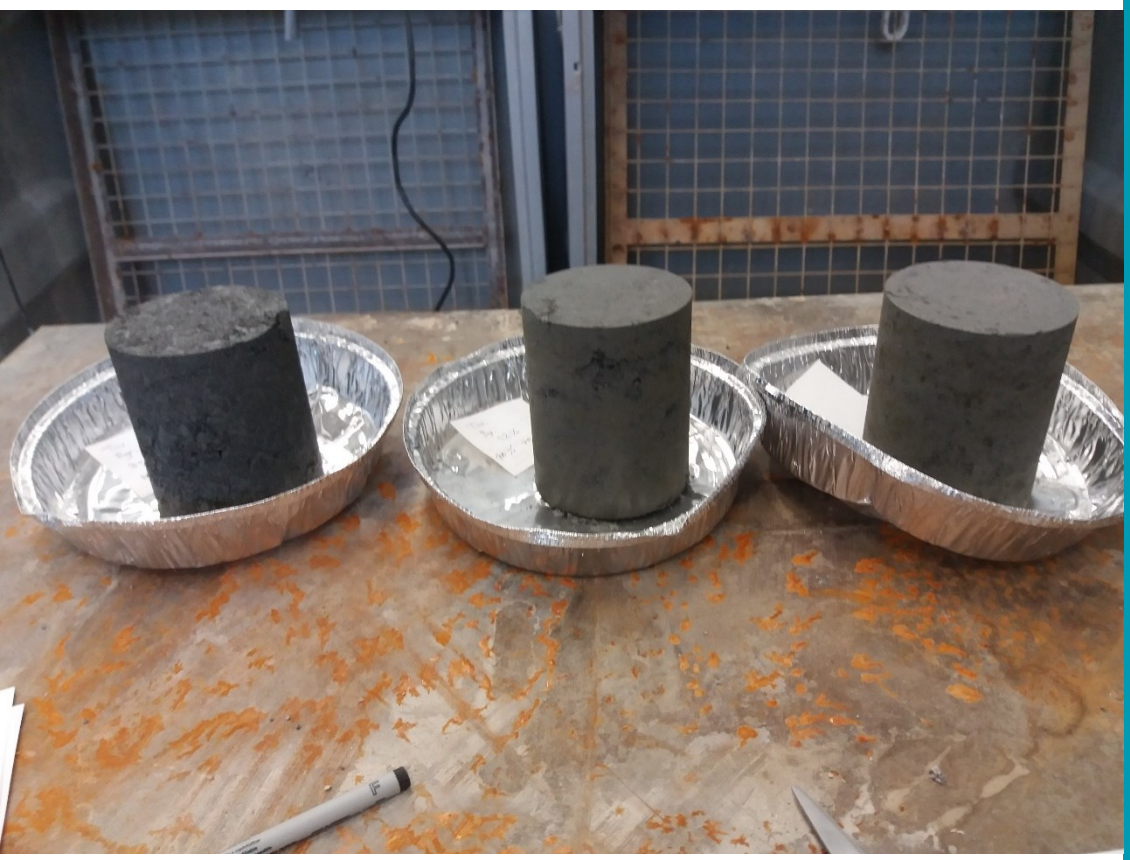
Janne Komulainen

# DustBinder-tuotteen käyttö kaivosalueiden pölynsidonnassa ja teiden stabiloinnissa



Insinööri (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatek-niikka

Kevät 2022

KAMK • University of Applied Sciences

## Tiivistelmä

**Tekijä(t)**: Komulainen Janne

**Työn nimi:** DustBinder-tuotteen käyttö kaivosalueiden pölynsidonnassa ja teiden stabiloinnissa.

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

**Asiasanat:** Kaivokset, kunnossapito, pölynsidonta, tiet

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, kuinka käsiteltävän kiviaineksen kivilaji ja hienoainespitoisuus vaikuttavat DustBinder-biopolymeerin vaikutukseen ja tehokkuuteen kaivosalueiden ja teiden pölynsidonnassa ja stabiloinnissa. Tutkimukset suoritettiin laboratoriokokeilla, joissa verrattiin kahden eri kivilajin ja kolmen erilaisen rakeisuuskäyrän mukaisia näytteitä. Työ tehtiin Tapojärvi Oy:n ja Destia Oy:n toimeksiannosta. Työn ohjaukseen osallistui myös DustBinder-biopolymeerin kehittäjä, Mfibrils Oy:n Olli Mäentausta.

Tutkimukseen valittiin kaksi mineraalisesti ja kemiallisesti eroavaa kivilajia, joista ensimmäinen oli yleisesti käytetty graniitti ja toinen pyrokseniitti, joka on ominaisuuksiltaan lähestulkoon graniitin vastakohta. Hienoainespitoisuuden vaikutuksen tutkimista varten suunniteltiin kolme erilaista rakeisuuskäyrää, joiden hienoainespitoisuus oli joko ohjearvon mukainen, ohjearvon alittava tai ohjearvon ylittävä.

Laboratoriokokeita varten kahdesta kivilajista valmistettiin kolmen rakeisuuskäyrän mukaisia pölyävyysnäytteitä ja puristuskappaleita. Puristuskappaleiden puristuslujuus testattiin Kajaanin ammattikorkeakoulun koestuslaitteella. Näytteiden pölyävyyttä tutkittiin suorittamalla puhalluskokeita Tapojärvi Oy:n kehittämällä mobiili-tuulikammiolla. Tulokset dokumentoitiin kirjallisesti ja kuvallisesti.

Tutkimustulosten perusteella voidaan päätellä, ettei kivilajien eroilla ole suurta vaikutusta DustBinderin pölynsitovuuteen. Hienoainespitoisuudella taas oli havaittavissa selkeä vaikutus DustBinderin tehokkuuteen. Jatkotutkimuksissa tulisikin ottaa huomioon käsiteltävän kiviaineksen hienoainespitoisuus. Puristuskokeissa pyrokseniittikappaleet kestivät graniittikappaleita paremmin. Mineralogisena syynä tähän voi saviminerаalien läsnäolo, joilla on havaittu olevan parantavaa vaikutusta kiviaineksen tiivistymiseen DustBinderin yhteisvaikutuksessa. Pölynsidonnan ja teiden stabiloinnin kannalta voidaan kuitenkin päätellä kivilajien eroilla ja hienoainespitoisuudella olevan vaikutusta DustBinderin toimivuuteen.

## Abstract

**Author(s):** Komulainen Janne

**Title of the Publication:** Dust Binding and Stabilization of Mining Areas and Roads with DustBinder

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Construction and Civil Engineering

**Keywords:** Dust binding, maintenance, mining, roads

The goal of this thesis was to study how the rock type and fine aggregate content of the treated rock material effects the DustBinder-biopolymers dust binding and stabilization efficiency in mining areas and roads. Thesis was commisioned by Tapojärvi Ltd and Destia Ltd. The Dust-Binder's developer, Olli Mäentausta of Mfibrils Ltd, also participated in the guidance of the thesis.

Two minerally and chemically distinct rock types were selected for the research, the first being commonly used granite and the second being pyroxenite, which in its properties is almost the opposite of granite. Three different granularity curves were designed to study the effect of fine aggregate content, with fine aggregate content either in accordance, below or above the guideline value.

For laboratory experiments, dusting samples and compression pieces of two types of rocks, consistent with three different granularity curves were prepared. The compressive strength of the compressive bodies was tested using a test device from Kajaani University of Applied Sciences. The dusting of the samples was studied by air blasting them in a mobile wind chamber developed by Tapojärvi Ltd. The results were documented in writing and with pictures.

Based on the results of the research, it can be concluded that differences in rock types do not have a major impact on DustBinder's dust binding. The fine substance content, on the other hand, had a clear effect on the effectiveness of DustBinder. Further studies should therefore take into account the fine aggregate content of the treated rock material. In compression experiments, pyroxenite bodies were more resistant to granite bodies. A mineralogical reason for this may be the presence of clay minerals, which have been found to have an improving effect on aggregate compaction in the interaction with DustBinder. However, from the point of view of dust binding and road stabilization, one can conclude that differences in rock types and fine aggregate content do have an effect on the functionality of DustBinder.

Sisällys


1 Johdanto ..... 1

2 Pölyävyys sorateillä ja kaivosalueilla ..... 2

2.1 Haitat, sääntely ja lainsäädäntö ..... 3

2.2 Pölynsidonta- ja pölynestomenetelmät ..... 7

2.3 Ympäristö- ja turvallisuusnäkökulma ..... 8

3 Teiden dynaaminen kantavuus ..... 12

3.1 Kelirikkko ..... 12

3.2 Julkishallinnon tiet vs. kaivosympäristö ..... 13

4 DustBinder ..... 15

4.1 Yleiskuvaus ja toimintaperiaate ..... 15

4.2 Selluteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen ..... 16

5 Kivilajit ..... 17

5.1 Graniitti ..... 18

5.2 Pyrokseniitti ..... 19

6 Aiemmat tutkimukset ..... 20

6.1 Suoritetut tutkimukset ..... 20

6.2 Tulokset ja johtopäätökset ..... 21

7 Testimenetelmät ..... 23

7.1 Rakeisuus ..... 23

7.2 Pölyävyys ..... 25

7.3 Puristuslujuus ..... 28

8 Laboratoriokokeet ..... 30

8.1 Rakeisuus ..... 30

8.2 Pölyävyys ..... 31

8.3 Puristuslujuus ..... 33

9 Tulokset ..... 35

9.1 Pölyävyys ..... 36

9.2 Puristuslujuus ..... 40

10 Tulosten tarkastelu ..... 46

11 Yhteenveto ..... 48

Lähteet ..... 49

Liitteet

# 1 Johdanto

Sorateiden pölyävyys ja rakenteelliset epätasaisuudet ovat jokakesäinen haitta niin tienkäyttäjille kuin kunnossapidosta vastaaville. Tien pölyäminen aiheuttaa haittaa lähialueen asukkaille ja ympäristölle. Kuoppainen ja epätasainen tie taas aiheuttaa vaaratilanteita ja kalustovaurioita tiellä kulkeville. Kuumimmat, vähäsateiset kesät voivat lisätä pölynsidonnan tarvetta huomattavasti. Yleisimpien käytössä olevien pölynsidonta-aineiden liikakäyttöä varjostaa niiden ympäristölliset haittavaikutukset. Tästä syystä teiden kunnossapidolle olisi tarpeellista löytää ympäristöystävällisempiä pölynsidonta-aineita.

Suomessa yleinen pölynsidonta tapa on liuossuolaaminen kalsiumkloridilla. Kalsiumkloridin ympäristövaikutuksia on tutkittu ja vaikka kalsiumkloridia ei ole luokiteltu ympäristölle myrkylliseksi ja sen vaikutukset vesistöihin ovat vähäisiä, sen käytön vaikutus pohjavesiin on huolestuttavaa. Pohjavesialueiden kloridipitoisuuden nousun suurin syy on uskottu olevan teiden suolaus. Kloridipitoisuuden nousu pehmeissä pohjavesissä johtaa syövyttävyyden lisääntymiseen ja sitä kautta korroosiohaittoihin. [1.]

MFibrils Oy:n Olli Mäentaustan kehittämän sellupohjainen biopolymeerin DustBinderin käyttöä sorateiden pölynsidontaan on tutkittu jo vuosia. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on keskittyä tutkimaan, kuinka kivilajien eroavuudet ja hienoainespitoisuus vaikuttavat DustBinder biopolymeerin tehokkuuteen kaivosteiden ja -alueiden pölynsidonnassa ja stabiloinnissa. Yhtenä syynä tutkimukseen on eri kaivosympäristöissä havaitut erot DustBinderin toimivuudessa. Työ on osa MFibrils Oy:n, Tapojärvi Oy:n ja Destian Oy:n yhteistyössä tekemää jatkuvaa tutkimusta. Työssä suoritettujen tutkimuksien suunnittelussa avustivat DustBinderin kehittänyt MFibrilsin Olli Mäentausta, Tapojärven prosessimineralogi Mari Seilonen ja Destian kehityspäällikkö Oiva Huuskonen.

Kivilajien eroavuuksien ja hienoainespitoisuuden vaikutusta DustBinder-biopolymeerin toimivuuteen tutkittiin valmistamalla kahdesta eri kivilajista, kolmen eri rakeisuuskäyrän mukaisia koesarjoja. Kivilajeiksi valittiin graniitti ja pyroksenitti, joista graniitti on yleisimmin Suomessa käytetty kivimateriaali ja pyrokseniitti sen kemiallinen ja mineraloginen vastakohta. DustBinderin pölyävyydenestoa ja kantavuuden parantavuutta tutkittiin valmistamalla pölyävyysnäytteitä puhallutuskokeita varten ja koekappaleita puristuslujuuskokeita varten. Laboratoriokokeet kokeet suoritettiin Kajaanin ammattikorkeakoulun tiloissa.

# 2 Pölyävyys sorateillä ja kaivosalueilla

Suomen tieverkon koko pituus on noin 454 000 kilometriä. Suurin osa eli noin 350 000 kilometriä tieverkosta on yksityis- ja metsäautoteitä, ja noin 26 000 kilometriä kuntien katuverkkoja. Noin 78 000 kilometriä tieverkosta on Väyläviraston vastuulla olevia maanteitä. [2.]

Maantieverkon koko pituudesta yli 35 % on sorateitä. Vaikka suuri osa näistä sorateistä on vähäliikenteisiä, niillä voi olla suuri merkitys alueensa maa- ja metsätaloudelle. Maa- ja metsätaloudessa käytettävät kulkuneuvot, kuten traktorit ja raskaat kuorma-autot lisäävät teiden kestävyysvaatimuksia ja kulutusta. Kunnossapidon täytyy vastata näitä vaatimuksia. Sorateiden kunnossapitoon käytetäänkin vuosittain, talvihoidon kustannukset pois lukien, noin 11 % koko tieverkoston kunnossapitokustannuksista. [3.]

Pölyäminen on kesäisin yleinen ilmiö sorateillä. Auringon polte ja korkeat lämpötilat kuivattavat soratienpintaa, josta ajoneuvojen renkaiden ja liikenteen ilmavirtausten vaikutuksesta irtoaa hienoainesta pölynä ilmaan. Ulkomaalaisen tutkimuksen mukaan yksi henkilöauto voi irrottaa kuivissa kesäolosuhteissa tien pinnasta 1,5 kg kulutuskerrosmateriaalia yhden tiekilometrin matkalla. Hienoaineksen hävikki soratien kulutuskerroksesta synnyttää tiehen reikiä ja uraisuutta. Kulkuneuvojen renkaiden irrottaessa irtoainesta kulutuskerroksesta sekä uudelleen kasatessa sitä tien pintaan muodostuu myös aaltomaista epätasaisuutta. Tällainen epätasaisuus on yleistä varsinkin tien kaarteissa ja jyrkissä mäissä. [3.]

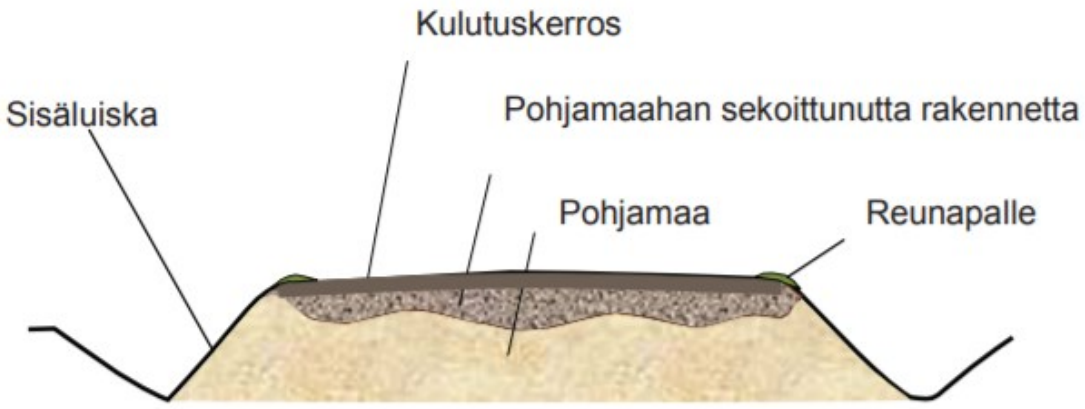
Kaivosalueiden tiet ovat yleensä päällystämättömiä ja tien rakenteet eivät usein vastaa yleisten teiden rakenteellisuutta. Kaivostoiminnasta, maarakennuksesta sekä työkoneiden ja kuljetusautojen liikkumisesta aiheutuva pölyäminen on kaivosalueilla yleistä. Pölyn määrää kaivosalueilla lisää esimerkiksi malmin ja sivukiven louhiminen ja käsittely kaivosalueella. Kaivostoiminnan raskaskalusto aiheuttaa sorateillä suurempaa pölyämistä kuin esimerkiksi henkilöautoliikenne. Mineraalipöly lisää entisestään kaivostoiminnan pakokaasupäästöistä aiheutuvaa haitallisuuttaa ympäristölle ja kaivostyöläisten terveydelle. [4.]

Sorateissä käytetty kulutuskerroksen kiviaines on yleensä maksimiraekooltaan 16 millimetristä kallio-, moreeni- tai soramursketta. Kevyempää liikennettä palvelevilla teillä voidaan käyttää maksimiraekooltaan 11 millimetristä mursketta, mutta 16 millimetriä on yleisempi vaihtoehto.

Hienompi maksimiraekoko mahdollistaa kiinteämmän ja tasaisemman tiepinnan saavuttamisen, mutta karkeammalla murskeella saadaan kantavampi tie. [3.]

