



Aalto-yliopisto  
Insinööritieteiden  
korkeakoulu

Topi Paalanen

## **Betonimurskeen puhtauden tunnistaminen ja mekaaniset ominaisuudet**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 07.09.2017

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaajat: DI Taavi Dettenborn ja TkT Gowthaman Sin-  
nathamby



---

**Tekijä** Topi Paalanen

---

**Työn nimi** Betonimurskeen puhtauden tunnistaminen ja mekaaniset ominaisuudet

---

**Koulutusohjelma** Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

---

**Pää-/sivuaine** Pohja- ja kalliorakentaminen**Koodi** Rak-50

---

**Työn valvoja** Professori Leena Korkiala-Tanttu

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Taavi Dettenborn ja TkT Gowthaman Sinnathamby

---

**Päivämäärä** 7.9.2017**Sivumäärä** 72 + 27**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Tarve betonimurskeen uudelleenkäytölle on lisääntynyt ympäristötietoisuuden ja betonimurskeen tunnistettujen hyvien maanrakennusominaisuuksien vuoksi. Työmaaolosuhteissa tuotetun betonimurskeen laadunvalvonta on monesti puutteellista laadun arvioinnin tulkinnanvaraisuuden vuoksi. Tästä syystä betonimurskeen tuottajien laadunarvioinnin helpottamiseksi tarvitaan lisää työkaluja.

Tässä työssä verrattiin 0/16 mm raekokoisen puhtaan betonimurskeen ja Sorilan kalliomurskeen mekaanisia ominaisuuksia. Työn toisessa osassa tehtiin sekoituskokeita BeM I-IV -luokan betonimurskeille eri vierasainemäärillä. Työn tavoitteena oli saada uutta tietoa 0/16 mm raekokoisen kalliomurskeen mekaanisista ominaisuuksista ja työkaluja BeM-laatulokan arvioimisen helpottamiseksi.

Mekaanisissa kokeissa murskeille määritettiin raekokojakauma, kuivatilavuuspaino, kiintotiheys, iskunkestävyys, kulutuskestävyys sekä dynaamisilla kuormituskokeilla kalliomurske- ja 0-28 vrk ikäisten betonimurskenäytteiden resilient moduulia ja pysyvää muodonmuutosta sekä staattisella aksiaalisella kuormituksella muodonmuutosta. Työn toisessa osassa 0/45 ja 0/90 mm raekokoiselle kuivalla ja märällä betonimurskeella tehtiin sekoituskokeita eri vierasaineiden pitoisuuksilla ja murskeseokset kuvattiin. Laatu-luokkien BeM I - IV -murskeiden 2D-kuvista laskettiin jätteen peittämiä pinta-aloja ja niitä verrattiin tilastollisesti näytteiden tunnettuihin jätteen määriin.

Mekaanisissa kokeissa kalliomurskeen kulutus- ja iskunkestävyys olivat betonimursketta paremmat, mutta betonimurskeen muodonmuutosominaisuudet ja resilient moduuli olivat Sorilan kalliomursketta paremmat. Betonimurskenäytteissä tapahtui lievää lujittumista 28 vrk tarkkailujakson aikana, mikä näkyi kasvaneena resilient moduulina ja pienempänä pysyvänä muodonmuutoksena. Betonimurskeen hyvistä muodonmuutosominaisuuksista ja lujittumisominaisuudesta johtuen se sopii hyvin kantavaan ja jakavaa kerrokseen, mutta kalliomursketta heikomman kulutus- ja iskunkestävyyden vuoksi huonosti kulutuskerrokseen. Murskeiden dynaamisia kuormituskokeita ei tehty standardien mukaisesti, joten kokeiden tulokset ovat suuntaa antavia.

Sekoituskokeissa betonimurskeeseen lisätyn tiilimurskeen tunnetun määrän ja 2D-kuvista laskettujen pinta-alojen välillä oli lineaarinen tilastollinen yhteys. Sekoitusnäytteiden puun, metallin, muovin ja kelluvien materiaalien tunnistetuissa määrissä oli suurta hajontaa ja materiaalit ovat tiiltä heterogeenisempiä. Sekoituskokeissa luotua kuvakirjastoa voidaan käyttää BeM-laatulokan murskeiden tiilen tunnistamisen apuna. Laatikomenetelmällä tehtyä epäpuhtauksien tunnistaminen varsinkin tiilen osalta voidaan suositella sovellettavaksi myös työmaaolosuhteissa. Näyte on hyvä kuvata sekä märkänä että kuivana.

---

**Avainsanat** betonimurske, BeM I - IV, resilient moduuli, pysyvä muodonmuutos

---

---

<b>Author</b> Topi Paalanen		
<b>Title of thesis</b> Mechanical properties and determination of wastes in crushed concrete		
<b>Degree programme</b> Civil and Environmental Engineering		
<b>Major/minor</b> Foundation and Rock Engineering	<b>Code</b> Rak-50	
<b>Thesis supervisor</b> Prof Leena Korkiala-Tanttu		
<b>Thesis advisor(s)</b> M.Sc. (Tech.) Taavi Dettenborn and D.Sc. (Tech.) Gowthaman Sin-nathamby		
<b>Date</b> 07.09.2017	<b>Number of pages</b> 72 +27	<b>Language</b> Finnish

---

**Abstract**

The need for reuse of the crushed concrete aggregate (CCA) has increased due to environmental awareness and the known properties of CCA. Quality control of the CCA production in site conditions is often incomplete because of ambiguous of the quality assessment. For this reason, additional tools are needed to facilitate the quality assessment of CCA producers and authorities.

In this work, mechanical properties of 0/16 mm grain sized pure CCA and the Sorila natural aggregate (NA) were compared. In the second part of the work, CCA mixing tests were made with different amounts of foreign matter for the quality class BeM I-IV of CCA. The aim of the thesis was to obtain new information on the mechanical properties of the 0/16 mm size CCA and to facilitate the CCA-waste mixtures quality assessment.

The grain size distribution, maximum dry weight, solid density, impact and wear resistance as well as resilient modulus and permanent deformation of CCA and NA were tested. In cyclic resilient module test samples were also tested for deformation in static axial load. In the second part of the work 0/45 and 0/90 mm grain sized dry and wet CCR were mixed and pictured with different concentrations of contaminants. Areas covered by waste particles of brick, wood, metal, plastics and floating materials were calculated from the 2D-images and compared statistically to mixing samples' known quantities of these wastes.

In mechanical experiments wear and impact resistance of NA were better than the CCA's, but permanent deformation properties and resilient modulus of the CCA were better than Sorila NA. CCA samples had hardened slightly during 28-day observation period, which showed up as an increased resilient modulus and a smaller permanent deformation compared to a fresh samples. Due to the good bearing properties of CCA, it suits well in the road base structures, but because of the lower wear and impact resistance its' use in surface course has limitations. The cyclic load tests were not performed according to standards, so the results of these tests are indicative.

Mixing experiments showed linear statistical correlation between known amount of red brick in CCA and the brick covered areas calculated from the 2D-images. Identified amounts of the wood, metal, plastic and floating materials had high variations and can't be quantified properly from the pictures. The photo library created in the mixing experiments can help to identify the brick of from the CCA. The box-mixing method in identifying brick-waste used in these tests is applicable also in construction site environment.

---

**Keywords** crushed concrete aggregate, CCA, CCA quality, resilient modulus, permanent deformation

---

## Alkusanat

Tämän diplomityön kolmiaksoalikoheet on rahoittanut Liikennevirasto ja Aalto yliopisto. Työssä suoritettut sekoituskokeet ovat rahoittaneet Espoon, Vantaan ja Helsingin kaupunki sekä Ramboll Finland Oy. Työtä varten tehty betonimurskeiden valokuva-pankki on tallennettu kuntien ja betonimurskeen tuottajien laadunvalvonnan käyttöön. Työn valvojana toimi professori Leena Korkiala-Tanttu ja työn ohjaajina DI Taavi Dettenborn ja TkT Gowthaman Sinnathamby.

Haluan kiittää työn ohjauksesta ja työhön liittyvistä kommentteista valvojaa ja ohjaajia. Kiitos työn toteutumisesta kuuluu myös maamekaniikan laboratorion henkilökunnalle Veli-Antti Hakalalle, Matti Ristimäelle, Pertti Alholle, Jukka Piroselle sekä tielaboratorion Petri Peltoselle

Espoo 7.9.2017

Topi Paalanen



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	5
Merkinnät .....	7
Lyhenteet .....	8
1 Johdanto .....	9
2 Betonimurske .....	11
2.1 Betonimurske materiaalina .....	11
2.2 Betonimurskeen laatuvaatimukset ja mekaanisia ominaisuuksia .....	13
2.3 Betonimurskeen käyttöön liittyvä ohjeistus ja lainsäädäntö .....	14
2.4 Betonimurskeen käyttö Suomessa .....	20
2.5 Betonimurskeen käyttö ulkomailla .....	21
2.6 Betonimurskeiden käyttö tie- ja maarakenteissa .....	22
2.7 Rakennekerrosmateriaalien muodonmuutosta kuvaavia suureita .....	24
3 Laboratoriokokeet .....	28
3.1 Betoni- ja kalliomurskeen mekaanisten ominaisuuksien selvittäminen .....	28
3.1.1 Käytetyt materiaalit .....	28
3.1.2 Raekokojakauma .....	28
3.1.3 Betonimurskeen ja kalliomurskeen kiintotiheyden määrittäminen .....	28
3.1.4 Betoni- ja kalliomurskeen kuivatiheyden määrittäminen parannetulla proctor-kokeella .....	29
3.1.5 Betonimurskeen kulutuskestävyyden määrittäminen (micro-Deval –testi) .....	30
3.1.6 Iskunkestävyyden määrittäminen Los Angeles-menettelmällä .....	30
3.1.7 Dynaamiset ja staattiset kolmiakselikokeet .....	30
3.2 Betonimurskeen sekoituskokeet, kuvaus ja vierasaineiden määrän arviointi .....	36
3.2.1 Käytetyt materiaalit .....	36
3.2.2 Materiaalien sekoitus .....	37
3.2.3 Kuvatut BeM I-IV -näytesarjat ja vierasaineiden pitoisuudet .....	38
3.2.4 Kuvaaminen ja kuvien käsittely .....	39
3.2.5 Jätteiden tunnistaminen betonimurskekuvista .....	40
3.2.6 Jätteiden lisätyt määrät ja mitatut pinta-alat prosentit .....	41
3.2.7 Tilastolliset muuttujat pinta-ala- ja paino-% -arvoille .....	42
3.2.8 Sekoitusaineistolle tehdyt tilastolliset kuvaajat .....	43
4 Tulokset ja pohdinta .....	44
4.1 Betonimurskeen mekaaniset ominaisuudet .....	44
4.1.1 Raekokojakauma .....	44
4.1.2 Betoni- ja kalliomurskeen kiintotiheys .....	45
4.1.3 Betoni- ja kalliomurskeen maksimikuivatilavuuspaino (proctor-tiiveys) .....	46
4.1.4 Betonimurskeen kulutuskestävyyden määrittäminen micro-Deval testillä .....	47
4.1.5 Betonimurskeen iskunkestävyys LA-kokeella .....	47
4.1.6 Resilient moduuli .....	48
4.1.7 Pysyvä muodonmuutos dynaamisessa kuormituksessa .....	50
4.1.8 Muodonmuutos staattisessa leikkauskokeessa .....	52
4.2 Vierasaineiden tunnistaminen 2D-kuvista .....	53
4.2.1 Yleistä .....	53

