenia ja noin kolmannes hiekkamoreenia. Savilajitteen osuus otetuissa moreeninäytteissä oli 1-15%. Otetuissa näytteissä moreenin hienoaineksen määrä kasvoi kohti luodetta. Hienon aineksen määrää on selitetty Savon seudun sedimenttikivikerrostumien sekä alueella ennen viimeisintä jäätiköitymistä olleen vanhemman materiaalin vaikutuksista. Geologian Tutkimuskeskuksen maaperäkartan karttaselitteen (toim. Kukkonen ja Sahala 1988) mukaan alueen kummut olisivat syntyneet jäätikköön rakoihin pusertuneesta pohjamoreenimateriaalista.



Kuva 3. Lähikuva (ylempi) ja monttukuva (alempi) Iisalmen Iimäen näytteenotto paikasta, josta otettiin yksi näyte II syvyysväliltä 0,9 – 1,2 metriä maanpinnan alapuolella.

3.3 Siilinjärvi YARA:n kaivoksen avolouhoksen maaleikkaus

Siilinjärven kaivos on Itä-Suomessa, Savossa Kuopion pohjoispuolella sijaitseva kaivos. Kallioperä Kuopion ja Siilinjärven alueella on pääosin arkeista granitoidigneisseiä. Siilinjärvellä on karbonaatti-kompleksi, johon Siilinjärven kaivoksen apatiittimalmi liittyy (Luoma *et al.* 2016). Alueen maaperä on pääosin pohjamoreenia, joka on lajitekoostumukseltaan hiekkamoreenia (Räisänen 1996). Alueella on myös harjumuodostumia, eritoten Siilinjärven keskustan alueella, sekä savi- ja silttimuodostumia (Kejonen *et al.* 1996, Räisänen 1996, Luoma *et al.* 2016). Siilinjärven kaivosalueelta otettiin kaksi moreeninäytettä (Taulukko 1). Aiempien havaintojen perusteella kaivosalueen moreeni on pääosin pohjamoreenia (Luoma *et al.* 2016). Lintisen (1995) mukaan alueen moreeneille on tyypillistä niiden korkea silttipitoisuus, mutta pienehkö savipitoisuus. Kaivosalueen maanpeitteen paksuus on keskimäärin 2,3m paksu ja sen vaihteluväli on noin metristä noin 18 metriin (Luoma *et al.* 2016). Alueen moreeni on huonosti vettä läpäisevää (Luoma *et al.* 2016).

Tässä työssä tutkittu ylempi moreeninäyte S1 otettiin syvyydeltä 1.2-1.7 m. Se on hienoainesmoreenia ja edustaa alueelle yleistä Salpausselkävaiheen moreenia. Alempi moreeninäyte S2 syvyydeltä 3.5-4.0 m on puolestaan hiekkamoreenia.



Kuva 4. Siilinjärven kaivoksen alueelta otettujen näytteiden näytteenottoaika.

3.4 Pyhäsalmen kaivoksen avolouhos

Pyhäsalmen alue on maaperältään tasaista. Sitä verhoaa 1-5m paksu moreenipatja, joka on pääosin hienoainesmoreenia. Alueella on myös soita ja savikoita (Räisänen & Skinnari 2015). Tutkitut näytteet on otettu Pyhäsalmen kaivoksen Ruotasessa olevasta moreenileikkauksen moreeniaineksesta. Kaivosalueella esiintyy kahta eri moreenipatjaa, joista toinen on ns. Pyhäsalmmoreenia ja toinen ns. Ruotanen moreenia (Nenonen 1995, Saarelainen & Nenonen 1995).

Ruotanen moreeni on mineraaliainekseltaan karkeampaa kuin Pyhäsalmmoreeni. Se edustaa hiekkamoreenia. Ruotanen moreeni on tyypiltään lodgement /basal melt out moreenia. Ruotanen moreeni on tyypillisesti muodostunut syvemmälle kallion muodostamiin alankoihin, kuten Ruotasen avolouhoksen kulmaan. Sen päälle on kerrostunut ohuempi välikerros deformaatiomoreenia, jonka päälle on kerrostunut alueella yleinen Pyhäsalmmoreeni (Nenonen 1995). Välikerroksessa on sekaisin sekä alempana olevaa Ruotanen-moreenia, että päällä olevaa Pyhäsalmmoreenia. Ruotanen-moreenissa olevat klastit ovat mineralogialtaan pääosin graniittista, gneissistä, kvartsiittista materiaalia.

Pyhäsalmmoreeni on hienoainesmoreenia. Pyhäsalmmoreeni on väriltään harmaanruskeaa. Siinä on saviainesta 10-20%. Siinä on laminoitunutta materiaalia, sekä merkkejä roudan aiheuttamista muutoksista rakenteessa (Nenonen 1995). Pyhäsalmmoreenissa olevat klastit ovat pääosin mineralogialtaan samankaltaista materiaalia, kuin Ruotanen-moreenissakin.

Pyhäsalmen kaivosalueelta tutkittiin neljä moreeninäytettä, P1-P4 (Taulukko 1). Näyte P1 on otettu avolouhoksen kaakkoiskulmassa olevasta leikkauksesta noin metrin syvyydeltä. Moreeninäyte P1 edustaa todennäköisesti Pyhäsalmi-moreenin ja Ruotanen-moreenin välillä olevaa deformaatiomoreenipatjaa.

Moreeninäyte P2 on otettu alueen moreeniläjituskasasta (ks. Taulukko 1). Näyte on sekoitus alueella esiintyvistä moreeneista.

Näyte P4 on otettu 12 m syvyydestä avolouhoksen kaakkoiskulmasta. Näyte P4 edustaa tyypillistä Ruotanen-moreenia, jonka savipitoisuudeksi on arvioitu 3-5 %.

Näyte P3, on otettu noin kahden metrin syvyydeltä samasta leikkauksesta kuin näyte P4. Näyte edustaa Pyhäsalmi-moreenia. Siinä on reilusti hienoainesta, arvioltaan noin 15 – 17%.

3.5 Sodankylän Vuotson lentokentän leikkaus

Näyte V1 on otettu rapakallioleikkauksesta Sodankylän Vuotson lentokentältä ja se edustaa tyypillistä rapakalliomoreenia (Kuva 5). Näytteen ottosyvyys oli 0,7 metriä (Taulukko 1). Näyte M1 on otettu 15 km päästä näytteestä V1 ja myös näyte M1 edustaa näytteenotto paikalleen tyypillistä rapakalliomoreenia.

Vuotson alue on tyypillistä Keski-Lapin maisemaa. Alueen geologiaa on tutkittu jo kauan, johtuen maankamarasta löydetystä kullasta. Kallioperägeologialtaan alue kuuluu arkeisiin metavulkaniitteihin tai metasedimenttikiviin tai graniitteihin, granuliitteihin ja gneisseihin (Kujansuu ja Hyyppä 1995). Paikallinen kallioperä on vaikuttavampi tekijä alueen maaperä muodostumisissa (Johansson 1995). Näytteenotto paikan alueella kallio on rapautunut rapakallioksi. Rapakalliot ovat Keski-Lapille tyypillinen ominaisuus (Kujansuu ja Hyyppä 1995). Rapakalliota on eritoten niillä alueilla, jossa jäätikön aiheuttama eroosio on ollut heikompaa. Voimakkaammin erodoituneilla alueilla eroosivoimat ovat paljastaneet alla olevan terveen kallion. Näyte on erodoitunut paikallisesta rapakalliosta. Näytteen kiviaines on kulkeutunut hyvin vähän emäkalliosta.

Vuotson alueesta noin kahta kolmasosaa peittää pääosin tasainen moreenipatja, joka on paikoin vain metrin paksuinen (Kujansuu ja Hyyppä 1995). Alavilla alueilla ja kallionkohoumien välillä peitteen paksuus voi olla myös suuri, jatkuen syvimmillään kymmeneen metriin (Kujansuu ja Hyyppä 1995). Syynä alueen moreenivaltaisuuteen on se, että alueen rapakallioista on helposti rapautunut materiaalia jäätikön kulutuksen aiheuttamana. Alueen moreenit ovat joko ablaatiomoreenia tai pohjamoreenia. Ablatiomoreeni on hiekkaisempaa ja vähemmän hienoainesta sisältävää kuin pohjamoreeni. Sen kerrospaksuus on yleensä noin 0,3m-0,6m. Pohjamoreeni on hienompaa ja vähemmän kivistä.



Kuva 5. Vuotson lentokentän rapakallioleikkaus, josta näyte V1 on otettu 0,7 m maanpinnan alapuolelta (Kuva Keijo Nenonen).

3.6 Sodankylä Mäkärän tutkimuskaivannon moreenileikkaus

Sodankylän Mäkärän tutkimuskaivannon moreenileikkauksesta on otettu näyte M1 (Taulukko 1). Näyte on otettu 0,6 metrin syvyydeltä. Kallion pinta on näytteenottoaikalla todennäköisesti suhteellisen lähellä näytteenottosyvyyttä, joten näytteen moreeniaines edustaa Keski-Lapin tyypillistä rapakalliomoreenia.

Mäkärän alue sijaitsee Sodankylän kunnassa. Geologialtaan alue on samanlaista kuin Vuotson alue. Molemmilla alueilla esiintyy rapakallioita ja rapakalliomoreeneja (Väisänen 1988), joita näytteet M1 ja V1 edustavat. Mäkärän alueella on maanpeitteenä yleisesti tasainen muutaman metrin paksuinen pohjamoreeni

Geologian tutkimuskeskus on suorittanut tutkimuksia alueen moreeneihin sekä kallioperään, johtuen alueen mahdollisesta kulta- ja REE-alkuaine-esiintymistä (Hulkki ja Peltoniemi-Taivalkoski 2013). Lisäksi alueetta on tutkittu jo 1950-luvulta mahdollisten kulta- ja hematiittiesiintymien johdosta (Väisänen 1988). Kallioperältään alueella on rapautunutta graniittia.



Kuva 6. Mäkärän moreenileikkaus

4. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkielman näytteille suoritetaan kokeet, joissa määritetään niiden rakeisuus, tiivistyvyys, vedenläpäisevyys, kapillaarisuus, konsistenssirajat ja ominaispinta-ala. Nämä ominaisuudet arvioitiin tutkielman kannalta oleellisimmiksi. Myös eroosioherkkyyttä tutkittiin, mutta koska tutkielmassa käytettäväksi suunniteltu menetelmä ei ollut soveltuva moreeninäytteille, ei siitä saatu tuloksia. Lisäksi tutkielmassa suunniteltiin tutkittavaksi näytteiden huokoskokojakaumaa sekä niiden antoisuutta, mutta laitteiston puuttumisen ja ajankäyttöisten syiden vuoksi ne jäivät tutkimatta. Edellä mainituilla ominaisuuksilla eniten vaikutusta moreenin käyttäytymiseen, sekä moreenimaiden käytettävyyteen rakennusalustana tai

rakennusmateriaalina. Lisäksi muut maan käyttäytymisominaisuudet, kuten routivuus, voidaan päätellä suurilta osin tutkielmassa tehtävien kokeiden antamien tulosten perusteella.

Opinnäytetyön tutkimukset suoritettiin laboratoriossa. Moreenimaille voi tehdä myös *in situ*-tutkimuksia joistain kyseisistä ominaisuuksista. Ne antavat tulokset häiriintymättömille näytteille ja maalle, toisin kuin tutkielman kokeissa käytetyt laboratoriomenetelmät. *In situ*-tutkimukset ovat tarkoituksenmukaisia, eritoten silloin kun kyseessä on maa, jota käytetään rakennusalueena. *In situ*-tutkimuksia kutsutaan pohjatutkimuksiksi. Pohjatutkimuksilla selvitetään maan käyttäytymisen lisäksi kohteen olosuhteita esimerkiksi kallion pinnan korkeutta, pohjaveden syvyyttä ja ominaisuuksia, maaperän kerrosjärjestystä ja muita ominaisuuksia sekä muita ympäristön ominaisuuksia (RIL 1985). Tutkielmassa tutkittavista ominaisuuksista eritoten tiivistyvyys, vedenläpäisevyys ja kapillaarisuus eroavat luonnonolosuhteissa häiritylle näytteelle tehtyihin laboratoriokokeen antamiin tuloksiin. Näytteen häiriintyminen luo virhettä tutkimustuloksiin, esimerkiksi maanäytteiden lujuus ja muodonmuutosominaisuudet ovat häiriintymättömissä näytteissä suuremmat kuin häiriintyneissä (RIL 1985). Tämä johtuu siitä, että luonnonolosuhteisella maalla on erilaisia rakenneominaisuuksia ja epäjatkuvuksia, jotka vaikuttavat maan käyttäytymiseen. Laboratoriokokeeseen homogenisoidulla näytteellä ei ole havaittavissa samoja ominaisuuksia. Näiden ominaisuuksien luonnontilaisia suuruuksia varten käytetään erinäisiä menetelmiä, kuten kairauksia ja erinäisiä geofysikaalisia menetelmiä. Geofysikaaliset luotaukset ovat yksi yleisesti käytetty menetelmä maan rakenneominaisuuksien selvittämisessä käytetty menetelmä. Kairaukset ovat usein haastavia moreenimaille, johtuen siitä, että niissä on usein maa-aineksessa karkearakeisempia kiviä mukana (Tiehallinto, 2008)

Tutkielman näytteiden geotekniset ominaisuudet voidaan jaotella kahteen luokkaan, indeksiominaisuuksiksi sekä hydraulisiksi ominaisuuksiksi. Tutkielmassa tutkitut indeksiominaisuudet olivat rakeisuus, joka tutkittiin seulonnoilla sekä areometrillä; tiivistettävyyden, joka tutkittiin parannetulla proctor-kokeella; näytteiden konsistenssirajat; jotka tutkittiin kierityskokeella sekä kartiokokeella sekä ominaispinta-ala, joka tutkittiin typpiadsorptiomenetelmällä. Hydraulisista ominaisuuksista tutkittiin vedenläpäisevyys muuttuvapaine-menetelmällä, kapillaarisuus kapillaarimetrillä. Lisäksi osalle näytteistä

tehtiin eroosioherkkyyden kokeet pinhole-menetelmällä, mutta näytteet eivät olleet soveltuvia menetelmälle, johtuen niiden sisältämistä suuremmista rakeista.

Tutkielman näytteille ensimmäinen tehtävä käsittelyprosessi oli näytteiden homogenisointi sekä silmämääräinen tulkinta ja arvioiminen (Kuva 7). Näytteet homogenisoitiin niin, että niissä olevat kerrosrakenteet ja anisotropia poistettiin mahdollisimman tehokkaasti ja jotta näytteet antaisivat mahdollisimman todellisen kuvan näytemateriaalien ominaisuuksista. Näytteet kaadettiin säikeistä uunipelleille tasaisesti. Näytteissä olleet isommat rakeet poistettiin näytteistä. Seuraavaksi näytteet jaettiin lohkoihin. Niihin laitettiin tasaisesti niistä aiemmin poistetut karkeammat rakeet. Näistä lohkoista valittiin sattumanvaraisesti lohkot, joista otetuille osanäytteille suoritettiin tutkielman tutkimukset.



Kuva 7. Vuotson näytteen V1 homogenisointi.

Homogenisoinnin yhteydessä näytettä otettiin proctor-koetta varten syrjään tiiviisiin muoviämpäreihin noin 1-2 kg. Homogenisoituja näytteet säilytettiin tutkielman ajan ilmatiiviissä säilytysastioissa. Näytteitä täytyi kierrättää joissain testeissä, koska näytemateriaali ei olisi riittänyt, mikäli kaikkiin testeihin olisi otettu uudelleen koskematon näytettä. Tutkimukset, joihin käytettiin kierrätettyä näytemateriaalia,

olivat sellaisia, että niiden tuloksiin eivät vaikuttaneet se, että näytteille oli tehty muita kokeita tai että näytemateriaali ei ollut luonnontilaista. Näytteitä säilytettiin tutkimuksen ajan ympäristölaboratorion varastossa hyllyillä tasaisissa olosuhteissa.

Näytteet olivat väriltään vaihtelevan ruskeita ja raekooltaan eriäviä, mikä on moreeneille tyypillistä. Moreeneille tyypillisen harmaan ruskeita olivat tutkielman näytteistä Espoon Turvesolmun näytteet. Keski- ja Itä-Suomen moreeneja edustaneet Pyhäsalmen, Siilinjärven ja Iisalmen näytteet olivat väriltään enemmän puhtaan ruskeita. Keski-Lapin rapakalliomoreenit olivat huomattavan oranssinruskeita ja värjääviä. Näytteissä ei pääsääntöisesti ollut paljon roskaa tai eloperäistä ainesta mukana. Pyhäsalmen näytteisiin oli sekoittuneena jonkin verran juuria ja muuta orgaanista ainesta. Ne poistettiin näytteistä näytteitä käsiteltäessä. Osa näytteistä oli jonkin verran paakkuuntuneita. Tämä johtui niissä olevasta hienoaineksesta. Ilmatiiviissä astiassa säilöittäessä hienoaines paakkuuntuu kosteuden imeytyessä siihen. Paakut hajotettiin näytteitä käsiteltäessä. Näytteitä liuotettiin useissa tutkielman tutkimuksissa sekä käsittelyvaiheissa vähintään vuorokausi, jotta paakut liukenisivat, eivätkä aiheuttaisi epätarkkuutta tutkimustuloksiin. Paakkuja yritettiin hajottaa lähtökohtaisesti mieluummin silloin, kun näyte oli kostea, koska kuivana savipaakut ovat hyvin kovia ja niitä on vaikea hajottaa. Lisäksi kuivia paakkuja hajotettaessa näyte saattaa kärsiä ja näytteen rakenne saattaa muuttua.

4.2 Indeksiominaisuudet

Maa-aineksen mekaanisista eli indeksiominaisuuksista tutkielmassa selvitettiin näytteille rakeisuus, plastisuus ja konsistenssirajat, tiivistyvyys, ja ominaispinta-ala. Luonnontilassa olevan maan mekaaniseen käyttäytymiseen vaikuttaa useat ominaisuudet, kuten maan mineraalikoostumus ja niiden ominaisuudet, maalajitteiden rakeiden koko ja rakenne, maan vesipitoisuus ja veden sitoutuminen, maahan kohdistuvan kuormituksen tapa ja voima sekä maassa olevat jännitys ja painevoimat (RIL 1990). Tutkielmassa suoritettavat kokeet tehtiin häiriintyneille näytteille, joten kaikkia luonnontilaisen maan käyttäytymiseen vaikuttavia ominaisuuksia ei voitu mitata.

4.2.1 Rakeisuus

Rakeisuuden eli lajitepitoisuuden määrittäminen tehdään tutkielmassani näytteille SFS-standardin ”CEN ISO/TS 17892-4:2004 Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratorion kokeet. osa 4: rakeisuuden määrittäminen ja sen soveltaminen Suomessa.” mukaisilla kuiva- sekä pesuseulonnoilla ja hydrometrikokeilla. Muita yleisesti käytössä olevia menetelmiä rakeisuuden määrittämiselle on erinäiset laser- ja röntgenmenetelmät. Tutkielmassa käytettiin seuluntoja sekä hydrometrimenetelmää, koska niihin oli laitteisto käytetyssä laboratoriossa. Kokeiden laatu varmennettiin toistamalla kokeet sattumanvaraisesti valikoiduille näytteille.

Rakeisuudella on suuri merkitys maan käyttäytymiselle. Lajitepitoisuuksien määrittäminen onkin usein tärkein geotekninen ominaisuus maa- tai kiviaineksen ominaisuuksia määrittäessä. Tämä johtuu siitä, että lajitteiden määräsuhteilla on merkittävä vaikutus maan käyttäytymiseen, kuten esimerkiksi sen maan kantavuuteen, kaivettavuuteen, tiivistyvyyteen ja routivuuteen (RIL 1985&1990). Esimerkiksi maalajin suuri kivisyys tai lohkarakeisuus huonontaa sen kaivettavuutta ja maalajin huono lajittuneisuus lisää sen routivuusherkkyttä. Myös suuri hienoainepitoisuus vaikuttaa kaivettavuuteen ja routivuuteen negatiivisesti (RIL 1995). Rakeisuuden vaikutuksesta kertoo esimerkiksi se, että yleiseurooppalaisissa standardeissa ja eri infra-alan järjestöjen ohjeissa, kuten rakennusliiton MaaRYL tai InfraRYL kirjoissa on määritelty ohjerajat sille, minkä rakeisuuden omaavaa maa- tai kiviainesta eri kohteissa voi tai saa käyttää. Lajitteet sekä niiden raja-arvot on esitetty Taulukossa 2. Tutkielman lajitteiden perusteella annetut nimet perustuvat GEO-luokitukseen.

Taulukko 2. Tutkielmassa käytetty ISO:n mukainen maalajiluokitus

Hyvin karkea maa	Lohkareet		>630mm
	Kivet		>63...200mm
Karkea maa	Sora	Karkea sora	>20...63mm
		Keskisora	>6,3...20mm
		Hieno sora	>2,0...6,3mm
	Hiekka	Karkea hiekka	>0,63...2mm
		Keskiahiekka	>0,2...0,63mm
		Hieno hiekka	>0,063...0,2mm
Hieno maa	Siltti	Karkea siltti	>0,02...0,063mm
		Keskisiltti	>0,063...0,002mm
		Hieno siltti	>0,002...0,0063mm
	Savi		<0,002mm

Moreenimailla rakeisuuden määrittäminen on erityisen oleellista, koska moreeneissa raekoko vaihtelee ja niiden käyttö riippuu hyvin vahvasti siitä, miten niissä on lajitteita. Yleensä moreenien käytettävyyteen vaikuttaa merkittävimmin niiden lohkaraisuus ja kivisyys, sekä niiden hienoainespitoisuus. Paljon murskauskelpoisia karkeita aineksia sisältävää moreenia voidaan hyödyntää kohteissa, joihin kaivataan karkeata materiaalia. Näissä kohteissa moreenien tyypillisesti sisältävä hienoaines on haitallista. Hienoainesta ja savilajitetta saa aineksesta poistettua seulonnoilla ja vastaavilla aineksen parannuskeinoilla (Tielaitos 1996). Moreeneille tämä on käytännössä pakollista, koska moreeneissa on melkein aina ainakin jonkin verran hienoainesta ja savilajitetta (GTK 2005).

Moreeniksi nimetään ne lajittumattomat maalajit, joiden tiedetään syntyneen jäätikön muodostamana. Moreenit luokitellaan lajitteidensa mukaan hienoainesmoreeneiksi, hiekkamoreeneiksi ja soramoreeneiksi. GEO-luokituksen mukaan hienoainesmoreeneiksi tai silttimoreeneiksi luokitellaan näytteet, joiden hienoainespitoisuus on yhtä suuri tai suurempi kuin 50% ja sorapitoisuus alle 5%. Soramoreeneja ovat näytteet joiden hienoainespitoisuus on 5% tai alle sen ja jonka sorapitoisuus on yli 50% (SGY 2012). Moreeninäytteet jotka eivät mene kumpaakaan edellä mainittuun kategoriaan ovat hiekkamoreeneja (GTK 2005). Hiekkamoreeni on suomen yleisin maalaji. Moreenimaalajien lyhenne koostuu päälajitteesta (Si, Hk, Sr) sekä moreenin lyhenteestä Mr. Esimerkiksi hiekkamoreenin lyhenne on HkMr. GEO-luokituksen mukaisesti moreeni saa myös lisänimen, jos siinä on päälajitteen lisäksi

toista lajitetta yli 30%. Lisämääreiden lyhenteet kirjoitetaan pienellä. Esimerkiksi siis soraista hiekkamoreenia saa lyhenteen srHkMr.

4.2.1.1 Seulonnat

Homogenisoiduista näytteistä otettiin uunipellille rakeisuusmäärittämiseen tarvittavan määrän näytettä. Rakeisuusmäärittämiseen valikoitunutta osanäyttemäärää kuivatettiin 105 °C-asteisessa uunissa vuorokausi, jotta materiaali olisi kuivaa. Näytteiden kosteus aiheuttaa maaraakeiden paakkuuntumista ja toisiinsa takertumista, mikä huonontaa tutkimustuloksia. Näytteet punnittiin kosteana sekä kuivana, jotta niistä saataisiin laskettua niiden luontainen vesipitoisuus. Vesipitoisuus kuivasta näytteestä laskettiin Kaavalla 1. Vesipitoisuuden ilmaisemiseksi käytetään näytteen kuivavesipitoisuutta, eli näytteessä olevan veden määrän suhdetta kuivan näytteen massa.

$$w_d = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \quad \text{(Kaava 1),}$$

jossa w_d = vesipitoisuus kuivasta massasta, m_w = kostean näytteen massa ja m_d = Kuivan näytteen massa.

Joissain tapauksissa tarvitaan myös näytteen vesipitoisuutta kosteasta massasta w_w . Sitä tarvitaan esimerkiksi silloin kun kostean näytteen kuivamassaa lasketaan vesipitoisuutta käyttäen. Vesipitoisuus kosteasta massasta laskettiin kaavalla 2.

$$w_w = \frac{m_w - m_d}{m_w} * 100 \quad \text{(Kaava 2),}$$

jossa w_w = vesipitoisuus kosteasta massasta

Kuivatuista näytteistä otettiin areometrikokeita ja ominaispinta-alan määrittämiä varten erilliset osanäytteet. Areometrikoeita varten kuivasta näytteestä seulottiin noin 100g alle 2mm rakeista näytettä. Ominaispinta-alan määrittämistä näytteestä seulottiin noin 5g osanäyte hienoainesta (0,064mm). Osanäytteiden ottamisen jälkeen näytteet punnittiin uudelleen ja saatua tulosta käytettiin rakeisuuksia määrittäessä. Tämän kokonaisuuden avulla voidaan laskea punnituista näytteistä, se määrä näytettä, joka huuhtoutui pesuseulonnan aikana. Siitä saadaan piirrettävälle käyrälle hienoaineksen määrä. Tutkielman hienoainesta karkeammalle fraktiolle tehtiin rakeisuuden määrittäminen pesu- ja kuivaseulonnalla. Se on SFS-standardin CEN ISO/TS 17892-4:2004 Geotekninen

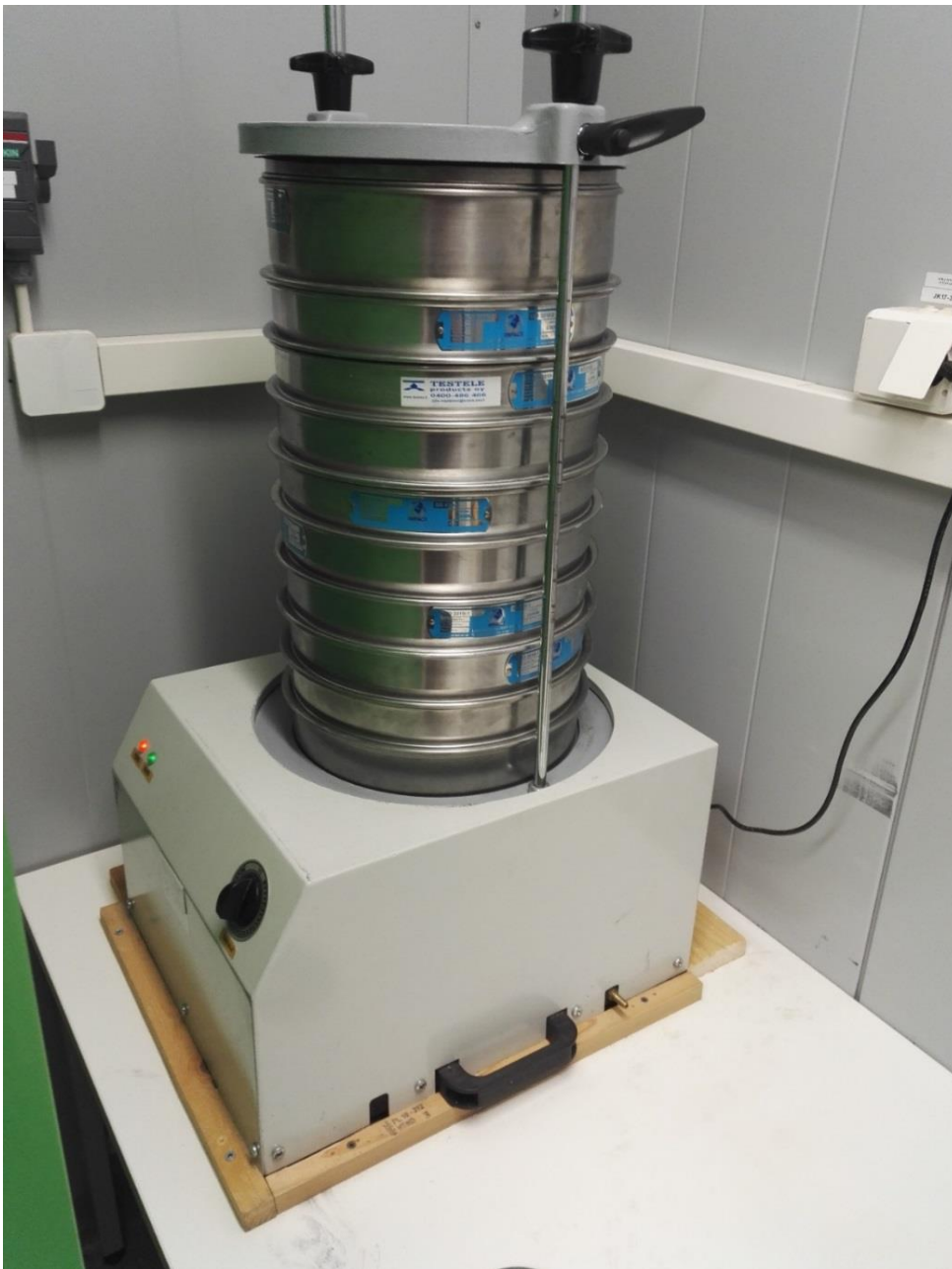
tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokokeet. osa 4: rakeisuuden määrittäminen ja sen soveltaminen Suomessa. mukainen menetelmä. Seulonnoilla määritetään hienoainesraekokoa karkeampien lajitteiden määräsuhdet, sekä hienoaineksen määrä. Pesuseulonnassa (Kuva 8.) näytettä pestään kahden täryttimen päällä olevan seulan avulla. Seuloista alemman tulee olla seulukooltaan 0,064, eli hienoaineslajitteen kokoinen. Näin näytteestä erotetaan hienoaines, jolloin se ei häiritse kuivaseulonnan tulosta. Näytettä huuhdellaan niin kauan, kunnes seulasta poistuva vesi on täysin kirkasta. Kaikilla näytteillä tämä ei onnistunut, koska osa näytteistä oli hyvin likaavia. Erityisesti tämä oli ongelmana Keski-Lapin rapakalliomoreeninäytteillä. Lisäksi kuiva näyte punnitaan ennen ja jälkeen pesuseulonnan, jolloin saadaan hienoaineksen määrä.



Kuva 8. Tutkimuksessa käytetty pesuseula.

Pesuseulottu näyte kuivataan ja kuivattu näyte seulotaan kuivaseulalla. Kuivaseulalta punnitaan näytteen seulasarjan seuloille jäävät massat. Seulonnassa häviää jonkin verran ainesta, joko näytteen tärisemisen yhteydessä ilmaa tai seuloille jääneen massan punnitsemisen yhteydessä. Seulonnoista saatavaa massaa voi verrata ennen seulontoja punnittuun massaan ja näin tarkastella kokeen onnistuvuutta. Tutkielmassa käytettiin seulasarjaa, johon kuuluivat seuraavat seulat suurimmasta seulakoosta pienimpään: 64

mm, 32 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,063 mm (Kuva 9). Kaksi suurirakoisinta seulaa eivät kuuluneet seurasarjaan joka oli täyrttimellä, vaan näytteissä olleet suuremmat rakeet käytettiin niistä läpi käsin. Tutkielman näytteistä suurin osa ei sisältänyt karkeimmille seuloille jäävää materiaalia. Seulontojen tulosten perusteella piirrettiin rakeisuuskäyrät, joissa x-akselilla on seulakoot ja y-akselilla läpäisyprosentti. Näihin tuloksiin yhdistettiin myöhemmin areometrikokeista saadut tulokset, ja näin saatiin hienoainesfraktion sisältävät rakeisuuskäyrät.



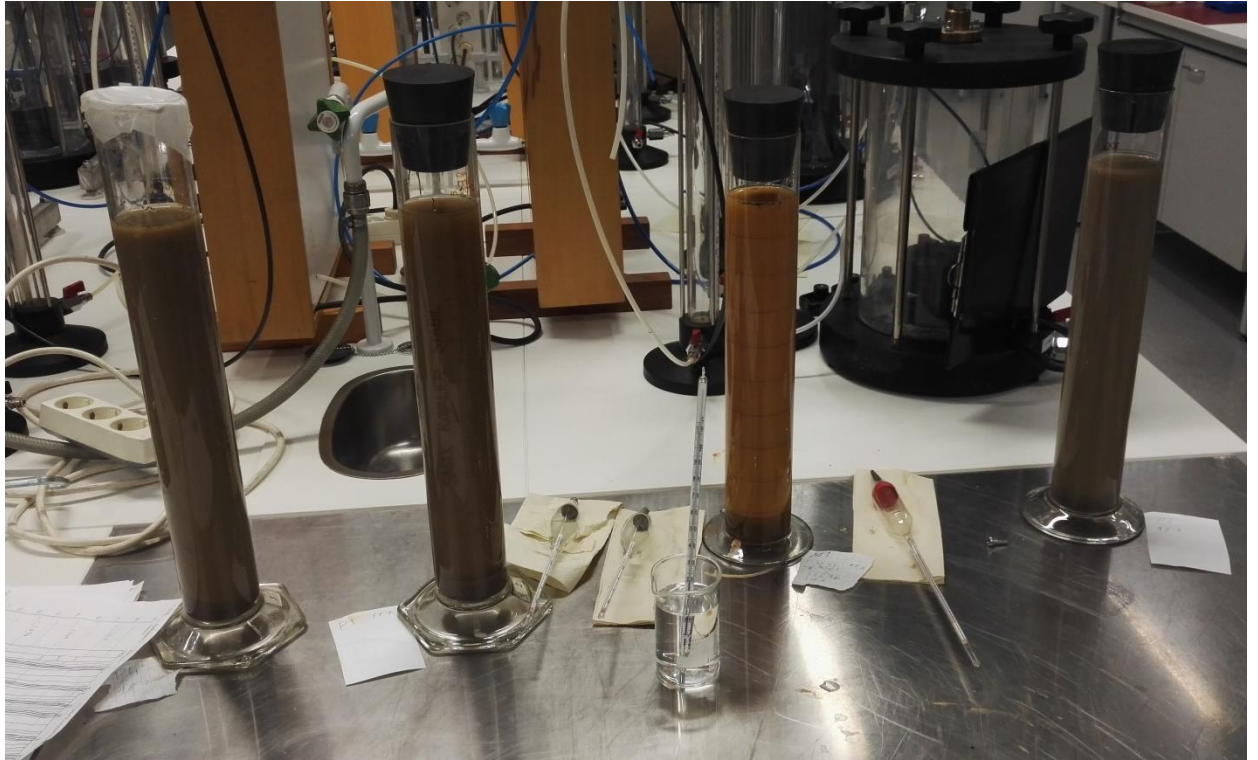
Kuva 9. Kuivaseulonnassa käytetty seulasarja.