## 2.1 Haitat, sääntely ja lainsäädäntö

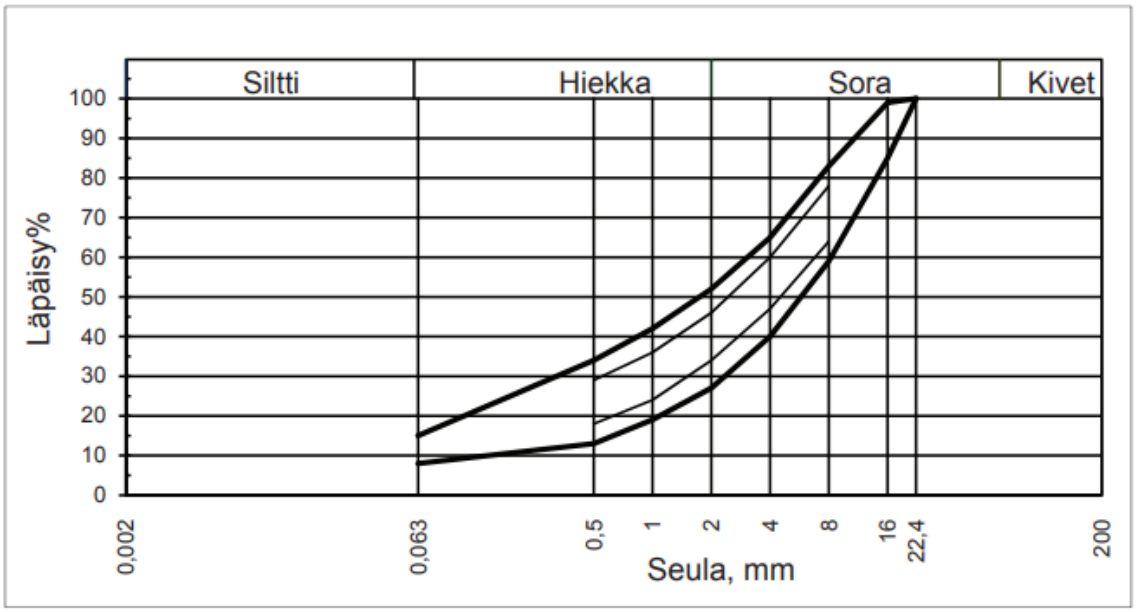
Soratien pölyävyys on sidonnainen sen pintakuntoon. Rakennetut soratiet koostuvat rakenteeltaan yleensä kulutuskerroksesta, kantavasta kerroksesta, jakavasta kerroksesta sekä suodatinkankaasta tai suodatinkerroksesta. Suurin osa Suomen tieverkon sorateistä kuitenkin koostuu vanhoista rakentamattomista sorateistä (kuva 1), joista puuttuu rakennettujen sorateiden kuntoa edistäviä rakennekerroksia. Näiden rakentamattomien sorateiden rakenteita on pyritty vuosien saatossa parantamaan kantavan materiaalin lisäämiselle. Soratien rakentamattomuudesta johtuen tien vähäiset rakenteet sekoittuvat kuitenkin helposti pohjamaahan. Tämän vuoksi myös tien pintakuntoon vaikuttaa vahvasti sen kulutuskerroksen kosteus tila. [3.]




Kuva 1: Rakentamattoman soratien rakenne [3.]

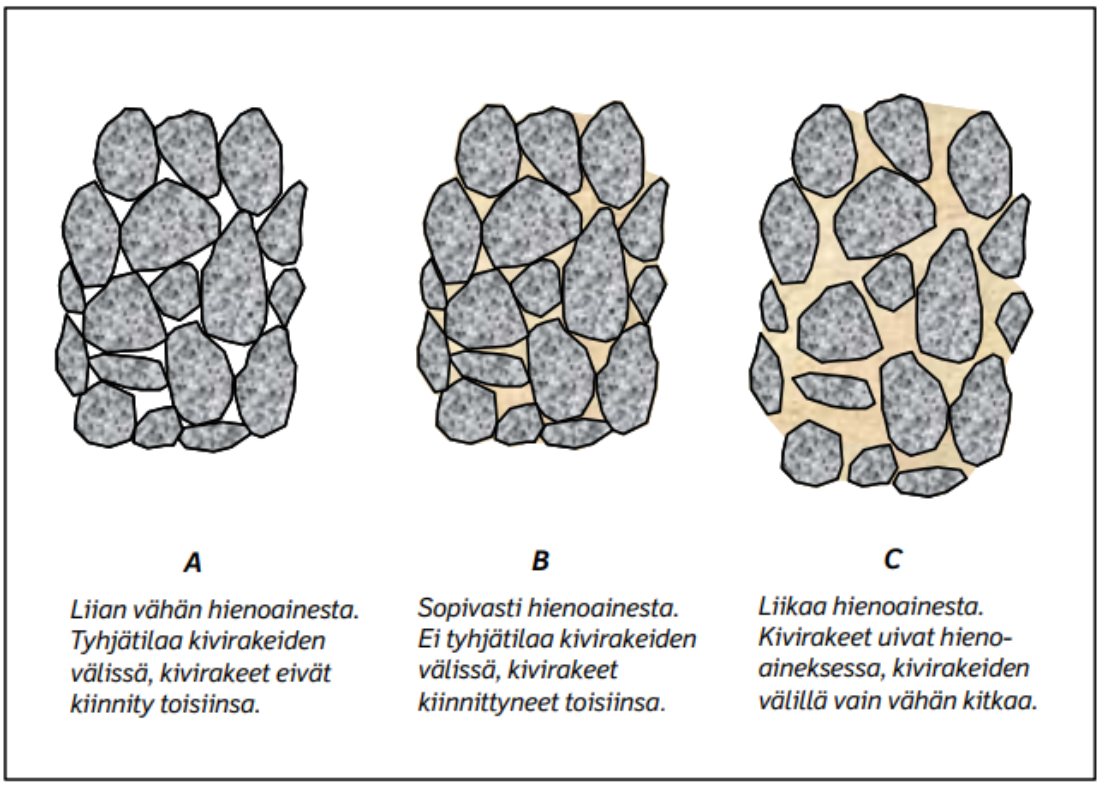
Soratie palvelee tienkäyttäjiä parhaiten tien pinnan ollessa tasainen ja kiinteä. Tämä saavutetaan parhaiten, kun kulutuskerroksen kiviaineksen ominaisuudet ovat suosiolliset. Kiviaineksen omi-

naisuuksista eniten tähän vaikuttavat sen maksimiraekoko, sitovan hienoaineksen määrä ja rakeisuuskäyrän muoto. Kuvassa 2 on esitetty maksimiraekooltaan 16 millimetrisen soratien kulutuskerroksen rakeisuuden ohjearvot. Suositus 0,063 millimetrisen hienoaineen osuudelle on 8–15 prosenttia. Hienoaineksen määrän tulisi olla riittävä täyttämään tyhjää tilaa suurempien kivirakeiden välillä. Kivirakeiden tulee kuitenkin kyetä kiinnittymään toisiinsa kitkan syntymiseksi (kuva 3). Muita vaikuttavia tekijöitä ovat kulutuskerrosmateriaalin kosteustilaherkkyys ja mitä pölynsidonta-aineita käytetään. [3.]




| 0/16 murskeen ohjeseulojen läpäisyprosentit | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Keskiarvot<br>Sisemmät rakeisuuskäyrät | | Yksittäiset tulokset<br>Uloimmat rakeisuuskäyrät | |
| Seulat mm | Alaraja | Yläraja | Alaraja | Yläraja |
| 22,4 | | | 100 | 100 |
| 16 | | | 85 | 99 |
| 8 | 64 | 78 | 59 | 83 |
| 4 | 47 | 60 | 40 | 65 |
| 2 | 34 | 46 | 27 | 52 |
| 1 | 24 | 36 | 19 | 42 |
| 0,5 | 18 | 29 | 13 | 34 |
| 0,063 | | | 8 | 15 |

Kuva 2: Kulutuskerroksen 0/16 murskeen ohjeellinen rakeisuuskäyrä ja läpäisyprosenttitaulukko. [3.]




Kuva 3: Hienoaineksen määrän vaikutus kivirakeiden kiinteyteen. [3.]

Liikenteen vaikutusta kulutuskerrosmateriaalin ominaisuuksiin tutkivissa kulutuskerrostutkimuksissa on havaittu kulutuskerroksen hienoainespitoisuuden lisääntyvän ensimmäisen 1–2 vuoden aikana, kulutuskerroksen kiviaineksen hienontuessa liikenteen vaikutuksesta. Noin kahden vuoden jälkeen hienoaineksen osuus kulutuskerroksen kiviaineksesta alkaa kuitenkin laskea pölyämisen seurauksena. Eniten kulutuskerroksen kiviaineksen hienonemista tapahtuu kesäisin. Hiekan osuus kulutuskerroksessa voi myös kasvaa peräti 3–17 %, johon vaikuttaa osasyynä hiekan käyttö talvikunnossapidon liukkaudentorjunnassa. [3.]

Pölyämisen haitat johtuvat kulutuskerroksen hienoaineksen vähentymisestä. Hienoaineksen vähentyminen johtaa myös karkean kulutuskerrosmateriaalin leviämiseen, mikä aiheuttaa irtonaisuutta tien pinnassa. Tien pinnan irtonaisuus synnyttää kuoppia ja urautumista, jotka aiheuttavat harmia ja mahdollisia vaaratilanteita soratiellä liikennöiville. Lisäksi tien pinnasta irronnut kulutuskerrosmateriaali päätyy usein tien pientareiden ja sivuojien lisäksi myös lähialueen asutusalueille ja viljelyksille aiheuttaen haittaa asukkaille ja maanviljelijöille. [3.]

Liikenneviraston ohjeistuksessa sorateiden hoitoon esitetään sorateiden keskeiset toimivuusvaatimukset tien pinnan tasaisuuden, kiinteyden ja pölyävyyden osalta. Sorateiden pölyävyyttä arvostellaan silmämääräisesti kuntoarvosanoin yhdestä viiteen, kuntoarvon 1 tarkoittaen kelvotonta ja kuntoarvon 5 erinomaista tien kuntoa (kuva 4). Sorateiden vaatimukset määräytyvät sen tieluokan (I-III) mukaan ja pölyävyyden kuntoarvon pitää olla vähintään tieluokalle asetettu vähimmäisarvo. Soratieluokissa I ja II pölyävyyden kuntoarvon täytyy olla vähintään 3, jonka sanallisen kuvauksen mukaan tien pinta pölyää jonkin verran, mutta pöly ei leviä pientareita kauemmaksi. Soratieluokan III mukaisten sorateiden pölyävyyden kuntoarvon taas täytyy olla vähintään 2, eli tien pölyäminen on kohtalaista ja pöly leviää melko paljon lähiympäristöön haitaten näkyvyyttä, sekä tienvarren asutusta ja viljelyksiä (kuva 5). [3.]

**Pölyävyyden kuntoarvojen 1-5 sanalliset kuvaukset**

Kuntoarvot kuvaavat henkilöauton aiheuttamaa pölyämistä ajonopeudella 60 km/h.

**Kuntoarvo 1: Tie pölyää runsaasti**

- Pöly leviää erittäin paljon tien ympäristöön ja haittaa merkittävästi näkyvyyttä.
- Pöly aiheuttaa huomattavaa haittaa tien varren asutukselle ja viljelyksille.

**Kuntoarvo 2: Tie pölyää kohtalaisesti**

- Pöly leviää melko paljon tien ympäristöön ja haittaa lievästi näkyvyyttä.
- Pöly haittaa tien varren asutusta ja viljelyksiä.

**Kuntoarvo 3: Tie pölyää jonkin verran**

- Pöly ei leviä pientareita kauemmaksi.

**Kuntoarvo 4: pientä pölyämistä renkaiden kohdalla**

- Pientä pölyämistä renkaiden takana on havaittavissa.

**Kuntoarvo 5: Pölyämistä ei esiinny lainkaan**

- Havaittavaa pölyämistä ei ole.

Kuva 4: Pölyävyyden kuntoarvojen 1–5 sanalliset kuvaukset [3.]

Kuva 5: Soratien pölyävyys (Kuntoarvo 2) [3.]

## 2.2 Pölynsidonta- ja pölynestomenetelmät

Sorateille voi aiheutua veden ja liikenteen yhteisvaikutuksesta nopeita rakenteellisia muutoksia. Soratien kulutuskerroksen ja pohjarakenteiden vesipitoisuus on korkeimmillaan syksyllä ja keväällä sekä mahdollisilla alkutalven lämpimillä jaksoilla. Tällöin soratie alttiimmillaan liikenteen aiheuttamalle painorasitukselle ja renkaiden iskuille. Veden kerääntyminen tien pinnalle lisää renkaiden iskuista irtoavien kivirakenteiden ja hienoaineksen määrää. Tämä taas lisää tien reikien määrää ja syvyyttä ja aiheuttaa epätasaisuutta ja pölyämistä soratielle. [3.]

Kulutuskerroksen normaali tavoitteellinen paksuus on 5 cm, joka on aivan riittävä esimerkiksi pintakelirikkoherkillä teillä. Rakennetuilla sorateillä, kelirikkokorjausta vaativilla teillä, sekä sorateiksi palautetuilla päällystetyillä teillä kulutuskerroksen tavoiteltava paksuus on kuitenkin noin 10 cm. Sorateiden pölyämistä ja materiaalihävikkiä voidaan vähentää varhaisella kevätmuokkauksella,

suolauksella ja tarpeeksi paksulla 5–10 cm paksulla kulutuskerroksella. Näillä toimenpiteillä vähentyvät myös lisäpölynsidonnan ja tasaustyön tarve. [5.]

Kaivoskuljetusten aiheuttamaa pölypäästöä voidaan vähentää lastattavan kuorman ja ajoteiden kastelulla, pölynsidonta-aineiden käytöllä ja kuormien peittämisellä. Suurempien kuormien käyttäminen vähentäisi edestakaisin ajamisen tarvetta, mutta raskaammat ajoneuvot irrottavat enemmän irtoainesta päällystämättömästä kaivostiestä. [4.]

Paras ajankohta sorateiden sekoitussuolauksena suoritettavalle kevätpölynsidonnalle on kevätmuokkauksen yhteydessä, heti pintakelirikkovaiheen päätyttyä. Suola sekoittuu parhaiten koko kulutuskerrokseen tien ollessa sopivan kostea ja ilmava pintakelirikon ja kevätmuokkauksen jäljiltä. [3.]

Pölynsidontaan teiden suolauksella käytetään kalsiumkloridia ja magnesiumkloridia. Kalsiumkloridi eli CaCl2 on hygroskooppinen suola, joka sitoo kosteutta itseensä ilmasta muuttuen näin liuokseksi. Vaatimuksena tälle on kuitenkin yli 30 % ilman suhteellinen kosteus, vedensitomiskyvylle sopiva ilman lämpötila. Kalsiumkloridin veteen liukenemiskyky on 745 g/l. Veden osuus hiutaleisessa kalsiumkloridissa on noin 23 %, loppujen 77 % koostuen kuiva-aineksesta. Kalsiumkloridi valmistetaan kalkkikivestä ja suolahaposta. Kalsiumkloridi on käytetyin pölynsidonta-aine Suomessa. Magnesiumkloridi eli MgCl2 on kalsiumkloridin tavoin ilmasta kosteutta ottava hygroskooppinen suola. Sen veteen liukenemiskyky on +20 celsiusasteen lämpötilassa 543 g/l. Magnesiumkloridin koostumus on 53 % vettä, loppujen 47 % koostuen kuiva-aineksesta. [3.]

Kalsium- ja magnesiumkloridin toiminta perustuu kulutuskerrosten hienoaineshiukkasten paikoilleen sitomiseen kapillaarivoimien avulla, kosteutta ilmasta itseensä ottamalla. Kummallakaan suoloista ei ole kulutuskerroksen rakennetta vahvistavia vaikutuksia. Sekä kalsium- että magnesiumkloridi vaativat toimiakseen tarpeeksi hienoainesta soratien kulutuskerroksessa. [3.]

## 2.3 Ympäristö- ja turvallisuusnäkökulma

Pölyäminen heikentää näkyvyyttä, liikenneturvallisuutta, tien varrella asumisen viihtyisyyttä ja terveellisyyttä sekä likaa tien lähiympäristön rakennuksia ja kasvillisuutta. Soratien kulutuskerroksen hienoaineksen pölyämisen lisäksi omat ympäristöriskinsä tuovat pölynsidonnassa käytetyt

suolaliuokset ja muut tienhoidon kemikaalit. Suurimmat haitat niistä aiheutuu pohjavesialueille. [3.]

Vuonna 2000 julkaistussa Tiesuolauksen riskikartoituksessa pohjavesialueilla, Juhani Gustafsson arvioi noin 44:llä prosentilla Suomen pohjavesialueista kulkevan teitä. Pohjavesialueiden suojelussa ei ole kyse vain ympäristön kasvillisuudesta, eläimistä ja viihtyisyydestä huolehtimisesta. Pohjavesillä on suuri yhdyskunnallinen merkitys, sillä jopa 3,5 miljoonaa suomalaista saa talousvetensä pohjavesistä. Suomen pohjavesiä suojaavat maakerrokset ovat usein ohuita, mikä tekee niistä entistä alttiimpia saastumiselle. Ympäristönsuojelulaki (86/2000) kieltää pohjaveden pilaamisen ehdottomasti. [1.]

Kloridien käyttö pölynsidonnassa uhkaa myös sisävesistöjä. Pölynsidonta-aineiden typpipitoisuuden vuoksi riski jokien ja rannikkovesien rehevöitymiseen on suuri. Toinen pölynsidonta-aineiden riskitekijä on niiden fosforipitoisuus. Vesistöjen rehevöitymisen tuomia ongelmia ovat kalaston muutokset, happikato ja suurten leväesiintymien yleistyminen. [1.]