4.2.2	Tiilen tunnistaminen 2D-kuvista .....	54
4.2.3	Puun, metallin ja muovin materiaalien tunnistaminen sekoitusnäytteiden 2D-valokuvista .....	59
4.2.4	Kelluvien materiaalien tunnistaminen sekoitusnäytteiden 2D-valokuvista...	63
4.2.5	Muiden vierasaineiden tunnistaminen betonimurskeesta .....	64
5	Yhteenveto .....	65
	Liiteluettelo .....	72
	Liitteet	



## Merkinnät

$E$	[MPa]	kimmomoduuli
$d$	[kPa]	deviatorinen jännitys
$M_{DE}$	[-]	micro-Deval -arvo
$M_r$	[MPa]	resilient moduuli
$R$	[-]	korrelaatiokerroin
$R^2$	[-]	selitysaste
$w$	[%]	vesipitoisuus
$\varepsilon_p^1$	[-]	pysyvä aksiaalinen muodonmuutos
$\varepsilon_e^1$	[-]	palautuva aksiaalinen muodonmuutos
$\delta_1$	[kPa]	pystyjännitys
$\delta_3$	[kPa]	vaakajännitys tai sellipaine
$\delta_d$	[kPa]	deviatorinen jännitys
$\theta$	[kPa]	pääjännitysten summa
$\rho_d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	kuiватиheys
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	kiintotiheys

## Lyhenteet

BeM	Betonimurske
BeM I – IV	Betonimurskeen laatuluokat I – IV
CE	Conformité Européene. Tuotteen, myös rakennustuotteille CE-merkki on tuotteen valmistajan vakuutus tuotteen kelpoisuudesta
ELY-keskus	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
KaM	Kalliomurske
LA	Los Angeles-luku
LVDT	Linear variable displacement transducer (näytteen muodonmuutosta mittaava anturi)
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
MARA-asetus	Valtioneuvoston asetus 591/2006 eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa ja asetuksen muutokset 403/2009 ja 1825/2009
SFS-EN	Eurooppalainen standardi EN, joka on vahvistettu suomalaisiksi kansalliseksi standardiksi.
UUMA	Uusiomateriaali-hanke
VN	Valtioneuvosto
VNa	Valtioneuvoston asetus

# 1 Johdanto

Tarve rakennusjätteen hyötykäytölle on lisääntynyt ympäristötietoisuuden ja jätemaksujen kasvun myötä. Jäteveron suuruus tonnille betonijätettä on vuoden 2016 alusta ollut 70 €kun samaan aikaan kalliomurskeen hinta määräytyy ehtyvien kivenottoa paikkojen ja kuljetuskustannukset etäisyyden mukaan. Betonimurskeen kierrätyksellä voidaan vähentää hyötykiven louhimista, kaatopaikka- tai muita kuljetuksia. Lisäksi betonimurske toimii myös hiilidioksidinieluna reagoimattoman sementin karbonatisoitussa ja samalla rakenteen lujittuessa.

Betonimursketta on käytetty maailmalla 40-luvulta lähtien ja Suomessa 90-luvulta lähtien. Betonimurskeen käyttö Suomessa maarakentamisessa on lisääntynyt ohjeistuksen ja materiaalin ominaisuuksien tunnistamisen myötä. 2000-luvun alkupuolelta lähtien Suomessa betonimurske on luokiteltu sen sisältämien vierasaineiden määrän mukaan neljään laatuiluokkaan BeM I - IV, joille kullekin luokalle on määrätty mekaaniset laatuvaatimukset ja soveltuvat käyttökohteet. Betonimurskeen laatuiluokittelun ja ominaisuuksien tunnistamisen myötä purkujätteenä syntyvän betonimurskeen uusiokäyttö on helpottunut.

Betonimursketta toimitetaan rakennuskohteisiin myös suoraan purkutyömailta, mikä lisää riskiä betonimurskeen laatuvaihteluille. Lisääntyvä betonimurskeen tuotanto ja betonimurskeen toimittaminen suoraan purkutyömailta maarakennuskohteisiin kasvattaa tarvetta betonimurskeen laatuiluokan tunnistamiselle maasto-olosuhteissa.

Työn tavoitteena oli vertailla 0/16 mm raekokoisen betonimurskeen ja kalliomurskeen mekaanisia ominaisuuksia. Työn toisena tavoitteena oli luoda BeM I – IV luokan betonimurskeille kuvakirjasto sekä arvioida sekoitusnäytteiden tunnettujen vierasainemäärien ja 2D-kuvista laskettujen vierasaineiden pinta-alaprosenttien perusteella, voidaanko betonimurskenäytteiden laatuiluokkaa arvioida 2D-kuvista. Työstä saatavalla tiedolla betonimurskeen hyötykäyttöä voidaan lisätä ja käytön luotettavuutta parantaa.

Työn kokeellinen osio koostui kahdesta osiosta: Ensimmäisessä osassa laboratoriokokeilla määritettiin 0/16 mm raekokoisen betonimurskeen mekaanisia ominaisuuksia ja verrattiin niitä 0/16 mm kalliomurskeen vastaaviin ominaisuuksiin. Kokeiden toinen osio koostui betonimurskeen laatuiluokilla BeM I - IV tehdyistä sekoituskokeista eri vierasainepitoisuuksilla ja valokuvapankin luomisesta BeM I - IV -luokan betonimurskeista.

Työn kokeellisessa osiossa tehtiin mekaanisia testejä puhtaalle 0/16 mm rakeiselle Parmabetoni Oy:n Hyrylän murskaamon puhtaalle luokan BeM I betonimurskeelle ja Sorilan avolouhoksen kalliomurskenäytteille. Murskeille määritettiin raekokojakauma, proctor-tiheys, mekaanisen kulutuksen kesto kuvaava micro-Deval arvo ja iskun kestävyyttä kuvaava LALuku. Lisäksi murskeille tehtiin dynaamisia kolmiakσιαalikokeita resilient moduulin ja pysyvän muodonmuutoksen määrittämiseksi.

Dynaamisilla kolmiakσιαalikokeilla määritettiin 0, 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisille betonimurskeelle ja 0 vuorokauden ikäisille kalliomurskenäytteille pysyvää muodonmuutosta ja resilient moduulia. Kunkin ikäisille näytteille dynaamiset kolmiakσιαalitestit tehtiin proctor-tiiveydeltä 95 - 99 % kolmelle rinnakkaiselle kalliomurskenäytteelle ja kolmelle rinnakkaiselle proctor-tiiveydeltä 92 - 97 % betonimurskenäytteelle. Eri ikäisten betonimurskeiden resilient moduuleja verrattiin keskenään ja tarkasteltiin, tapahtuuko betonimurskeessa lujittumista näytteiden ikääntyessä. Dynaamisissa kokeissa käytetyt kuormitustasot eivät olleet

standardin SFS-EN 13268-7 mukaisia, joten tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia samankaltaisten kuormituskokeiden tulosten kanssa. Betonimurskeen vertailumateriaaliksi kokeisiin valittiin Rudus Oy:n Sorilan 0/16 mm raekokoinen kalliomurske sen aikaisempien kirjallisuusviitteiden perusteella.

Kokeen toisessa osiossa betonimurskeelle tehtiin sekoituskokeita tunnetuilla määrillä eri vierasaineita ja BeM I - IV -luokan betonimurskeiden sekoitusnäytteet valokuvattiin. Sekoituskokeissa epäpuhtauksina käytettiin tiiltä, puuta, metallia ja muovia sekä kelluvina materiaaleina XPS- ja lasivilla-eristeitä. Murskenäytteet kuvattiin ja 2D-kuvista laskettiin eri roskatyypin pinta-aloja tunnetuilla epäpuhtauspitoisuuksilla ja verrattiin arvoja tilastollisesti keskenään. Työssä laadittiin kuvakirjasto eri puhtausluokkien BeM I - IV betonimurskeista eri vierasainemäärillä ja arvioitiin, kuinka hyvin 2D-kuvista voidaan arvioida murskeiden BeM-luokkaa ja epäpuhtauden määrää vierasaineiden peittämän pinta-alaprosentin perusteella. Työssä BeM I - IV -luokan betonimurskeista eri roskapitoisuuksilla luotu kuvapankki on tehty kuntien ja betonimurskeen tuottajia varten vierasaineiden määrän arvioimiseksi ja BeM-luokan tunnistamisen avuksi.

## 2 Betonimurske

### 2.1 Betonimurske materiaalina

SFS 5884:n määrittelee betonimurskeen (BeM) rakennustyömaiden ja betoniteollisuuden betonijätteestä murskatuksi tuotteeksi. BeM voi sisältää betonin lisäksi makroepäpuhtauksina muuta materiaalia kuten tiiltä, puuta, muovia, kumia, metallia ja eristevillaa. VNa 403/2009 mukaan betonimurskeen kappalekoko saa olla enintään 150 mm ja siinä saa olla tiiltä enintään 30 painoprosenttia. Betonimurske voi sisältää erilaisia haitta-aineita ja kemikaaleja kuten saumausmassoja, öljyjä, asbestia, sulfaatteja ja PAH-yhdisteitä, mutta näiden pitoisuuksille on asetettu raja-arvoja betonimursketta hyödynnettäessä uudelleen. Betonimurske on hieman emäksinen ( $\text{pH} > 11$ ) johtuen sen raaka-aineen emäksisyydestä, mikä rajoittaa sen käyttö maarakennuksessa alumiinin ja kromin läsnä ollessa. (Rossi 2012).

Betonimursketta käytetään maarakennusmateriaalina ja voidaan käyttää uusiokiviaineksena betonin valmistuksessa, mikäli sen ominaisuudet täyttävät SFS-EN 12620 vaatimukset. Maarakennuskäyttöön tarkoitettu betonimurske luokitellaan laatuluokkiin BeM I - IV riippuen makroepäpuhtauksien määrästä. Kemiallisille mikroepäpuhtauksille on asetettu sallitut ylärajat Valtioneuvoston asetuksessa 403/2009.

Betonin murskaaminen tapahtuu joko työmailla tai siihen soveltuviin murskauslaitoksissa. Maarakennuskäyttöön tuotettava betonimurske murskataan 0 - 150 mm raekokoiseksi, mutta kierrätyslaitoksissa ja purkukohteissa tuotetulle raekooltaan 0 - 90 mm kokoiselle betonimurskeelle voidaan hakea Euroopan Unionin rakennustuoteasetuksen (L 305/2011) mukaista CE-merkintää. Tuotteen tulee tällöin täyttää harmonisoidun tuotestandardissa annetut ehdot. Purkukohteissa tuotettu CE-merkitymätön betonimurske-tuote voidaan myös uusiokäyttää maarakentamisessa tietyin ehdoin. (Betoroc ohje 2015).

a)



b)



Kuva 1. a) Murskattavia betonielementtejä ja b) murskattua puhdasta BeM I-luokan 0/45 mm raekokoista betonimursketta murskausasemalla.

