

Niko Hietala  
Pirjo Kuula

# ASFALTTIKIVIAINEKSEN RAEMUODON JA MURSKAUS- TAVAN VAIKUTUS KUULAMYLLYARVOON





Niko Hietala, Pirjo Kuula

**Asfalttikiviaineksen raemuodon ja  
murskaustavan vaikutus  
kuulamyllyarvoon**

Väyläviraston tutkimuksia 15/2019

Väylävirasto  
Helsinki 2019

*Kannen kuva: Niko Hietala*

Verkkójulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0982

ISBN 978-952-317-724-6

Väylävirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. 0295 34 3000

**Niko Hietala ja Pirjo Kuula: Asfalttikiviaineksen raemuodon ja murskaustavan vaikutus kuulamylyllyarvoon.** Väylävirasto. Helsinki 2019. Väyläviraston tutkimuksia 15/2019. 77 sivua ja 2 liitettä. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-724-6.

**Avainsanat:** asfaltti, kiviaines, nastarenkaat, kulutuskestävyys, murskaus, kuulamylyllyarvo, litteysluku, raemuoto

## Tiivistelmä

Kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyydellä on suuri vaikutus päällysteiden kulumisnopeuteen. Nastarengaskulutuskestävyyttä mitataan pohjoismaisella kuulamylyllytestillä. Kiviaineksen litteysluvulla tiedetään kokemuseräisesti olevan yhteys kuulamylyllytestin tuloksiin siten, että litteiden rakeiden osuuden kasvassa kuulamylyllyarvo myös kasvaa.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kokeellisesti litteysluvun ja kuulamylyllyarvon välistä yhteyttä valikoiduilla kivilajityypeillä. Tutkimuksen tavoitteena oli myös luoda lähtökohdat jatkotutkimuksille asfalttipäällysteiden nastarengaskulutuskestävyyden ja kuulamylyllytestin tulosten välisen yhteyden selvittämiseen. Tutkimus toteutettiin opinnäytetyönä, jossa on esitelty kirjallisuuteen perustuen Suomen kivilajien yleisiä ominaisuuksia, kiviaineksen tuotantoprosessia, asfalttipäällysteitä ja asfalttipäällysteen kulumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Opinnäytetyön kokeellisessa osassa tutkittiin litteysluvun vaikutusta kuulamylyllyarvoon modifioimalla neljän erilaisen kiviaineksen litteyslukua ja tekemällä muokatulla kiviaineksella kuulamylyllykokeita. Työssä selvitettiin myös kiviaineksen murskausprosessin aikana tehdyn raemuodon muokkauksen (kubisoinnin) ja laboratoriomittakaavaisen esihionnan vaikutusta kuulamylyllyarvoon. Esihionnan vaikutusta selvitettiin pyörittämällä kiviainesta kuulamylyllyssä, jonka jälkeen kiviaineksen litteyslukua modifioitiin valitulle tasolle ja kuulamylyllytestit tehtiin uudelleen. Kuulamylyllytettä tehtiin myös raekooltaan pienemmällä testilajitteella 8/11,2 mm, jonka korrelaatio lajitteesta 11,2/16 mm tehdyn kuulamylyllytestin tuloksiin selvitettiin. Lopuksi valmistettiin yhdestä kiviaineksestä kahdella erillisellä litteysluvulla AB16-asfalttimassa, jonka nastarengaskulutuskestävyyttä mitattiin Prall-testin avulla.

Tutkimuksen tulosten perusteella kuulamylyllyarvo muuttuu keskimäärin 0,5-1,0 yksikköä kymmentä litteysluvun yksikköä kohti lukuun ottamatta yhden louhoksen kiviainesta, jonka nastarengaskulutuskestävyys pysyi samalla tasolla litteysluvun muuttuessa. Suurimmillaan kuulamylyllyarvon muutos oli 1,9 kun litteysluku muuttui kymmenen yksikköä. Tulosten perusteella voitiin todeta, että litteysluku ei vaikuta kuulamylyllyarvoon, jos kiviaineksen raaka-aine on ominaisuuksiltaan erittäin lujaa.

Kubisoinnilla voidaan parantaa kiviaineksen kuulamylyllyarvoa ja vähentää litteysluvun vaikutusta, mutta vaikutus on aina kivilajikohtainen. Tässä tutkimuksessa laboratoriossa tehty esihionta paransi kuulamylyllyarvoa, mutta tulosten perusteella voitiin havaita, että tarvittava hionta-aika riippuu selkeästi kivilajista. Lajitteiden 8/11,2 mm ja 11/16 mm kuulamylyllykokeiden tulokset korreloivat hyvin keskenään. Tämän perusteella voitiin todeta, että kiviaineksen kuulamylyllyarvoa voidaan arvioida testaamalla lajitetta 8/11,2 mm, ja tulosten arvioinnissa voidaan käyttää Asfalttinormien mukaisia kuulamylyllyluokkia.

---

Litteysluvun vaikutuksesta Prall-testin tuloksiin ei voitu tehdä johtopäätöksiä pienen testiaineiston vuoksi, mutta tulosten perusteella karkean kiviaineksen litteysluvun vaikutusta asfalttimassan kulumiskestävyys on syytä tutkia lisää Prall-menetelmällä. Tutkimuksen tuloksia dokumentoitiin kuvaamalla testi-näytteet ennen kuulamylykoetta ja sen jälkeen. Kuvista oli erittäin paljon hyötyä kuulamylytestissä tapahtuvan litteysluviltaan erilaisen kiviaineksen rikkoutumisen havainnollistamisessa.

Tutkimustulosten perusteella jatkotutkimustarpeena tuli selkeästi esille tarve litteysluvun ja kuulamylyarvon sekä asfalttimassan ja päällysteiden nastarengaskulumiskestävyyskeskinäisen vuorovaikutussuhteen selvittäminen ensin laboratoriomittakaavassa ja sen jälkeen mahdollisesti myös pienimuotoisilla koerakenteilla. Siten voitaisiin selvittää kiviaineksen litteysluvun ja kuulamylyarvon vaikutus päällysteen todelliseen nastarengaskulumiskestävyys.

Tutkimus on osa Väyläviraston selvityksiä, joissa tutkitaan päällystekiviainesten ominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä.

**Niko Hietala och Pirjo Kuula: Inverkan av asfaltstenmaterialets kornform och krossningssätt på kulkvarnsvärdet.** Trafikledsverket. Helsingfors 2019. Trafikledsverkets undersökningar 15/2019. 77 sidor och 2 bilagor. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-724-6.

## Sammanfattning

Stenmaterialets dubbdäcksslitstyrka har en stor inverkan på hur snabbt beläggningarna slits. Dubbdäcksslitstyrkan mäts med det nordiska kulkvarns-testet. Erfarenhetsmässigt vet man att stenmaterialets flisighetstal har ett samband med resultaten av kulkvarnstestet på så vis att när andelen platta korn ökar ökar även kulkvarnsvärdet.

Syftet med studien var att genom test reda ut sambandet mellan flisighetstalet och kulkvarnsvärdet med utvalda typer av stenmaterial. Ett annat syfte var att skapa utgångspunkter för fortsatta undersökningar för att reda ut sambandet mellan asfaltbeläggningars dubbdäcksslitstyrka och resultaten i kulkvarns-testet. Studien genomfördes som ett lärdomsprov där man utifrån litteraturen presenterade allmänna egenskaper hos stensorterna i Finland, stenmaterialets produktionsprocess, asfaltbeläggningar och faktorer som påverkar slitaget på asfaltbeläggningar.

I lärdomsprovets experimentella del studerades flisighetstalets inverkan på kulkvarnsvärdet genom att modifiera fyra olika stenmaterials flisighetstal och göra kulkvarnstester med bearbetat stenmaterial. I arbetet redde man även ut hur bearbetning av kornformen under stenmaterialets krossningsprocess (kubisering) och grovslipning i laboratorieskala påverkar kulkvarnsvärdet. Effekten av grovslipning utreddes genom rotering av stenmaterial i kulkvarnen, varefter stenmaterialets flisighetstal modifierades till vald nivå och kulkvarnstesterna upprepades. Kulkvarnstester gjordes även med den mindre testkornfraktionen 8/11,2 mm, vars korrelation med resultaten av kulkvarnstester med kornfraktionen 11,2/16 mm utreddes. Till slut framställde man AB16-asfaltmassa från samma stenmaterial med två separata flisighetstal, varefter man mätte massans dubbdäcksslitstyrka med hjälp av ett Prall-test.

Studiens resultat visar att kulkvarnsvärdet ändras med i genomsnitt 0,5–1,0 enheter per tio flisighetstalsenheter med undantag för stenmaterial från ett stenbrott, vars dubbdäcksslitstyrka höll sig på samma nivå när flisighetstalet ändrades. Som störst var förändringen i kulkvarnsvärdet 1,9 när flisighetstalet ändrades med tio enheter. Utifrån resultaten kunde man konstatera att flisighetstalet inte påverkar kulkvarnsvärdet om stenmaterialets råmaterial till sina egenskaper är mycket hårt.

Genom kubisering kan stenmaterialets kulkvarnsvärde förbättras och flisighetstalets inverkan minskas, men effekten är alltid beroende av stensorten. I denna studie förbättrades kulkvarnsvärdet genom en grovslipning i laboratorium, men resultaten visade att den tid som krävs för slipningen klart beror på stensorten. Resultaten av kulkvarnstesterna med kornfraktionerna 8/11,2 mm och 11/16 mm korrelerar väl sinsemellan. Utifrån detta kunde man konstatera att ett stenmaterials kulkvarnsvärde kan bedömas genom att testa kornfraktionen 8/11,2 mm, och att kulkvarnsklasser enligt Asfaltnormerna kan användas för utvärdering av resultaten.

---

Man kunde inte på grund av litet testmaterial dra några slutsatser om flisighetstalets inverkan på Prall-testets resultat, men utifrån resultaten finns det anledning att undersöka vidare med Prall-metoden vilken inverkan ett grovt stenmaterials flisighetstal har på asfaltmassans slitstyrka. Studiens resultat dokumenterades genom att fotografera proverna före och efter kulkvarnstestet. Bilderna var till mycket stor nytta för att åskådliggöra hur stenmaterial med olika flisighetstal söndras i kulkvarnstestet.

Resultaten visar att det finns ett klart behov av fortsatta undersökningar för att reda ut växelverkan mellan flisighetstalet och kulkvarnsvärdet samt asfaltmassans och beläggningarnas dubbdäcksslitstyrka, först i laboratorieskala och därefter möjligtvis även genom småskaliga provkonstruktioner. På så vis kunde man få fram hur stenmaterialets flisighetstal och kulkvarnsvärdet i verkligheten påverkar beläggningens dubbdäcksslitstyrka.

Studien är en del i Trafikledsverkets utredningar i vilka man undersöker beläggningstenmaterials egenskaper och faktorer som påverkar dessa.



**Niko Hietala and Pirjo Kuula: The Effect of Particle Shape and Crushing Process on the Nordic Ball Mill Test Results of Asphalt Aggregates.** Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2019. Research reports of the Finnish Transport Infrastructure Agency 15/2019. 77 pages and 2 appendices. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-724-6.

**Keywords:** aggregates, studded tyre abrasion, flakiness index, particle shape, Nordic abrasion test

## Abstract

The main element effecting on the wearing of asphalt pavement is the resistance of coarse aggregate to wear by studded tyres which is measured according to EN 1097-9 (Nordic abrasion test). Based on experiential knowledge there is a correlation between flakiness index and studded tyre abrasion value of coarse aggregate when the percentage of flaky grains increases the studded tyre abrasion value also increases.

The aim of this study was to find out the correlation between flakiness index and studded tyre abrasion value of coarse aggregate mainly by experimental studies. The aim of the study was also to create basis for further research for evaluation of the the wearing resistance of asphalt pavement. The literature part of thesis presents the general characteristics of the Finnish rock types, the basics of aggregate production process and the asphalt pavements and the factors affecting the wear of the asphalt pavement.

In the experimental part of the thesis, the effect of flakiness index on abrasion value was studied by modifying the flakiness of four different aggregate types and testing the modified aggregates by Nordic abrasion test. The effect of the shape properties on the abrasion value was also studied by pre-grinding the aggregates in laboratory conditions. The effect of the use of impact crusher in the real crushing process on the flakiness index and abrasion value was also evaluated. The effect of pre-grinding was studied by shaping the aggregate in abrasion test drum in dry conditions for 10 or 30 minutes, after which the aggregate was modified, and abrasion was tested. Abrasion was also tested using a smaller grain size 8/11.2 mm to evaluate the correlation to the coarser test fraction 11/16 mm. Finally, one of the aggregates was used in asphalt mass. Flakiness index of the coarse aggregate was modified to 3 and 20. Aggregates with different flakiness indexes were used in AB16 asphalt masses. The wear resistance of the bituminous mixtures were measured by the Prall test.

According to test results the abrasion value changes on average from 0.5 to 1.0 units per 10 flakiness index units. If quality of the aggregate is very good, the flakiness index does not affect to abrasion value.

The decrease of the flakiness index improves the abrasion value of aggregates, but the effect is always specific to the aggregate and rock type. In this study, pre-grinding improved the value of abrasion value, but the results showed that the required grinding time clearly depends on the type of rock. The abrasion test results of the grain size fraction 8/11.2 mm and 11/16 mm correlated well. Based on this, the abrasion value level of the 11,2/16 mm fraction can be estimated on the basis of the abrasion value of 8/11.2 mm fraction, and the abrasion classes in Asfalttinormit can be used to evaluate the results.

---

The effect of the flakiness index on the results of the Prall test could not be concluded due to the small number of tests. Based on the results, the effect of coarse aggregate flakiness on the abrasion resistance of asphalt mass should be further studied by the Prall method. The results of the study were documented by photographing test samples before and after the abrasion test. The photographs were very useful in illustrating the breakage of the aggregates with different flakiness indices in the abrasion test.

Based on the research results, the need for further studies is to find out the correlation between flakiness index and abrasion value and the wear resistance of asphalt mass and pavement first in a laboratory scale and then by using in-situ test structures. Thus, the effect of aggregate's flakiness index and the Nordic ball mill value on the actual wear resistance of pavement could be determined.

The thesis is part of The Finnish Transport Infrastructure Agency's research in which the properties of asphalt aggregates and the factors affecting them are studied.

---

## Esipuhe

Tutkimus on osa Väyläviraston selvityksiä, joissa tutkitaan päällystekiviainesten ominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Julkaisu perustuu Niko Hietalan diplomityöhön, josta työn ohjaaja Pirjo Kuula on muokannut Väyläviraston julkaisun.

Tutkimuksen ohjaukseen ovat osallistuneet Kari Lehtonen, Katri Eskola ja Laura Valokoski Väylävirastosta sekä Pirjo Kuula ja Pauli Kolisoja Tampereen yliopistosta.

Helsingissä lokakuussa 2019

Väylävirasto  
Tekniikka ja ympäristö

## Sisältö

1	JOHDANTO .....	11
2	KIVIAINEKSEN VALMISTUS JA OMINAISUUDET .....	12
2.1	Suomen kallioperä ja kivilajit.....	12
2.2	Kivilajien ja mineraalien ominaisuuksista .....	15
2.3	Kiviaineksen laatuvaatimukset.....	16
2.4	Kiviaineksen tuotantoprosessi .....	18
3	ASFALTTIPÄÄLLYSTEEN KULUMINEN .....	24
3.1	Asfalttipäällysteet .....	24
3.2	Asfalttipäällysteen kuluminen .....	25
3.3	Kiviaineksen vaikutus asfalttipäällysteen kulumiseen .....	27
4	TESTATUT NÄYTTEET .....	30
4.1	Valikoidut näytemateriaalit .....	30
4.2	Näytteenotto.....	34
4.3	Näytteiden esikäsittely .....	38
5	TESTAUSOHJELMA JA –MENETELMÄT .....	39
5.1	Testausohjelma .....	39
5.2	Testausmenetelmät .....	39
	5.2.1 Litteysluku .....	39
	5.2.2 Kuulamylyllyarvo.....	40
5.3	Litteysluvun modifiointi .....	42
5.4	Esihionta.....	43
5.5	Asfalttimassan nastarengaskulutus- kestävyys .....	44
6	KIVIAINESTESTIEN TULOKSET .....	46
6.1	Louhos A.....	46
6.2	Louhos B.....	49
6.3	Louhos C .....	52
6.4	Louhos D.....	55
6.5	Esihionta.....	57
6.6	Kuulamylylytestit raekokolajitteesta 8/11,2 mm.....	60
7	ASFALTTIMASSAN NASTARENGASKULUTUSKESTÄVYYS .....	61
7.1	Asfalttimassan suunnittelu ja valmistus .....	61
7.2	Prall-testi .....	62
8	TULOSTEN ANALYSOINTI JA VERTAILU .....	65
8.1	Tulosten yhteenveto .....	65
8.2	Litteysluvun vaikutus kuulamylylytuloksiin.....	67
8.3	Murskausprosessin vaikutus .....	68
8.4	Esihionnan vaikutus.....	69
8.5	Testilajitteen vaikutus .....	71
8.6	Litteysluvun vaikutus asfalttimassan Prall-arvoon.....	71
9	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	73
	LÄHTEET .....	75
	LIITTEET	
	Liite A Testausstandardit	
	Liite B Kuulamylylynäytteiden valokuvat	

# 1 Johdanto

Päällysteen urautuminen on Suomen teillä yleinen syy päällysteen uusimis- ja paikkaamistoimenpiteisiin. Yksi urautumista aiheuttavista tekijöistä on tien kulutuskerrokseen kohdistuva nastarengaskulutus. Nastarenkaan kulutusvaikutus ilmenee nastan iskuna, hiertona ja raapaisuna nastan joutuessa kontaktiin päällysteen kanssa. Lisäksi nastan ominaisuudet vaikuttavat kulumisnopeuteen.

Kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyydellä on suuri vaikutus päällysteiden urautumiseen ja siten niiden käyttöikään Suomessa. Vaikutus on yleisesti pohjoisissa olosuhteissa isompi kuin muualla, sillä merkittävä osa autoilijoista käyttää nastarenkaita lain määrittämän talvirengaspakon aikana, mikä nopeuttaa päällysteen kulumista. Asfalttipäällysteen kulumiseen vaikuttavat esimerkiksi liikenteen nastarengaskulutus ja uuden päällysteen alkukuluminen. Päällysteen kulumisen havaitaan yleensä urautumisena, joka voi johtua myös rakennekerrosten ongelmista, työvirheistä päällystyksen aikana tai esimerkiksi siitä, että massapintausta tehdään voimakkaasti urautuneelle päällysteelle tasaamatta sitä ensin. Päällysteen urautuminen ei siis välttämättä johdu ainoastaan kulumisesta. Kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyttä mitataan laboratoriossa kuulamylykokeella, jonka tulokset korreloivat kulutuskestävyyden kanssa.

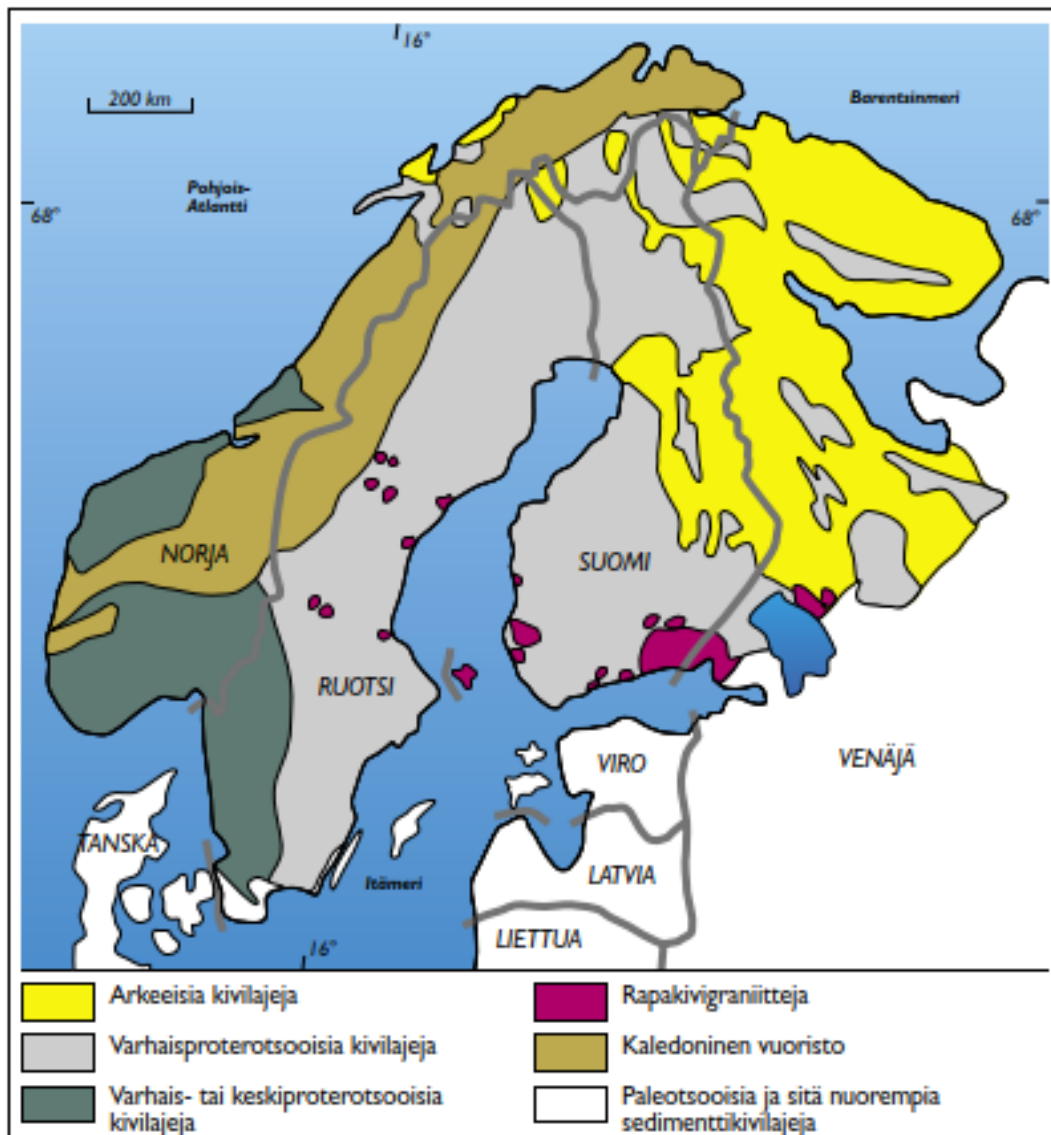
Kiviaineksen litteysluvulla tiedetään kokemusperäisesti olevan yhteys kuulamylykokeen tuloksiin, mutta sitä ei tunneta vielä tarkasti. Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia litteysluvun ja kuulamylyarvon välistä yhteyttä valikoituilla kivilajityypeillä sekä verrata tuloksia kirjallisuuteen. Lisäksi tällä tutkimuksella luodaan lähtökohdat jatkotutkimuksille asfalttipäällysteiden nastarengaskulutuskestävyyden ja kuulamylytestin tulosten välisen yhteyden selvittämiseen. Kiviaineksen ominaisuudet riippuvat kivilajista, mineraaleista ja niiden vallitsevasta raekoosta, mineraalien järjestäytyneisyydestä ja rapautuneisuudesta. Nämä asiat määrittelevät kiviaineksen käyttökelpoisuuden asfalttikiviaineksenä.

Kirjallisuusselvityksessä perehdytään kiviaineksen valmistukseen ja ominaisuuksiin sekä asfalttipäällysteen kulumiseen. Tutkimuksen kokeellisessa osassa tutkittiin, miten kiviaineksen murskausprosessi ja muoto-ominaisuudet vaikuttavat kuulamylykokeen tuloksiin tutkimukseen valituilla neljästä ottopai- kasta peräisin olevalla kiviainestyyppillä. Myös ennen kuulamylytestiä tehtävän esihionnan vaikutusta selvitetään kokeellisesti. Kiviainekselle tehdään vielä esihionta, jonka jälkeen tehdään litteysluvun modifiointi ja kuulamylytestit uudelleen. Kuulamylykoe tehdään myös 8/11,2 mm lajitteelle, sillä murskatun kiviaineksen litteyslukuarvo kasvaa usein siirryttäessä pienempiin raekokoihin ja lajite voi vaikuttaa päällysteen kulutuskestävyyteen. Laboratoriokokeiden jälkeen valmistetaan yhdestä kiviaineksestä kahdella erillisellä litteysluvulla asfalttimassa, jonka nastarengaskulutuskestävyyttä mitataan Prall-testin avulla.

## 2 Kiviaineksen valmistus ja ominaisuudet

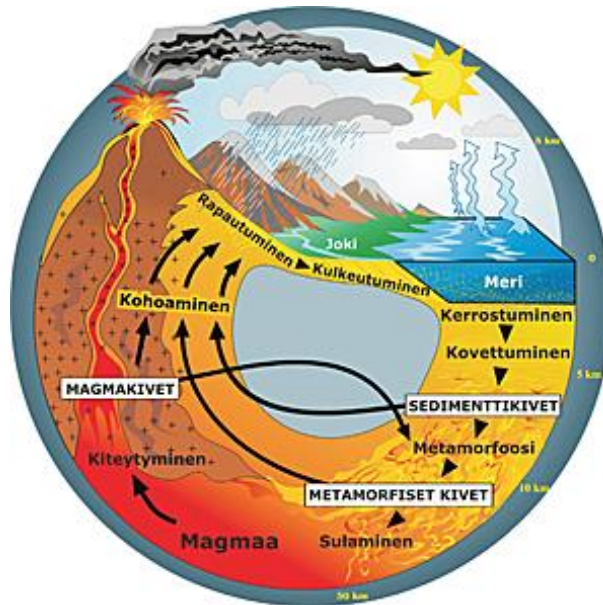
### 2.1 Suomen kallioperä ja kivilajit

Suomen kallioperä kuuluu Fennosarmatian peruskalliokratooniin. Suomen etelä- ja keskiosat kuuluvat noin 1900 miljoonaa vuotta sitten syntyneeseen kallioperään. Suomen pohjois- ja itäosat kuuluvat noin 3000 miljoonaa vuotta sitten syntyneeseen kallioperään. Vain pieni osa Suomen kallioperästä on nuorta sedimenttikiveä. (Korsman, Koistinen 1998) Kuvasta 1 huomataan, kuinka Suomen suurtopografia jakautuu melko selkeästi eri alueisiin. Kallioperän laatu kuitenkin vaihtelee alueellisesti paljon, mikä johtuu kivilajien vaihtelun ja kallioperän heikkousvyöhykkeiden yhteisestä vaikutuksesta. (Korhonen, Gardemeister et al. 1974)



Kuva 1. Fennoskandian kallioperän pääosat (Korsman, Koistinen 1998).

Suomen kallioperän kivilajit voidaan karkeasti jakaa kolmeen ryhmään: syväkivilajit, sedimenttikivilajit ja metamorfiset kivilajit. Yli puolet Suomen kallioperän pinta-alasta on syväkivilajeja, 40 prosenttia on metamorfisia kivilajeja ja pieni osa on sedimenttikivilajeja. (Korhonen, Gardemeister et al. 1974) Osa metamorfisista kivilajeista on syväkivilajeja, jotka ovat kokeneet voimakkaan metamorfoosin (Kauranne 1972). Kuvassa 2 on esitetty kiven yksinkertaistettu kierto-  
kulku.



Kuva 2. Kiven kiertokulku (Grönholm, Alviola et al. 2010).