4.2.1.2 Areometrikokeet

Tässä työssä tutkittujen moreeni- ja rapakallionäytteiden hienoainesfraktion määrittämiseen käytettiin hydrometriä. Koemenetelmä perustuu maa-aineksen raekokojen eroaviin laskeuma-aikoihin nesteessä. Kokeessa käytetään 1000 ml tilavuista astiaa sekä hydrometriä. Näytteiden hienoainesjakauman määrittämiseen käytettiin 100 g painoista näytettä, jonka raekoko oli $< 0,2$ mm. Kokeessa näytettä ravistetaan niin, että kaikki aines on suspensiossa. Hydrometri upotetaan näytteeseen tietyin määräajoin sekoituksen lopusta. Hydrometrin vajoamista saadaan hydrometrinomogrammien avulla määritettyä näytteen hienoaineksen suhde. Saaduista tuloksista saatu rakeisuuskäyrä yhdistetään pesuseulonnasta saatuun käyrään. Tutkielman tutkimusmenetelmä perustuu edellisissä kappaleissa mainittuun standardiin sekä päällystealan neuvottelukunnan PANK:n menetelmäohjeeseen 2013.

Areometrikokeessa näyte sekoitetaan nesteeseen, joka koostuu natriumporyfosfaatista ja tislatusista vedestä. Näyte sekoitetaan nesteeseen vuorokautta ennen varsinaista koetta. Näin varmistetaan, että näyte sekoittuu kunnolla ja että näytteessä olevat hienoainesta sisältävät paakut varmasti liukenevat nesteeseen. Tutkielman näytteiden kannalta tämä oli erityisen tärkeää, koska näytteillä oli havaittu olevan taipumus muodostaa kokkareita. Areometrikokeiden ajan näytteet suojattiin mittalaseihin asetettavan tulpan avulla (Kuva 10). Näytteille V1, P4 ja I1 tehtiin areometrikokeet kahteen kertaan. Toistot tehtiin siksi, että voitaisiin todeta tulosten olevan luotettavia. Näytteet uusintakokeisiin valikoitiin sattumanvaraisesti.

Areometrikokeet tulee tehdä tasaisen lämpötilaisessa ympäristössä. Näytteiden lämpötilaa monitoroitiin näytteiden läheisyydessä olevalla huoneenlämpöiseen veteen upotetulla lämpömittarilla. Näin areometrinesteiden kanssa samoissa olosuhteissa oleva mittari kertoi missä lämpötilassa näytteet olivat. Lämpötila tarkastettiin samalla kun näytteistä otettiin hydrometrin lukema. Lämpötila vaihteli tutkimusten aikana $20,6^{\circ}\text{C}$:sta $21,3^{\circ}\text{C}$:n. Tämän lämpötilan mukaan näytteille voi määrittää tulokset 21°C monogrammin mukaisesti.



Kuva 10. Hydrometrikokeita. Kuvassa näytteiden P4, P1, P4 ja P2 kokeet.

4.2.2 Konsistenssirajat, plastisuus- sekä juoksuraja

Maa-aineksen konsistenssilla tarkoitetaan sen muotoiltavuutta ja jäykkyyttä näytteen ollessa häirittyinä. Konsistenssirajojen määrittäminen on tärkeää maa-aineksen geoteknisiä ominaisuuksia määrittäessä, koska se vaikuttaa merkittävästi hienompirakeisten aineiden käyttäytymiseen, kun niille rakennetaan. Konsistenssirajojen määrittäminen on sitä tärkeämpää mitä hienorakeisempaa maa on, sillä maa ei käyttäydy plastisesti, ellei siinä ole merkittävästi hienoainesta.

Maa-aines käyttäytyy eri tavoin riippuen siitä, onko se kuivaa vai kosteaa. Kuiva maa-aines on kiinteää ja murtuu hauraasti paineen alla, kun taas kosteana sama maa käyttäytyy plastisesti. Kun maa saavuttaa juoksurajan sen käytös muuttuu niin että se muotoutuu ja ”juoksee” oman painonsa alla. Eri olomuotojen välisiä rajoja kutsutaan konsistenssirajoiksi ja Atterbergin rajoiksi. Yleisimmin käytetyt rajat ovat kutistumis-, plastisuus- ja juoksuraja. Kutistumisrajan saavuttaessaan maa-aines muuttuu kiinteästä puolikiinteäksi. Plastisuusrajan vesipitoisuuden saavutettuaan maa-aines muuttuu kiinteästä tai puolikiinteästä muovailtavaksi eli plastiseksi. Juoksurajan saavuttamisella

tarkoitetaan sitä, että maa-aines saavuttaa rajan missä se muuttuu plastisesta juoksevaksi (RIL 1985).

Konsistenssirajat määritetään maa-aineksesta kartio- ja kierityskokeilla tai Casagranden menetelmällä. Yleisesti kartiokoetta pidetään Casagranden menetelmää parempana (SFS 1997-2). Kartiokokeen antamat tulokset ovat Casagranden kokeesta saatavia tuloksia luotettavampia ja eritoten ne ovat luotettavampia silloin, kun tutkittavana olevan näytteen plastisuus on alhainen. Täten kartiokoe soveltuu moreeninäytteille, koska niissä on lähtökohtaisesti savia pienempi plastisuus.

4.2.2.1 Kartiokoe

Kartiokoe on SFS-standardin mukainen menetelmä konsistenssirajojen määrittämiselle, perustuen standardiin: Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratorionkokeet, Osa 12: Konsistenssirajojen määrittäminen. Atterbergin rajat ja sen soveltaminen Suomessa (2007). Kartiokokeen avulla määritetään näytteelle juoksuraja w_L . Juoksuraja on raja, jossa maa-aines muuttuu plastisesta juoksevaan tilaan. Kokeen nimi tulee kokeessa käytettävästä kartiokojeesta. Kojee koostuu tiputettavasta pudotuskartiosta, näyteastiasta, mitta-asteikosta ja säädettävästä tukivarresta.

Kokeessa käytettävät kartiot ovat joko massaltaan 60g ja kärkikulmaltaan 60° tai 80g ja 30° . Kartion tulee olla valmistettu kestävästä materiaalista, kuten ruostumattomasta teräksestä, ja sen tulee olla riittävän terävä. Laitteen mittataulusta tulee kyetä lukea painauman arvo 0,1mm tarkkuudella. Suomessa käytetään kartioita, joiden tunkeutuma näytteeseen tulee olla vähintään 4mm ja enintään 13mm. Tutkielmassa käytetty kartio oli 60g painava ja kokeen kuppi halkaisijaltaan 60mm. Kartiokojeen mitta-asteikko oli millin tarkkuudella, vaikka sen pitäisi olla standardin mukaan 0,1 mm tarkkuuteen kykenevä. Millimetriasteikkoa käyttämällä päästiin kuitenkin noin 0,25 mm tarkkuuteen, jota voi pitää jo riittävänä tarkkuutena.

Kartiokokeeseen käytettävästä näytteestä tulee seuloa pois yli 0,4 mm rakeet, jos kyseessä on sekalajitteinen näyte. Se tulee tehdä vedellä 2 mm ja 0,4 mm seuloja tai niitä mahdollisimman lähellä olevia seuloja käyttäen. Tässä tutkimuksessa käytettiin 2 mm ja 0,5 mm seuloja. Vetenä tulisi käyttää mahdollisimman näytteen luontaisen huokosveden kaltaista vettä, mutta koska näytteitä oli monta ja alueen pohjavesien saaminen olisi ollut epäkäytännöllistä, käytettiin seulonnoissa tislattua vettä. Kokeisiin

tarvitaan 200g hienoainesnäytettä tai 300g karkeammasta materiaalista seulottua näytettä. Seulottavan massan määrän arvioimiseen käytettiin näytteistä aiemmin tehtyjä rakeisuuskäyriä. Märkäseulotusta näytteestä tulee poistaa kirkas huuhteluvesi. Tutkimuksessa näytteiden annettiin asettua pesuvesineen, kunnes suspensiossa olleet hienommat partikkelit laskeutuisivat muun näytteen päälle ja vesi kirkastuisi. Tämä oli ongelma, koska osa näytteistä oli hyvin likaavia ja veden kirkastuminen olisi kestänyt kauan tai sitä ei laisinkaan tapahtunut. Eritoten Keski-Lapin rapakalliomoreeneilla ja Pyhäsalmen näytteillä tämä oli ongelma. Kun näytteistä oli poistettu kirkastunut vesi, ne laitettiin 50 °C lämpötilassa olleeseen uuniin haihtumaan. Niitä sekoitettiin samalla, jotta ne eivät pääsisi osittain kuivumaan. Menetelmässä on tärkeää, ettei näytteet pääse kuivumaan, koska näytteiden kiderakenne muuttuu kuivuessa ja aiheuttaa tuloksiin virhettä. Sopivaan vesipitoisuuden kuivuneille näytteille tehtiin kartiokoe kartiokojeella (Kuva 11).



Kuva 11. Tässä tutkimuksessa käytetty kartiokoje.

Näytteistä haihdutettiin kosteutta, kunnes ne olivat niin kuivia, että niiden vajoaman tuloksiksi tulisi joko noin 4 mm tai 13 mm vajoama. Näistä tuloksista näytteitä voisi sitten joko kuivata tai kostuttaa niin, että pudotusten välillä niiden vesipitoisuus kasvaisi tai laskisi tasaisesti. Tutkimuksen kannalta on parempi, jos joko näytettä kuivatetaan tasaisesti, tai jos siihen lisätään vettä tasaisesti. Tutkielman näytteille koe suoritettiin vähintään neljällä pudotuksella. Siilinjärven näytteelle S1 kartiokoe tehtiin useammalla toistolla, koska alkuperäisessä kokeessa tulokset eivät asettuneet hyvin kuvaajaan. Juoksurajan lisäksi näytteille määritettiin juoksevuusluku. Se määritetään kappaleen 3.2.2.2 Kaavan 4 mukaan.

4.2.2.2 Kierityskoe

Kierityskokeella määritetään näytteen plastisuusraja w_p . Plastisuusraja tarkoittaa rajaa, jossa maa ei ole enää muovailtavissa. Menetelmä perustuu samaan standardiin kuin kartiokoe. Kierityskokeessa tarvitaan lasinen sekoituslevy, kaksi veistä tai lastaa ja halkaisijaltaan 3 mm ja pituudeltaan 100 mm oleva tanko. Lasisen sekoituslevyn tulee olla naarmuton ja hyvässä kunnossa. Pinnan kunto vaikuttaa näytteen käyttäytymiseen. Kierityskokeeseen tarvitaan noin 20g näytettä.

Näytettä otetaan maakassasta noin 20 g ja se asetetaan sekoituslevylle. Näytettä tulee kuivata käsien välissä, kunnes se on niin plastista, että siitä saa muovailtua pallon. Palloa tulee pyöritellä käsien välissä, kunnes se on kuivunut niin että sen pinnalle alkaa ilmestyä pieniä halkeamia. Koenäyte tulee jakaa kahteen noin 10 g osanäytteeseen. Osanäytteet jaetaan neljään osaan ja niille tehdään kaikille määritykset. Näytteitä tulee pyöritellä tasaisiksi noin 6 mm paksuiksi rihmoiksi. Tämä rihma tulee pyörittää yhdellä kädellä sekoituslevyn päällä 3 mm paksuiseksi rihmaksi. Pyörittelyyn tulee käyttää noin 5-10 liikettä. Pyörittelyä tulee jatkaa, kunnes rihma katkeaa pituus ja poikkisuunnassa. Rihmat ovat plastisuusrajassa, kun ne murtuvat. Rajan saavuttaneet rihmat laitetaan erilliseen astiaan, joka suljetaan välittömästi. Edellä mainitut välivaiheet tulee toistaa toisillekin näytekappaleille. Niistä saadut rajan saavuttaneet rihmat laitetaan samaan astiaan. Plastisuusrajalla olevien näyterihmojen vesipitoisuus tulee määrittää. Näytteestä otetulle toiselle puoliskolle toistetaan myös koe ja senkin plastisuusrajalla olevien rihmojen vesipitoisuus tulee määrittää. Kahden osanäytteen vesipitoisuus saa poiketa vain 0,5%. Jos ero on suurempi, tulee koe uusia.

Plastisuus- (w_p) ja juoksurajojen (w_L) lisäksi konsistenssirajojen määrityksillä voidaan määrittää tutkimuskohteille plastisuus- (I_p), juoksevuus- (I_L) ja konsistenssiluvut (I_c) sekä sen aktiivisuus (I_A). Plastisuusluku on numeerinen ero tutkittavan maan plastisuusrajan ja sen juoksurajan kanssa. Se määritetään Kaavalla 3. Juoksevuusluku on maan vesipitoisuuden ja plastisuusrajan erotuksen suhde plastisuusindeksiin. Juoksevuusluvulla ilmennetään maan sensitiivisyyttä, eli sen herkkyyttä juoksettua. Se määritetään Kaavalla 4. Konsistenssiluvulla taas tarkoitetaan maan juoksurajan ja vesipitoisuuden erotuksen suhdetta plastisuusindeksiin. Myös konsistenssiluku on täysin häiriintyneen maan olotilan mittauksessa käytettävä parametri. Sen puolestaan määritetään Kaavalla 5.

$$I_p = w_L - w_p \quad \text{(Kaava 3),}$$

Plastisuusluvun määrittäminen, jossa I_p = plastisuusluku, w_L = Juoksevuusraja ja w_p = plastisuusraja.

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad \text{(Kaava 4),}$$

Juoksevuusluvun määrittäminen, jossa I_L = juoksevuusluku, w_L = Juoksevuusraja, w_p = plastisuusraja ja w = luonnon vesipitoisuus.

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_p} \quad \text{(Kaava 5),}$$

Konsistenssiluvun määrittäminen, jossa I_c = konsistenssiluku, w_L = Juoksevuusraja, w_p = plastisuusraja ja w = luonnon vesipitoisuus.

Tutkimuksen näytteet ovat moreenia, joten niille voi olla kieritysmenetelmällä haastavaa saada tuloksia niiden suhteellisen pienen hienoainepitoisuuden vuoksi. Kierityskokeella saa tuloksen vain, jos maa on plastisesti käyttäytyvää. Näin ollen maille, joissa on vähän hienoainesta, ei voi koetta suorittaa. Jos koetta ei voi näytteelle suorittaa, voidaan todeta, että näyte ei käyttäydy plastisesti. Kierityskokeet tehtiin näytteille kahdessa erässä, koska isossa erässä samanaikaisesti tehdessä saadaan tulokset pysymään yhdenmukaisina. Käytetty menetelmä on jossakin määrin tutkijasta riippuvainen.

4.2.3 Tiivistävyys

Maa-aineksen tiivistävyys on yksi sen oleellisista rakenneominaisuuksista. Tiiviydellä tarkoitetaan maa-aineksen kuivatilavuuspainon suhdetta sen maksimikuivatilavuuspainoon (RIL 1985). Tiiviyteen vaikuttaa maalajin rakeisuus, vesipitoisuus, tiivistymisenergia ja maa-aines patjan paksuus (RIL 1995). Tiivistävyys vaikuttaa maalajin kantavuuteen sekä muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksiin. Yleisesti ottaen maan tiivistävyys on sitä heikompaa, mitä hienorakeisempaa se on. Moreenit ovat keskimäärin muita maalajeja tiiviimpiä, johtuen niiden eri lajiteita sisältävästä luonteesta. Moreeneissa hienempi aines täyttää karkeampien rakeiden väliin jäävän tilan, tehden maasta tiiviimpää (RIL 1995, s. 68). Erityisen tiiviitä moreeneja ovat pohjamoreenit. Tämä johtuu siitä, että kun ne syntyivät jäätikön alle, jolloin jäätikön massan aiheuttama paine pakkasi ne hyvin tiiviiksi kerrostumiksi.

Maa-ainekselle määritetään aina tiiviys (D) mihin se pitää saada, kun sitä käytetään rakennuskohteessa. Määrittäminen perustuu siihen mitä kohteeseen tehtävä rakennus tai muu asia vaatii. Määritetyt tiiviysrajat saadaan laskennallisesti sekä laboratoriokokeilla perusteltua käyttökohteelle (RIL 1995).

Tiiviyttä määritetään laboratorio-olosuhteissa Suomessa proctor-kokeilla tai käyttämällä California Bearing Ratio-koetta (SFS 1997-2). Proctor-kokeita maan kuivatiheyden ja vesipitoisuuden välisen suhteen määrittämiseen tietyssä tiivistämismäärässä. California Bearing ratio – kokeella määritetään tiivistetyn ja häiriintymättömän näytteen California Bearing ratio-arvo. Kyseinen arvo saadaan prosenttiosuutena siitä tunkeumasta, jonka standardin poikkileikkauspinta-alainen sylinterinmuotoinen mäntä aiheuttaa maahan (SFS 1997-2). Maan tiivistymisen tutkimisessa laboratoriokokeet eivät sovellu kaikille mailla, vaan tietyntyyppisillä mailla on syytä harkita enemmän *in situ*-kokeiden käyttämistä laboratoriokokeiden sijaan tai ohella.

Kenttäolosuhteissa sitä mitataan koekuormituksilla (RIL 1985). Koekuormitukseen käytettäviä menetelmiä ovat muun muassa levykuormituskoe tai pudotuspainokoe. Tiiviyttä mitataan kentällä volymetrikokeella tai säteilyn vaimentumiseen perustuvalla laitteella.

4.2.3.1 Proctor-koe

Tässä tutkielmassa näytteiden tiivistyvyys tutkittiin parannetulla proctor-kokeella. Proctor-kokeet suoritettiin tutkielman kokeista järjestyksessä toisena, koska vedenläpäisevyyden mittaukseen tarvitaan maksimikuivatilavuuspainon γ'_{dmaks} ja optimivesipitoisuuden w'_{opt} arvot näytteistä. Nämä parametrit määritetään sullonnoista saatujen arvojen perusteella piirretystä tiivistyvyyskäyrästä.

Näytteen maa-aineksesta tulee ennen koetta poistaa ylisuuret rakeet. Kokeessa käytettävä maksimiraekoko riippuu proctor-muotin halkaisijasta, ollen tässä tapauksessa 16 mm. Poistetut rakeet punnittiin, koska niiden massaa tarvittiin tiivistyvyyskäyrän korjauskertoimien määrittämisessä. Muotti tulisi myös punnita aina ennen sullontaa. Tutkielmassa käytetty muotti oli halkaisijaltaan 10 cm ja korkeudeltaan 11,6 cm. Näin ollen sen tilavuus oli 911cm^3 . Muotin massa oli noin 4572 g. Se vaihteli mittauksissa aavistuksen johtuen muotin kosteudesta tai sen rakosiin jääneistä maa-ainesrakeista (Kuva 12). Kokeessa proctor-muottiin sullotaan maa-ainesta tasaisin välein viidessä

osassa. Massamäärien tulisi olla tasaisia, että kerrospaksuuksista tulisi yhtä suuria ja tuloksesta mahdollisimman hyvä. Muotissa olevan näytemäärän korkeus mitataan aina osasullonnan jälkeen, jotta tiedettäisiin, miten tasaisesti muottia täytetään. Viidennen sullonnan jälkeen muotin yläpinta tasataan ja muotin ulkopuolelta pyyhitään huolellisesti ylimääräiset maa-ainekset. Täysi muotti punnitaan 0,1 gramman tarkkuudella. Tämän jälkeen muotti tyhjennetään ja puhdistetaan. Näytteestä otetaan osanäyte vesipitoisuuden määrittystä varten. Näytteestä mitataan vesipitoisuus Kaavan 1 mukaan. Tutkielman kokeissa ensimmäinen vesipitoisuus oli yleensä näytteen luontainen säilytyspussissa ollut kosteus. Kokeet suoritettiin useamman vuorokauden kuluessa, johtuen siitä, että näytteitä piti usein kuivattaa sullontojen välillä halutun vesipitoisuuden saavuttamiseksi. Kuivaukset toteutettiin ilmakehän ilmakuivaamalla näytteitä.

Kun vesipitoisuus ja muotissa ollut massa tunnetaan, voidaan niistä laskea kostean näytteen irtotiheys ρ_w (Kaava 6) sekä tilavuuspaino γ_w (Kaava 7).

$$\rho = \frac{M_w}{V} \quad \text{(Kaava 6),}$$

jossa ρ = irtotiheys, M_w = näytteen massa kosteana ja V = muotin tilavuus

$$\gamma = \rho * 9,81 \quad \text{(Kaava 7),}$$

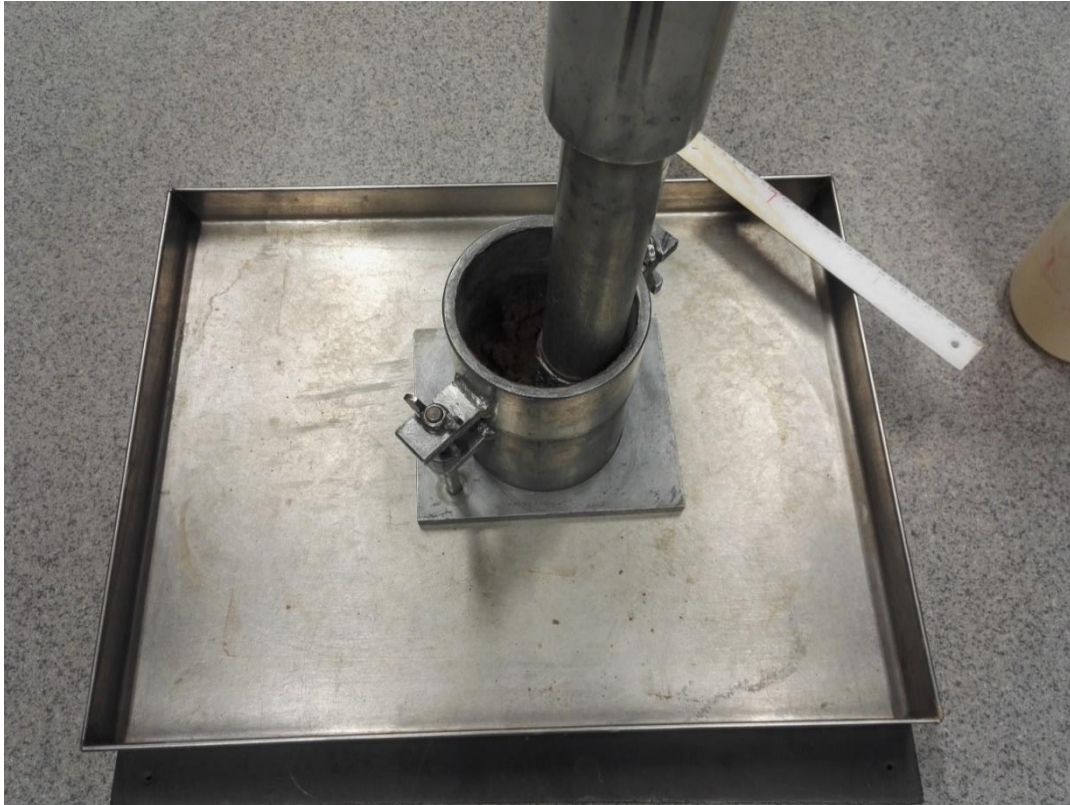
jossa γ = Tilavuuspaino ja 9,81g/cm² vakio ilmakehän paine.

Lisäksi tuloksista tulee laskea myös näytteen kuivairtitiheys ρ_d ja –tilavuuspaino γ_d . Ne lasketaan muuten samoja kaavoja käyttäen, mutta kostea massa M_w korvataan näytteen kuivamassalla. Näytteen massa kuivana saadaan laskettua vesipitoisuuden w_w avulla Kaavalla 8.

$$m_d = \frac{100-w_w}{100} * m_w \quad \text{(Kaava 8),}$$

jossa M_d = näytteen massa kuivana, w_w = vesipitoisuus kosteasta massasta, M_w = näytteen massa kosteana.

Sullonnat uusitaan, kunnes saadut tulokset ovat kattavat. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että tuloksia on riittävästi, jotta nähdään, että maksimitiivisyys saadaan vesipitoisuudella, joka jää tehtyjen testien väliin. Yleensä näytteille suoritettiin neljä sullontaa riittävän edustavan tuloksen varmistamiseksi.



Kuva 12. Tässä työssä käytetty proctor-muotti, johon näytettä tiivistetään vasaralla.

Näytteen maksimikuivatilavuuspaino γ_{dmaks} saadaan tiivistymiskäyrän huippuarvosta. Huippuarvon kohta x-akselilla on myös näytteen optimivesipitoisuus. Saatuihin maksimi-irtotilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden arvoihin tulee vielä laskea korjaus poistettujen suurten rakeiden johdosta. Se tehdään irtotilavuuspainon osalta Kaavalla 9. Maksimivesipitoisuuden osalta se lasketaan Kaavalla 10.

$$\gamma'_{dmaks} = \frac{100 \cdot \gamma_{dmaks} \cdot \gamma_s}{100 \cdot \gamma_s - k(\gamma_s - \gamma_{dmaks})} \quad \text{(Kaava 9),}$$

korjattu maksimi-kuivatilavuuspaino jossa γ'_{dmaks} = korjattu maksimi-kuivatilavuuspaino, γ_s = kiviaineksen kiintotilavuuspaino ja k = ylisuurten rakeiden osuus.

$$w'_{opt} = w_{opt} \cdot \left(1 - \frac{k}{100}\right) \quad \text{(Kaava 10),}$$

korjattu optimivesipitoisuus jossa w'_{opt} = korjattu optimivesipitoisuus

4.2.4 Huokoisuus, huokoisuusluku ja huokoskokojakauma

Maa-aineksen huokoisuudella tarkoitetaan maa-aineksessa olevan ei-kiinteästä materiaalista koostuneen tilan tilavuutta suhteutettuna näytteen kokonaistilavuuteen (RIL 1985). Huokoisuus saadaan laskettua kaavan mukaisesti. Huokoisuudella on huomattava merkitys useissa eri maan käyttäytymisissä. Esimerkiksi routivuus, kapillaarisuus ja antoisuus riippuvat suuresti maan huokoisuudesta. Maan huokoisuutta kuvataan huokosluvulla ja huokoskokojakaumalla. Huokosluku lasketaan Kaavan 11 mukaan:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{Kaava 11}),$$

huokoisuus, jossa n = huokoisuus, V_v = huokostilavuus ja V = kokonaistilavuus

Huokosluvulla tarkoitetaan huokoisuuden tilavuuden suhdetta näytteen kiinteän aineksen tilavuuteen. Huokosluku lasketaan Kaavan 12 mukaan.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{Kaava 12}),$$

huokosluku, jossa e = huokosluku, 1 ja V_s = maa-aineksen tilavuus

Maan huokoisuus kasvaa mitä suuremmat sen rakeet ovat. Maan lajittuneisuus pienentää huokoisuutta ja huokoskokojakaumaa. Hienoaineksisilla mailla on tyypillisesti pieni huokoisuus ja sorilla ja muilla karkeilla mailla suuri. Moreenimaiden huokoisuus riippuu niiden syntytavasta ja lajitesuhteesta. Mitä lajittuneempi ja karkeampi moreeni on kyseessä, sitä suurempi sen huokoisuus on (RIL 1985). Tässä tutkimuksessa näytteille ei kuitenkaan määritetty huokoslukua.

4.2.5 Ominaispinta-ala

Ominaispinta-ala tarkoittaa maa-aineksen rakeiden pinta-alaa massayksikköä kohden. Toisin sanoen se siis tarkoittaa sitä, miten laajalle alalle yhden massayksikön verran ainesta levittäytyy. Sen yksikkö on m^2/g . Ominaispinta-ala on erityisen merkittävä ominaisuus savien ja muiden hienoainesta sisältävien maiden ominaisuuksia tutkittaessa. Rakennuskohteissa käytettävien maiden ominaispinta-alaa parannetaan

usein lisäämällä siihen bentoniittia. Ominaispinta-alalla on suuri vaikutus maan routivuuteen ja kapillaarisuuteen sekä maaperän geokemiallisiin ominaisuuksiin. Mitä suurempi ominaispinta-ala maaperällä on, sitä helpommin se sitoo itseensä muun massa raskasmineraaleja.

Pääosin ominaispinta-ala on suurempaa hienorakeisimmilla maalajeilla. Moreenimaissa näin ollen ominaispinta-ala kasvaa sen mukaan mitä enemmän siinä on hienoainesta. Ominaispinta-alaa mitataan typpiadsorptiomenetelmällä, jota on selitetty kappaleessa 4.2.5.1.

Ominaispinta-alan suuruuteen vaikuttaa maan kiviaineksen mineraalikoostumus (Nieminen 1985). Muodoltaan litteillä kiillemäisillä savimineraaleilla on suurempi ominaispinta-ala kuin suurimmalla osalla muista mineraaleista. Tämän johdosta sillä on suuri merkitys, onko moreenin kiviaines peräisin enemmän suoraan kallioperästä kuluneesta aineksesta vai vanhemmista maaperämuodostumista uudelleen kerrostuneesta aineksesta. Niemisen mukaan rapautunutta materiaalia sisältävissä moreeneissa on yleensä suurempi ominaispinta-ala. Suomen moreenien hienoaineksen päämineraalit ovat kvartsi, plagioklaasi, amfibolit, kloriitti, illiitti ja vermikuliitti, sekä muut savimineraalit (Lintinen 1995). Näin ollen moreeniaineksen ollessa rapautunutta, on sen ominaispinta-ala oletettavasti suurempi (Lintinen 1995). Ominaispinta-alaa lisää rapautuneissa aineksissa mineraalirakeiden päälle muodostuneet metallisaostumat sekä humuspitoisuus (Nieminen 1985).

4.2.5.1 Typpiadsorptiomenetelmä

Typpiadsorptiomenetelmä on PANK ry:n hyväksymä ja Suomessa yleisesti käytetty menetelmä ominaispinta-alojen määrittämiseksi. Tutkimukset on suoritettu standardin PANK-2401 mukaisesti. PANK- 2401 menetelmä perustuu siihen, että näytteeseen adsorboidaan typpikaasua. Näytteen massa tulee ensin mitata tarkkaan riittävän tarkalla vaa'alla. Punnittu näyte laitetaan sitten mittalaitteeseen, jossa siihen adsorboidaan typpikaasua. Adsorboituva typpikaasu tekee näytteen päälle yhden molekyylin paksuisen monomolekylaarisen typpikerroksen. Kuluneen typpikaasun määrästä voi näin ollen laskea adsorptioon vaadittavan typpikaasun määrän. Kun typpimolekyylin peittämä pinta-ala tunnetaan, voidaan kuluneen typen määrän perusteella laskea näytteelle pinta-ala tutkittavana ollutta näytemäärää kohtaan.

Ominaispinta-alan määrittäminen tehtiin typpiadsorptiomenetelmällä Mitta Oy:n Oulun laboratoriossa. Näytteistä seulottiin ominaispinta-alan määrittämistä varten osanäytteet niiden rakeisuuden määrittämisen yhteydessä. Osanäytteisiin seulottiin noin 5g 0,063mm seulan läpäisevää ainesta.

4.3 Hydrauliset ominaisuudet

Näytteiden hydraulisista ominaisuuksista tutkielmassa määritetään vedenjohtavuus, kapillaariuus, vedenpidättyvyys ja eroosioherkkyys. Yksi tämän opinnäytetyön päättökysymyksistä liittyi Pyhäjärven kaivoksen metalli-ionien kapillaariseen nousuun malmista moreenipatjan läpi moreenipatjaa peittävään turpeeseen. Siksi eritoten kapillaarisuuden tutkiminen moreeninäytteistä oli oleellista.

4.3.1 Vedenläpäisevyys

Vedenjohtavuudella tarkoitetaan sitä, miten nopeasti x-määrä vettä kulkee maan poikkileikkauksen läpi. Sitä määritetään Darcyn lailla (Kaava 13).

$$v = ki \quad \text{(Kaava 13),}$$

Darcyn laki, jossa v = veden nopeus, k = vedenläpäisevyys, eli Darcyn vakio, cm/s, i = hydraulinen putous

Vedenjohtavuus on oleellista tuntea maa-aineksesta riippuen sen käyttökohteesta. Esimerkiksi jos tutkimuskohteena on pohjaveteen tai sen muodostumiseen liittyvä maa-aines, on vedenjohtavuus ehdottoman tärkeä parametri tuntea. Tämän takia esimerkiksi kaatopaikoille, teille ja vastaaville rakennuskohteille on tarkkaan määritetty pohjakerrosten materiaaleille vedenläpäisevyyden rajat (SFS 2013a & 2013b). Vedenjohtavuudella on myös suuri merkitys muihin hydraulisiin ominaisuuksiin, kuten kapillaarisuuteen ja routivuuteen.

Moreenimaiden vedenläpäisevyys riippuu vahvasti niiden materiaalin lajitepitoisuuksista ja syntytavasta. Moreenien vedenläpäisevyys voi näin ollen vaihdella huomattavasti. Yleensä se on luokiteltu olevan 1×10^{-5} - 1×10^{-9} m/s (Ronkainen 2012). Karkeammat soramoreenit ja epätiivimmät pintamoreenit ovat luonnonoloissa vettäläpäisevämpiä. Hienoainesmoreenit ja tiiviiksi pakkautuneet pohjamoreenit ovat

huonosti vettä läpäiseviä. Eritoten paljon savea sisältävät hienoainesmoreenit voivat olla vettä läpäisemättömiä. Saarelaisen ja Nenosen (1995) mukaan hienoainesmoreeneilla vedenläpäisevyys voi olla niinkin pientä kuin 10^{-11} m/s. Usein moreenimaiden vedenläpäisevyys on huomattavasti suurempi luonnossa laboratorionkokeisiin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että muodostumissa on sisällä usein erilaisia kerrosrakenteita, kuten lamelleja ja hiekkalinssejä. Myös niiden lajitesuhteet vaihtelevat, kun jaksot vaihtelee muodostuman sisällä. Esimerkiksi pääosin hiekkamoreeniksi luokitellun muodostuman sisällä voi olla lämpimämmässä vaiheessa syntynyt savisempi jakso, joka on vettä pitävä (Saarelainen & Nenonen 1995).