Teiden kunnon merkitys kalustolle on erittäin tärkeässä roolissa. Tiestön hyvä kunto näkyy suoraan kunnossapitokuluissa. Epätasaisuudet, kuopat ja muut poikkeamat aiheuttavat rasitusta alustan osille ja lyhentävät käyttöikää huomattavasti. Merkittäviä kustannuksia aiheutuu rengaskuluista, joiden kuluminen huonoista olosuhteista johtuen kasvavat. Ylimääräiset iskut isoja painoja käsiteltäessä aiheuttavat rasitusta renkaan rungolle sekä ylimääräiset lohkareet voivat rikkoa renkaan kyljen tai pinnan. Huonosti hoidetut tiestöt nostavat myös vierintävastuksen määrää, mistä aiheutuu kasvavia polttoainekuluja. Alustakulut koostuvat useista eri jousituksen komponenteista kuten jousista, iskunvaimentimista sekä tukitangoista. Näiden elinikä lyhenee merkittävästi huonokuntoisilla teillä ajettaessa ja epäkunnossa olevien alustan osien takia voivat seurannaisvauriot olla paljon suuremmat, esimerkiksi akselin irrottua. Myös kunnossapidon työn määrä kasvaa sekä huoltojen läpimenoaika pitenee. Nämä kaikki lisäävät kuluja sekä työn määrää. Yllättävät laiterikot aiheuttavat aina tuotannollisten töiden viivästymistä ja ketjureaktion johdosta vaikutukset voivat olla suuret sekä vaikuttavat tulokseen negatiivisesti. Tiestön asianmukainen kunto takaa sujuvan ja tehokkaan toiminnan, kuljettajan mukavuutta unohtamatta. [6.]

Pölyäminen aiheuttaa myös erilaisia kalustokustannuksia kaivostyölle ja kunnossapidolle. Pöly voi tukkia suodattimia ja tunkeutua laitteistoihin, joista aiheutuu vaihto- ja puhdistuskustannuksia ja pahimmissa tapauksissa laiterikkoja. Laiterikkoja voi aiheutua myös liejuuntuneen hienoaineksen

aiheuttamista luisumisista ja pölyn aiheuttaman näkyvyyden heikkenemisen takia tapahtuvista törmäyksistä. [6.]

Kaivosympäristössä liiallinen pölyäminen aiheuttaa ongelmia myös työturvallisuusnäkökulmasta. Kivipöly sisältää kiteistä piidioksidia, jonka yleisin muoto Suomessa on kvartsi. Suomessa kvartsille altistuu vuosittain noin 50 000 työntekijää ja yleisimpiä toimialoja ovat kaivos- ja rakennusteollisuus. Kvartsin hengittämisestä voi seurata vakavia terveysongelmia. Hengittyvä pöly koostuu suun ja nenän kautta hengitettävistä jakeista. Torakaalijakeet eli keuhkojakeet koostuvat pienistä hiukkasista, jotka voivat kulkeutua keuhkoputkistoon ja alveolijakeet voivat mahdollisesti kulkeutua vielä syvemmälle keuhkojen keuhkorakkuloihin. Pölylle ja muille hiukkasmaisille ilman epäpuhtauksille on annettu työhygieeniset HTP-vertailuarvot. Yleensä vertailuarvot annetaan vain hengittyvälle pölylle, mutta arvoja voidaan antaa myös alveolijakeiselle pölylle altistumisen ollessa suurta. [7.]

Työterveyslaitoksen mittauksissa hengittyvän epäorgaanisen pölyn pitoisuudet kaivos ja louhintatoimialalla olivat keskiarvoltaan 5,3 mg/m3 (kuva 6). Ehdotettu ohjearvo yleiselle hengittyvälle pölylle on työterveyslaitoksen mukaan 2 mg/m3. Alveolijakeisen pölyn pitoisuus oli saman tutkimuksen mukaan kaivos- ja louhinta-alalla keskiarvoltaan 0,31 mg/m3 (kuva 7). Alveolijakeisen pölyn ehdotettu ohjearvo on 0,5 mg/m3. Pölyn hiukkasten koko ilmoitetaan sen aerodynaamisella halkaisijalla, eli keskimäärin 1 g/cm³ tiheän pallonmuotoisen, laskeutumisnopeudeltaan tutkittavaa hiukkasta vastaavan hiukkasen halkaisijalla. [7.]

| Toimiala | Näytteiden lkm | Keskiarvo | Mediaani | Vaihteluväli |
|---|---|---|---|---|
| Kaivokset ja louhinta | 651 | 5,3 | 1,6 | <0,1–180 |
| Ei-metallisten mineraalituotteiden valmistus, kaikki | 888 | 5,8 | 1,8 | 0,04–191 |
| Betonituoteteollisuus | 493 | 6,7 | 2,6 | <0,1–144 |
| Metallien jalostus, kaikki | 334 | 6,2 | 1,4 | <0,1–207 |
| Metallien valu | 245 | 7,9 | 2,9 | <0,1–23,7 |
| Metallituotteiden valmistus (pl. koneet ja laitteet) | 562 | 4,5 | 1,3 | 0,02–81 |
| Koneiden ja laitteiden valmistus | 412 | 4,5 | 0,82 | <0,1–284 |
| Jätteen keruu ja kierrätys | 293 | 2,0 | 0,6 | <0,1–51 |
| Rakentaminen | 125 | 4,8 | 1,1 | <0,1–120 |
| Kaikki toimialat | 4602 | 5,8 | 1,1 | 0,002–2200 |

Kuva 6: Hengittyvän epäorgaanisen pölyn pitoisuudet (mg/m3) [7.]

| Toimiala | Näytteiden lkm | Keskiarvo | Mediaani | Vaihteluväli |
|---|---|---|---|---|
| Kaivokset ja louhinta | 42 | 0,31 | 0,10 | <0,1 - 1,7 |
| Metallien valu | 139 | 1,2 | 0,20 | <0,009 - 45 |
| Betonituoteteollisuus | 47 | 1,1 | 0,42 | <0,09 - 6,6 |
| Kaikki toimialat | 435 | 0,68 | 0,16 | <0,009 - 45 |

Kuva 7: Alveolijakeisen pölyn pitoisuudet (mg/m3) [7.]

Yksi yleinen kivipölyn terveyshaitta on silikoosi eli kivipölykeuhkosairaus, joka on keuhkosairaus, jota kiteinen piidioksidi aiheuttaa. Suomen silikoositapauksissa suurin osa on kvartsipölyn aiheuttamia. Silikoosin kehittyminen vaatii useimmissa tapauksissa yli 10 vuoden pituisen altistumisen kvartsi- tai muulle piidioksidipölylle ja sen latenssiaika on yli 20 vuotta. [8.]

# 3 Teiden dynaaminen kantavuus

Rakennettujen sorateiden rakenne koostuu yleensä kulutuskerroksesta, kantavasta kerroksesta, jakavasta kerroksesta sekä suodatinkankaasta tai suodatinkerroksesta. Suurin osa Suomen tieverkon sorateistä on kuitenkin vanhoja rakentamattomia sorateitä, joista puuttuu rakennettujen sorateiden kuntoa edistäviä rakennekerroksia. Rakentamattomien sorateiden rakenteita on pyritty vuosien saatossa parantamaan kantavan materiaalin lisäämiselle. Soratien rakentamattomuudesta johtuen tien vähäiset rakenteet sekoittuvat kuitenkin helposti pohjamaahan aiheuttaen tien routivuutta. [3.]

Kulutuskerroksen kiviaineksen yhteen pakkautumiskyvyllä on suuri vaikutus soratien kulutuskerroksen koossapysyvyyteen ja muodonmuutoskestävyyteen. Kulutuskerroksen rakeisuuskäyrällä on vaikutusta sen yhteen pakkautumiseen. Soratien dynaamiseen kantavuuteen voi vaikuttaa myös hienoaineksen määrä. Hienoainesta tulee olla tarpeeksi täyttämään kivirakeiden välinen tyhjä tila. Kivirakeiden tulee kuitenkin pystyä kiinnittymään toisiinsa ja liika hienoaines aiheuttaa kulutuskerroksen, jossa kivirakenteet uivat erillään hienoaineksessa, eikä kantavuuden kannalta tärkeää rakenteen sisäisen kitkaa juurikaan synny. [3.]

## 3.1 Kelirikkko

Kelirikko tarkoittaan tien pinnan tai tierakenteen pehmenemisestä aiheutuvaa tien kunnon ja käyttökelpoisuuden merkittävää huonontumista. Yleisintä tien pinnan ja rakenteen pehmentyminen on keväällä, kun talven jälkeinen routa alkaa sulaa, mutta ilmiötä voi tapahtua myös sateisen loppusyksyn aikaan tai lämpimänä alkutalvena. Kelirikko voi olla pinnan pehmentymisen aiheuttamaa pintakelirikkoa tai runkokelirikkoa tien heikentyessä syvemmältä rakenteista. [3.]

Pintakelirikkoa syntyy tien 5–10 cm paksun kulutuskerroksen muuttuessa kosteuden vaikutuksesta huonosti kantavaksi. Pintakelirikkoisen tien kulutuskerros on usein vellimäinen ja huonosti ajettava (kuva 8). Sulamisajan sää ja lämpötilat vaikuttavat pintakelirikon syntyyn. Tie kuivuu nopeammin aurinkoisilla ja tuulisilla säillä. Myös yöpakkaset vähentävät pintakelirikon syntyä. Tien ylläpidon osalta pintakelirikon riskiä vähentää tien pinnan oikeanlaiset sivukaltevuudet ja reunapalteiden poisto, että vesi pääsee valumaan esteittä sivuojiin [3.]

Runkokelirikkoa syntyy yleensä, kun vesi ei pääse haihtumaan tai poistumaan sivuojiin tarpeeksi nopeasti keväällä tien sulamisvaiheessa, imeytyen tien pohjarakenteisiin ja heikentäen koko tien rakenteen kantavuutta. Tienrakenteet voivat pehmentyä jopa 20 cm:n syvyyteen saakka. Runkokelirikon riskiä lisää runsas raskas liikenne tiellä ja hienoaineksen määrä. [3.]

Kuva 8: Pintakelirikko [3.]

Tienpinnan kestävyyteen vaikuttavat sen kantavuus, kuivatus, kulutuskerroksen koossapysyvyys ja pinnan tiiveys. Kulutuskerroksen laadun vaikutus tien kestävyyteen on merkittävä. Tien pinnan kunto vaikuttaa suuresti tien ajomukavuuteen, kuormituskestävyyteen ja liikenneturvallisuuteen. Varsinkin pinnan tasaisuus ja riittävä kitka ovat turvallisuuden kannalta tärkeitä tekijöitä. [3.]

## 3.2 Julkishallinnon tiet vs. kaivosympäristö

Julkishallinnon ja kaivosympäristön teissä voi olla suuria rakenteellisia eroja. Kaivosteiden rakenteet poikkeavat julkishallinnon teistä niihin kohdistuvan raskaan liikenteen vaatimuksesta. Maanalaisilla kaivosteillä myös olosuhteet voivat erota merkittävästi julkihallinnon teistä tai maanpäällisistä kaivosteistä.

Kaivostoiminnasta saatavaa kivimateriaalia pyritään käyttämään useissa kaivosalueen maarakennuskohteissa, joista yksi on kaivosalueen tiestöt. Tästä syystä kaivosalueen sorateiden kulutuskerroksen materiaaleissa on paljon enemmän eroja kuin julkishallinnon sorateissä. Eri kivilajien kemialliset ja mineralogiset erot tuovat eroa siihen, millainen kulutuskerroksen yhteen pakkautumiskyky on ja kuinka pölyämisesto toimenpiteet toimivat kohteessa. Pölyämisen kannalta kulutuskerroksen kiviaines kulutuskestävyyden tulisi olla riittävä. Tästä syystä julkishallinon teissä käytetään useimmiten graniittia. Kaivoksesta louhittava kivimateriaali voi kuitenkin olla kulutuskestävyydeltään heikompaa lisäten pölyävyyttä [8].

# 4 DustBinder

## 4.1 Yleiskuvaus ja toimintaperiaate

DustBinder on Mfibrils Oy:n kehitystyön tuloksena syntynyt entsymaattisesti modifioitu biopolymeeri (kuva 9). DustBinderia pyritään soveltamaan käytettäväksi pölynsidontaan maanteiden kunnossapidossa, kaivosalueilla ja muissa pölyävyyden hallintaa vaativissa kohteissa, kuten louhos- ja varastointialueilla. [10.]

Kuva 9: Laimentamatonta DustBinderia

DustBinderiksi kutsuttu biopolymeeri valmistetaan kuitulietteen bioteknisellä käsittelyllä. Kuitulietteen bioteknisessä käsittelyssä pyritään avaamaan rajoitetusti nollakuidun sisältämiä selluloosakuitukimppuja elementaarikuiduiksi ja katkoa osittain muodostuneita kuitujatkeita. Lopputuloksena saadaan kuitumassaa, joka laimennetaan vedellä käyttöliuokseksi, jota voidaan käyttää pölyn sidonnassa. DustBinderin ja veden laimennussuhde käyttöliuoksessa on vielä tutkinnan alla. Tämän opinnnäytetyön kokeissa käytettiin 1+3 laimennussuhdetta [9].

DustBinder-biopolymeerin toiminta pölynsidonta-aineena perustuu hiekkapölyn kiviaineksen runsaaseen silikaattimineraalisisältöön. Kiviaineksen silikaattimineraalit sisältävät hydroksyyliryhmiä, jotka muodostavat vety- ja muita kemiallisia sidoksia bioteknisesti käsitellyn kuitulietteen vapaiden hydroksyyliryhmien kanssa. Nämä erilaiset kemialliset sidokset synnyttävät hienoainespölyn ja sellukuitufraktioiden välille suuria partikkeliklustereita sisältäviä verkostoja. Hienoainespölyn sitoutuessa suuremmiksi partikkeliklustereiksi pölyäviä kivihiukkasia on vähemmän irrallaan ja tästä syystä pölyävyys on vähäisempää. [10.]

## 4.2 Selluteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen

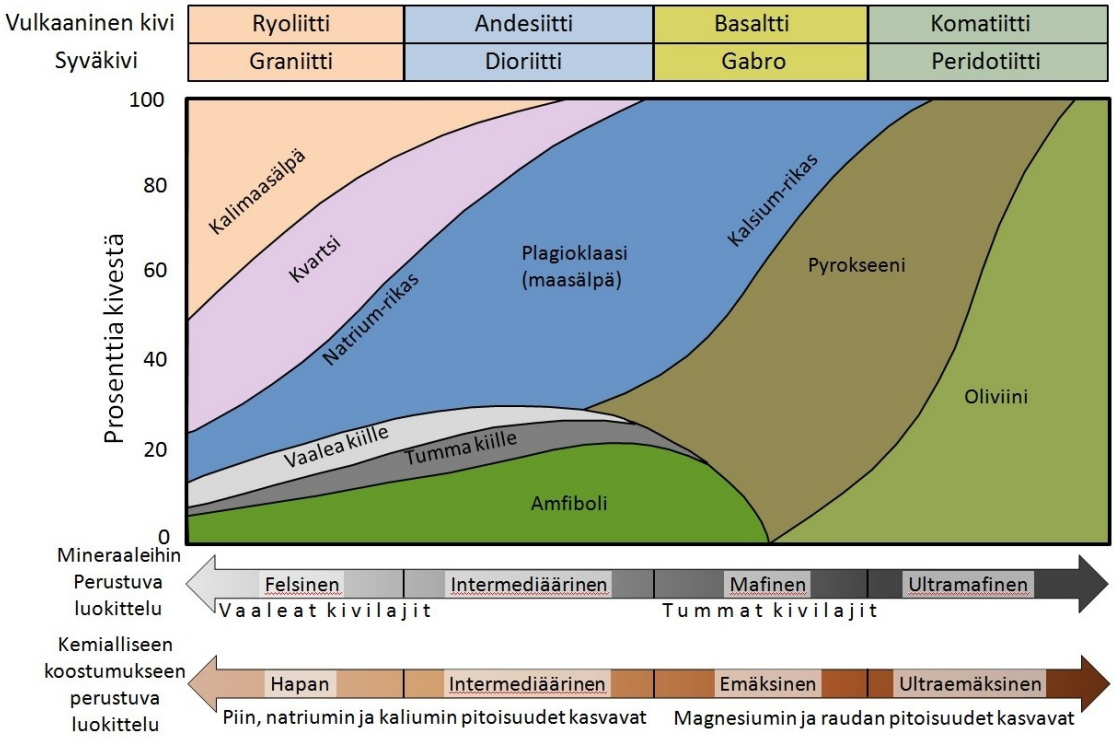
Suomen sellu- ja paperiteollisuuden sivutuotteena syntyy vuodessa noin 750000 tonnia puukuitulietettä, joka oli ennen tapana polttaa tai kuljettaa kaatopaikalle. Lakiuudistuksen myötä jätevero koskettaa myös teollisuuden kaatopaikkoja ja kuitulietettä ja on vähintään 50 €/t. Uusi jätelaki määrittelee myös, missä tapauksissa materiaali luokitellaan jätteen sijasta sivutuotteeksi. Jätteeksi luokittelu ei rajoita materiaalin hyödyntämistä seostuotteina. Tästä syystä kuitulietteestä on tullut arvokas sivutuote eri käyttötarkoitusten raaka-aineeksi EU:n ja Suomen kansallisen jätestrategian, valtioneuvoston vuonna 2008 hyväksymän valtakunnallisen jätesuunnitelman ja uuden 1.5.2012 alkaneen jätelain ja materiaalitehokkuustavoitteiden mukaisesti. Kuitulietteen uusia mahdollisia käyttösovellutuksia ovat esimerkiksi käyttö sideaineena energia- ja kuivikepelleteissä, pölynsidonta-aineena tierakentamisessa sekä maanparannusaineena perunanviljelyssä. [10.]

# 5 Kivilajit

Kivet ovat luonnollisen prosessin tuloksena syntyneitä mineraalien yhdistelmiä. Kivilajit määritellään geologiassa yleensä kolmeen eri luokkaan niiden synty-ympäristön mukaan. Ensimmäinen luokka on sedimenttikivet, jotka syntyvät hiekan, saven ja eliöiden kalsiittikuorien päällekkäin kerrostumisen aiheuttaman tiivistymisen tuloksena. Toinen luokkaan luokiteltavat magmakivet syntyvät sulan magman jäähtymisen ja kiteytymisen tuloksena. Viimeisenä ovat metaforfiset kivet, jotka syntyvät, kun magmakivi tai syvälle maan sisään hautautunut sedimenttikivi metamorfoituu mineralogiaansa ja tekstuuriaan muuttaen altistuessaan suurelle paineelle ja korkealle lämpötilalle. Mineralogian muutos tarkoittaa eri mineraalien keskinäisten osuuksien muutosta kivessä. Tekstuurin muutos taas tarkoittaa yksittäisten mineraalien koon, muodon ja yhdistymisen muuttumista. [12.]