Syväkivilajit eli magmakivet ovat massamaisia kivilajeja, eli ne ovat suuntautumattomia. Syväkivilajit muodostuvat magmasta hitaasti kiteytymällä syvällä maankuoren sisässä. (Korhonen, Gardemeister et al. 1974) Syväkivilajien rakenne voi olla tasarakeinen tai porfyyrinen. Porfyyrinen rakenne sisältää isompia hajarakeita, mikä tekee rakenteesta hauraamman. (Grönholm, Alviola et al. 2010) Syväkivilajeihin kuuluvat muun muassa graniitti, dioriitti ja gabro. (Korhonen, Gardemeister et al. 1974)



Kuva 3. Taivassalon punainen graniitti (Väätäinen b).

Metamorfishet kivilajit eli kiteiset liuskeet ovat rakenteeltaan liuskeisia kivilajeja, eli ne ovat suuntautuneita. Metamorfishet kivilajit voivat syntyä sekä magmattä sedimenttikivistä. Maankuoren liikunnat, korkea lämpötila sekä puristavat voimat kääntävät ja kasvattavat mineraalirakeita tiettyyn suuntaan, mikä aiheuttaa metamorfoosin lisäksi kiven suuntautuneisuuden. Metamorfishiin kivilajeihin kuuluvat muun muassa kvartsiitit, amfiboliitit, kiillegneissit, leptiitit ja kiilleliuskeet. (Korhonen, Gardemeister et al. 1974)



Kuva 4. Kalimaasälvän ja kvartsin muodostama silmägneissi (Geologia.fi).

Sedimenttikivilajit eli kerrostuneet kivilajit ovat rakenteeltaan klastisia. Klastinen rakenne muodostuu sedimenttien rakeesta ja iskosaineesta, joka on yleensä kvartsi, kalkkisälpä tai rautaoksidi. Sedimenttikivilajit syntyvät savesta tai hiekasta kovettumalla tai kemiallisesti saostumalla liuoksista. Sedimenttikivien rakenne on löyhä ja lujuudeltaan ne ovat muita kivilajeja heikompia. (Korhonen, Gardemeister et al. 1974)



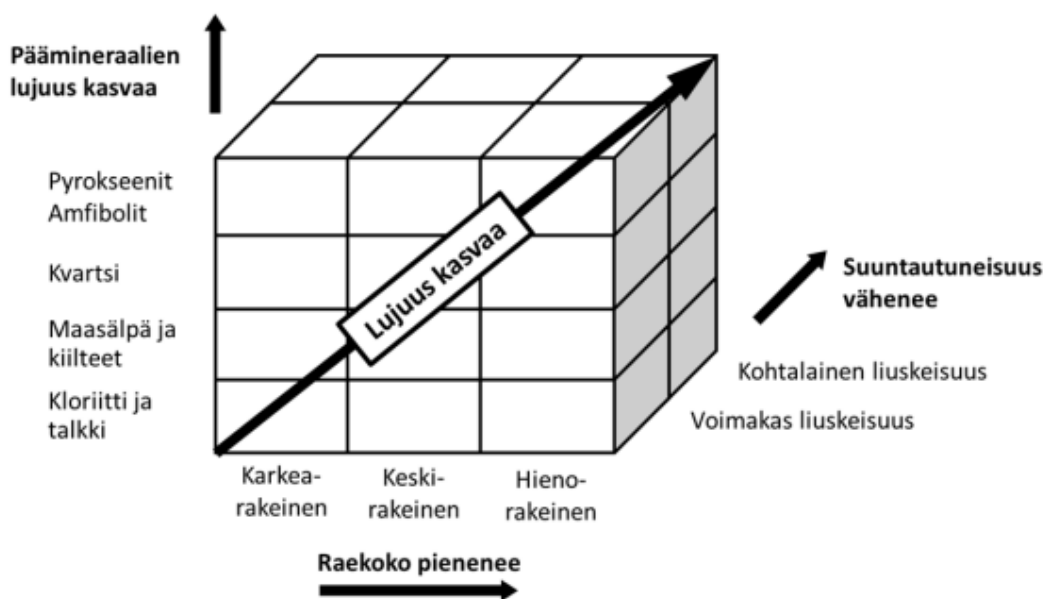
Kuva 5. Hiekkakivi (Väätäinen a).



## 2.2 Kivilajien ja mineraalien ominaisuuksista

Kivilajin petrografinen koostumus vaikuttaa merkittävästi kiviaineksen ominaisuuksiin ja käyttökelpoisuuteen. Koostumuksen tärkeimmät tekijät ovat mineraalikoostumus sekä muuttumis- ja rapautumistila. Petrografisessa kuvauksessa kiven pääkomponenteista eli mineraaleista määritellään raekoko, teksturi, anisotropia, huokoisuus, väri ja vulkaanisilla kivilajeilla rakkulaisuus. Lisäksi määritellään eri mineraalien suhteelliset osuudet. Kuvaukseen lisätään tarvittaessa tiedot käyttöä rajoittavista mineraaleista tai haitallisista aineista, kuten kiilteistä, sulfaateista, sulfideista, silikaateista tai orgaanisista aineksista. Kiven petrografinen koostumus määritetään ohuthienäytteestä, joka valmistetaan esimerkiksi lohkarasta standardien SFS-EN 12407 tai PANK 2302 mukaisesti. Ohuthienäyte hiotaan 0,03 mm paksuiseksi, jonka jälkeen sitä analysoidaan polarisaatiomikroskoopilla. Mineraalien suhteet lasketaan pistelaskurilla. Ohuthieanalyysin suorittaa geologi. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018) Myös murskeesta voidaan tehdä yksinkertaistettu petrografinen analyysi standardin SFS-EN 932-3 mukaan. Yksinkertaistetussa analyysissä määritellään yleensä vain kivilaji. Tavoitteena on osoittaa kiviaineksen kelpoisuus asfaltin kiviainekseksi.

Kiviaineksen lujuuteen vaikuttavat mineraalikoostumus, mineraalien raekoko ja suuntautuneisuus (kuva 6). Mineraalikoostumus vaikuttaa kiven ominaisuuksiin usealla eri tavalla. Eri mineraaleilla on tyypillinen muoto, lujuus, kovuus ja lohkeamistapa. Kiven lujuus kasvaa mineraalien raekoon pienentyessä, sillä hienorakeisten mineraalien koheesio-pinta on suurempi kuin karkearakeisilla mineraaleilla. Suuntautuneisuus heikentää kiven lujuutta, koska suuntautuneilla mineraaleilla heikkoussuunnat ovat yhdensuuntaiset, mikä voimistaa niiden vaikutusta. Suuntautuneilla mineraaleilla murtolujuus vaihtelee merkittävästi puristus-suunnasta riippuen. Suuntautumattomilla mineraaleilla lujuus pysyy melko samanlaisena puristus-suunnasta riippumatta, mikä tekee siitä ominaisuuksiltaan paremman. (Kauranne 1972)



Kuva 6. Kiven lujuuteen vaikuttavat tekijät (Rasimus 2014, Maijala, Kauranne et al. 1973).

Mineraalien kovuus voidaan määritellä eri tavoin. Mohsin kovuusasteikolla määritellään mineraalien suhteellinen kovuus, mikä ei anna totuudenmukaista kuvaa mineraalien välisistä kovuseroista. Luokittelu perustuu siihen, että suuremman kovuusasteen mineraali naarmuttaa pienemmän kovuusasteen mineraalia. Kvartsi on suomalaisista kivilajeja muodostavista mineraaleista kovin (kovuus 7) ja vastaavasti kiillemineraalit, kuten biotiitti ja muskoviitti, ovat kovuudeltaan 2,5-3 (Grönholm, Alviola et al. 2010). Mohsin kovuuden sijaan voidaan käyttää esimerkiksi Vickersin kovuutta, joka määritetään painamalla timanttikartiota koekappaleeseen yhdestä suunnasta. Vickersin testi antaa tarkemman kuvan mineraalien välisistä kovuseroista. (SFS-EN ISO 6507-1:2018) Taulukossa 1 on mineraaleja, joille on määritetty sekä Mohsin että Vickersin kovuus.

Taulukko 1. *Mineraalien kovuusasteikkoja (Korhonen, Gardemeister et al. 1974, Hytönen 1999).*

Vertailumi- neraali	Mohsin kovuus	Vickersin kovuus	Naarmuttava väline
Talkki	1	7-20	Kynsi
Kipsi	2	30-50	Messinkiraha
Kalsiitti	3	100	Messinkiraha
Fluoriitti	4	180-200	Ikkunalasi
Apatiitti	5	400-600	Ikkunalasi
Maasälpä	6	600-900	Teräs
Kvartsi	7	1000	
Topaasi	8	1100-2000	
Korundi	9	1700-2300	
Timantti	10	7000-11000	

Mineraalin sitkeys vaikuttaa kovuuden lailla sen kestävyteen mekaanisessa rasituksessa. Sitkeys vaikuttaa etenkin mineraalin puristuslujuuteen ja iskunkestävyyteen. Sitkeässä mineraalissa tapahtuu plastista tai kimmoista muodonmuutosta ennen hajoamista. Sitkeitä mineraaleja ovat muun muassa sarvivälke ja pyrokseeni. Mineraalirakeiden muoto vaikuttaa rakeiden väliseen kiinnittymiseen. Epämääräisen muotoiset rakeet kiinnittyvät toisiinsa lujemmin kuin pyöreän muotoiset rakeet. Esimerkiksi kvartsilla ei ole selkeää lohkeavuussuuntaa, ja sen murros on simpukkamainen. Hieman heikommalla kalimaasälvällä on sen sijaan kaksi selkeää lohkeavuussuuntaa. (Korhonen, Gardemeister et al. 1974, Selonen 2017)

## 2.3 Kiviaineksen laatuvaatimukset

Kiviaines on yleisnimitys rakentamisessa käytetyllä rakeiselle materiaalille. Kalliota murskattaessa syntyy kiviainesta, joille on asetettu laatuvaatimuksia. Kiviaineksen käyttöön liittyvistä laatuvaatimuksista tärkeimpiä ovat raekokojakautuma, rakeiden muoto-ominaisuudet ja lujuusominaisuudet, kuten hiovan kulutuksen kesto ja iskunkestävyys. Nämä ominaisuudet määritetään asianomaisten testausstandardien mukaisesti. Lisäksi kiviaineksen mineraalikoostumukselle on asetettu vaatimuksia siten, että vaativissa käyttökohteissa käytettävä kiviaines ei saa sisältää liikaa rapautumisherkkiä mineraaleja. Asfalttikiviaineksen laatuvaatimukset on esitetty Asfalttinormeissa. Tässä tutkimuksessa

keskitytään kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyttä kuvaavaan kuulamylyllyarvoon ja muoto-ominaisuuksia kuvaavaan litteyslukuun. Testimenetelmät esitellään tarkemmin luvussa 5. Kuulamylyllyarvon vaatimukset esitetään Asfalttinormeissa taulukon 2 mukaisina luokkina. Asfalttinormien mukaan yksittäisistä tuloksista 85 prosenttia tulee olla valitun luokan mukaisia. Yksittäisille tuloksille on lisäksi määritetty poikkeavan tuloksen enimmäisarvo. Asfalttikiviaineksen tuotantoerän kuulamylyllyjen keskiarvon tulee täyttää aina taulukon 2 mukaisen luokan vaatimus. (PANK ry 2017)

Taulukko 2. Nastarengaskulutuskestävyyden luokat (PANK ry 2017).

Luokka	Kuulamylyllyarvo	Poikkeavan yksittäisen tuloksen enimmäisarvo
A <sub>N</sub> 7	≤ 7,4	8,1
A <sub>N</sub> 10	≤ 10,4	11,5
A <sub>N</sub> 14	≤ 14,4	16,1
A <sub>N</sub> 19	≤ 19,4	21,9
A <sub>N</sub> 30	≤ 30,4	34,5

Litteysluvulle on asfalttinormeissa määritetty taulukon 3 mukaiset luokat. Asfalttimassaan käytettävän kiviainesseoksen luokka määräytyy litteyslukutulosten keskiarvon perusteella. Yksittäisen lajitteen litteysluvun tulee olla aina suurempi kuin 3. (PANK ry 2017)

Taulukko 3. Litteysluvun enimmäisarvojen luokat (PANK ry 2017).

Litteyslukuluokka	Litteysluvun arvo
Fl <sub>10</sub>	≤ 10
Fl <sub>15</sub>	≤ 15
Fl <sub>20</sub>	≤ 20
Fl <sub>35</sub>	≤ 35

Asfalttinormien mukaan kiviaineksen kelpoisuus asfalttimassaan voidaan määrittää mineralogian perusteella ohuthienäytteestä. Asfalttiin käytettävän kiviaineksen tulee olla rapautumatonta. Rapautumattomuuden kriteerit on määritelty mineraalikoostumuksen perusteella. Kiviaines on rapautumatonta, jos sulfidimineraalien määrä on maksimissaan 5 prosenttia määritettynä ohuthieestä. Jos kokonaisrikkipitoisuus on alle 0,1 prosenttia, ei sulfidimineraalien määrää ja laatua tarvitse selvittää. Sulfidimineraaleihin kuuluvat muun muassa magneettikiisu, rikkikiisu ja kuparikiisu. Kiilteen tai muiden pehmeiden mineraalien määrä saa maksimissaan olla 15 prosenttia. Jos kiilteen määrä on 15-20 prosenttia, tulee kiilteen olla hienorakeista ja tasaisesti jakautuneena. Hienorakeisen kiilteen raekoko on alle 1 mm. Kiilteet eivät saa olla yleisin mineraali kiviaineksessa. Tämä tarkistetaan röntgendiffraktiomenetelmällä PANK 2301 mukaisesti. Jos pehmeitä mineraaleja on yli 20 prosenttia, osoitetaan rapautumattomuus muilla menetelmillä. Pehmeitä mineraaleja ovat mineraalit, joiden Mohsin kovuus on pienempi tai yhtä suuri kuin 3, tai Vickersin kovuus on pienempi tai yhtä suuri kuin 100. (PANK ry 2017)

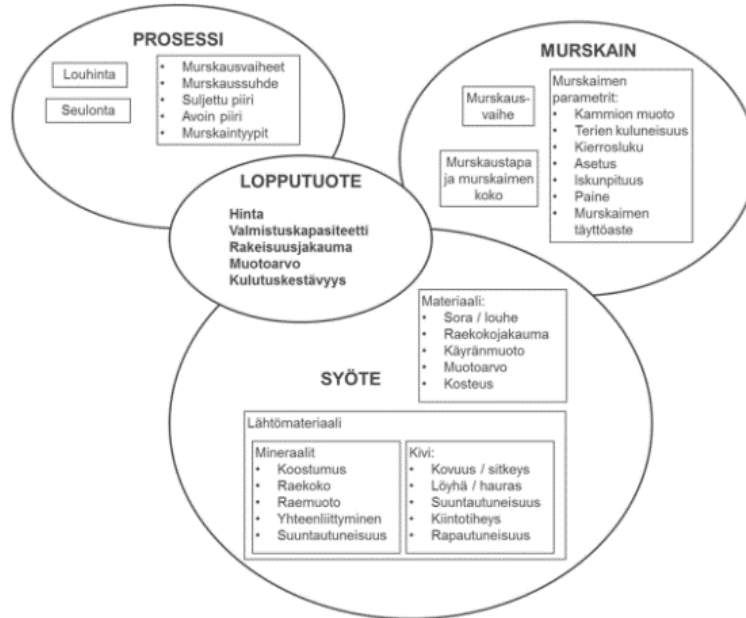
## 2.4 Kiviaineksen tuotantoprosessi

Vuosittain Suomessa käytetään noin 70-100 miljoonaa tonnia kiviaineksiä. Kalliomurskeen osuus käytetystä kiviaineksestä on kasvanut jo useita vuosikymmeniä, ollen vuoden 2013 tilastojen perusteella noin 60 % koko kiviainestuotannosta. Siksi myös kiviaineksen tuotantoprosessin merkitys kasvaa jatkuvasti. Suurin osa kiviaineksestä käytetään sitomattomana, asfalttiin käytettävän kiviaineksen määrä on noin 10 prosenttia. Noin 80 prosenttia Geologian tutkimuskeskuksen tutkimasta kallioperäalueesta on käyttökelpoista kiviainestuotantoon, mutta vain prosentti tutkitusta alueesta on kiviaineksiltään riittävän laadukasta, jotta sitä voitaisiin käyttää laadukkaimmissa asfalteissa. (Lonka, Loukola-Ruskeeniemi et al. 2015)



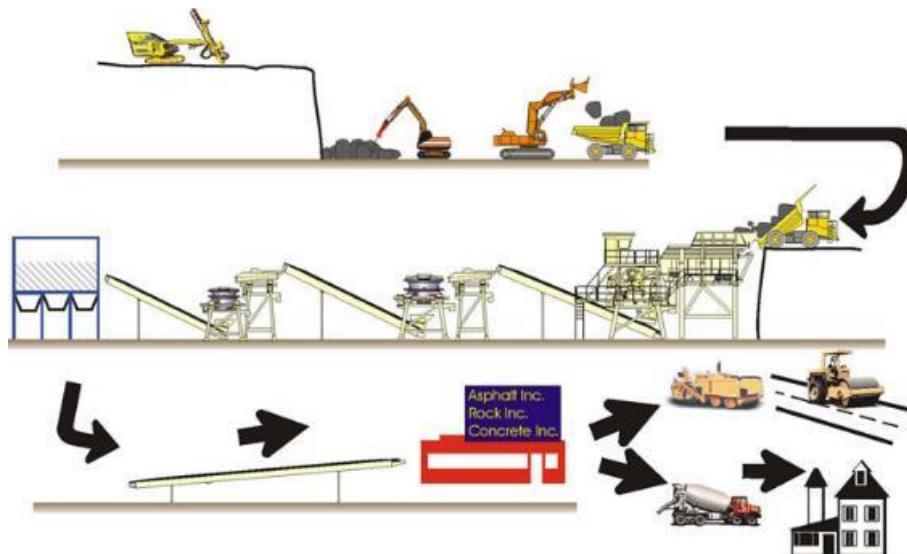
Kuva 7. Tie- ja ratarakenteet ovat sitomattoman kiviaineksen yleinen käyttökohde. Kuvassa on ratarakenne (Kuula 2015).

Raaka-aineen ominaisuuksien lisäksi kiviaineksen tuotantoprosessi on merkittävä kiviaineksen laatuun vaikuttava tekijä. Kuvassa 8 on esitetty kiviaineksen raaka-aineiden, tuotantoprosessin ja siihen liittyvien tekijöiden vaikutuksia syntyvään lopputuotteeseen.



Kuva 8. Kiviaineksen tuotantoprosessin vaikutus lopputuotteeseen (Ruuskanen 1999).

Kiviaineksen tuotantoprosessi koostuu louhinnasta, murskauksesta ja seulonnasta. Kiviaineksen louhinta on osa louhosprosessia. Louhosprosessiin kuuluu kallion poraus ja räjäytys, lohcareiden rikotus, kuljetus murskauslaitokselle, murskaus ja varastointi (kuva 9). Poraus ja räjäytys pyritään tekemään siten, ettei lohcareet ole ylisuuria. Optimoimalla porausreikien välimatka vältetään myös räjäytyksessä syntyviä mikrohalkeamia, jotka heikentävät kiviaineksen laatua. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018).

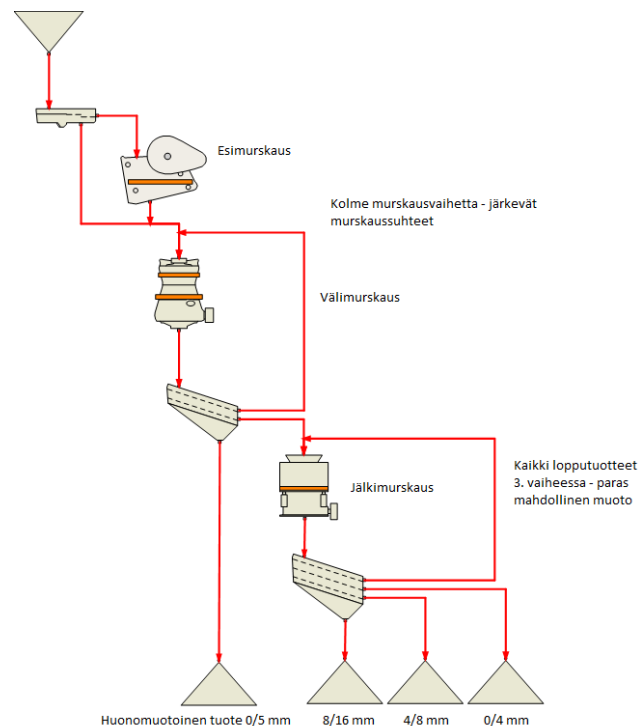


Kuva 9. Esimerkki louhosprosessista (Suomen Betoniyhdistys ry 2018).

Murskausprosessi jaetaan kolmeen eri vaiheeseen: esimurskaukseen, välimurskaukseen ja jälkimurskaukseen. Välimurskaus voi sisältää useampia murskauskertoja riippuen halutusta lopputuotteesta ja esimurskauksen lopputuotteesta. Esimurskauksen tarkoituksena on pienentää kiviaineksen raekokoa riittävästi, jotta sitä voidaan kuljettaa kuljetushihnalla ja murskata pienemmällä murskaimella. Esimurskaimena käytetään leukamurskaimia tai joskus karamurskaimia, mikäli tuotantokapasiteetti on erityisen iso tai murskaustarve pitkäaikainen. Leukamurskaimet ovat kuitenkin yleisempiä helpon siirrettävyytensä vuoksi.

Välimurskauksen tarkoituksena on muodostaa kiviaineksesta eri raekokoja käyttötarkoituksen mukaan. Välimurskauksessa voidaan kiviaineksesta tuottaa suoraan sopivia raekokoja esimerkiksi tien rakenteeseen tai murskata kiviainesta jälkimurskausta varten. Välimurskaukseen käytetään yleensä kara- tai kartiomurskainta. Jälkimurskauksen tarkoituksena on parantaa lopputuotteen laatua. Jälkimurskauksessa murskataan kiviaines sopiviin pienempiin raekokoihin tai kubisoidaan kiviainesta paremman muotoiseksi.

Jälkimurskauksessa käytetään yleensä kartio- tai iskumurskainta, kuten HSI eli horizontal shaft impact crusher ja VSI eli vertical shaft impact crusher. HSI on vaaka-akselinen iskumurskain eli iskupalkkimurskain (kuva 15) ja VSI pystyakselinen iskumurskain (kuva 16) eli keskipakomurskain. (Viilo 2011) Kubisointi tarkoittaa murskausprosessin vaihetta, jossa keskitytään etenkin kiviaineksen muotoiluun raekoon pienentämisen sijasta. Kiviaineksen muotoilu tapahtuu yleensä jälkimurskauksessa iskumurskaimella. Kuvassa 10 on esimerkki murskausprosessista, joka on sopiva betoni- tai asfalttikiviaineksille.



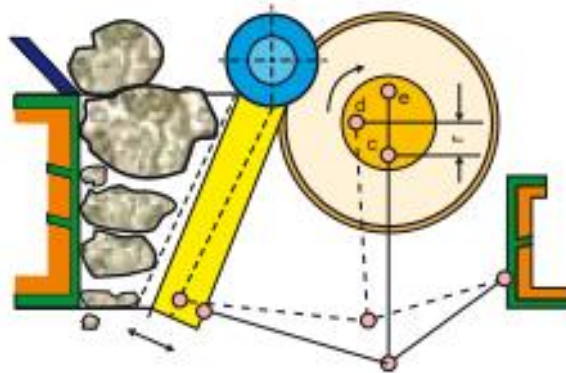
Kuva 10. Esimerkki asfalttikiviaineksen murskausprosessista (Suomen Betoniyhdistys ry 2018).

Leukamurskaimen murskausteho perustuu leuan puristavaan voimaan, joka syntyy liikkuvan leuan lähestyessä kiinteää leukaa. Liikkuvan leuan liike tuotetaan akselilla, joka on kiinnitetty määrätylle etäisyydelle vauhtipyörän keskipisteestä. Vauhtipyörä tuottaa pyöriessään akselille edestakaisen liikkeen, mikä käytännössä näkyy liikkuvan leuan liikkeenä. Leukamurskain voi olla yksi- tai kaksiakselinen. (Viilo 2011) Yksiakselista leukamurskainta kutsutaan kiertomurskaimeksi (kuva 11). Kiertomurskaimien murskausteho perustuu tehokkaaseen murskausliikkeeseen kidan yläosassa. Tehokas murskausliike yläosassa varmistaa, ettei murskattava kiviaines aiheuta tukkeutumisia ja siten tuotantokatkoja. Kiinteää leukaa vasten murskausliike on vino kidan keski- ja alaosassa. (Heikkilä, J. 1988)



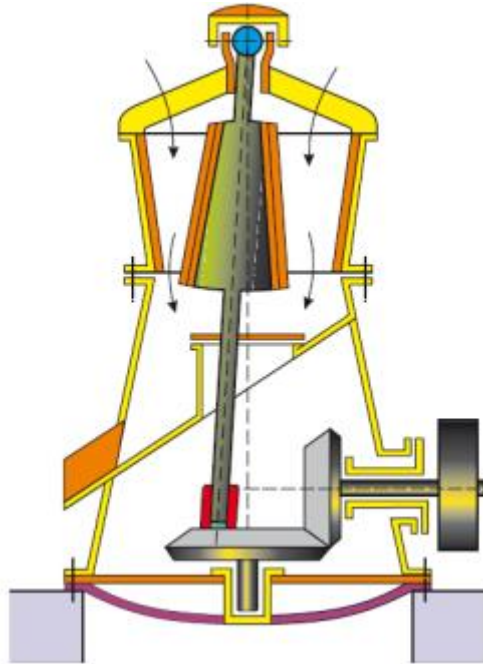
Kuva 11. Yksiakselinen leukamurskain (Viilo 2011).

Kaksiakselista leukamurskainta kutsutaan heilurimurskaimeksi (kuva 12). Heilurimurskaimessa liikkuva leuka ja liikkeen antava kiertokanki ovat erilliset, jonka ansiosta liikkuvan leuan liike on lineaarista. Murskaus on tehokasta ainoastaan kidan keski- ja alaosassa, mikä aiheuttaa kiviaineksen tukkeumariskin ja siten tuotantokatkoja. Kaksiakselisen murskaimen rakenne on myös monimutkainen. Lisäksi murskain on painava ja vaatii hyvät perustukset. Toisaalta leukojen kuluminen on tällä murskaimella vähäisempää kuin yksiakselisella murskaimella. Saman kokoisella yksiakselisella murskaimella kapasiteetti on korkeampi kuin kaksiakselisella murskaimella. (Heikkilä, J. 1988)



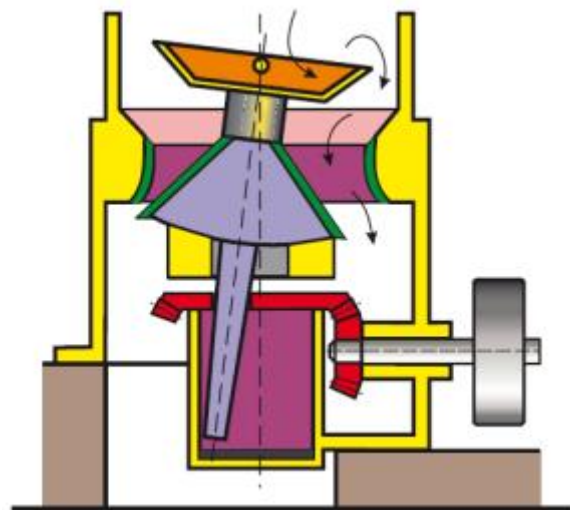
Kuva 12. Kaksiakselinen leukamurskain (Viilo 2011).