Murskausprosessissa betoniraaka-aine esipaloitellaan, murskataan hienommaksi, jonka jälkeen tehdään rautojen poisto. Tämän jälkeen poistetaan muita epäpuhtauksia (Kuva 2). Betonimurske siivilöidään yleensä raekokoluokkiin 0/45, 0/90 tai 0/120 mm, mutta kaupallisia

betonimursketuotteita löytyy 0/8 mm raekoisesta lajitteesta lähtien. Puhdas betonimurske on yleensä 0/45 mm kokoista (Kuva 1.) (Betoroc ohje 2015).



*Kuva 2. a) Purkukohteessa murskattua tiiltä sisältävää betonimurskettä ja purkujätteestä eritelty b) puu, c) metalli ja d) muovijäte.*

### **Yleistä betonista**

Betoni raaka-aineena koostuu sementistä, kiviaineksesta, seosaineista kuten mineraalisista fillereistä ja pigmenteistä, vedestä, lisäaineista ja mahdollisista kuiduista. Sementti on epä-organista materiaalia joka veden kanssa reagoidessa muodostaa pastan, sitoutuu ja kovettuu ja joka kovettumisen jälkeen säilyttää lujuutensa ja pysyvyytensä myös veden alla. (Johansson et al. 2016).

Betonissa käytetty kiviaines voi olla luonnonkiviainesta, keinokiviainesta, uusiokiviainesta tai kierrätyskiviainesta, joka on standardin SFS-EN 12620 mukaisesti CE-merkittyä kiviainesta. Mikäli betonissa käytetty kiviaines ei ole CE-merkittyä, tulee materiaali olla testattu AVCP-luokan 2+ mukaisesti. Betonissa voidaan käyttää myös SFS-EN 12620 mukaisia keinotekoisia ja uusiokiviaineksia kuten masuunikuonaa, betonimurskettä ja kevytsoraa (Johansson et al. 2016 s. 28 – 29 ja SFS-EN 12620 + A1).

Betonissa käytettävä seosaine on hienojakoista epäorgaanista pigmenttiä, filleri kiviainesta tai pozzolaanista ja hydraulista lentotuhkaa tai masuunikuonaa, joka on CE-merkittyä. Betonin valmistuksessa käytetylle vedelle on määritetty puhtausvaatimukset, kuten orgaanisen aineen ja kloridin suurimmat sallitut pitoisuudet. (Johansson et al. 2016).

Betonissa voi olla kovettuvan tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin vaikuttavia lisäaineita. Tällaisilla aineilla vaikutetaan betonin kovettumisnopeuteen, pakkasen kestoon, sulfidin kestoon ja muihin mekaanis-kemiallisiin ominaisuuksiin. Lisäaineet lisätään betonimassaan kuivana tai veteen sekoitettuna riippuen käytetystä määrästä. (Johansson et al. 2016).

Betonin sementin hydratoituminen alkaa kontaktista veden kanssa, jonka jälkeen betoni alkaa kovettua ja lujittua. Betonin lujittumiseen vaikuttaa lisäaineiden lisäksi myös lämpötila. Betonin lujuusluokan mukainen puristuslujuus määritetään yleensä 28 vrk ikäisestä kappaleesta. Betoni voi kuulua lujuusluokkiin C12/15...C90/105, missä ensimmäinen luku esim. 12 tarkoittaa 150 x 300 mm lieriöstä määritettyä alinta ominaislujuutta  $f_{ck,cyl}$  [MN/m<sup>2</sup>] ja jälkimmäinen 15 tarkoittaa 150 mm kuutiosta määritettyä alinta ominaislujuutta  $f_{ck,cube}$  [MN/m<sup>2</sup>]. Eri lujuuksia saadaan, eri runko-aineilla, sementin- ja muiden aineiden määrää säätämällä. (Johansson et al. 2016).

Lujuusluokan lisäksi betonille on määritetty rasitusluokkia, joissa annetaan raja-arvot betonirakenteen erilaisille korroosio, sulamis-jäätymis, ja kemiallisille altistuksille. Betonirakenteiden suunniteltu käyttöikä, lujuus-, korroosio-, ja pakkarasitukset vaihteleva kohteittain samoin kuin betonirakenteiden suunnitellut käyttöiät. (Johansson et al. 2016 s. 36 - 39).

Betonilta vaatii rakenteissa monesti myös vetolujuutta, joka saadaan aikaan raudoitteilla. Betoniteräs on kuuma tai kylmävalssattua hiiliterästä/ruostumatonta terästä tai jänneterästä, mikä valetaan juoksevan betonimassan sisään. (Johansson et al. 2016).

## **2.2 Betonimurskeen laatuvaatimukset ja mekaanisia ominaisuuksia**

Betonimurske luokitellaan puhtauden perusteella luokkiin BeM I - IV. Luokan BeM I murskeen raaka-aine on pääsääntöisesti betoniteollisuuden ylijäämäbetonia, joka voi sisältää 0,5 paino-% muita vierasaineita (puu, metalli, muovi) kuin tiili. BeM II -luokan betonimurske voi sisältää 10 paino-% tiiltä ja 1 paino-% muita vierasaineita, BeM III -luokan betonimurskeen joukossa voi olla 10 paino-% tiiltä ja 1 paino-% muita vierasaineita. BeM IV -luokan betonimurskeessa saa olla korkeintaan 30 paino-% tiiltä ja 1 paino-% vierasaineita. Epäpuhtaudet vaikuttavat betonimurskeen teknisiin ominaisuuksiin, mikä taas vaikuttaa betonimurskeen soveltuvuuteen eri käyttökohteissa. Kunkin BeM-luokan betonimurskeiden ominaisuuksille kuten 28 vuorokauden ikäisen näytteen puristuslujuudelle ja raekokajakaumalle on asetettu raja-arvoja InfraRYL 2017 -ohjeistuksessa. (InfraRYL 2017, Helsinki 2015).

BeM I - III -luokkien betonimurskeen rakeisuuden tulee täyttää kantavan tai jakavan kerroksen rakeisuusvaatimukset, IV-luokan rakeisuusvaatimukset asetetaan tapauskohtaiset. Puristuslujuus määritetään 28 vuorokauden ikäisistä koekappaleiden ja puristuslujuuden on oltava I-luokan betonimurskeella vähintään 1,2 MPa, II-luokassa 0,8 MPa ja on III-IV -luokan

betonimurskeilla tapauskohtainen. BeM I - III –luokkien murskeiden tulee olla routimattomia ja luokan IV routivuuskriteerit määräytyvät tapauskohtaisesti. Tien kantavuusmitoituksessa Odemarkin menetelmällä BeM I -luokan betonimurskeelle käytetään E-moduulin arvoa 700, BeM II:lle 500 MPa ja BeM III -luokan betonimurskeelle 280 MPa (Tielaitos 2000).

Betonimurske on teknisiltä ominaisuuksiltaan verrattavissa luonnonkiviaineisiin. Maarakenuskohdeissa tehdyissä kantavuusmittauksissa betonimurskeen kantavuus on ylittänyt luonnonkiviaineilla saavutettuja kantavuuksia (Dettenborn 2015). Betonimursketta ei saa käyttää suoraan päällysrakenteissa vaan tulee päällystää tai peittää vähintään 10 cm paksuisella kerroksella luonnonkiviainesta heikomman kulutuskestävyytensä vuoksi. BeM on uudelleen lujuuttu materiaali sen sisältämän reagoimattoman sementin ansiosta. Ruotsissa tehdyissä betonimurskeen kuormituskokeissa betonimurskeen residuaali moduuli arvon  $M_r$  [MPa] on havaittu jopa puolitoistakertaistuvan vuoden seuranta-aikana (Tielaitos 2000, Helsinki 2015, Yrdevik 2000, Dettenborn 2013).

### **2.3 Betonimurskeen käyttöön liittyvä ohjeistus ja lainsäädäntö**

#### **Yleistä**

Betonimurskeen käyttö ja laatuvaatimukset ovat useamman asetuksen, säännöksen ja ohjeen alaista. Betonimurske on Jätelain 646/2011 alaista jätettä, Jäteverolaissa 1126/2010 on määrätty betonimurskeelle jätevero, mikä on nostettu vuonna 2016 tasolle 70 €/t (Vero 2017). Ns. MARA-asetuksessa 591/2006 ja asetuksen muutoksessa 403/2009 määritellään betonimurskeen haitallisten aineiden sallitut raja-arvot ja ohjeistetaan, milloin betonimursketta voidaan käyttää maarakentamisessa ilmoitusmenettelyssä ja milloin tarvitaan ympäristönsuojelulain 86/2000 mukainen lupa käytölle. EU:n asetus 305/2011 määrittelee rakennustuotteiden harmonisoiduista tuotestandardeista ja CE-merkinnästä, jotka koskevat myös BeM I-III –luokan betonimurskeita. InfraRYL 2017 –ohjeessa on vaatimukset sitomattomassa kantavassa- ja jakavassa kerroksessa käytettävän betonimurskeen teknisistä vaatimuksista ja suosituksista ominaisuuksien testaustiheydeksi.

Betonimurskeen tuottamisen ja uudelleenkäytön helpottamiseksi on lisäksi laadittu paikallista ohjeistusta, joihin on tiivistetty betonimurskeen käytön ilmoitusmenettely-käytäntö, mitoituspäätökset ja suunnittelun avuksi, betonimurskeen käyttökohteet ja laatuvaatimukset. Paikallisten ohjeistusten luomisen apuna on ollut mm. UUMA ja UUMA2 (uusiomateriaali) -hankkeet. Helsingin seudun ympäristö (HSY) on laatinut oman ohjeistuksen betonimurskeen käytön suunnittelulle, käytölle ja ylläpidolle vesihuoltoverkostojen näkökulmasta (HSY 2014). Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungeilla on yhteinen ohje betonimurskeen hyödyntämisestä infrarakentamisessa. Ohjeistus tukee pyrkimystä kierrättää Suomessa rakennusjätteestä vähintään 70 % vuoteen 2020 mennessä ja pääkaupunkiseutujen kuntien tavoite hyödyntää kaikki syntyvä betonijäte betonimurskeena (Helsinki 2015). Myös Pirkanmaan ja Oulun seudulla on ollut suunnitteluhankkeita betonimurskeen uudelleenkäytölle muiden uusiomateriaalien ohella (Routa-Lindroos & Nenonen 2014).



## **Jätelaki 646/2011**

Betonimurske luokitellaan jätteeksi ja se kuuluu jätelain piiriin. Jätelaki pyrkii ehkäisemään jätteistä aiheutuvaa terveyden ja ympäristön vaaraa ja haittaa. Lain tarkoituksena on myös vähentää jätteiden määrää ja haitallisuutta, edistää luonnonvarojen käyttöä, tehostaa jätehuoltoa ja ehkäistä roskaantumista.

Jäte on lain §5 mukaan sivutuote jos 1) materiaalin jatkokäytöstä on varmuus, 2) ainetta tai esinettä voidaan käyttää suoraan sellaisenaan tai sen jälkeen, kun sitä on muunnettu enintään tavanomaisen teollisen käytännön mukaisesti, 3) aine tai esine syntyy tuotantoprosessin olennaisena osana; sekä 4) aine tai esine täyttää sen suunniteltuun käyttöön liittyvät tuotetta sekä ympäristön- ja terveydensuojelua koskevat vaatimukset eikä sen käyttö kokonaisuutena arvioiden aiheuta vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle.