Kivilajit voidaan luokitella niiden sisältämien mineraalien tai niiden kemiallisen koostumuksen perusteella (kuva 10). Mineraaleihin perustuvassa luokittelussa kivet voidaan luokitella felsisiin, intermediäärisiin, mafisiin tai ultramafisiin kivilajeihin. Felsiset ja intermediääriset kivilajit sisältävät väriltään vaaleampia mineraaleja, kun taas mafiset ja ultramafiset kivilajit koostuvat tummemmista mineraaleista. Kemiallisen koostumuksen perusteella kivilajit voidaan luokitella happamiin, intermediäärisiin, emäksisiin ja ultraemäksisiin kivilajeiihin. Happamille kivilajeille ominaista on suurempi pii-, natrium- ja kaliumpitoisuus, kun taas emäksisemmät kivilajit ovat huomattavasti magnesium- ja rautapitoisempia. [13.]

DustBinderin vaikutuksen tutkimiseksi vertailtaviksi kivilajeiksi valikoituivat kaksi magmakivilajeihin luokiteltavaa kivilajia: graniitti ja pyrokseniitti. Graniittiset muodostumat käsittävät yli puolet Suomen kallioperästä, ja se on erittäin yleisesti sorateissä ja maarakennuksessa käytetty kivilaji. Pyrokseniitti on paljon harvinaisempi syväkivilaji, joka on kemialtaan ja mineralogialtaan graniittiin verrattuna hyvin erilainen. Kemiallisesti graniitti ja pyrokseniitti ovat lähestulkoon toistensa ääripäitä: graniitin ollessa hapan kivilaji, kun taas pyrokseniitti on ultraemäksinen kivilaji (kuva 10). Mineralogisesti ne ovat myös hyvin erilaisia, mikä tekee niistä hyvän vertailuparin. [6.]




Kuva 10: Kivilajien jakaantuminen mineraalien ja kemiallisen koostumuksen perusteella. [13.]

## 5.1 Graniitti

Graniitti on magmakiviin kuuluva felsinen syväkivilaji. Graniitti koostuu kalimaasälvästä, plagioklaasista, kvartsista ja biotiitista tai sarviválkkeestä. Maasälpäpitoisuutensa ansiosta graniitti on usein väriltään punertava tai harmaa (kuva 11). Kemialliselta koostumukseltaan graniitti luokitellaan happamaksi kivilajiksi ja se on hyvin silikaattipitoinen. Rakenteeltaan graniitti on hyvin tasarakeinen. Graniitti on Suomen yleisin kivilaji ja sitä käytetään tasaisen laatunsa ja kauniin värinsä ansiosta rakennuskivenä ja muistomerkeissä. Se on myös Suomessa yleisesti käytetty kulutuskerrosmateriaali. [14.]

Kuva 11: Graniitti (vasen) ja pyrokseniitti

## 5.2 Pyrokseniitti

Pyrokseniitti on magmakiviin kuuluva ultramafinen syväkivilaji, jonka pääminerаaleja ovat pyrokseeneihin luokiteltavat mineraalit, kuten ortopyrokseeni, augiitti, diopsidi ja oliviini. Pyrokseniitiksi luokitellaan yli 90 % pyrokseenimineraaleja sisältävä kivi. Pyrokseniitti on raskas ja kova kivi, jonka väri voi olla musta, tummanvihreä tai vaaleanvihreä (kuva 11). Kemialliselta koostumukseltaan pyrokseniitti luokitellaan ultraemäksiseksi kivilajiksi. Pyrokseniitti on varsinkin Suomessa harvinaisempi kivilaji. Pyrokseniitin käyttötarkoituksia maailmalla ovat esimerkiksi hautakivet, rakennuskivet, tiekiviaineksena ja koristekivet. [15.].

# 6 Aiemmat tutkimukset

Biopolymeerien käyttöä pölynsidonnassa on tutkittu jo useita vuosia. Myös DustBinderin kehitystyötä on tehty jo pidemmän aikaa. Useat tutkimukset, opinnäytetyöt ja diplomityöt ovat perehtyneet eri osa-alueisiin biopolymeerien avulla tapahtuvassa teiden pölynsidonnassa ja kantavuuden parantamisessa, niin yleisillä teillä, kuin kaivosteillä. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kivilajien erojen ja hienoaineksen määrän vaikutukseen DustBinderin toimivuudessa. Tutkimus laitteiston erojen ja menetelmien standardien puutteen takia tutkimuksien tulosten vertailukelpoisuus vaihtelee, mutta vanhempien tutkimusten tulokset voivat tarjota näkökulmaa tämän tutkimuksen tulosten luotettavuuteen ja johdonmukaisuuteen.

## 6.1 Suoritetut tutkimukset

Liikenneviraston, Oulun Yliopiston, Destian ja YIT:n yhteistyössä kesien 2015 ja 2016 aikana toteutetussa tutkimuksessa (Nissinen T. & Pottala J. Biopolymeerit ja Pölynsidonta. Liikennevirasto. 2016) selvitettiin biopolymeerien toimivuutta sorateiden pölynsidonnassa yhdessä ja ilman kloridisuolojen yhteisvaikutusta. Tutkimus oli jatkoa kesällä 2014 suoritetuille alustaville kenttäkokeille. Tutkitut biopolymeerit olivat tärkkelys- ja selluloosapohjaisia. Tutkimukset suoritettiin kenttäkokeina levittämällä liuosta testikohteille ja seuraamalla toimivuutta vähintään kahden viikon välein. [16.]

Keväällä 2019 valmistuneessa opinnäytetyössä Oulun ammattikorkeakoulun opiskelija Salla Konttinen tutki sellupohjaisen biopolymeerin DustBinderin vaikutusta sorateiden pölynsidontaan ja kelirikkokohteiden tien kantavuuteen. Tutkimuksissa DustBinderin soveltuvuutta tutkittiin pölyävyyskokeiden, puristuslujuuskokeiden, sadetuskokeiden ja näytteiden pinnan mikroskopoinnin avulla. Mikroskopoinnilla tutkittiin biopolymeerikalvon muodostumista näytteenpinnalle. Testausmenetelmät olivat osin tutkimuksia varten kehitettyjä standardoitujen menetelmien puuttuessa. [17.]

Syksyllä 2020 Oulun ammattikorkeakoulun opiskelija Tomi Kemppainen tutki opinnäytetyössään DustBinderin käyttöä sorateiden pintakelirikkotapausten estämisessä. Tutkimus suoritettiin labo-

ratorio- ja kenttäkokein. Kokeissa käytettiin SFS-EN-standardeja. Laboratoriokokeisiin sisältyi kiviaineksen rakeisuuden, vesipitoisuuden, humuspitoisuuden ja puristuslujuuden tutkimista. Kenttäkokeissa suoritettiin kantavuusmittauksia pudotuspainolaitteen avulla. [18.]

Biopolymeerien käyttöä kaivosalueen pölynsidonnassa tutkittiin Oulun yliopiston Victoria Alexanderin vuonna 2020 valmistuneessa diplomityössä. Työ toteutettiin yhteistyössä Tapojärvi Oy:n kanssa ja siinä tutkiin mm. miten levitystapa vaikuttaa DustBInder-biopolymeerin toimivuuteen kaivostiellä ja millaisia vaikutuksia kaivosteillä käytettävien kivien zeta-potentiaalilla, pH-arvolla ja muilla tekijöillä on pölynsidontaan. [19.]

## 6.2 Tulokset ja johtopäätökset

Liikenneviraston tutkimuksessa biopolymeerien käytöstä pölynsidonnassa havaittiin biopolymeerien sitovan parhaiten tieosuuksilla, joissa kalsiumkloridin vaikutus oli yhä osittain voimassa. Biopolymeerikäsittely vaikutti myös pidentävän kalsiumkloridin vaikutusaikaa. Biopolymeerien teho vaikutti heikkenevän nopeammin testitien osuuksilla, joissa tien pinta oli irtonaisempaa. Tämän uskottiin johtuvan siitä, ettei biopolymeerien sidontakyky riitä estämään suurien irtonaisten partikkelien liikkumista liikenteen vaikutuksesta. Koetuloksiin vaikuttivat mahdollisesti myös testipäivien aikaiset sateet, jotka heikensivät polymeerikalvon kovettumista. Tutkimuksissa havaittiin myös biopolymeerin käyttömäärällä olevan vaikutusta pölynsidonnan kestoon. Lopullisena johtopäätöksenä tutkimuksista todettiin biopolymeerikäsittelyn kulutuskestävyyden olevan vielä riittämätön liikenteen aiheuttamaa kuormitusta vastaan. Lisäksi sen ei havaittu tuovan merkittävää hyötyä perinteiseen suolakäsittelyyn verrattuna. [16.]

Salla Konttisen kevään 2019 tutkimuksien tuloksista voitiin päätellä DustBinderin vähentävän hienoaineksen pölyävyyttä, kasvattavan tien kantavuutta ja muodostavan biopolymeerikalvon näytteen pinnalle, annostuksen ollessa oikeanlainen. Konttisen mukaan DustBinderin annostelua tulisikin tutkia lisää ja tarkentaa. Tutkimuksia suoritettiin annostuksilla, joissa koko nestemäärä oli DustBinderia, ja annostuksilla, joissa puolet nesteestä oli vettä ja puolet DustBinderia. Näistä kah-

desta jälkimmäinen tuotti parempia tuloksia. Tutkimusten perusteella DustBinderilla on myös puristuslujuutta parantava vaikutus, mutta 0 vuorokauden ikäisten koekappaleiden puutteen takia puristuslujuuden lähtötilanne ei ole tiedossa. [17.]

Tomi Kemppaisen opinnäytetyön kenttäkokeiden tulokset osoittivat DustBinderin parantavan tien kantavuutta, kiinteyttävän soratien pintaa ja tiivistävän sen päällysrakenteita vähentäen samalla myös pölyävyyttä. Työn laboratoriokokeiden perusteella maa-aineksen rakeisuudella, vesipitoisuudella tai humuspitoisuudella ei havaittu olevan suurta vaikutusta DustBinderin toimivuuteen. Puristuslujuustestin tulosten perusteella DustBinderilla käsitelty maa-aines vaikutti olevan kantavuudeltaan heikompaa kuin käsittelemätön maa-aines. DustBinderin vaikutus puristuslujuuteen näytti kasvavan ajan myötä, mutta sama ilmiö tapahtui myös pelkällä vedellä käsitellyissä koekappaleissa. Syytä tälle ilmiölle ei löytynyt. Puristuslujuuden tutkimiseen Kemppainen esitti lisätutkimusten tarvetta. Näytteitä tulisi myös olla useampia eri koealueita kohden varmempien tulosten saamiseksi. [18.]

Victoria Alexanderin diplomityön tutkimuksissa DustBinder sitoi pölyä jatkuvaa vesikastelua heikommin. Alexander kuitenkin huomauttaa, että tuloksiin voivat vaikuttaa kohdetien kaivoksen olosuhteet, eikä niitä voi yleistää koskemaan kaikkia kaivosteitä tai yleisiä teitä. Laboratoriotutkimusten perusteella DustBinderin toimivuuteen voi vaikuttaa esimerkiksi kohdetien zeta-potentiaali, pH ja alkuainekoostumus. Myös ilmankosteudella ja hienoaineksen määrällä voi olla tutkimuksen mukaan vaikutusta toimivuuteen. Alexander esittääkin, että näiden tekijöiden vaikutusta DustBinderin toimivuuteen tulisi tutkia lisää. [19.]

# 7 Testimenetelmät

Työn tarkoituksena oli tutkia DustBinderin vaikutusta graniitin ja pyrokseniitin puristuslujuuteen ja pölyävyyteen. Työssä haluttiin etenkin keskittyä tarkkailemaan, miten näytteiden rakeisuus ja hienoainespitoisuus vaikuttavat puristuslujuus- ja pölyävyystuloksiin.

Kokeita varten suunniteltiin kolme varsinkin hienoainespitoisuudeltaan eroavaa rakeisuuskäyrää hienoaineksen vaikutuksen vertailua varten. Yksi rakeisuuskäyrä vastasi kulutuskerrosmurskeen rakeisuuden ohjearvoja ja sisälsi 12 prosenttia alle 0,063 millimetristä hienoainesta. Kaksi muuta rakeisuuskäyrää edustivat kahden ääripään hienoainepitoisuuksia. Ensimmäinen niistä sisälsi 3 prosenttia alle 0,063 millimetristä hienoainesta ja toinen oli ns. katastrofaalinen vertailukohta, joka sisälsi 20 prosenttia alle 0,063 millimetristä hienoainesta.

DustBinderista konsentraatista valmistettiin vedellä laimennettua käyttöliuosta. Käyttöliuoksen laimennussuhde oli 1+3. DustBinder-käyttöliuosta sekoitettiin näytteisiin sekoitussuhteella 0,0242 l/kg.

## 7.1 Rakeisuus

Rakeisuus tarkoittaa, kuinka paljon kiviaines sisältää erisuuruisia rakeita painosuhteessa muihin rakeisiin. Rakeisuus määritetään SFS-EN 933-1 standardin mukaisella seulonnalla. Kiviaines jaetaan halutun seulasarjan mukaisesti eri raekokoluokkiin, minkä jälkeen määritetään eri raekokojen massaprosentti punnitsemalla. Tuloksien perusteella laaditaan graafinen rakeisuuskäyrä ja kirjallinen taulukko. [20.]

Tutkimuksissa haluttiin tarkastella kivilajien eroja käyttämällä kolmen eri rakeisuuskäyrän mukaisia näytekappaleita. Rakeisuudessa kiinnitettiin eniten huomiota näytteen hienoainespitoisuuden vaikutukseen tarkkailemalla, miten raekooltaan 0,063 millimetrisen murskeen määrä näytteessä vaikutti DustBinderin toimivuuteen. Yhtäläisten rakeisuuksien saavuttamiseksi näytteet valmistettiin kokoamalla ne murskatusta ja seulotusta kiviaineksesta.

Kiviaineksien murskaukseen käytettiin Retschin BB 200 -leukamurskainta (kuva 12). Työ aloitettiin 16 millimetrisen murskeen valmistuksella ja etenemällä hienompiin raekokoihin sitä mukaa, kun kutakin raekokoa saatiin tarvittava määrä. Leukamurskaimen tuotehienous oli < 2 millimetriä, joten hienoinpien raekokoja valmistettiin myös kuulamyllyllä jauhamalla. Kuulamyllyllä käsiteltiin lisäksi myös muut raekoot, jotta murskeen morfologia saatiin vastaamaan paremmin tieliikenteen muovaamaa päällystemursketta. Murskattu ja jauhettu kiviaines eroteltiin haluttuihin raekokoihin käyttämällä Retschin AS 450 -täryseulaa (kuva 13). Seulonta suoritettiin kuivaseulontana.

Kuva 12: Retsch BB 200 -leukamurskain

Kuva 13: Retsch AS 450 -täryseula

## 7.2 Pölyävyys

Kiviaineksen pölyävyyttä tutkittiin puhaltamalla paineilmaa kiviainenäytteisiin. Pölyävyysnäytteet punnittiin ennen ja jälkeen pölyävyyskokeen ja painoerosta laskettiin näytteen hävikkiprosentti.

Kiviainesten pölyävyyden testaamiseen käytettiin Tapojärven valmistamaa, käyttötarkoitukseen suunniteltua mobiili-tuulikammiota (kuva 14). Tuulikammio on alumiinisesta turkkilevystä valmis-

tettu ja kooltaan n. 50 x 50 x 50 senttimetriä. Tuulikammion ovessa on kirkkaasta polykarbonaattilevystä valmistettu ikkuna näytteen tarkkailua varten ja kaksi säädettävää salpalukkoa, joilla kammio saadaan suljettua ilmatiiviisti. Kammion sisällä on korkeussäädettävä, rengaspolttimesta muokattu puhallin, jonka reikiä on muotoiltu ilmapyörteen saavuttamiseksi tuulikammion sisällä. Tuulikammion sivussa on rengaspolttimeen yhdistyvä pikaliitin paineilmakompressorin kytkemistä varten. Lisäksi kammion katolla on pikalukkoliitin pölynimurin kytkemistä varten. Pölytyskokeissa näytteitä puhallettiin 4 baarin paineella 3 minuuttia.

Kuva 14: Tuulikammio

Sopivimmaksi pölytysastiaksi kokeita varten valikoitui noin 40 x 30 cm kokoinen muovilaatikon kansi. Kansi soveltui käyttötarkoitukseen parhaiten matalien reunojen ja kokonsa ansiosta, sillä näyte saatiin levitettyä tasaisesti koko kannen alalle ilman, että siihen olisi jäänyt suuria kasaantumia. Kannen huonona puolena oli sen ulkoreunaa kiertävä kapea tasanne, johon pölyyntynyttä

kiviainesta saattoi kertyä. Tämän vuoksi ulkoreuna pyyhkäistiin aina puhtaaksi siveltimellä ennen pölytyksen jälkeistä punnitusta.

Tuulikammiota oli käytetty jo jonkin verran samalaisiin kokeisiin, mutta sen tasaisesta toimivuudesta ei ollut vielä varmuutta. Tutkimuksen kaltaisista pölytyskokeista ei myöskään ole olemassa virallista standardia. Tämän vuoksi puhallutusten tasaisuuden tutkimisen vuoksi tuulikammioon asetettiin kokeiden ajaksi myös Testo 410-1 -virtausmittari (kuva 15). Virtausmittarilla saatiin selville kammion virtauksen keskiarvo ja maksimivirtaus, joiden arvoja voitiin käyttää selittämään mahdollisia epätasaisuuksia pölyävyystuloksissa.