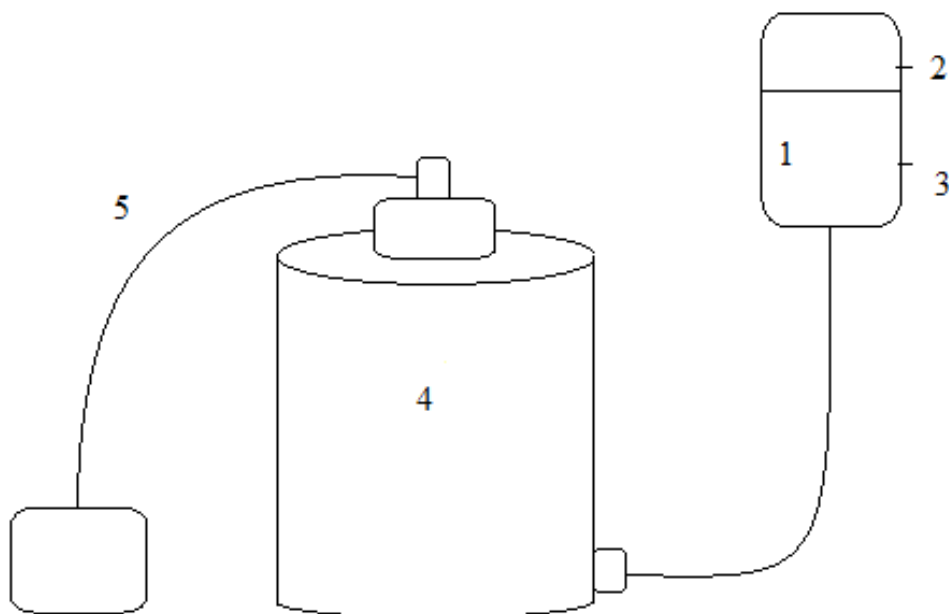
Vedenläpäisevyyttä mitataan maastossa *in situ*-olosuhteissa esimerkiksi koepumppauksilla ja infiltrometrillä (SFS 2013c). Laboratoriossa vedenjohtavuutta mitataan vakioputous- tai muuttuvaputouskokeella (RIL 1985). Vakioputouskoe soveltuu eritoten karkeampien kitkamaalajien tutkimiseen, kun taas muuttuvaputouskoe soveltuu paremmin huonosti vettä läpäisevien koheesiomaalajien tutkimiseen. Tutkielman kokeet suoritettiin standardin mukaisella muuttuvapainemenetelmällä.

4.3.1.1 Muuttuvapainemenetelmä

Tutkielmassa käytettäväksi vedenläpäisevyyden tutkimusmenetelmäksi valikoitui muuttuvapainemenetelmä. Tämä johtuu siitä, että se sopii parhaiten huonosti vettä läpäisevien maiden tutkimiseen. Koska näytteet ovat yleisesti hienoainesta sisältävää moreenia, oletuksena oli, että ne ovat keskimäärin huonosti vettä läpäiseviä. Vedenläpäisevyys tutkittiin tiivistyvyyden jälkeen, koska menetelmää varten tarvitaan tieto näytteiden optimitiiviydestä ja -vesipitoisuudesta. Menetelmä on Suomen standardoimisliiton SFS:n mukainen menetelmä. Menetelmä perustuu standardiin ”Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratorionkokeet. Osa 11: Vedenläpäisevyyden määrittäminen. Vakiopaine- ja muuttuvapainekoe ja sen soveltaminen Suomessa”. Menetelmä on standardin mukaan sopiva moreenimaille käytettäväksi. Näytteille suoritettiin vedenläpäisevyyskokeet 85% ja 92% tiiviyksissä. Näytteille tehtiin ensin 92% tiiviydessä vedenläpäisevyyden määrittäminen, jonka jälkeen niille toistettiin se 85% tiiviydessä. 92% tiiviyden lisäksi haluttiin, että näytteistä saataisiin selville luonnontilaa lähemmän 85% tiiviyden vedenläpäisevyys. 92 % tiiviyys valikoitui ensimmäiseksi tiiviydeksi, missä vedenläpäisevyyttä mitattiin, koska tiedettiin että näytteissä oli hienoainesta. Näin ollen oletettiin, että näytteiden vedenläpäisevyys tulisi

olemaan sängen pieni, jolloin kokeen tekeminen suuremmalla tiiviydellä olisi hyvin aikaa vievää tai mahdotonta. Tiiviydet (D) ovat laskettu proctor-kokeessa määritetyn optimitilavuuspainon perusteella. Näytteille ei tehty vedenläpäisevyyden määrittystä 92% suuremmalla tiiviydellä, koska jo 92% tiiviudessa osan näytteistä vedenläpäisevyys jäi niin pieneksi, että ne luokiteltaisiin lähes vettä läpäisemättömiksi. Lisäksi kokeen uusiminen suuremmalla tiiviydellä olisi vienyt hyvin paljon aikaa tai olisi mahdotonta.

Muuttuvapainemenetelmässä vesi läpäisee sylinterissä olevan näytteen, virraten siihen sitä korkeammalla olevasta byretistä. Byretin korkeus vaikuttaa veden korkeuspaineeseen. Mitä suurempi korkeuspaine, sitä nopeammin vesi läpäisee näytteen. Kaaviokuva muuttuvapainemenetelmästä on esitetty Kuvassa 13. Vedenläpäisevyys mitataan etäisyytenä aikamäärettä kohtaan, yleisesti metreinä sekunnissa. Yleensä moreeneilla se on $1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-10}$ m/s optimitiiviudessa (Ronkainen 2012). Mitä enemmän hienoainesta näytteissä on niin sitä pienempi vedenläpäisevyys on tyypillisesti. Lisäksi näytteiden lajitteiden tasalaatuisuus pienentää vedenläpäisevyyttä. Tämä johtuu siitä, että rakeet pääsevät pakkautumaan tiiviimmin, mikäli ne ovat pieniä ja tasalaatuisia.



Kuva 13. Muuttuvapainemenetelmä. 1. byretti, 2. Vedenkorkeuden alkukorkeus, 3. vedenkorkeuden loppukorkeus, 4. näytesilinteri ja 5. veden poistoletku.

Vedellä kyllästyneestä näytteestä annetaan veden mennä läpi, kunnes vähintään 30 millilitraa on läpäissyt näytteen. Koe tulee tehdä kolmesti, että tuloksista saadaan luotettavia. Näytteen vedenläpäisevyys saadaan laskemalla se Kaavan 14 mukaisesti. Kaava perustuu edellä mainittuun standardiin.

$$k(T) = \frac{l*a}{A*t} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{(Kaava 14),}$$

jossa $k(T)$ = vedenläpäisevyys tutkimuslämpötilassa, A = näytteen pinta-ala, t = tutkimusaika, l = näytteen korkeus, a = putken pinta-ala, h_1 = vedenkorkeus mittauksen alussa ja h_2 = vedenkorkeus mittauksen lopuksi.

Tutkimuksessa näytteet sullottiin 10 cm halkaisijaltaan olevaan sylinteriin, näytekorkeuden ollessa 10 cm. Sullomiseen tarvittava näytemäärä lasketaan Kaavalla 15. Sylinteri asetettiin muovisen aihion päälle. Kirkkaasta muovista tehdyn sylinterin reunan ja muoviahion pohjan välillä oli kuminen tiivistinrenkas. Aihion pohjalle asetettiin suodatin sekä kvartsisoraa, jonka päälle vielä sylinterin muotoon leikattu suodatinpaperi. Kvartsisoran funktio on ohjata vesi virtaamaan tasaisesti koko sylinterin alalta. Sylinterin päälle laitettiin painoja pitämään sitä paikallaan. Näin varmistettiin, ettei sylinteri liiku paikaltaan, ja ettei sylinterin ja muoviahjon välille pääse likaa tai kappaleita.

$$m = \frac{D*V}{9,81} * \left(\frac{w}{100} + 1\right) \quad \text{(Kaava 15),}$$

jossa, m = sullomiseen tarvittava näytemassa, D = käytettävä tiiviys, V = sylinterin tilavuus ja w = näytteen vesipitoisuus

Näytteestä poistettiin yli 10% sylinterin halkaisijasta olevat rakeet. Tämä tarkoitti siis yli 10 mm rakeita. Näytteet, joita vedenläpäisevyyden tutkimisessa käytettiin, on kierrätetty tiiviiden tutkimisessa. Tiivistyvyyden määrittämisellä proctor-kokeella ei ole vaikutuksia näytemateriaalin vedenläpäisevyyteen. Näytteeseen sullottava massa lisättiin sylinteriin neljässä yhtä suuressa erässä. Näytettä lisättäessä punnittiin näytemäärä huolella sen paikkaansa pitämisen varmistamiseksi. Jos näytteessä oli paakkuja, ne muserrettiin sylinteriin laitettaessa mahdollisimman tehokkaasti. Näytteen paakkuisuus parantaa näytteen vedenläpäisevyyttä, koska näytteen läpäisevä vesi voi kiertää tiiviimmät kohdat. Sylinteriin sullotun näytteen päälle laitettiin suodatinpaperi sekä kvartsisoraa. Näytteen päälle laitettiin vielä muovinen kansi, joka on samanlainen

kuin pohjalla oleva muovi. Kannessa on ”pilli” josta näytteen läpi kulkenut vesi poistui sylinteristä.



Kuva 14. Kuvassa vasemmalla on vedenläpäisevyyssylinteri, jossa on sullomisvaiheen paino päällä ja kuvassa oikealla on vedenläpäisevyyskokeen koejärjestelyt muuttuvapaineisella laitteistolla.

Valmiiseen sylinterissä olevaan näytteeseen laitettiin tunnetulla korkeuspaineella virtaamaan vesi. Vesi virtaa astiasta, jonka korkeutta voi säätää. Alkuun veden korkeuspaine pidettiin matalana ja sitä kohotettiin kokeen edetessä. Näytteeseen virtaavan veden määrää ja vauhtia tarkkailtiin kokeen aikana. Näin tiedetään, tarvitseeko painetta lisätä ja milloin näytteeseen on virrannut tarpeeksi vettä, niin että se on kokonaan kyllästynyt. Varsinainen mittaus aloitettiin, kun näyte on täysin kyllästynyt vedestä. Liian suuri korkeuspaine aiheuttaa sen, että näyte menettää muotonsa muotissa. Tällöin koe ei onnistu ja saatava vedenläpäisevyyden nopeus on liian suuri. Korkeuspaineen seuraaminen oli erityisen tärkeää vähemmän tiiviimmin sullotuilla näytteillä.

Määrittäessä käytettiin vesiastian 100 ml byrettiä sekä Kuvassa 14 oikealla olevassa kuvassa kaapin päällä näkyvää noin 500 ml vesiastiaa. Useampaa astiaa piti käyttää, koska samaan aikaan tehtiin useampaa koetta. 100 ml byretin pinta-ala oli noin 0,00001

m² ja isomman vesiastian noin 0,001 m². Veden painekorkeus vaihteli tutkimuksissa. Matalimmillaan se oli noin 10 cm ja korkeimmillaan noin 2,3 m.

Kokeessa vesi virtaa näytteen läpi alhaalta ylöspäin. Kokeessa mitataan aikaa kokeen aloitushetkestä siihen hetkeen, jolloin näytteen läpi on virrannut vähintään 30 ml vettä. Korkeammalla olevan astian vedenkorkeus tulee mitata kokeen alkaessa ja sen päättyessä. Näiden erotuksena saadaan näytteen läpi virranneen veden määrä. Ylemmän vesiastian tulee olla ilmatiivis siten, että siitä ei pääse vesi haihtumaan. Kokeiden tekeminen tutkielman näytteille vei hienoaineksisemmissä näytteissä useita vuorokausia. Niihin veden haihtuminen astiasta loisi todellista suuremman vedenläpäisevyytuloksen. Koe tulee toistaa näytteelle vähintään kolme kertaa tuloksen luotettavuuden takaamiseksi. Lopullinen vedenläpäisevyys lasketaan saatujen kokeiden tulosten keskiarvosta. Erityisen huomionarvoista koettaa suorittaessa on myös se, että astioiden välillä kulkevissa putkissa ei ole ilmakuplia. Jos niitä on niin ne estävät veden virtausta ja pienentävät vedenläpäisevyyttä.

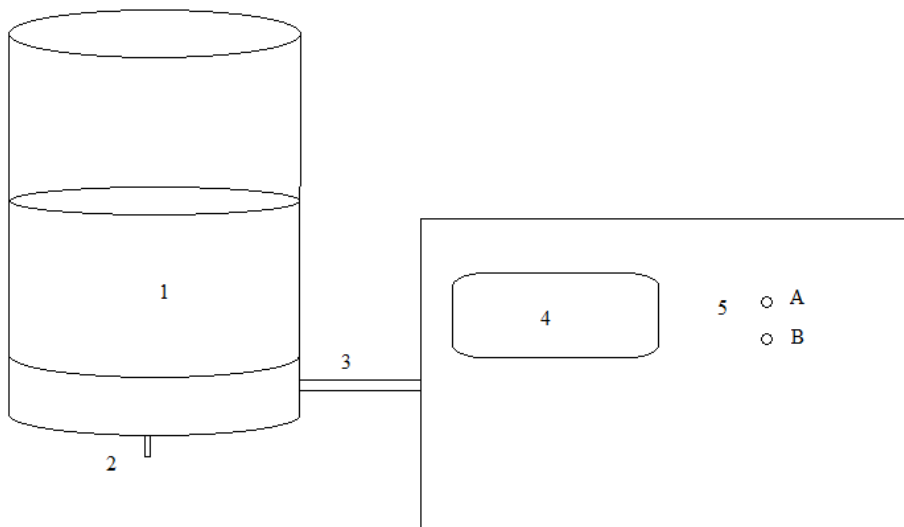
Kokeista saaduista tuloksista laskettiin vedenläpäisevyyden arvot esitetyn Kaavan 14 mukaan. Tulokset kirjattiin ylös ja laskettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen. Laboratorion lämpötila oli tutkimuksia tehdessä tasaisesti noin 21 °C. Tutkimuksen aikana vallinnutta lämpötilaa monitoroitiin vedenläpäisevyyden koejärjestelyjen vieressä olevalla, vesilasiin upotetulla lämpömittarilla.

4.3.2 Kapillaarisuus

Kapillaarisuudella tarkoitetaan maassa olevien kapillaaristen voimien aikaansaamaa veden kapillaarista nousua. Sen aiheuttaa veden pintajännitys sekä maa-aineksen rakeiden ja veden välillä oleva vetovoima. Näiden vaikutuksesta veden pinta nousee maa-aineksen huokosissa pohjaveden pinnan yläpuolelle. Kapillaarisuus on suurta eritoten karkearakeisemmissa ja huonosti lajittuneissa maalajeissa, koska niissä rakeiden väliin muodostuvat kapillaariputket ovat suurempia (RIL 1985). Kapillaarisuudella on merkittävä vaikutus maan routimisen kannalta. Suuri kapillaarisuus johtaa siihen, että maa saa nostettua enemmän vettä muodostuvaan routalinssiin. (Tielaitos 1996). Näytettä pidetään yleisesti routimattomana, jos sen kapillaarisuus on alle metrin (Tielaitos 1996).

4.3.2.1 Kapillaarimetri

Tutkielman kapillaarikorkeus tutkittiin kapillaarimetrin avulla (Kuvat 15 ja 16). Tutkielmassa käytetty kapillaarimetri on mallia SAHI. Kapillaarimetri perustuu näytesylinterissä olevan juoksevassa tilassa olevan näytteeseen tehtävään alipaineeseen. Näytteen keskelle muodostuu ilmapatsas, joka kasvaa alipainetta nostamalla. Alipainetta lisätään avaamalla laitteessa olevia venttiilejä. Vallalla oleva alipaine vastaa koneen näytöllä näkyvää korkeutta.



Kuva 15. Kaaviokuva kapillaarimetristä, jossa 1. näyte sylinterissä, 2. veden poistoputki, 3. alipaineenluova putki kiinnitettynä alipainelaitteeseen, 4. kapillaarikorkeuden ilmoittava näyttö, 5. venttiilien säätönapulat.

Näytteitä pidettiin tislatussa vedessä noin vuorokauden ennen kokeen suorittamista. Kuten areometrikokeessa, sekin tehtiin siksi, että näytteisiin muodostuvat hienoainespaakut saataisiin hajoamaan. Testissä näytteen vesipitoisuuden tulee olla sellainen, että näytteestä erottuu vähän irtainta vettä. Kokeissa huomattiin, että mitä enemmän vettä näytteessä on, niin sitä suurempi on maksimikorkeus, mihin kapillaarimetrillä pääsi. Käsiteltävästä näytteestä tuli poistaa yli 16 mm kokoiset rakeet, kapillaarimetrin sylinterin leveyden vuoksi. Kapillaarisuuden tutkimisessa käytettiin samoja osanäytteitä kuin vedenläpäisevyyden- ja tiivistyvyyden tutkimuksissa.

Kokeessa näytettä laitetaan sylinteriin siihen merkattuun rajaan saakka, joka oli noin 10 cm. Kokeessa laitteen luomaa painekorkeutta lisättiin 3 cm kerrallaan minuutin välein.

Tätä jatkettiin, kunnes saavutettiin näytteen kapillaarisuuden raja. Se ilmeni siitä, että näytteestä ei enää tippunut vettä vaan siitä alkoi päästä irti ilmaa. Koetta tehdessä piti olla tarkkana, ettei näytettä sylinteriin laittaessa siihen pääse ilmaa, joka purkautuisi näytteestä ennen kapillaarisuuden rajan saavuttamista. Ilmakuplien näytteeseen pääsyä ei voi täydellisesti estää. Tästä johtuen ilmakuplien purkautumista seurattaessa tulee olla huolellinen. Tutkimuksessa tehtiin ensin esikoe, jolla määritettiin kapillaarinousun suuruusluokka. Esikokeen jälkeen varsinaisissa kokeissa voi korkeutta nostaa alkuun 10 cm minuutin välein, kunnes saavutetaan korkeus metrin päässä esikokeessa saavutetusta korkeudesta. Tämän jälkeen korkeutta nostetaan 3 cm/min. Varsinaisia kokeita tehtiin, kunnes kokeista saadut tulokset ovat lähellä toisiaan, eikä ole syytä epäillä tulosten luotettavuutta. Epäily kokeen luotettavuudesta voi johtua esimerkiksi siitä, että johtuuko ilmakuplien purkautuminen näytteestä siihen päässeistä ilmakuplista vai kapillaarinousun rajan saavuttamisesta. Tuloksista saadaan luotettavampia kokeita toistamalla.



Kuva 16. Kapillaarimetri. Kapeampi sylinteri kuvassa vasemmalla ja tutkielmassa käytetty sylinteri kiinnitettynä kapillaarimetriin.

4.3.3 Eroosioherkkyys

Eroosioherkkydellä, eli maan dispergoituvuusominaisuuksilla tarkoitetaan maan taipumusta erodoitua.

Eroosioherkkyttä tutkiessa käytetään yleisimmin neljää menetelmää (SFS 1997-2) Pinhole-koetta, kaksoishydrometrikoeetta, murukoetta tai huokosvedessä olevien liuenneiden suolojen määrittystä. Pinhole-koe mallintaa halkeamaa pitkin virtaavan veden vaikutusta. Kaksoishydrometrikokeessa verrataan sitä, miten savirakeet sekoittuvat veteen ilman ulkopuolista mekaanista sekoittamista, siihen miten savi sekoittuu dispergoivaan liukseen, johon kohdistetaan mekaaninen sekoittaminen. Murukokeessa seurataan maamurujen sekoittumista laimeaan natriumhydroksidiliukseen. Huokosvedessä olevien suolojen määrittelyksellä saadaan selville natriumpitoisuuden ja kyllästysuutteessa olevan liuenneen kokonaissuolamäärän

välinen korrelaatio. Näillä metodeilla saadaan käsiteltyä eroosioherkkyyttä eri näkökulmista.

4.3.3.1 Pinhole-koe

Pinhole-koe on maa-aineksen dispergoitumisen ja erodoitumisen mittaamiseen käytetty tutkimusmenetelmä. Menetelmän nimi tulee millimetrin halkaisijaltaan olevasta neulanpiston kokoisesta reiästä, jonka läpi vesi virtaa. Menetelmä soveltuu lähinnä hienoainesnäytteille. Tutkielman näytteistä se suoritettiin näytteille P3 ja P2, koska ne olivat näytteistä hienoaineksisimmat. Kokeessa sylinterimäiseen muottiin sullottuun näytteeseen tehdään millimetrin kokoinen reikä, josta vettä ohjataan virtaamaan läpi. Näytteistä poistettiin yli 10 mm kokoiset rakeet ennen muottiin sullomista, koska ne haittaavat reiän muodostumista sekä näytteiden halkaisemista kokeen jälkeen. Kuvassa 17 on kuvattuna tutkielmassa käytetty koejärjestely.

Ennen veden päästämistä näytteeseen tehdyn reiän läpi, tulee näytteen kyllästyä vedestä vuorokauden ajan. Näin varmistetaan, että kokeessa vesi kulkee näytteestä vain reiän läpi. Astian, josta vesi virtaa, korkeus ja läpimitta tunnetaan, jolloin sen korkeuspaine tunnetaan. Siitä voidaan laskea painekorkeus, kuten kappaleen 4.3.1.1 muuttuvapainemenetelmässä. Pinhole-kokeessa hydraulinen gradientti pysyy vakiona, toisin kuin tutkielman vedenläpäisevyyden tutkimuksissa. Näytteen dispergoitumista mitataan seuraamalla läpivirranneen veden väriä ja määrää. Mitä enemmän näyte dispergoituu, sitä enemmän veteen sekoittuu maa-ainesta ja vesi värjäytyy. Koe toistetaan viidesti eri painekorkeuksilla. Painekorkeudet olivat 50 mm, 180 mm, 380 mm ja 1020 mm, joista aloituskorkeudessa koe suoritettiin kahdesti. Kokeissa veden annettiin virrata aina viiden minuutin ajan näytteen läpi.



Kuva 17. Pinhole-kokeen koelaitteet.

Kokeen jälkeen näyte otettiin muotista varovaisesti ulos ja halkaistiin. Halkaistusta näytteestä katsottiin, kuinka paljon näytteeseen tehty reikä umpeutui tai hajosi kokeen myötä. Dispergoitumisloukkia on viisi: ei dispergoituva (ND2), hitaasti dispergoituva (D2), hieman dispergoituva (ND3), kohtuullisesti dispergoituva (ND4) ja dispergoituva (D1 & D2). Dispergoitumisloukat määrittyy näytteen läpi virranneen veden määrän ja värin mukaan.

5. TULOKSET

5.1 Näytteiden rakeisuus

Seulonnoista sekä areometrikokeista laaditut rakeisuuskäyrät on esitetty Liitteessä 1. Näytteiden d_{50} määrittelyn mukaiset nimet ovat myös kokoomataulukossa. Näytteet ovat pääosin hiekkamoreeneja. Näytteen tulosten keskiarvosta laadittu käyrä on hiekkamoreenia, jossa on 7,8% savilajitetta, 19,7% hienoainesta ja 14,9% soraa. Myös tutkielman tuloksista tehty keskiarvokäyrä on esitetty Liitteessä 1. Tutkielman näytteistä rakeisuudeltaan karkein oli Espoon Turvesolmun ylempää moreenipatjaa edustanut näyte E1. Näytteessä E1 on soralajitetta 29,8%, eli se on lähes soraista hiekkamoreenia. Näytteissä oli paljon näytteitä, joissa oli sangen paljon hienoainesta. Ne eivät saaneet lisänimitystä silttinen, koska niissä oli myös savea usein niin, että siltin painoprosentin osuus jäi alle GEO-luokituksen 30% rajan. Savilajitetta näytteissä oli pääosin 5%-10%. Pyhäsalmen Pyhäsalmoreenia edustaneen näytteen P3 16,5% savipitoisuus oli ainoa tutkielman näytteistä, joka oli selvästi yli 10%. Se näyte oli tutkielman näytteistä muutenkin hienorakeisin ja ainoa, joka on silttimoreenia.

Lähtötietoihin verrattuna Espoon näyte E2 oli selvästi karkeampi. Lähtötiedoissa mainittiin sen edustavan Hirvas *et al.* (1995) Vuosaaren moreenileikkauksesta tunnistettua moreenikerrosta. Vuosaaren vastaava moreenikerros sisältää hienoainesta 48%-58%, kun taas tutkielman näyte vastaavasta kerroksesta (E2) sisältää hienoainesta noin 30%. Savilajitetta sen sijaan on saman verran; tämän tutkielman näytteessä 10,4% ja Hirvas *et al.* (1995) tutkimuksessa 9,7%-12,6%. Samassa julkaisussa ei ollut ylemmästä moreenipatjasta, jota tutkielmassa edustaa näyte E1, tarkkoja lajitemääriä.

Näytteiden kivisyydestä tai lohkaraisuudesta ei ole tarkkaa tietoa. Näytteissä ei ollut mukana kiviä luettavia kappaleita, mutta Espoon, Siilinjärven ja Pyhäsalmen näytteissä oli mukana soralajitteen karkeampaan päähän sijoittuvia rakeita. Espoon Turvesolmusta olevassa kuvassa (Kuva 2) näkyy selvästi, että moreenikerrostumat josta näytteet E1 ja E2 ovat peräisin sisältää kiviä. Kuvan 2 perusteella kuitenkin on mahdotonta arvioida kivisyydelle tarkempaa määrää.

Liitteen 1 rakeisuustuloksissa on laskettuna myös näytteiden raekokosuhte (d_{60}/d_{10}). Raekokosuhte määritetään jakamalla rakeisuuskäyrän 60% kohtaa vastaava raekoko 10% kohtaa vastaavalla raekoolla. Näytteet ovat lajittuneita, jos raekokosuhte on alle 15. Tutkielman näytteet olivat kaikki selvästi lajittumattomia, mikä on moreeninäytteille oletettavaa.

Uusituista areometreista saadut arvot poikkesivat ensimmäisistä kokeista pääosin vähän. Suurimmillaan poikkeamat olivat parin prosentin luokkaa, mutta pääosin alle prosentin per raekoko. Usein areometrin ja seulontojen tulosten perusteella piirrettyjä käyriä yhdistäessä tulee tuloksia korjailla, jotta saatavasta käyrästä tulisi johdonmukainen. Tutkielman tuloksista saadut käyrät olivat kuitenkin johdonmukaisia ilman korjauksiakin. Tämä kertoo siitä, että sekä seulontojen, että areometrikokeiden tulokset ovat todennäköisesti hyviä ja vastaavat todellisuutta.

Rakeisuuksien määrittelysten yhteydessä näytteistä määritettiin niiden luontainen vesipitoisuus. Tutkielmassa saadut näytteiden vesipitoisuuden arvot ovat oletettavasti luontaisia arvoja hieman matalammat. Tämä johtuu siitä, että näytteistä lienee haihtunut hieman kosteutta sekä säilöittäessä, että näytteiden käsittelyssä. Osassa näytempusseista oli myös reikiä, jotka oli paikattu. Lisäksi näytettä ottaessa vallinneet sääolot vaikuttavat vesipitoisuuksiin. Pyhäsalmen näytteelle P1 ei saatu luonnontilaisen vesipitoisuuden arvoa. Siitä oli kuitenkin otettu osanäyte eri tutkimusta varten, jossa sen vesipitoisuudeksi oli saatu 9%. Tutkielman myöhemmässä vaiheessa pitempään säilytyksessä olleelle näytteelle tehtiin vesipitoisuuden määrittely ja siinä tulokseksi saatiin myös 9%. Vesipitoisuusarvot on esitetty Taulukossa 3 ja Liitteen 1- rakeisuustuloksissa.

Taulukko 3. Näytteiden luontaiset vesipitoisuudet

Näytteiden luontaiset vesipitoisuudet	
E1	5,4 %
E2	5,8 %
I1	11,7 %
M1	17,5 %
P1	9,0 %
P2	6,8 %
P3	11,8 %
P4	5,4 %
S1	6,0 %
S2	7,2 %
V1	11,4 %

Tuloksista on nähtävissä, että tasarakeisilla ja hienorakeisilla näytteillä on suurempi vesipitoisuus. Myös Keski-Lapin rapakalliomoreeneilla on huomattavissa selvästi suuremmat vesipitoisuusarvot. Maan vesipitoisuus vaikuttaa suuresti maan

käyttäytymiseen, kuten tiivistyvyyteen tai vedenläpäisevyyteen. Vesipitoisuuden määrään vaikuttaa näytteen rakeisuuden lisäksi sen humuspitoisuus (Ronkainen 2012). Myös näytteen mineralogia vaikuttaa vesipitoisuuteen, jos näyte on rapautunut ja se sisältää savimineraaleja, niin sen vesipitoisuus kasvaa, kun isompi osa vedestä on adsorptiovetenä (Nieminen 1985). Myös konsistenssiominaisuudet kasvavat vesipitoisuuden kasvaessa (Ronkainen 2012).

5.2 Tiivistyvyys

Tutkielman näytteiden maksimikuivatilavuuspaino oli väliltä 19,32 kN/m³-22,63 kN/m³ ja optimivesipitoisuudet olivat väliltä 4,77%-12,32%. Näytteiden keskimaksimikuivatilavuuspainoksi saatiin 21,2 kN/m³ ja keskioptimivesipitoisuudeksi saatiin 6,97%. Tulokset on koottu kappaleen lopusta löytyvään kokoomataulukkoon (Taulukko 7). Näytteistä saadut tiivistyvyyssäyrät on esitetty liitteenä 2. Näytteiden maksimikuivatilavuuden ja optimivesipitoisuuden arvot ovat saatu käyrien huippukohdista laskemalla. Suurin kuivatilavuuspainon arvo oli Espoon leikkauksen alemmaa moreenia edustaneella näytteellä, E2. Tuloksissa ei ollut suuria heittoja ja ne edustavatkin moreenille tyypillisiä arvoja. Näytteet, joissa on mukana enemmän hienoainesta, ovat tutkielman tulosten mukaan hieman korkeamman kuivatilavuuspainon omaavia. Esimerkiksi Espoon näytteistä hienoaineksisemmalla E2:lla on suurempi maksimikuivatilavuuspaino, kuin karkeammalla E1:llä. Sama on todettavissa myös Siilinjärven näytteissä, hienoaineksisemmän S1 maksimikuivatilavuuspaino on suurempi kuin vähemmän hienoaineksisen näytteen S2. Tämä johtuu siitä, että tiivistettäessä hienoainesrakeet täyttävät karkeampien rakeiden välit, tehden maasta tiiviimpää.

Pienin maksimikuivatilavuuspainon arvo oli näytteellä M1. Tämä johtuu oletettavasti siitä, että se sisälsi tutkielman näytteistä vähiten karkean hiekan ja soralajitekoon rakeita. Niiden puutteessa tiivistyvyys jää pienemmäksi.

Tuloksiin vaikuttaa mahdollisesti myös se, että näytteistä tuli poistaa yli 16 mm halkaisijaltaan olevat rakeet. Niiden puuttuminen on huomioitu laskennallisesti, laskemalla tuloksiin korjauskerroin poistetun maa-aineksen määrän perusteella (ks. Kaavat 9 ja 10). Maksimikuivatilavuuspainolle korjauskerroin lasketaan Kaavalla 9.

Poistettujen rakeiden irtotiheytenä on käytetty $2,65 \text{ g/cm}^3$. Se on yleisesti käytetty kiviaineksen kiintotilavuuspaino. Optimivesipitoisuudelle lasketaan korjauskertoimen Kaavan 10 avulla.

5.3 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyyden määrittäminen suoritettiin näytteille kahdessa tiiviydessä, D(92%) ja D(85%) (Taulukko 4). Saadut tutkimustulokset ovat sangen pieniä, kuten oli odotettavissa. Eritoten näytteissä, joissa oli paljon hienoainesta, jäi vedenläpäisevyys hyvin pieneksi. Keskiarvo tutkielman näytteiden vesipitoisuudelle oli 92%-tiiviydessä $4,17\text{E-}08 \text{ m/s}$ sekä 85%-tiiviydessä $2,42\text{E-}07 \text{ m/s}$. 85%-tiiviyden keskiarvoa laskettaessa ei otettu huomioon Siilijärven näytteen S1 arvoa, koska sille ei saatu tehtyä koetta tässä tiiviydessä onnistuneesti. Suurimmat vedenläpäisevyydet 92% tiiviydessä olivat Espoon näytteellä E1 sekä Iisalmen näytteellä I1. Näissä näytteissä on tutkielman näytteistä vähiten savilajitetta. Se selittää suurimman vedenläpäisevyyden. Tiiviyssasteessa 85% näytteiden vedenläpäisevyydet olivat keskimäärin noin 100-kertaisia verrattuna 92% tiiviyteen.

Taulukko 4. Vedenläpäisevyyden arvot (E = kymmenkantaluvin eksponentti). Taulukossa osakokeiden arvot sekä niistä lasketut keskiarvot. Tulokset ovat yksikössä m/s

Näyte	85% I	85% II	85% III	85% ka	92% I	92% II	92% III	92% ka
Espoo E1	2,46E-07	1,75E-07	1,78E-07	1,99E-07	1,23E-07	1,24E-07	1,16E-07	1,21E-07
Espoo E2	5,64E-07	5,37E-07	5,56E-07	5,52E-07	3,14E-09	5,53E-09	5,70E-09	4,79E-09
Iisalmi I1	1,94E-07	1,76E-07	1,76E-07	3,67E-08	3,49E-08	3,85E-08	ei tulosta	1,82E-07
Mäkärä M1*	3,79E-07	3,44E-07	2,15E-07	3,12E-07	7,70E-09	1,12E-08	5,78E-09	8,23E-09
Pyhäjärvi P1	2,66E-08	1,36E-07	2,29E-08	6,19E-08	3,14E-09	5,53E-09	5,43E-09	4,70E-09
Pyhäjärvi P2	6,43E-08	1,21E-07	2,31E-07	1,39E-07	2,69E-08	2,15E-08	3,97E-08	2,94E-08
Pyhäjärvi P3	1,76E-09	1,82E-09	ei tulosta	1,79E-09	5,10E-10	5,47E-10	5,39E-10	5,32E-10
Pyhäjärvi P4	3,44E-08	4,52E-08	5,24E-08	4,40E-08	1,14E-09	1,10E-09	ei tulosta	1,12E-09
Siilinjärvi S1	2,73E-05	2,76E-05	2,82E-05	2,77E-05	6,86E-09	5,74E-09	6,56E-09	6,39E-09
Siilinjärvi S2	1,07E-06	5,01E-07	4,22E-07	6,64E-07	1,55E-08	2,29E-08	2,45E-08	2,10E-08
Vuotso V1	7,12E-07	2,64E-07	2,43E-07	4,07E-07	9,44E-08	7,30E-08	7,18E-08	7,97E-08

Näytteelle S1 ei saatu tehtyä koetta 85% tiiviydessä. Se ei pysynyt kasassa, kun siihen laitettiin virtaamaan vettä. Tämä johtunee siitä, että se on tutkielman näytteistä vähiten

lajittunut. Siinä on paljon soralajitetta sekä silttiä, mutta ei niin paljoa hiekkaa. Tämän takia sen rakenne ei pysynyt kasassa pienemmässä tiiviydessä.