Karamurskaimen toiminta perustuu iskun ja puristuksen yhteisvaikutukseen. Kiviaines murskautuu liikkuvan sisäkartioiden ja kiinteiden ulkokartioiden välissä (kuva 13). Sisäkartioiden liike syntyy kara-akselin epäkeskokohtaan avulla. Karamurskain on rakenteeltaan melko samanlainen kartiomurskaimen kanssa, mutta karamurskain voi murskata kiviainesta, jonka raekoko on huomattavasti isompi. (Viilo 2011, Tolppanen 1998)



Kuva 13. Karamurskain (Viilo 2011).

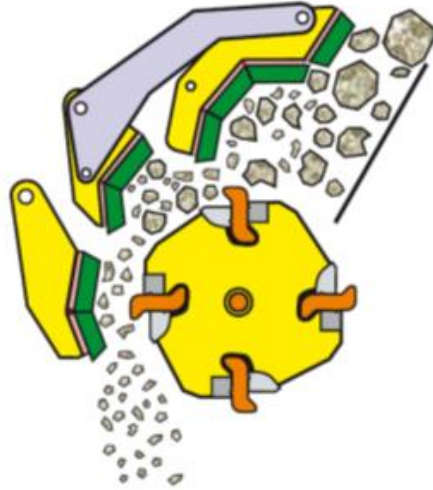
Kartiomurskaimessa (kuva 14) murskaus tapahtuu samalla tavalla kuin karamurskaimessa eli liikkuvan sisäkartioiden ja kiinteiden ulkokartioiden välissä. Sisäkartioiden akseli on kiinnitetty akseliin, joka on pystysuora, epäkeskeisesti laakeroitu ja yläpäästään vapaa. (Tolppanen 1998)



Kuva 14. Kartiomurskain (Viilo 2011).

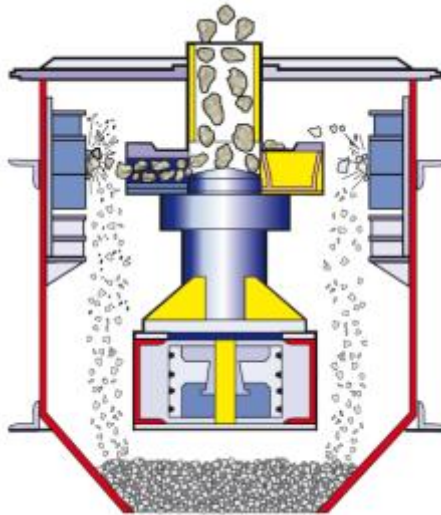


Iskupalkkimurskauksessa (kuva 15) vaaka-akseliin kiinnitetyt vasarat linkoavat kiviainesta panssaroiduille seinille. Kiviaines murskautuu aiheutuvan iskun voimasta ja putoaa alas. Iskupalkkimurskaimella on erityisen suuri murskaussuhde, ja syntyvä kiviaines on muodoltaan tavallista parempaa. Iskupalkit ja panssarit kuluvat toisalta nopeasti. (Heikkilä, J. 1988, Viilo 2011)



Kuva 15. Iskupalkkimurskain eli HSI (Viilo 2011).

Keskipakomurskauksessa (kuva 16) pystyakseliin kiinnitetty moottoroitu pyörittäjä linkoaa kiviaineksen suurella nopeudella panssaroiduille seinille. Kiviaines murskautuu aiheutuvien iskujen voimasta ja putoaa alas. Iskuja aiheuttavat sekä seinät että muut kivet yhteen iskeytyessään. Keskipakomurskainta käytetään erityisesti hienorakeisempien ja hyvämuotoisten materiaalien valmistuksessa. (Viilo 2011)



Kuva 16. Keskipakomurskain eli VSI (Viilo 2011).

Murskauksen yhteydessä kiviainesta lajitellaan pois murskausprosessista seulojen avulla. Seuloja käytetään kuvan 10 mukaisesti etenkin väli- ja jälkimurskauksen yhteydessä. Seulonnan tavoitteena on kerätä hienoaines ja rakeisuudeltaan sopiva kiviaines talteen, ettei sitä murskata liian pieneen rakeisuuteen. Murskaimen kapasiteetti myös paranee, kun prosessia haittaava ylimääräinen kiviaines on otettu talteen.

## 3 Asfalttipäällysteen kuluminen

### 3.1 Asfalttipäällysteet

Asfalttipäällysteet koostuvat pääasiassa kiviaineksesta, sideaineesta ja fille-ristä. Päällyste sisältää myös ilmaa ja mahdollisesti lisäaineita, kuten kuituja tai sideaineen modifiointiaineita. Asfalttipäällyste pyritään suunnittelemaan siten, että se vastaa päällysteen kulumiskestävyysvaatimukseen. Asfalttinormeissa suositellaan karkearakeisen kiviaineksen käyttöä, kun pyritään kulumista ja de-foimoitumista kestäväan päällysteeseen. Kun pyritään tiiviiseen ja sileään päällysteeseen, suositellaan hienorakeisen kiviaineksen käyttöä. Karkearakeinen päällyste sopii esimerkiksi vilkasliikenteiselle ajoradalle. Hienorakeinen päällyste sopii vastaavasti esimerkiksi jalankulkuun tai pyöräilyyn tarkoitetulle väylälle. (Lampinen 1993, PANK ry 2017) Kuvassa 17 on porapalanäyte, josta näkee tyypillisen asfaltin rakenteen.



Kuva 17. Asfalttipäällysteestä otettu porapalanäyte (Niko Hietala 2019).

Asfalttipäällysteen tyyppi valitaan käyttökohteen, nopeusrajoituksen, liikennemäärän ja -jakauman mukaan.

Asfalttibetoni (AB) on päällyste, jota voidaan käyttää ajoradoilla, jalkakäytävillä, pihoidilla, tierakenteen kantavassa kerroksessa, kuluneiden päällysteiden pin- tauksissa ja ympäristönsuojusrakenteissa. Asfalttibetonin rakeisuuskäyrä on jatkuva ja sen sideaineen tunkeuma 25 celsiusasteessa on alle 250 [0,1 mm]. Pehmeän asfalttibetonin sideaineen tunkeuma ylittää 250 [0,1 mm] 25 celsius- asteessa. (ASKO 2018, PANK ry 2017)

Kivimastikiasfaltti (SMA) on päällyste, jonka pääosan muodostaa murskattu karkea kiviaines. Kiviainesrunгон tyhjätilan täyttää stabiloitu mastiksi. Rakei- suuskäyrä on epäjatkua ja kiviaineksesta on kalliomursketta vähintään 85 pro- senttia. Sideainetta sitovana lisäaineena käytetään kuitua. Kivimastikiasfalttia

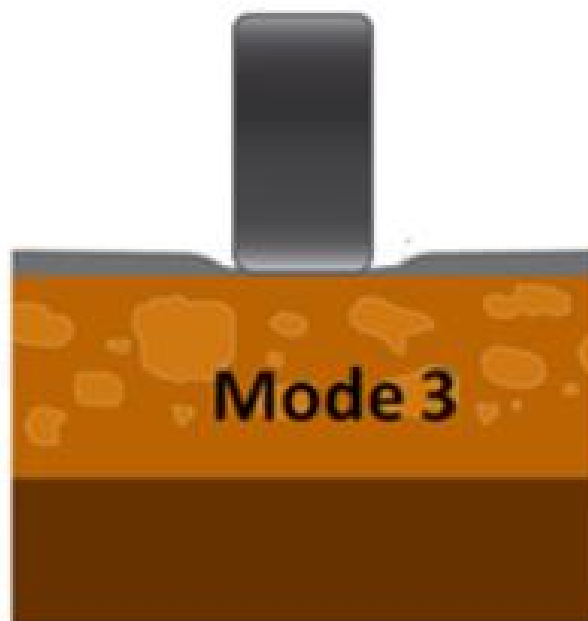
voidaan käyttää monipuolisesti, mutta se on kallis päällyste. Siksi sitä käytetään lähinnä vaativien ajoratojen kulutuskerroksessa. (ASKO 2018, PANK ry 2017)

Valuasfaltti (VA) on päällyste, jossa, sideaine täyttää kiviaineksen tyhjätilan ja tekee massasta kuumana valettavan. Valuasfaltti voidaan levittää käsin tai levittimellä eikä sitä välttämättä tiivistetä. Kiviaineksena käytetään murskettua ja hiekkaa. Yli 5,6 mm:n kiviainesrakeista vähintään 50 prosenttia on oltava kokonaan tai osittain murskattuja. Täytejauheena käytetään kalkkikivijauhetta. Valuasfaltit soveltuvat esimerkiksi silloille ja korkeille alueille tehtäviin päällystyksiin, kuten katoille. (ASKO 2018, PANK ry 2017)

Avoim asfaltti (AA) on päällyste, jossa toisiinsa yhteydessä olevat ilmahuokokset saavat aikaan vettä läpäisevän rakenteen. Sen rakeisuuskäyrä on epäjatkuva. Lisäaineena voidaan käyttää selluloosakuitua tai luonnonasfalttia. Avointa asfalttia käytetään lähinnä pysäköintialueiden ja pihojen päällysteenä. Avoimen asfaltin alla on suotavaa käyttää vettä johtavia rakenteita. (ASKO 2018, PANK ry 2017)

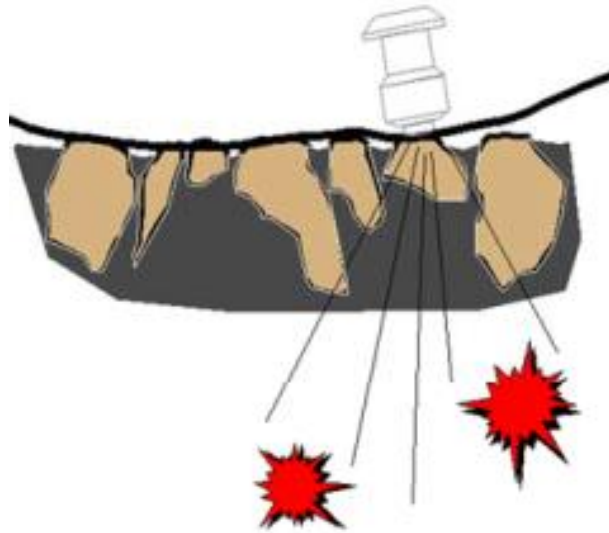
## 3.2 Asfalttipäällysteen kuluminen

Asfalttipäällysteeseen voi muodostua uria pinnan kulumisen, sidottujen kerrosten leikkausdeformaation, pohjamaan deformaation, sitomattomien kerrosten deformaation ja tiivistymisen vuoksi. Tämän tutkimuksen kannalta mielenkiintoisin urautumismekanismi on asfalttipäällysteen kuluminen. Asfalttipäällysteen pinnasta irtoaa kivirakeiden ja sideaineen vaurioitumisen seurauksena hiukkasia. Pitkäaikaisena vaikutuksena on päällysteen paksuuden sekä massan väheneminen ajouran kohdalta ja siten urautuminen. (Heikkinen 2012) Kuvassa 18 on esitetty periaatekuva asfalttipäällysteen urautumisesta, kun urautumisen syynä on päällysteen kuluminen.



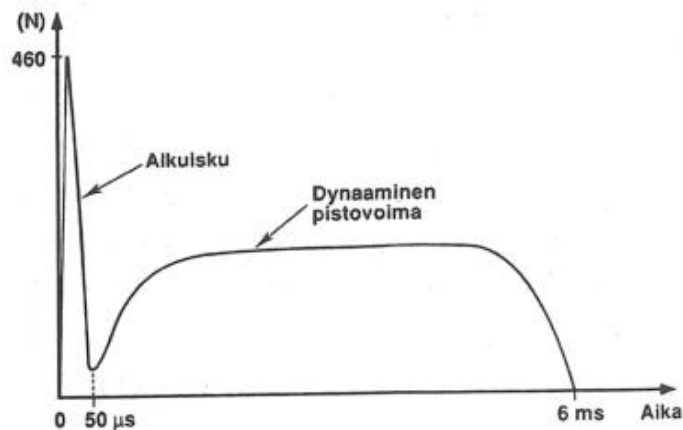
Kuva 18. Päällysteen kuluminen urautumalla (ROADDEX).

Uuden päällysteen kulumiseen kuuluu kaksi vaihetta: alkukuluminen ja normaali kuluminen. Alkukulumisessa kuluu lähinnä sideainetta ja hienorakeista kiviainesta, jota kertyy asfaltin pintaan enemmän kuin karkeaa kiviainesta. Alkukuluminen on nopeaa kulumista, joka tapahtuu ensimmäisen vuoden aikana asfalttipäällysteen valmistuksesta. Alkukuluminen jälkeen kulumisvauhti tasoittuu päällysteelle ominaiseen nopeuteen. Tässä vaiheessa asfaltin pinta on karkeutunut, ja kuluminen kohdistuu sekä karkeaan kiviainekseen että muihin asfalttipäällysteessä oleviin aineisiin. Tällöin kuluminen tapahtuu lähinnä nastarenkaan nastan aiheuttamien iskujen ja hierron seurauksena. (Heikkinen 2012, Lampinen 1993) Nastarenkaan nasta iskee päällysteeseen kuvan 19 mukaisesti.



Kuva 19. Nastarenkaan aiheuttama isku päällysteeseen (Unhola, Timo 2015).

Nastarenkaat aiheuttavat selvästi eniten asfalttipäällysteen kulumista. Nastarenkaan nasta koskettaa päällystettä, mikä voidaan jakaa eri vaiheisiin: dynaamiseen iskuun ja pistovoimaan sekä hiertoon ja raapaisuun (kuva 20). Dynaamista alkuiskua ja pistovoimaa on tutkittu päällysteeseen asennetuilla antureilla. Nastarenkaan iskun kokonaisaika on 6-7 millisekuntia nopeudella 80 km/h. Nastan aiheuttama hierto kestää suunnilleen yhtä kauan. Raapaisun vaikutusta pidetään vähäisenä verrattuna muihin muuttujiin. (Lampinen 1993)



Kuva 20. Nastan tienpintaan kohdistamien pistovoimien periaatteellinen jaottelu (Lampinen 1993).

Nastan aiheuttamaan iskuenergiaan vaikuttaa erityisesti nastan massa ja ajoneuvon nopeus. Myös rengaspaine ja kuormitus vaikuttavat iskunopeuteen. Liian alhainen rengaspaine tai kuormituksen kasvu suurentavat nastarenkaan kuluttavaa vaikutusta. Myös liian korkea rengaspaine suurentaa nastarenkaan kuluttavaa vaikutusta. Renkaan sortokulman kasvu eli kaarreajo nopeuttaa päällysteen kulutusta. (Lampinen 1993, Unhola, T. 2004)

Nastan hirtovaiheessa nasta liikkuu horisontaalisesti päällysteen pinnalla ja aiheuttaa päällysteen pinnan rikkoutumista sekä päällystemateriaalin irtautumista. Hirtovaihe alkaa dynaamisesta nastaiskusta ja päättyy raapaisuun. Hirtovaiheen pituuteen ja voimakkuuteen vaikuttaa moni tekijä: aurasukulma, tien kaltevuus, luisto, renkaan ominaisuudet, ajonopeus sekä nastan ominaisuudet ja kuluneisuus. (Lampinen 1993)

Tienkäyttäjät ja olosuhteet vaikuttavat myös nastarenkaan aiheuttamaan kulumukseen. Tienkäyttäjät voi taloudellisella ajotavalla vähentää renkaissa esiintyviä sivu- että pituusvoimia eli luistoa. Nastarenkaat kuluttavat asfalttipäällystettä maltillisesti suoralla ja tasaisella ajamisella. Kaarreajossa päällysteen kulumisnopeus on tähän verrattuna 1,1-kertainen, kiihdyttäessä 1,4-kertainen ja jarruttaessa jopa 2,8-kertainen. Märällä kelillä vaikutukset ovat kaksinkertaiset 80 km/h nopeudella. Näiden vaikutusta voidaan lieventää pienentämällä ajonopeutta ja pitämällä ajotapa sekä päällysteen että ajoneuvon kannalta taloudellisena. (Lampinen 1993)

Asfalttipäällysteen kulumisnopeuteen vaikuttaa myös ympäristötekijät, kuten lämpötila ja kosteus. Etenkin alhainen lämpötila ja sade kasvattavat asfaltin kulumisnopeutta. Alhainen lämpötila tekee bitumista haurasta, minkä vuoksi se murtuu helposti nastarenkaan nastan iskusta. Sateen myötä asfaltin pintaan jäävä vesi nopeuttaa asfaltin kulumista. Lampisen mukaan nastarenkaan nastaiskun jälkeisessä hierrossa nasta pääsee liikkumaan pitemmän matkan märällä päällysteellä, koska renkaan kosketuspinnan ja tien pinnan välinen kitka on märkänä pienempi. Vesi nopeuttaa asfaltin kulumista myös tunkeutumalla päällysteen rakoihin ja huokosiin, mikä aiheuttaa rakoissa dynaamisen hydrostaattisen paineen, joka irrottaa rakeita toisistaan ja heikentävät niiden välisiä sidoksia. Kulumisnopeus on suurimmillaan leutoina talvina, koska päällysteen pinta on paljaana ja usein myös märkänä. (Heikkinen 2012, Lampinen 1993)

### 3.3 Kiviaineksen vaikutus asfalttipäällysteen kulumiseen

Kiviaineksen valinnalla voidaan vaikuttaa asfalttipäällysteen kulumisnopeuteen. Asfalttipäällysteessä etenkin karkean kiviaineksen määrä, muoto ja nastarengaskulutuskestävyys vaikuttavat sen kulumisnopeuteen. Päällysteiden kulumuskestävyys paranee, kun kiviaineksen muoto on kuutiomainen ja sen raekoko on mahdollisimman suuri. Lisäksi karkean kiviaineksen tulee jakautua mahdollisimman tasaisesti päällysteeseen. Keskikokoiset (0,25...8 mm) kiviainesrakeet heikentävät kulumuskestävyyttä, sillä nastaisku murskaa keskikokoiset rakeet helpommin ja nastan aiheuttama hierto pystyy irrottamaan ne paikaltaan. Lisäksi keskikokoiset rakeet estävät karkeiden rakeiden optimaalisen sijoittumisen päällysteessä. (Kurki, Manninen et al. 1992, Lampinen 1993)

Kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyttä mitataan kuulamylykokeella, jonka tuloksena saadaan kuulamylyarvo. Kuulamylyarvon merkitys päällysteen laskennallisessa kulumisnopeudessa todetaan kaavassa 1.

$$KN = TP \times MT \times (9,4 + 2,21 \times KM), \quad (1)$$

jossa KN on päällysteen laskennallinen kulumisnopeus, joka kuvaa päällysteen suhteellista kulumiskestävyyttä. Kaavassa TP on toimenpidekerroin välillä 1,00–1,25, MT on massatyypikerroin välillä 1,00–1,46 ja KM on kuulamylyarvo 11,2/16 mm lajitteesta. Kaava perustuu kokemukseräiseen tietoon eri tekijöiden vaikutuksesta päällysteen kulumisnopeuteen. Päällysteen laskennallista kulumisnopeutta käytetään päällysteen urasyvyyden tavoitearvon ennustamisessa. Taulukossa 4 on määritelty tarkemmin toimenpide- ja massatyypikohtainen kerroin. (Liikennevirasto 2018)

Taulukko 4. Päällysteen laskennalliseen kulumisnopeuteen vaikuttavat kertoimet.

Kerroin	Toimenpide/massatyyppi	Kerroin
TP	Kerran REM	1,15
TP	Kahdesti REM	1,25
TP	Muut	1,00
MT	AB 16	1,46
MT	AB 20-22	1,26
MT	SMA 16	1,08
MT	SMA 20-22	1,00

Kuulamylyarvon merkitystä voidaan arvioida esimerkillä, jossa toimenpide- ja massatyypikerroin asetetaan arvoon 1,00. Jos kaavaan sijoitetaan kuulamylyarvo 7,0, saadaan päällysteen laskennalliseksi kulumisnopeudeksi 24,9. Jos kaavaan sijoitetaan kuulamylyarvo 10,0, saadaan päällysteen laskennalliseksi kulumisnopeudeksi 31,5. Päällysteen laskennallinen kulumisnopeus kasvaa 2,2 yksiköllä, kun kuulamylyarvo nousee yhdellä yksiköllä. Laskennallisen kulumisnopeuden muutos on 5–8% kuulamylyarvon yksikköä kohti kuulamylyarvoilla 7–14. (Liikennevirasto 2018) Taulukossa 5 on päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden esimerkkilaskelmia eri massatyypeillä ja kuulamylyarvoilla.

Taulukko 5. Päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden (KN) esimerkkilaskelmia, kun toimenpidekerroin 1,00.

Kuulamylyarvo	Massatyyppi	Kulumisnopeus (KN)
7	AB 16	36,31
7	AB 22	31,34
7	SMA 16	26,86
7	SMA 22	24,87
10	AB 16	45,99
10	AB 22	39,69
10	SMA 16	34,02
10	SMA 22	31,50
14	AB 16	58,90
14	AB 22	50,83
14	SMA 16	43,57
14	SMA 22	40,34

Päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden arvon vaikutus urasyvyyden tavoitearvon ennustamisessa on melko pieni. Päällysteen laskennallinen kulumisnopeus  $KN$  on Tierakenteen suunnitteluohjeen kaavassa 14 kertoimena. Kaavassa 2 on esitetty Tierakenteen suunnitteluohjeen (2018) urasyvyyden tavoitearvon ennustamisessa käytetty laskentakaava.

$$Urasyyvyys = k_{TASALAAAT} \times \left[ A + t_{TAK} \times 0,3 \frac{mm}{v} \times \frac{2 \times KVL_{KAISTA}}{1000 \frac{ajon}{vrk}} \times k_{LEV} \times k_{NOP.RA} \times \frac{KN}{46} \right] \quad (2)$$

Kulumisnopeus jaetaan luvulla 46, joten yllä olevan taulukon 5 perusteella se kasvattaa tai pienentää lopullista urasyvyyttä 50 prosenttia. Taulukon suurin kulumisnopeuden arvo oli 58,9, mutta sitä voitaisiin kasvattaa 25 prosenttia toimenpidekertoimella, jonka lopputulos kasvattaisi lopullista urasyvyyttä 60 prosenttia. Tällaista massa- tai toimenpidetyyppiä kohteeseen tuskin valitaan, mikäli tiedetään, että päällysteen todellinen urautumisnopeus kasvaa saadun tuloksen mukaisesti. Kaavan 1 perusteella todetaan, että jos päällysteelle tullaan tekemään REM-käsittelyjä, valitaan massatyyppi ja kiviaines, joilla on pienet kertoimet, mikä pienentää urautumisnopeutta merkittävästi. (Liikennevirasto 2018)

Heikkilän (1990) tutkimuksen mukaan etenkin karkean kiviaineksen muoto vaikuttaa päällysteen kulutuskestävyyteen. Kiviaineksen muotoa voidaan parantaa murskausprosessin aikana kubisoinnin avulla. Kiviaineksen muoto paranee yleisesti murskausvaiheiden määrää kasvattamalla ja erityisesti tavoitteellisessa muodon parantamisessa jälkimurskaimilla. Kiviaineksen muodon parantaminen parantaa erityisesti heikkolaatuisen kiviaineksen laatua. Hyvälaatuisen kiviaineksen kulutuskestävyys ei juurikaan parane kubisoinnin tuloksena. Siksi kubisointi soveltuu lähinnä heikkolaatuisten kiviainesten laadun parantamiseen. (Heikkilä, P., Jokinen et al. 1990)

Tielaitoksen tutkimuksessa vuonna 1997 testattiin kiviaineksen muodon vaikutusta päällysteen kulumisnopeuteen minikoeteillä. Minikoetie on menetelmä, jossa tien reunauran kohdalle asennetaan laboratoriossa valmistettuja päällystelaattoja, joiden kulumista seurataan laserprofilometrillä. Minikoetietä kulutettiin kolmen talven aikana. Yhteenlaskettujen kulumistulosten perusteella hyvämuotoisen kiviaineksen kuluminen oli keskimäärin 5 prosenttia vähäisempää ja huonomuotoisen kiviaineksen kuluminen keskimäärin 15 prosenttia suurempaa kuin normaalimuotoisella kiviaineksella. Huonomuotoisen kiviaineksen kuluminen oli hyvämuotoiseen kiviainekseen verrattuna keskimäärin yli 20 prosenttia suurempaa. Tulosten mukaan litteysluvun 5 yksikön huononeminen lajitteen 12,5/20 mm litteysluvussa lisää päällysteen kulumista keskimäärin 5 prosenttia. (Alkio, Kurki et al. 1997)

Tielaitoksen (1997) tutkimuksessa todetaan, että kiviaineksen kubisoinnilla on parhaimmillaan mahdollista parantaa kiviaineksen karkeimman lajitteen litteyslukua 15 yksikköä. Litteysluvun 15 yksikön parantamisella voidaan vähentää päällysteen kulumista jopa 15 prosenttia, mikä tarkoittaa runsaasti liikennöidyllä tiellä (KVL 18000) yhden vuoden eroa tai vähemmän liikennöidyllä tiellä (KVL 7500) jopa kahden vuoden eroa päällysteen käyttöiässä. (Alkio, Kurki et al. 1997)

## 4 Testatut näytteet

### 4.1 Valikoidut näytemateriaalit

Näytteiden valinnan tavoitteena oli löytää tutkittavaksi monipuolinen yhdistelmä kivilajeja, mikä toisaalta mahdollistaisi kivilajikohtaisten erojen havaitsemisen tutkimustuloksista ja toisaalta olisi rajallisen tutkimusajan puitteissa tutkittavissa. Louhokset valittiin käytettävissä olleiden ennakkotietojen perusteella siten, että louhoksen kiviaineksen tuli olla vähintään kuulamylyluokassa  $A_{N14}$ . Louhokset on merkitty kirjaimin A, B, C ja D. Louhosten nimet eivät ole oleellisia tässä tutkimuksessa, joten ne on jätetty mainitsematta.

Louhokselta A haettiin kubisoitua ja kubisoimatonta kiviainesta, joiden alkuperäiset rakeisuudet ovat 0/16 mm. Haetut näytteet on nimetty koodeilla A1K, A1 ja A2K. A1K on kubisoitua koostekiviainesta, jonka rakeisuuden alarajaa ei ole määritetty. A2K on lajitteesta 0/16 mm katkaistua kubisoitua kalliomurskettä. A1 on 0/16 mm koostekiviainesta, jota ei ole kubisoitu.

Louhoksen A kiviaines on graniittinen ja kivilajityypille ominaisesti murskaustuote on muoto-ominaisuuksiltaan melko hyvää. Kiviaines koostuu kahdesta kivilajista amfiboliitti (tummat rakeet) ja graniitti, jota kiviaineksessa on silmämääräisesti arvioituna 70-80 prosenttia. Amfiboliitin päämineraalit ovat sarvivälke, plagioklaasi ja biotiitti. Graniitin päämineraalit ovat plagioklaasi, kvartsi, kalimaasälpä ja biotiitti. Kiilteen eli biotiitin määrä on louhoksen A kiviaineksessa keskimäärin välillä 7-12 prosenttia petrografisen tutkimuksen perusteella. Kuvassa 21 on kiviainesta louhokselta A.



Kuva 21. Louhoksen A kiviainesrakeita (Niko Hietala 2018).

Louhokselta B haettiin kahta erilaista kiviainesta, joiden alkuperäiset rakeisuudet ovat 0/16 mm ja 8/16 mm. Haetut näytteet on nimetty koodeilla B2p, B2, B1, ja B1p. B2 on kalliomurskettä, jonka rakeisuus on tuotantoprosessin tulos. B2p on käytännössä samaa tuotetta kuin B2, mutta siitä on katkaistu 13,2 mm seulalla lajitteen karkein osuus pois. B1 on kalliomurskettä, jonka alkuperäinen rakeisuus on 0/16 mm. Siitä on katkaistu 10 mm seulalla lajitteen hienoin osuus pois. B1p on kalliomurskettä, jonka alkuperäinen rakeisuus on 0/16 mm. Siitä on



katkaistu 5 mm seulalla lajitteen hienoin osuus pois ja 13,2 mm seulalla lajitteen karkein osuus pois. B1p on laadultaan vastaavaa kuin B1.