Kuva 15: Testo 410-1 -virtausmittari

## 7.3 Puristuslujuus

Puristuslujuuskokeet suoritettiin yksiaksiaalisina puristuskokeina, joissa tarkasteltiin, mikä on suurin pystysuorajännitys, jonka sivutukemattomat koekappaleet kestävät ennen murtumista. Koekappaleiden puristuslujuuden testaamiseen käytettiin Matest S212M Universal multispeed load frame, 50kN -koestuslaitetta (kuva 16). Puristuslujuuskokeita suoritettiin 7 vuorokautta ja 28 vuorokautta vanhoille koekappaleille, jotta ajan vaikutusta DustBinderin toimivuuteen voitiin verrata. Lisäksi valmistettiin erillisiä koekappaleita murskeen morfologian ja humuspitoisuuden vaikutuksen tutkimiseksi. Puristuslujuutta testattiin ICT-tiivistetyillä, lieriönmuotoisilla koekappaleilla. Koekappaleiden halkaisija oli 100 mm.

Kuva 16: Matest S212M Universal multispeed load frame, 50kN -koestuslaite.

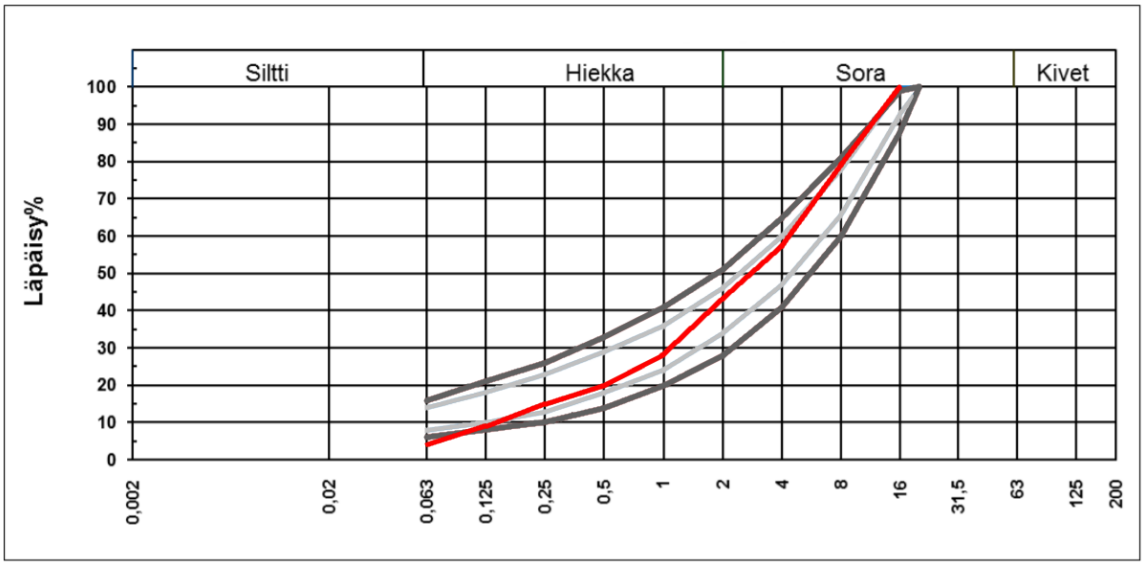
Lieriönmuotoisen koekappaleen halkaisijan vaikutusta puristuslujuuskokeen tulokseen on tutkittu betonista valmistetuilla koekappaleilla. Tutkimuksista saadut tulokset ovat tuottaneet eriäviä johtopäätöksiä. Siinä missä osassa tutkimuksissa näytteen halkaisijalle ei ole havaittu olevan vaikutusta puristuslujuuteen, on muissa tutkimuksissa taas havaittu pienemmän lieriökoon tuottavan suurempia lieriökokoja heikompia puristuslujuuksia. Toisaalta tutkimuksissa on myös havaittu pienempien lieriökokojen tuottavan suurempaa hajontaa puristuskokeiden tuloksissa. Lieriökoon vaikutuksen tutkimiseen on pääosin käytetty koekappaleita, joiden pituus-halkaisija-suhde on 2,0. [21.]

Koekappaleen kosteuspitoisuudella voi myös olla vaikutusta puristuslujuuskokeiden tuloksiin standardin EN 13791 mukaan. Vedellä kyllästetyn koekappaleen lujuus voi olla noin 10–15 % ilmakuivaa koekappaletta pienempi. Ilmakuivalla koekappaleella tarkoitetaan tässä tapauksessa koekappaletta, jonka suhteellinen kosteus on noin 8–12 %. [21.]

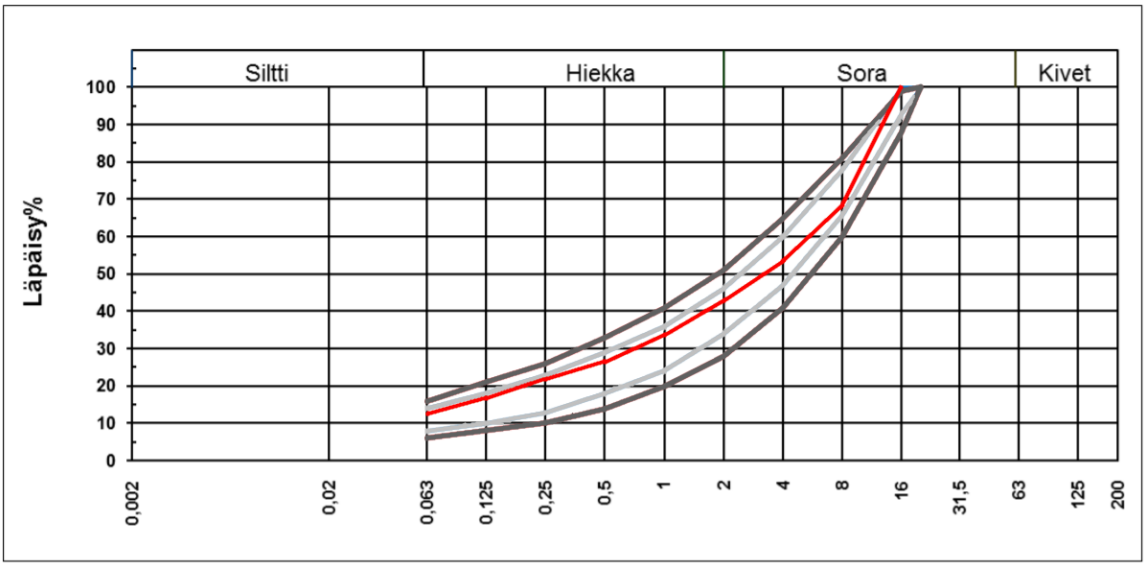
# 8 Laboratoriokokeet

## 8.1 Rakeisuus

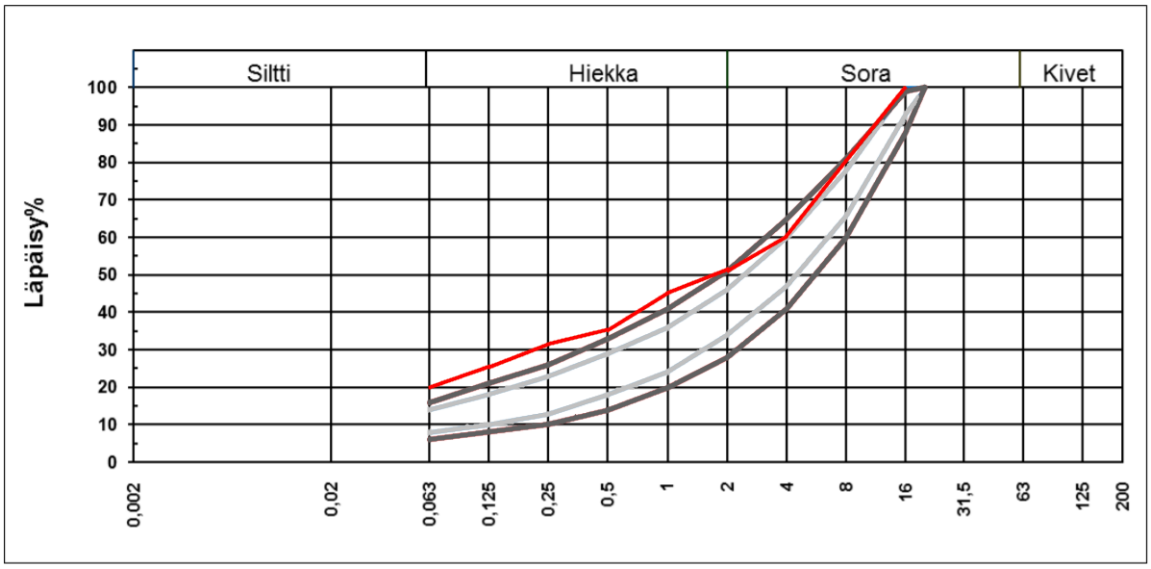
Laboratoriokokeita varten suunniteltiin kolmea eri hienoainespitoisuutta käyttävää rakeisuuskäyrää. Tarkoitus oli tutkia, miten DustBinderin vaikutus muuttuu näytteen rakeisuuden ollessa ohjearvojen mukainen (kuva 18), ohjearvot alittava (kuva 17) tai selvästi ohjearvot ylittävä (kuva 19).




Kuva 17: Rakeisuuskäyrä: 3 % hienoainesta (< 0,063 mm)




Kuva 18: Rakeisuuskäyrä: 12 % hienoainesta (< 0,063 mm)




Kuva 19: Rakeisuuskäyrä: 20 % hienoainesta (< 0,063 mm)

## 8.2 Pölyävyys

Pölyävyyden testaamista varten kiviaineksista valmistettiin kolmen rakeisuuskäyrän mukaisia pölyävyysnäytteitä. Pölyävyysnäytteet koottiin 0,85 litran alumiinivuokiin ja jokaiseen näytteeseen

käytettiin 500 grammaa mursketta. DustBinderilla käsiteltyjä pölyävyysnäytteitä valmistettiin kolme toistoa jokaista kolmea rakeisuuskäyrää kohden molemmista kivilajeista. Vertailun vuoksi valmistettiin myös samanlainen näytesarja DustBinderilla käsittelemättömiä nollanäytteitä. Lisäksi molemmista kivilajeista valmistettiin kaksi lisänäytettä, joilla tutkittiin humuksen vaikutusta pölyävyystulokseen yhden ja viiden prosentin humuspitoisuudella.

Pölyävyysnäytteet koottiin punnitsemalla jokaista raekokoa rakeisuuskäyrän mukainen määrä alumiinivuokaan. Seuraavaksi näytteen sekaan sekoitettiin 0,0242 l/kg sekoitussuhteella, 1+3 suhteella laimennettua DustBinder-käyttöliuosta. Sekoitus suoritettiin käsin alumiinivuoassa. Valmiita näytteitä säilytettiin kosteassa tilassa. Näytteiden kosteutta tarkkailtiin säännöllisin väliajoin.

Pölyävyysnäytteet testattiin 7 vuorokauden jälkeen niiden valmistuksesta. Näytteitä uunikuivattiin yön yli noin 50 celsiusasteessa. Uunikuivattu näyte leviteltiin tasaisesti pölytysastiana käytetylle muovilaatikon kannelle. Näytteet punnittiin ennen pölytystä ja lisäksi ne valokuvattiin, että pölyyntymisjälkeä voitiin tarvittaessa verrata (kuva 20).

Kuva 20: Pölyävyysnäytteen punnitus ennen pölytystä.

Punnittu ja valokuvattu pölyävyysnäyte aseteltiin tuulikammioon siten, että paineilmaa puhaltava rengaspoltin sijoittui pölytysastian keskelle. Etäisyys näytteen pinnasta rengaspolttimeen oli noin 4 senttimetriä. Virtausmittari aseteltiin rautalangasta valmistettuun telineeseen lähelle näytteen pintaa, rengaspolttimen alapuolelle. Pölytys aloitettiin avaamalla paineilmaventtiili ja käynnistämällä tuulikammioon kytketty pölynimuri samanaikaisesti. Näytettä pölytettiin 3 minuuttia noin 4 baarin paineella. Pölytyksen aikana näytteen pölyävyyttä tarkkailtiin silmämääräisesti. Myös painemittari tarkkailtiin säännöllisesti paineen pudotusten varalta.

Jokaisen pölytyksen jälkeen kammiosta poistettiin ensimmäisenä virtausmittari, josta tarkistettiin pölytyksen aikainen virtauksen keskiarvo ja maksimivirtaus. Virtausmittari puhdistettiin pölystä paineilmalla jokaisen pölytyksen jälkeen. Pölytysastia poistettiin kammiosta seuraavana jälkipunnitusta varten. Ennen punnitusta pölytysastian ulkoreunalta poistettiin siveltimellä siihen laskeutunut kivipöly. Jälkipunnituksen tulos kirjattiin ylös ja näyte valokuvattiin. Punnitustulosten erotuksella laskettiin näytteen hävikkiprosentti pölyävyyden vertailua varten. Tuulikammiosta imuroitiin ja pyyhittiin suurin osa sisälle kertyneestä pölystä jokaisen pölytyksen jälkeen.

## 8.3 Puristuslujuus

Puristuslujuuden testaamista varten kiviaineksista valmistettiin lieriönmuotoisia, halkaisijaltaan 100 millimetrin kokoisia koekappaleita. Molemmista kivilajeista valmistettiin koekappaleita kaksi yhdeksän koekappaleen sarjaa, jotka sisälsivät kolme toistoa jokaista kolmea rakeisuuskäyrää kohden. Ensimmäinen sarja sisälsi 7 vuorokauden ja toinen 28 vuorokauden jälkeen testattavat koekappaleet. Kahdesta kivilajista valmistettiin myös kaksi neitseellistä mursketta sisältävää koekappaletta, jotta murskeen morfologian vaikutusta DustBinderilla käsitellyn koekappaleen puristuslujuuteen voitiin verrata. Lisäksi humuspitoisuuden vaikutuksen tutkimisen vuoksi, kivilajeista valmistettiin humuspitoisuudeltaan yhden ja viiden prosentin koekappaleet.

Koekappaleet valmistettiin kokoamalla ensin seulotuista, eri raekoon murskeista suunniteltujen rakeisuuskäyrien mukaisia murskeseoksia ennalta punnittu tiivistysastiaan sopiva määrä. Graniittikoekappaleisiin käytettiin 2,260 kilogrammaa ja pyrokseniittikoekappaleisiin 2,500 kilogrammaa kiviainesta. Murskeeseen sekoitettiin 0,0242 l/kg sekoitussuhteella, 1+3 suhteella laimennettua

DustBinder-käyttöliuosta. Sekoitus suoritettiin metalliastiassa muovikauhalla sekoittaen, kunnes kuivaa kiviainesta ei ollut enää havaittavissa. Seuraavaksi huolellisesti sekoitettu kiviaines kauhottiin ICT-tiivistysastiaan. Koekappaleita tiivistettiin ICT-tiivistyskoneella 220 kPa:n paineella 80 kierrosta.

ICT-tiivistetyt koekappaleet säilöttiin muovilaatikkoon, jonka pohjalla oli vettä. Koekappaleet asetettiin laatikon pohjalla, rimojen päällä oleville reiällisille grillaustarjottimille ja laatikko suljettiin ilmatiiviisti muovilla ja ilmastointiteipillä. Koekappaleita säilytettiin kosteassa tilassa neljä vuorokautta, jonka jälkeen niiden annettiin kuivua huoneilmassa ennen puristuslujuuden testaamista.

Ennen puristuslujuuden testaamista koekappaleista kirjattiin ylös niiden paino, korkeus, sekä mahdolliset vauriot tai muut silmämääräisesti havaittavat piirteet, jotka saattoivat auttaa tuloksia tarkastellessa. Tutkittava koekappale nostettiin laatikosta vanerilevyn päälle, jolla sitä voitiin siirrellä punnitukseen ja testaukseen ilman pelkoa sen vaurioitumisesta.

Puristuslujuuden mittaamiseen käytettiin Matest S212M Universal multispeed load frame, 50kN -koestuslaitetta. Koekappale asetettiin laitteeseen vanerilevyn päällä. Koekappaleen päälle laitettiin pari ohutta, pyöreää, 100 mm halkaisijan metallilevyä jakamaan puristusvoima paremmin koko kappaleen alalle. Laitteen sisäinen koetulosten kirjaustoiminto ei suostunut toimimaan halutulla tavalla, joten laitteen mittanäyttöä asetettiin kuvaamaan videokamera, tulosten tallentamista varten.

Koestuslaite kuormitti koekappaletta hitaasti, kunnes puristuskuorma nousi 0,150 kN:iin. Tämän raja-arvon jälkeen koekappaleen kuormitus kiihtyi saavuttaen lopulta koekappaleen murtumispisteen. Koe pysäytettiin manuaalisesti kuorman pudotessa nollaan murtumisen jälkeen. Tarkka puristuslujuuden enimmäisarvo tarkistettiin jälkikäteen videolta ja kirjattiin ylös.

# 9 Tulokset

Pölyävyys- ja puristuslujuuskokeiden tuloksissa haluttiin tarkastella kivilajien erojen ja hienoainespitoisuuden vaikutusta DustBinderin toimivuuteen. Tuloksen luotettavuuden lisäämiseksi tutkimuksissa käytettiin kolmen toiston sarjoja jokaista näytettä kohden. Joissain tapauksissa toistoja tehtiin tarpeen mukaan lisää. Muutama toisto myös menetettiin ennen lopullisen tuloksen saamista vaurioitumisen takia. Tutkimuksissa pölyävyysnäytteille ja puristuskoekappaleille annettiin näytekohtaiset tunnukset tunnistamisen ja tulosten kirjaamisen helpottamiseksi (liite 1). Tulosten arvioinnin parantamiseksi pölyävyys- ja puristuskokeiden koesarjojen sisäisille tuloksille laskettiin keskiarvo, keskihajonta, varianssi sekä luottamusvälin vähimmäis- ja maksimiarvo.