Näytteelle M1 tehtiin vedenläpäisevyyden kokeet 85% tiiviydessä kuudesti. Tämä johtui siitä, että oli syytä epäillä, että näytettä sullottaessa sylinteriin olisi tullut jokin virhe ja tulokset näin vääristyneitä. Uusituista kokeista kävi selväksi, ettei virhettä ollut tapahtunut.

Joillekin näytteille uusittiin osakokeita kolmesti. Tämä johtui siitä, että joko niissä kokeissa tapahtui jokin virhe, jonka takia tulos ei ollut luotettava, tai sitten ne epäonnistuivat jostain muusta syystä. Ensimmäisen kahden kokeen tulokset olivat näissä kokeissa kuitenkin riittävän saman suuntaiset, joten niiden perusteella keskiarvot voitiin määrittää.

5.4 Kapillaarisuudet

Tutkielman näytteiden kapillaarisuudet olivat suuria, kuten pääosin hiekkamoreeneille oli oletettavaa (Taulukot 5 ja 7). Suurin kapillaarikorkeus, mihin tutkielmassa käytetty kapillaarimetri yltää on noin 6-10 m. Tutkittujen näytteiden suurin kapillaarinousu oli 7,66 m. Tästä johtuen tutkimuksessa käytetty kapillaarimetri ei välttämättä sovellu täysin moreenimaille, joiden kapillaarinousu voi olla kymmeniäkin metrejä. Tutkielman näytteistä Espoon näytteille, Keski-Lapin rapakalliomoreeninäytteille, sekä Siilijärven näytteelle S1 sai kapillaarimetrillä tuloksen. Lopuille näytteille pystyttiin määrittämään vain kapillaarisuuden minimiarvo. Saatuihin kapillaarinousun tuloksiin vaikuttaa myös se, että näytteistä piti poistaa yli 10 mm rakeet. Karkeammilla rakeilla olisi todennäköisesti kapillaarisuutta laskeva vaikutus tuloksiin. Eritoten Siilinjärven näytteissä olisi todennäköisesti pienempi kapillaarisuus, koska ne sisälsivät runsaasti suurempia rakeita.

Poikkeuksena muihin tuloksiin on Keski-Lapin rapakalliomoreeninäytteiden tulokset. Niiden kapillaarisuus jäi selvästi pienemmäksi kuin muiden tutkielman näytteiden, riippumatta niiden suhteellisen hienorakeisesta raekokojakaumasta. Tämä johtuneee siitä, että niiden materiaali oli suurelta osin rapautunutta ja vesi on sitoutunut

adsorptiovetenä.

Taulukko 5. Näytteiden kapillaarisuudet. Tulokset ovat metreissä.

Näyte	Kapillaarisuus
E1	2,47
E2	7,50
I1	>7,10
S1	5,01
S2	>7,66
P1	>6,8
P2	>7,66
P3	>6,5
P4	>7,66
V1	2,49
M1	5,19

5.5 Konsistenssirajat

Kartiokokeen ja kierityskokeen tulokset on esitetty Taulukossa 6 ja Liitteessä 3. Kartiokokeista saadut painauman arvot sijoitettiin lineaariseen koordinaatistoon. Koordinaatistoon sijoittuvien pisteiden perusteella tuloksista piirrettiin niitä mahdollisimman hyvin kuvaava suora. Näytteiden juoksuraja saadaan määritettyä tuloksista tehdyn suoran 10 mm kohtaa vastaavasta tunkeumasta. Kartiokokeessa on silttisillä näytteillä ongelmana se, että niissä nousee vesi pintaan, kun näytettä laitetaan kaarevaan astiaan ja näytteen pintaa tasoitetaan. Tämä aiheuttaa vaikeuksia kokeen suorittamiseen sekä tekee tuloksista epäluotettavia. Tulokset huononevat, koska kokeeseen käytetyn näytteen vesipitoisuus vaihtelee sen eri syvyyksissä. Tällöin näytteille on vaikeaa saada kuvaavaa vesipitoisuutta juuri sille osalle näytteestä, mihin kartio on tiputettu. Tutkielman näytteissä oli osassa havaittavissa tätä ilmiötä. Eritoten sitä aiheutui näytteille, jossa oli silttiä enemmän, kuten Siilinjärven näytteelle S1.

Suurin osa näytteistä ei käyttäytynyt plastisesti, eikä niille saanut suoritettua kierityskoetta. Se oli oletettavaa, koska niiden hienoainesmäärä on sangen vähäinen. Näytteet murtuivat ennen kuin niistä sai pyöritettyä riittävän ohuen rihman. Tutkielman näytteistä Pyhäsalmen näyte P3, Keski-Lapin rapakalliomoreenia edustanut Mäkäran näyte M1 ja Espoon näyte E2 käyttäytyivät riittävän plastisesti, että niille sai tehtyä

kierityskokeen. Näytteiden M1 ja E2 kierityskokeet onnistuivat vain hädin tuskin, joten niiden tulokset eivät välttämättä ole luotettavia. Ainoastaan näyte P3 käyttäytyi selvästi plastisesti. E1 näytteen plastisuusraja on kyseenalainen, koska sen tulokseksi kierityskokeesta tuli juoksurajaa suurempi vesipitoisuus. Juuri ja juuri plastisten näytteiden tulokset ovat epäluotettavia, koska kierityskokeessa on vaikea määrittää mikä on niiden tarkka murtumakohta ja täten plastisuusraja.

Taulukko 6. Juoksurajat (wL), plastisuusraja (wp), juoksuluku (IL), plastisuusluku (Ip), juoksuluku (IL) sekä konsistenssiluku (Ic). Tulokset ovat plastisuus- ja juoksevuusrajan osalta vesipitoisuuksia.

Näyte	Plastisuusraja (wp)	Juoksevuusraja (wL)	Plastisuusluku (Ip)	Juoksevuusluku (IL)	Konsistenssiluku (Ic)
E1	16	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei
E2	12,3	10	-2,3	5,3	-4,3
I1	17	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei
M1	23,6	27,5	3,9	-1,5	2,5
P1	17	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei
P2	16,4	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei
P3	11,4	20,5	9,1	-1,2	2,2
P4	16	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei
S1	17,2	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei
S2	17	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei
V1	20,8	Ei plastinen	Ei	Ei	Ei

5.6 Ominaispinta-ala

Näytteiden ominaispinta-alat ovat pääsääntöisesti melko alhaisia (Taulukko 7). Selvän poikkeuksen tähän teki Keski-Lapin rapakalliomoreenit sekä Pyhäsalmen näyte P3. Myös toisen Pyhäsalmen näytteen, näytteen P1 ominaispinta-alan arvo oli suurehko. Espoon näytteissä oli lähtötiedoissa verrattuun moreenikerrostumiin verrattuna pienemmät ominaispinta-alan arvot. Vuosaaren leikkauksen näyte E2 vastaavan kerroksen ominaispinta-alat olivat 5.6-7,3 m²/g (Hirvas *et al.* 1995). E2 näytteellä se oli 3,61 m²/g. Tätä selittää se, että tutkielman näyte oli muutenkin vähemmän hienoainesta ja savea sisältävä.

Näyttääkin siltä, että näytteiden ominaispinta-ala kuvastaa lähinnä materiaalin rapautuneisuutta sekä saviaineksen määrää. Mitä suurempi ominaispinta-ala on, niin sitä enemmän näytteen materiaali on rapautunut. Tätä tulkintaa tukee myös Niemisen (1985) julkaistu tutkimus sekä Lintinen (1995). Lisäksi Niemisen mukaan (1985) suuri savespitoisuuden osuus hienoaineksesta kasvattaa ominaispinta-alan arvoa.

Rapautuneissa moreeneissa hienoainesrakeiden pintaan on muodostunut rautasaostumaa, joka lisää sen pinta-alaa saostumattomiin puhtaisiin rakeisiin verrattuna (Nieminen 1985). Rapakalliomoreeninäytteet ovat huomattavan rapautuneita, koska niiden materiaali on peräisin paikallisesta rapautuneesta rapakalliosta. Pyhäsalmen näytteistä ominaispinta-ala oli suuri näytteissä P3 ja P1. Ne edustavat Pyhäsalmi-moreenia, P3 edustaen sitä tyyppistratigrafisesti ja P1 näyte ollen deformaatiomoreenia koostuen siitä sekä sen päälle kasautuneesta Ruotanen-moreenista. Nenosen 1995 mukaan ne ovat mineralogialtaan pääosin muuttumattomista mineraaleista koostunutta ainesta. Saman julkaisun diagrammissa mainitaan moreenipatjojen pohjalla olevan rapautunut peruskallio. Pyhäsalmi-moreenin hienoainekseen on voinut päätyä sitä kautta rapautunutta ainesta. Pyhäsalmi-moreenissa on havaittavissa merkittävässä määrin metalleja (Nenonen 1995). Se on voinut vauhdittaa hienoaineksen rapautumista ja erinäisten saostumien muodostumista mineraalien pintaan. Hienoainesmoreeneilla on suuri ioninvaihto-potentiaali (Nenonen 1995 & Lintinen 1995).

Suuri ominaispinta-ala tarkoittaa sitä, että materiaali on todennäköisesti hyvin routivaa (Nieminen 1985). Tarkemman kuvan moreenin routivuudesta saa vertaamalla näytteen ominaispinta-alan sekä rakeisuuden arvoja.

5.7 Eroosioherkkyys

Tutkielman näytteistä Pyhäsalmi-moreenia edustavalle näytteelle P3 saatiin tehtyä onnistuneesti eroosioherkkyttä mittaava pinhole-koee. Siitä saadun tuloksen mukaan näytteen edustama moreeni on dispergoitumatonta, luokkaa ND1. Vesi kulki näytteeseen tehdystä reiästä hitaasti läpi kaikilla painekorkeuksilla, eikä se värjäantynyt. Tästä tuloksesta voidaan päätellä, että näytteessä ei dispergoitunut läpivirtaavaan veteen ja että se on tältä osin hyvin eroosiota kestävä.

Koe tehtiin myös näytteelle P2. Siinä koe ei onnistunut, koska reikä ei pysynyt avoimena. Tämä johtui siitä, että näyte käyttäytyy sen vähäisen hienoainesmäärän takia epäplastisesti. Kuvassa 17 on esitetty näytteet P2 ja P3 pinhole-kokeiden jälkeen halkaistuina. Siitä näkee, kuinka näytteeseen P3 tehty reikä on pysynyt avonaisena, kun taas näytteeseen P2 on tukkeutunut. Oli oletettavaa, että tukkeutuminen toistuisi, Pyhäsalmi-moreenin näytettä lukuun ottamatta, myös muille näytteille, koska ne olivat

konsistenssirajojen mittauksen mukaan epäplastisesti käyttäytyviä. Näin ollen on syytä olettaa, että niissäkin hiekkainen näyte murenisi ja täyttäisi reiän. Täten kokeita ei toistettu muille näytteille, koska koemenetelmä oli huonosti näytteille sopiva ja hyvin aikaa vievä sekä virhealtis.



Kuva 18. Näytteet pinholekokeiden jälkeen. Vasemmalla puolella on näyte P2, jossa kokeen aikana läpi puhkaistu reikä umpeutui ja oikealla näyte P3, jossa reikä pysyi avonaisena.

Taulukko 7. Kokoomataulukko tutkielman tutkimustuloksista (kapillaarisuus = m; ominaispinta-ala = g/m²).

Kokoomataulukko									
Näyte	d/50	γ'_{dmaks}	w'opt	VI 92%	VI 85%	Kapillaarisuus	Ominaispinta-ala	Juoksuraja	Plastisuusraja
Espoo E1	HkMr	21,31	5,14	1,21E-07	1,99E-07	2,47	2,39	16	ei
Espoo E2	HkMr	22,62	4,77	4,79E-09	5,52E-07	7,50	3,61	10	12,3
Iisalmi I1	HkMr	21,60	5,78	1,82E-07	3,67E-08	>7,10	5,91	17	ei
Mäkärä M1	HkMr	19,26	12,32	8,23E-09	3,12E-07	5,19	18,68	27,5	23,6
Pyhäjärvi P1	siHkMr	21,76	6,14	4,70E-09	6,19E-08	>6,8	8,15	17	ei
Pyhäjärvi P2	HkMr	21,64	6,54	2,94E-08	1,39E-07	>7,66	4,25	16,4	ei
Pyhäjärvi P3	hkSiMr	21,06	8,29	5,32E-10	1,79E-09	>6,5	17,19	20,5	11,43
Pyhäjärvi P4	HkMr	21,53	5,89	1,12E-09	4,40E-08	>7,66	5,47	16	ei
Siilinjärvi S1	siHkMr	21,25	6,55	6,39E-09	2,77E-05	5,01	3,45	17,2	ei
Siilinjärvi S2	HkMr	20,89	7,22	2,10E-08	6,64E-07	>7,66	4,31	16,9	ei
Vuotso V1	HkMr	20,30	8,05	7,97E-08	4,07E-07	2,49	11,42	21	ei

7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA KÄYTTÖKOHTEET

7.1 Johtopäätökset

Näytteet edustivat Suomen moreeneille tyypillisesti pääosin hiekkamoreeneja. Myöskin niiden hienoainespitoisuus on tyypillinen. Rakeisuuden perusteella ne siis edustavat

hyvin tyypillisiä Suomalaisia moreeneja. Lähtötiedoissa oli usea näyte nimetty joko hienoainesmoreeniksi, tai enemmän hienoainesta sisältäväksi kuin mitä tutkimukset osoittivat.

Tutkielman näytteiden käytettävyyteen liittyvistä ongelmista yksi suurimmista on niiden todennäköinen routivuus. Kaikissa tutkielman näytteissä oli vähintään 5% savilajitetta ja ne ovat kapillaarisuudeltaan suuria. Nämä edistävät näytteen routimista. Lisäksi tutkielman moreeneissa on muutama näyte, joissa on suuret ominaispinta-alan arvot. Suuri ominaispinta-alakin on routivuutta lisäävä ominaisuus. Koska tutkielman moreenit olivat valittu niin, että ne edustivat suuralueillaan tyypillisiä moreeneja, voi tulosten perusteella todeta moreenien olevan hyvin routivia. Vähän routivat moreenit lienevät täten harvinaisia.

Näytteiden tiivistettävyys oli moreeneille tyypillistä ja sangen tasalaatuisia. Suurempia heittoja ei tullut tuloksiin. Optimivesipitoisuuden ja kuivairtoteheyden arvot olivat aika lailla oletetun suuruisia.

Savisuuden määrällä ei näyte olevalta suurta merkitystä moreenin tiivistymiseen. Tutkielman savisimman näytteen P3, optimikuivairtoteheys ei eroa merkittävästi muista tutkielman näytteistä. Se on tutkielman keskitasoa. Sillä vaikuttaa olevan jossain määrin vaikutusta moreenin optimivesipitoisuuteen. Tutkielman näytteistä suurimmat optimivesipitoisuudet ovat Keski-Lapin rapakalliomoreeneilla sekä Pyhäsalmoreenia edustavalla näytteellä. Oletettavasti tämä johtuu siitä, että niissä on enemmän savimineraaleja, jotka sitovat itseensä muuntumattomia mineraaleja enemmän vettä. Näiden näytteiden savimineraalisuutta tukee myös näytteiden ominaispinta-alan tulokset.

Rapakalliomoreeneilla, ja eritoten Mäkärän näytteellä M1 on muihin näytteisiin verrattuna suuremmat vesipitoisuuteen ja muihin veden sitoutumiseen liittyvät arvot. Tämä johtuu siitä, että rapakallionäytteet sisältävät rapautuneempaa ainesta kuin muut tutkielman näytteet. Voi olettaa, että se sitoo itseensä paremmin vettä kuin vähemmän rapautuneet ja muuntuneet kiviainekset. Mäkärän moreeneissa voi olla mukana paisuvahilaisia savimineraaleja.

Rapakallionäytteiden rapautuneisuus vaikutti moniin tutkielman vaiheisiin. Huomattavin näkyvä vaikutus näytteiden rapautuneisuudella oli niiden likaavuuteen.

Näytteen M1 ja V1 olivat huomattavan likaavia ja värjäviä. Ne värjäisivät niiden kanssa kosketuksissa olevan veden hyvin vahvasti oranssinruskeaksi. Siitä oli haittaa esimerkiksi pesuseulontaa ja konsistenssirajoja varten tehtyä näytteiden esikäsittelyä tehdessä. Keski-Lapin rapakalliomoreenit eivät ole altistuneet kovin suurelle kuljetukselle, vaan moreenien kiviaines on pääosin peräisin niiden peittämästä rapakalliosta. Lisäksi supra-akvaattisella alueella ovat moreenit, eivät ole huuhtoutuneita. Nämä seikat aiheuttavat näytteille tyypillisen likaavuuden ja rapautuneisuuden luonteen.

Rapakalliomoreeninäytteiden ominaispiirteet veden kanssa liittyvät siihen, miten vesi sitoutuu niiden mineraaleihin verrattuna muihin näytteisiin. Niissä on mukana oletettavasti paljon savimineraaleja ja kiilteitä, ja niiden mineraaliaines on rapautunutta. Vesi sitoutuu niihin tehden kemiallisesti adsorption avulla, eikä fyysisesti kitkavoimien avulla (Nimeinen 1985). Vesi on siis niissä pääosin adsorptiovetenä. Tällöin niissä ei ole paljon vapaata vettä. Se selittää Mäkärän ja Vuotson näytteiden pienen kapillaarisuuden sekä niiden keskimääräistä suuremmat vesipitoisuuksiin liittyvät arvot, kuten luontaisen vesipitoisuuden tai optimivesipitoisuuden. Tästä johtuu myös se, että Vuotson näytteellä V1 näkyy rapautuneelle ainekselle ominaiset ominaisuudet Mäkärän näytettä M1 huonommin. Näyte V1 on näytettä M1 karkearakaisempi ja siinä on vähemmän hienoaainesta. Näin ollen se ei sido itseensä samalla tavalla vettä kuin Mäkärän näyte.

Tutkielman näytteiden kapillaarisuus on pääosin varsin suuri. Vain näytteillä E1 ja V1 kapillaarisuusnousun arvoksi jää noin 2,5 m. Niistäkin Vuotson näytteen moreenipatjan etäisyys kalliosta on keskimäärin pari metrin luokka. Näytteiden, joiden kapillaarisuuden arvon nousi suuremmaksi, kuin mihin kapillaarimetrillä pääsi, kapillaarisuuden arvoa on vaikea arvioida. Tällöin voidaan vain todeta, että kapillaarisuus on suurempi kuin saavutettu kapillaarimetrin arvo. Tutkielman tulosten mukaan hypoteesi siitä, että metallit ovat nousseet mm. Pyhäsalmeella moreenipatjan kautta mineralisaatiosta moreenia peittävään turvepatjaan, on mahdollinen. Lintisen (1995) mukaan ioninvaihto on nimenomaisen suurta hienorakeisessa moreenissa. Tämä tukee sitä, että Pyhäsalmeella Pyhäsalmoreenin kautta metalli-ionit ovat nousseet malmista turpeeseen ja siitä pintavaluntaan aiheuttaen hydromorfisen pinta-anomalian. Vastaavien pinta-anomalioiden perusteella voidaan ohjata malminetsintää, kuten Wennevirta (1968) on esittänyt.

Suurimmalle osaa näytteistä ei saatu määritettyä plastisuusrajaa ja siihen liittyviä arvoja. Tämä johtui suurimmaksi osaksi siitä, että näytteissä ei ollut tarpeeksi hienoainesta, jotta ne olisivat olleet muovailtavia kierityskokeessa. Näytteiden savipitoisuuden olisi pitänyt olla suurempi, jotta ne olisivat käyttäytyneet plastisesti. Ainoastaan Pyhäsalmen hienoaineksisimmalle, Pyhäsalmoreenia edustavalle näytteelle sai kierityskokeen tehtyä kunnolla. Lisäksi tuloksen sai Espoon alemmalle näytteelle sekä Mäkärän näytteelle. Mäkärän rapakalliomoreenin plastisuuteen vaikutti luultavasti se, että vaikka siinä ei ollut yhtä paljon saviainesta kuin jossain muissa näytteissä, sen aines oli rapautuneempaa.

7.2 Käyttökohteet

Tutkimuksen perusteella moreeneille voi todeta eri moreenien käytettävyydestä eri käyttökohteissa.

GTK:n maaperäkartan käyttöoppaassa soramoreeneille on luokiteltu tekniseksi käytöksi tienrakennuksen rakennekerrokset. Myös hiekkamoreeneille on annettu sama luokittelu. Hienoainesmoredeneja voi sen mukaan käyttää patorakenteisiin sekä teinrakennuksessa penkereisiin. Drumliinien ja muiden moreenimuodostumien kiviainekselle oppaassa on annettu käyttökohteiksi kaikki edellä mainitut. Espoon Turvesolmun näytteet olivat soraisimmat, niissä soralajitteen osuus näytteessä E1 oli noin 30%. Näin ollen ne olisivat rakeisuudeltaan käytettävimpiä infrarakentamiseen. Näytteen edustama leikkaus oli myös kivinen ja lohkarainen, joten murskaamalla voi aineksesta saada käyttökelpoisempaa. Tutkimuksen perusteella voisi olettaa, että niiden edustamat moreenimuodostumat voisivat olla käytettävissä raaka-aineen ottamiseen. Vallisaaren leikkaus, jota Espoon näytteet myös edustavat, on ainekseltaan tutkimuksen näytteistä lähinnä drumliinia.

Myös karkeampien rakeiden raemuodolla on vaikutusta kiviaineksen käytettävyydelle. Tutkielmassa ei tutkittu näytteiden raemuotoa, mutta ne ovat moreeneilla, ja eritoten pohjamoreeneilla, yleisesti pitkulaisia (Bennet & Glosser 2009). SFS-standardin SFS-EN 13242 + A1: Maa- ja vesirakentamisessa käytetyt sitomattomat ja hydraulisesti

sidotut kiviainekset (2008) on määritetty kiviainekselle vaatimuksen sen muotoominaisuuksiin. Myös käytettävän kiviaineksen rakeiden murtopinnan ja pyörityneisyyden määrä pitää tuntea esimerkiksi betonikiviaineksessa. Moreenin rakeet ovat pääsääntöisesti jossakin määrin murtopintaisia (Bennet & Glosser 2009). Tutkielman näytteistä niitä ei tutkittu. Hienoainesta karkeissa kiviaineksissa saa olla korkeintaan 4% (SFS 2007), joten tutkielman näytteiden edustamissa moreeneissa se ei täyty. Jotta niitä voisi käyttää karkeina kiviaineksina, tulisi niistä seuloa hienoaines pois. Myös iskunkestävyys ja kulutuskestävyys tulee karkealle kiviainekselle tuntea. Näytteissä on karkeata ja hienompaa ainesta sekaisin niin niitä tulee standardin mukaan käsitellä koostekiviaineksena. Tutkielman rakeisuustulosten perusteella moreenien rakeisuus pysyy useimmissa käyttökohteissa MaaRYL:n ohjekäyrien sisällä. Lisäksi niitä voi seuloa niin, että niistä saa käyttökohteisiin sopivia. Esimerkiksi rakeisuuden perusteella moreenit ovat pääosin kelpaavia suodatin- jakaviin- ja kantaviin kerroksiin käytettäväksi materiaaliksi sellaisinaan tai pienillä parannuksilla.

Jossakin kiviaineskäytöissä tulee testata kiviaineksesta erinäisiä kemiallisia ominaisuuksia, koska ne vaikuttavat esimerkiksi betonin käyttäytymiseen. Moreenikiviaines lienee muuten kemialliselta koostumukseltaan varsin stabiilia, eikä sisällä esimerkiksi sulfideja, ellei kiviaines ole mineralisaatiosta kulkeutunutta. Toisen poikkeuksen tekevät rapautuneet moreenikiviainekset, joita tutkielmassa edustaa Keski-Lapin rapakalliomoreenit. Ne ovat rapautuneet hapettumalla ja niissä on oletettavasti paljon rautaa, koska rakeiden päälle on muodostunut rautasaostumia (hematiittia) metallisaostumaa.

Tutkielman näytteistä Espoon näytettä vastaavat moreenit lienevät käytettävimmät rakennusmateriaaleiksi. Niiden edustamia moreeneja tavataan Etelä-Suomessa laajalti Salpausselkien eteläpuolisella alueella (Hirvas *et al.* 1995). Eritoten päällimmäisempi moreeni, jota näyte E1 edustaa, on verrattain karkeaa. Näyte edustaa Hirvas *et al.* (1995) tutkiman Vuosaaren leikkauksen Unit 6:ta. Lisäksi kuvien perusteella moreenit ovat sangen kivisiä, mikä lisää niiden käyttökelpoisuutta. Kyseisessä näytteessä oli lisäksi hienoaineksen määrä moreeniksi melko alhainen, mikä edistää käytettävyyttä. Siis ylemmän moreenipatjan kivisemmät osat voivat olla mahdollisia saada kannattavasti esimerkiksi MaaRYL:n ohjekäyrien mukaisiin lajitepitoisuuksiin. Sitä hyödyntämällä voi mahdollisesti korvata luonnonsoran käytön käyttökohteessa. Näytteen ominaispinta-ala oli pieni, joka kertoo siitä, että näytteen hienoaines on

materiaaliltaan rapautumatonta, eikä niihin ole muodostunut metallisaostumia. Tämä on käytettävyyden kannalta positiivista, koska metallisaostumat hankaloittavat materiaalin käytettävyyttä useissa kohteissa. Moreenia käytettäessä rakennekerroksissa tulee kuitenkin ottaa huomioon niiden suuri routivuus, joka tekee niistä huonosti soveltuvan materiaalin routimisherkkiin rakenteisiin

Keski-Lapin rapakalliomoreenien käytettävyyttä huonontaa niiden rapautuneisuus ja siitä johtuva liikaavuus. Niiden kanssa kosketuksissa ollut vesi muuttuu hyvin vahvasti oranssinruskeaksi, vaikka niistä olisi huuhdeltu pois suurin osa hienoaineksesta.

Eräs tutkielman tutkimuskysymyksistä oli se, voiko moreeneja käyttää tutkielman perusteella geeristeinä tai vastaavina veden kulkua eristävinä kerroksina rakenneprojekteissa, kuten padoissa. Moreeni on lähtökohtaisesti esimerkiksi savea parempi eristemateriaali, koska se on muun muassa käsiteltävyydeltään ja kantavuudeltaan käytännöllisempää (Saarelainen & Nenonen 1995). Tutkielman näytteistä tutkittiin vedenläpäisevyys kuvastamaan niiden käytettävyyttä geeristeinä. SFS-standardien ”13361 Geeristeet. Altain ja patojen rakentamisessa käytettäviltä geeristeiltä vaadittavat ominaisuudet (2013a) ja ”SFS-EN 13492 Geeristeet. Jätealtain, vastaanottoasemien ja vuotoa keräävien järjestelmien rakentamisessa käytettäviltä geeristeiltä vaadittavat ominaisuudet” mukaan käytettävältä materiaalilta tulee tutkia myös sen kulutuskestävyyteen liittyviä ominaisuuksia. Niiden suhteen tutkielman näytteistä ei voi ottaa kantaa niiden käytettävyyteen. Vedenläpäisevyydeltään moreenin tulee olla alle $1,0E-09$ m/s (Saarelainen & Nenonen 1995). Tutkielman näytteistä tämä toteutuu Pyhäsalmoreenia edustavalla näytteellä P3 92% tiiviudessa. Muista näytteistä vedenläpäisevyys oli $1,0E-09$ m/s luokkaa niissä, joissa oli suurempi savespitoisuus. Karkeammissa näytteissä vedenläpäisevyys oli $1,0E-07$ m/s - $1,0E-08$ m/s välillä. 85% tiiviudessa näytteen P3 tiiviys oli lähellä vaadittua $1,0E-09$ m/s vedenläpäisevyyttä. Muilla näytteillä se oli selvästi suurempi. Näin ollen Pyhäsalmoreenia lukuun ottamatta tutkielman moreeneita käytettäessä eristeinä niitä on joko tiivistettävä yli 92% tiiviuteen, tai niihin on lisättävä vedenläpäisevyyttä pienentävää ainetta, kuten bentoniittia.

Pinhole-kokeen antaman tuloksen mukaisesti voi olettaa, että Pyhäsalmoreeni kestää verrattain hyvin eroosiota ja näin ollen se siltäkin osin soveltuu geeristeeksi. Muista

näytteistä ei voi eroosioherkkyyden perusteella tulkita mitään, koska tutkimusmenetelmää ei ollut niille soveltuva.

Moreenien suurta kapillaarisuutta voi mahdollisesti hyödyntää malminetsinnässä. Turvepatjoihin nousseiden metallien geokemiallinen tutkiminen on mahdollisesti kannattavaa, koska se on ympäristöä kuormittamatonta ja Nenonen & Virtasen (2016) mukaan se on lupaprosesseiltaan helpompaa, kuin raskaalla kalustolla suoritettava malminetsintä. Jos sitä hyödynnetään malminetsinnässä, niin tulee alueen maanpeitteitä tuntea, koska kapillaarinousun määrä on olennaisesti riippuvainen niiden ominaisuuksista. Tutkielman tulosten mukaan esimerkiksi rapautuneisuus tai moreeniaineksen karkearakeisuus heikentää kapillaarisuutta. Myöskin moreenipatjan sisällä olevat kerrosrakenteet ja moreenipatjan vaihtelut oletettavasti vaikuttavat kapillaarinousun määrään. Jotta metallit nousisivat kapillaarisuuden avulla pintaan, tulee moreenipatja sisältää hienoainesta (Lintinen 1995).

Suuri kapillaarisuus viittaa myös suureen routivuuteen. Tämä vähentää materiaalin hyödynnettävyyttä. rakennuskäytössä maa lasketaan routivaksi, jos sen kapillaarinousu on yli 1m. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki tutkielman moreenit ovat hyvin routivia. Moreenimaille tulisi ainakin tehdä parannustoimenpiteitä, kuten hienoaineksen poistoa, routivuuden vähentämiseksi. Tämä tulee ottaa huomioon tutkielman näytteiden edustamia moreeneja käyttäessä. Koska moreeni on selvästi yleisin maalaji Suomessa, niin on se pääsääntöisesti kantavana maapohjana rakennuksille, kuten esimerkiksi suurimmalle osalle maamme pientaloista. Moreenien kapillaarisuudesta johtuen vesi pääsee nousemaan rakennusten perustuksiin ja alusrakenteisiin, ellei niihin ole tehty asianmukaisia kapillaarikatkaisuja karkealla materiaalilla. Suurin osa vaurioista on syntynyt moreenimaille laattaperustetuille pientaloille, kun routasuojaus ja kapillaarikatkaisu on tehty puutteellisesti tai väärin.

Juoksurajat olivat keskimäärin noin 17% ja yli 20% paikkeilla. Näytteiden luontainen vesipitoisuus oli yleensä huomattavasti pienempi, keskimäärin 9%. Näin ollen tutkielman näytteiden perusteella moreeneja voi käyttää myös juoksurajan puolesta rakennuskohteissa. Juoksurajaan noustakseen moreenien vesipitoisuuden tulisi nousta merkittävästi, erityisesti kun rapakalliomoreeni oli kyseessä.

KIITOKSET

Haluan kiittää tutkielman ohjaajia, Keijo Nenosta, Juha Pekka Lunkkaa ja Kauko Kujalaa. Lisäksi haluan kiittää Oulun yliopiston ympäristötekniikan laboratorion laboratorioteknikkoa Tuomo Pitkästä sekä tohtorikoulutettava Tiina Eskolaa, jotka auttoivat toteuttamaan tutkielman laboratoriotutkimukset.

VIITELUETTELO

- Bennett, M. ja Glasser, N. 2009. *Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms*. Wiley-Blackwell, 373s.
- Geologinen tutkimuskeskus, 2005. *Maaperäkartan käyttöopas*. Espoo, Verkkojulkaisu <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/>
- Haavisto-Hyvärinen, M. 1994. *Espoon maaperäkartan 2032 12 selitys*, Geologian tutkimuskeskus, Espoo, 28s.
- Hirvas, H., Lintinen P., Lunkka, J., Eriksson, B. ja Grönlund, T. 1995. *Sedimentation and Lithostratigraphy of the Vuosaari Multiple Till Sequence in Helsinki, Southern Finland*. Bull.Geol. Soc. Finland 67, part II, 51-64.
- Hulkki, H ja Peltoniemi-Taivalkoski, A. 2013. *Mäkärän rapakallio- ja moreeninäytteiden geokemiallisten tulosten arviointi ja tulkinta*, GTK, 87s.
- Johansson, P. 1995. *The Deglaciation in the Eastern Part of the Weichselian Ice Divine in Lapland*, GTK Bulletin, 72s.
- Kejonen A., Jokinen S., Lukkarinen H., Nenonen K. & Väänänen T. 1996 *Kuopion Korsumäen moreenileikkauksen Eem-kerrostuma ja moreenistratigrafia*. Geologi 48 (1996) 64-69s.
- Korkiala-Tanttu, L., Juvankoski, M., Kivikoski, H., Eskola P. ja Kiviniemi, M. 2008. *Moreeni tehokäyttöön! HUUMA Heikkolaatuisten luonnonmateriaalien hyötykäytön tehostaminen infrarakentamisessa*. VTT, Espoo 74s.
- Kujansuu, R ja Hyyppä, J. 1995. *Vuotson kartta-alueen maaperä*, Geologian tutkimuskeskus, Espoo, 107s.
- Lintinen P. 1995. *Origin and physical characteristics of till fines in Finland*, Geologian tutkimuskeskus, Espoo, 83s.
- Luoma, S., Majaniemi, J., Kaipainen, T. ja Pasanen, A. 2016 *GPR survey and field work summary in Siilinjärvi mine during July 2014*. Geological Survey of Finland, Espoo, 44s.
- Mäkelä J. 1996. *Rogen-moreenien synnystä*. Geologi 48. 123-128s.
- Nenonen, K. 1995. *Pleistocene Stratigraphy and Reference Sections in Southern and Western Finland*. GtK, Kuopio. 94s.
- Nenonen, K. ja Virtanen, K. 2016. *Soil geochemical response in Geochemical terrain: examples from till- and peat-covered mineralizations in Finland*. 12. Geokemian päivät. Vuorimiesyhdistys, Espoo
- Nieminen, P. 1985. *Moreenin hienoaineksen laatu ja sen vaikutus routimisherkkyyteen*. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere, 81s.