Louhoksen B kiviaineksessa esiintyy paljon vaihtelua. Louhokselta B otetusta lohkarista valmistetun ohuthieen perusteella kiviaines on pääosin hienoraakeista porfyriittia. Kiviainesnäytteistä voitiin havaita myös selkeästi suuntautunutta ainesta, josta tuotettu murske on muodoltaan hyvin litteää ja puikkoista. Kiviaineksen päämineraalit ovat plagioklaasi, kvartsi ja sarvivälke. Kiillettä kiviaineksessa on noin 4 prosenttia. Kiviaines sisältää myös vaaleita hajarakeita kvartssia, joiden raekoko on 1-3 mm. Kiviaines on rapautumatonta. Kuvassa 22 on kiviainesta louhokselta B.



Kuva 22. Louhoksen B kiviainesarakeita (Niko Hietala 2018).

Louhokselta C haettiin kahta erilaista kiviainesta, joiden alkuperäiset rakeisuudet ovat 0/16 mm ja 8/16 mm. Haetut näytteet on nimetty koodeilla C1p, C2p, C2 ja C1. C2 on kalliomurskettä, jonka rakeisuus on tuotantoprosessin tulos. C2p on käytännössä samaa tuotetta kuin C2, mutta siitä on katkaistu 13,2 mm seulalla lajitteen karkein osuus pois. C1 on kalliomurskettä, jonka alkuperäinen rakeisuus on 0/16 mm. Siitä on katkaistu 10 mm seulalla lajitteen hienoin osuus pois. C1p on kalliomurskettä, jonka alkuperäinen rakeisuus on 0/16 mm. Siitä on katkaistu 5 mm seulalla lajitteen hienoin osuus pois ja 12 mm seulalla lajitteen karkein osuus pois. C1p on laadultaan vastaavaa kuin C1.

Louhoksen C kiviaines koostuu kahdesta erilaisesta kivilajityypistä, joista vaaleampi on granodioriitti ja tumma kiillegneissi. Kiviaineksesta tuotettu murske on kivilajityypille ominaisesti hyvää, tosin suuntautunut gneissi rikkoutuu luontaisesti graniittista osuutta enemmän puikkoiseksi ja litteäksi. Graniittisen kivilajityypin osuuden vaihtelu on silmämääräisesti arvioituna 50-70 prosenttia. Mineraalirakeiden raekoko on vaihtelevaa ja suurimmillaan 3-5 mm. Granodioriitin päämineraalit ovat plagioklaasi, kvartsi, kalimaasälpä ja biotiitti. Biotiittiä eli kiillettä on alle 6 prosenttia. Kiillegneissin päämineraalit ovat plagioklaasi, kvartsi ja biotiitti. Biotiittiä eli kiillettä on noin 22 prosenttia. Kiviaines on rapautumatonta. Kuvassa 23 on kiviainesta louhokselta C.



Kuva 23. Louhoksen C kiviainesrakeita (Niko Hietala 2018).

Louhokselta D haettiin kolmea erilaista kiviainesta, joiden alkuperäiset rakeisuudet ovat 0/16 mm, 6/11 mm ja 11/16 mm. Haetut näytteet on nimetty koodeilla D1K, D3K ja D2K. D2K on kalliomursketta, jonka rakeisuus on tuotantoprosessin tulos. D3K on kalliomursketta, jonka rakeisuus on myös tuotantoprosessin tulos. D1K on kalliomursketta, jonka alkuperäinen rakeisuus on 0/16 mm. Siitä on katkaistu 10 mm seulalla lajitteen hienoin osuus pois.

Louhoksen D kiviaines on porfyriittiä. Porfyriitin päämineraalit ovat sarvivälke ja plagioklaasi. Kiillettä kiviaineksessa ei ole, mutta opaakkia, kuten esimerkiksi sulfidimineraaleja on 1-3 prosenttia. Kiviaines on hienorakeista ja rapautumaton. Mineraalien raekoko on 1-3 mm. Kuvassa 24 on kiviainesta louhokselta D.



Kuva 24. Louhoksen D kiviainesrakeita (Niko Hietala 2018).

Taulukossa 6 on lopulliset testilajitteet, joista osa on alkuperäisiä ja osa seulottuja. Yhteensä erilaisia testilajitteita on 16.

Taulukko 6. Yhteenveto tutkimuksen näytteistä.

Näyte	Kubisoitu	Murskausvaiheiden määrä	Alkuperäinen rakeisuus
A1	Ei	3	0/16 mm
A1K	Kyllä	4	0/16 mm
A2K	Kyllä	4	0/16 mm
A1p	Ei	3	0/16 mm
A1Kp	Kyllä	4	0/16 mm
B1	Ei	3	0/16 mm
B1p	Ei	3	0/16 mm
B2	Ei	4	8/16 mm
B2p	Ei	4	8/16 mm
C1	Ei	2	0/16 mm
C1p	Ei	2	0/16 mm
C2	Ei	2	8/16 mm
C2p	Ei	2	8/16 mm
D1K	Kyllä	4	0/16 mm
D2K	Kyllä	5	11/16 mm
D3K	Kyllä	5	6/11 mm

Näytteet on nimetty kuvan 25 mukaisesti.



Kuva 25. Näytteiden nimeämisen perusteet.

## 4.2 Näytteenotto

Näytteet otettiin lapiolla joko varastokasasta tai pyöräkuormaajan levittämältä kiviainesmatolta. Louhoksella A näytteet otettiin varastokasoista. Kuvassa 26 on louhoksen A varastokasa.



Kuva 26. Louhoksen A varastokasa (Antti Kalliainen 2018).

Taulukko 7. Louhoksen A näytteet.

Näyte	Kubisoitu	Murskausvaiheiden määrä	Alkuperäinen rakeisuus
A1	Ei	3	0/16 mm
A1K	Kyllä	4	0/16 mm
A2K	Kyllä	4	0/16 mm
A1p	Ei	3	0/16 mm
A1Kp	Kyllä	4	0/16 mm

Louhoksella B näytteet otettiin kiviainesmatolta, joka levitettiin pyöräkuormaajalla juuri ennen näytteenottohetkeä.



Kuva 27. Louhoksen B näytteenotto kauhakuormaajalla levitetystä kiviainesmatosta (Niko Hietala 2018).

Taulukko 8. Louhoksen B näytteet.

Näyte	Kubisoitu	Murskausvaiheiden määrä	Alkuperäinen rakeisuus
B1	Ei	3	0/16 mm
B1p	Ei	3	0/16 mm
B2	Ei	4	8/16 mm
B2p	Ei	4	8/16 mm

Louhoksella C näytteet otettiin kahdesta varastokasasta, joiden lajitteet olivat 0/16 mm ja 8/16 mm. Kuvassa 28 on louhoksen C lajitteen 0/16 mm varastokasa.



Kuva 28. Louhoksen C lajitteen 0/16 mm varastokasa (Niko Hietala 2018).

Taulukko 9. Louhoksen C näytteet.

Näyte	Kubisoitu	Murskausvaiheiden	
		määrä	Alkuperäinen rakeisuus
C1	Ei	2	0/16 mm
C1p	Ei	2	0/16 mm
C2	Ei	2	8/16 mm
C2p	Ei	2	8/16 mm

Louhoksella D näytteet otettiin varastokasoista. Lajitteille 0/16 mm, 6/11 mm ja 11/16 mm oli omat kasansa. Kuvassa 29 on näytteenottotilanne louhoksella D.



Kuva 29. Näytteen seulontaa D louhoksella lajitteen 0/16 mm varastokasasta (Niko Hietala 2018).

Taulukko 10. Louhoksen D näytteet.

Näyte	Kubisoitu	Murskausvaiheiden määrä	Alkuperäinen rakeisuus
D1K	Kyllä	4	0/16 mm
D2K	Kyllä	5	11/16 mm
D3K	Kyllä	5	6/11 mm

### 4.3 Näytteiden esikäsittely

Näytteiden esikäsittelyyn kuuluu näytteen jakaminen, seulonta, pesu ja kuivaus. Esikäsittely alkoi periaatteessa jo näytteitä haettaessa, sillä louhoksella tehdyt seulonnat helpottivat kiviaineksen esikäsittelyä laboratoriossa. Kuvassa 30 on esimerkki seulontajärjestelystä, jolla katkotaan näytteestä B1p sekä maksimi- että minimiraekoko yhdellä seulonnalla.



Kuva 30. Kiviaineksen seulontaa B louhoksella (Niko Hietala 2018).

Näytteiden jakamiseen käytettiin jakolaatikkoa standardin SFS-EN 932-2 mukaisesti. Jakolaatikkoa käytettiin edustavan litteyslukunäytteen valmistuksessa. Kiviaineksen seulonnassa käytettiin seulatärytintä. Näytteet esikäsiteltiin testistandardin mukaisesti käyttäen seulakokoja 8-10-11,2-14-16 mm. Seulotut lajitteet pestiin, jotta saatiin hienoaines irti rakeiden pinnoilta. Kiviaines kuivattiin uunissa +105 celsiusasteessa yön yli.



## 5 Testausohjelma ja –menetelmät

### 5.1 Testausohjelma

Taulukossa 11 on määritelty jokaisen louhoksen kiviainekselle tehdyt testit. Taulukossa esitetty kuulamylyluokka arvioitiin käytettävissä olevien ennakkotietojen perusteella.

Taulukko 11. Testausohjelma.

Otto- paikka	Alustava kuu- lamylyluokka	Testaus	Testimäärä (kpl)
A	A <sub>N</sub> 10 ja A <sub>N</sub> 14	Kuulamylytestit kolmella litteyslukutasolla (0-10-20) ja lajitteesta 8/11,2 mm	22
		Litteysluku	22
B	A <sub>N</sub> 10 ja A <sub>N</sub> 14	Kuulamylytestit kolmella litteyslukutasolla (0-10-20) ja lajitteesta 8/11,2 mm	18
		Litteysluku	18
C	A <sub>N</sub> 14	Kuulamylytestit kolmella litteyslukutasolla (0-10-20) ja lajitteesta 8/11,2 mm	16
		Litteysluku	16
D	A <sub>N</sub> 7	Kuulamylytestit kolmella litteyslukutasolla (0-10-20) ja lajitteesta 8/11,2 mm	10
		Litteysluku	10
Louhokset B ja C	A <sub>N</sub> 10 ja A <sub>N</sub> 14	Esihiontamenettelyn testaus	16
		Litteysluku	16

### 5.2 Testausmenetelmät

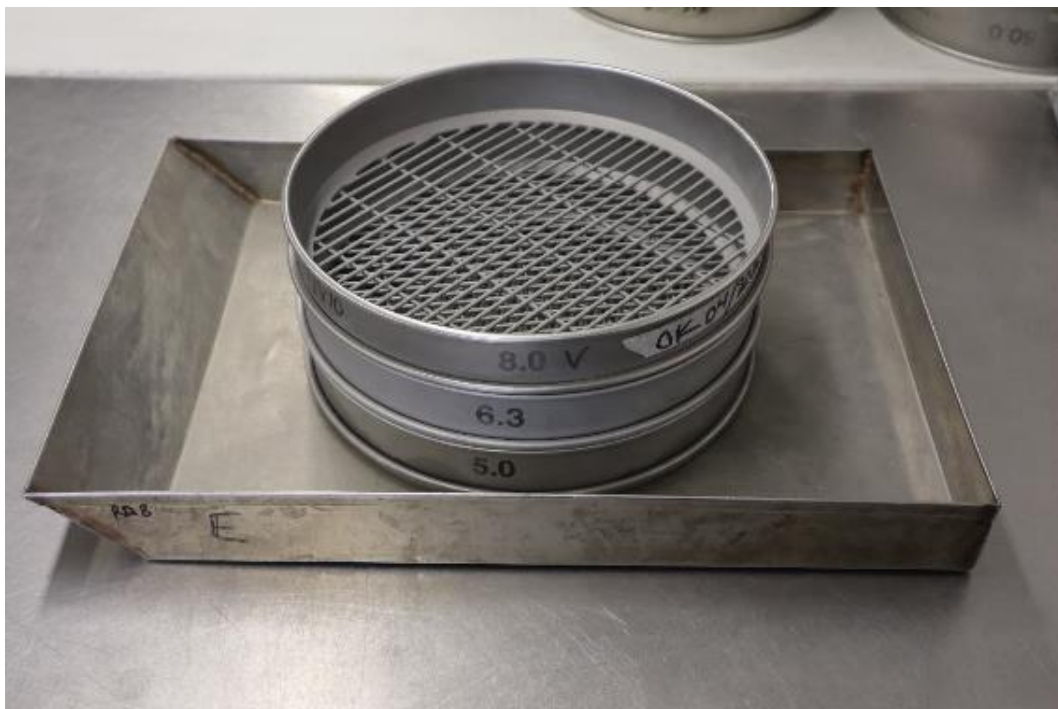
#### 5.2.1 Litteysluku

Kiviaineksen litteysluku määritetään standardin SFS-EN 933-3 mukaisesti. Litteysluku on taulukon 12 mukaisen välppäseulan läpäisseen kiviaineksen massan prosentuaalinen osuus tutkittavan näytteen massasta. Litteysluku mitataan lajitteista, jotka ovat raekooltaan yli 4 mm. Taulukossa 12 on esitetty litteysluvun määrittämisessä käytettävät välppät lajitteittain

Taulukko 12. Litteysluvun määrittämisessä käytettävät testilajitteet ja niitä vastaavat välppäseulat (SFS-EN 933-3).

Raekokolajite [mm]	Välppäseulan nimellisrakokoko [mm]
16 / 20	10
12,5 / 16	8
10 / 12,5	6,3
8 / 10	5
6,3 / 8	4
5 / 6,3	3,15
4 / 5	2,5

Välppäseulan nimellisrakokoko määritellään raekokolajitteen ylärajan perusteella. Lajitteen yläraja  $D$  jaetaan kahdella ( $D/2$ ), josta saadaan tuloksena lajitteen litteysluvun määrittämiseen tarkoitetun välppäseulan rakokoko. Kuvassa 31 on testeissä käytettyjä välppäseuloja.



Kuva 31. Testeissä käytettyjä välppäseuloja (Niko Hietala 2019).

### 5.2.2 Kuulamylyarvo

Kuulamylytestillä mitataan kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyttä, joka ilmaistaan kuulamylyarvona. Testi tehdään standardin SFS-EN 1097-9 mukaisesti. Kiviainesta pyöritetään myllyssä teräskuulien ja veden kanssa. Kiviaineksen kuluminen mitataan prosentuaalisena painohävikkinä alle 2 mm rakeiden osuutena.

Kuulamylytesti tehdään lajitteelle 11,2/16 mm, josta 65 % on välillä 11,2-14 mm. Yksittäistestinäytteen massa korjataan siten, että kiintotiheydeltään erilaisten

kiviainesten testattava kiviainesrakeiden määrä ja tilavuus ovat samanlaisia. Kiviaineksen kiintotiheys määritetään standardin SFS-EN 1097-6 mukaisesti.

Kuulamylyttesti voidaan tehdä myös standardin SFS-EN 1097-9 liitteen mukaan raekooltaan erilaisesta kiviaineksesta, jos käytetään erilaisia testiparametreja (taulukko 13). Standardin lähtökohtana on, että eri lajitteista pitäisi saada samantasoisin tuloksia.

Taulukko 13. Kuulamylyttestin parametrit eri testilajitteille (SFS-EN 1097-9).

Parametri	Raekokolajite 8/11,2 mm	Raekokolajite 11,2/16 mm (referenssi)
Seulat	2-8-10-11,2	2-11,2-14-16
Kuulien halkaisija (mm)	11,1 +0,1/-0,5	15,0 +0,1/-0,5
Kuulien minimikoon mittaava väljän tan- kujen etäisyys (mm)	10,7 ± 0,1	14,6 ± 0,1
Välikoon seula (mm)	10,0	14,0
Välikoon seulan lä- päisyprosentti (%)	65±1	65±1

Kuulamylyyn tarkkuutta voidaan arvioida toistettavuuden ja uusittavuuden perusteella. Standardissa SFS-EN 1097-9 on esitetty edellä mainituille muuttujille kaavat vuonna 1994 suoritetun laboratorioden välisen vertailututkimuksen perusteella, jossa kuulamylyarvo oli välillä 5-16.

Toistettavuuden arvo tarkoittaa kahden tuloksen välistä eroa 95 % todennäköisyydellä, silloin kun testi on tehty samasta näytteestä samalla laitteistolla. Toistettavuuden  $r$  arvoksi saatiin tutkimuksessa:

$$r = 0,13 * A_N - 0,17, \quad (3)$$

Esimerkiksi testituloksena saatu kuulamylyarvo 8 ( $r = 0,87$ ) voi toistettavuuden rajoissa samassa laboratoriossa ja samalla laitteistolla määritettynä vaihdella välillä 7,13-8,87.

Uusittavuus tarkoittaa kahden tuloksen välistä erotusta silloin kun testi on tehty samasta näytteestä eri laitteistolla ja eri laboratoriossa. Uusittavuudelle  $R$  saatiin tutkimuksen perusteella seuraava kaava:

$$R = 0,14 * A_N + 0,27, \quad (4)$$

Esimerkiksi testituloksena saatu kuulamylyarvo 8 ( $R = 1,39$ ) voi uusittavuuden rajoissa eri laboratoriossa määritettynä vaihdella välillä 6,61- 9,39.

Suomessa tehdyissä vertailututkimuksissa on saatu vastaavia tuloksia kuin edellä esitettyssä eurooppalaisessa vertailukokeessa. Esimerkiksi vuoden 2015 vertailukokeessa toistettavuudeksi saatiin  $0,093 * A_N - 0,28$  ja uusittavuudeksi  $0,166 * A_N - 0,22$ , kun kuulamylyarvo oli välillä 5-20. Kuulamylyarvon tasolla 8 toistettavuus olisi tulosten perusteella  $r = 0,46$  ja vastaavasti uusittavuus  $R = 1,11$ . Vertailukokeeseen osallistui 15 laboratoriot. (PANK ry, 2015)

### 5.3 Litteysluvun modifiointi

Litteysluvun modifioinnin tavoitteena oli tutkia litteysluvun vaikutusta kuulamylyarvoon eri kivilajityypeillä. Kiviaines esikäsiteltiin standardin mukaisesti. Kiviaineksen esikäsitelyssä oli tärkeää varmistaa, että kiviainesta seulottiin riittävä määrä, jotta kiviaineksen litteysluku voitiin modifioida tavoitearvoon. Litteyslukua modifiointiin lisäämällä testinäytteisiin litteitä tai ei-litteitä rakeita siten, että kaikkien tutkittujen materiaalien litteysluvulle saatiin kolme tasoa 0-10-20. Kun yksittäistestinäytteet oli valmistettu tavoitellulla litteysluvulla, tehtiin kuulamylytesti standardin SFS-EN 1097-9 mukaan.

Jokaisen yksittäistestinäytteen litteysluku modifioitiin välppämällä ensin litteät rakeet pois ja lisäämällä tunnettu määrä litteitä rakeita, jotta saavutettiin oikea litteyslukutaso. Kun 11,2-16 mm välille seulottu kiviaines oli pesty ja kuivattu, seulottiin kiviaines lajitteiksi 11,2/12,5 mm ja 12,5/16 mm. Nämä lajitteet välpättiin sopivilla välppäseuloilla taulukon 12 mukaisesti. Välppien läpi menneet kivet luokiteltiin litteiksi. Tämän jälkeen välpättyä kiviainesta voitiin sekoittaa takaisin kuulamylykokeen lajitteisiin 11,2/14 mm ja 14/16 mm. Kuvassa 32 on lajitteen 11,2/16 mm kiviaines välpättyinä. Vasemmalla on pyöreät kivirakeet ja oikealla litteät kivirakeet.



Kuva 32. Kiviaines lajiteltuna pyöreään ja litteään raemuotoon (Niko Hietala 2019).

Kiviaineksen kiintotiheyden perusteella laskettiin tarvittava litteiden rakeiden määrä. Tämän jälkeen lisättiin litteää kiviainesta kiviaineksen joukkoon siten, että saavutettiin oikea litteysluku lajitteille 11,2/14 mm ja 14/16 mm. Esimerkiksi litteyslukua 20 tavoitellessa lisättiin ei-litteää kiviainesta 80 % tavoitemassasta ja litteää 20 % tavoitemassasta.

Litteyslukumäärityksen tarkkuutta voidaan arvioida toistettavuuden ja uusittavuuden perusteella. Standardissa SFS-EN 933-3 on esitetty edellä mainituille muuttujille kaavat, jotka on määritetty vuonna 1994 suoritetussa laboratoriodivälisessä vertailututkimuksessa. Toistettavuudelle  $r$  määritettiin tutkimuksen perusteella seuraava kaava:

$$r_1 = 0,0028 * \sqrt{\frac{FI*(100-FI)*D^3}{M}}, \quad (5)$$

jossa  $D$  on kiviaineksen raekoko (mm),  $M$  on testinäytteen massa (kg) ja  $FI$  on testinäytteen litteysluku.

Uusittavuudelle  $R$  määritettiin tutkimuksen perusteella seuraava kaava:

$$R_1 = 0,95 + 0,226 * FI, \quad (6)$$

jossa  $FI$  on testinäytteen litteysluku. (SFS-EN 933-3 2012)

Toistettavuus määrittää litteysluvulle hyväksyttävän vaihteluvälin, kun käytettävä laitteisto ei muutu ja testattava näyte on vastaava. Esimerkiksi testituloksena saatu litteysluku 10 voi toistettavuuden rajoissa samassa laboratoriossa ja samalla laitteistolla määritettynä vaihdella välillä 7-13. (SFS-EN 933-3 2012)

Uusittavuus määrittää litteysluvulle hyväksyttävän vaihteluvälin, kun käytettävä menetelmä, laitteisto tai laboratorio muuttuu ja testattava näyte on vastaava. Esimerkiksi testituloksena saatu litteysluku 10 voi uusittavuuden rajoissa eri laboratoriossa määritettynä vaihdella välillä 7-13. (SFS-EN 933-3 2012)

## 5.4 Esihionta

Kuulamylytestin hiovan luonteen vuoksi kiviaineksen muoto-ominaisuuksilla ja murskaustavalla on suuri vaikutus sen tuloksiin. Näiden vaikutusta voidaan lieventää kiviaineksen esihionnalla, joka pyöristää rakeita ja vähentää niiden pintakarkeutta. (Tielaitos 1994)

Esihiontaan valittiin louhoksen B ja C lajitteet 10/16 mm eli näytteet B1 ja C1. Louhoksen D kiven laatu oli liian hyvää esihionnan kannalta, eikä litteysluvun muokaus juurikaan vaikuttanut saatuihin kuulamylytuloksiin. Louhosten A ja C kiviaines olivat kumpikin graniittisia, joten näistä valittiin toinen. Louhoksen B kiviaines on esihionnan kannalta mielenkiintoista, koska sen eri tuotteista mitaissa litteysluvuissa oli eniten vaihtelua.

Kiviaines jaettiin kahteen eri luokkaan hionta-ajan perusteella. Lyhyt hionta oli pituudeltaan 10 minuuttia ja pitkä hionta oli pituudeltaan 30 minuuttia. Lyhyt hionta hioi kivirakeen särmiä hieman pois. Pitkä hionta poisti särmiä tehokkaammin sekä vähensi pintakarkeutta. Lisäksi kiviaineksen litteysluku modifioitiin litteyslukuihin 0 ja 20.



Kuva 33. Kuulamyllylaite (Niko Hietala 2019).

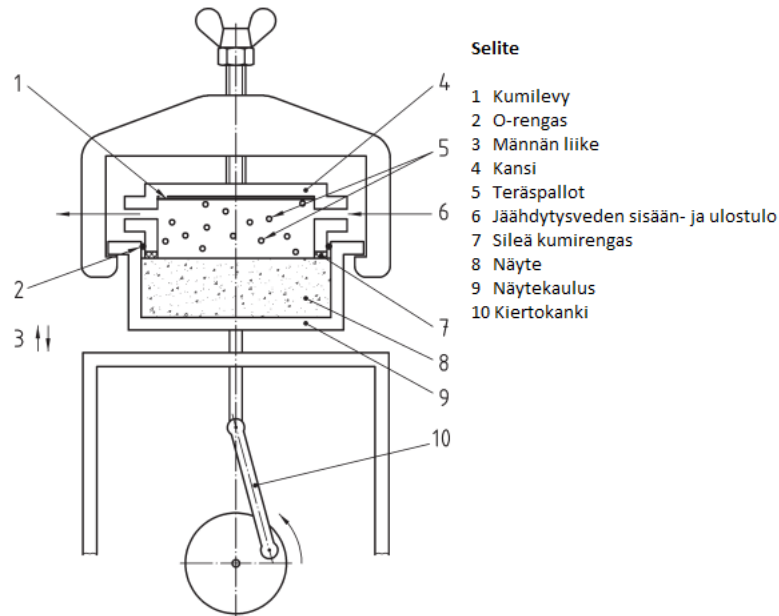
Kiviainesta seulottiin 11,2 mm seulalla niin paljon, että siitä voitiin esihionnan jälkeen tehdä litteysluvultaan sekä 0 että 20 kuulamyllynäytteet. Toisin sanoen siitä piti riittää kiviainesta neljän yksittäisnäytteen tekemiseen. Yli 16 mm kiviaines seulottiin vasta esihionnan jälkeen pois, sillä esihionnan oletettiin pienentävän kiviaineksen raekokoa hieman. Siten varmistettiin kuulamyllylaitteen 11,2/16 mm sisältävän riittävästi myös lajitteen karkeampia rakeita.

Esihionta tehtiin pyörittämällä kuivaa, rakeisuudeltaan yli 11,2 mm ja massaltaan 3,5-4,5 kg olevaa kiviainesta kuulamyllyssä ilman teräskuulia joko 10 tai 30 minuuttia. Kiviaines pestiin ja kuivattiin, jonka jälkeen kiviaines seulottiin lajitteiksi 11,2/12,5 mm ja 12,5/16 mm. Kiviaineksen litteysluku modifioitiin luvussa 5.3 esitettyllä tavalla, jonka jälkeen kuulamyllytesti tehtiin standardin SFS-EN 1097-9 mukaisesti.

## 5.5 Asfalttimassan nastarengaskulutuskestävyys

Asfalttimassan kulumiskestävyys testataan Asfalttinormien mukaan ensisijaisesti Prall-menetelmällä standardin SFS-EN 12697-16 mukaisesti joko menetelmällä A tai B. Menetelmä A on tässä luvussa kuvattava Prall-testi ja menetelmä B on sivurullakulutustesti (SRK). Suomessa käytetään ensisijaisesti menetelmää A. Menetelmä B soveltuu sellaisten asfalttimassojen testaukseen, joiden sideainena käytetään modifioitua sideainetta, kuten polymeerimodifioitu bitumi. Kumpaakin testausmenetelmää voidaan käyttää, kun asfalttimassan kiviaineksen ylempi seulakoko on enintään 22 mm. (SFS-EN 12697-16 2016, PANK ry 2017) Prall-testiin tarvittavat näytteet porataan päällysteestä tai laboratorioissa valmistetusta asfalttilaatasta. Näytteenä käytetään lieriön muotoista porapalaa, jonka halkaisija on 100 mm ja korkeus 30 mm. Testinäytteitä tulee valmistaa vähintään neljä kappaletta. Näytteen tiheys määritetään standardin SFS-EN

12697-6 mukaisesti. Näyte saatetaan +5 °C lämpötilaan, jonka jälkeen määritetään näytteen massa. (SFS-EN 12697-16 2016) Kuvassa 34 on Prall-testissä käytettävän kulutuslaitteen periaatekuva.