Keskihajonta laskettiin kaavalla:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n}((x_1 - \bar{x})^2 + (x_1 - \bar{x})^2 + \ldots + (x_n - \bar{x})^2)}$$

Varianssi laskettiin kaavalla:

$$s^2 = \frac{1}{n}((x_1 - \bar{x})^2 + (x_1 - \bar{x})^2 + \ldots + (x_n - \bar{x})^2)$$

Luottamusvälin vähimmäisarvo laskettiin kaavalla:

$$\bar{x} - (t_{\alpha,v} * \frac{s}{n^{0,5}})$$

Luottamusvälin maksimiarvo laskettiin kaavalla:

$$\bar{x} + (t_{\alpha,n-1} * \frac{s}{n^{0,5}})$$

Laskukaavoissa ”n” tarkoittaa varianssiin kuuluvien arvojen määrää ja "$\bar{x}$" arvojen keskiarvoa. Arvo ”$t_{\alpha,n-1}$” on taulukosta saatu studentin t-jakauman arvo.

Taulukko 1: Pölyävyys

| Pölyävyys [%] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Keskiarvo | Keskihajonta | Varianssi | LV:Min | LV:Max |
| 0-P3 | 1,73 | 0,48 | 0,2338 | 0,26 | 3,2 |
| 0-P12 | 2,82 | 0,78 | 0,6102 | 0,44 | 5,19 |
| 0-P20 | 3,58 | 0,39 | 0,1559 | 2,38 | 4,78 |
| 0-G3 | 1,92 | 0,34 | 0,1185 | 0,88 | 2,97 |
| 0-G12 | 2,31 | 0,3 | 0,088 | 1,41 | 3,22 |
| 0-G20 | 3,18 | 0,44 | 0,1896 | 1,85 | 4,5 |
| P3 | 1,53 | 0,42 | 0,1753 | 0,26 | 2,81 |
| P12 | 1,88 | 0,21 | 0,0446 | 1,24 | 2,52 |
| P20 | 4,59 | 0,17 | 0,0275 | 4,09 | 5,1 |
| G3 | 0,97 | 0,12 | 0,014 | 0,61 | 1,33 |
| G12 | 2,16 | 0,02 | 0,0004 | 2,1 | 2,21 |
| G20 | 3,5 | 0,21 | 0,0444 | 2,85 | 4,14 |

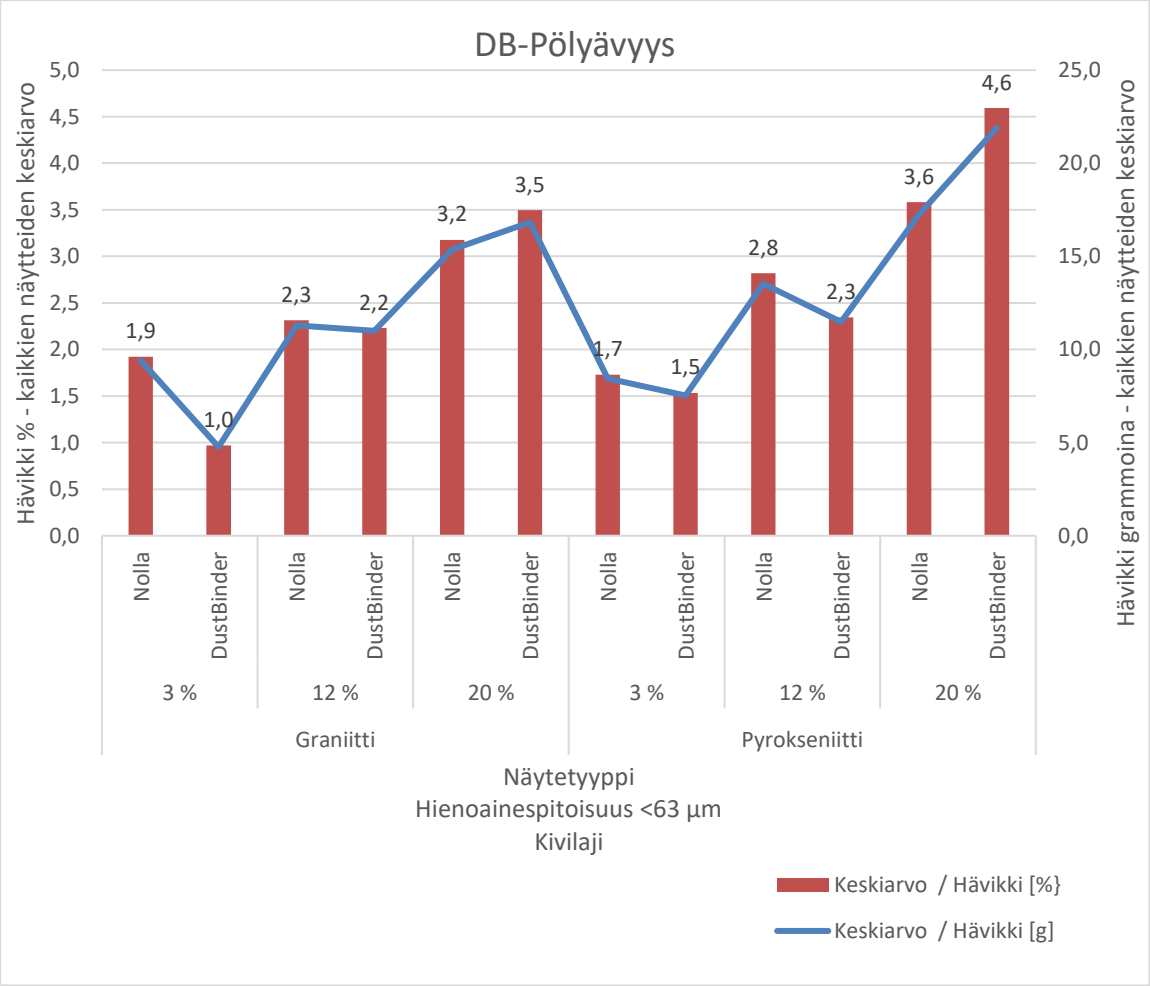
Taulukko 2: Puristuslujuus

| Puristuslujuus [kN] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Keskiarvo | Keskihajonta | Varianssi | LV:Min | LV:Max |
| G3-7 | 0,488 | 0,486 | 0,2365 | -0,72 | 1,696 |
| G12-7 | 0,32 | 0,009 | 0,0001 | 0,298 | 0,343 |
| G20-7 | 0,389 | 0,028 | 0,0008 | 0,137 | 0,641 |
| G3-28 | 0,413 | 0,04 | 0,0016 | 0,314 | 0,512 |
| G12-28 | 0,267 | 0,072 | 0,0051 | -0,376 | 0,909 |
| G20-28 | 0,377 | 0,018 | 0,0003 | 0,333 | 0,422 |
| P3-7 | 0,905 | 0,236 | 0,0557 | 0,612 | 1,153 |
| P12-7 | 1,088 | 0,023 | 0,0005 | 1,031 | 1,145 |
| P20-7 | 0,771 | 0,091 | 0,0083 | -0,047 | 1,589 |
| P3-28 | 1,184 | 0,302 | 0,091 | 0,435 | 1,934 |
| P12-28 | 0,961 | 0,168 | 0,0281 | 0,545 | 1,378 |
| P20-28 | 0,237 | 0,108 | 0,0117 | -0,734 | 1,208 |

## 9.1 Pölyävyys

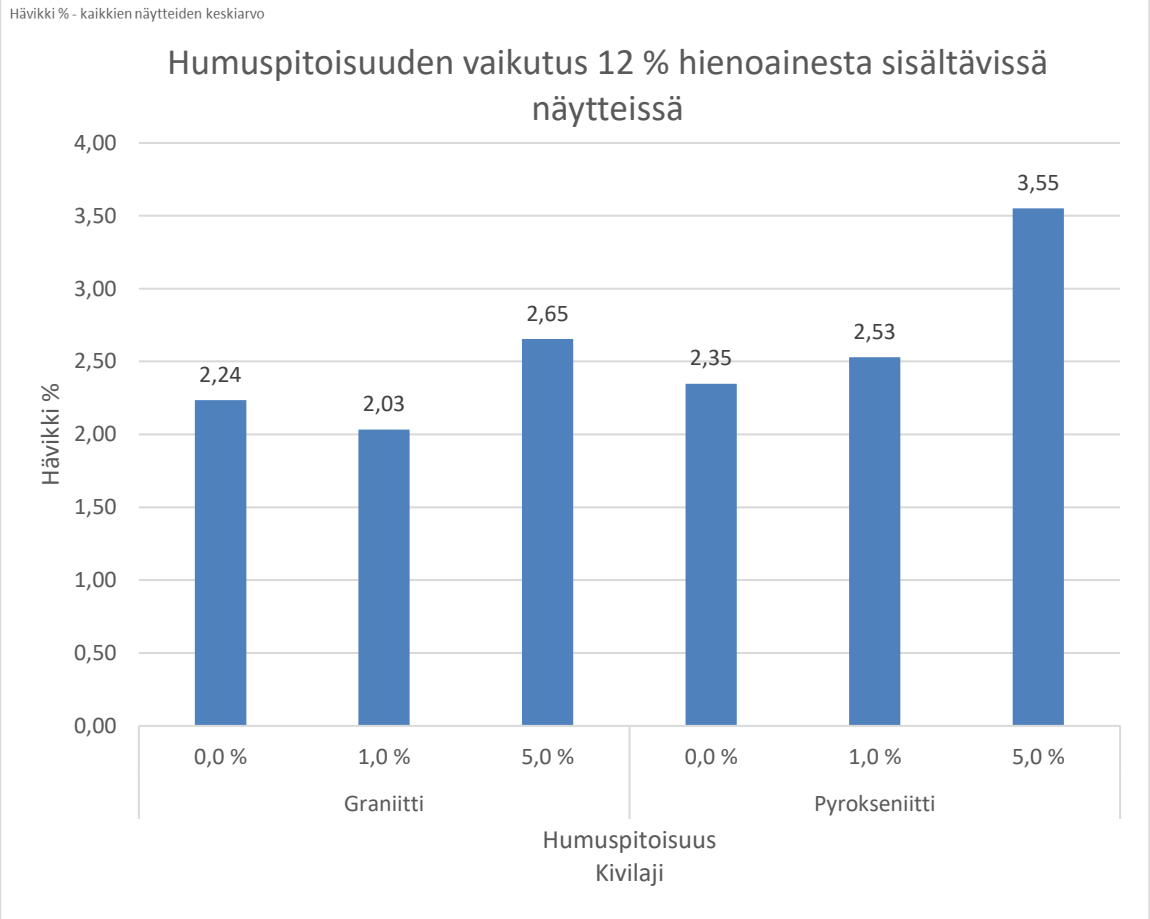
Pölyävyyskokeisiin käytettiin 500 gramman näytteitä, jotka oli käsitelty 12 millilitran annoksella DustBinder-käyttöliuosta. Näytteet sekoitettiin 0,85 litran alumiinivuokiin ja säilöttiin kosteaan

tilaan. 7 vuorokautta vanhat näytteet uunikuivattiin 50 asteessa yön yli ja pölytettiin Tapojärven mobiilituulikammiossa. Pölytyksen jälkeen näytteiden painoa verrattiin pölytystä edeltävään painoon ja laskettiin hienoaineksen hävikin määrä grammoina ja prosentteina. Saman näytteen toistojen tuloksista laskettiin hävikin keskiarvo grammoina ja prosentteina (kuva 21). Näytteiden toistojen painohäviön keskiarvoa prosentteina on kuvattu kaaviossa punaisin pylväin. Sininen jana kuvastaa painohäviötä grammoina. Humuspitoisuuden vaikutusta 12 % näytteen pölyävyyteen on havainnollistettu toisessa taulukossa (kuva 22).




Kuva 21: Tuulikammio kokeiden tuloksia

Pölyävyyden koenäytteiden painohäviöiden keskiarvoja vertaillessa voidaan havaita DustBinderin vähentäneen pölyävyyttä 3 % ja 12 % hienoainespitoisissa näytteissä sekä graniitin että pyrokseniitin kanssa. 20 % hienoainesta sisältävissä näytteissä painohäviö on ollut käsitellyissä näytteissä nollanäytteitä suurempi. Suurin ero painohäviön laskussa on ollut 3 %:n graniittinäytteissä, joissa painohäviö on laskenut n. 0,9 % tai 4,6 g. Seuraavaksi suurin painohäviön lasku on tapahtunut 12 %:n pyrokseniittinäytteissä, joissa painohäviö on laskenut 0,5 % tai 2,0 g.

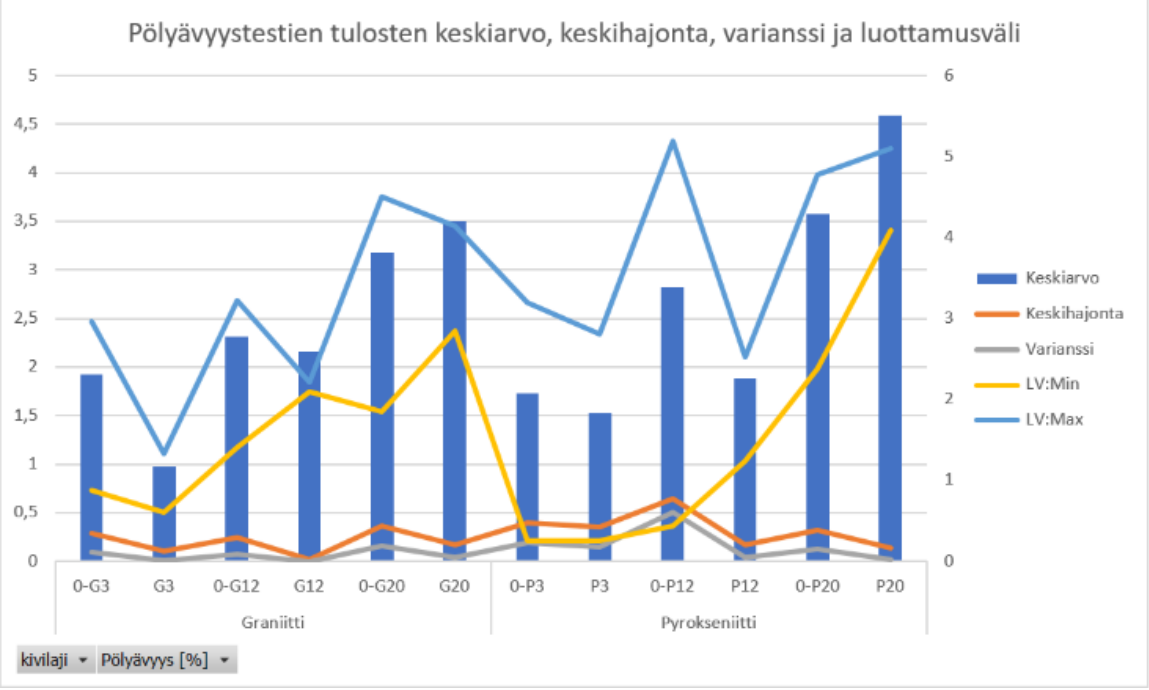



Kuva 22: Humuspitoisuuden vaikutus pölyävyyteen

Humuspitoisuuden vaikutusta näytteiden pölyävyyteen tutkittiin yhden prosentin ja viiden prosentin humuspitoisilla pölyävyysnäytteillä. Graniittinäytteitä vertaillessa humuspitoisuudella ei

näyttäisi olevan suurta vaikutusta graniitin pölyävyyteen. Hävikki on hieman suurempi 5 % humusta sisältävässä näytteessä, jonka hävikki oli noin puoli prosenttia humuksetonta näytettä suurempi. Suuri osa hävinneestä painosta oli itse humusainesta, jota oli puhalluskokeen jäljiltä paljon tuulikammion pohjalla. Pyrokseniittinäytteitä vertaillessa ei yhden prosentin humuspitoisuudella ole myöskään suurta vaikutusta hienoaineksen hävikkiin, kun taas 5 % humusta sisältävän näytteen hävikki on noin 1,1 %. Humuspitoisuuden vaikutusta havainnollistavia tuloksia tarkastellessa tulee ottaa huomioon niiden perustuvan yhdestä näytteestä saatuihin arvoihin. Useammilla toistoilla humuspitoisuuden vaikutuksen tulokset olisivat varmempia.