PANK-2103 Rakeisuusmäärittäminen, Hydrometrikoita.

PANK-2401 Kiviainekset, Ominaispinta-ala, Typpiadsorptiomenetelmä

Rakennustieto Oy. 2010 MaaRYL 2010: Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset Talonrakennuksen maatyöt, Rakennustietosäätiö RTS, Viro, 196s.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. ja Tammirinne, M. 1996. Geotekniikka. 15. painos. Hakapaino Oy, Helsinki, 195s.

Ronkainen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristökeskus, Helsinki 57s.

Räisänen, M ja Skinnari, V. 2015. Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekan jätealueen ympäristön pintavesien kemiallinen nykytila vuonna 2006. Geologian tutkimuskeskus. 28s.

Saarelainen J. & Nenonen, K. 1995. Hienoaineksen huono vedenläpäisevyys – Hyvä ominaisuus ympäristönhoidossa. Geologi 4-5/1995, Suomen Geologinen seura, 58-63s

Stroeven A., Hättestrand C., Kleman J, Heyman J., Fabel D., Fredin O., Goodfellow B., Harbor J., Jansen J., Olsen L., Caffee M., Fink D., Lundqvist J., Rosqvist G., Strömberg B. & Jansson K. 2016. Deglaciation of Fennoscandia. Quaternary Science Reviews 147 (2016) 91-121s

Suomen Rakennusinsinööriliitto. 1985. Geomekaniikka I, Otapaino Espoo, 479s.

Suomen Rakennusinsinööriliitto. 1990. Geomekaniikka II, Vaasa Oy, Vaasa, 430s.

Suomen Rakennusinsinööriliitto. 1995. RIL 156 Maarakennus, Gummerrus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 486s.

Suomen geoteknillinen yhdistys. 2012. Soveltamisohje: ISO-maaluokituksen soveltamisohje Suomessa. 25s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2013a. SFS-EN 13361 Geeristeet. Altaiden ja patojen rakentamisessa käytettäviltä geeristeiltä vaadittavat ominaisuudet. 65s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2013b. Geeristeet. Jätealtaiden, vastaanottoasemien ja vuotoa keräävien järjestelmien rakentamisessa käytettäviltä geeristeiltä vaadittavat ominaisuudet. 67s

Suomen standardoimisliitto SFS. 2013c. SFS-EN ISO 2282-1:2013 Geotekninen tutkimus ja testaus. Geohydrauliset kokeet. Osa 1: Yleiset säännöt. 59s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2007. CEN ISO/TS 17892-4:2004 Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokokeet. osa 4: rakeisuuden määrittäminen ja sen soveltaminen Suomessa.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2004. CEN ISO/TS 17892-11:fi Geotekninen tutkimus ja koetus. Maan laboratoriokokeet. Osa 11: Vedenläpäisevyyden määrittäminen. Vakiopaine- ja muuttuvapainekoe ja sen soveltaminen Suomessa. 22s.

Suomen standardoimisliitto SFS. Geotekninen tutkimus ja koetus. Maan laboratoriokokeet. Osa 12: Konsistenssirajojen määrittäminen. Atterbergin rajat ja sen soveltaminen Suomessa.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2007. SFS-EN 13242 + A1: Maa- ja vesirakentamisessa käytetyt sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset

Tiehallinto. 2008. Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, Helsinki, 62s.

Tielaitos. 1996. Moreenien hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin. Oy Edita Ab, Helsinki, 32s.

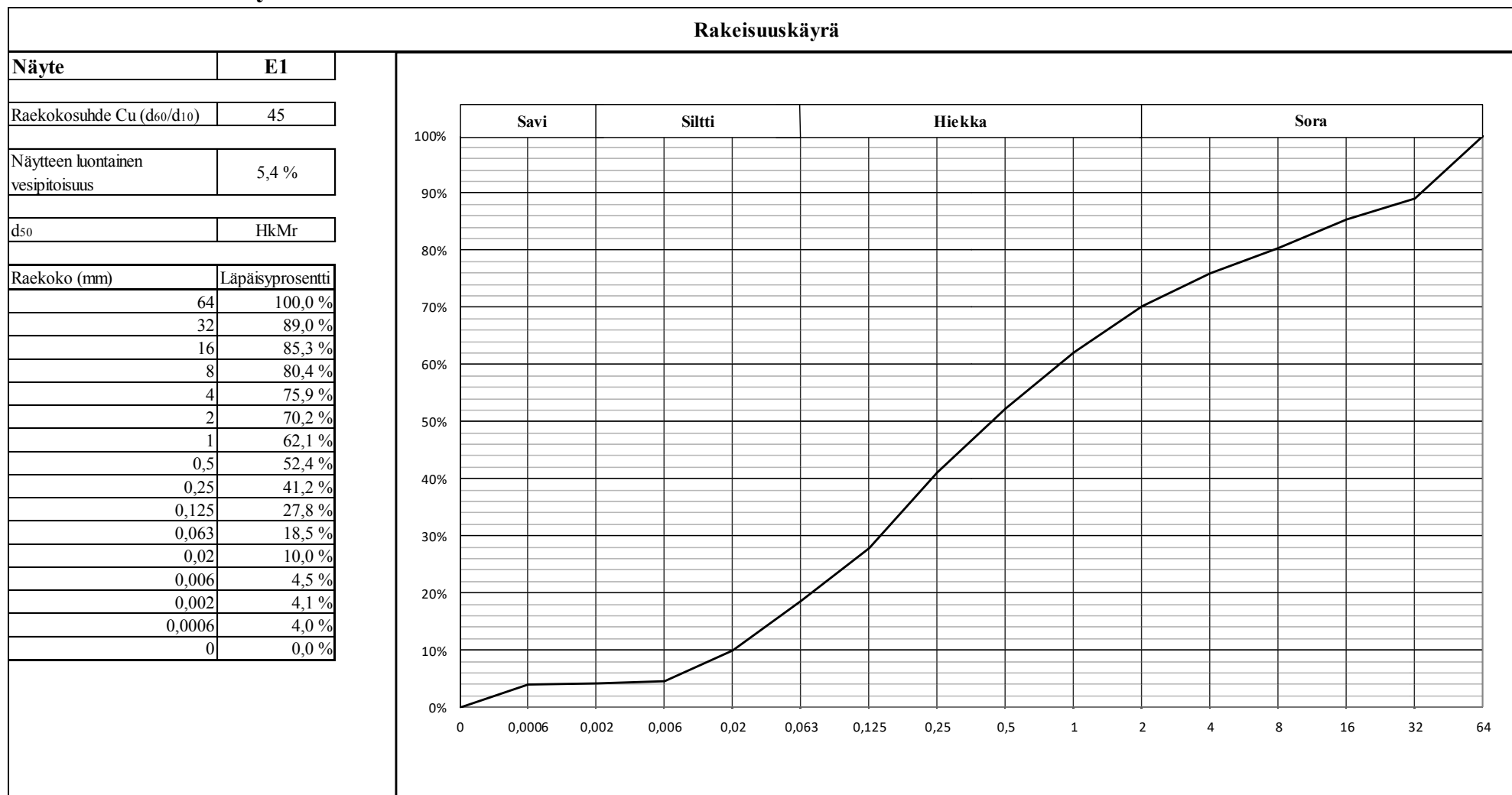
Toimittaneet: Kukkonen, E ja Sahala, L. 1988. Iisalmen kartta-alueen maaperä. Geologian Tutkimuskeskus, Espoo, 45s.

Väisänen, U. 1988. Mäkäränharjun alueen maaperä, Geologian tutkimuskeskus, Rovaniemi, 20s.

Wennervirta H. 1968. Application of geochemical methods to regional prospecting in Finland. Bull. Comm. Géol. Finlande, No 234, 91p.

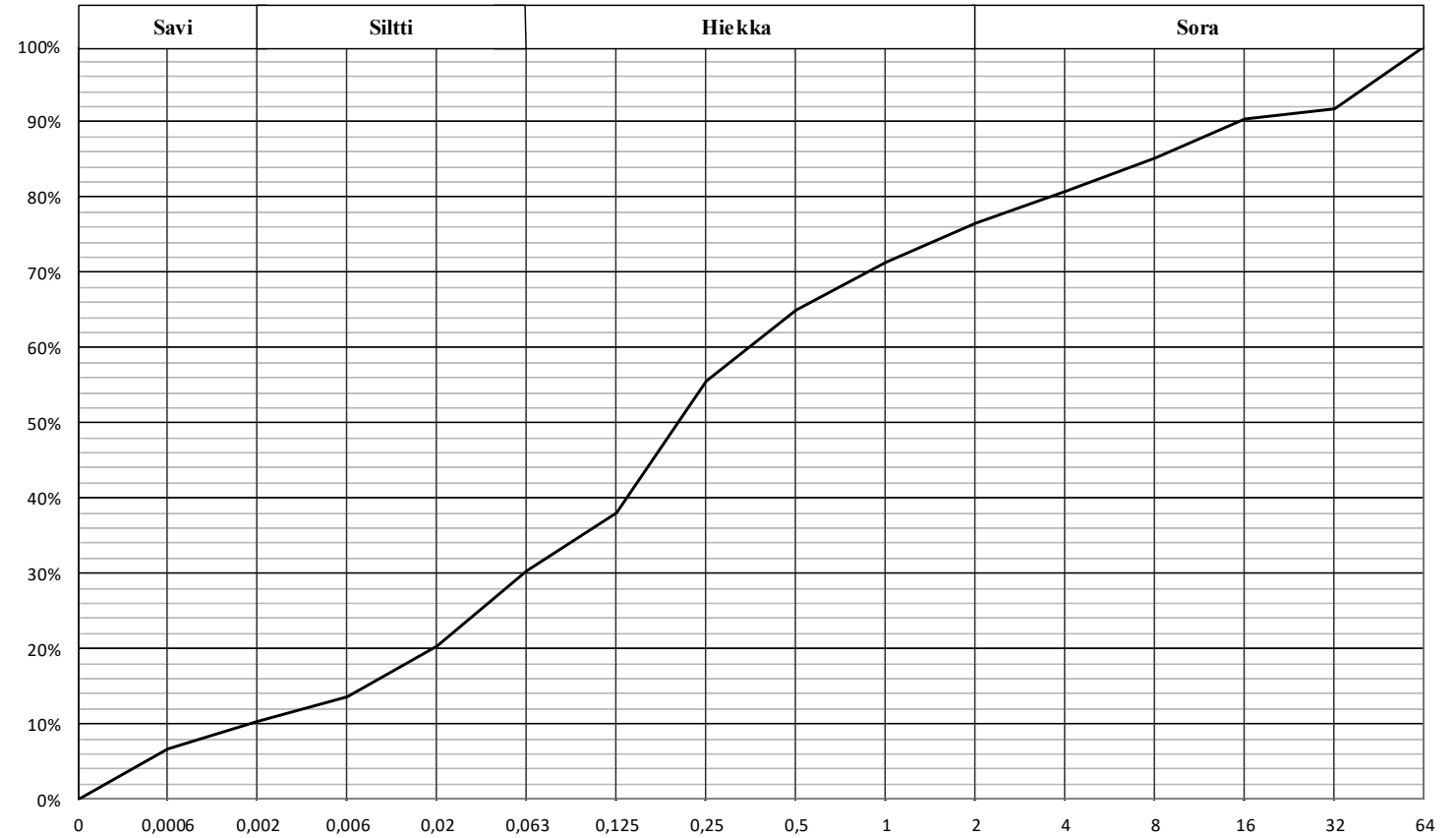
LIITTEET

Liite 1. Rakeisuuskäyrät



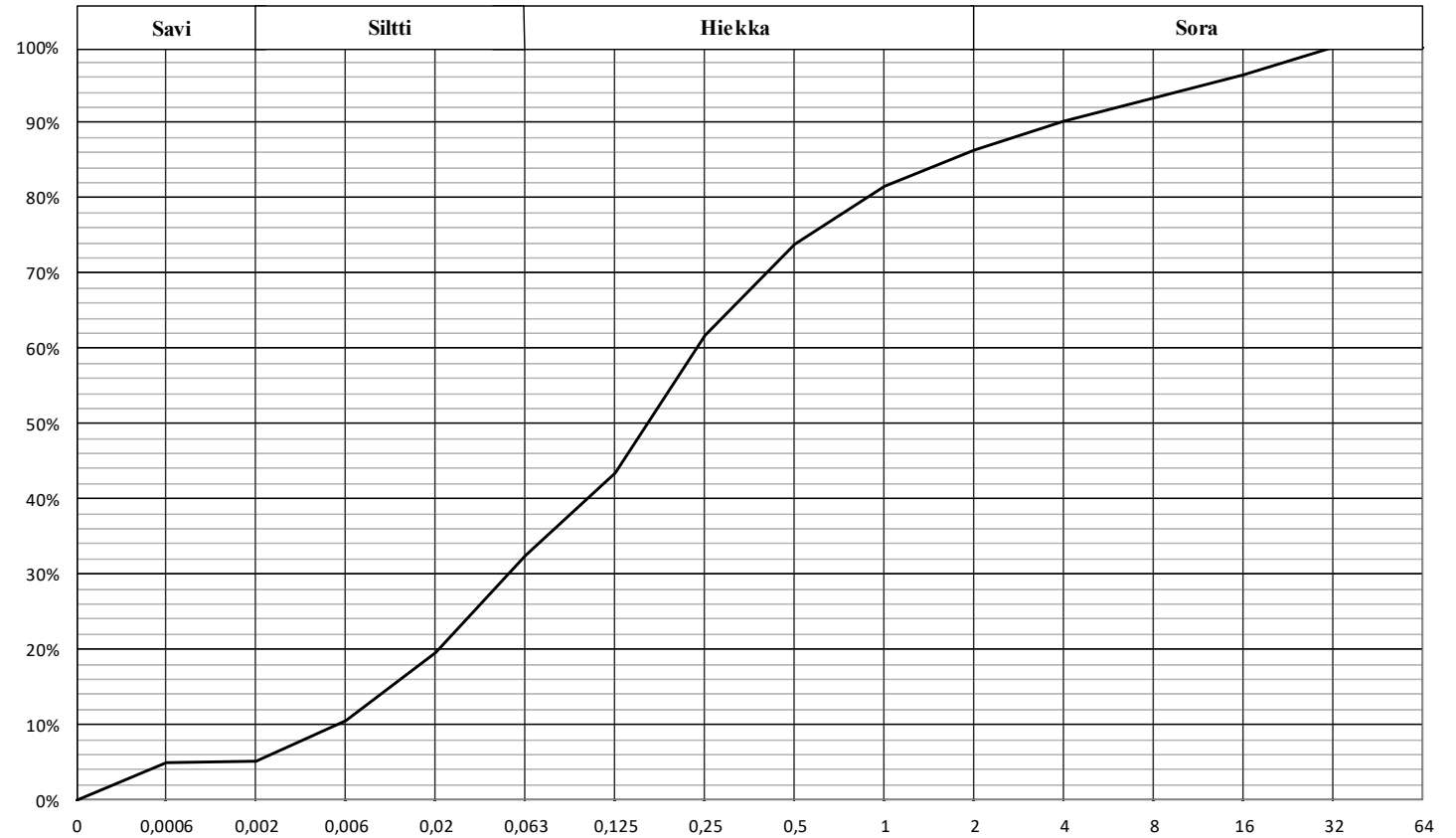
Rakeisuuskäyrä

Näyte	E2
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	40
Näytteen luontainen vesipitoisuus	5,8 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	91,7 %
16	90,3 %
8	85,1 %
4	80,8 %
2	76,6 %
1	71,3 %
0,5	64,9 %
0,25	55,6 %
0,125	38,0 %
0,063	30,4 %
0,02	20,4 %
0,006	13,6 %
0,002	10,4 %
0,0006	6,6 %
0	0,0 %



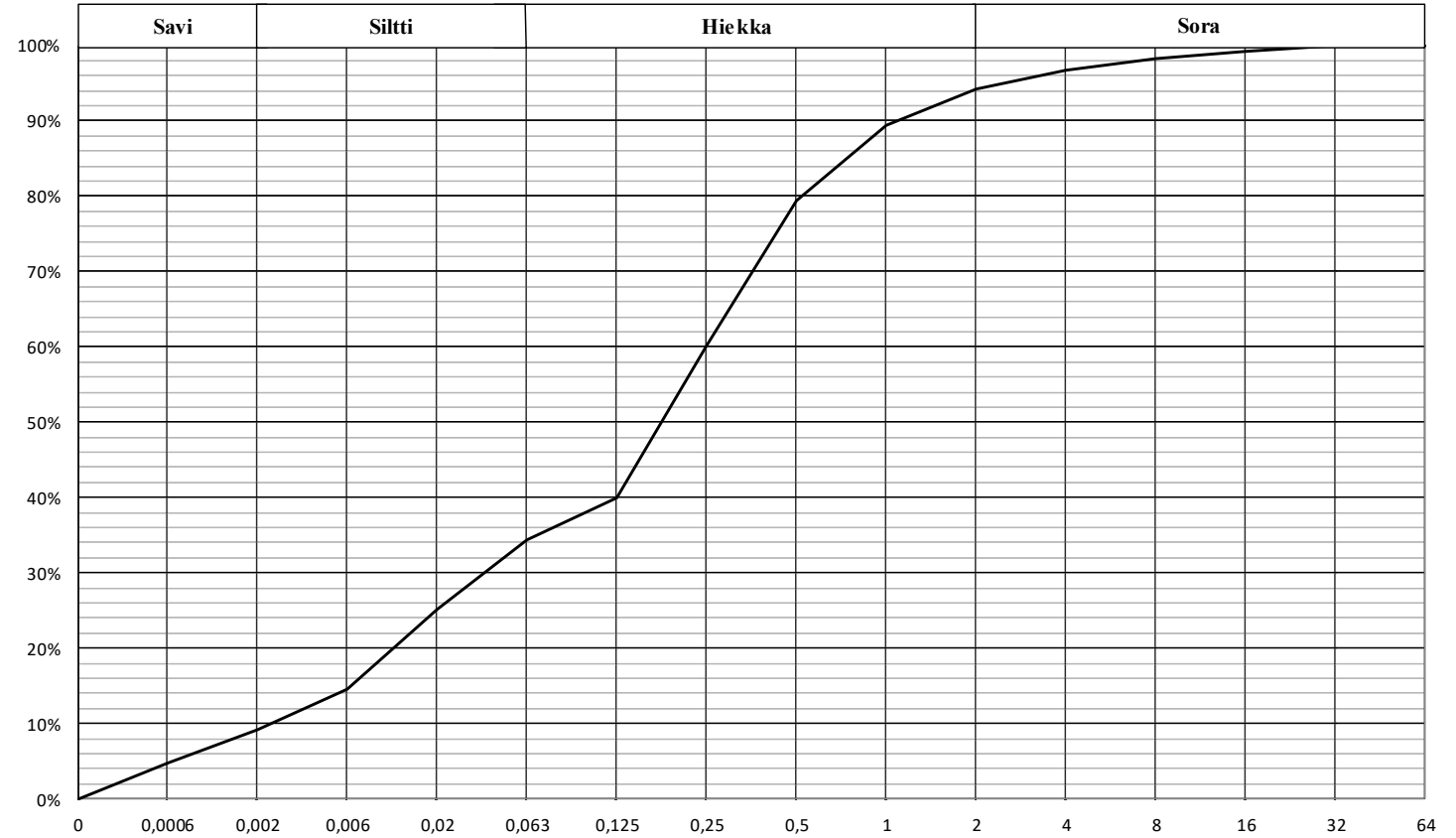
Rakeisuuskäyrä

Näyte	II
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	46
Näytteen luontainen vesipitoisuus	11,7 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	96,4 %
8	93,2 %
4	90,1 %
2	86,4 %
1	81,6 %
0,5	73,9 %
0,25	61,8 %
0,125	43,5 %
0,063	32,4 %
0,02	19,6 %
0,006	10,6 %
0,002	5,2 %
0,0006	4,9 %
0	0,0 %



Rakeisuuskäyrä

Näyte	M1
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	119
Näytteen luontainen vesipitoisuus	17,5 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	99,2 %
8	98,2 %
4	96,7 %
2	94,2 %
1	89,4 %
0,5	79,5 %
0,25	60,1 %
0,125	40,0 %
0,063	34,3 %
0,02	25,2 %
0,006	14,5 %
0,002	9,2 %
0,0006	4,6 %
0	0,0 %



Rakeisuuskäyrä

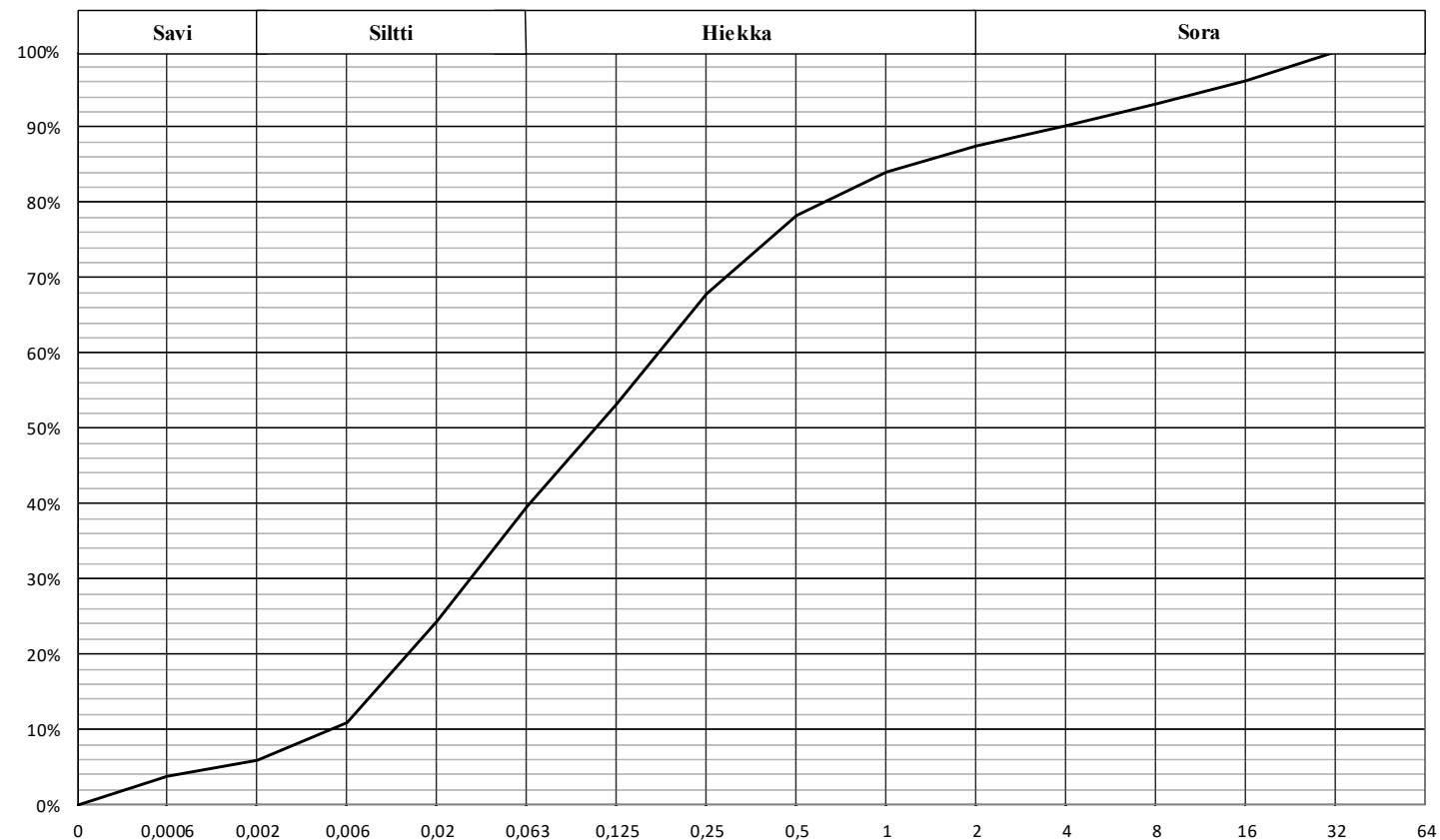
Näyte **P1**

Raekokosuhte Cu (d₆₀/d₁₀) **45**

Näytteen luontainen vesipitoisuus **9,0 %**

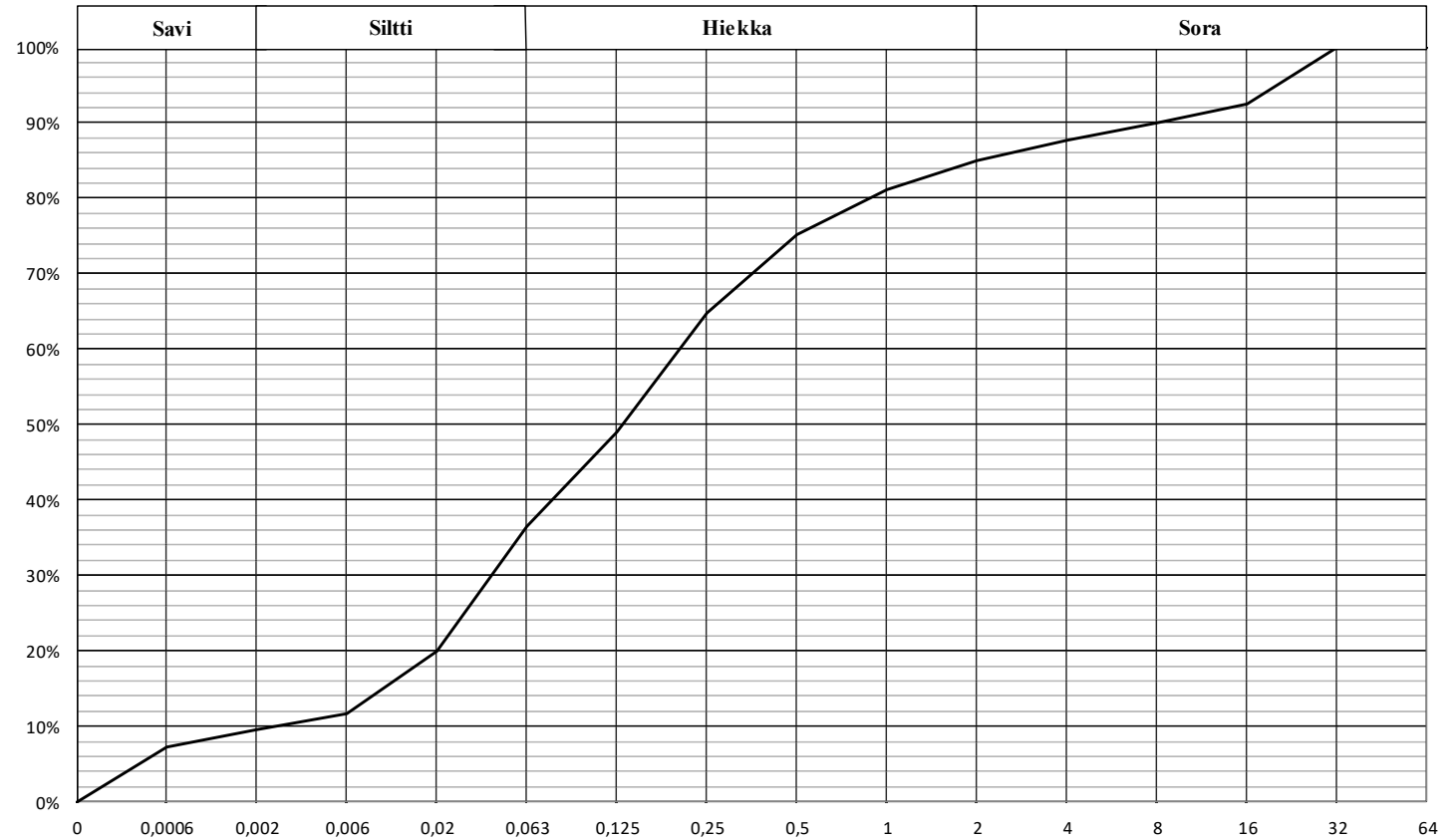
d₅₀ **siHkMr**

Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	96,1 %
8	93,1 %
4	90,1 %
2	87,5 %
1	84,0 %
0,5	78,2 %
0,25	67,8 %
0,125	53,3 %
0,063	39,6 %
0,02	24,4 %
0,006	10,9 %
0,002	5,9 %
0,0006	3,9 %
0	0,0 %



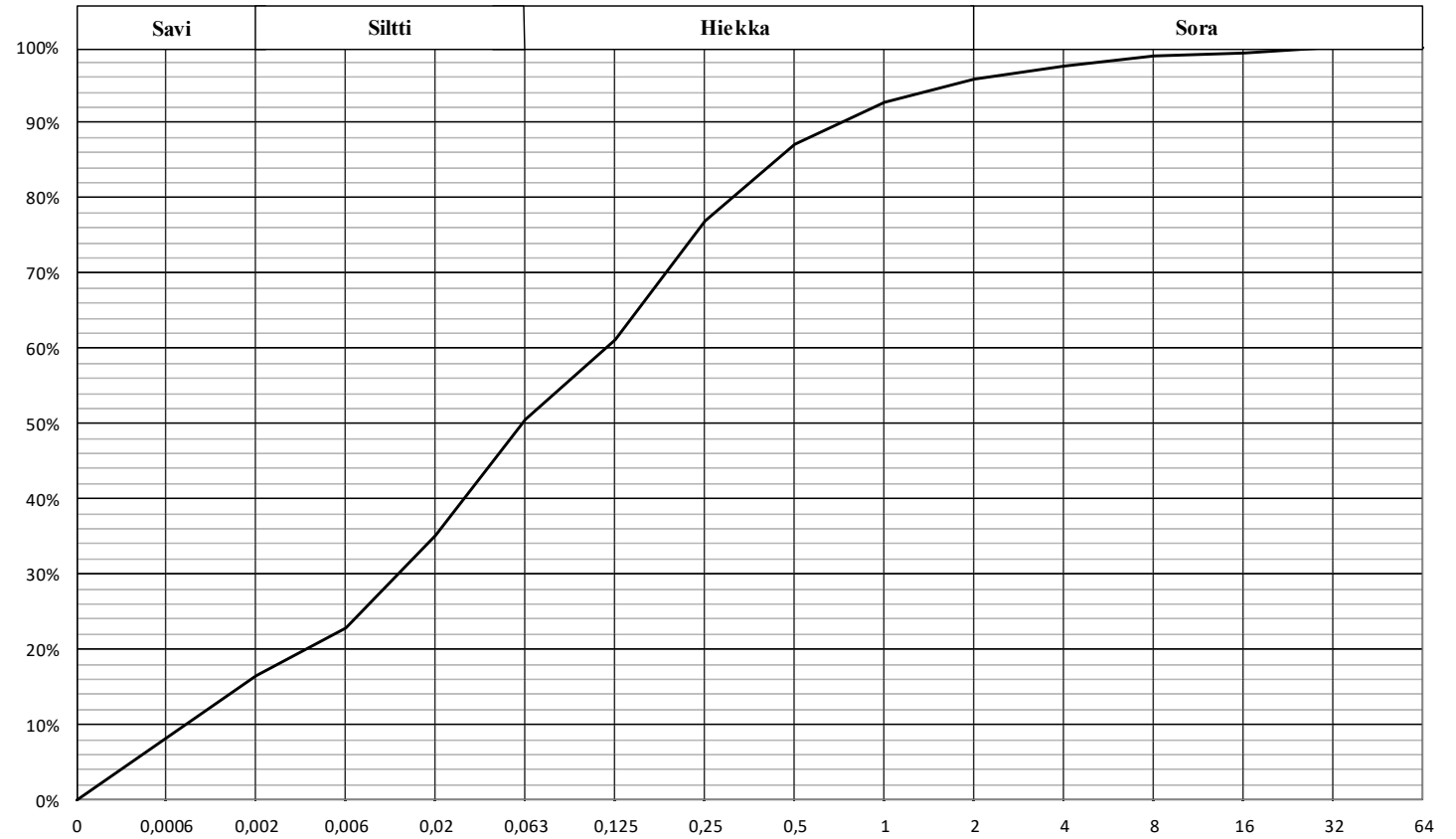
Rakeisuuskäyrä

Näyte	P2
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	87
Näytteen luontainen vesipitoisuus	6,8 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	92,6 %
8	90,0 %
4	87,6 %
2	84,9 %
1	81,1 %
0,5	75,3 %
0,25	64,9 %
0,125	49,1 %
0,063	36,6 %
0,02	19,9 %
0,006	11,7 %
0,002	9,5 %
0,0006	7,2 %
0	0,0 %