Jätelaissa viitataan valtioneuvoston asetukseen, jolla annetaan tarkempia säännöksiä jätela-jeittain siitä, milloin aine tai esine ei ole enää jätettä, jos:

- 1) se on läpikäynyt hyödyntämistoimen;
- 2) sillä on käyttötarkoitus, johon sitä käytetään yleisesti;
- 3) sillä on markkinat tai kysyntää;
- 4) se täyttää käyttötarkoituksensa mukaiset tekniset vaatimukset ja on vastaaviin tuotteisiin sovellettavien säännösten mukainen; ja
- 5) sen käyttö ei kokonaisuutena arvioiden aiheuta vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäris-tölle.

Vaikka betonimurske on jätelain mukaista jätettä, betonimurske voi kuulua ns. MARA-ase-tuksen piiriin, jos se täyttää tietyn betonimurskeen laatuluokan laatuvaatimukset vaatimuk-set. Tällöin betonimursketta voidaan hyödyntää maarakenteissa kevennetyllä menettelyllä. Jätteen haltijan on laadittava rakennus- ja purkujätteelle vastaanottajalle siirtokirja luovute-tusta jätteestä. (Jätelaki 646/2011, VNa 591/2006).

## **Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 591/2006, asetuksen muutokset VNa 403/2009 ja 1825/2009 sekä luonnos uudeksi ase-tukseksi 194/2017**

Tällä ns. MARA-asetuksella, muutoksella ja uudella asetusluonnoksella on tarkoituksena edistää jätteiden hyödyntämistä maarakenteissa. Asetuksessa määritetään edellytykset, joi-den täytyessä asetuksessa tarkoitettujen jätteiden käyttöön maarakentamisessa riittää ympä-ristönsuojelulain (527/2014) mukaisen ympäristöluvan sijasta kevyempi ilmoitusmenettely. Muun muassa betonimurske kuuluu MARA-asetuksen piiriin. (VNa 591/2006, 194/2017)

Asetuksen 591/2006 mukaan sovellettavia maarakennuskohteita ovat mm:

- 1) yleiset tiet, kadut, pyörätiet ja jalkakäytävät sekä niihin liittyvät tienpito tai liikennettä varten tarpeelliset alueet, pois lukien meluesteet;
- 2) pysäköintialueet;
- 3) urheilukentät sekä virkistys- ja urheilualueiden reitit;
- 4) ratapihat sekä teollisuus-, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varas-tointikentät ja tiet.

Lausuntakierroksella olevassa MARA-asetuksen luonnoksen 194/2017 mukaan betonimurskeen ja kevytbetonijätteiden käyttö on sallittua väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa. Betonimurskekerroksen enimmäispaksuus väylä-, kenttä- ja teollisuus/varastorakennusten pohjarakenteissa saa olla 1,5 m ja vallirakenteissa 5 m.

Betonimursketta saa hyödyntää ilman ympäristönsuojelulain mukaista ympäristölupaa, jos jätteen laadunhallinta ja hyödyntäminen järjestetään ja toiminnasta ilmoitetaan asetuksen mukaisesti ELY-keskuksen ylläpitämään ympäristönsuojelun tietojärjestelmään (VAHTI) merkitsemistä varten. MARA-asetuksen mukaisesti jätteen saa luovuttaa hyödyntämispaikan tai välivarastointipaikan haltijalle, kun toiminta on merkitty jätelain mukaisesti ympäristönsuojelun tietojärjestelmää. (VNa 591/2006 6§, 194/2017 ja ELY-keskus 2016).

VNa 591/2006 mukaisesti jätteen luovuttajalla on oltava laadunvalmistusjärjestelmä, johon sisältyy 1) laadunvalvontatutkimukset, 2) vastuuhenkilöiden nimeäminen ja niiden pätevyys, 3) ohjeet jätteen vastaanotosta, varastoinnista, käsittelystä ja toimittamisesta hyödyntämispaikkaan, 4) laadunvarmistusjärjestelmän arviointi- tai auditointisuunnitelma, 5) tarvittaessa erityiset puhtausvaatimukset, kuten jätteeseen kuulumattoman aineksen osuus 6) seuranta ja raportointi. Myös CE-merkitsemätöntä betonimursketta voidaan käyttää ilmoitusmenettelyllä, jos murske täyttää MARA-asetuksen asettamat laatuvaatimukset. Jos betonimurske ei täytä MARA-asetuksen vaatimuksia, sen käyttö on ympäristöluvan alaista (VNa 403/2009 liite 1, Helsinki et al. 2015).

MARA-asetuksessa on määritetty ilmoitukseen sisällytettävät tiedot. Asetusluonnokseen 194/2017 on tullut tarkennuksia aikaisempaan asetukseen 591/2006 verrattuna mm. ilmoitusmenettelyssä ilmoitettavien tietojen osalta. Alkuperäisen vuoden 2006 MARA-asetuksen jälkeen on tullut uusi ympäristönsuojelulaki vuonna 2014, mihin on päivitetty MARA-ilmoituksen vastaanottavat viranomaiset. Uuden MARA-asetuksen tullessa voimaan, MARA-ilmoitukseen tulee liittää betonimurskeen käyttökohteesta selvitys, jossa on jätettä sisältävästä rakenteesta periaatepoikkileikkaus sekä hyödyntämispaikan sijainti merkittynä asemapiiirroksen tai karttaan koordinaatteineen. Kartassa rakenne tulee olla rajattuna sekä sen läheisyydessä sijaitsevat pohjavesialueet, niiden luokat sekä vedenottoaikat ja vesistöt. Lisäksi hyödyntämispaikan haltijan on rakentamisen päätyttyä annettava selvitys siitä, miten ilmoituksen mukainen jätteiden hyödyntäminen on toteutunut. (VNa 591/2006 ja luonnos194/2017)

Edellytyksenä betonimurskeen MARA-asetuksen mukaiselle hyödyntämiselle on, että jäte täyttää haitallisten aineiden pitoisuutta ja liukoisuutta koskevat vaatimukset sekä on teknisesti ominaisuuksiltaan käyttökelpoista ((VNa 403/2009 liite1, VNa 194/2017 luonnos). Asetuksessa betonimurske määritellään jätteeksi, joka on valmistettu puretuista betonirakenteista tai uudisrakentamisen ja betoniteollisuuden betonijätteistä murskaamalla enintään 150 mm kappalekokoon ja saa sisältää enintään 30 painoprosenttia tiili- ja kaakelijätettä, yhden painoprosentin siihen kuulumatonta vedessä kellumatonta ainesta, kuten puuta, kumia tai metallia. Lisäksi betoni- ja tiilimurskeessa saa olla enintään 10 cm<sup>3</sup>/kg vettä kevyempiä materiaaleja, kuten muovivaaleja ja eristemateriaaleja (VNa 403/2009 liite 1, VNa luonnos 194/2017)

Asetusluonnoksen 194/2017 mukaan laitospölyssä syntyvän betonimurskeen ympäristökelpoisuus tulee tutkia säännöllisesti ja rakennus- ja purkukohteissa syntyvän ja

käsiteltävän betoni- ja tiilimurskeen ympäristökelpoisuus tulee tutkia purkukohdekohtaisesti. Laitosmaisesti tuotetun betonimurskeen sisältämien haitta-aineiden liukoisuudet ja pitoisuudet tulee määrittää vähintään yhdestä kokoomanäytteestä ennen jätteen luovuttamista hyödynnettäväksi, kun taas purkukohteissa tuotetusta betonimurskeesta tulee määrittää lisäksi materiaalijakauma ja epäpuhtauksien määrä. (VNa luonnos 194/2017)

### **Euroopan unionin rakennustuoteasetus L 305/2011 ja CE-merkintä**

Euroopan unionin rakennustuoteasetus vaatii maarakentamisessa käytettäviltä rakennustuotteilta CE-merkintää (Conformité Européenne), mikäli tuotteelle on olemassa sille sovellettavissa oleva harmonisoitu tuotestandardi (hEN). CE-merkinnällä valmistaja vakuuttaa, että rakennustuotteen ominaisuudet ovat eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaiset. Rakennustuotteiden CE-merkinnästä tuli pakollinen 1.7.2013 myös maarakentamisen rakennustuotteille. CE-merkintä rakennustuotteessa ei vielä takaa sitä, että tuote soveltuu käytettäväksi tietyssä maassa tiettyyn rakennuskohteeseen. Suomessa kansalliset säädökset ja ohjeet antavat tarkempia määräyksiä muun muassa maarakenteissa käytettävän betonimurskeen ominaisuuksille. (EU 305/2011 ja Ympäristöministeriö 2017).

Betonimurske voi saada CE-merkinnän, mikäli se täyttää asetuksen EU 305/2011 ja standardin SFS-EN 13242 (Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset) mukaiset vaatimukset. CE-merkitystä betonimurskeesta tulee olla tehtynä asetuksen mukainen suoritustasoilmoitus, josta ilmenee valmistajan varmistamat suoritustasojen tiedot tuotteet perusominaisuuksista. Suoritustasoilmoitus laaditaan hEN tai eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) perusteella. Betonimurskeelle käytettävä harmonisoitu tuotestandardi SFS-EN 13242 on vahvistettu suomalaisiksi kansalliseksi standardiksi ja se pitää sisällään luonnonkiviainesten lisäksi keino- ja uusiokiviaineksen mekaaniset vaatimukset ja testauksen (EU 305/2011, Ympäristöministeriö 2017, SFS-EN 13242). Betonimurske kuuluu AVPC 4 luokan rakennusmateriaaleihin, jolloin tuotteen CE-merkitsemiseksi riittää tehtaan sisäinen dokumentoitu laadunvalvonta ja tyyppitestaukset kansallisten standardien mukaisesti. Betonimurskeen kohdalla ominaisuudet ovat sitomattomia kiviaineita vastaavia. CE-merkityn betonimurskeen suurin raekoko on 0/90 mm (EU 305/2011, Ympäristöministeriö 2017, Lahti 2013)

### **Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset SFS-EN 13242**

Standardissa määritetään kiviainesten geometriset, fysikaaliset, kemialliset ja säilyvyysvaatimukset. Standardissa on myös ohjeistus vaatimustenmukaisuuden arvioinnille. Kiviaineksen tuottajalla tulee olla tehtaalla sisäinen laadunvalvontajärjestelmä, jolla todetaan kiviaineksen laadunvalvonnan toimivuus. Standardi sisältää rakennustuotedirektiiviin perustuvan yhdenmukaistetun osan, jonka pohjalta rakennustuotteeseen voidaan kiinnittää CE-merkintä. Lisäksi standardissa määritellään tehtaan tai laitoksen sisäinen laadunvalvonnan menettely, jonka avulla varmistetaan tuotteiden täyttävän standardin vaatimukset.

Standardissa SFS-EN 13242 on ohjeistus siitä, minkä standardin tai työohjeen mukaisesti kukin kiviaineen ominaisuus tulee testata ja ominaisuuden testaustiheys. Esimerkiksi materiaalin hienoaineen määrää tulee testata kerran viikossa työohjeen EN 933-1 mukaisesti. Muita testattavia ominaisuuksia ovat mm. kiviaineksen raekoko, muoto, iskun- ja kulutuskestävyys, kiintotiheys, rikkipitoisuus, jäädytys-sulatuskestävyys, veden imeytyminen ja joiden testaamisen työohje tai standardi on ilmoitettu tässä standardissa SFS-EN 13242.