Tuloksia tarkastellessa hienoaineksen prosentuaalisen hävikin keskihajonta oli suurimmillaan 3 % ja 12 % hienoainesta sisältävissä pyrokseniittinäytteissä. Tämä on nähtävissä sekä nollanäytteiden, että DustBinderilla käsiteltyjen näytteiden kesken, mutta nollanäytteissä hajonta on suurempaa. Suurinta keskihajonta oli käsittelemättömässä 12 % pyrokseniittinäytteessä, jossa keskihajonnaksi laskettiin 0,78. Pienin keskihajonta taas oli 3 % ja 12 % hienoainesta sisältävissä graniittinäytteissä sekä käsittelemättömien että käsiteltyjen näytteiden kesken. Vähäisintä hajonta oli DustBinderilla käsitellyissä graniittinäytteissä. Pienin keskihajonta, 0,02, oli käsitellyn 12 % graniittinäytteen. (kuva 23)

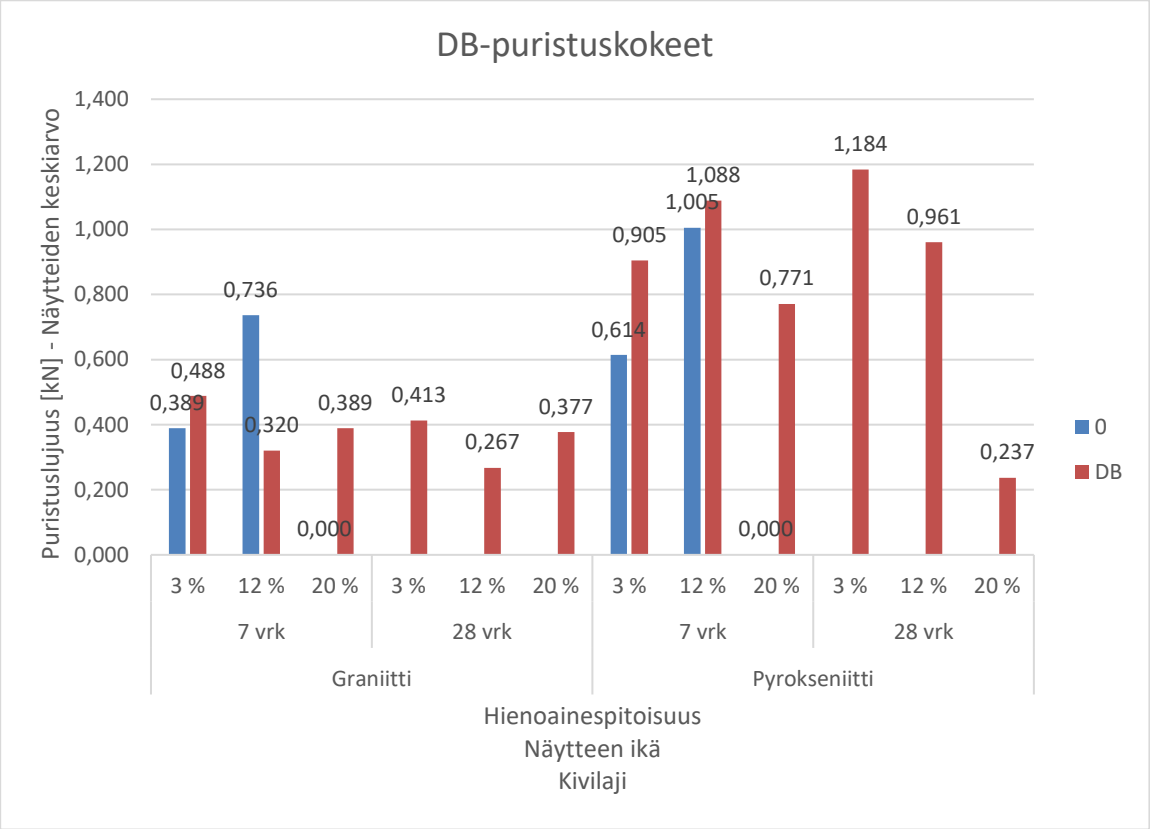



Kuva 23: Pölyävyystestien tulosten keskiarvo, keskihajonta, varianssi ja luottamusväli.

## 9.2 Puristuslujuus

Puristuslujuuskokeet suoritettiin noin 2,5 kilogramman painoisille, lieriön muotoisille koekappaleille, joiden halkaisija oli 100 millimetriä. Kokeita suoritettiin sekä 7, että 28 vuorokautta vanhoille koekappaleille ajan vaikutuksen DustBinderin toimivuuteen tutkimiseksi (kuva 24). Murskeen morfologian vaikutuksen tutkimiseksi, valmistettiin molemmista kivilajeista myös kaksi neitseellistä mursketta sisältävää koekappaletta, joita verrattiin jauhetusta murskeesta valmistettuihin koekappaleisiin (kuva 25). Lisätutkimuksena haluttiin myös tarkastella humuspitoisuuden vaikutusta kappaleen puristuslujuuden. Tätä varten molemmista kivilajeista valmistettiin yksi 1 % humusta sisältävä koekappale, sekä yksi 5 % humusta sisältävä koekappale. Näitä koekappaleita verrattiin normaaleihin DustBinderilla käsiteltyihin 12 % hienoainesta sisältäviin koekappaleisiin (kuva 26).

Molemmista kiviaineista valmistettiin myös yksi käsittelemätön koekappale, jokaista rakeisuuskäyrää kohden. Koekappaleiden päätarkoitus oli tutkia, kuinka materiaali tiivistyy ilman DustBinder-käsittelyä. Käsittelemättömistä kappaleista, jotka selvisivät ehjänä, pyrittiin mittaamaan myös puristuslujuus. Käsittelemättömät koekappaleet valmistettiin tutkituista koekappaleista ensimmäisinä, joten niiden tutkiminen kärsi niiden käsittelyn harjaantumattomuudesta. Lisäksi puristuslujuuden mittauslaitteen käytön harjaantumattomuus johti siihen, ettei kaikista lujuusmitatuista, käsittelemättömistä koekappaleista saatu tuloksia ylös. Käsittelemättömistä koekappaleista 20 % koekappaleet olivat odotetusti heikoimpia, eivätkä ne selvinneet puristuskokeeseen asti. 3 % ja 12 % hienoainesta sisältävistä, käsittelemättömistä koekappaleista onnistuttiin saamaan puristuslujuustulokset. Käsittelemättömien graniittikoekappaleiden puristuslujuudet olivat 0,389 kN (3 %) ja 0,736 kN (12 %), ja pyrokseniittikoekappaleiden puristuslujuudet 0,614 kN (3 %) ja 1,005 kN (12 %).

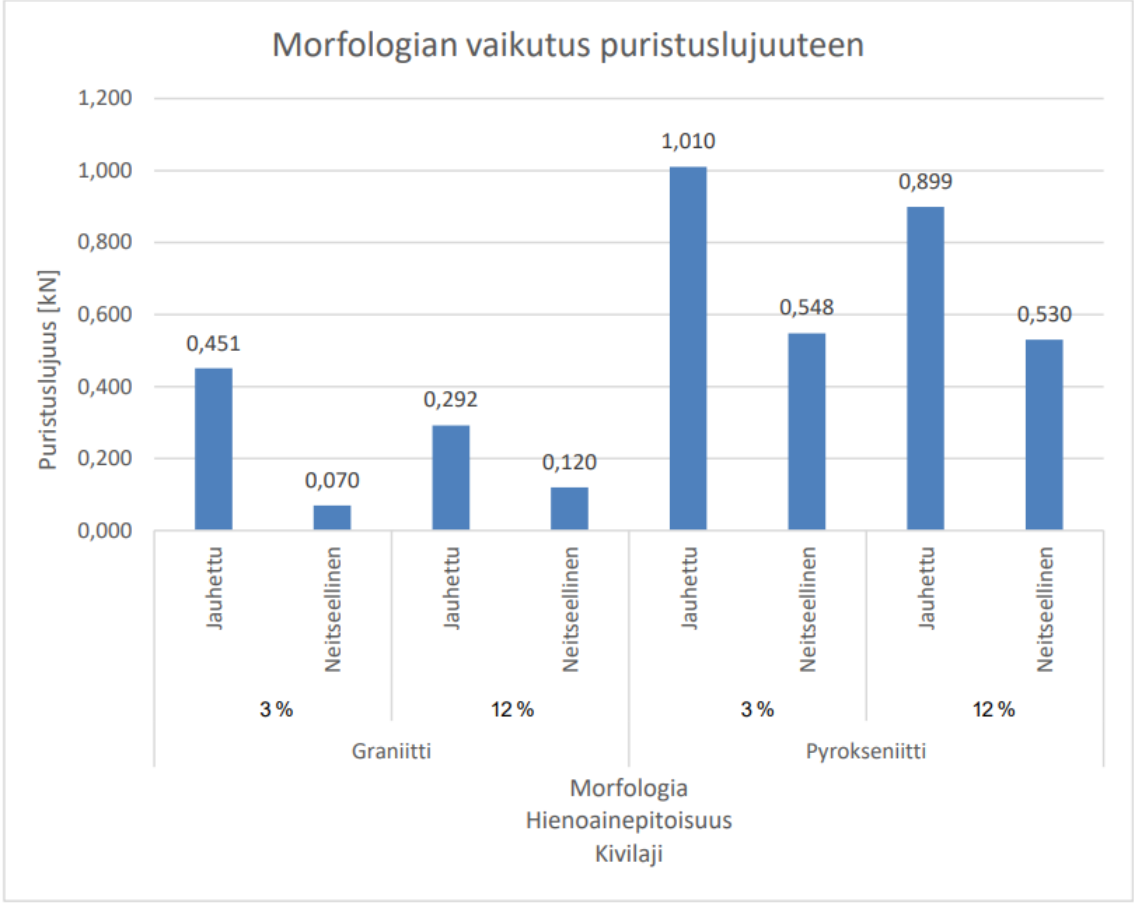



Kuva 24: Puristuskokeiden tuloksia (Siniset käsittelemättömiä 0-näytteitä)

Puristuskokeiden tuloksia vertaillessa voidaan havaita pyrokseniitistä valmistettujen koekappaleiden puristuslujuuden olleen useimpien vertausluokkien osalta graniitista valmistettuja koekappaleita suurempi. Puristuskokeiden jälkeisissä silmämääräisissä tutkimuksissa graniittista valmistetuissa koekappaleissa oli kuitenkin havaittavissa vahvempia hienoainessidoksia kuin pyrokseniitistä valmistetuissa koekappaleissa. Vahvimmat havainnot olivat 12 % hienoainesta sisältävissä graniitin koekappaleissa.

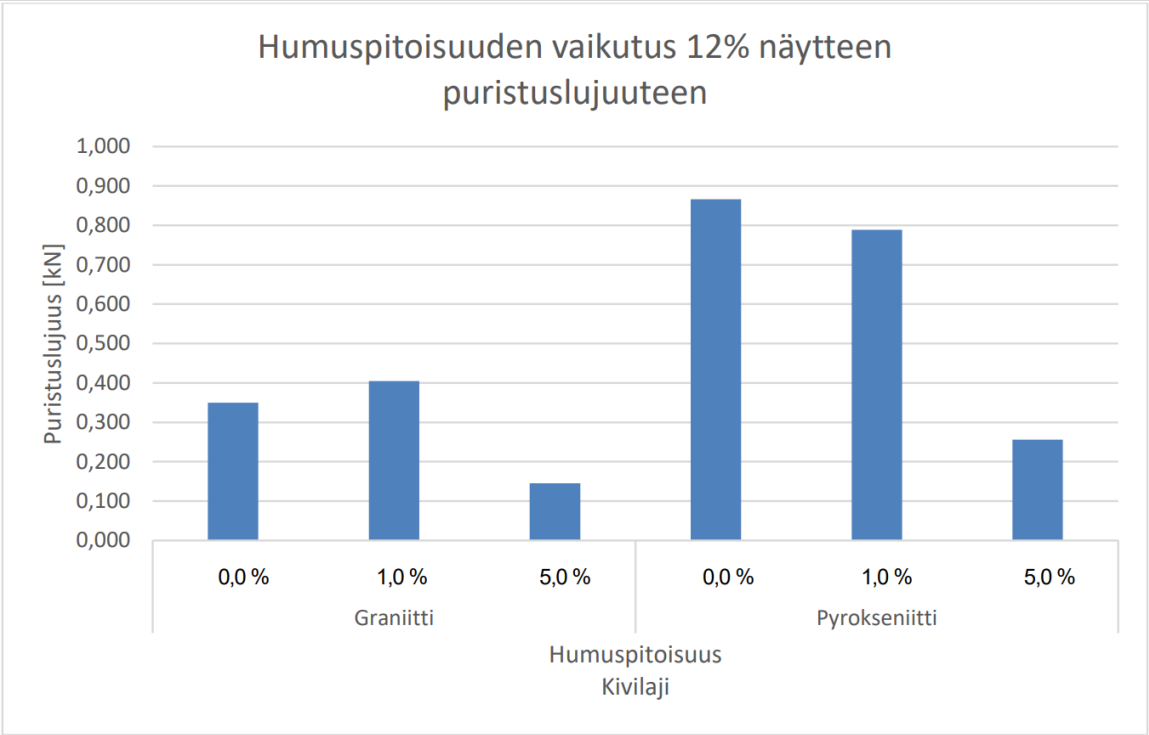
Kun tuloksia verrataan käsittelemättömistä koekappaleista saatuihin lujuustuloksiin, on huomioitava, että DustBinderilla käsitellyn 12 % graniittisen koekappaleen puristuslujuus (0,320 kN) on alle puolet käsittelemättömän koekappaleen lujuudesta (0,736 kN). 12 % pyrokseniittikoekappaleiden ja molempien kivilajien 3 % koekappaleiden osalta DustBinder paransi puristuslujuutta. Käsittelemättömistä 20 % koekappaleista puristuslujuuksia ei voitu mitata. Käsittelemättömiä ja DustBinderilla käsiteltyjä koekappaleita verratessa tulee ottaa huomioon, että käsittelemättömiä

koekappaleita oli vain yksi kappale rakeisuuskäyrää kohden. Useammalla toistolla käsittelemättömien kappaleiden tuloksien vertailu olisi luotettavampaa.




Kuva 25: Kiviaineksen morfologian vaikutus puristuslujuuteen

Morfologian vaikutusta puristuslujuuteen tutkiessa voidaan puristuskoe tuloksista havaita neitseellisestä murskeesta valmistetuissa koekappaleissa selvästi heikompia puristuslujuuksia, kuin tyypillistä tiellä esiintyvää pyöristynyttä mursketta vastaavaksi jauhetusta murskeesta valmistetuissa koekappaleissa. Puristuslujuuden heikentymistä on havaittavissa molemmissa kivilajeissa. Tuloksia tarkastellessa tulee kuitenkin ottaa huomioon neitseellisissä koekappaleissa havaittujen rakenteellisten vaurioiden vaikutus puristuskokeeseen. Toinen huomioitava seikka on myös toistojen puute neitseellisten koekappaleiden osalta.

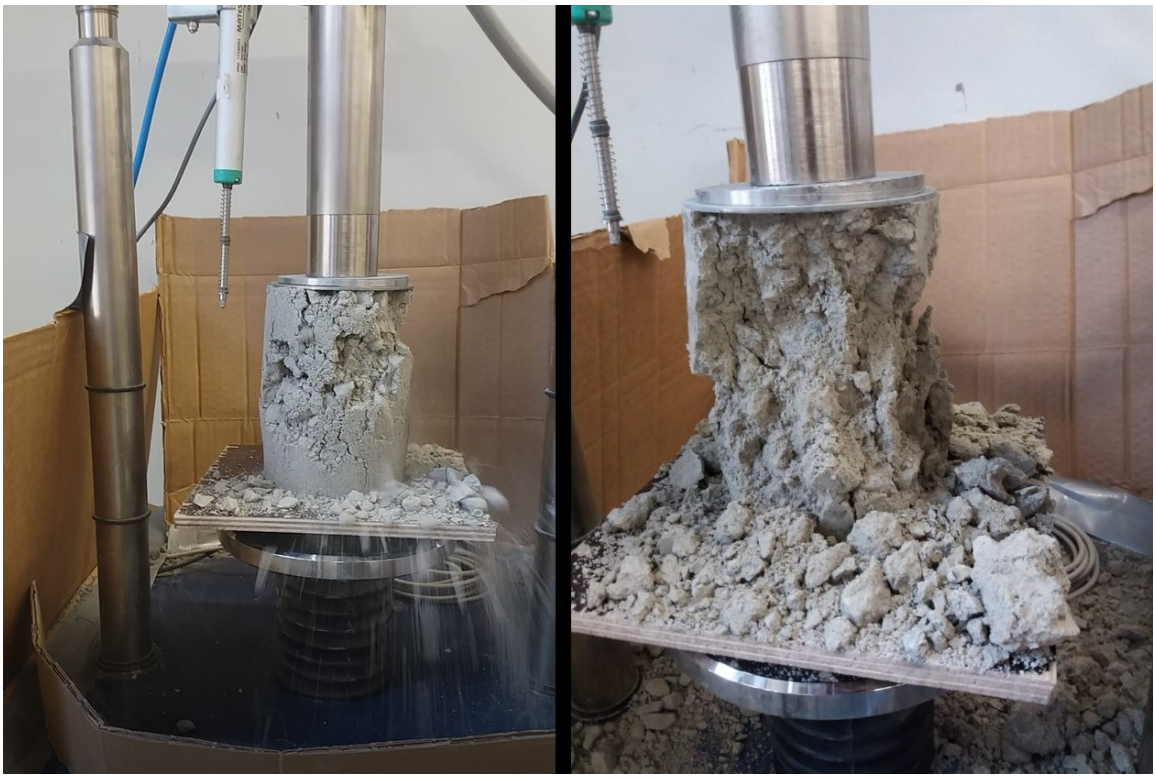



Kuva 26: Humuspitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen

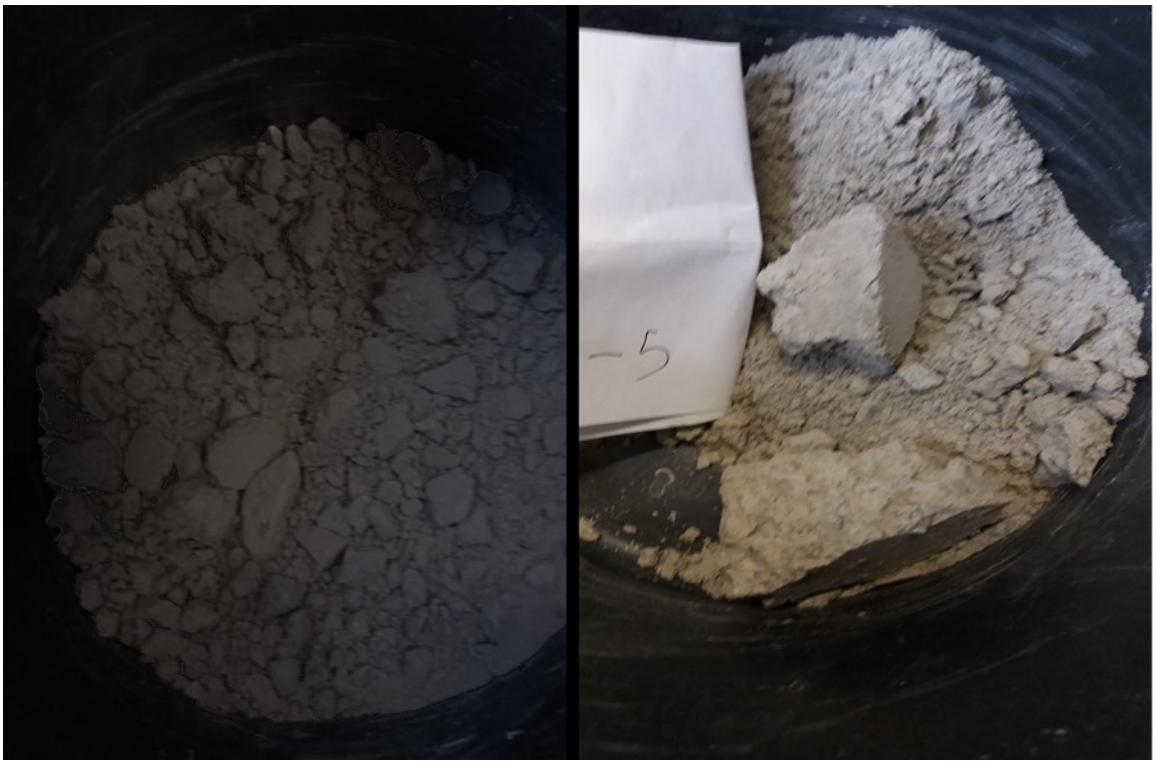
Humuspitoisuuden vaikutusta koekappaleen puristuslujuuteen tutkittiin 12 % alle 0,063 millimetrin hienoainesta sisältävillä koekappaleilla. Puristuskokeiden tulosten perusteella yhden prosentin humuspitoisuudella ei vaikuttaisi olevan suurta vaikutusta kummankaan kivilajin koekappaleiden puristuslujuuteen. Kun humuspitoisuutta nostettaan viiteen prosenttiin, on koekappaleen puristuslujuudessa havaittavissa jo selkeää heikentymistä. Kuten morfologian vaikutusta tutkivien koekappaleiden kohdalla, myös humuspitoisten koekappaleiden tutkimustuloksissa tulee ottaa huomioon toistojen puute. Lisäksi viisi prosenttisten koekappaleiden rakenne oli jo silmämääräisesti heikompi ennen puristuskokeita, mikä selittää heikkoa puristuskokeen tulosta, mutta myös lisää epäilystä DustBinderin toimivuudesta humuspitoisuuden ollessa tuota korkeusluokkaa.