Kuva 34. Prall-laite (SFS-EN 12697-16 2016).

Näytettä kulutetaan 40 teräskuulalla 15 minuutin ajan. Testin aikana näytekapaleen pinnalla virtaa vesi, joka huuhtoo näytteestä irtoavan materiaalin pois. Näytteen massa määritetään vesipunnituksella ennen koetta ja kokeen jälkeen, jonka perusteella voidaan laskea näytteen tilavuuden muutos millilitroina, joka ilmoitetaan kulumisarvona  $Abr_A$  (ml). (SFS-EN 12697-16 2016)

## 6 Kiviainestestien tulokset

Testit tehtiin edellä kuvattujen SFS-EN-standardien (Liite A) ja näytteiden modifiointimenetelmien mukaan. Testit tehtiin edustavista näytteistä, jotka jaettiin standardin SFS-EN 932-2 mukaisesti. Jokaisen kiviaineksen ominaisuuksia tutkittiin ensin testeillä, joissa kiviaineksen muoto-ominaisuuksia ei modifioitu lainkaan, jotta saatiin selville tutkittavaksi haetun tuote-erän litteysluvun ja kuulamylyarvon perustaso. Kiviainesten tuottajilta saatiin myös kyseisten tuotteiden laadunvalvontatuloksia.

### 6.1 Louhos A

Louhoksen A näytteille A1, A1K ja A2K tehtiin kuulamylykoe lajitteesta 11,2/16 mm ja näytteille A1p ja A1Kp tehtiin kuulamylykoe 8/11,2 mm lajitteesta. Näiden muokkaamattomien näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,3. Keskiarvon perusteella kiviaines kuuluisi nastarengaskulutuskestävyydeltään luokkaan  $A_N10$ . Yksittäisten kuulamylyarvojen vaihteluväli oli 8,8-12,2. Vaihteluvälin perusteella osa tutkituista näytteistä kuuluu luokkaan  $A_N14$ . Näytteet A1 ja A1p olivat tasoltaan  $A_N14$  kiviainesta ja näytteet A1K, A1Kp ja A2K olivat tasoltaan luokan  $A_N10$  kiviainesta. Lajitteesta 8/11,2 mm tehtyjen testien tulokset olivat keskimäärin hieman pienempiä kuin lajitteesta 11,2/16 mm tehtyjen testien tulokset.

Alkuperäisten modifioimattomien kiviainesnäytteiden litteyslukujen vaihteluväli oli 10-16 %. Ainoastaan lajitteesta 8/11,2 mm tehty näyte A1p kuului luokkaan  $Fl_{20}$ , ja muut näytteet kuuluivat luokkaan  $Fl_{15}$ . Kiviainestuottajan testeissä kubi-soimattoman kiviaineksen litteysluvun vaihteluväli oli 10-14 ja kuulamylyarvon vaihteluväli oli 11,0-12,7. Kubisoidun kiviaineksen litteysluku oli kaikissa kiviainestuottajan testeissä 12 ja kuulamylyarvon vaihteluväli oli 8,7-9,4. Taulukossa 14 on alkuperäisten näytteiden tulokset.

Taulukko 14. Louhoksen A kuulamylykoetulokset ( $A_N$ ) näytteille, joiden litteyslukua ei modifioitu.

Näyte	Testilajite	$A_N1$	$A_N2$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku $Fl$
A1K	11,2/16	9,9	10,2	10,1	11
A1Kp	8/11,2	8,8	9,1	9,0	13
A1	11,2/16	12,2	11,2	11,7	14
A1p	8/11,2	11,5	11,4	11,5	16
A2K	11,2/16	9,6	9,2	9,4	10

Näytteet A1 ja A1p ovat kubi-soimatonta kiviainesta, mikä voidaan selvästi havaita taulukon 14 perusteella. Niiden keskimääräinen kuulamylyarvo on noin 2 yksikköä korkeampi kubi-soituun kiviainekseen verrattuna (näyte A1K ja A2K). Yksittäisten testitulosten ero on suurimmillaan 3,4 yksikköä. Lajitteiden 8/11,2 mm keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,2 – vastaavasti lajitteiden 11/16 mm keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,9. Lajitteiden välinen 0,7 yksikön ero ei ylitä toistettavuuden rajaa, mutta tuloksista voidaan havaita 8/11,2 mm lajitteiden kuulamylyarvojen olevan hieman parempia.



Louhoksen A näytteiden litteyslukuja muokattiin siten, että saatiin testinäytteet, joissa litteysluku oli 0 ja vastaavasti 20. Litteysluvun modifiointia tehtiin näytteille A1K, A1 ja A2K. Näiden lajitteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,4, johon modifioituja tuloksia verrattiin.

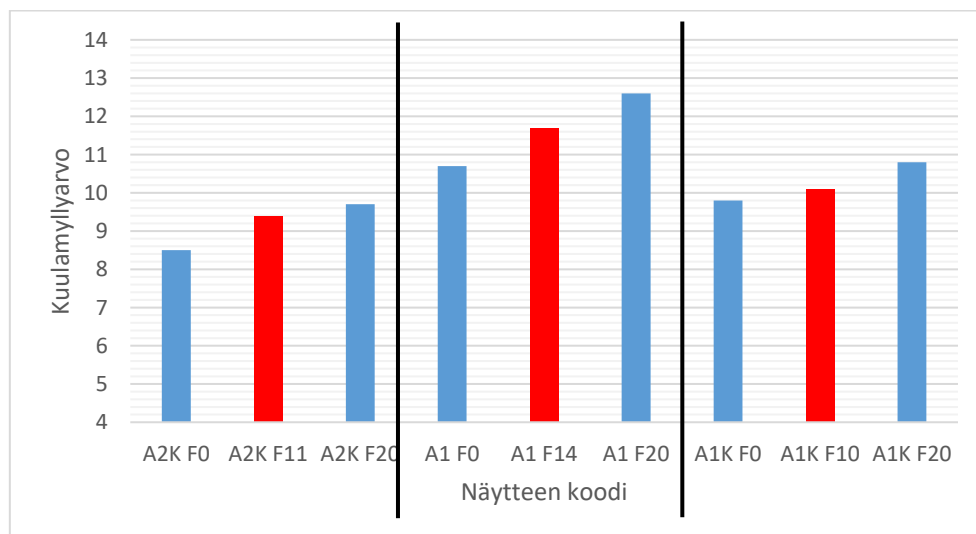
Litteyslukuun 20 modifioitujen näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 5,7 prosenttia suurempi verrattuna alkuperäisten näytteiden keskiarvoon. Keskimääräinen kuulamylyarvo laski 7,2 prosenttia, kun alkuperäisten lajitteiden litteysluku modifioitiin arvoon 0. Taulukossa 15 on modifioitujen näytteiden testien tulokset.

Taulukko 15. Louhoksen A kuulamylytulokset ( $A_N$ ) näytteille, joiden litteyslukua on modifioitu.

Näyte	Testilajite	$A_{N1}$	$A_{N2}$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku FI
A2K	11,2/16	8,7	8,3	8,5	0
A1K	11,2/16	9,6	9,9	9,8	0
A1	11,2/16	10,3	11,0	10,7	0
Keskiarvo				<b>9,6</b>	
A2K	11,2/16	9,5	9,9	9,7	20
A1K	11,2/16	10,8	10,8	10,8	20
A1	11,2/16	11,9	13,2	12,6	20
Keskiarvo				<b>11,0</b>	

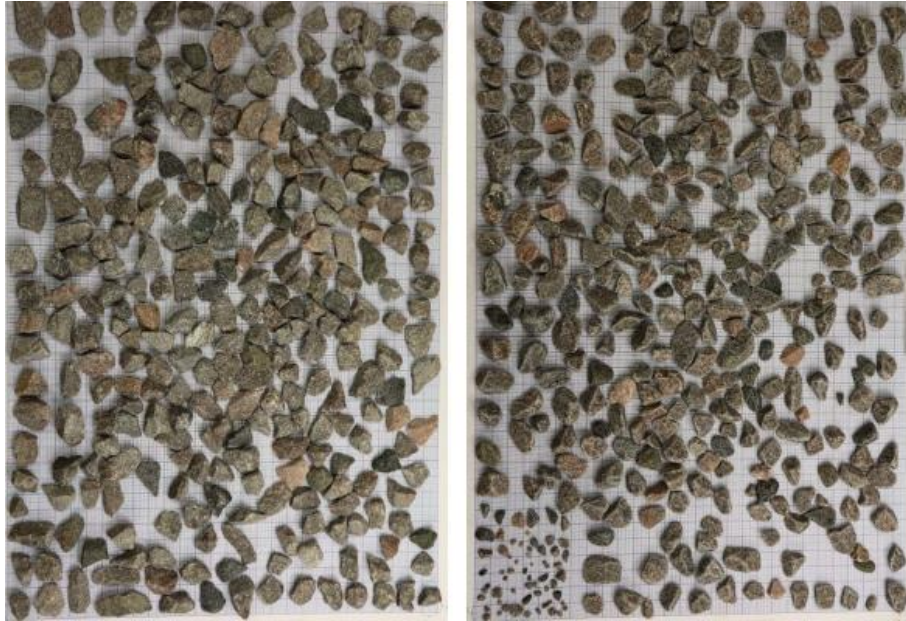
Louhoksen A kiviaineksilla keskimääräinen kuulamylyarvo laski 12,7 prosenttia, kun kuulamylynäytteen litteysluku laskettiin arvosta 20 arvoon 0. Merkittävin vaikutus litteysluvun modifioinnilla oli näytteeseen A1, jonka kuulamylyarvo pieneni lähes kahdella yksiköllä litteysluvun modifioinnin tuloksena.

Kuulamylyarvon vaihtelu on esitetty kuvassa 35. Louhoksen A kiviaineksilla kuulamylyarvo kasvaa pääosin lineaarisesti litteysluvun kasvaessa. Louhoksen A kaikkien testien kuulamylyarvo vaihteli välillä 8,5-12,6. Kaikkien näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,3.



Kuva 35. Louhoksen A näytteiden kuulamylyarvot eri litteysluvuilla. Alkuperäisen materiaalin muokkaamattomat näytteet ovat merkitty punaisella värillä ja modifioidut testit ovat merkitty sinisellä värillä.

Kuvasta 35 havaitaan, kuinka näytteen A1 kubisoimaton kiviaines reagoi voimakkaammin litteysluvun muutoksiin. Syynä on kubisoimattoman kiviaineksen huonompi muoto, joka osoittaa litteysluvun vaikuttavan kuulamylyarvoon. Kubisoituneen kiviaineksen kuulamylyarvo vaihtelee selkeästi vähemmän, vaikka kivilaji on sama. Kuvassa 36 on kuulamylynäyte A1 ennen koetta ja kokeen jälkeen.



Kuva 36. Näyte A1 ennen kuulamylykoetta vasemmalla ja kuulamylykokeen jälkeen oikealla. Näytteen kuulamylyarvo on 12,2 ja litteysluku on 14. (Niko Hietala 2018).

Kuvassa 37 on kuulamylynäyte A1 litteysluvulla 0 ennen koetta ja kokeen jälkeen.



Kuva 37. Näyte A1 ennen kuulamylykoetta vasemmalla ja kuulamylykokeen jälkeen oikealla. Näytteen kuulamylyarvo on 10,3 ja litteysluku on 0. (Niko Hietala 2018).

Kiviaineksen A rakeet olivat jonkin verran puikkoisia. Kuulamyllykokeen aikana syntyneen pienirakeisen kiviaineksen määrä oli litteysluvultaan paremmalla näytteellä merkittävästi pienempi, mutta kuulamyllyarvo oli silti niukasti yli 10. Litteyslukua modifioimalla valmistetun kiviaineksen muoto ei ollut kuitenkaan yhtä hyvä verrattuna kubisoituun kiviainekseen. Taulukosta 15 voidaan havaita, että kubisoimattoman näytteen kuulamyllyarvot ovat suurempia, vaikka litteysluvut ovat samoja.

## 6.2 Louhos B

Louhoksen B näytteille B1 ja B2 tehtiin kuulamyllytesti lajitteesta 11,2/16 mm ja näytteille B1p ja B2p tehtiin kuulamyllykoe 8/11,2 mm lajitteesta. Näiden muokkaamattomien näytteiden keskimääräinen kuulamyllyarvo oli 9,9. Keskiarvon perusteella kiviaines kuuluisi nastarengaskulutuskestävyydeltään luokkaan  $A_N10$ . Yksittäisten kuulamyllyarvojen vaihteluväli oli 7,6-12,8. Vaihteluvälin perusteella osa tutkituista näytteistä kuuluu luokkaan  $A_N14$ . Näytteet B1p ja B1 olivat tasoltaan  $A_N14$  kiviainesta ja näytteet B2p ja B2 olivat tasoltaan  $A_N10$  kiviainesta. Lajitteesta 8/11,2 mm tehtyjen testien tulokset olivat keskimäärin hieman pienempiä kuin lajitteesta 11,2/16 mm tehtyjen testien tulokset.

Alkuperäisten modifioimattomien näytteiden litteyslukujen vaihteluväli oli 17-38 %. Näytteet B2p ja B2 kuuluivat luokkaan  $Fl_{20}$  ja näyte B1 kuului luokkaan  $Fl_{35}$ . Näytteen B1p litteysluku oli liian suuri kuuluakseen mihinkään Asfalttinormien mukaisista luokista. Kiviainestuottajan testeissä näytteen B1 litteysluvun vaihteluväli oli 26-44 ja näytteen B2 litteysluvun vaihteluväli oli 7-13. Taulukossa 16 on alkuperäisten näytteiden tulokset.

Taulukko 16. Louhoksen B kuulamyllytulokset ( $A_N$ ) näytteille, joiden litteyslukua ei modifioitu.

Näyte	Testilajite	$A_N1$	$A_N2$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku $Fl$
B2p	8/11,2	8,1	8,0	8,1	20
B2	11,2/16	7,6	8,3	8,0	17
B1p	8/11,2	11,1	10,9	11,0	38
B1	11,2/16	12,8	12,0	12,4	32

Taulukosta 16 voidaan havaita, että näytteet B2p ja B2 ovat muodoltaan selvästi parempia verrattuna näytteisiin B1p ja B1. Tämä voidaan todeta myös saatujen kuulamyllyarvojen perusteella. Näytteiden B2p ja B2 keskimääräinen kuulamyllyarvo on lähes neljä yksikköä parempi. Lajitteiden 8/11,2 mm keskimääräinen kuulamyllyarvo oli 9,5, ja vastaavasti lajitteiden 11/16 mm keskimääräinen kuulamyllyarvo oli 10,2. Tuloksista voidaan havaita, että 8/11,2 mm lajitteen kuulamyllyarvo oli hieman parempi, vaikka litteysluku oli hieman suurempi. Molempien lajitteiden tulokset osoittavat kiviaineksen kuuluvan luokkaan  $A_N10$ .

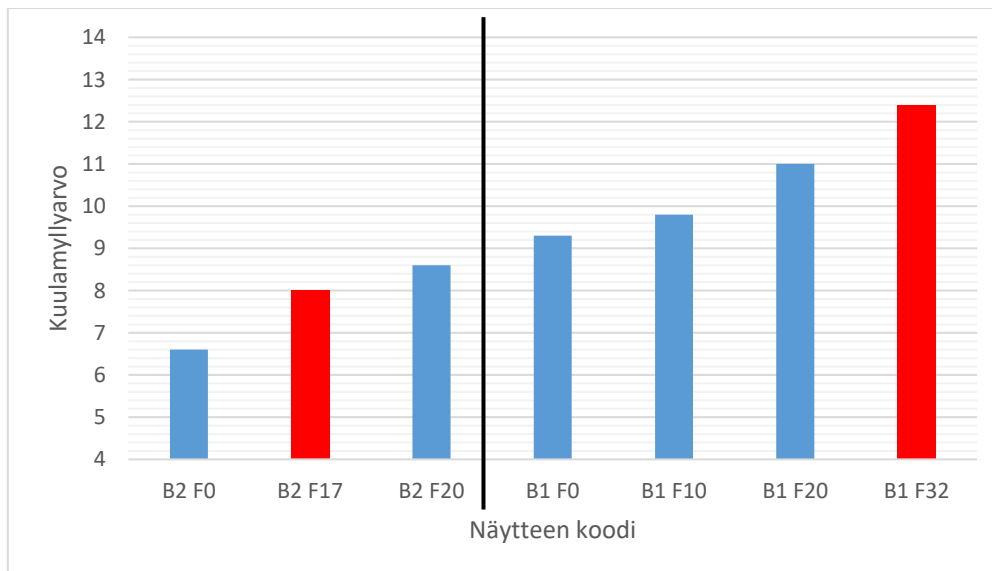
Louhoksen B näytteiden litteyslukuja modifioitiin siten, että saatiin testinäytteet, joissa litteysluku oli 0 ja vastaavasti 20. Litteysluvun modifiointia tehtiin näytteille B2 ja B1. Näiden lajitteiden keskimääräinen kuulamyllyarvo oli 10,2, johon modifioituja tuloksia verrattiin.

Näytteen B1 kuulamylyarvo kasvoi 10,9 prosenttia, kun modifioitavien näytteiden litteysluku nostettiin arvosta 10 arvoon 20. Näytteen B1 kuulamylyarvo laski 5,4 prosenttia, kun litteysluku laskettiin arvosta 10 arvoon 0. Taulukossa 17 on modifioitujen näytteiden testien tulokset.

Taulukko 17. Louhoksen B kuulamylytulokset ( $A_N$ ) näytteille, joiden litteyslukua on modifioitu.

Näyte	Testilajite	$A_N 1$	$A_N 2$	$A_N 3$	$A_N 4$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku FI
B2	11,2/16	6,5	6,6			6,6	0
B1	11,2/16	10,4	8,9	9,5	8,3	9,3	0
<b>Keskiarvo</b>						<b>7,9</b>	
B1	11,2/16	9,7	9,9			9,8	10
<b>Keskiarvo</b>						<b>9,8</b>	
B2	11,2/16	8,8	8,4			8,6	20
B1	11,2/16	11,1	10,8			11,0	20
<b>Keskiarvo</b>						<b>9,8</b>	

Louhoksen B kiviaineksilla keskimääräinen kuulamylyarvo laski 19,4 prosenttia, kun kuulamylynäytteen litteysluku laskettiin arvosta 20 arvoon 0. Sekä B2 että B1 näytteillä kuulamylyarvo laski keskimäärin noin yhdellä yksiköllä, kun litteyslukua laskettiin 10 yksikköä. Kuulamylyarvon vaihtelu on esitetty kuvassa 38. Louhoksen B kiviaineksilla kuulamylyarvo kasvaa melko lineaarisesti litteysluvun kasvaessa. Louhoksen B kaikkien testien kuulamylyarvo vaihteli välillä 6,5-12,8. Kaikkien näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo on 9,4.



Kuva 38. Louhoksen B näytteiden kuulamylyarvot eri litteyslukuilla. Alkuperäisen materiaalin muokkaamattomat näytteet ovat merkitty punaisella värillä ja modifioidut testit ovat merkitty sinisellä värillä.

Kuvasta 38 voidaan havaita, kuinka voimakkaasti huonomuotoisen kiven kuulamylyarvoon voidaan vaikuttaa litteyslukua modifioimalla. Näytteen B1 alkuperäinen keskimääräinen kuulamylyarvo oli yli 12, jonka mukaan se kuuluu luok-

kaan  $A_N14$ . Litteyslukua modifioimalla näytteen B1 keskimääräinen kuulamylyarvo voidaan laskea selvästi alle 10, jolloin kiviaines kuuluu luokkaan AN10. Kuulamylyarvoa voidaan louhoksen B kiviaineksella parantaa jopa 25 prosenttia litteyslukua muokkaamalla. Kuvassa 39 on kuulamylynäyte B1 ennen koetta ja kokeen jälkeen. Kuvassa 40 on kuulamylynäyte B1 litteysluvulla 10 ennen koetta ja kokeen jälkeen.



Kuva 39. Näyte B1 ennen kuulamylykoetta vasemmalla ja kuulamylykokeen jälkeen oikealla. Näytteen kuulamylyarvo on 12,8 ja litteysluku on 32 (Niko Hietala 2018).



Kuva 40. Näyte B1 ennen kuulamylykoetta vasemmalla ja kuulamylykokeen jälkeen oikealla. Näytteen kuulamylyarvo on 9,7 ja litteysluku on 10 (Niko Hietala 2018).

Kuvista 39 ja 40 voidaan havaita rakeiden olevan puikkoisia ja särmikkäitä ennen kuulamylykoetta. Särmikkyuden ja puikkoisuuden vaikutus voidaan todeta kuvan 39 kuulamylykokeen jälkeisestä kuvasta, jossa hienorakeista kiviainesta on syntynyt runsaasti kuulamylykokeen aikana. Vaikka kiviaineksen litteysluku paranee jälkimmäisessä testissä (kuva 40) merkittävästi, syntyy hienorakeista kiviainesta yhä melko runsaasti.

## 6.3 Louhos C

Louhoksen C näytteille C1 ja C2 tehtiin normaali kuulamylytesti lajitteesta 11,2/16 mm ja näytteille C1p ja C2p tehtiin kuulamylykoe 8/11,2 mm lajitteesta. Näiden muokkaamattomien näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,5. Keskiarvon perusteella kiviaines kuuluisi nastarengaskulutuskestävyydeltään luokkaan  $A_N14$ . Yksittäisten kuulamylyarvojen vaihteluväli oli 10,0-10,9. Vaihteluvälin perusteella osa tutkituista näytteistä kuuluu luokkaan  $A_N10$ . Näytteet C2p ja C1 olivat tasoltaan  $A_N10$  kiviainesta ja näytteet C1p ja C2 olivat tasoltaan luokan  $A_N14$  kiviainesta. Lajitteesta 8/11,2 mm tehtyjen testien tulokset olivat keskimäärin samalla tasolla kuin lajitteesta 11,2/16 mm tehtyjen testien tulokset. Kummankin lajitteen kuulamylyarvot olivat keskimäärin noin 10,5.

Litteyslukujen vaihteluväli oli 11-21 %. Näytteet C1, C2p ja C2 kuuluivat luokkaan  $Fl_{20}$  ja näyte C1p kuului luokkaan  $Fl_{35}$ . Taulukossa 18 on alkuperäisten näytteiden tulokset.

*Taulukko 18. Louhoksen C kuulamylytulokset ( $A_N$ ) näytteille, joiden litteyslukua ei modifioitu.*

Näyte	Testilajite	$A_N1$	$A_N2$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku FI
C1p	8/11,2	10,9	10,6	10,8	21
C1	11,2/16	10,3	10,3	10,3	11
C2p	8/11,2	10,0	10,1	10,1	20
C2	11,2/16	10,5	10,9	10,7	13

Taulukosta 18 voidaan havaita, että kuulamylyarvot ovat hyvin saman tasoisia, vaikka testilajite oli erilainen. Lajitteen 8/11,2 mm litteysluvut ovat noin 10 prosenttia suuremmat kuin lajitteella 11,2/16 mm. Lajitteiden 8/11,2 mm keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,4 ja vastaavasti lajitteen 11,2 /16 mm keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,5.

Louhoksen C näytteiden litteyslukuja modifioitiin siten, että saatiin testinäytteet, joissa litteysluku oli 0 ja vastaavasti 20. Litteysluvun modifiointia tehtiin näytteille C2 ja C1. Näiden lajitteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,2, johon modifioituja tuloksia verrattiin.

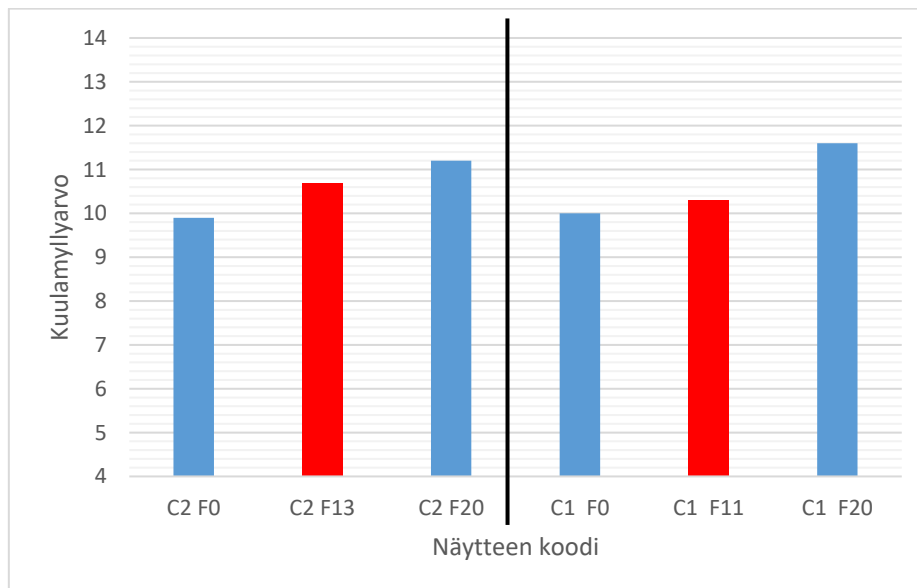
Näytteiden C2 ja C1 keskimääräinen kuulamylyarvo kasvoi 7,5 prosenttia, kun näytteiden litteysluku modifioitiin arvoon 20. Keskimääräinen kuulamylyarvo laski 5,7 prosenttia, kun alkuperäisten lajitteiden litteysluku muokattiin arvoon 0. Taulukossa 19 on modifioitujen näytteiden testien tulokset.

Taulukko 19. Louhoksen C kuulamylytulokset ( $A_N$ ) näytteille, joiden litteysluku on modifioitu.

Näyte	Testilajite	$A_{N1}$	$A_{N2}$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku $F_l$
C2	11/16	10,3	9,4	9,9	0
C1	11/16	10,1	9,8	10,0	0
Keskiarvo				<b>9,9</b>	
C2	11/16	11,4	10,9	11,2	20
C1	11/16	11,1	12,0	11,6	20
Keskiarvo				<b>11,4</b>	

Louhoksen C kiviaineksilla keskimääräinen kuulamylyarvo laski 12,8 prosenttia, kun kuulamylynäytteen litteysluku muuttui arvosta 20 arvoon 0. Näytteiden C2 ja C1 kuulamylyarvoissa ei ollut merkittäviä eroja litteyslukua modifioitaessa.

Kuulamylyarvon vaihtelu on esitetty kuvassa 41. Louhoksen C kiviaineksilla kuulamylyarvo kasvaa melko lineaarisesti litteysluvun kasvaessa. Louhoksen C kaikkien testien kuulamylyarvo vaihteli välillä 9,4-12,0. Kaikkien näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 10,5.



Kuva 41. Louhoksen C näytteiden kuulamylyarvot eri litteyslukuilla. Alkuperäisen materiaalin muokkaamattomat näytteet ovat merkitty punaisella värillä ja modifioidut testit ovat merkitty sinisellä värillä.

Kuvasta nähdään, ettei louhoksen C näytteiden kuulamylyarvoon voida vaikuttaa voimakkaasti litteyslukua muokkaamalla. Alkuperäisen kiviaineksen kuulamylyarvo voidaan kuitenkin parantaa luokkaan  $A_{N10}$ . Kuvassa 42 on kuulamylynäyte C1 ennen koetta ja kokeen jälkeen.