### **Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmä SFS 5884. 2001.**

Standardissa ohjeistetaan, miten betoniteollisuuden sekä rakennusten lajittelevassa purussa syntyvä betonijäte jalostetaan maarakentamisessa tekniset ja ympäristövaatimukset täyttäväksi betonimurskeeksi. Standardia sovelletaan rakennustyömaille ja kiinteillä vastaanottoalueilla maarakennuskäyttöön jalostettavan betonimurskeen kaupallisessa tuotannossa, kaupassa ja käytössä. (SFS 5884 2001).

Standardissa betonimurske määritellään rakennustyömaiden ja betoniteollisuuden betonijätteestä murskatuksi tuotteeksi ja sen sisältämät epäpuhtaudet kuten tiili, puu, muovi, kumi, metallit ja eristevillat. Standardin liitteissä on lueteltu materiaaleja, joita sisältävät betonierät eivät sovellu maarakennuskäyttöön. Tällaisia materiaaleja ovat muun muassa elementtimaalit, öljyiset betonit, kipsilevyt, kyllästetty puu sekä haitta-aineina PCB, asbesti, lyijy, kupari, raskasmetallit ja sulfaatit. Betonimurskeen haitta-aineiden sallitut pitoisuudet on eritelty tarkemmin valtioneuvoston asetuksessa 403/2009.

Standardissa SFS 5884 määritellään myös betonimurskeen mekaanisten ominaisuuksien testaaminen sekä tuottamisen laadunhallinnan periaatteet. Standardi on ajalta jolloin betonimursketta maarakennuskäytössä ei tarvinnut vielä CE-merkitä, mutta standardin kiviaineksille tehtävät testivaatimukset ja parametrit ovat pysyneet suurimmaksi osaksi muuttumattomina CE-merkintäkäytännöstä huolimatta. Maarakennuskäytössä CE-merkitylle kiviainekselle ja betonimurskeelle tulee olla nykyisin tehtynä suoritustasoilmoitus, mutta tässä standardissa vaatimusta ei vielä ole. Suomalaiset ohjeet betonimurskeen testattaville parametreille ovat suurimmalta osalta edelleen SFS 5884 mukaisia vaikka standardi on jo 16 vuotta vanha, jona aikana betonimurskeeseen liittyvä lainsäädäntö ja ohjeistus tarkentunut. (SFS 5884, 2001).

### **Paikallinen ohjeistus**

Betonimurskeen käytön paikallinen ohjeistuksen taustalla lainsäädännön lisäksi ovat olleet UUMA- ja UUMA2- kehitysohjelmien tuottama tieto (UUMA 2017). Pääkaupunkiseudulla HSY on laatinut suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon ohjeistuksen betonimurskeen käytölle putki ja vesijohtorakenteiden yhteydessä (HSY 2014). Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupunki ovat laatineet ohjeistuksen betonimurskeen hyödyntämiselle PK-seudulla muissa kuin HSY:n verkosto ja putkikohteissa (Helsinki et al. 2015). HSY:n ja Helsingin ohjeista löytyy mitoitusparametrejä ja vaatimuksia betonimurskeen ominaisuuksille ja esimerkkejä betonimurskerakenteita sisältävistä raittien ja katujen periaatepoikkileikkauksia.

Näistä löytyy ohjeistus betonimurskeen hyödyntämisen ”MARA”-asetuksen mukaisella ilmoitusmenettelyllä. Ohjeen mukaan pääkaupunkiseudun pienissä kohteissa, joihin ei tarvita

ympäristölupaa (esim. sijoitettavamäärä alle 500 tonnia) sovelletaan ao. kaupungin määräyksiä. Määräysten mukaan betonimurskeen hyödyntämisestä on tehtävä ilmoitus ympäristölautakuntaan. (HSY 2014 ja Helsinki et al 2015)

Muilta alueellisilta seutukunnilta kuin pääkaupunkiseudulta ei löydy yhtä kattavaa paikallista ohjeistusta betonimurskeen hyödyntämiselle. Näissä kunnissa hyödynnetään pääasiallisesti PK-seudun ja UUMA-hankkeiden ohjeistusta. (Oulu 2016)

## **InfraRYL**

Infrarakenteiden yleiset laatuvaatimukset -julkaisu, InfraRYL ohjeistaa uusiomateriaalien joihin myös BeM kuuluu, käyttöä maarakenteissa. InfraRYL 2017 mukaan sitomattoman kantavassa ja jakavassa kerroksessa käytettävien materiaalien materiaalivaatimukset ja kelpoisuus osoitetaan standardin SFS-EN 13242 mukaisella CE-merkinnällä, suoritustasoilmoituksella ja rakeisuuden tutkimustuloksilla.

Ohjeistuksen mukaan maarakenteissa käytettävien uusiomateriaalien on teknisiltä ominaisuuksiltaan ja maarakennuskelpoisuudeltaan sovelluttava käyttökohteeseen ja oltava riittävän tasalaatuisia. Kuormitettavissa maarakenteissa käytettävien uusiomateriaalien pitkäaikaiskestävyys osoitetaan käyttöhistorialla esim. toteutetuista rakennuskohteista. Uusiomateriaalien pitkäaikaiskestävyyteen liittyviä riskejä pienennetään alustavilla laboratorio- ja kenttäkokeilla sekä kokeilukohteista saadulla tiedolla. (InfraRYL 2017)

InfraRYL 2017 mukaan betonimurske on osittain sitoutuva materiaali, mutta rakenteeseen tiivistetty betonimurske on kuitenkin aukikaivettavissa ja uudelleen tiivistettävissä. Ohjeen mukaan betonimurske ei sovellu käytettäväksi vedenpinnan alaisissa täytöissä tai rakenteissa hienoaineen mahdollisen liettymisen takia. Myös betonimurskeen luonnonkiviainesta korkeampi pH-arvo rajoittaa sen käyttöä mm. pinnoittamattomien alumiinisten vesihuollon laitteiden kanssa kontaktia on vältettävä.

Luokkien BeM I ja II murskeita voidaan käyttää sitomattomissa kantavissa kerroksissa, kun niiden raekokojakauma on SFS-EN 13285 luokkien G<sub>0</sub> tai G<sub>A</sub> mukainen. InfraRYL 2017 liitteessä T18 on tarkemmat ohjeet luokkien BeM I - III betonimurskeiden laatuvaatimuksista ja ominaisuuksien testaustiheydestä käytettäessä sitomattomissa kantavissa ja jakavissa kerroksissa. (InfraRYL 2017)

## 2.4 Betonimurskeen käyttö Suomessa

Betonimurskeen uusiokäytön tutkiminen maarakentamisessa on aloitettu Suomessa vuonna 1992, jonka jälkeen betonimurskeen materiaaliominaisuuksia ja ympäristökelpoisuutta on tutkittu laboratoriossa ja koerakennuskohteissa. Ensimmäinen koetien rakentamisen jälkeen betonimursketta on käytetty Suomessa teiden, katujen ja kenttien jakavassa ja kantavassa kerroksessa, joista on kerätty myös seurantatietoja (Tielaitos 2000, Dettenborn 2013). Ympäristötietoisuuden lisääntymisen, lainsäädännön uudistuminen ja ohjeistuksen parantuminen myötä betonimurskeen käyttö on helpottanut maarakentamisessa 90-luvun loppupuolelta. Betonimurskeen kaupallinen tuotanto alkoi Suomessa 90-luvun puolivälissä ja sen käyttö on lisääntynyt pieniä vuosittaisia vaihteluita lukuun ottamatta. Esimerkkinä Rudus Oy toimitti 2000-luvun alussa betonimursketta 100000 t/vuosi kun määrä 2010-luvulla on ollut yli 500000 t/vuosi (Joutsenoja 2012). Nykyisellään Suomessa uusiokäytetään vuodessa 700 000 - 1 000 000 tonnia betonimursketta, mikä vastaa noin 0,8 % sora- ja kalliokiviainesten oton kokonaismäärästä. Betonimurskeen käytössä on jonkin verran vuosittaista vaihtelua. Käyttö on helpottunut MARA-asetuksen myötä, kun betonimurskeen maarakennuskäytön ympäristöluvanvaraisuus muutettiin tietyin ehdoin ilmoitus-käytännöksi. Betonimursketta käytetään nykyisin myös suoraan purkukohteiden yhteydessä toteutettavassa uudisrakentamisessa. Tällöin betonimurskeen laatuluokka tulee todentaa maarakennuskohteeseen soveltuvaksi ja haitta-aineiden määrä selvittää liukoisuuskokeilla (VNa 591/2006, Delete Oy 2017). Mm. Helsingin kaupunki on käyttänyt Kruunuvuoren rannan alueen maarakentamisessa alueelta purettujen vanhojen öljysäiliöiden betonirakenteista tehtyä mursketta (Suojala 2017).

Pääasiallisesti Suomessa betonimursketta käytetään maarakenteiden jakavissa kerroksissa. Betonimursketta on käytetty muun muassa valtateiden parannuskohteissa Vt3:lla Pirkanmaalla, Vt5:lla Uudenmaan alueella, Kehä I:llä Helsingissä (Oulu 2014). Eniten betonimurskeen käytöstä on tietoa pääkaupunkiseudun kohteista. Suurin kotimainen betonimurskeen käyttökohde on tähän mennessä ollut vuosina 2014 – 2016 toteutettu Kehä I:n Kivikon eritasoliittämä ja väylänparannus työmaa, missä BeM II -luokan betonimursketta käytettiin jakaviin kerroksiin ja pengerrakenteisiin yhteensä noin 100 000 t. Toinen viime vuosien suuri betonimurskeen käyttökohde oli Vantaan Energian jätteen polttolaitoksen piharakenteet, joihin käytettiin noin 90000 tonnia BeM II -luokan betonimursketta. Tälläkin hetkellä Uudellamaalla on useita yli 20000 t betonimurske-rakennuskohteita esim. kaksi logistiikkahallityömaata Tuusulassa ja tienparannuskohde Kehä-I:n varrella Helsingin Konalassa. BeM I-luokan betonimurskeen kansallinen käyttö on alle 50000 t vuodessa vähäisemmän tuotannon vuoksi (Pieksämä 2017, Suojala 2017).

Tällä hetkellä Suomesta löytyy useita kaupallisen CE-merkityn betonimurskeen tuottajia. Osa tuottajista murskaa betonimurskeen murskaus-asetemilla, osa suoraan purkukohteissa. Vuosien 2009-2012 aikana Uudenmaan ELY-keskuksen alueella tehtiin 20 - 51 kpl MARA-ilmoitusta betonimurskeen hyödyntämiseksi, mikä on määränä 400000 – 700000 tonnia/vuodessa. Samalla aikavälillä Pirkanmaan alueella MARA-ilmoituksia tehtiin 3 – 16 kpl. Vuonna 2014 MARA-ilmoituksia tehtiin ELY-keskuksille 76 kpl joiden betonimurskeen kokonaismäärä oli noin 660 000 tonnia. BeM käyttökohdeita oli muun muassa valtateiden 3 ja 4 parannuskohteet, Kehä I Helsingissä ja erilaiset kunnalliset katurakenteiden penkereet, jakavat ja kantavat kerrokset. Betonimurskeen kokonaiskäyttömäärä on MARA-ilmoituksia suurempi ilmoittamatta jätettyjen betonimurskemäärien vuoksi. (Oulu 2016, Pieksämä 2017).