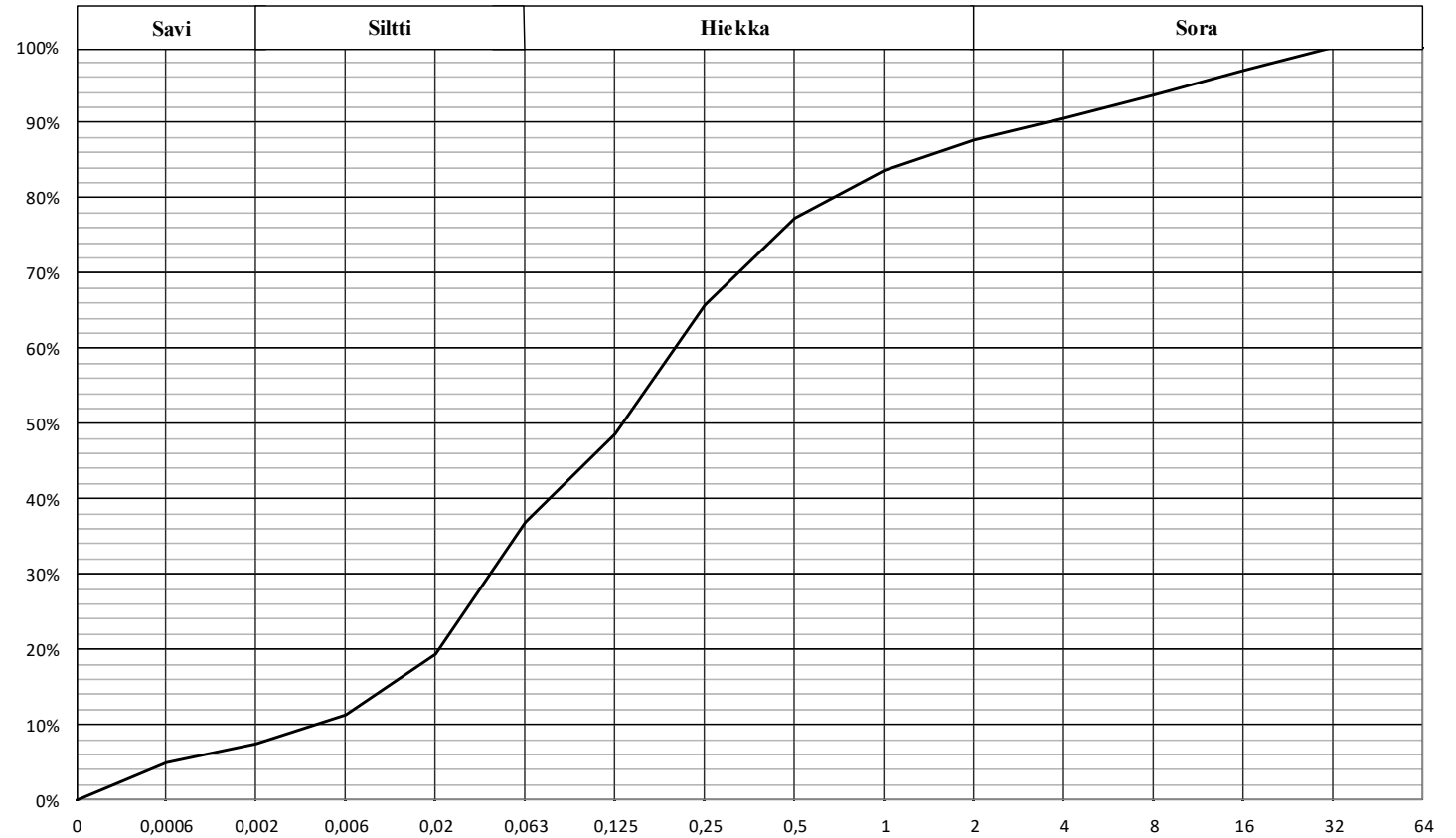
Rakeisuuskäyrä

Näyte	P3
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	176
Näytteen luontainen vesipitoisuus	11,8 %
d ₅₀	hkSiMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	99,2 %
8	98,9 %
4	97,5 %
2	95,8 %
1	92,7 %
0,5	87,0 %
0,25	77,0 %
0,125	61,1 %
0,063	50,5 %
0,02	35,2 %
0,006	22,9 %
0,002	16,5 %
0,0006	8,2 %
0	0,0 %



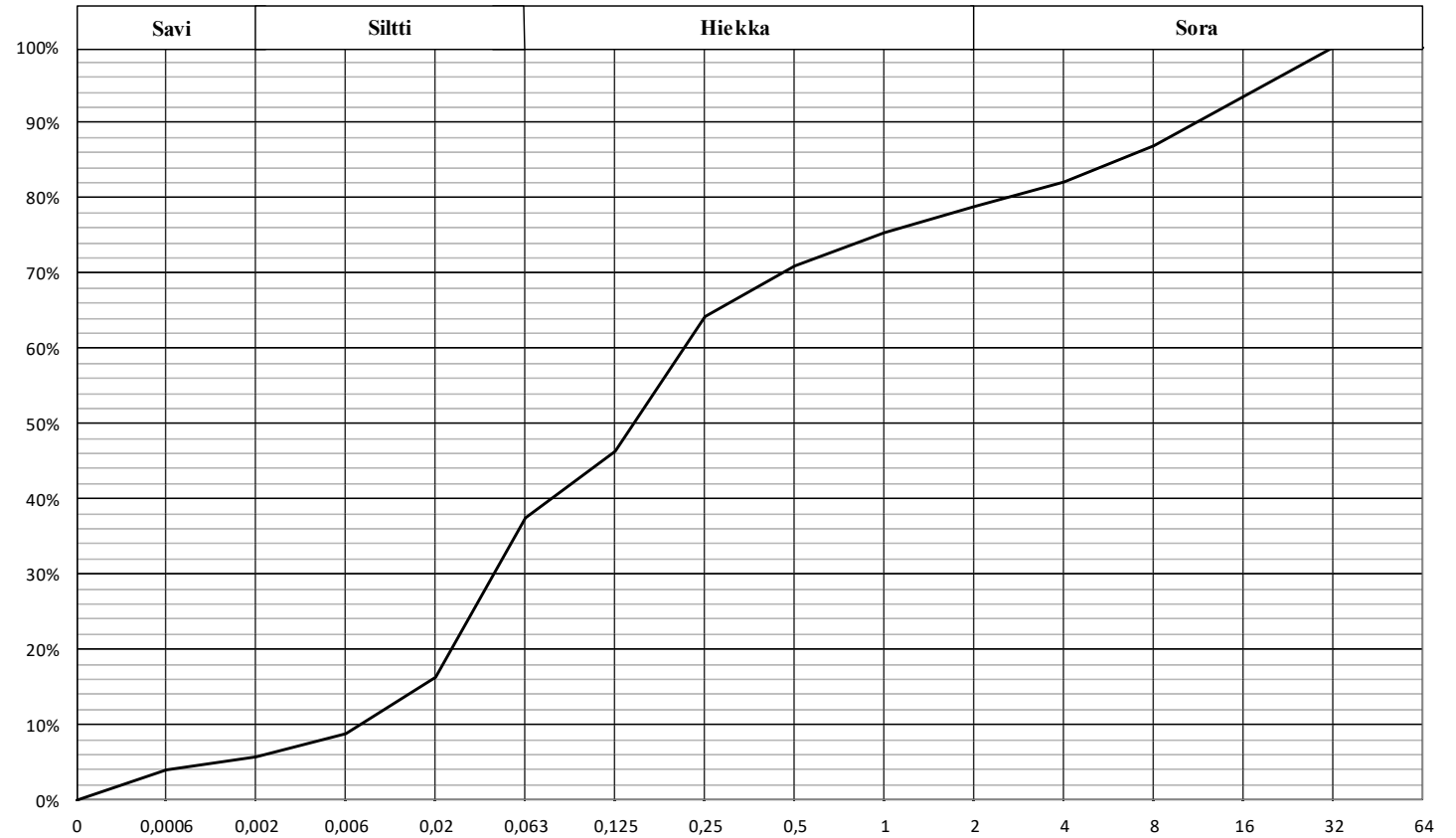
Rakeisuuskäyrä

Näyte	P4
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	64
Näytteen luontainen vesipitoisuus	5,4 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	96,9 %
8	93,6 %
4	90,6 %
2	87,6 %
1	83,6 %
0,5	77,3 %
0,25	65,8 %
0,125	48,7 %
0,063	36,8 %
0,02	19,3 %
0,006	11,2 %
0,002	7,5 %
0,0006	4,9 %
0	0,0 %



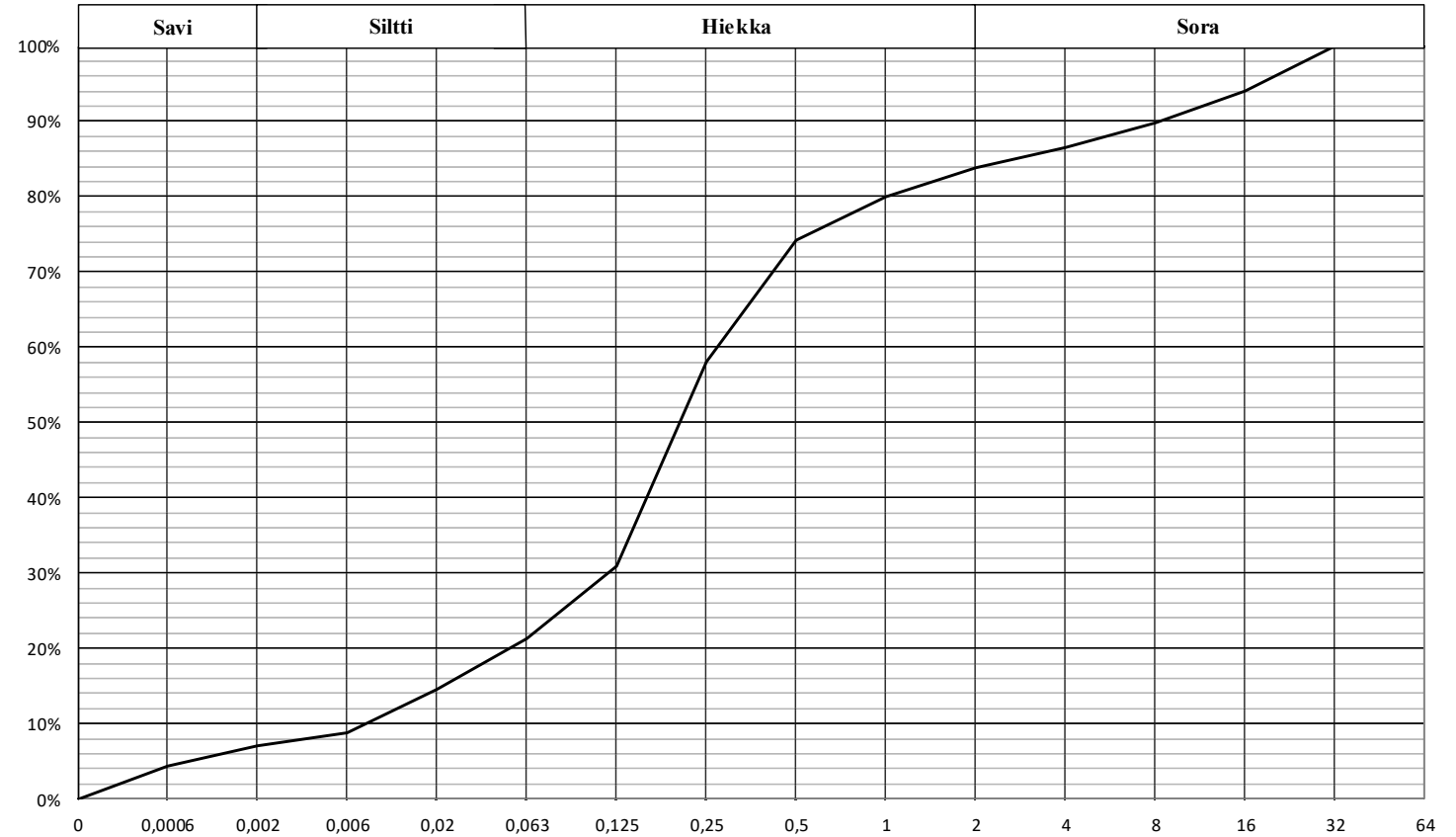
Rakeisuuskäyrä

Näyte	S1
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	37
Näytteen luontainen vesipitoisuus	6,0 %
d ₅₀	siHkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	93,5 %
8	87,0 %
4	82,1 %
2	78,8 %
1	75,4 %
0,5	71,0 %
0,25	64,3 %
0,125	46,3 %
0,063	37,5 %
0,02	16,3 %
0,006	8,7 %
0,002	5,6 %
0,0006	3,9 %
0	0,0 %



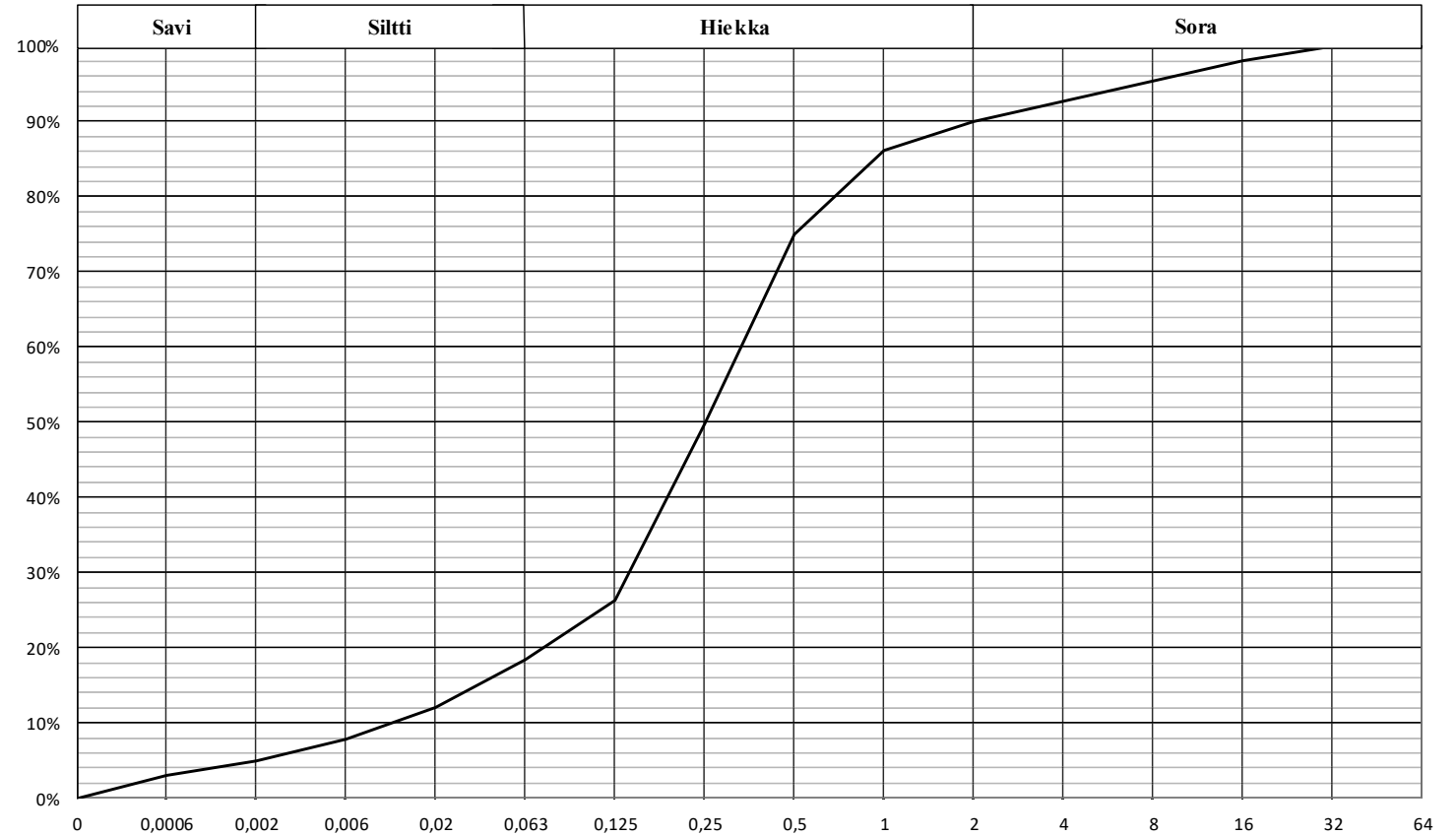
Rakeisuuskäyrä

Näyte	S2
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	41
Näytteen luontainen vesipitoisuus	7,2 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	94,0 %
8	89,9 %
4	86,6 %
2	83,8 %
1	80,0 %
0,5	74,2 %
0,25	58,0 %
0,125	30,9 %
0,063	21,3 %
0,02	14,5 %
0,006	8,9 %
0,002	7,0 %
0,0006	4,4 %
0	0,0 %



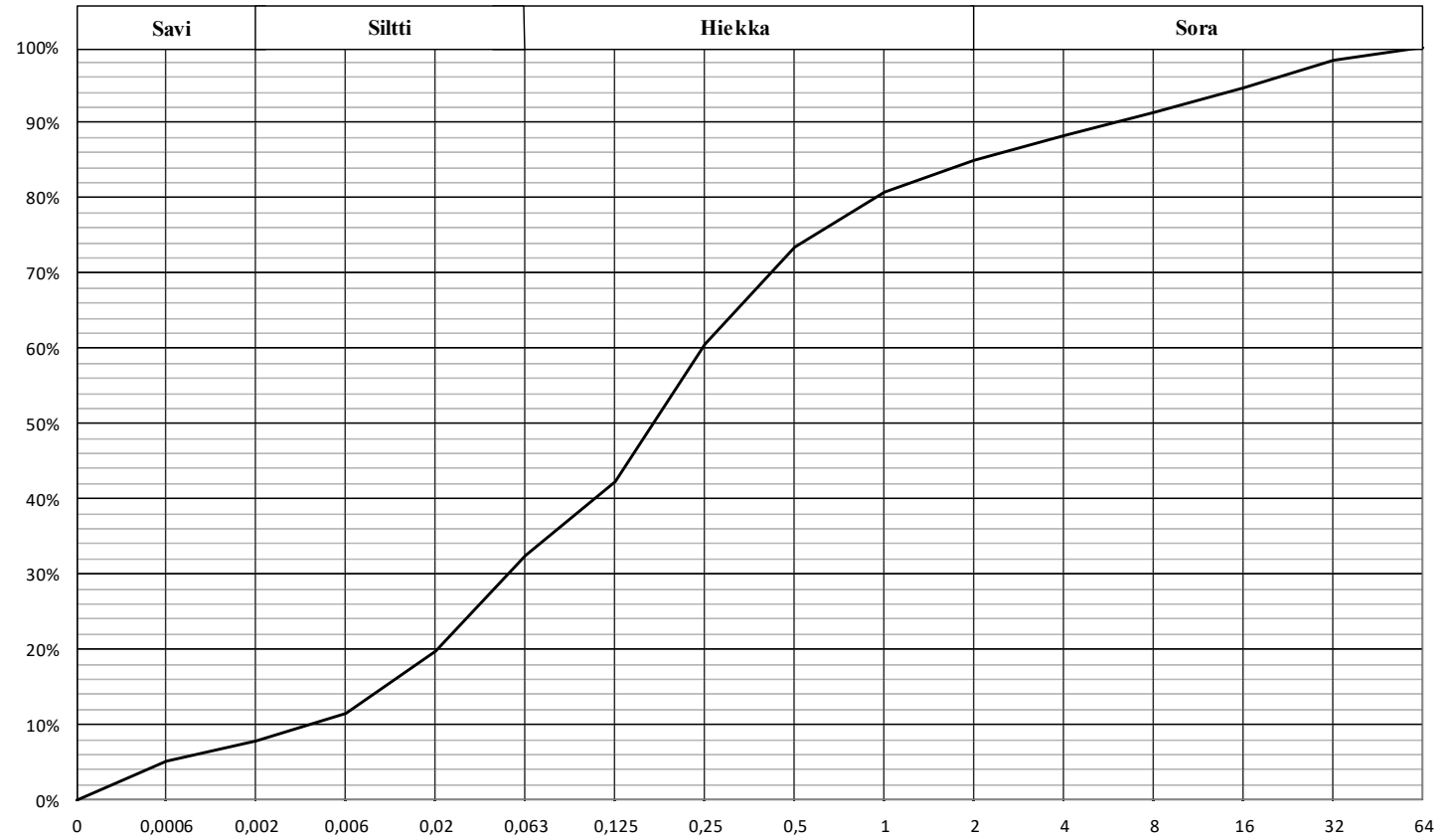
Rakeisuuskäyrä

Näyte	V1
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	29
Näytteen luontainen vesipitoisuus	11,4 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,0 %
32	100,0 %
16	98,0 %
8	95,4 %
4	92,7 %
2	90,0 %
1	86,1 %
0,5	74,9 %
0,25	49,8 %
0,125	26,3 %
0,063	18,4 %
0,02	12,1 %
0,006	7,7 %
0,002	5,0 %
0,0006	3,1 %
0	0,0 %



Rakeisuuskäyrä

Näyte	Keskiarvo
Raekokosuhte Cu (d ₆₀ /d ₁₀)	62,5
Näytteen luontainen vesipitoisuus	8,9 %
d ₅₀	HkMr
Raekoko (mm)	Läpäisyprosentti
64	100,00 %
32	98,24 %
16	94,68 %
8	91,33 %
4	88,24 %
2	85,08 %
1	80,66 %
0,5	73,51 %
0,25	60,57 %
0,125	42,27 %
0,063	32,40 %
0,02	19,71 %
0,006	11,39 %
0,002	7,81 %
0,0006	5,06 %
0	0,00 %

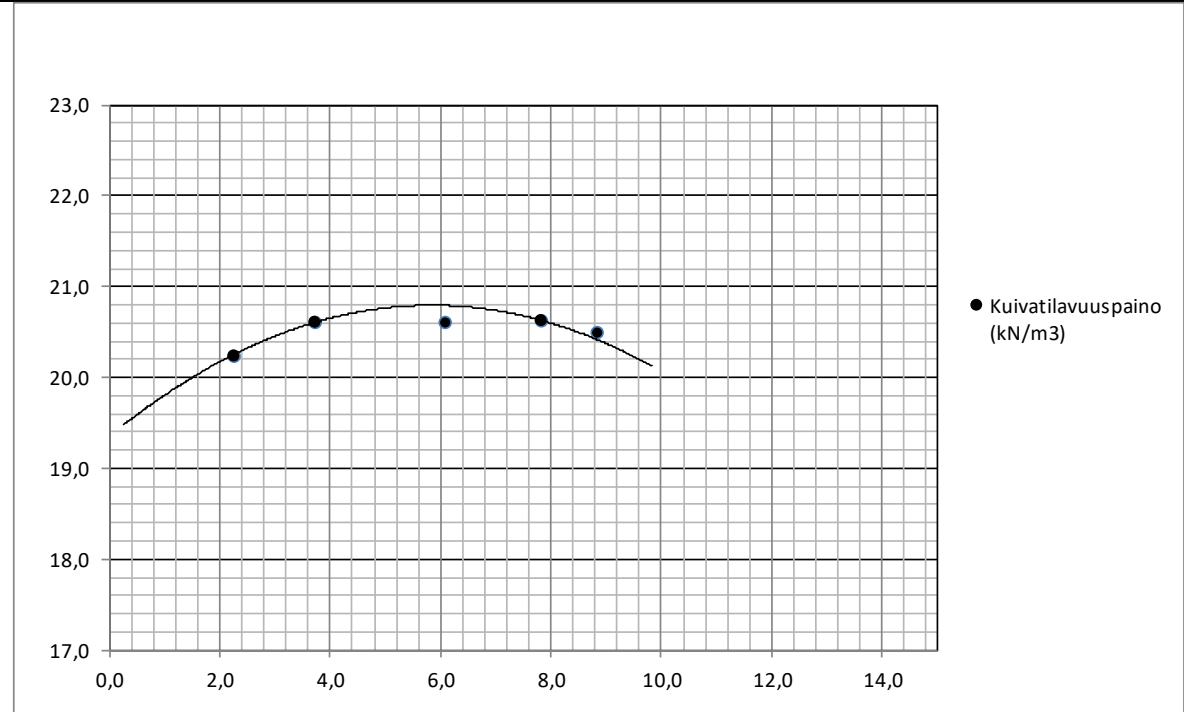


Liite 2. Tiivistävyyskäyrät

Tiivistävyys

Näyte	E1				
Sullonta	I	II	III	IV	V
Näytteen massa	4323,3	4056	4078,4	4046	3981,7
Haluttu kosteus	6	2	4	8	9
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	62	149,7	54
Kostea näyte + muotti	6601,4	6493,7	6556	6636,8	6642,7
Muotin massa	4571	4570,9	4571,1	4571,1	4571,1
Näytteen massa kosteana (m(w))	2030,4	1922,8	1984,9	2065,7	2071,6
Kostea näyte + astia	108,4	108,1	109,4	108,3	113,3
Kostea näyte	104,7	104,6	105,8	104,7	109,7
Kuiva näyte + astia	102,4	105,8	105,6	100,7	104,4
Astian massa	3,7	3,5	3,6	3,6	3,6
Kuiva näyte	98,7	102,3	102	97,1	100,8
Veden massa	6	2,3	3,8	7,6	8,9
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	5,73	2,20	3,59	7,26	8,11
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	6,08	2,25	3,73	7,83	8,83
Näytteen massa kuivana (Md)	1914,0	1880,5	1913,6	1915,8	1903,5
Irtotiheys	2,229	2,111	2,179	2,268	2,274
Tilavuuspaino	21,864	20,705	21,374	22,244	22,308
Kuivairtotiheys	2,101	2,064	2,101	2,103	2,089
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	20,611	20,250	20,606	20,630	20,498

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	521,2 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	12,056

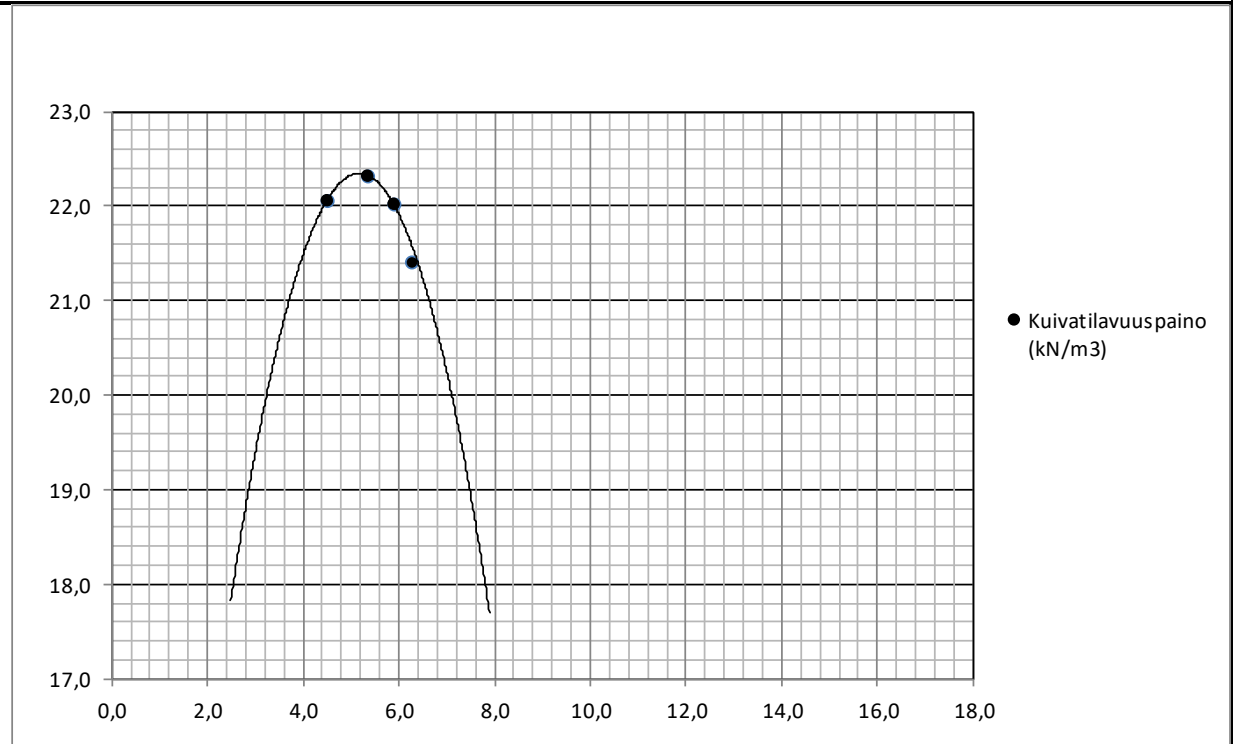
γ_{dmaks}	20,80
γ'_{dmaks}	21,31

w_{opt}	5,85
w'_{opt}	5,14

Tiivistyvyys

Näyte	E2			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	4472,5	4301,9	4233,6	4167,5
Haluttu kosteus	5,5	2	7	7
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	43,6	51,5
Kostea näyte + muotti	6736,4	6657	6724,3	6722,5
Muotin massa	4571,1	4571,3	4571,4	4571,2
Näytteen massa kosteana (m(w))	2165,3	2085,7	2152,9	2151,3
Kostea näyte + astia	106,1	105,9	105,8	105,4
Kostea näyte	102,4	102,4	102,3	101,8
Kuiva näyte + astia	100,4	101,5	100,6	99,4
Astian massa	3,7	3,5	3,5	3,6
Kuiva näyte	96,7	98	97,1	95,8
Veden massa	5,7	4,4	5,2	6
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	5,57	1,80	3,70	7,60
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	5,89	4,49	5,36	6,26
Näytteen massa kuivana (Md)	2044,8	2048,2	2073,2	1987,8
Irtotiheys	2,377	2,289	2,363	2,361
Tilavuuspaino	23,317	22,460	23,183	23,166
Kuivairtotiheys	2,245	2,248	2,276	2,182
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	22,019	22,055	22,325	21,405

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	358,8 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	7,43

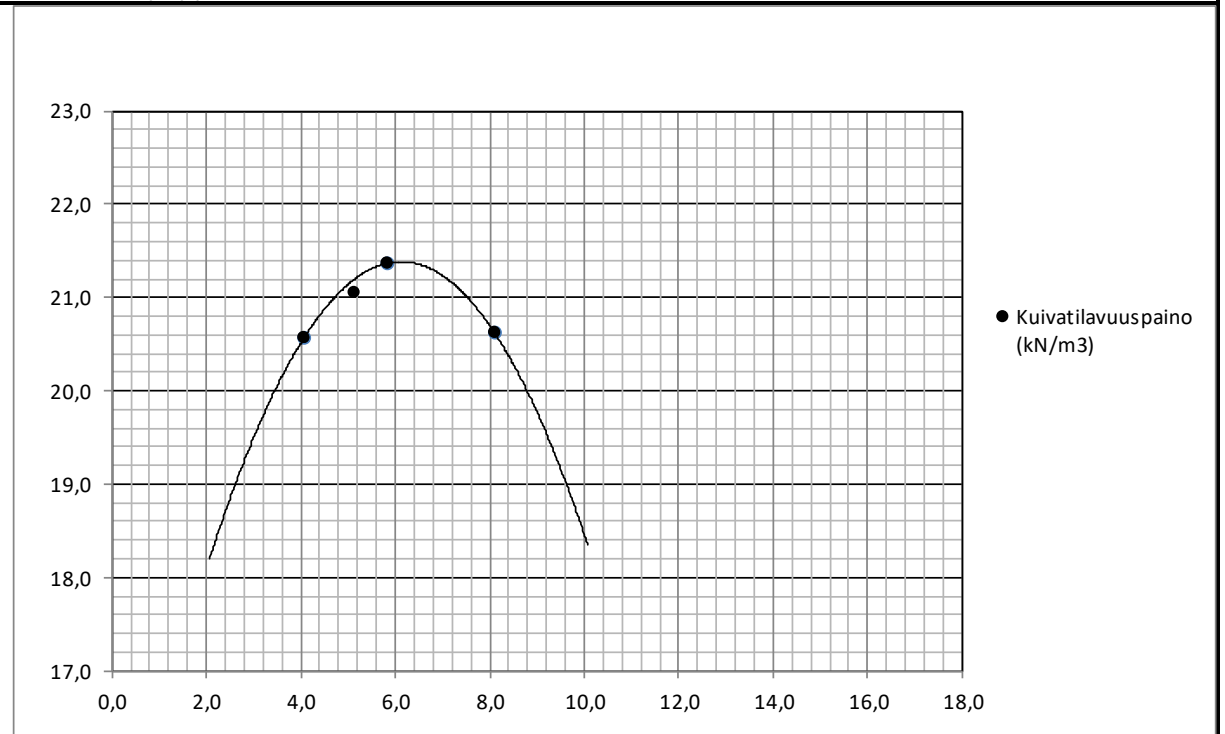
γ_{dmaks}	22,39
γ'_{dmaks}	22,62

w_{opt}	5,15
w'_{opt}	4,77

Tiivistävyys

Näyte	II			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	5758,5	5082,1	5048	
Haluttu kosteus	5	~4	~7	~10
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	78,4	152
Kosteaa näyte + muotti	6626,5	6559,2	6671	6643,3
Muotin massa	4571,3	4571,3	4571,3	4571,3
Näytteen massa kosteana (m(w))	2055,2	1987,9	2099,7	2071,7
Kosteaa näyte + astia	106,3	105,9	105,7	116
Kosteaa näyte	102,7	102,3	101,9	112,4
Kuiva näyte + astia	101,3	101,9	100,1	107,6
Astian massa	3,6	3,6	3,8	3,6
Kuiva näyte	97,7	98,3	96,3	104
Veden massa	5	4	5,6	8,4
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	4,87	3,91	5,50	7,47
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	5,12	4,07	5,82	8,08
Näytteen massa kuivana (Md)	1955,1	1910,2	1984,3	1916,9
Irtotiheys	2,256	2,182	2,305	2,274
Tilavuuspaino	22,131	21,406	22,610	22,309
Kuivairtotiheys	2,146	2,097	2,178	2,104
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	21,054	20,569	21,368	20,642

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	211,4 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	5,51