Kuva 42. Näyte C1 ennen kuulamylykoetta vasemmalla ja kuulamylykokeen jälkeen oikealla. Näytteen kuulamylyarvo on 10,3 ja litteysluku on 11 (Niko Hietala 2018).

Kuvassa 43 on kuulamylynäyte C1 litteysluvulla 0 ennen koetta ja kokeen jälkeen.



Kuva 43. Näyte C1 ennen kuulamylykoetta vasemmalla ja kuulamylykokeen jälkeen oikealla. Näytteen kuulamylyarvo on 10,1 ja litteysluku on 0 (Niko Hietala 2018).

Kiviaineksen rakeet olivat jonkin verran puikkoisia. Kuulamylykokeen aikana syntyneen pienirakeisen kiviaineksen määrä oli litteysluvultaan paremmalla näytteellä jonkin verran pienempi, mutta kuulamylyarvo ei parantunut käytännössä lainkaan. Pienirakeisen kiviaineksen määrä pysyi lähes samana myös näytteissä, joiden litteysluku oli 20.



## 6.4 Louhos D

Louhoksen D näytteille D1K ja D2K tehtiin normaali kuulamylytesti lajitteesta 11,2/16 mm ja näytteelle D3K tehtiin kuulamylykoe 8/11,2 mm lajitteesta. Näiden muokkaamattomien näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 5,7. Keskiarvon perusteella kiviaines kuuluisi nastarengaskulutuskestävyydeltään luokkaan  $A_{N7}$ . Yksittäisten kuulamylyarvojen vaihteluväli oli 4,9-6,1. Tämä perusteella jokainen yksittäinen näyte kuuluu luokkaan  $A_{N7}$ . Lajitteesta 8/11,2 mm tehtyjen testien tulokset olivat keskimäärin samalla tasolla kuin lajitteesta 11,2/16 mm tehtyjen testien tulokset.

Alkuperäisten litteyslukujen vaihteluväli oli 2-11 %. Näytteet D1K ja D2K kuuluivat luokkaan  $Fl_{10}$  ja näyte D3K kuului luokkaan  $Fl_{15}$ . Kiviainestuottajan testeissä jokainen näyte kuului kuulamylyluokkaan  $A_{N7}$  ja litteyslukuluokkaan  $Fl_{10}$ . Taulukossa 20 on alkuperäisten tuotenäytteiden tulokset.

Taulukko 20. Louhoksen D kuulamylytulokset ( $A_N$ ) näytteille, joiden litteyslukua ei modifioitu.

Näyte	Testilajite	$A_{N1}$	$A_{N2}$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku $Fl$
D3K	8/11,2	6,3	5,9	6,1	11
D1K	11,2/16	6	6,1	6,1	8
D2K	11,2/16	5	4,9	5,0	2

Taulukosta 20 havaitaan, että louhoksen D kiviainekset ovat kuulamylytestien tulosten perusteella nastarengaskulutuskestävyydeltään laadukkaita. Jokainen yksittäinen testinäyte on selvästi luokassa  $A_{N7}$ . Sekä kuulamylyarvot että litteysluvut ovat poikkeuksellisen pieniä. Lajitteiden 8/11,2 mm keskimääräinen kuulamylyarvo oli 6,1. Lajitteita 8/11,2 mm vastaavien lajitteiden 11/16 mm keskimääräinen kuulamylyarvo oli 5,5.

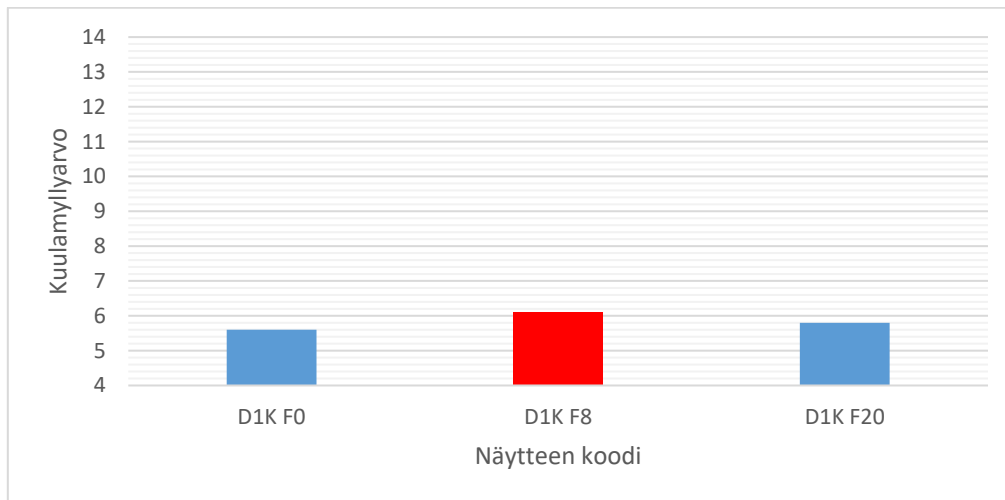
Louhoksen D näytteen D1K litteyslukua modifioitiin siten, että saatiin testinäytteet, joissa litteysluku oli 0 ja vastaavasti 20. Näytteen D1K kuulamylyarvo oli 6,1, johon modifioituja tuloksia verrattiin. Näytteen D2K litteyslukua ei modifioitu. Taulukossa 21 on modifioitujen näytteiden testien tulokset.

Taulukko 21. Louhoksen D kuulamylytulokset näytteille, joiden litteyslukua on modifioitu.

Näyte	Testilajite	$A_{N1}$	$A_{N2}$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku $Fl$
D1K	11/16	5,7	5,4	5,6	0
D1K	11/16	5,8	5,8	5,8	20

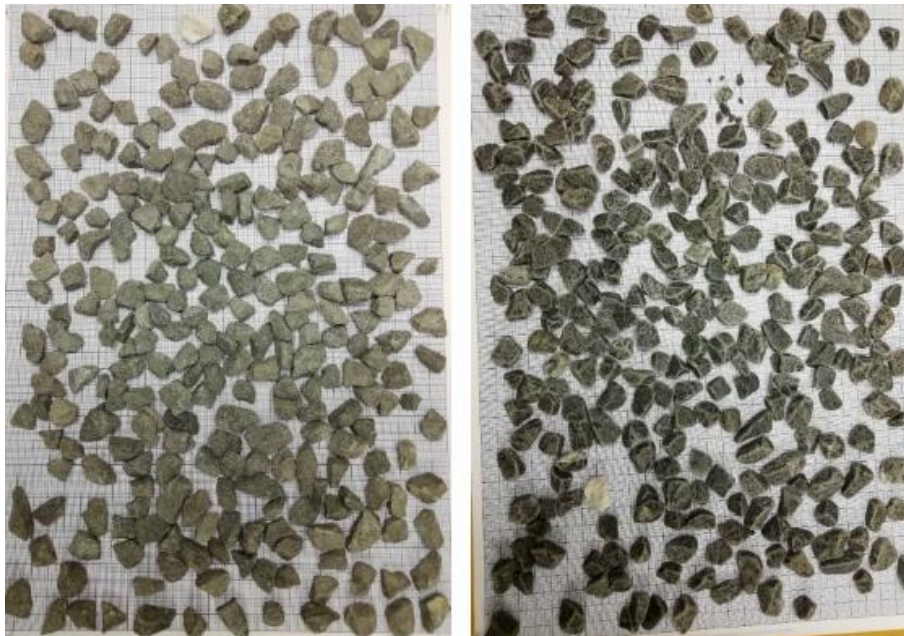
Taulukosta 21 voidaan havaita, että kuulamylyarvot ovat erittäin hyviä kiviaineksen litteysluvusta riippumatta. Keskimääräinen kuulamylyarvo laski 0,2 yksikköä, kun litteysluku pieneni 20 prosenttia.

Kuulamylyarvon vaihtelu on esitetty kuvassa 44. Louhoksen D kuulamylyarvo vaihteli välillä 4,9-6,3. Kaikkien näytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo oli 5,7.



Kuva 44. Louhoksen D näytteen D1K kuulamylyarvot eri litteysluvuilla. Alkuperäisen materiaalin muokkaamaton näyte on merkitty punaisella värillä ja modifioidut testit ovat merkitty sinisellä värillä.

uvasta 44 voidaan havaita, ettei litteysluvun muokkaus vaikuta kuulamylyarvoihin. Alkuperäisen näytteen kuulamylyarvo oli suurin, mutta erot ovat kaiken kaikkiaan hyvin pieniä. Näytteen D1K kuulamylyarvot pysyvät luokassa  $A_{m7}$ . Kuvassa 45 on kuulamylynäyte D1K ennen koetta ja kokeen jälkeen.



Kuva 45. Näyte D1K ennen kuulamylykoetta vasemmalla ja kuulamylykokeen jälkeen oikealla. Näytteen kuulamylyarvo on 6,1 (Niko Hietala 2018).

## 6.5 Esihionta

Louhosten B ja C näytteillä B1 ja C1 testattiin kiviaineksen esihionnan vaikutusta kuulamylyarvoon. Näytteiden litteyslukuja modifioitiin esihionnan jälkeen siten, että saatiin testinäytteet, joissa litteysluku oli 0 ja vastaavasti 20.

Taulukko 22. Esihionnan vaikutus näytteen B1 kuulamylytuloksiin.

Näyte	Hionta-aika	A <sub>N</sub> 1	A <sub>N</sub> 2	A <sub>N</sub> 3	A <sub>N</sub> 4	A <sub>N</sub> keskiarvo	Litteysluku Fl
B1	0 min	10,4	8,9	9,5	8,3	9,3	0
B1	0 min	11,1	10,8			11,0	20
					Keskiarvo	<b>10,1</b>	
B1	10 min	8	8,5			8,3	0
B1	10 min	9,3	10,4			9,9	20
					Keskiarvo	<b>9,1</b>	
B1	30 min	7,5	7,2			7,4	0
B1	30 min	8,2	8,8			8,5	20
					Keskiarvo	<b>7,9</b>	

Taulukosta 22 voidaan havaita, että louhoksen B kiviaineksen esihionnalla voidaan parantaa kuulamylyarvoa keskimäärin kahdella yksiköllä riippumatta modifioidun näytteen litteysluvusta. Yhdistämällä litteysluvun pienentyminen ja pitkä esihionta voidaan näytteen B1 keskimääräistä kuulamylyarvoa parantaa jopa 39,5 prosenttia. Kuulamylyarvo pienenee alkuperäisestä materiaalista saadusta arvosta 12,4 (taulukko 16) arvoon 7,4. Kuulamylyluokka paranee luokasta A<sub>N</sub>14 luokkaan A<sub>N</sub>7. Tämä osoittaa louhoksen B kivilajin hyvät petrografiset ominaisuudet, mikä ei alkuperäisten tuotenäytteiden testeissä tule esille rakeiden huonomuotoisuuden vuoksi.



Kuva 46. Pintastruktuurin ja särmikkyuden muutoksia esihionnan seurauksena. Vasemmalla esihiomatonta kiviainesta B ja oikealla 30 minuuttia esihioittua kiviainesta (Niko Hietala 2019).

Kuvasta 46 voidaan havaita, kuinka särmät ovat hioutuneet pyöreäksi esihionnan aikana. Myös yleinen kuluneisuus näkyy kivirakeessa, mistä voidaan päätellä pinnan karkeuden väheneminen. Louhoksen B kiviaineksella särmien kuluminen on merkittävämpi kuulamylyarvoa parantava tekijä.



Kuva 47. Näytteen B1 kiviainekset kuulamylykokeiden jälkeen. Vasemmalla esihiomattoman kiviaineksen kuulamylynäyte ja oikealla 30 minuuttia esihiotun kiviaineksen kuulamylynäyte kokeen jälkeen. Vasemman näytteen kuulamylyarvo on 10,3 ja oikean näytteen kuulamylyarvo on 7,5 (Niko Hietala 2019).

Kuvasta 47 havaitaan, kuinka merkittävästi esihionta vähentää kiviaineksen särmien lohkeilua ja siten hienorakeisen kiviaineksen syntymistä kuulamylykokeen aikana. Pintastruktuurin muutokset eivät ole yhtä merkittäviä, josta voidaan päätellä B louhoksen kivilajin olevan hyvin hiovaa kulutusta kestävä. Louhoksen C näytteelle C1 tehtiin vastaavat esihiontakokeet. Taulukossa 23 on näytteen C1 kuulamylyarvot eri litteyslukutasoilla ja esihionta-ajoilla.

Taulukko 23. Esihionnan vaikutus näytteen C1 kuulamylytuloksiin ( $A_N$ ).

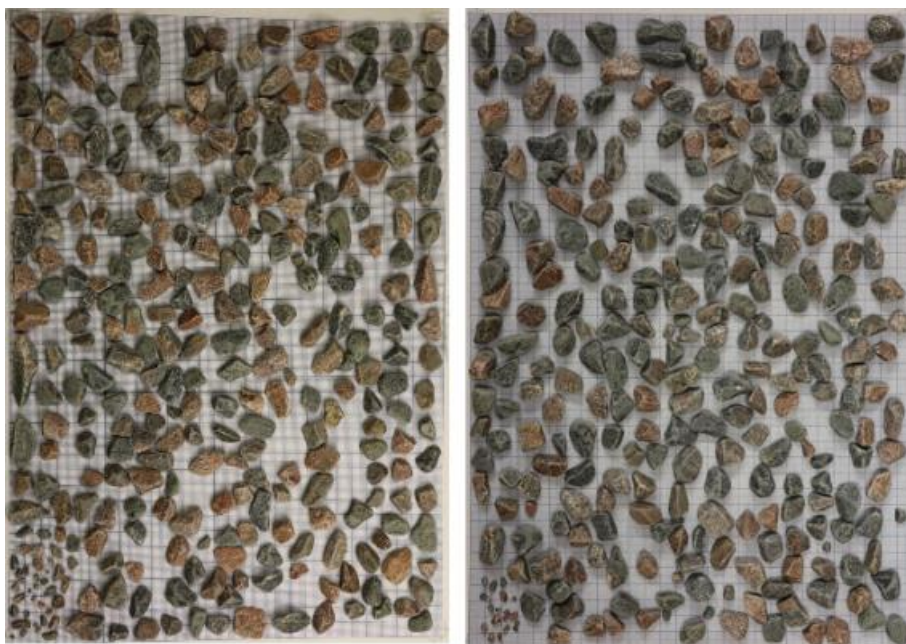
Näyte	Hionta-aika	$A_N 1$	$A_N 2$	$A_N$ keskiarvo	Litteysluku FI
C1	0 min	10,1	9,8	10,0	0
C1	0 min	11,1	12,0	11,6	20
Keskiarvo				<b>10,8</b>	
C1	10 min	8,3	8,8	8,6	0
C1	10 min	10,9	10,0	10,5	20
Keskiarvo				<b>9,5</b>	
C1	30 min	8,2	8,6	8,4	0
C1	30 min	8,8	8,7	8,8	20
Keskiarvo				<b>8,6</b>	

Taulukosta 23 voidaan havaita, että louhoksen C kiviaineksen esihionnalla voidaan parantaa kuulamylyarvoa keskimäärin kahdella yksiköllä. Etenkin suuremmalla litteysluvulla mitatut kuulamylyarvot putosivat lähes kolmella yksiköllä, kun kiviainekselle tehtiin pitkä esihionta. Yhdistämällä litteysluvun pienentyminen ja pitkä esihionta voidaan näytteen C1 keskimääräistä kuulamylyarvoa parantaa 18,4 prosenttia. Kiviaines kuuluu molemmissa tapauksissa kuitenkin luokkaan  $A_{N10}$ .



Kuva 48. *Pintastruktuurin ja särmikkyuden muutoksia esihionnan seurauksena. Vasemmalla esihiomatonta kiviainesta ja oikealla 30 minuuttia esihiottua kiviainesta (Niko Hietala 2019).*

Kuvasta 48 voidaan havaita, kuinka särmät ovat hioutuneet pyöreäksi esihionnan aikana. Myös yleinen kuluneisuus näkyy kivirakeessa, mistä voidaan päätellä pinnan karkeuden väheneminen. Louhoksen C kiviaineksella pintastruktuurin hioutuminen näyttää olevan särmien lohkeilua merkittävämpi kuulamylyarvoa parantava tekijä. Kuvassa 49 on esihiotun ja esihiomattoman näytteen kiviaines kuulamylykokeen jälkeen.



Kuva 49. *Näytteen C1 kiviainekset kuulamylykokeiden jälkeen. Vasemmalla esihiomattoman kiviaineksen kuulamylynäyte ja oikealla 30 minuuttia esihiotun kiviaineksen kuulamylynäyte. Vasemman näytteen kuulamylyarvo on 10,1 ja oikean näytteen kuulamylyarvo on 8,2 (Niko Hietala 2019).*

Kuvasta 49 voidaan havaita, että esihionta vaikuttaa vähemmän graniittisen kiviaineksen särmien lohkeiluun verrattaessa näytteeseen B. Esihiotun näytteen B kuulamylyjarvo on kuitenkin noin kaksi yksikköä pienempi, mikä osoittaa pintastruktuurin muuttuneen eli terävät särvät ovat pyöristyneet erihionnassa.

## 6.6 Kuulamylytestit raekolajitteesta 8/11,2 mm

Kuulamylytesti tehdään normaalisti lajitteesta 11,2/16 mm, testistandardissa on esitetty mahdollisuus myös vaihtoehdoisen 8/11,2 mm lajitteen käyttöön. Periaatteessa eri lajitteilla tehdyistä testeistä pitäisi saada samalainen tulos. Kuulamylykokeet tehtiin standardin SFS-EN 1097-9 mukaisesti. Taulukossa 24 on eri louhosten näytteiden testituloksia määritettynä sekä 8/11,2 mm lajitteesta että 11/16 mm lajitteesta.

Taulukko 24. Lajitteiden 8/11,2 mm ja 11,2/16 mm kuulamylytulosten vertailu.

Näyte	Testilajite	A <sub>N</sub> 1	A <sub>N</sub> 2	A <sub>N</sub> keskiarvo	Litteysluku FI
A1Kp	8/11,2	8,8	9,1	9,0	13
A1K	11,2/16	9,9	10,2	10,1	11
<b>Erotus</b>				<b>1,1</b>	<b>2</b>
A1	8/11,2	11,5	11,4	11,5	16
A1p	11,2/16	12,2	11,2	11,7	14
<b>Erotus</b>				<b>0,2</b>	<b>2</b>
B2p	8/11,2	8,1	8	8,1	20
B2	11,2/16	7,6	8,3	8,0	17
<b>Erotus</b>				<b>0,1</b>	<b>3</b>
B1p	8/11,2	11,1	10,9	11,0	38
B1	11,2/16	12,8	12	12,4	32
<b>Erotus</b>				<b>1,4</b>	<b>6</b>
C1p	8/11,2	10,9	10,6	10,8	21
C1	11,2/16	10,3	10,3	10,3	11
<b>Erotus</b>				<b>0,5</b>	<b>10</b>
C2p	8/11,2	10	10,1	10,1	20
C2	11,2/16	10,5	10,9	10,7	13
<b>Erotus</b>				<b>0,6</b>	<b>7</b>
D3K	8/11,2	6,3	5,9	6,1	11
D1K	11,2/16	6	6,1	6,1	8
<b>Erotus</b>				<b>0,0</b>	<b>3</b>

Taulukosta 24 voidaan havaita, että eri lajitteista tehtyjen kuulamylytestien tulokset vastaavat toisiaan pääosin hyvin. Jokaisen näyteparin kuulamylyjarvojen erotus on toistettavuuden rajoissa. Litteyslukujen erot ovat myös pieniä. Näytteet D3K ja D1K eivät ole samasta varastokasasta peräisin, mutta niiden litteysluku ja muoto ovat samankaltaiset, joten ne otettiin mukaan vertailuun. Kahden näyteparin kuulamylyjarvojen erotus nousi yli yhteen yksikköön, mutta kuulamylyjarvojen vaihtelulle ei löytynyt selitystä litteysluvuista tai kiviaineksen mineralogiasta. Keskimääräinen kuulamylyjarvojen erotus oli 0,6 yksikköä ja keskimääräinen litteyslukujen erotus oli 4,7 yksikköä.

## 7 Asfalttimassan nastarengaskulutuskestävyys

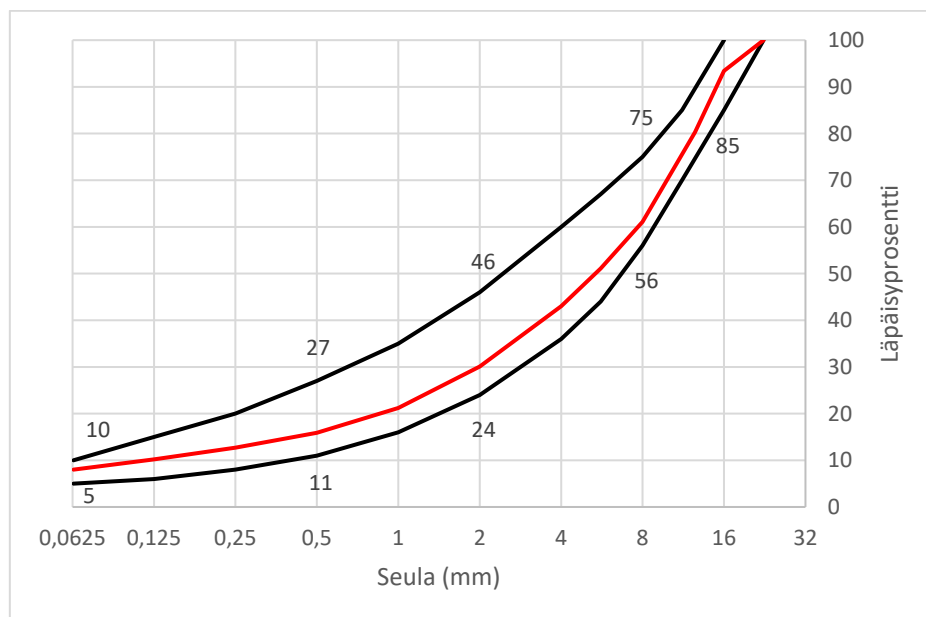
### 7.1 Asfalttimassan suunnittelu ja valmistus

Asfalttipäällysteen karkea kiviaines modifioitiin näytteestä B2 Tampereen yliopiston laboratoriossa. Näytteen B2 litteysluku modifioitiin arvoihin 3 ja 20, jonka jälkeen kiviaines toimitettiin Mitta Oy:n asfalttilaboratorioon. Laboratoriossa asfalttimassa suunniteltiin kiviainesten rakeisuuden perusteella. Asfalttimassojen kiviainekset koostuivat taulukon 25 mukaisista materiaaleista.

Taulukko 25. Asfalttimassan AB 16 kiviaineksen suhteelliset osuudet.

Materiaali	Rakeisuus (mm)	Määrä (%)
Kalkkifilleri	0/0,25	3
KaM X	0/8	57,6
KaM B2	8/12,5	19,2
KaM B2	12,5/16	20,2

Kalliomurske X ja kalkkifilleri ovat Mitta Oy:n laboratorion käyttämiä tunnettuja referenssimateriaaleja. Asfalttimassassa käytettiin sideainetta B 70/100 Nynas 5,2 prosenttia. Valitulla reseptillä valmistettiin koelaatat, jotka tiivistettiin kei-nujyrällä käyttäen normaalin AB-päällysteen tiivistysmäärää. Käytetyt materiaalit ja niiden suhteet olivat keskenään identtiset lukuun ottamatta lajitteen 8/16 mm litteyslukuja eri laatoissa. Molemmista laatoista porattiin halkaisijaltaan 100 mm olevia lieriökoekappaleita 12 kappaletta. Koekappaleista 5 käytettiin Prall-testissä ja muihin testeihin käytettiin neljä koekappaletta. Loput koekappaleet säilytettiin mahdollisia tulevia jatkotestejä varten. Kuvassa 50 on suunnitellun AB-massan kiviaineksen rakeisuuskäyrä.



Kuva 50. Suunnitellun AB-massan kiviaineksen rakeisuuskäyrä.

## 7.2 Prall-testi

Prall-testit tehtiin viiden näytteen sarjoina standardin SFS-EN 12697-16A mukaisesti Mitta Oy:n laboratoriossa. Taulukossa 26 on esitetty litteysluvun 3 näytesarjan tulokset ja vastaavasti taulukossa 27 on esitetty litteysluvun 20 näytesarjan tulokset.

Taulukko 26. Tiivistettyjen asfalttimassojen Prall-arvot, kun karkean kiviaineksen litteysluku on 3.

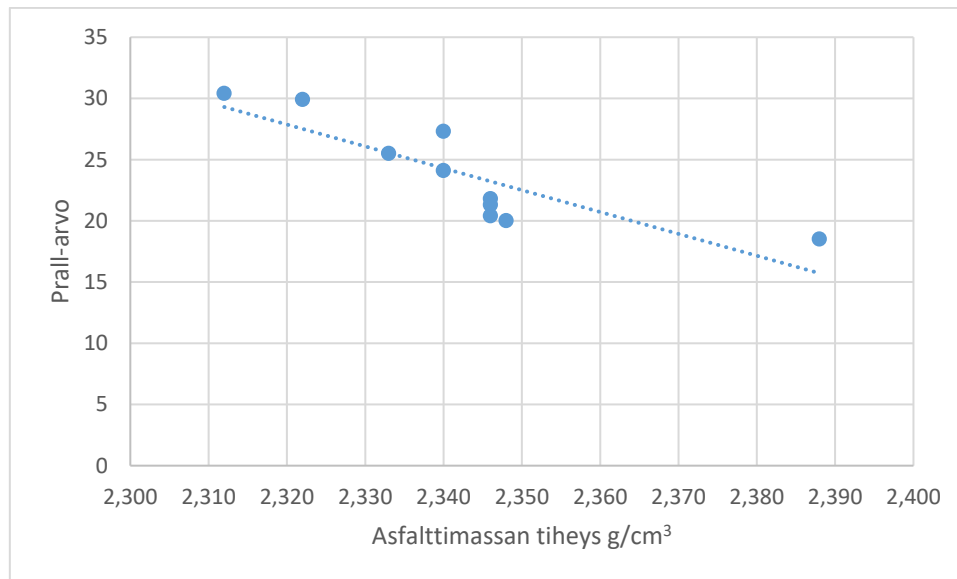
Näyte	Tulos (ml)	Asfaltti- normien kulu- misluokka	Laskennallinen Prall-arvo
1/FI3	27,3		
2/FI3	21,3		
3/FI3	18,5		
4/FI3	24,1		
5/FI3	20,4		
<b>Näytesarjan FI<sub>3</sub> keski- arvo</b>	<b>22,3</b>	<b>A<sub>brA</sub>max 28</b>	<b>29,0</b>

Taulukko 27. Tiivistettyjen asfalttimassojen Prall-arvot, kun karkean kiviaineksen litteysluku on 20.