Vaikka purkukohteissa murskatun CE-merkityn betonimurskeen käyttö lisääntyy jatkuvasti ja kotimaisesta purkubetonista kierrätetään arviolta 70 – 80 %, kierrätyksen tehokkuudessa on alueellisia ja paikkakuntaisia eroja. Tampereen seudulla betonimursketta hyödynnetään tehokkaasti, mutta pienemmillä paikkakunnilla rakennusviranomaisilla ei ole välttämättä riittävästi kokomusta betonimurskeen käytöstä, jolloin päädytään helpommin käyttämään perinteisempiä maarakennusmateriaaleja. Helsingin seudulla betonimurskeen käyttö keskittyy pitkäikäisten maarakenteiden rakennekerrokseen ja teollisuusrakentamisen piharakenteisiin. Usein auki kaivettavissa maarakenteissa ja putkirakenteiden yhteydessä betonimurskeen hyödyntäminen on vähäistä betonimurskeen lujittumisominaisuuden vuoksi. (Pieksämä 2017, Suojala 2017)

Betonimurskeen käyttö Suomessa betonin uusiokiviaineena on toistaiseksi vähäistä laadukkaan luonnonkiviaineksen helpon saatavuuden ja parempien materiaaliominaisuuksien vuoksi. (Rakennusteollisuus 2017)

## **2.5 Betonimurskeen käyttö ulkomailla**

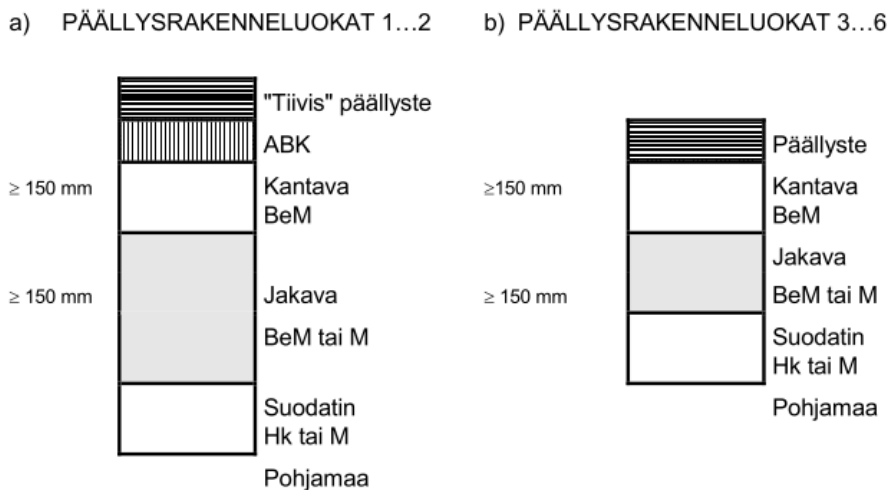
Betonimursketta on käytetty Euroopassa jo toisen maailmansodan jälkeen tienrakennusmateriaalina, kun sodan jälkeen suuri määrän tuhoutunutta rakennuskantaa piti purkaa ja purkujätteitä piti sijoittaa uudelleen. Betonimurskeen käyttö väheni sodan jälkeisen jälleen rakentamisen jälkeen, mutta betonimurskeen hyödyntäminen maarakenteiden täyttömateriaaleina, pohjarakentamisessa ja betonin kiviaineena nousi uudelleen esille 1970-luvulla Amerikassa. Yksi syy betonimurskeen käytön lisääntymiselle on ympäristötietoisuuden kasvu rakennusalalla ja rajallinen luonnonkiviaineksen saatavuus. (McNeil & Kang 2013, Jin & Chen 2015)

Nykyisellään betonin tuotantoon käytetään vuosittain maailmassa 10 miljardia tonnia kiviaineksiä ja kun samaa aikaan tuotetaan vuosittain 6 – 8 miljardia tonnia betonijätettä. (Jin & Chen 2015) Betonimursketta käytetään yleisesti Saksassa, Itävallassa, Pohjoismaissa, Australiassa, Uudessa Seelannissa, Japanissa ja Pohjois-Amerikassa maarakentamisessa. Japanissa lähes kaikki betonijäte kierrätetään, Tanskassa, Hollannissa ja Belgiassa betonijätteestä kierrätetään noin 80 %, kun taas Etelä-Euroopassa kierrätys on vähäisempää johtuen riittävästä ja riittävän kustannustehokkaista luonnonkivivaroista. Yhdysvalloissa kierrätetään vuosittain yli 140 miljoonaa tonnia betonia, josta arviolta 85 % käytetään teiden rakenteisiin. Murskattua betonia käytetään myös betonin runkoaineena korvaamaan luonnonkiviaineita. (Lim et al. 2008, Chandra 2005, Jin & Chen 2015, Vakkuri 2011, Concrete construction 2017)

Eri maissa betonimurskeen laatuluokituksessa ja sallituissa vierasainemäärissä on eroja. Ruotsissa betonimurskeelle on neljä laatuluokkaa, joista 1. luokan betoni on puhdasta betonimursketta, 2. luokka sisältää vähintään 95 painoprosenttia betonia, 3. luokka vähintään 80 ja 4. luokka vähintään 50 painoprosenttia betonia. Myös kunkin luokan betonimurskeen kulutuskestävyydelle annettu minimi vaatimukset (Vägverket. 2004)

## 2.6 Betonimurskeiden käyttö tie- ja maarakenteissa

Betonimursketta voidaan teknisten ominaisuuksien puolesta käyttää tien päällyys- ja alusrakenteen kerroksissa kuten pengertäytteenä, täytöissä, jakavissa ja kantavissa kerroksissa. (Kuva 3. Tielaitos 2000). Jotta betonimurskeella saavutetaan rakenteessa riittävä kantavuus, on kerrospaksuuksien oltava riittäviä, tiivistys kunnollinen ja materiaalien muut ominaisuudet rakennekerrokseen sopivat. BeM I voidaan käyttää kantavassa kerroksessa, BeM II kantavissa ja jakavissa kerroksissa ja BeM III jakavissa kerroksissa, kun materiaalin ominaisuudet täyttävät sitomattoman kantavan ja jakavien kerrosten murskeiden vaatimukset. (HSY 2014).



Kuva 3. Tyypillinen betonimurskerakenne. Päällysrakenneluokat 1 - 6 on nykyisin korvattu kuormitusluokilla 25 - 0,1, jossa luokka määräytyy kuormituskertaluvun (KKL<sub>20 vuotta</sub>) mukaan (Tielaitos 2000, Tiehallinto 2004)

Betonimurskeen käytölle maarakentamisessa on tiettyjä materiaalin ominaisuuksista johtuvia rajoitteita. Betonimursketta ei saa käyttää sitomattomissa päällysteissä, vaan BeM-rakenne on peitettävä vähintään 100 mm paksuisella kerroksella luonnon kiviainesta. Tämä johtuu mm. betonimurskeen kalliomursketta huomommasta kulutus ja iskunkestävyydestä. Betonimurskeen käyttö on rajoitettu myös putkikaivantojen täytöissä ja kasvien kantavissa kasvialustoissa lujittumisominaisuuksien vuoksi. Putkien asennusalustoissa ja alkutäytöissä betonimurskeen käyttö on kielletty HSY:n alueella, samoin kuin I ja II-luokan pohjavesialueilla. (Helsinki et al. 2015, HSY 2014).

Maarakentamisessa betonimurskerakenne saa olla enintään 1,5 m paksu ja vallirakenteissa 5 m. Betonimurskeen sallituille haitallisten aineiden liukoisuuksille on asetettu maarakentamiskohdekohtaisia arvoja. Päällystetyillä väylillä ja teollisuuden pohjarakenteissa käytetyn betonimurskeen haitallisten aineiden sallitut pitoisuudet voivat olla paikoitellen puolitoista kertaa suurempia kuin päällystämättömissä maarakenteissa. Betonimurskeen käyttö meluvälillä, satamien kenttärakenteissa ja puistojen täytöissä on ympäristöluvan varaista, samoin kun käyttö pohjavesialueilla ja yli 1,5 m kerrospaksuuksilla. (VNa luonnos 194/2017).



Samoin kuin kalliomurskeita käytettäessä, betonimurskeita sisältävien maarakenteiden rakennekerrospaksuudet mitoitetaan joko Odemarkin mitoitusmenetelmällä tai väsymisteoriaan perustuvalla monikerroslaskennalla, esimerkiksi APAS 3 -ohjelman avulla. Monikerroslaskenta mahdollistaa päällystekerroksen optimaalisemman käytön, kun päällysteiden kokonaispaksuus on  $\geq 120$  mm. Monikerroslaskentaa ei käytetä, kun päällysteiden kokonaispaksuus on alle 80 mm. Odemarkin menetelmä näistä yksinkertaisempi ja Suomessa pääasiallisesti käytetty kantavuusmitoitusmenetelmä. (Tiehallinto 2004). Vaikka betonimurskeella saavutetaan tierakenteen tavoitekantavuus mitoituksellisesti kalliomursketta ohuemmillä kerroksilla, Suomessa betonimurskekerrosten paksuuden toteutetaan yleensä kalliomurskeiden kerrospaksuuksilla. (Pieksämä 2017).

### Odemarkin menetelmä

Jakavan ja kantavan kerroksen murskeiden kantavuusmitoituksessa käytetään yleisesti Odemarkin kaavaa (Kaava 1). Odemarkin kuormituskestävyyden mitoitusmenetelmän lähtötiedoiksi tarvitaan vaadittu päällystetyyppi, päällystekerrosten vähimmäispaksuus, tavoitekantavuus ja alusrakenteen kantavuus. (Tiehallinto 2004)

$$E_p = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2} \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}} \quad (1)$$

missä

- $E_A$  = mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa),
- $E_p$  = mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa),
- $E$  = mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa),
- $h$  = mitoitettavan kerroksen paksuus (m) ja
- $a$  = kuormituspinnan säde, 0,15 m esim. levykuormituslaitteen

Kalliomurskeille ja sorille rakenteen mitoituksessa käytettävän kimmomoduulin E (MPa) arvo määräytyy rakeisuusjakauman 0/8 ... 0/80 mm ja rakeisuusluokan G<sub>0</sub>, G<sub>P</sub>, G<sub>A</sub> tai G<sub>C</sub> mukaan. Tyypillisesti kantavan kerroksen kalliomurskeille käytetään E-moduulin arvona 200 – 280 MPa ja jakavan kerroksen murskeille 150 – 280 MPa. Betonimurskeelle suunnittelussa käytettävien E-moduulin arvot (Taulukko 1) perustuvat koerakenteiden kantavuusmittauksista Odemarkin yhtälöä käyttäen tehtyjen takaisinlaskentojen tuloksiin ja vaihtelevat BeM I – III –luokissa välillä 700 – 280 MPa (Taulukko 1). (Tiehallinto 2005).