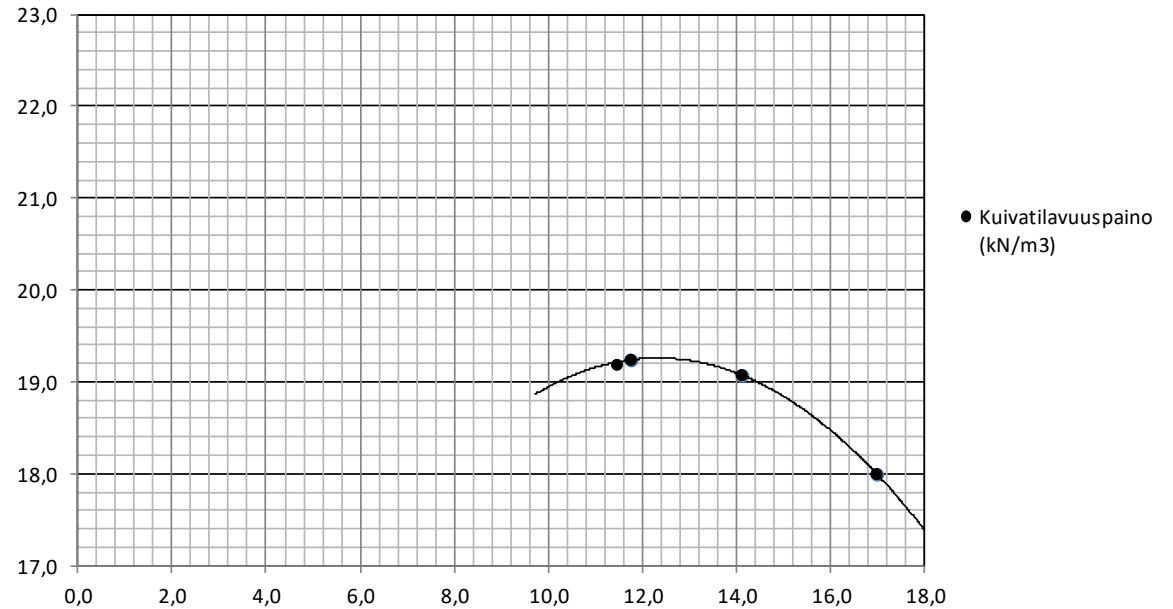
γ_{dmaks}	21,38
γ'_{dmaks}	21,60

w_{opt}	6,12
w'_{opt}	5,78

Tiivistyvyys

Näyte	M1			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	4411,9	4181,2	3984,3	3812,7
Haluttu kosteus	17	14,5	11	12,5
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	Ilmakuivaus	81,1
Kostea näyte + muotti	6526	6592,5	6556,1	6567,4
Muotin massa	4571,3	4571,3	4571,2	4571,2
Näytteen massa kosteana (m(w))	1954,7	2021,2	1984,9	1996,2
Kostea näyte + astia	117,2	107,2	105,7	107,5
Kostea näyte	113,6	103,5	102,1	103,8
Kuiva näyte + astia	100,7	94,4	95,2	96,6
Astian massa	3,6	3,7	3,6	3,7
Kuiva näyte	97,1	90,7	91,6	92,9
Veden massa	16,5	12,8	10,5	10,9
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	14,52	12,37	10,28	10,50
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	16,99	14,11	11,46	11,73
Näytteen massa kuivana (Md)	1670,8	1771,2	1780,8	1786,6
Irtotiheys	2,146	2,219	2,179	2,191
Tilavuuspaino	21,049	21,765	21,374	21,496
Kuivairtotiheys	1,834	1,944	1,955	1,961
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	17,992	19,073	19,176	19,239

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	0 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	0,00

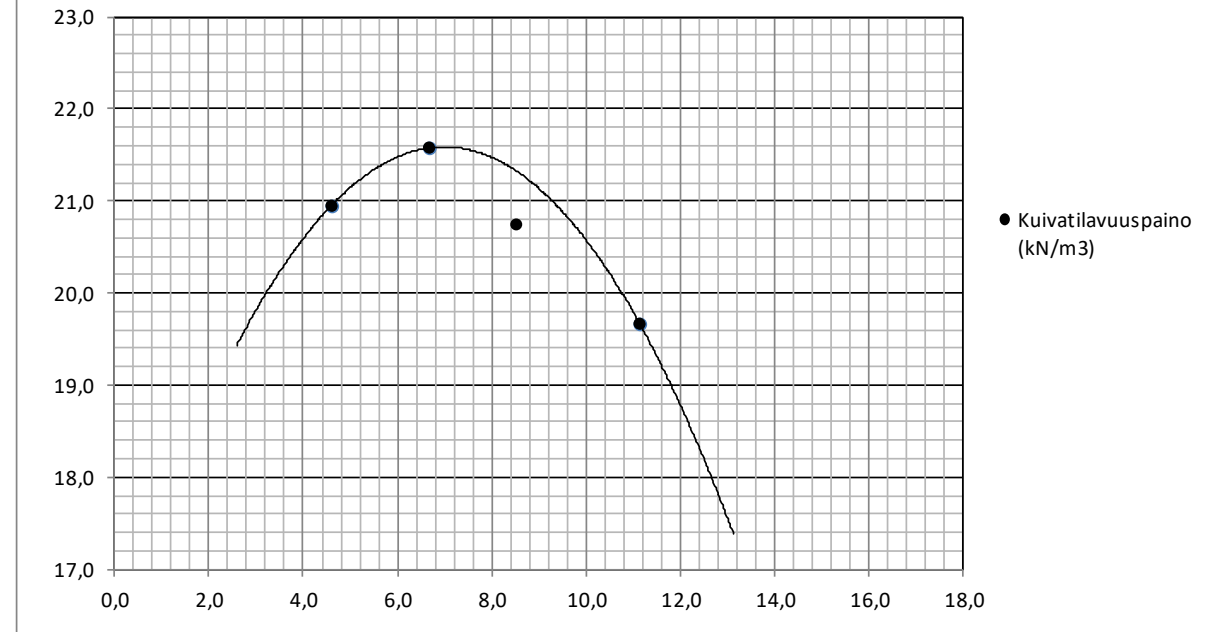
γ_{dmaks}	19,26
γ'_{dmaks}	19,26

w_{opt}	12,32
w'_{opt}	12,32

Tiivistyvyys

Näyte	P1			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	5049,8	4771,2	5048	
Haluttu kosteus	~9	~11	~4	~6
Lisätty vesimäärä	-	104,4	Ilmakuivaus	75,3
Kosteaa näyte + muotti	6662,4	6602	6606,6	6708,9
Muotin massa	4571,8	4571,8	4571,8	4571,8
Näytteen massa kosteana (m(w))	2090,6	2030,2	2034,8	2137,1
Kosteaa näyte + astia	111,9	116,4	117,4	114,1
Kosteaa näyte	108,3	112,8	113,8	110,5
Kuiva näyte + astia	103,4	105,1	112,4	107,2
Astian massa	3,6	3,6	3,6	3,6
Kuiva näyte	99,8	101,5	108,8	103,6
Veden massa	8,5	11,3	5	6,9
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	7,85	10,02	4,39	6,24
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	8,52	11,13	4,60	6,66
Näytteen massa kuivana (Md)	1926,5	1826,8	1945,4	2003,7
Irtotiheys	2,295	2,229	2,234	2,346
Tilavuuspaino	22,512	21,862	21,912	23,013
Kuivairtoteheys	2,115	2,005	2,135	2,199
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	20,745	19,672	20,949	21,576

Poistettujen rakeiden irtoteheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	245,6 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	4,86

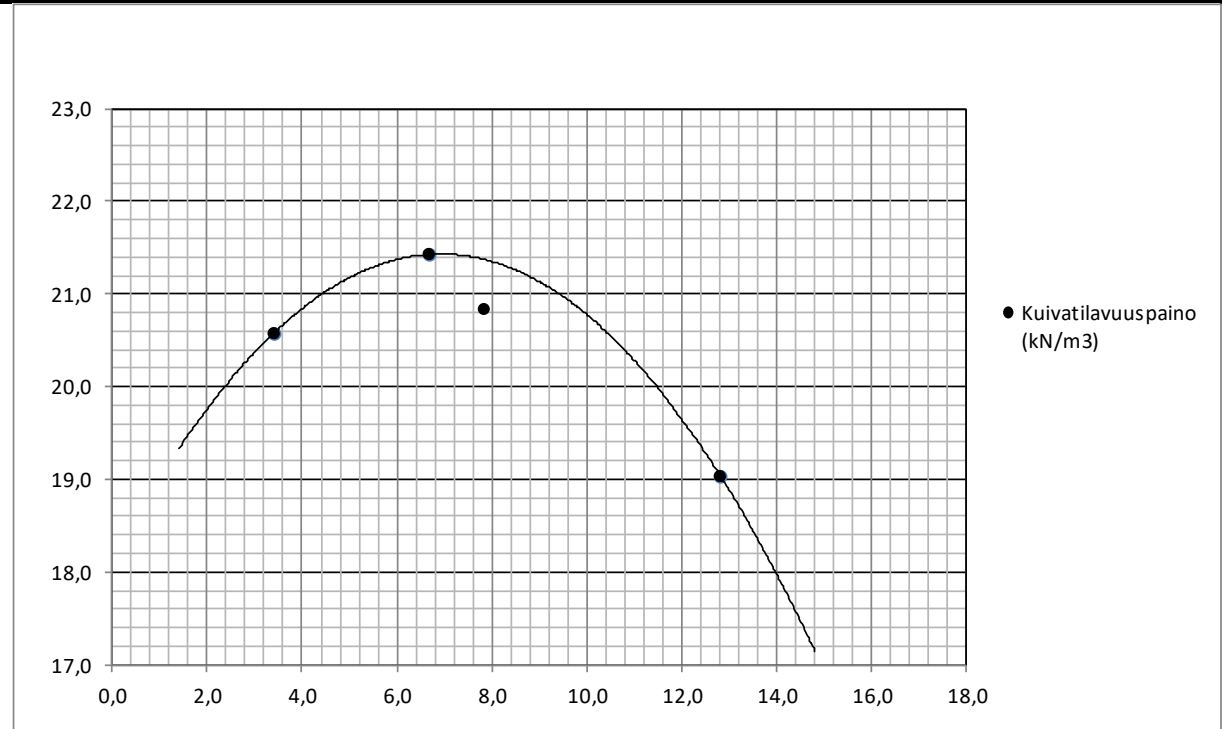
γ_{dmaks}	21,58
γ'_{dmaks}	21,76

w_{opt}	6,45
w'_{opt}	6,14

Tiivistyvyys

Näyte	P2			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	4419,1	4771,2	5048	
Haluttu kosteus	6	~4	~8	~10
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	180	119
Kosteaa näyte + muotti	6694	6548	6658,7	6566,4
Muotin massa	4571,6	4571,6	4571,6	4571,6
Näytteen massa kosteana (m(w))	2122,4	1976,4	2087,1	1994,8
Kosteaa näyte + astia	109,4	109,6	110,9	108,4
Kosteaa näyte	105,6	106,1	107,4	104,8
Kuiva näyte + astia	102,8	106,1	103,1	96,5
Astian massa	3,8	3,5	3,5	3,6
Kuiva näyte	99	102,6	99,6	92,9
Veden massa	6,6	3,5	7,8	11,9
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	6,25	3,30	7,26	11,35
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	6,67	3,41	7,83	12,81
Näytteen massa kuivana (Md)	1989,8	1911,2	1935,5	1768,3
Irtotiheys	2,330	2,169	2,291	2,190
Tilavuuspaino	22,855	21,283	22,475	21,481
Kuivairtotiheys	2,184	2,098	2,125	1,941
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	21,426	20,581	20,842	19,042

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	243,5 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	5,51

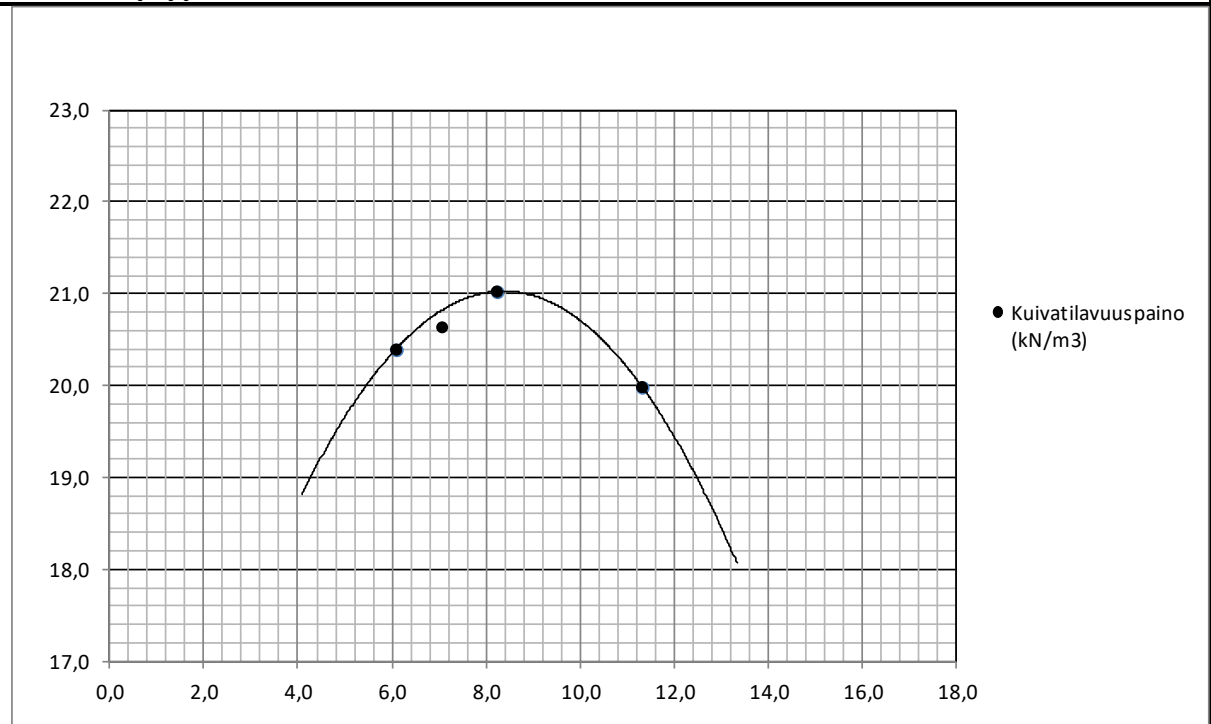
γ_{dmaks}	21,43
γ'_{dmaks}	21,64

w_{opt}	6,92
w'_{opt}	6,54

Tiivistävyys

Näyte	P3			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	5049,8	4771,2	5048	
Haluttu kosteus	10,6	~6	~5	8
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	Ilmakuivaus	114
Kostea näyte + muotti	6636,6	6623,3	6580,3	6684,5
Muotin massa	4571,3	4571,3	4571,3	4571,3
Näytteen massa kosteana (m(w))	2065,3	2052	2009	2113,2
Kostea näyte + astia	110,8	106,7	108,4	103,5
Kostea näyte	107,1	103,1	104,7	99,9
Kuiva näyte + astia	99,9	99,9	102,4	95,9
Astian massa	3,7	3,6	3,7	3,6
Kuiva näyte	96,2	96,3	98,7	92,3
Veden massa	10,9	6,8	6	7,6
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	10,18	6,60	5,73	7,61
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	11,33	7,06	6,08	8,23
Näytteen massa kuivana (Md)	1855,1	1916,7	1893,9	1952,4
Irtotiheys	2,267	2,252	2,205	2,320
Tilavuuspaino	22,240	22,097	21,634	22,756
Kuivairtotiheys	2,036	2,104	2,079	2,143
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	19,976	20,639	20,394	21,025

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	48,5 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	0,96

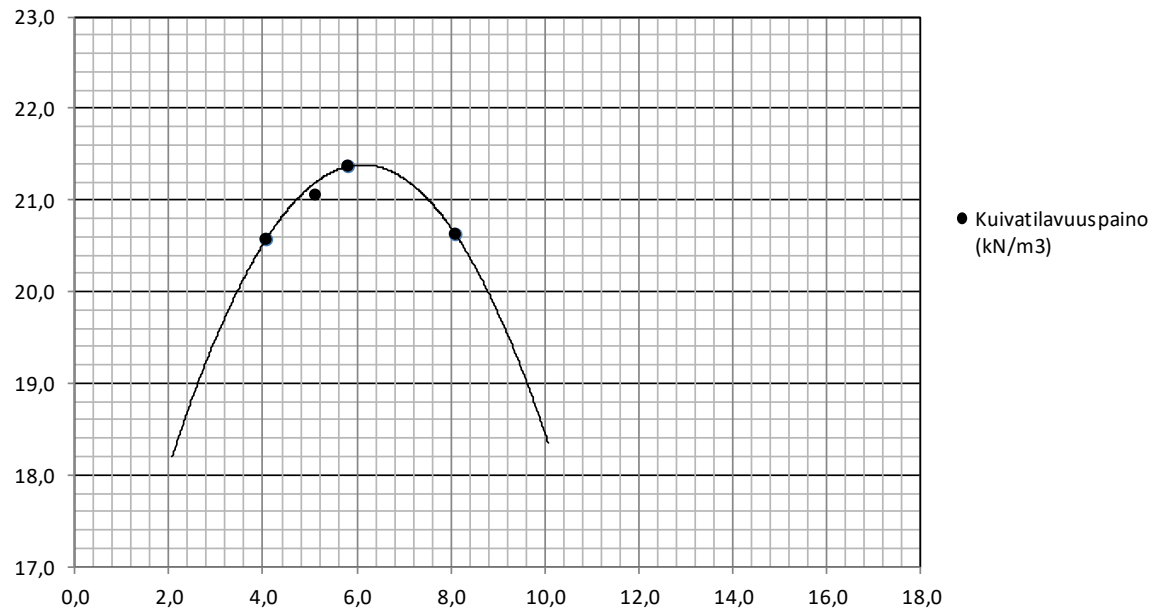
γ_{dmaks}	21,03
γ'_{dmaks}	21,06

w_{opt}	8,37
w'_{opt}	8,29

Tiivistyvyys

Näyte	P4			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	5758,5	5082,1	5048	
Haluttu kosteus	5	~4	~7	~10
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	78,4	152
Kosteaa näyte + muotti	6626,5	6559,2	6671	6643,3
Muotin massa	4571,3	4571,3	4571,3	4571,3
Näytteen massa kosteana (m(w))	2055,2	1987,9	2099,7	2071,7
Kosteaa näyte + astia	106,3	105,9	105,7	116
Kosteaa näyte	102,7	102,3	101,9	112,4
Kuiva näyte + astia	101,3	101,9	100,1	107,6
Astian massa	3,6	3,6	3,8	3,6
Kuiva näyte	97,7	98,3	96,3	104
Veden massa	5	4	5,6	8,4
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	4,87	3,91	5,50	7,47
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	5,12	4,07	5,82	8,08
Näytteen massa kuivana (Md)	1955,1	1910,2	1984,3	1916,9
Irtotiheys	2,256	2,182	2,305	2,274
Tilavuuspaino	22,131	21,406	22,610	22,309
Kuivairtotiheys	2,146	2,097	2,178	2,104
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	21,054	20,569	21,368	20,642

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	211,4 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	3,67

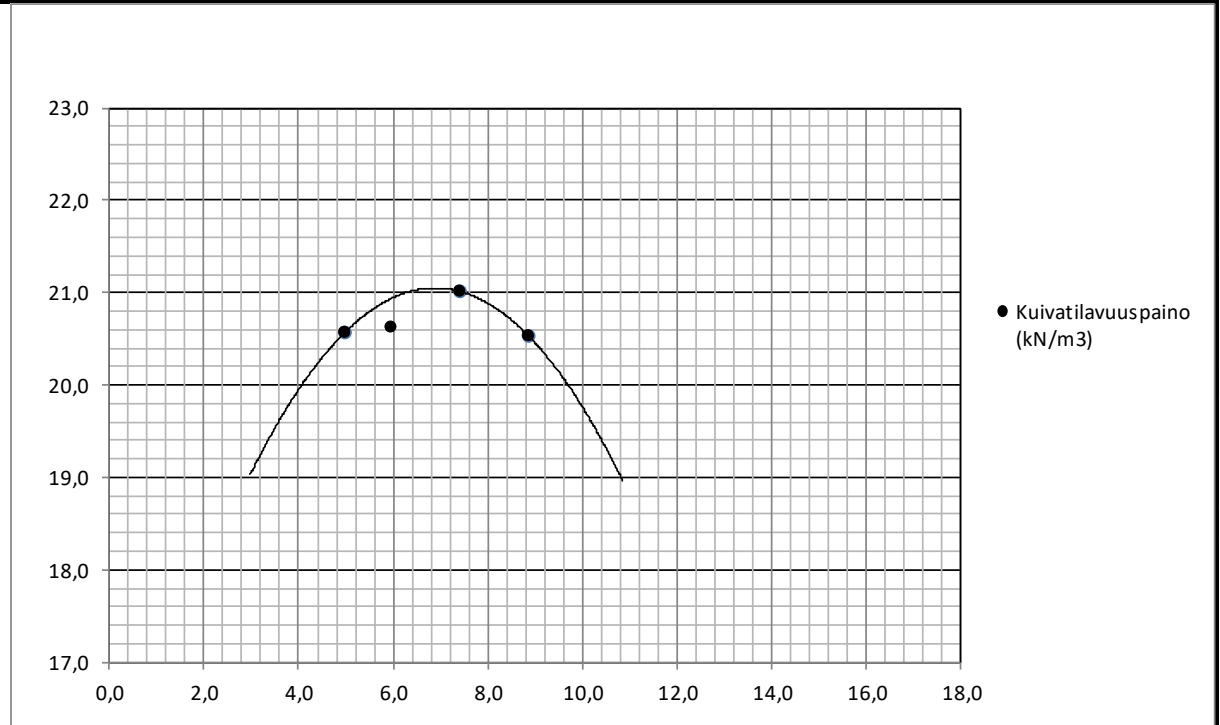
γ_{dmaks}	21,39
γ'_{dmaks}	21,53

w_{opt}	6,12
w'_{opt}	5,89

Tiivistävyys

Näyte	S1			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	5133,7	5049,8	5049,8	5049,8
Haluttu kosteus	5,9	11,6	12,6	13,6
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	131,8	68
Kosteaa näyte + muotti	6601,5	6576,2	6667,1	6646,8
Muotin massa	4571,1	4570,8	4571,2	4570,9
Näytteen massa kosteana (m(w))	2030,4	2005,4	2095,9	2075,9
Kosteaa näyte + astia	107,2	107	108,3	108,2
Kosteaa näyte	103,7	103,3	104,7	104,5
Kuiva näyte + astia	101,4	102,1	101,1	99,7
Astian massa	3,5	3,7	3,6	3,7
Kuiva näyte	97,9	98,4	97,5	96
Veden massa	5,8	4,9	7,2	8,5
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	5,59	4,74	6,88	8,13
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	5,92	4,98	7,38	8,85
Näytteen massa kuivana (Md)	1916,8	1910,3	1951,8	1907,0
Irtotiheys	2,229	2,201	2,301	2,279
Tilavuuspaino	21,864	21,595	22,569	22,354
Kuivairtotiheys	2,104	2,097	2,142	2,093
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	20,641	20,571	21,017	20,536

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	250,9 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	4,89

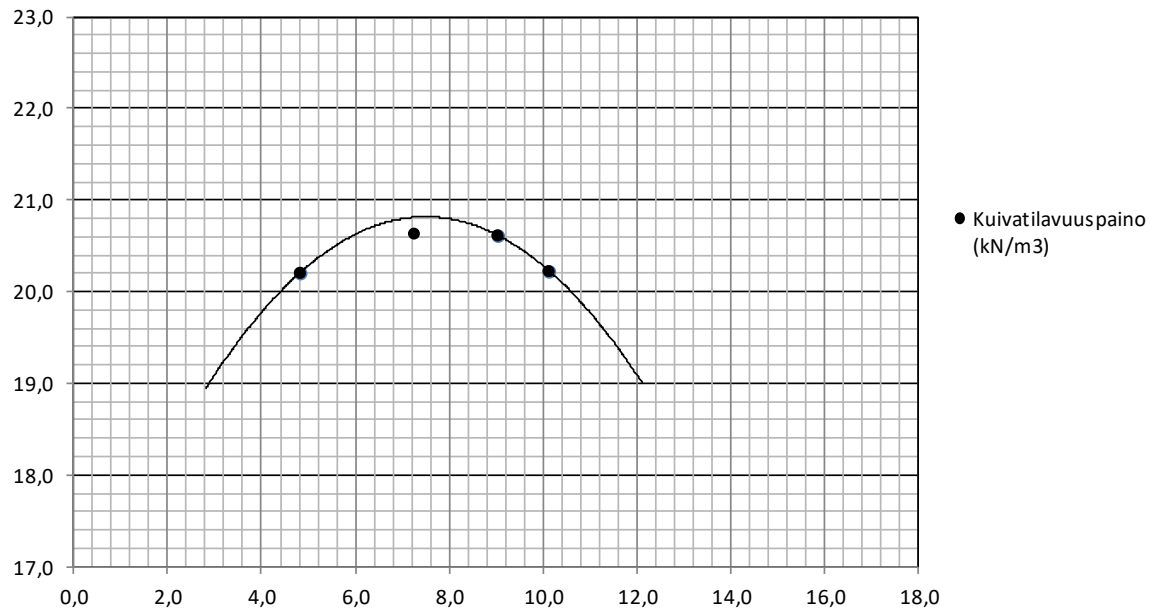
γ_{dmaks}	21,05
γ'_{dmaks}	21,25

w_{opt}	6,88
w'_{opt}	6,55

Tiivistyvyys

Näyte	S2			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	4586			
Haluttu kosteus	7	5	<9	10
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	162	43,3
Kostea näyte + muotti	6626,5	6536,9	6658,6	6640,3
Muotin massa	4571,3	4571	4571	4571,3
Näytteen massa kosteana (m(w))	2055,2	1965,9	2087,6	2069
Kostea näyte + astia	105,5	106,1	106,3	105,9
Kostea näyte	101,9	102,5	102,7	102,3
Kuiva näyte + astia	98,6	101,4	97,8	96,5
Astian massa	3,6	3,6	3,6	3,6
Kuiva näyte	95	97,8	94,2	92,9
Veden massa	6,9	4,7	8,5	9,4
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	6,77	4,59	8,28	9,19
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	7,26	4,81	9,02	10,12
Näytteen massa kuivana (Md)	1916,0	1875,8	1914,8	1878,9
Irtotiheys	2,256	2,158	2,292	2,271
Tilavuuspaino	22,131	21,170	22,480	22,280
Kuivairtotiheys	2,103	2,059	2,102	2,062
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	20,633	20,199	20,620	20,233

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	225,8 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):

k	4,69
---	------

γ_{dmaks}

20,69
γ'_{dmaks}
20,89

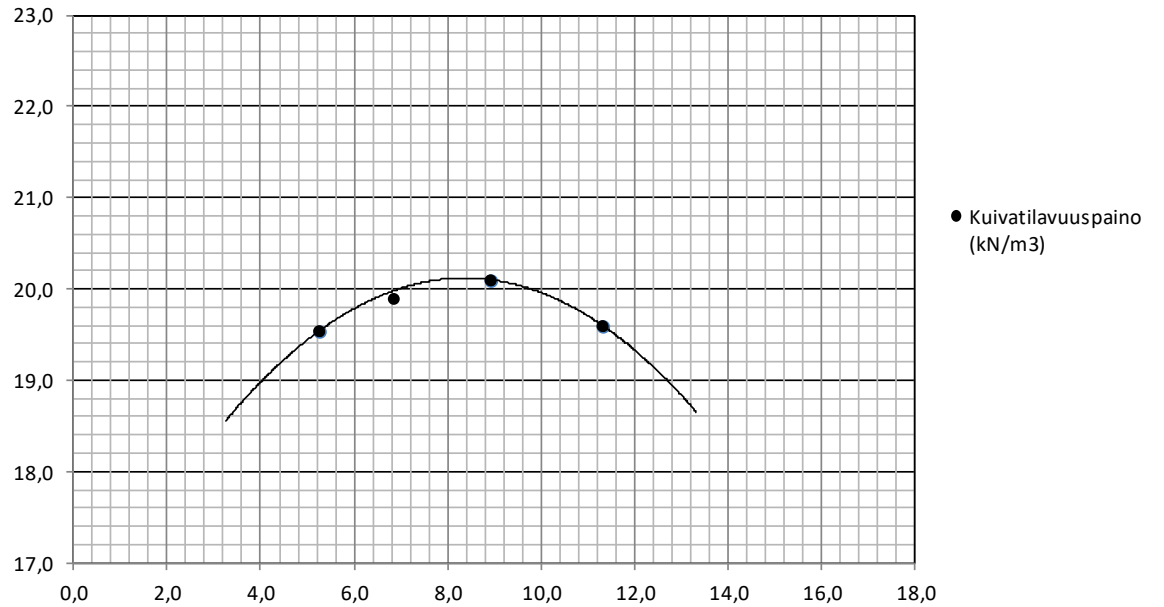
w_{opt}

7,58
w'_{opt}
7,22

Tiivistyvyys

Näyte	V1			
Sullonta	I	II	III	IV
Näytteen massa	4650	4413	4300,1	4260,7
Haluttu kosteus	11,5	~4	~6,75	~8,6
Lisätty vesimäärä	-	Ilmakuivaus	83,9	83,9
Kosteä näyte + muotti	6597,2	6480,5	6543,8	6604,3
Muotin massa	4571,3	4571,2	4571,3	4571,3
Näytteen massa kosteana (m(w))	2025,9	1909,3	1972,5	2033
Kosteä näyte + astia	105,9	110	113,1	108,8
Kosteä näyte	102,2	106,4	109,4	105,2
Kuiva näyte + astia	95,5	104,7	106,1	100,2
Astian massa	3,7	3,6	3,7	3,6
Kuiva näyte	91,8	101,1	102,4	96,6
Veden massa	10,4	5,3	7	8,6
Vesipitoisuus kosteasta massasta (ww)	10,18	4,98	6,40	8,17
Vesipitoisuus kuivasta massasta (wd)	11,33	5,24	6,84	8,90
Näytteen massa kuivana (Md)	1819,7	1814,2	1846,3	1866,8
Irtotiheys	2,224	2,096	2,165	2,232
Tilavuuspaino	21,816	20,560	21,241	21,892
Kuivairtotiheys	1,998	1,991	2,027	2,049
Kuivatilavuuspaino (kN/m ³)	19,596	19,536	19,882	20,102

Poistettujen rakeiden irtotiheys	2,65 g/cm ³
Proctor sylinterin tilavuus	911 cm ³
>16mm rakeiden massa	521,2 g



Ylisuurten rakeiden osuus (%):	
k	3,87

γ_{dmaks}	20,123
γ'_{dmaks}	20,300

w_{opt}	8,37
w'_{opt}	8,05

Liite 3. Kartiokokeet

Kartiokoe

Näyte **E1**

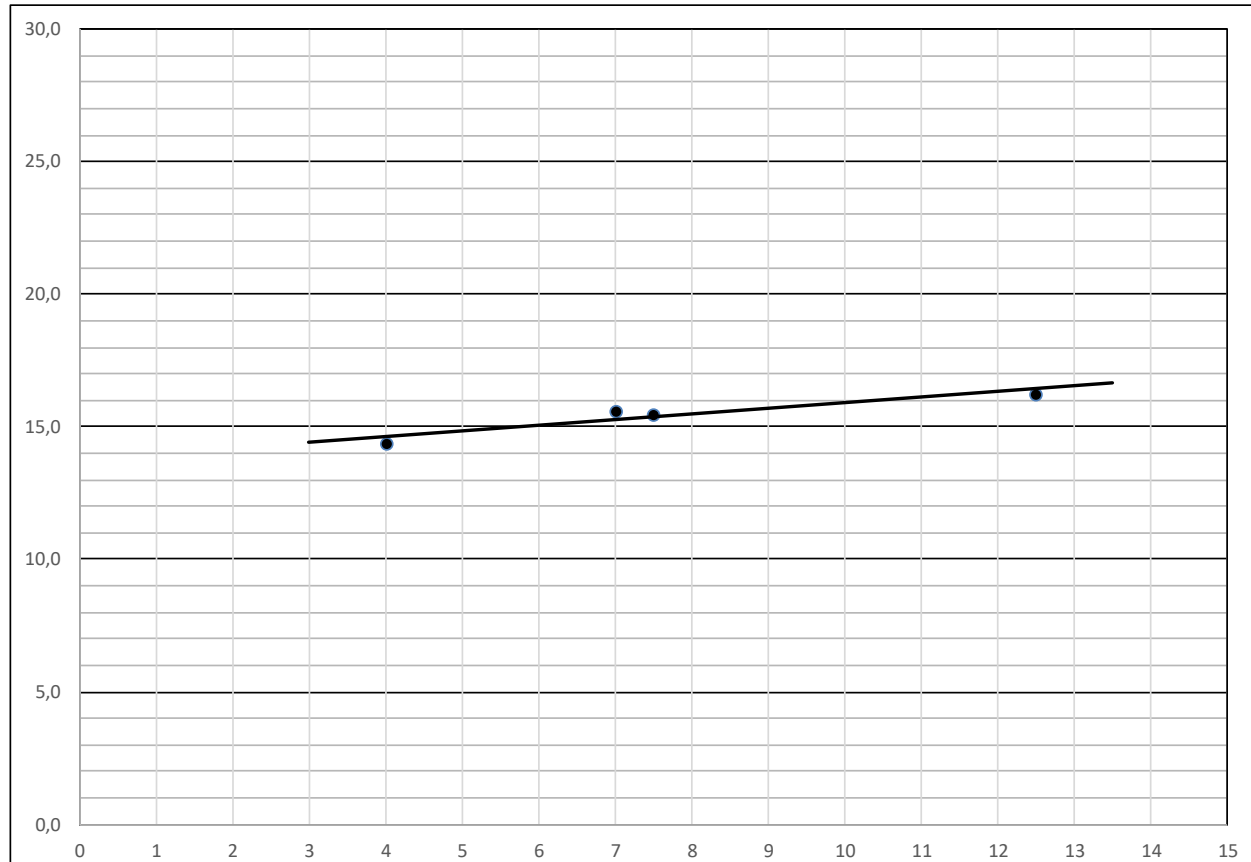
Pudotukset

I		II		III		IV	
ap	3,5	ap	12,5	ap	13	ap	9
1	5,5	1	12,5	1	6,5	1	8
2	2,5			2	7	2	7
3	3,5			3	7	3	8
4	4					4	7,5
5	3					5	7,5
6	4						
7	4						
ka	4	ka	12,5	ka	7	ka	7,5

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV
astia	0,83	0,82	0,84	0,81
m_w	11,66	10,61	11,2	10,8
m_d	10,3	9,24	9,8	9,46
w_k	14,4	16,3	15,6	15,5