Näyte	Tulos (ml)	Asfaltti- normien kulu- misluokka	Laskennallinen Prall-arvo
6/FI20	25,5		
7/FI20	30,4		
8/FI20	21,8		
9/FI20	20,0		
10/FI20	29,9		
<b>Näytesarjan FI<sub>20</sub> keski- arvo</b>	<b>25,5</b>	<b>A<sub>brA</sub>max 28</b>	<b>35,5</b>

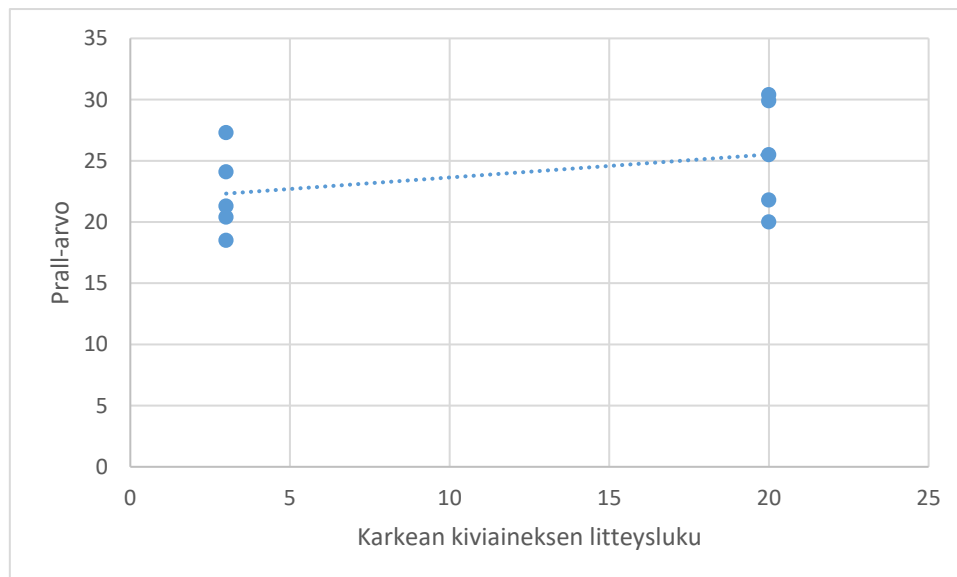
Taulukoista 26 ja 27 voidaan havaita, että asfalttipäällysteen karkean kiviaineksen litteysluvun pienentyessä 17 prosenttia pienenee Prall-testin tulos kolmella yksiköllä. Kolmen yksikön ero ei ole merkittävä suhteessa litteysluvun suureen alenemaan. Luokkien rajatapauksissa kolmen yksikön ero voi toisaalta nostaa pienemmän litteysluvun asfalttipäällysteen parempaan kulumisluokkaan. Asfalttipäällysteen koostumusta muokkaamalla voitaisiin nähdä selkeämmin karkean kiviaineksen litteysluvun vaikutus asfalttipäällysteen kulumiskestävyyteen. Kiviaineksen litteysluku voi vaikuttaa päällysteen tiivistettävyyteen ja si-deaineen määrään. Kuvassa 51 on esitetty päällystemassojen Prall-arvot eri massan tiheyden arvoilla. Taulukoissa 26 ja 27 esitetyt laskennalliset Prall-arvot on laskettu tierakenteen suunnitteluohjeessa esitetyn menettelyn mukaan päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden (KN) tavoitearvon avulla.





Kuva 51. Tiivistettyjen päällystemassojen Prall-arvojen ja massan tiheyden vertailu.

Kokeessa käytetyn päällystemassan tiheyden ja Prall-tuloksien välillä havaittiin kuvan 51 mukainen yhteys. Prall-tuloksista huomataan selkeä laskeva trendi, kun asfalttimassan tiheys kasvaa. Suuren litteysluvun asfalttimassan tiheys oli keskimäärin pienempi, minkä perusteella myös Prall-arvot ovat keskimäärin suuremmat. Kuvassa 52 on päällystemassojen Prall-arvot eri litteysluvuilla.



Kuva 52. Tiivistettyjen päällystemassojen Prall-arvot eri litteysluvuilla.

Litteysluvun kasvu kasvatti Prall-tuloksien vaihtelua selkeästi. Litteysluvultaan huonomuotoisen asfalttimassan parhaat Prall-tulokset ovat samaa tasoa hyvämuotoisen asfalttimassan tulosten kanssa, mutta huonoimmat tulokset putosivat jo kulumisluokkaan  $Abr_{Amax36}$ .

Prall-arvo voidaan arvioida Tierakenteen suunnitteluohjeen mukaan päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden tavoitearvon (KN-arvo) perusteella, kun tiedetään kiviaineksen potentiaalinen kulumisnopeus päällysteessä. Kaavassa 7 Prall-arvo lasketaan asfalttimassanäytteelle. (Liikennevirasto 2018)

$$PRALL_{MASSA} = KN - 6, \quad (7)$$

jossa KN on päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden tavoitearvo (kaava 1). (Liikennevirasto 2018) Kaavan paikkaansa pitävyyttä voidaan testata näytteellä B2, josta on tehty sekä kuulamylykoe että Prall-testi. Näytteen B2 keskimääräinen kuulamylyarvo litteysluvulla 0 oli 6,6. Tätä kuulamylyarvoa vastaava päällysteen laskennallinen kulumisnopeus KN on kaavan 1 mukaan 35,0. Laskennallinen Prall-arvo on kaavan 8 mukaan 29,0. Näytteen B2 keskimääräinen kuulamylyarvo litteysluvulla 20 oli 8,6. Tätä kuulamylyarvoa vastaava päällysteen laskennallinen kulumisnopeus KN on kaavan 1 mukaan 41,5. Laskennallinen Prall-arvo on kaavan 7 mukaan 35,5. Laskennallinen Prall-arvo ylittää testattujen näytteiden Prall-arvot selvästi.

Asfalttinormeissa on asetettu tiivistetylle asfalttimassalle kulumiskestävyysvaatimuksia. Kulumisluokkia on neljä kappaletta ja kulumisluokka määräytyy viiden yksittäisen testituloksen keskiarvon perusteella. (PANK ry 2017)

Taulukko 28. Tiivistettyjen asfalttimassojen kulumisluokat (PANK ry 2017).

Kulumisluokka	Prall-arvo $Abr_A$ (ml)
$Abr_{A \max 20}$	$\leq 20$
$Abr_{A \max 28}$	$\leq 28$
$Abr_{A \max 36}$	$\leq 36$
$Abr_{A \max 45}$	$\leq 45$

Asfalttinormeissa on esitetty myös esimerkkejä asfalttimassan kulumisluokan valinnasta kuulamylyarvon perusteella. Taulukon 29 arvoja voidaan käyttää vaatimusten asettamisen ja toiminnallisen suunnittelun lähtökohtana. (PANK ry 2017)

Taulukko 29. Esimerkkejä asfalttimassan kulumisluokan valinnasta kuulamylyarvon perusteella (PANK ry 2017).

Massatyyppi	Kuulamylyarvo ja Prall-arvo	
	$A_{N7}$	$A_{N10}$
AB 11	$Abr_{A36}$	$Abr_{A45}$
AB 16	$Abr_{A28-A36}$	$Abr_{A36-A45}$
AB 22	$Abr_{A28}$	$Abr_{A36}$
SMA 11	$Abr_{A28}$	$Abr_{A36}$
SMA 16	$Abr_{A20-A28}$	$Abr_{A28-A36}$
SMA 22	$Abr_{A20}$	$Abr_{A28}$

Prall-kokeissa käytettiin päällysteen massatyypinä AB 16. Prall-kokeissa käytetyn näytteen B2 kuulamylyarvo vaihteli litteysluvun mukaan. Hyvämuotoinen B2 näyte kuuluu luokkaan  $A_{N7}$  ja huonomuotoinen B2 näyte kuuluu luokkaan  $A_{N10}$ . Prall-kokeet osoittavat, että massatyypin AB 16 Prall-arvosuosituksukset (taulukko 29) täyttyvät sekä  $A_{N7}$  että  $A_{N10}$  kuulamylyluokan kiviaineksilla.

## 8 Tulosten analysointi ja vertailu

### 8.1 Tulosten yhteenveto

Tässä tutkimuksessa kuulamylyarvoon vaikuttavia tekijöitä olivat kiviaineksen murskausprosessi, litteysluvun modifiointi ja esihionta. Taulukossa 30 on esitetty kaikkien testinäytteiden keskimääräinen kuulamylyarvo ja litteysluku. Taulukkoon 31 on koottu esihiontatestien tulokset. Taulukon numeerisia arvoja on havainnollistettu myös kuvassa 53. Taulukkoon on koottu myös tuloksista tehdyt tärkeimmät johtopäätökset.

Taulukko 30. Yhteenveto testinäytteiden tuloksista.

Näyte	Kuulamylyarvo	Litteysluku	Johtopäätökset
A1K	9,8	0	Graniittia ja amfiboliittia sisältävän kiviaineksen kubisointi parantaa kuulamylyarvoa 2-3 yksikköä verrattaessa kubisoimattomaan, kun litteysluku vakioidaan.
A1K	10,1	11	
A1K	10,8	20	
A1	10,7	0	
A1	11,7	14	
A1	12,6	20	
A2K	8,5	0	
A2K	9,4	10	
A2K	9,7	20	
A1p	11,5	16	
A1Kp	9,0	13	Koostumukseltaan vaihtelevaa hienorakeista porfyriittia sisältävän kiviaineksen litteysluku ja tuotantoprosessi vaikuttavat tuloksiin merkittävästi. Tuotteen B2 (8/16 mm) kuulamylyarvo on lähes 3 yksikköä 0/16 mm tuotteen B2 arvoa parempi samalla litteyslukutasolla.
B2	6,6	0	
B2	8,0	17	
B2	8,6	20	
B1	9,3	0	
B1	9,8	10	
B1	11,0	20	
B1	12,4	32	
B1p	11,0	38	Lajitteella 8/11,2 mm tehdyllä testillä saadaan keskimäärin saman tasoisia tuloksia kuin referenssilajitteella 11,2/16 mm. Litteysluvulla on merkittävä vaikutus myös lajitteen 8/11,2 mm kuulamylytulokseen.
B2p	8,1	20	Graniitista ja gneissistä koostuvan kiviaineksen tuotteiden 8/16 mm ja 0/16 mm kuulamylyarvot ovat lähes identtiset samoilla litteyslukutasoilla. Litteysluku vaikuttaa kuulamylyarvoon noin yhden yksikön litteysluvun muuttuessa kymmenen yksikköä.
C2	9,9	0	
C2	10,7	13	
C2	11,2	20	
C1	10,0	0	
C1	10,3	11	
C1	11,6	20	

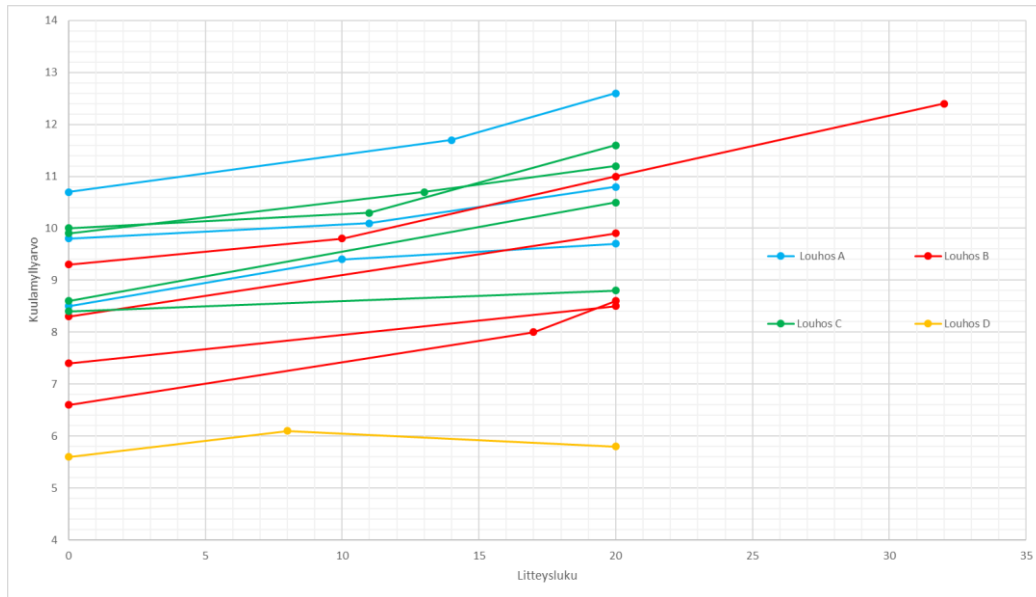
Näyte	Kuulamylyarvo	Litteysluku	Johtopäätökset
D1K	5,6	0	Litteysluvun muutos vaikuttaa kuulamylytulokseen erittäin vähän.
D1K	6,1	8	
D1K	5,8	20	
D3K	6,1	11	
D2K	5,0	2	

Taulukko 31. Yhteenvedo esihiontatestien tuloksista.

Näyte	Esihionta	Kuulamylyarvo	Litteysluku	Johtopäätökset
B1	0	9,3	0	Esihionta vaikuttaa kuulamylyarvoon 2-3 yksikköä. Louhoksen B hyvämuotoisen (FI=0) kiviaineksen 10 ja 30 min esihionta pienentää kuulamylyarvoa.
B1	10 min	8,3	0	
B1	30 min	7,4	0	
B1	0	11,0	20	
B1	10 min	9,9	20	
B1	30 min	8,5	20	
C1	0	10,0	0	Esihionta vaikuttaa kuulamylyarvoon noin 2 yksikköä. Louhoksen C hyvämuotoisen kiviaineksen (FI=0) esihionta ei vaikuta 10 min hionnan jälkeen kuulamylyarvoon.
C1	10 min	8,6	0	
C1	30 min	8,4	0	
C1	0	11,6	20	
C1	10 min	10,5	20	
C1	30 min	8,8	20	

Louhoksen A ja C kiviainekset ovat ominaisuuksiltaan melko samanlaisia. Kumpikin kivilaji on graniittinen, kiviaineksen muoto on melko hyvä ja alkuperäisten testien tulokset ovat sekä litteysluvun että kuulamylyarvon osalta hyvin lähellä toisiaan. Louhoksen B kiviaines on muodoltaan huonoa, mutta raaka-aineen ominaisuuksien perusteella hiovan kulutuksen kestoiltaan hyvää. Louhoksen raaka-aine vaihtelee ja tässä tutkimuksessa kivilajiksi määrytyi hienorakeinen porfyriitti, jossa on vaihtelevasti kvartsirakeita. Kiviaines on pääosin suuntautunutta, mikä aiheuttaa kiviainekselle luontaisen huonomuotoisuuden, kun murskausvaiheita on vähän. Louhoksen B kiviaineksen kuulamylyarvoissa ja litteyslukuissa havaittiin myös suurimmat vaihtelut.

Louhoksen D kiviaines on suuntautumaton ja kovaa. Kivilaji on hienorakeinen porfyriitti. Kuulamylyarvo ja litteysluku ovat pienimmät, eikä kuulamylyarvoon saatu juurikaan muutoksia litteyslukua modifioimalla. Kuulamylytestin aikana ei kivirakeista lohkeile juuri lainkaan palasia. Kuluminen tapahtuu siis hioutumisena ja pyöristymisenä. Kiviaines oli laadultaan niin hyvää, ettei sen litteysluku vaikuttanut kuulamylyarvoon lainkaan, mikä voidaan todeta kuvasta 53.



Kuva 53. Kaikkien näytteiden kuulamylyarvot eri litteyslukuilla.

## 8.2 Litteysluvun vaikutus kuulamylytuloksiin

Louhoksen A kiviaines on graniittista ja muodoltaan melko hyvää. Kiviainesta testattiin sekä kubisoituna että kubisoimattomana. Kubisoimattoman kiviaineksen kuulamylyarvo muuttuu noin kahdella yksiköllä litteysluvun muuttuessa 20 yksiköllä. Kubisoidun kiviaineksen kuulamylyarvo muuttuu noin yhdellä yksiköllä litteysluvun muuttuessa 20 yksiköllä. Kiviaineksen kulumisen kuulamylykokeissa näyttää tutkitussa graniittisessa kiviaineksessa liittyvän ensisijaisesti pinnan kulumiseen eli rakeiden pintakarkeuden pienenemiseen. Edes kubisoimaton näyte A1 ei näytä olevan muodoltaan erityisen huonoa, mutta sen keskimääräinen kuulamylyarvo oli lähes 12. Kubisoimaton kiviaines on kuitenkin hieman särmikkäämpää ja puikkoisempaa, minkä vuoksi sen kuulamylyarvo on selkeästi isompi. Valokuvista voidaan havaita, että kokeessa syntyneen hienorakeisen aineksen määrä on melko pieni kaikille litteysluvun tasoilla.

Tämän tutkimuksen kiviaineksista louhoksen B kiviaines on selkeästi huonomuotoisinta. Alkuperäisten näytteiden testitulokset ovat kuitenkin samalla tasolla louhoksen A ja C kiviainesten kanssa. Tämä kertoo louhoksen B kiviaineksen potentiaalisesti hyvästä kulutuskestävyydestä. Kiviaineksen kuulamylyarvo muuttui keskimäärin 1,9 yksikköä, kun litteyslukua modifioitiin 20 yksikköä. Louhoksen B kiviaineksen kulumisen kuulamylykokeissa näyttää liittyvän ensisijaisesti kiviaineksen litteiden ja puikkoisten rakeiden määrään. Huonomuotoisesta kiviaineksista lohkeaa merkittävä määrä palasia kuulamylykokeessa, mikä nopeuttaa kiviaineksen kulumista testin aikana lisäten hioutumiselle altista pintaa ja vaikuttaa siten tulokseen. Kivilajin kovuus estää kuulamylyarvon jyrkän kasvun litteysluvun kasvaessa. Kivilaji on suuntautunutta, minkä vuoksi kiviaineksen muoto jää huonoksi murskausprosessissa, jossa ei ole käytetty kubisointia.

Louhoksen C kiviaines on graniittista ja muodoltaan melko hyvää. Louhoksen C kiviaines on hyvin samankaltaista louhoksen A kiviaineksen kanssa, mutta se muodostuu selkeästi kahdesta komponentista, jotka ovat graniitti ja gneissi.

Louhoksen C kiviainesta ei kuitenkaan ole kubisoitu. Kiviaineksen kuulamylyarvo muuttui keskimäärin 1,5 yksikköä, kun litteyslukua modifioitiin 20 prosenttisyksikköä. Kiviaineksen kulumisen kuulamylykokeissa näyttää liittyvän ensisijaisesti kivirakeiden pinnan kulumiseen eli pintakarkeuden pienenemiseen. Tummat kiillepitoiset kiviainesrakeet pyöristyivät visuaalisten havaintojen perusteella hieman enemmän kuin graniittiset rakeet. Kiviaines ei ole erityisen huonomuotoista, minkä vuoksi valokuvissa ei näy suurta lohkeilua. Kuulamylyarvo kuitenkin muuttuu selkeästi litteysluvun mukaan. Taulukossa 32 on esitetty yhteenvetona litteysluvun vaikutus eri louhosten kuulamylyarvoihin.

Taulukko 32. Litteysluvun vaikutus kuulamylyarvoon eri kivilajityypeillä. Louhosten A ja C kiviainekset ovat graniittisia.

Näyte	Kubisoitu	FI muutos	$A_N$ -arvon muutos
A1K	Kyllä	0 → 20	+1,2
A2K	Kyllä	0 → 20	+1
A1	Ei	0 → 20	+1,9
B2	Ei	0 → 20	+2
B1	Ei	0 → 20	+1,7
C2	Ei	0 → 20	+1,3
C1	Ei	0 → 20	+1,6
D1K	Kyllä	0 → 20	+0,2

Litteysluvun vaikutusta kuulamylyarvoon on testattu myös vuonna 2008 tehdyssä päällysteiden vierintämeluun liittyvässä VIEME-tutkimuksessa. Tutkimuksessa tehtiin kuulamylykokeita sekä välpätymille että välppäämättömille kiviaineksille, ja tulokset ovat vastaavia kuin louhoksen D kiviaineksen testitulokset eli litteysluvun muutos ei parantanut testattujen näytteiden kuulamylyarvoa, kun kuulamylyluokka oli  $A_N7$ . Tämän perusteella todettiin, että parhaimman kuulamylyluokan kiviaineksen litteysluvulla ei ole juurikaan vaikutusta sen kuulamylyarvoon. (Tervahattu, Lahti et al. 2008)

### 8.3 Murskausprosessin vaikutus

Kiviaineksen murskausprosessin vaikutus kuulamylyarvoon voidaan havaita louhoksen A kiviaineksella. Testitulokset osoittavat, että kiviaineksen kubisointi parantaa kuulamylyarvoa noin yhdellä yksiköllä, kun litteysluku muuttuu 20 yksikköä. Kun tutkittiin modifioimattomia alkuperäisiä kiviaineksia havaittiin, että kiviaineksen kubisointi paransi louhoksen A litteyslukua noin viisi yksikköä ja vastaavasti kuulamylyarvo parani keskimäärin 1,6 yksikköä. Joten kubisoinnin aiheuttamalla rakeiden pyöristymisellä on suurempi vaikutus kuulamylyarvoon kuin pelkällä litteysluvun muutoksella. Louhoksen A kiviaineksen keskimääräinen kuulamylyarvo on hyvin lähellä kuulamylyluokan  $A_N10$  rajaa, mikä korostaa litteysluvun merkitystä tällä kiviaineksella. Litteysluvun modifioinnin vaikutus on kubisoimattomalla kiviaineksella noin kaksi kertaa suurempi kuin kubisoidulla kiviaineksella. Tämän kiviaineksen murskausprosessilla voidaan siis parantaa kiviaineksen nastarengaskulutuskäytävyyttä, kun litteiden ja puikkoisten kiviainesrakeiden määrä vähenee ja kiviaines pyöristyy.

Kubisoinnissa kiviaineksen kulmat hioutuvat ja pyöristyvät, joten kubisoidun näytteen kuulamylyarvot ovat hieman parempia kuin kubisoimattoman. Jos graniittisesta kivistä lohkeaa palasia, se voi johtua myös mineraalien välisten sidosten löyhyydestä tai kiviaineksen louhinnassa syntyneestä mikrorakoilusta. Kubisoinnilla voidaan parantaa kiviaineksen litteyslukua ja vähentää särmikkyyttä, mutta sen vaikutus on kivilajikohtaista. Siksi kiviaineksen kubisoinnin tarve tulisi määritellä esimerkiksi louhoskohtaisesti. Kiviaineksen kubisoinnille ei voi siis asettaa yleistä vaatimusta tai kieltoa. Kubisoinnin todellista vaikutusta asfalttipäällysten nastarengaskulutuskestävyyteen voitaisiin tutkia esimerkiksi tekemällä kubisoiduista ja kubisoimattomista kiviaineksista päällystelaattoja ja tekemällä niille Prall-testejä. Testejä voitaisiin tehdä eritasoisille ja -tyypisille kiviaineksille.

## 8.4 Esihionnan vaikutus

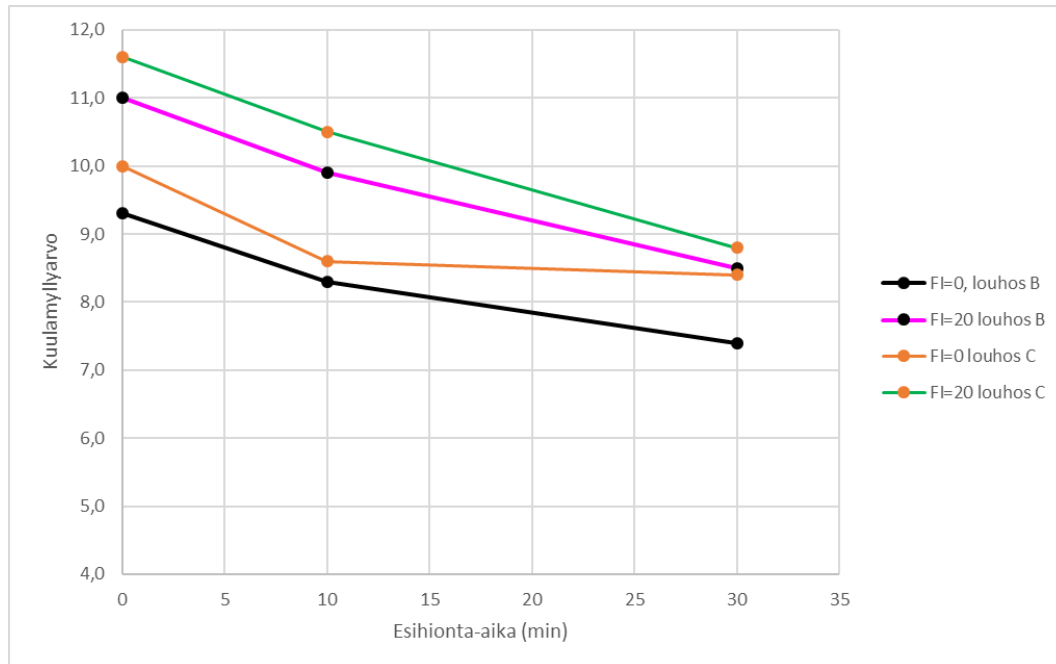
Louhosten B ja C kiviaineksille tehtiin lisätestejä, joiden tavoitteena oli testata kuivalle näytteelle tehtävän esihionnan vaikutusta kiviaineksen kuulamylyarvoon. Lyhyt hionta kesti 10 minuuttia ja pitkä hionta 30 minuuttia.

Louhoksen B kiviaines olisi hyvin laadukasta kuulamylyarvolla mitattuna, mikäli sen muoto olisi parempi. Esihiontatesteissä hyvämuotoisen näytteen kuulamylyarvo muuttui 1,9 yksikköä, kun kiviainekselle tehtiin pitkä esihionta. Huonomuotoisen näytteen kuulamylyarvo muuttui 2,5 yksikköä, kun kiviainekselle tehtiin pitkä esihionta. Esihionta paransi kuulamylyarvoa tasaisesti kummallakin litteysluvun arvolla. Kiviaineksen lohkeilu kuulamylytestissä vähenee sekä litteysluvun pienentämisen että esihionnan yhteydessä. Esihionnan ja litteysluvun modifioinnin vaikutus kuulamylyarvoon on suunnilleen saman suuruinen.

Louhoksen C kuulamylyarvoa pystytään parantamaan jonkin verran muotoa parantamalla. Esihiontatesteissä hyvämuotoisen näytteen kuulamylyarvo muuttui 1,6 yksikköä, kun kiviainekselle tehtiin pitkä esihionta. Huonomuotoisen näytteen kuulamylyarvo muuttui 2,8 yksikköä, kun kiviainekselle tehtiin pitkä esihionta. Taulukossa 33 ja kuvassa 54 on esitetty kuulamylyarvon muutos eri esihionta-ajoilla.

Taulukko 33. Kuulamylyarvon muutos eri esihionta-ajoilla.

Näyte	Litteysluku	Hionta-aika	Kuulamylyarvo ( $A_N$ )
B1	0	0	9,3
B1	0	10 min	8,3
B1	0	30 min	7,4
B1	20	0	11,0
B1	20	10 min	9,9
B1	20	30 min	8,5
C1	0	0	10,0
C1	0	10 min	8,6
C1	0	30 min	8,4
C1	20	0	11,6
C1	20	10 min	10,5
C1	20	30 min	8,8



Kuva 54. Louhosten B ja C kuulamylyarvot eri esihionta-ajoilla.

Lyhyt esihionta paransi kuulamylyarvoa tasaisesti kummallakin litteysluvun arvolla. Pitkä esihionta paransi louhoksen C graniittisen kiviaineksen hyvämuotoisen kiviaineksen kuulamylyarvoa enää hyvin vähän verrattuna lyhyeen esihiontaan. Huonomuotoisen kiviaineksen pitkä esihionta paransi kuulamylyarvoa kuitenkin selvästi enemmän. Kiviaineksen mineralogia ja kivilajityyppi aiheuttavat kiviaineksen muodosta riippumattomasti kulumista niin paljon, ettei edes esihionta paranna kuulamylyarvoa tiettyä määrää enempää.