Taulukko 1. Odemarkin mitoituksessa käytettävät betonimurskeiden ja yleisesti myynnissä olevien standardimurskeiden moduulit. (Tiehallinto 2005, taulukon 2 ja 3 tietoja)

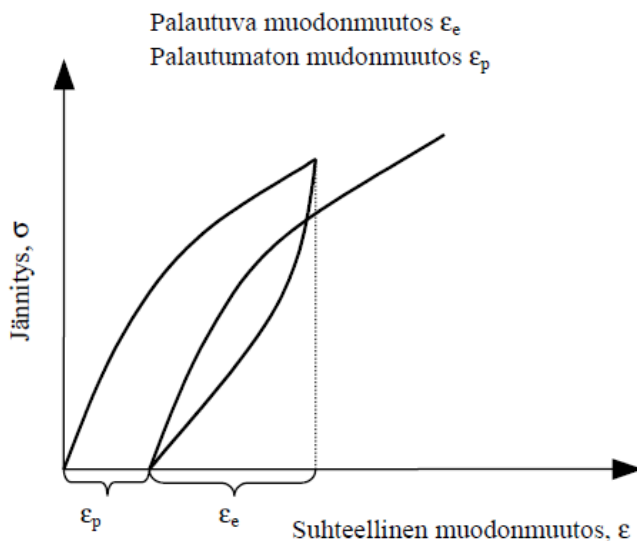
Materiaali	E [MPa]	$n = E/E_A$ , max	Muuta
BeM I	700	10	Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuusvaatimukset. 28d:n puristuslujuus $\geq 1,2$ MPa.
BeM II	500	10	Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuusvaatimukset. 28d:n puristuslujuus $\geq 0,8$ MPa
BeM III	280	6	Sitomattoman kantavan kerroksen rakeisuusvaatimukset.
KaM 0/16...22 mm*	150	6	
KaM 0/31,5 mm*	200	6	
KaM 0/40...80 mm*	280	6	

\* Kalliomurskeille yleisesti Suomessa käytetty rakeisuusluokka on  $G_0$ ; vähän hiekkarakeita sisältävä, avoin eli roikkuva rakeisuuskäyrä ja siksi hyvin vettä läpäisevä, nopeasti kuivuva ja märkänäkin hyvin kantavuutensa säilyttävä.

Betonimurskeen parempaa kantavuutta voidaan hyödyntää muun muassa ohuempina kantavina kerroksina tai ohentamaan päällystepaksuuksia. Sopiva kerrospaksuus sitomattomille kerroksille Odemarkin mitoituskaavaa käytettäessä on 200 - 300 mm kun  $n = E/E_A$  arvo on  $\leq 6 * E_A$  ja osittain sidotuille kerrospaksuus 150 - 200 mm ja  $n * E_A$ . (Tiehallinto 2000, Tiehallinto 2004).

## 2.7 Rakennekerros materiaalien muodonmuutosta kuvaavia suureita

Maarakenteiden rakennekerroksissa käytettävien materiaalien mekaanista käyttäytymistä simuloidaan erilaisten materiaaliparametrien ja materiaalmallien avulla. Kantavien ja jakavien kerrosten kallio-, sora-, ja betonimurskeet ovat toistuvan dynaamisen ja staattisen kuormituksen alaisena, josta seuraa materiaalin pysyviä ja palautuvia muodonmuutoksia (Kuva 4), maapartikkelien uudelleen järjestyessä ja materiaalin tiivistyessä. (Tiehallinto 2001, Martinlauri 2016).



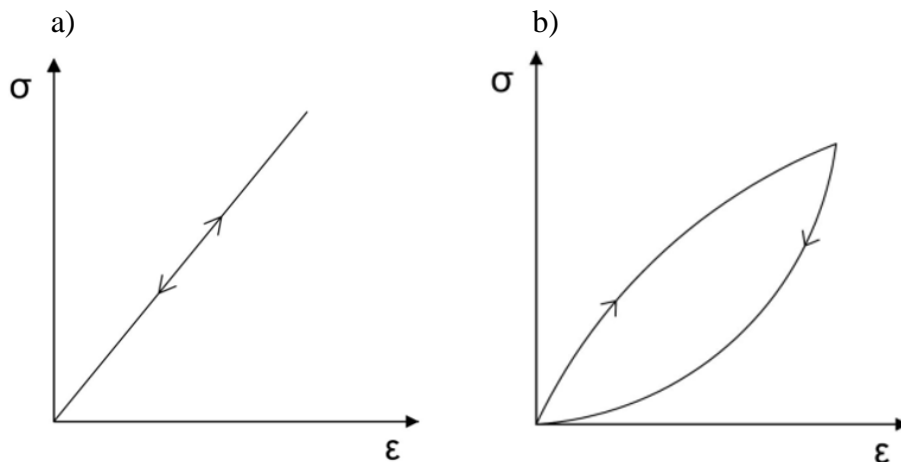
Kuva 4. Elasto-plastinen kuormitus-muodonmuutosvaste (Tiehallinto 2001)

Kun materiaalin muodonmuutosten oletetaan olevan lineaarisesti elastisia (kuva 5 a) kuormitustasosta riippumatta materiaalin ajatellaan käyttäytyvän Hooken lain mukaisesti. Kimmomoduuli kuvaa monien homogeenisten ja isotrooppisten materiaalien, kuten metallien tai kiinteän kiven muodonmuutuskäyttäytymistä (kaava 2).

$$E = \Delta\delta / \Delta\varepsilon \quad (2)$$

missä E on kimmomoduuli [MPa]  
 $\Delta\delta$  on jännityksen muutos  
 $\Delta\varepsilon$  on muodonmuutoksen muutos

Maamateriaalien muodonmuutuskäyttäytyminen on harvoin lineaarista (Kuva 5 a), vaikka maapartikkelit olisivat järjestyneet tiiviiksi rakenteeksi. Tällöin myös rakenteeseen kohdistuvan jännityksen muodonmuutoksen suhdetta kuvaavat mallit ovat epälineaarisia (Kuva 5 b).

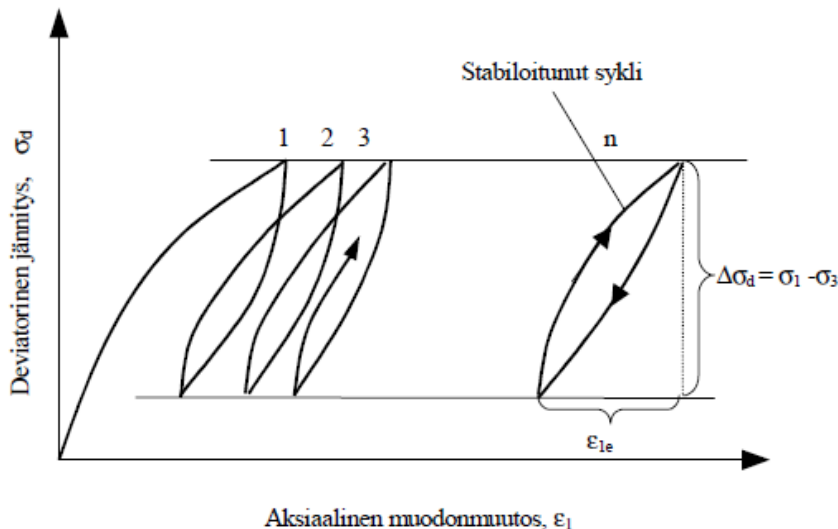


Lineaarisesti kimmoinen materiaali

Epälineaarisesti käyttäytyvä materiaali

Kuva 5. a) Lineaarisesti ja b) epälineaarisesti kimmooisan materiaalin kuormitus-muodonmuutosvaste (Tiehallinto 2001, Matinlauri 2016)

Kimoteoriaa paremmin maarakennusmateriaalien muodonmuutoksia kuvaa elasto-plastinen muodonmuutuskäyttäytyminen. Kuormitus aiheuttaa maamateriaalissa sekä elastisen eli palautuvan ja plastisen eli pysyvän muodonmuutoksen. Elastinen osa johtuu rakeiden muodostaman raerungon palautuvasta kimmoisesta muodonmuutoksesta ja plastinen osa vastaa raerungon rakeiden kiertymistä ja liukumista toistensa suhteen. Riittävän monta kertaa kuormitetun maamateriaalin muodonmuutos sykli lopulta stabiloituu, jolloin muodonmuutos on palautuvaa (Kuva 6). (Tiehallinto 2001)



Kuva 6. Sitomattoman maamateriaalin jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen toistuvassa kuormituksessa. (Tiehallinto 2001)

### Resilient moduuli $M_r$

Tierakenteiden rakeisten materiaalien muodonmuutuskäyttäytyminen riippuu kuormitustasosta. Tien vaaka- ja pystykuormitus vaihtelee jatkuvasti ajoneuvojen pyörien muuttuvista kuormista. Lisäksi maamateriaaliin kohdistuva jännitystilä riippuu syvyydestä ja päällä olevien kerrosten ominaisuuksista (Tiehallinto 2001). Materiaalin palautuvaa muodonmuutosta eri kuormitustasoilla kuvaava resilient moduulia voidaan määrittää dynaamisilla kolmiaksaalikojeilla muuttuvassa tai vakiosellinpaineessa. (SFS-EN 13286-7:2004)

Resilient moduulin määrittämiseen on useampia lähestymistapoja ja laskukaavoja. Yksinkertaisimmillaan resilient moduuli lasketaan syklisen kuormituksen aiheuttaman muodonmuutoksen palautuvan eli resilientin osan sekä pystyjännityksen ja sellipaineen avulla, kun sellipaineen arvo pysyy kokeessa vakiona (Kaava 3) (Lekarp et al. 2000).

$$M_r = \frac{\Delta(\delta_1 - \delta_3)}{\varepsilon_1^r} \quad (3)$$

missä  $M_r$  on resilient moduuli [MPa]  
 $\delta_1$  on pystyjännitys  
 $\delta_3$  on sellipaine tai vaakajännitys  
 $\varepsilon_1^r$  on resilientti (palautuva) aksiaalinen muodonmuutos

Yleisemmin materiaalin jännitystilän ja aksiaalisen muodonmuutoksen suhdetta kuvaavana mallina käytetään ns.  $k\theta$ -mallia (Kaava 4). Mallissa materiaalin poissonin luvun oletetaan olevan vakio (Kolisuoja 1997).

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad (4)$$

missä  $M_r$  on resilient moduuli [MPa]  
 $k_1$  ja  $k_2$  ovat materiaaliparametrejä  
 $\theta$  on pääjännitysten summa

$k\theta$ -malli on melko hyvä aksiaalisen muodonmuutoksen määrittämiseen, mutta on todettu ennustavan huonosti radiaalista ja tilavuuden muodonmuutosta. Myös maamateriaalin poissonin luvun on todettu olevan jännitystilasta riippuvainen, jolloin jännitystilan ja materiaalin palautuvan muodonmuutoksen suhde on hieman monimutkaisempi.  $k\theta$ -mallissa ei myöskään oteta huomioon deviatorisen ja hydrostaattisen jännityksen arvoja erikseen. Paremmiin rakeisten maamateriaalien muodonmuutuskäyttäytymistä kuvaa Uzanin malli (Lekarp et al. 200)

$$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{k_2} \left(\frac{q}{\theta_0}\right)^{k_3} \quad (5)$$

missä  $M_r$  on resilient moduuli [MPa]  
 $k_1$ ,  $k_2$  ja  $k_3$  ovat materiaaliparametrejä  
 $\theta$  on pääjännitysten summa  
 $\theta_0$  on vertailujännitys 100 kPa  
 $q$  on deviatorinen jännitys

Määritettäessä resilient moduulin arvoa syklisillä kuormituskokeilla tulee ottaa huomioon, onko kuormitusportaiden sellipaine vakio vai muuttuva ja mitataanko testilaitteistolla pelkkää aksiaalista muodonmuutosta vai myös radiaalista ja tilavuuden muodonmuutosta.