Juoksuraja **16**



Kartiokoe

Näyte E2

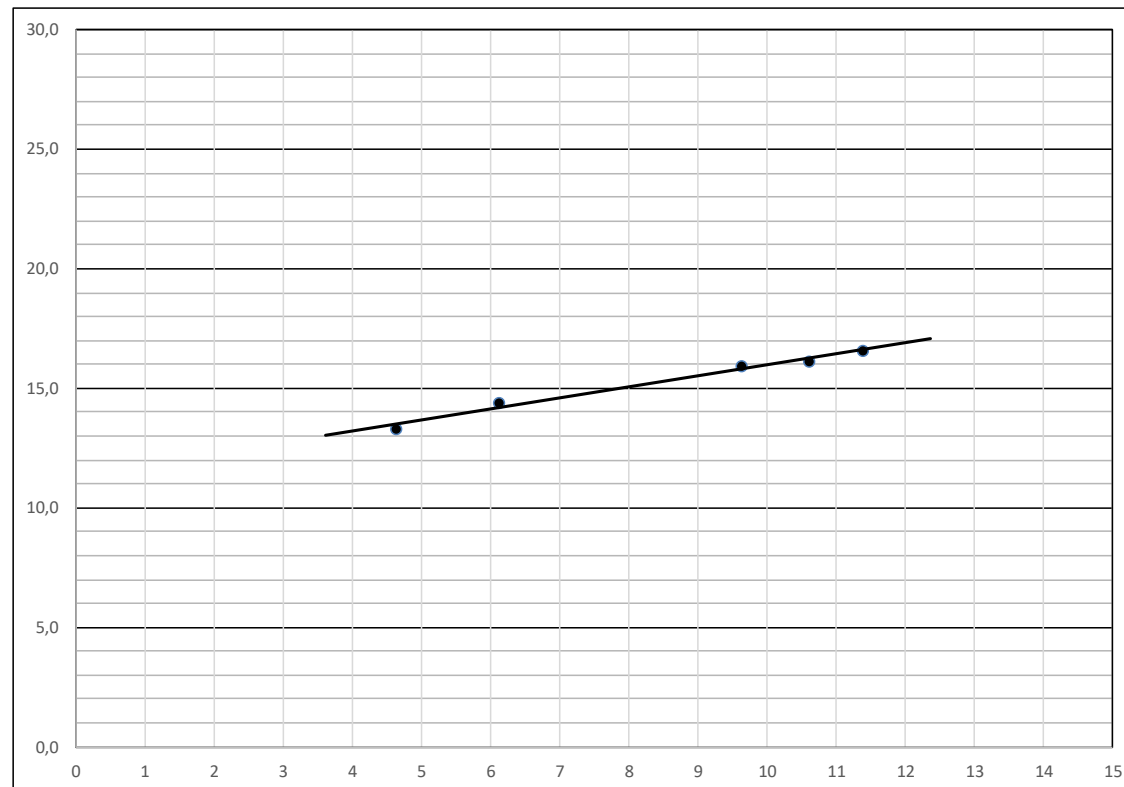
Pudotukset

I		II		III		IV		V	
ap	9,5	ap	10,5	ap	4	ap	7	ap	9
1	10,5	1	11	1	4,75	1	7,25	1	10,25
2	10	2	10,5	2	5,25	2	6,75	2	11,5
3	9,5	3	10,7	3	4,75	3	6	3	11,5
4	9,75			4	6	4	6,25	4	11,25
				5	4,75				
				6	4,5				
ka	9,625	ka	10,6	ka	4,625	ka	6,125	ka	11,375

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV	V
astia	0,81	0,81	0,82	0,8	0,73
m_w	18,49	19,9	17,99	18,63	19,75
m_d	16,06	17,25	15,97	16,38	17,04
w_k	15,9	16,1	13,3	14,4	16,6

Juoksuraja 16



Kartiokoe

Näyte **II**

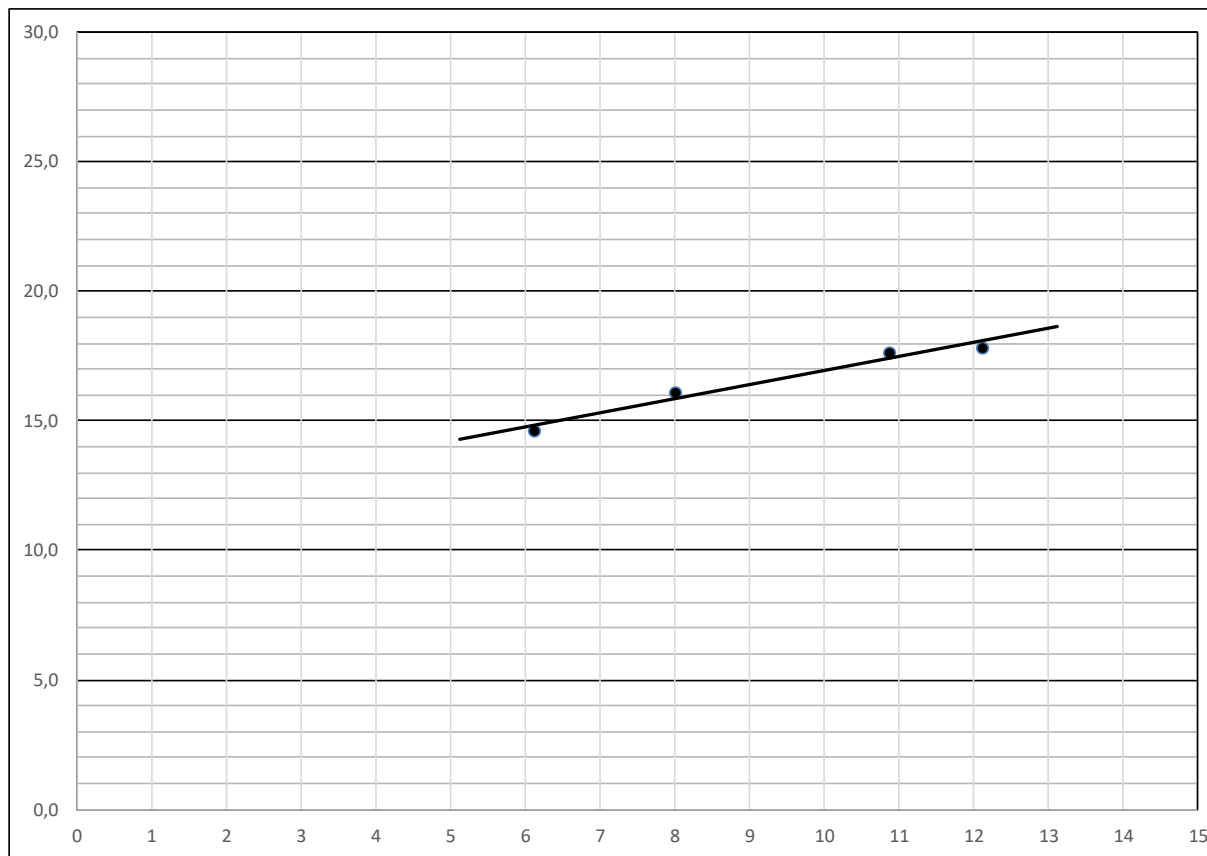
Pudotukset

I		II		III		IV	
ap	10	ap	12	ap	7,5	ap	7
1	11	1	12,75	1	7,75	1	5,75
2	10,5	2	13	2	9,25	2	6,75
3	11	3	11	3	7,25	3	6,25
4	10	4	12	4	8	4	6
5	11	5	12,25	5	7		
6	10,75			6	8		
				7	8		
ka	10,875	ka	12,125	ka	8	ka	6,125

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV
astia	0,82	0,8	0,8	0,8
m_w	18,96	20,51	18,6	22,2
m_d	16,24	17,53	16,13	19,47
w_k	17,6	17,8	16,1	14,6

Juoksuraja **17**



Kartiokoe

Näyte **M1**

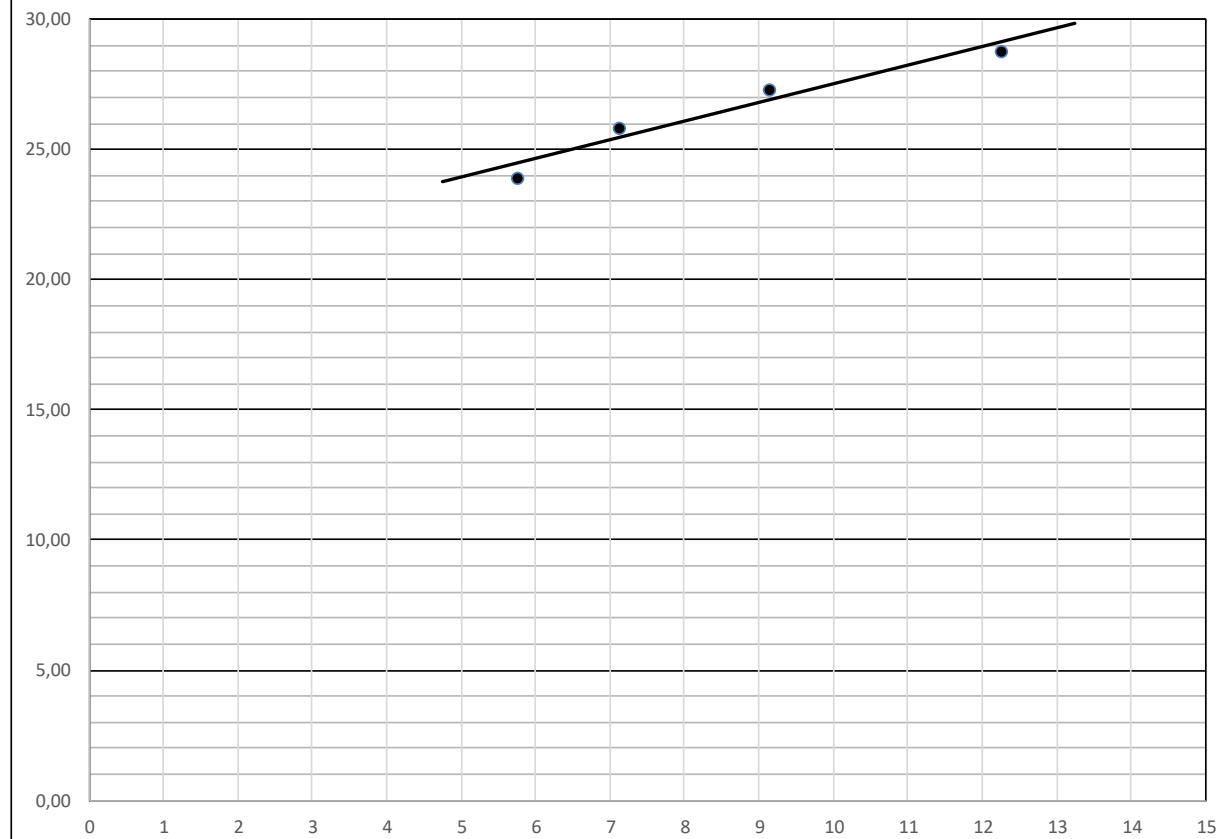
Pudotukset

I		II		III		IV	
ap	10	ap	13	ap	7	ap	5,25
1	9,5	1	12,5	1	7	1	5,75
2	9	2	12	2	7,25	2	5,75
3	9,25		13	3			
			13,5				
			12,5				
			12				
ka	9,125	ka	12,25	ka	7,125	ka	5,75

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV
astia	0,81	0,8	1,62	0,82
m_w	18,99	18,01	20,72	19,09
m_d	15,09	14,16	16,80	15,56
w_k	27,31	28,82	25,82	23,95

Juoksuraja **27,5**



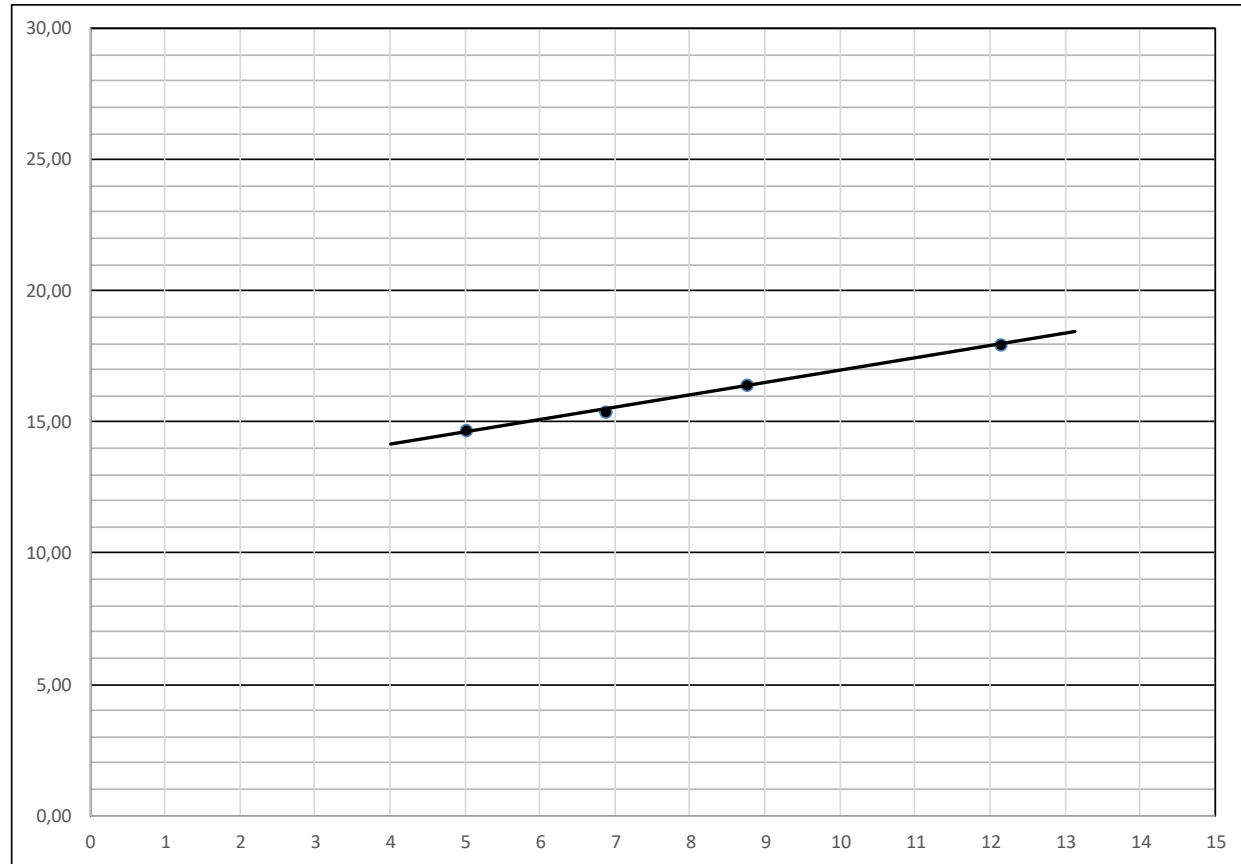
Kartiokoe

Näyte | **P1**

Pudotukset							
I		II		III		IV	
ap	5	ap	7,5	ap	8,75	ap	12,25
1	5	1	6,5	1	8,75	1	12,25
2	6	2	7,5	2	10	2	12
3	5	3	6	3	8,75		
4	5	4	7	4	8,75		
		5	6,75				
ka	5	ka	6,875	ka	8,75	ka	12,125

Vesipitoisuudet (w_k)				
	I	II	III	IV
astia	0,81	0,8	0,82	0,81
m_w	18,11	17,67	18,01	18,4
m_d	15,89	15,42	15,58	15,72
w_k	14,72	15,39	16,46	17,97

Juoksuraja | **17**



Kartiokoe

Näyte **P2**

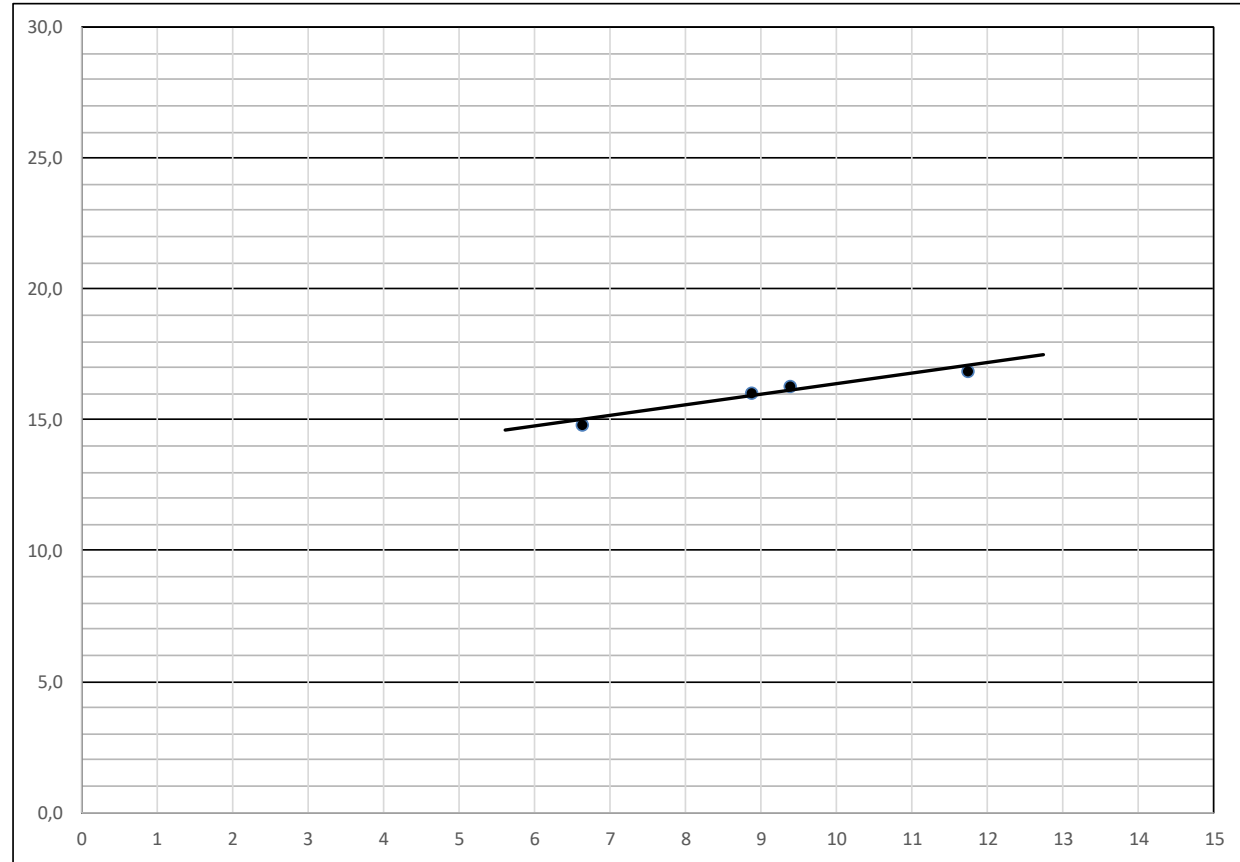
Pudotukset

I		II		III		IV	
ap	10	ap	10,25	ap	12	ap	5,25
1	8,75	1	9	1	11	1	6
2	9	2	10,5	2	12	2	6,75
		3	9,25	3	11,5	3	6,5
		4	9,5				
ka	8,875	ka	9,375	ka	11,75	ka	6,625

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV
astia	0,74	0,81	0,82	0,8
m_w	21,34	17,28	19,21	19,44
m_d	18,49	14,97	16,55	17,03
w_k	16,1	16,3	16,9	14,8

Juoksuraja **16,4**



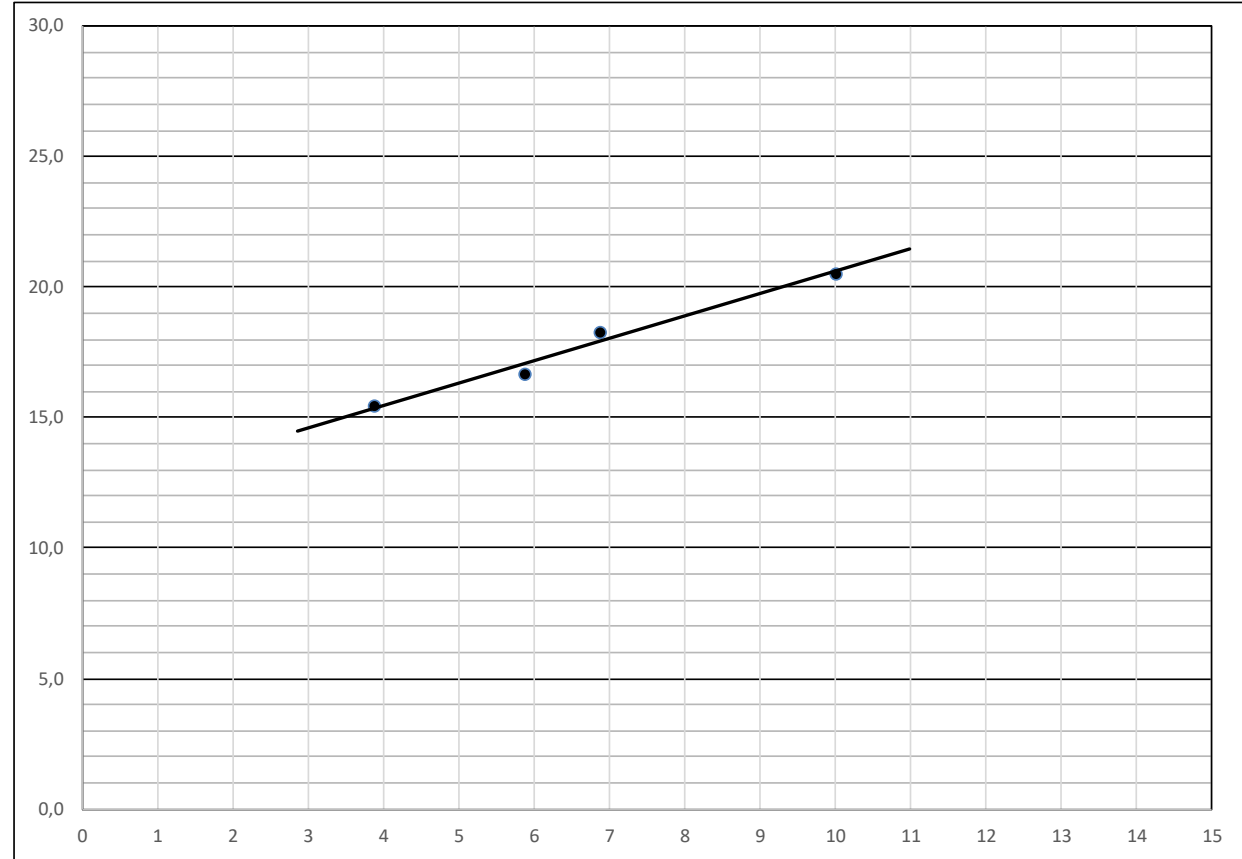
Kartiokoe

Näyte P3

Pudotukset							
I		II		III		IV	
ap	4	ap	5,25	ap	7	ap	11
1	3,75	1	5,75	1	6,75	1	10,5
2	4	2	6	2	7	2	9
3	4,45					3	8,5
4	3,75					4	11
5	4					5	10
						6	10
ka	3,875	ka	5,875	ka	6,875	ka	10

Vesipitoisuudet (w_k)				
	I	II	III	IV
astia	0,8	0,82	0,82	0,82
m_w	19,94	20,7	20,03	21,13
m_d	17,38	17,86	17,06	17,67
w_k	15,4	16,7	18,3	20,5

Juoksuraja 20,5



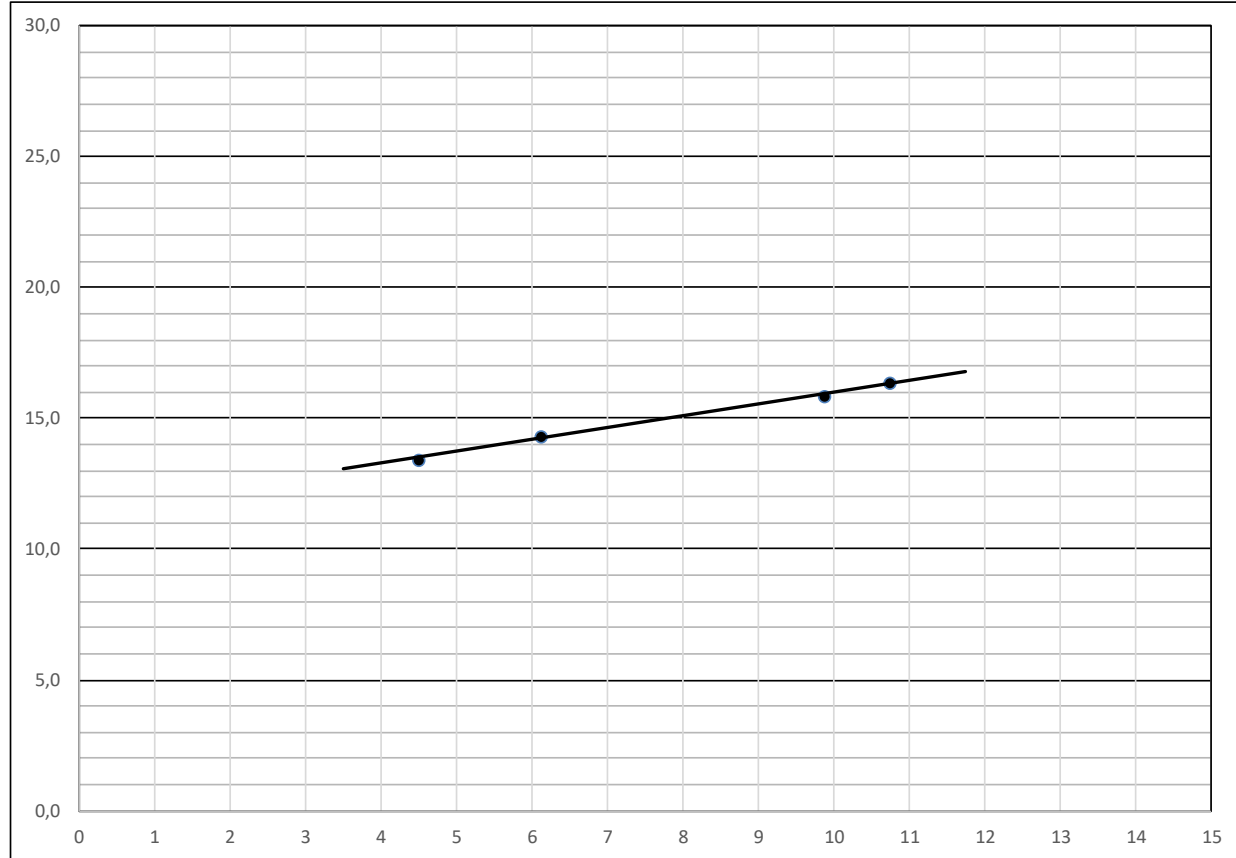
Kartiokoe

Näyte P4

Pudotukset							
I		II		III		IV	
ap	4,5	ap	7,25	ap	10	ap	12,25
1	4,5	1	6,25	1	9,75	1	11,25
2	4,5	2	6	2	10	2	10,75
		3	6,25	3	9,5	3	10
				4	10	4	10,75
				5	9,75	5	10,75
ka	4,5	ka	6,125	ka	9,875	ka	10,75

Vesipitoisuudet (w_k)				
	I	II	III	IV
astia	0,81	0,82	0,83	1,62
m_w	18,9	18,43	19,8	22,76
m_d	16,76	16,22	17,2	19,79
w_k	13,4	14,4	15,9	16,3

Juoksuraja 16



Kartiokoe

Näyte **S1**

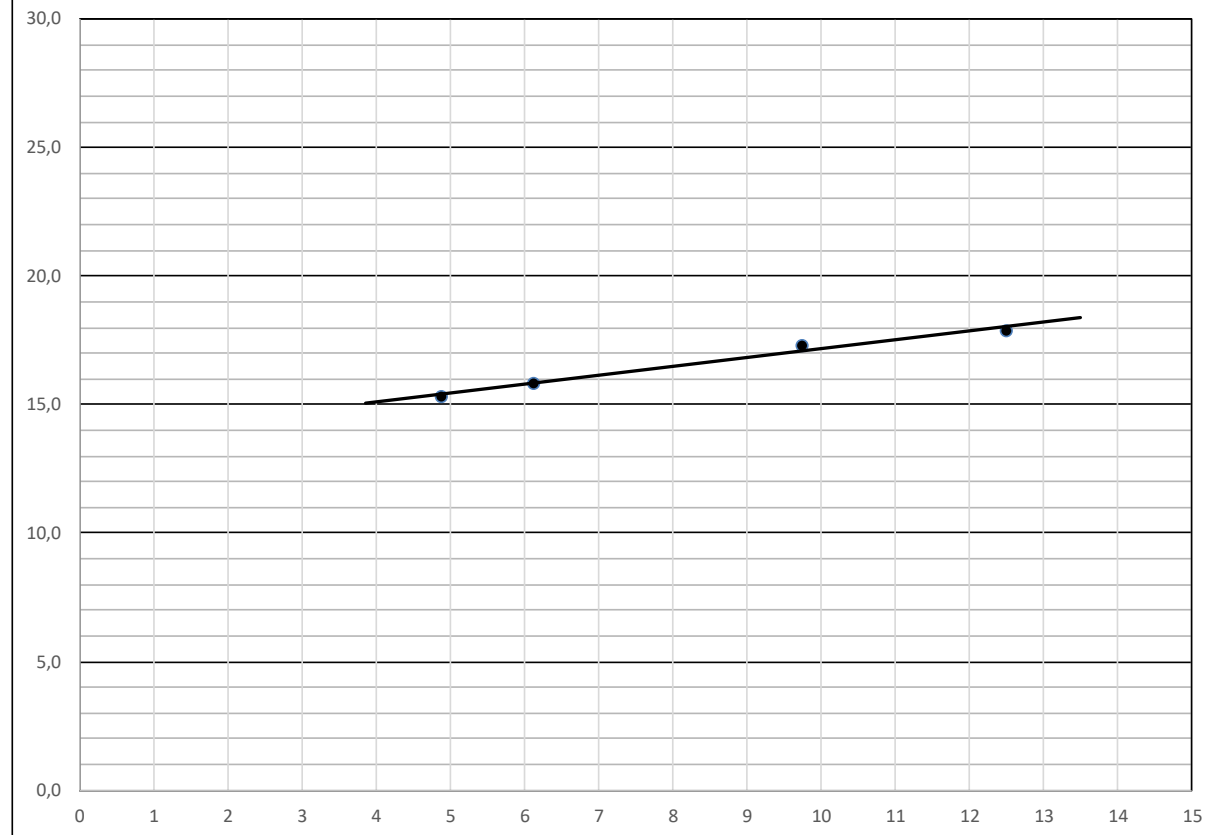
Pudotukset

I		II		III		IV	
ap	5	ap	6	ap	9,75	ap	13,5
1	5	1	6,25	1	9	1	13,5
2	4,75	2	7	2	9,5	2	14
		3	5,5	3	10	3	12,5
		4	6,5	4	9,5	4	12,5
		5	5,5				
		6	6,25				
		7	6				
ka	4,875	ka	6,125	ka	9,75	ka	12,5

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV
astia	0,72	0,72	0,82	0,81
m_w	20,01	20,98	20,75	20,87
m_d	17,44	18,21	17,81	17,82
w_k	15,4	15,8	17,3	17,9

Juoksuraja **17,1**



Kartiokoe

Näyte **S2**

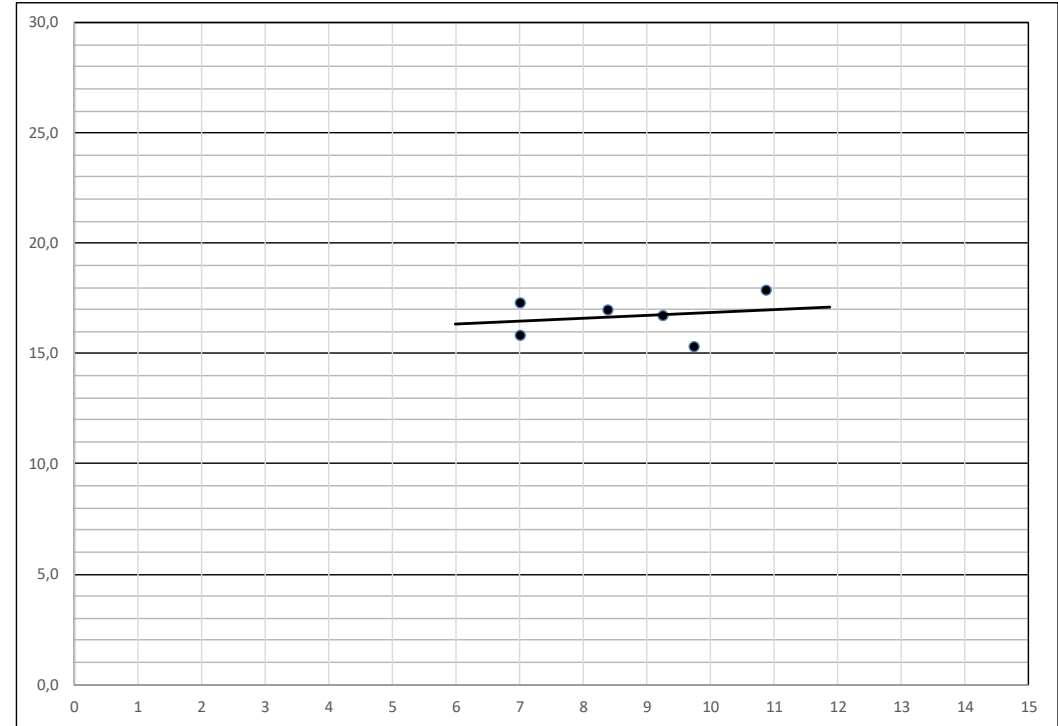
Pudotukset

I		II		III		IV		V		VI	
ap	10	ap	6,25	ap	6	ap	11	ap	11,5	ap	9,5
1	10,5	1	7	1	5,5	1	10,25	1	9,75	1	8,25
2	9	2	7	2	6,5	2	10,25	2	8,25	2	8,5
3	10			3	7,5	3	11	3	7,75	3	8,25
4	8,5			4	6,75	4	10,75	4	9,5		
5	12			5	7			5	9		
6	10			6	7						
7	9,5										
ka	9,75	ka	7	ka	7	ka	10,875	ka	9,25	ka	8,375

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV	V	VI
astia	0,72	0,72	0,82	0,81	0,809	0,8207
m_w	20,01	20,98	20,75	20,87	18,5445	25,1
m_d	17,44	18,21	17,81	17,82	16,0018	21,57
w_k	15,4	15,8	17,3	17,9	16,7	17,0

Juoksuraja **16,9**



Kartiokoe

Näyte **V1**

Pudotukset

I		II		III		IV	
ap	4	ap	9	ap	15	ap	11
1	3	1	7,5	1	14	1	10
2	4	2	7	2	14,5	2	10,5
3	4,5			3	13		
				4	13,5		
ka	4	ka	7,25	ka	13,25	ka	10,25

Vesipitoisuudet (w_k)

	I	II	III	IV
astia	0,85	0,85	0,82	2,2267
m_w	20,44	20,76	20,83	24,7959
m_d	17,23	17,36	17,27	20,9843
w_k	19,6	20,6	21,6	20,3

Juoksuraja **20,9**