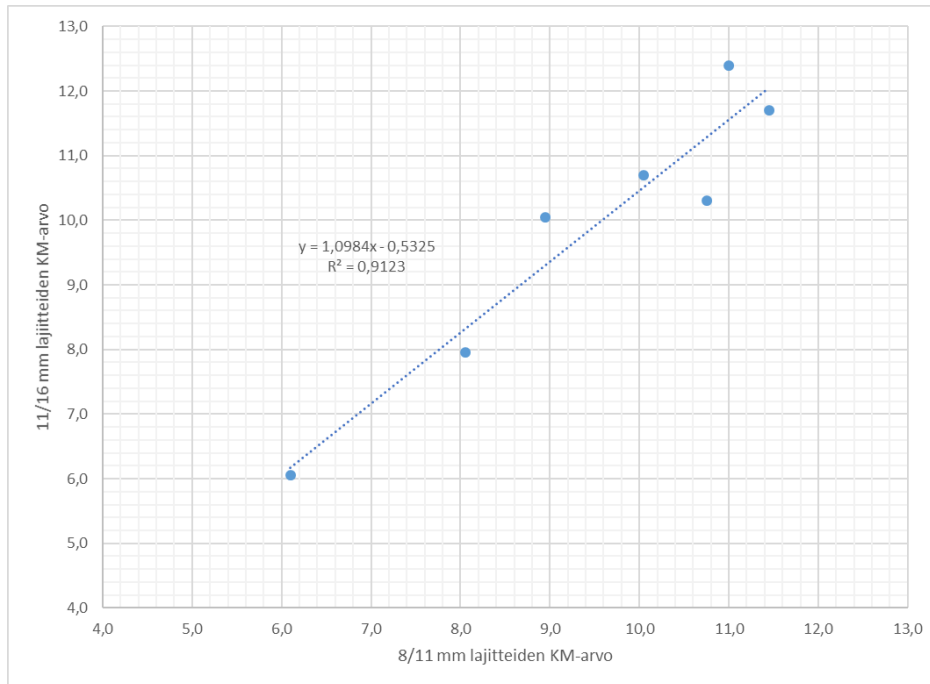
Louhoksen B kiviaineksen kuulamylyarvoa voitiin parantaa arvosta 12,4 arvoon 7,4 modifioimalla litteyslukua laboratorio-olosuhteissa. Keskimääräinen kuulamylyarvo parani lähes 40 prosenttia, mikä kertoo kivilajin olevan perusominaisuuksiltaan kulutuskestävää, mutta rikkoutuvan murskausprosessissa huonomuotoiseksi ja särmiikkääksi. Kiviaineksen murskausprosessilla voidaan merkittävästi vaikuttaa saatavaan kuulamylyarvoon.

Esikulutuksen vaikutus kuulamylyarvoon on todettu jo vuonna 2000 tehdyssä tutkimuksessa, jossa korkeatasoisen metavulkaniitin kuulamylyarvoa pystyttiin parantamaan esikulutuksella noin kaksi yksikköä. Kyseisen kiviaineksen kuulamylyarvo oli sekä hyvä että huonomuotoisena tasolla 6,5 ilman esikulutusta. Esikulutus paransi sekä hyvä että huonomuotoisen kiviaineksen kuulamylyarvon tasolle 4,5. Kiviaineksen laatu on niin hyvä, ettei sen litteysluku enää vaikuta kuulamylyarvoon. Samanlaisia tuloksia saatiin louhoksen D kiviaineksen testeistä. (Alkio 2000)



## 8.5 Testilajitteen vaikutus

Kuulamylykokeita tehtiin myös lajitteelle 8/11,2 mm, joka myös kuuluu asfalttimassan karkeaan kiviainekseen. Karkea kiviaines vaikuttaa eniten päällysteen kulumisnopeuteen, jonka vuoksi myös lajitetta 8/11,2 mm olisi syytä testata. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka hyvin saman näytteen lajitteiden 8/11,2 mm ja 11,2/16 mm kuulamylyarvot vastaavat toisiaan. Kuvassa 55 on näytteen 8/11,2 mm ja 11,2/16 mm lajitteiden kuulamylyarvojen vertailu.



Kuva 55. Näytteen eri lajitteiden välinen kuulamylyarvojen vertailu.

Kuulamylyarvot olivat pääosin samalla tasolla. Yksittäisten näytteen tulokset olivat lähellä toistettavuuden ylärajaa, jolle ei löytynyt selitystä. Näiden testien perusteella standardin mukaiset testiparametrit ovat kuitenkin sopivat tuloksien verrattavuuden kannalta. Tämän perusteella voidaan todeta, että lajitteen 8/11,2 mm kuulamylyarvon perusteella voidaan arvioida saman kiviaineksen lajitteen 11,2/16 mm kuulamylyarvoa.

## 8.6 Litteysluvun vaikutus asfalttimassan Prall-arvoon

AB-massalla tehtyjen Prall-testien tuloksiin ei saatu suurta eroavaisuutta litteysluku muokkaamalla. Asfalttipäällysteen 8/16 mm lajitteen kiviaineksen litteysluvun vaikutus Prall-arvoon oli 3 yksikköä, kun litteysluku muuttui arvosta 20 arvoon 3. Litteysluvun vaikutus on tällä asfalttimassalla ja kiviaineksella melko pieni. Prall-tuloksista huomattiin kuitenkin yhteys karkean kiviaineksen litteysluvun ja tiivistetyn asfalttimassan tiheyden välillä. Asfalttimassan tiivistettävyys parani testitulosten perusteella, kun asfalttimassan karkean kiviaineksen litteysluku oli pieni. Prall-testien yksittäistestinäytteen tuloksissa oli

suuria poikkeamia keskiarvoon nähden. Litteysluvun 3 näytesarjan keskimääräinen Prall-arvo oli 22,3. Tulokset vaihtelivat välillä 18,5-27,3. Suurin poikkeama oli 5 yksikköä. Litteysluvun 20 näytesarjan keskimääräinen Prall-arvo oli 25,5. Tulokset vaihtelivat välillä 20,0-30,4. Suurin poikkeama oli 5,5 yksikköä. Yksittäisten testitulosten välinen erotus oli jopa 10 yksikköä.

Kirjallisuuden mukaan karkean kiviaineksen litteysluvun vaikutus SMA-päällysteiden Prall-arvoon oli hieman voimakkaampi. Hyvä- ja huonomuotoisen karkean kiviaineksen aiheuttama ero Prall-arvossa oli Alkion (2001) tutkimuksen mukaan keskimäärin 4-6 yksikköä. Samassa tutkimuksessa tehtiin asfalttiasoista minikoeteitä, jossa huonomuotoisen kiviaineksen vaikutus erottui selkeästi. Hyvä- ja normaalimuotoiset kiviainekset kuluivat lähes yhtä paljon. Huonomuotoisesta kiviaineksestä tehty päällyste kuluu pahimmillaan useita millimetrejä enemmän kolmen vuoden aikana. (Alkio 2001)

Prall-testin tulosten suuri vaihtelu on todettu myös muissa tutkimuksissa. Suomessa käytettäville Prall-laitteille tehtiin vertailukokeita vuonna 2016. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että tasoero eri laboratorioiden Prall-laitteilla oli huomattava. Syitä saattoivat olla esimerkiksi laitteiden perustamistapa tai laitteiden eriasteiden kuluminen. (Bäckström 2017) NordFoU:n projektin tavoitteena oli kehittää Prall-menetelmän tarkkuutta. Tutkimukseen osallistui laboratorioita kaikista Pohjoismaista Tanskaa lukuun ottamatta. Laboratorioiden välinen uusittavuus oli vertailukokeissa noin 26 prosenttia, mikä Prall-arvolla 25 tarkoittaisi 4-7 yksikön vaihtelua. Laboratorioiden sisäinen toistettavuus parani 20 prosentista 15 prosenttiin. Tämän tutkimuksen yksittäistestinäytteiden poikkeama keskiarvosta oli maksimissaan noin 20 prosenttia, minkä perusteella myös tässä tutkimuksessa toistettavuuden pitäisi olla samalla tasolla muiden laboratorioiden kanssa. (NordFoU 2015)

## 9 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa kiviaineksen ominaisuuksia muokattiin litteysluvun modifioinnilla, kubisoinnilla ja esihionnalla. Kiviaineksista tehtiin yhteensä yli 150 yksittäistä kuulamyly- ja litteyslukutestiä standardien SFS-EN 1097-9 ja SFS-EN 933-3 mukaisesti. Yhden louhoksen muotoarvoiltaan erilaisia karkeita kiviaineksiä käytettiin päällystelaatoissa, joille tehtiin Prall-kokeita.

Kuulamylyarvolla mitattuun kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyteen vaikuttavat kivilajityyppi, kiven mineraloginen koostumus ja kivirakeiden muoto. Kiviaineksen raaka-aineen rakenne ja koostumus vaikuttavat muun muassa kiviaineksen kovuuteen ja suuntauneisuuteen, jotka puolestaan vaikuttavat tuotantoprosessissa valmistetun lopputuotteen laatuun. Suuntautunut kivilaji rikkoutuu herkästi sen heikkoussuuntien mukaisesti, mistä yleensä johtuu tällaisen kiviaineksen huonomuotoisuus. Huonomuotoisen kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyys on heikompi verrattuna vastaavaan hyvämuotoiseen kiviainekseen, koska huonomuotoinen kivirae särkyä helpommin nastarengaan nastan iskusta. Kivirakeen särkyminen nopeuttaa sen kulumista merkittävästi. Litteä kiviaines särkyä helpommin ja siten kuluu nopeammin verrattuna hyvämuotoiseen kiviainekseen, mikä voitiin havaita myös visuaalisesti kuulamylykokeen jälkeen valokuvatuista testinäytteistä. Litteysluvun vaikutus voidaan todeta tutkimusten tuloksista, jossa  $A_{N10}$  ja  $A_{N14}$  -luokan kiviainesten kuulamylyarvo muuttui keskimäärin 0,5-1,0 yksikköä, kun litteysluku muuttui 10 yksikköä. Suurimmillaan muutos oli jopa 2 yksikköä, kun litteysluku muuttui 10 yksikköä.

Tuotantoprosessilla voidaan parantaa kiviaineksen laatua merkittävästi. Optimoimalla louhinta voidaan välttää syntyviä mikrohalkeamia, jotka heikentävät kiviaineksen laatua. Murskausprosessissa kiviaineksen muotoa voidaan parantaa monivaiheisella murskauksella, johon kuuluu myös kiviaineksen kubisointi. Kubisointi tarkoittaa murskausprosessin vaihetta, jossa keskitytään etenkin kiviaineksen muodon parantamiseen raekoon pienentämisen sijasta. Kiviaineksen muotoilu tapahtuu yleensä jälkimurskauksessa iskumurskaimella. Kubisointi parantaa kiviaineksen kuulamylyarvoa ja lieventää litteysluvun vaikutusta kuulamylyarvoon ja näin ollen parantaa kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyttä. Louhoksen A kiviaineksen kuulamylyarvo parani noin kaksi yksikköä, kun kiviainesta kubisoitiin ja litteyslukua pienennettiin. Kubisoinnin vaikutus on kuitenkin aina kivilajikohtaista, eikä sillä voida tehdä erittäin huonosta raaka-aineksestä hyvää kiviainesta. Raaka-aineen perusteella hyvästäkin kiviaineksestä voi saada huonon kuulamylytuloksen, jos sen tuotannossa ei käytetä riittävää määrää murskausvaiheita muoto-ominaisuuksia parantamaan. Muoto-ominaisuuksien vaikutus nastarengaskulutuskestävyyteen vähenee kiviaineksen raaka-aineen laadun parantuessa. Erittäin hyvälaatuisen kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyys ei juurikaan muutu sen litteyslukua modifioimalla.

Esihionnan avulla voidaan löytää teoreettinen maksimi kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyydelle. Kuulamylyluokan  $A_{N14}$  kiviaineksen kuulamylyarvoa voidaan parantaa esihionnalla ja litteysluvun modifioinnilla lähes 40 prosenttia. Louhoksen C kiviaineksen paras mahdollinen kuulamylyarvo on noin 8. Louhoksen C kuulamylyarvojen muutoksen vaihteluväli oli 0,2-1,7 yksikköä esihionta-ajan ollessa 0, 10 ja 30 minuuttia. Louhoksen B paras mahdollinen kuulamylyarvo ei selvinnyt, mutta testitulosten perusteella se voisi olla alle jopa 7. Louhoksen B kuulamylyarvojen muutoksen vaihteluväli oli 0,9-1,4 yksikköä esihionta-ajan ollessa 0, 10 ja 30 minuuttia. Esihiomalla kiviainesta lisää olisi sen

paras mahdollinen kuulamylyllyarvo selvinnyt. Tämä kuitenkin osoittaa sen, että kaikille kiviaineksille sopivaa yhtenäistä esihionta-aikaa ei voida määrittellä. Kiviainekselle sopiva hionta-aika vaihtelee ainakin kivilajikohtaisesti. Muita hionta-aikaan vaikuttavia tekijöitä ei voida tämän tutkimuksen perusteella määrittellä. Esihionta eroaa kubisoinnista siten, että esihionta suoritetaan kuivalle kiviainekselle laboratorioissa kuulamylylyssä, joka poistaa kiviaineksesta sekä särmikkyyttä että pintakarkeutta. Kubisoinnilla voidaan vähentää lähinnä kiviaineksen särmikkyyttä ja jonkin verran pintakarkeutta.

Raekooltaan erilaisten testilajitteiden 8/11,2 mm ja 11/16 mm kuulamylyllyarvojen vertailun tuloksista voidaan päätellä, että lajitteiden 8/11,2 mm ja 11/16 mm kuulamylyllyarvot olivat samalla tulostasolla. Jos esimerkiksi kiviaineksesta ei ole käytettävissä karkeampaa lajitetta, kuulamylylyttesti voidaan tehdä myös lajitteesta 8/11,2 mm ja arvioida tuloksia nykyisten kuulamylylyluokkien perusteella, ottaen kuitenkin huomioon sen, että luokka määräytyy aina referenssilajitteen 11,2/16 mm perusteella. Tutkimuksia on kuitenkin syytä tehdä vielä lisää, jotta mahdolliset kivilajityyppikohtaiset poikkeamat saadaan selville.

Kiviaineksen mineraalikoostumus, mineraalien raekoko ja suuntautuneisuus vaikuttavat sen kuulamylyllyarvoon merkittävästi. Etenkin lujat, hienorakeiset, kovista mineraaleista koostuvat ja suuntautumattomat kivilajityypit kestävät kulumusta hyvin. Kiihteet, pehmeät mineraalit ja sulfidimineraalit voivat heikentää kiviaineksen ominaisuuksia, minkä vuoksi niiden määrille asfalttikiviaineksessa on asetettu vaatimuksia.

Prall-testien yksittäisten tulosten vaihtelu oli odotetulla tasolla verrattaessa aikaisempien tutkimusten tuloksiin. Yksittäisen kivirakeen irtoaminen voi vaikuttaa tulokseen usealla millilitralla, minkä vuoksi Prall-testien tulostaso voi vaihdella huomattavasti. Tässä tutkimuksessa tehtyjen Prall-testien määrä oli hyvin pieni, ja testeissä käytettiin ainoastaan louhoksen B kiviainesta. Prall-kokeita tulisi tehdä huomattavasti enemmän sekä johtopäätösten että yleisesti testimenetelmän kehittämisen kannalta. Litteysluvultaan erilaiset kiviainekset vaikuttavat asfalttimassan koostumuksen suunnitteluun ja tiivistettävyyteen, mitä ei tässä tutkimuksessa pystytty ottamaan huomioon.

Tässä tutkimuksessa havainnollistettiin kiviaineksen käyttäytymistä kuulamylylykokeessa valokuvaamalla näytteet ennen ja jälkeen testin. Kuvat helpottivat kuulamylylykokeessa tapahtuneen kiviaineksen rikkoutumisen ja hioutumisen vaikutuksen analysointia, ja otettuja kuvia käytettiin paljon kiviainesten vertailuun. Näytteiden valokuvaaminen osana testausprosessia auttaa havainnollistamaan muun muassa testatun kiviaineksen edustavuutta sekä helpottaa kiviaineksen tulosten analysointia.

Murskausprosessin vaikutuksia ei pystytty kaikilta osin selvittämään, koska näytteiden ottoa ei voitu tehdä murskaustyön aikana. Jatkotutkimuksia olisi syytä tehdä esimerkiksi 2-3 louhoskohteessa asfalttikiviaineksen murskausprosessin aikana siten, että kaikkien tuotannon aikaisten kuulamylylytestien litteysluvat dokumentoidaan ja testinäytteet kuvataan. Tutkimustulosten perusteella jatkotutkimustarpeena tuli selkeästi esille tarve litteysluvun, kuulamylyllyarvon ja asfalttimassan nastarengaskulumiskestävyyden vaikutuksen keskinäisen suhteen selvittäminen ensin laboratoriomittakaavassa ja sen jälkeen mahdollisesti myös pienimuotoisilla koerakenteilla. Siten voitaisiin selvittää kiviaineksen litteysluvun vaikutuksia päällysteen todelliseen nastarengaskulumiskestävyyteen.

## Lähteet

- Alkio R., 2001. Prall- ja srk-menetelmien vertailtavuus minikoetiekulumiin. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 29/2001.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/4000294-prall-\\_ja\\_srk-menet\\_vert\\_minikoetiekulumiin.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/4000294-prall-_ja_srk-menet_vert_minikoetiekulumiin.pdf)
- Alkio R., 2000. Kiviaineksen pintakarkeuden vaikutus kuulamylyarvoon. Helsinki: Tielaitos, Tiehallinto.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/3200579-kiviaineksen\\_pintakarkeuden\\_vaik\\_kuulamylyarvoon.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/3200579-kiviaineksen_pintakarkeuden_vaik_kuulamylyarvoon.pdf)
- Alkio R., Kurki T. & Vuorinen J., 1997. Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteen kulumiskestävyyteen: minikoetien talvien 1995-1996 ja 1996-1997 tulokset. Tielaitos.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/3200480-kiviain\\_raemuod\\_vaik\\_paal\\_kulumiskest.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/3200480-kiviain_raemuod_vaik_paal_kulumiskest.pdf)
- Asko, 2018. Asfaltit, niiden valmistus ja laatuvaatimukset. Saatavissa: <http://pank.fi/tekniset-vaatimukset/muut-julkaisut/opinnaytteet-ja-muut-selvitykset/asfalttialan-oppimateriaali-asko> [2.4., 2019].
- Bäckström E., 2017. Prall-laitteiston kehittäminen.
- Geologia.fi, gneissit. Saatavissa: <http://www.geologia.fi/index.php/glossary/gneissit/> [18.4., 2019].
- Grönholm S., Alviola R., Kinnunen K.A., Kojonen K., Kärkkäinen N. & Mäkitie H., 2010. Retkeilijän kiviopas. Geologian tutkimuskeskus.
- Heikkilä J., 1988. Maa-ainesten murskaus. Teknillinen korkeakoulu.
- Heikkilä P., Jokinen J. & Matikainen R., 1990. Louhinta- ja murskaustavan vaikutus päällystekiviaineksen laatuun. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma asto 1987-1992. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tie- ja liikennelaboratorio, (768), pp. 49.
- Heikkinen H.M., 2012. Nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen taajamanopeuksissa; pavement wear by studded tires in low-speed urban traffic environment.
- Hytönen K., 1999. Suomen mineraalit. Geologian tutkimuskeskus.
- Kauranne L.K., 1972. Rakennusgeologia. 2. Otaniemi: Otakustantamo.
- Korhonen K.H., Gardemeister R., Jääskeläinen H., Niini H. & Vähäsarja P., 1974. Rakennusalan kallioluokitus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Korsman K. & Koistinen T., 1998. Suomen kallioperän yleispiirteet. Suomen kallioperä, 3000, pp. 93-103.
- Kurki T., Manninen E. & Saarinen L., 1992. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma Asto 1987-1992. Asfalttipäällysteen kuluminen: osa 1. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Kuula P., 2015. Tien ja radan sitomattomissa rakennekerroksissa käytettävien kiviainesten lujuuden ja hienontumisen tutkiminen: kirjallisuusselvitys.

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä: 68/2015.

[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2015-68\\_tien\\_radana\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2015-68_tien_radana_web.pdf)

Lampinen A., 1993. Kestopäälysteiden urautuminen, Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Liikennevirasto, 2018. Tierakenteen suunnittelu. Helsinki: Liikennevirasto.

[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2018-38\\_tierakenteen\\_suunnittelu\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf)

Lonka H., Loukola-Ruskeeniemi, K., Ehrukainen E., Gustafsson J., Honkanen M., Härmä P., Jauhiainen P., Kuula P., Nenonen K. & Pellinen T., 2015. Kiviaines- ja luonnonkiviteollisuuden kehitysnäkymät. 1797-3554.

Maijala P., Kauranne L., Lindholm O., Matikainen R., Mustala J., Niini H. & Peltola E., 1973. Kallion rakenteellisten ominaisuuksien vaikutus louhittavuuteen.

Vuorimies-yhdistys ry.

Nordfou, 2015. Development of the prall-test method in a nordic perspective. Nordic research and development collaboration.

Pank ry, 2017. Asfalttinormit. Pank ry.

PANK ry, 2015 Kiviainesten vertailukokeet 2015. Julkaisematon raportti. PANK ry Laboratoriotoimikunta.

Rasmus R., 2014. Kivituhkan hyödyntäminen massastabiloinnissa.

Roadex, e-learning: vesi ja tien mekaaniset ominaisuudet. Saatavissa:

<https://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/teiden-kuivatus/3-vesi-ja-tien-mekaaniset-ominaisuudet/> [1.4., 2019].

Ruuskanen J., 1999. Syötteen vaikutus murskaimen tuotteeseen ja toimintaan.

Selonen O., 2017. Suomalaiset luonnonkivimateriaalit.

SFS-EN 1097-9, 2014. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: nastarengaskulutuskestävyyden määrittäminen. Pohjoismainen testi (kuulamyllymenetelmä). Rtt ry.

SFS-EN 12697-16, 2016. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 16: nastarengaskuluminen. Sfs. Liikennevirasto.

SFS-EN 933-3, 2012. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 3: raemuodon määrittäminen. Litteysluku. RTT ry.

Suomen betoniyhdistys ry, 2018. Betonin kiviainekset by 43. Helsinki.

Tervahattu H., lahti T. & Pirjola I., 2008. Vierintämelun vähentäminen. Viemettutkimus- ja kehittämishankkeen loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu, 4, pp. 2008.

Tielaitos, 1999. Kiviaineksen pintakarkeuden vaikutus kuulamylyarvoon. Tielaitos.

[https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/3200579-kiviaineksen\\_pintakarkeuden\\_vaik\\_kuulamylyarvoon.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf1/3200579-kiviaineksen_pintakarkeuden_vaik_kuulamylyarvoon.pdf)

Tolppanen P., 1998. Louhitun kiven käyttökohteet ja murskaus. Posiva Oy, työraportti, pp. 98-40.

Unhola T., 2004. Nastarenkaiden kuluttavuus. Ajoneuvotekijöiden vaikutus. Yliajokoe.

Unhola, T., 2015. Nastarenkaiden kuluttavuus. Ajoneuvotekijöiden vaikutus. Yliajokoe 2004. Liikenne- ja viestintäministeriö.

Väätäinen J., a. Hiekkakivi. Saatavissa: <https://kaiva.fi/geologia/kivilajit-ja-malmien-synty/kivilajien-jaottelu-ja-syntytavat/> [18.4., 2019].

Väätäinen J., b. Taivassalon punainen graniitti. Saatavissa: <http://spinelli.gtk.fi/graniitti/> [18.4., 2019].

Viilo K., 2011. Crushing and screening handbook. Metso.

## Testausstandardit

Standardi	Nimi	Testaustulos
SFS-EN 932-2	Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Laboratorionäytteiden jakaminen	-
SFS-EN 932-3	Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 3: Yksinkertaistetun petrografisen kuvauksen menettely ja terminologia	Sanallinen kuvaus
SFS-EN 933-3	Kiviainesten geometrysten ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Litteysluku.	Litteysluku Fl
SFS-EN 1097-6	Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimukyvyn määrittäminen	Kiintotiheys $\rho$ Vedenimeytyminen WA
SFS-EN 1097-9	Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: Nastarengaskulutuskestävyyden määrittäminen. Pohjoismainen testi (kuulamyllymenetelmä).	Kuulamyllyarvo $A_W$
SFS-EN 12407	Natural stone test methods. Petrographic examination	Sanallinen kuvaus
SFS-EN 12697-6	Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 6: Asfalttinäytteen kappaleitiheyden määrittäminen	Kappaleitiheys $\rho_s$
SFS-EN 12697-16	Asfalttimassat. Testausmenetelmät. osa 16: Nastarengaskuluminen.	Kulumisarvo $Abr_A$ (Prall-arvo)

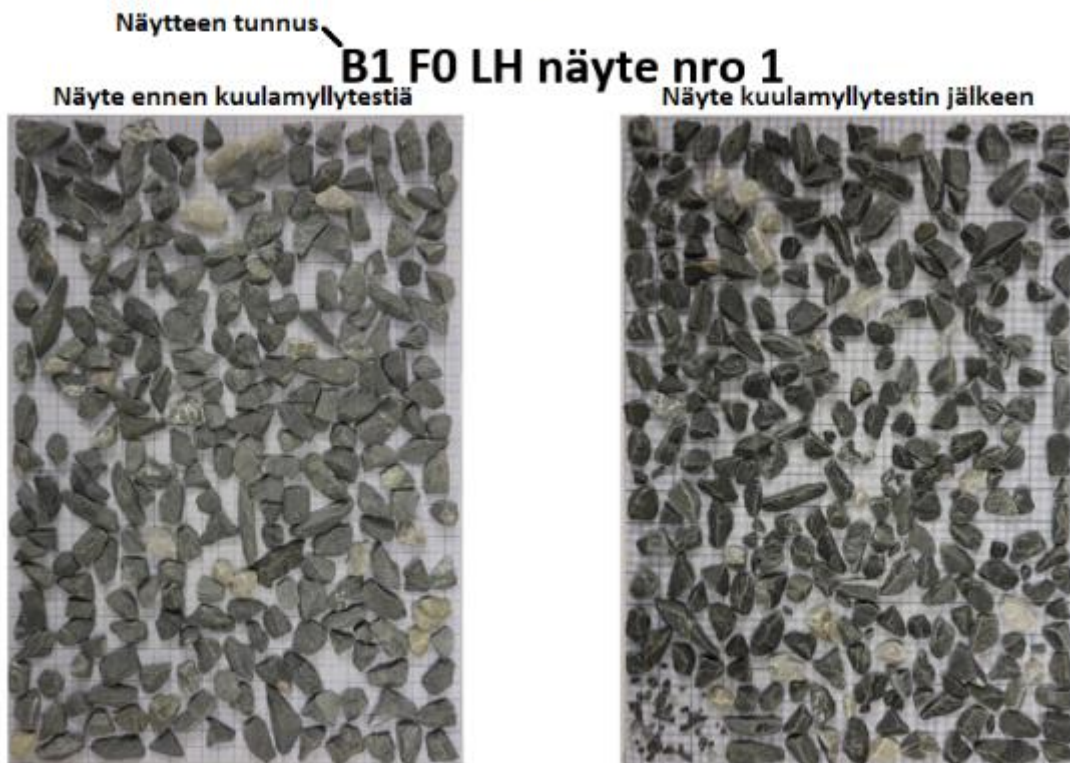


## Kuulamylynäytteiden valokuvat

avautuvat linkin kautta:

[https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt\\_2019-15\\_liite\\_b\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-15_liite_b_web.pdf)

### Esimerkki kuvaparien tulkintaan



Lisätiedot näytteestä

Kuulamylyarvo 8,0  
Litteysluku 0  
Esihionta-aika 10 minuuttia

Näytekoodien tulkinta:



F0 – litteysluvun arvo on 0

LH – lyhyt esihionta (10 minuuttia)

PH – pitkä esihionta (30 minuuttia)



ISSN 2490-0982  
ISBN 978-952-317-724-6  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)