Koekappaleiden hajoamisen silmämääräisessä seuraamisessa oli havaittavissa, että suuremman puristuslujuuden ennen sortumista saavuttaneet pyrokseniitista valmistetut koekappaleet hajosivat hapertuen hienommaksi kiviainekseksi (kuva 27). Alhaisempia puristuslujuustuloksia tuottaneet graniittikoekappaleet murtuivat kiinteämpinä palasina (kuva 28). Graniittikoekappaleiden

jäänteistä oli havaittavissa, että koekappaleen ulkoisempi osa koostui kiinteämmistä, yhteen sitoutuneista partikkeliklustereista, mutta koekappaleen ydin oli pehmeämpää ja irtonaisempaa.



Kuva 27: Pyrokseniitti ja graniitti




Kuva 28: Pyrokseniitti ja graniitti

# 10 Tulosten tarkastelu

Työn perimmäinen tarkoitus oli tutkia puhallus- ja puristuskokeiden avulla, kuinka kahden eri kiviaineksen erot ja erilaiset rakeisuuskäyrät vaikuttavat DustBinder-biopolymeerin vaikutukseen pölynsidonnassa ja stabiloinnissa. Tuulikammiossa testattujen pölyävyysnäytteiden tuloksia tarkastellessa voitaisiin päätellä, että rakeisuuskäyrällä ja hienoaineksen määrällä on vaikutusta materiaalin pölyävyyteen. Kiviainesten eroilla taas ei näiden testausten perusteella vaikuttaisi olevan suurta vaikutusta näytteen pölyävyyteen. Myös humuspitoisuuden vaikutus pölyävyyteen on tulosten perusteella vähäinen. Vaikka materiaalihävikissä on selvä nousu 5 % humusta sisältävien näytteiden kohdalla, suuri osa menetetystä materiaalista oli silmämääräisten havaintojen perusteella itse humusainesta.

Hienoaineksen määrän vaikutus pölyävyyteen ei itsessään ole suuri yllätys. Hienoin kiviaines on kevyintä ja suurin syy teiden pölyämiseen, ja kun sen määrä lisätään, lisääntyy myös pölyäminen. Biopolymeeriliuoksen määrä oli kaikissa pölyävyysnäytteissä sama. Rakeisuuskäyrän mukainen hienoainespitoisuus tulee ottaa huomioon biopolymeeriliuoksen annostelussa. Käsiteltävän tierakenteen rakeisuus tulisi tuntea tai selvittää ennen käsittelyä ja annostelua säätää sen mukaisesti.

Pölyävyyskokeiden tulosten tarkastelussa tulisi kuitenkin ottaa huomioon standardoimattoman testausmenetelmän mahdolliset huomiotta jääneet muuttujat ja prototyyppiasteella oleva tuulikammio, jonka toimivuudessa voi olla vielä epätasaisuutta. Tuulikammiosta saatuja tuloksia pitäisi pyrkiä vertaamaan 60 kilometrin tuntivauhdista saatuihin kenttätuloksiin, jotta tulosten vertailuarvo oikeaan liikenteen aiheuttamaan pölyävyyteen paranisi.

Koekappaleiden puristuslujuuskokeista saaduista tuloksista voidaan päätellä DustBinderin tehoavan paremmin pyrokseniitin kanssa kuin graniitin. Koekappaleiden silmämääräisen havainnoinnin perusteella on mahdollista, että karkeimpien kivikappaleiden jakaantuminen ja epätasainen biopolymeeriliuoksen tuottama yhteensitoutuminen on jättänyt graniittikoekappaleiden rakenteeseen tyhjää tilaa, joka heikensi niiden puristuslujuutta, kun taas pyrokseniittikoekappaleiden tasaisemman rakenteen ansiosta puristuksen rasitus jakaantui tasaisemmin koekappaleessa. Syytä tälle ilmiölle on kuitenkin vaikea selittää. Koekappaleiden vesipitoisuutta ei määritetty ko-

keita varten, joten kappaleiden kuivatiheyttä ja tiivistymistä on mahdoton vertailla tulosten tarkempaa tarkastelua varten. Koekappaleiden kosteus ja kuivumisolosuhteiden eroilla voi olla vaikutusta koekappaleiden tuloseroihin. Koekappaleiden säilytys ja kuivattaminen huoneilmassa täytyi olosuhteista johtuen suorittaa hieman improvisoiden pyrkien kuitenkin seuraamaan asianmukaisia standardeja mahdollisimman tarkasti, joten olosuhteiden täydellisestä yhtenäisyydestä koekappaleiden kesken ei voi olla täysin varmoja. Pyrokseniittikoekappaleiden valmistus ja säilytysajankohtana vallitsi helleaalto, kun taas graniittinäytteiden säilytysaikana ilma oli viileämpää. Periaatteessa tällä ei pitäisi olla suurta vaikutusta, mutta ero säilytystilana toimineen laboratorion sisäilmassa oli huomattavissa.

Tutkimuksissa käytettyjen puristuslujuuskokeiden verrattavuutta oikeisiin tieolosuhteisiin tulisi pohtia toimivuuden ja mielekkyyden kannalta. Tutkittuihin koekappaleisiin ei esimerkiksi kohdistunut tieolosuhteisiin verrattavavia tukivoimia sivuilta päin ja ne olivat muotonsa vuoksi paljon alttiimpia murtumaan laajaan tien kulutuskerrokseen verrattuna. DustBinderin on osoitettu parantavan tien kantavuutta pudotuspainomittauksina suoritettuina kenttäkokeina, esimerkiksi aiemmin mainitussa Tomi Kemppaisen opinnäytetyössä.

Tutkimusten tuloksista näkyy kuitenkin, että hienoaineksen määrällä ja kiviainesten eroilla voi olla vaikutusta DustBinder-biopolymeerin toimivuuteen. Lisätutkimuksia tulisi tehdä hienoaineksen määrän ja DustBinderin annostelun suhteesta. Kiviainesten erojen vaikutuksen lisätutkimuksissa tulisi perehtyä kiviainesten kemiallisten erojen vaikutuksen suurempaan tarkasteluun, jotta saataisiin parempaa tietoa, mitkä ominaisuudet ovat DustBinderin toimivuuden kannalta edullisia ja mitkä taas haitallisia.

# 11 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kivilajien erojen ja hienoainespitoisuuden vaikutusta DustBinder-biopolymeerin toimivuuteen pölynsidonnassa ja teiden stabiloinnissa. Kivilajien ja hienoaineksen vaikutuksella on merkitystä varsinkin kaivosalueilla, joissa teiden kulutuskerroksen materiaali on kivilajiltaan vaihtelevaa, ja pölyn määrä suurta kaivotyöstä johtuen. Riittävällä kehitystyöllä DustBinderista olisi mahdollista saada myös ympäristöystävällisempi vaihtoehto pölynsidontaan ja stabilointiin julkishallinnon sorateillä.

Päätavoitteiltaan opinnäytetyötä voidaan pitää onnistuneena. Pölyävyys- ja puristuslujuuskokeiden tuloksista on nähtävissä kivilajien erojen ja hienoainespitoisuuden vaikutusta DustBinderin toimivuuteen. Vaikka laboratoriotutkimusten tuloksia ei voida pitää suoraan verrannollisina todellisiin kaivosympäristön olosuhteisiin, saadaan niistä kuitenkin tietoa, kuinka esimerkiksi kulutuskerroksen rakeisuuskäyrä tulisi ottaa huomioon DustBinderin annostelussa.

Yleisesti opinnäyteprosessi oli myös erittäin onnistunut ja opettavainen kokemus. Työhön kuului tutkimusten lisäksi paljon palaverien ja tapaamisten järjestelyä ja muuta yhteydenpitoa osapuolien välillä, mikä oli hyödyllistä työelämän kannalta. Opintoihin kuuluneen harjoittelujakson tavoin myös tämän opinnäytetyön tekeminen auttoi suuresti siirtymisessä opiskelusta työelämään, lähentäen suhteita tulevaan työnantajaan ja tarjoten samalla hyödyllistä tietoa ja osaamista tulevaa työpaikkaa ajatellen.

Lähteet

1: Kaarela, Outi. Sorateiden pölynsidonta-aineiden ympäristövaikutuksia. Tiehallinto. 2003. https://julkaisut.vayla.fi/pdf/3200811v_sorateiden.pdf, Viitattu 13.11.2021

2: Tieverkko. Väylävirasto. 2021. https://vayla.fi/vaylista/tieverkko, Viitattu 13.3.2022

3: Sorateiden kunnossapito. Liikennevirasto. 2014. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2014-01_sorateiden_kunnossapito_web.pdf, Viitattu 17.7.2021

4: Kaivostoiminnassa muodostuva pöly ja sen leviäminen. Pöyry. 2013. https://www.ympa-risto.fi/download/noname/%7B0B761817-C81B-4A21-BE5D-7F99A8BE8169%7D/93349, Viitattu 13.11.2022

5: Oiva Huuskonen 14.1.2022

6: Tapojärvi Oy, 13.4.2022

7: Työympäristön pölyt. Työterveyslaitos. https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistumi-nen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/tyoympariston-polyt, Viitattu 24.3.2022

8: Silikoosi eli kivipölykeuhkosairaus. Työterveyslaitos. https://www.ttl.fi/teemat/tyoter-veys/ammattitaudit/silikoosi-eli-kivipolykeuhkosairaus, Viitattu 24.3.2022

9: Kaivostoiminta ja kaivoksen elinkaari. Geologia. 2018. https://www.geolo-gia.fi/2018/07/03/kaivostoiminta-ja-kaivoksen-elinkaari/, Viitattu 19.10.2021

10: Kuokkanen, Matti. Kuokkanen, Toivo. Mäentausta, Olli. Räsänen, Kimmo. Bioteknisesti modi-fioidun kuitulietteen eko- ja kustannustehokas hyödyntäminen. Mfibrils Oy. Oulun yliopisto. https://www.oulu.fi/sites/default/files/content/Kuitulieteposteri200514.pdf, Viitattu 17.7.2021

11: Patrikainen, Tapio. Hurme, Rauno. Kuokkanen, Matti. Teollisuuden sivuvirtojen käyttäminen pölynsidonnassa. Oulun yliopisto. 2018. https://www.oamk.fi/c5/files/5515/4261/0795/Ra-portti_polynsidontakokeista_2018_FINAL.pdf, Viitattu 13.3.2022

12: Johdonto kiviin. Geologia.2018. https://www.geologia.fi/2018/05/28/johdanto-kiviin/, Vii-tattu 19.10.2021

13: Kivilajien jaottelu ja syntytavat. Kaiva. https://kaiva.fi/geologia/kivilajit-ja-malmien-synty/ki-vilajien-jaottelu-ja-syntytavat/, Viitattu 8.2.2022

14: Granite. Geologyscience. 2018. https://geologyscience.com/rocks/granite/, Viitattu 25.2.2022

15: Pyroxenite. Geologyscience. 2018. https://geologyscience.com/rocks/igneous-rocks/pyroxenite/, Viitattu 25.2.2022

16: Nissinen, Timo. Pottala, Jorma. Biopolymeerit ja pölynsidonta. Liikennevirasto 2016. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-51_biopolymeerit_polynsidonta_web.pdf, Viitattu 13.11.2021

17: Konttinen, Salla. Biopolymeerien käyttö sorateiden pölynsidonnassa ja kelirikkokorjauksissa. AMK-opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. 2019. https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201901071094

18: Kemppainen, Tomi. Biopolymeeri Dustbinder soratien pintakelirikon estämisessä. AMK-opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. 2020. https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020092820781

19: Alexander, Victoria. Bioteknisesti modifioidun kuitusaven pilotointi pölynsidonnassa kaivosalueella. Yliopiston diplomityö. Oulun yliopisto. 2020. http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202011193144

20: Rakeisuus. Betonitieto. 13.1.2022. https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/rakeisuus.html, Viitattu 13.1.2022

21: Haavisto, Jukka. Laaksonen, Anssi. Betonin puristuslujuus. Liikennevirasto. 2018. Betonin puristuslujuus Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista, Viitattu 13.1.2022

Liite 1: Pölyävyysnäytteiden ja puristuskoekappaleiden tunnukset

| **Pölyävyysnäytteet** | |
|---|---|
| **Tunnus** | **Selitys (X = toiston järjestysnumero)** |
| **0-P3-X** | DustBinderia sisältämätön pyrokseniittin "nollanäyte", jonka hienoainespitoisuus (< 0,063 mm) on 3% |
| **0-P12-X** | DustBinderia sisältämätön pyrokseniittin "nollanäyte", jonka hienoainespitoisuus (< 0,063 mm) on 12% |
| **0-P20-X** | DustBinderia sisältämätön pyrokseniittin "nollanäyte", jonka hienoainespitoisuus (< 0,063 mm) on 20% |
| **0-G3-X** | DustBinderia sisältämätön graniittin "nollanäyte", jonka hienoainespitoisuus (< 0,063 mm) on 3% |
| **0-G12-X** | DustBinderia sisältämätön graniittin "nollanäyte", jonka hienoainespitoisuus (< 0,063 mm) on 12% |
| **0-G20-X** | DustBinderia sisältämätön graniittin "nollanäyte", jonka hienoainespitoisuus (< 0,063 mm) on 20% |
| **P3-X** | DustBinderilla käsitelty pyrokseniittinäyte, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **P12-X** | DustBinderilla käsitelty pyrokseniittinäyte, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **P20-X** | DustBinderilla käsitelty pyrokseniittinäyte, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 20% |
| **G3-X** | DustBinderilla käsitelty graniittinäyte, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **G12-X** | DustBinderilla käsitelty graniittinäyte, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **G20-X** | DustBinderilla käsitelty graniittinäyte, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 20% |
| **P-H1** | DustBinderilla käsitelty, 12 % hienoainesta sisältävä pyrokseniittinäyte, jonka humuspitoisuus on 1% |
| **P-H5** | DustBinderilla käsitelty, 12 % hienoainesta sisältävä pyrokseniittinäyte, jonka humuspitoisuus on 5% |
| **G-H1** | DustBinderilla käsitelty, 12 % hienoainesta sisältävä graniittinäyte, jonka humuspitoisuus on 1% |
| **G-H5** | DustBinderilla käsitelty, 12 % hienoainesta sisältävä graniittinäyte, jonka humuspitoisuus on 5% |

| Puristuskoekappaleet | |
|---|---|
| **Tunnus** | **Selitys (X = toiston järjestysnumero)** |
| **G7-3-X** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **G7-12-X** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **G7-20-X** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 20% |
| **G28-3-X** | 28 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **G28-12-X** | 28 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **G28-20-X** | 28 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 20% |
| **P7-3-X** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **P7-12-X** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **P7-20-X** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 20% |
| **P28-3-X** | 28 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **P28-12-X** | 28 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **P28-20-X** | 28 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 20% |

| Puristuskoekappaleet | |
|---|---|
| **Tunnus** | **Selitys (X = toiston järjestysnumero)** |
| **G7-3-N** | Neitseellisestä murskeesta valmistettu, 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **G7-12-N** | Neitseellisestä murskeesta valmistettu, 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **P7-3-N** | Neitseellisestä murskeesta valmistettu, 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 3% |
| **P7-12-N** | Neitseellisestä murskeesta valmistettu, 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% |
| **G7-12-H1** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% ja humuspitoisuus 1% |
| **G7-12-H5** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty graniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% ja humuspitoisuus 5% |
| **P7-12-H1** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% ja humuspitoisuus 1% |
| **P7-12-H5** | 7 vuorokauden ikäisenä testattu, DustBinderilla käsitelty pyrokseniitti koekappale, jonka hienoainespitoisuus ( < 0,063 mm) on 12% ja humuspitoisuus 5% |