## 3 Laboratoriokokeet

### 3.1 *Betoni- ja kalliomurskeen mekaanisten ominaisuuksien selvittäminen*

#### 3.1.1 Käytetyt materiaalit

Kokeissa käytettiin materiaaleina Parma-betonin Tuusulan Hyrylän betonimurskaamon puhtaasta BeM I luokan 0/45 mm betonimursketta, josta siivilöitiin mekaanisiin kokeisiin 0/16 mm betonimurskelajitetta. Vertailumateriaalina kokeissa käytettiin 0/16 mm kalliomursketta Rudus Oy:n Tampereen Sorilan avolouhokselta ja murskaamolta.

#### 3.1.2 Raekokojakauma

Puhtaalle 0/45 mm betonimurskeen raekokojakauma määritettiin kuivaseulonnalla kahden näyte-erän (44 kg ja 48 kg) keskiarvona 0/32 mm seulasarjalla. Betonimurskeen 0/16 mm raekokojakauma määritettiin poistamalla > 16 mm rakeet 0/32 mm näytesarjasta. Sorilan 0/16 mm kalliomurskeen raekokojakauma määritettiin yhdestä uunikuivatusta 35 kg näyte-erästä kuivaseulontana. Seulonnat tehtiin sovelletusti standardin SFS-EN 933–1 mukaisesti.

Ennen seulontaa näytteet uunikuivattiin ja jäähtynyt näyte kuivaseulottiin noin 2 kg erissä täryttimen ja silmäkooltaan 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 ja 32 mm. verkkoseulasarjan avulla ja punnittiin kullekin seulalle ja pohjalautaselle jäänyt näytemäärä. 0/16 mm kalliomurskeelle sekä 0/32 mm ja 0/16 mm betonimurskeelle piirrettiin raekokojakauma-käyrä koko näyte-erästä.

#### 3.1.3 Betonimurskeen ja kalliomurskeen kiintotiheyden määrittäminen

Sorilan 0/16 mm kalliomurskeelle ja puhtaalle 0/16 mm Hyrylän betonimurskeelle määritettiin kiintotiheys pyknometrimenetelmällä sovelletusti työohjetta SFS 179-2. Tyhjä ja kuiva pyknometri punnittiin, täytettiin vedellä ja punnittiin. Uunikuivaa 4/12 mm betonimursketta ja kalliomursketta punnittiin > 300 g pyknometriin ja punnittiin, mursketta sisältävään pyknometriin lisättiin vettä, pyknometrinä poistettiin ilma vakuumlaitteella, pyknometri täytettiin vakio- lämpöisellä vedellä ja punnittiin. Murskeiden kuivatilavuuspaino määritettiin kaavan 6 avulla kahdesta rinnakkaisesta näytteestä.

$$\rho_s = \rho_w \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 + m_2)} \quad (6)$$

missä  $\rho_s$  on kiintotiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\rho_w$  on veden tiheys lämpötilassa, missä  $m_2$  mitattiin [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $m_0$  on tyhjän kuivan pyknometrin massa [kg]  
 $m_1$  on vedellä täytetyn pyknometrin massa [kg]  
 $m_2$  on näytteen ja pyknometrin massa [kg]  
 $m_3$  on näytteellä ja vedellä täytetyn pyknometrin massa [kg]  
 $m_4$  on näytteen massa [kg]

### 3.1.4 Betoni- ja kalliomurskeen kuivatiheyden määrittäminen parannetulla proctor-kokeella

Sorilan 0/16 mm kalliomurskeelle ja puhtaalle 0/16 mm Hyrylän betonimurskeelle määritettiin maksimitilavuuspaino (optimi kosteus) parannetulla proctor-sullontakokeella työohjeen SFS-EN 13286-2 mukaisesti. Kuivatilavuuspainon määrittämisessä betonimurskeelle käytettiin 7 – 15 % ja kalliomurskeelle 2 – 7 % vesipitoisuuksia. Uunikuivattuun 4 kg murskenäyte-erään lisättiin vettä tunnetun painoprosentin verran, sekoitettiin murskeeseen tasaisesti, annettiin asettua ja sullottiin viitenä kerroksena proctor-muottiin juntaten 25 kertaa jokaista lisättyä murskekerrosta 4,5 kg iskuvasaralla 457 mm pudotuskorkeudelta. Käytetyn muotin halkaisija oli 100 mm ja korkeus 117 mm. Iskuvasaralla sullottu näyte tasattiin viivaimella proctor-muotin yläreunaan, näyte punnittiin ja näyte uunikuivattiin vesipitoisuuden määrittämiseksi. Näytteen kuivatiheys  $\rho_d$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) määritettiin kaavojen (7) ja (8) avulla.

$$\rho = (m_1 - m_2) \quad (7)$$

missä  $\rho$  on näytteen tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $m_1$  on muotin massa (kg)  
 $m_2$  on muotin ja näytteen massa (kg)  
 $V$  on näytteen tilavuus ( $\text{m}^3$ )

$$\rho_d = (100 \times \rho) / (100 + w) \quad (8)$$

missä  $\rho_d$  on näytteen kuivatiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\rho$  on näytteen tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $w$  on näytteen vesipitoisuus prosentteina (%)

### 3.1.5 Betonimurskeen kulutuskestävyyden määrittäminen (micro-Deval – testi)

Puhtaan 0/16 ja 31,5/50 mm betonimurskeen sekä Sorilan 0/16 mm kalliomurskeen kulutuskestävyys määritettiin micro-Deval testillä työohjeen SFS-EN 1097-1 mukaisesti. Koe tehtiin 31,5 – 55 mm ja 10 -14 mm raekokoiselle betonimurskeelle sekä 10 -14 mm kalliomurskeelle.

Testissä 500 g pestyä ja kuivattua 10/14 mm raekokoista näytettä pyöritettiin teräsmyllyssä veden ja 5000 g teräskuulien läsnäollessa 12 000 kertaa 100 rpm nopeudella. Myllyssä jauhautunut näyte pesuseulottiin 1,6 mm siivilällä, rakeet uunikuivattiin 105°C lämpötilassa ja > 1,6 mm rakeiden massa punnittiin. Näytteen micro-Deval arvo laskettiin kaavan 9 avulla kahdelle rinnakkaisen näytteen keskiarvona.

$$M_{DE} = \frac{500-m}{5} \quad (9)$$

missä  $M_{DE}$  on micro-Deval arvo  
m on 1,6 mm siivilälle jääneen näytteen kuivamassa

### 3.1.6 Iskunkestävyyden määrittäminen Los Angeles-menetelmällä

Betonimurskeen iskunkestävyyttä kuvaava Los Angeles -luku määritettiin työohjeen SFS-EN 1097-2 mukaisesti sekä 10/14 mm raekokoiselle kalliomurskeelle, että betonimurskeelle kahdesta rinnakkaisen näytteen keskiarvona.

Pestyä ja kuivattua 10/14 mm raekokoista testinäytettä 5000 g ja teräskuulia 4800 g pyöritettiin teräsrummussa 500 kierrosta vakio nopeudella 30 rpm.

Teräsrummussa jauhautunut näyte pesuseulottiin 1,6 mm siivilällä, rakeet uunikuivattiin 105°C lämpötilassa ja > 1,6 mm rakeiden massa punnittiin. Näytteen Los Angeles –luku laskettiin kaavan 10 avulla kahdelle rinnakkaisen näytteen keskiarvona.

$$LA = (5000 - m)/50 \quad (10)$$

missä LA = Los Angeles –luku  
m = 1,6 mm seulalle jäänyt massa grammoina

### 3.1.7 Dynaamiset ja staattiset kolmiakselialikokeet

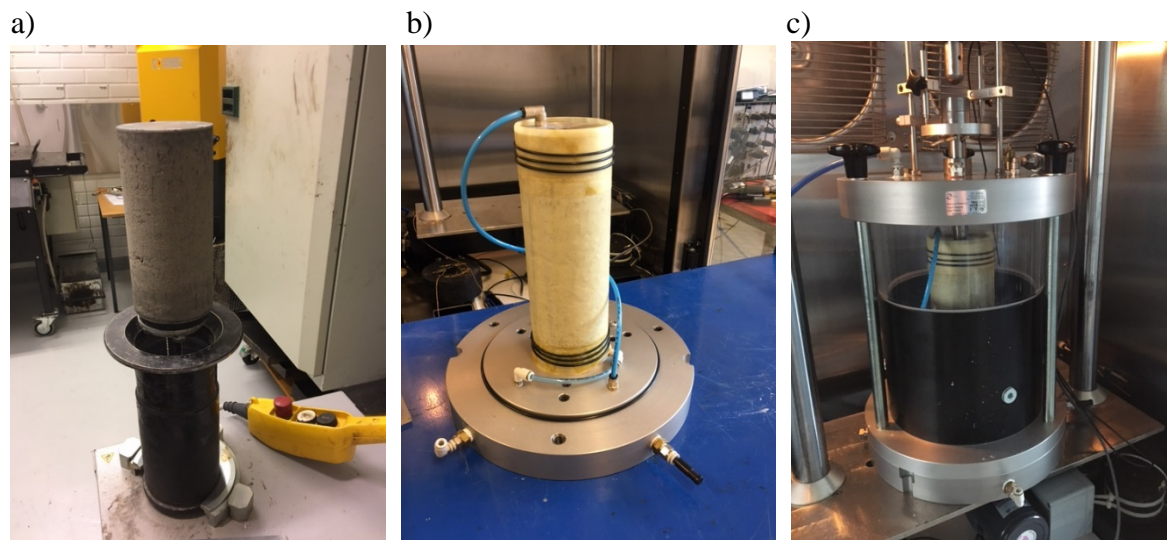
Rakeisuudeltaan 0/16 mm betonimurskeelle ja kalliomurskeelle määritettiin dynaamisilla kolmiakselialikokeilla pysyvää aksiaalista muodonmuutosta  $\epsilon_p^1$  [%] ja resiliient moduulia  $M_r$  [MPa] soveltaen työohjetta SFS-EN 13286-7:2004. Betonimurskeen pysyvä muodonmuutos ja resiliient moduuli määritettiin 0, 1, 7 ja 28 vrk ikäisille näytteille ja kalliomurskeelle 0 vrk ikäiselle näytteelle.



Uunikuivattuun noin 3200 g betonimurskenäytteeseen lisättiin vesi 8 paino-% ja referenssimateriaalina toimineeseen Sorilan kalliomurskeeseen noin 3500 g lisättiin 3,5 paino-% vettä, sekoitettiin ja annettiin kosteuden tasaantua 0,5 h peitettynä. Näyte esitiivistettiin sullomalla > 200 mm korkeaan ja halkaisijaltaan 100 mm terässylinteriin ja näyte punnittiin. Näyte kiertotiivistettiin terässylinterissä ICT 150 RB laitteella noin 170 kN/m<sup>2</sup> leikkausvoimalla, 500 kierrosta 30 rpm kierrosnopeudella 200 ± 5 mm loppukorkeuteen. Laite ilmoitti näytteen korkeuden 0,1 mm tarkkuudella. BeM näytteet tiivistettiin 92 - 97 % ja KaM näytteet 95 - 99 % maksimikuivatilavuuspainoon. KaM näytteet tiivistettiin tiiviimmäksi heikomman koossa pysymisen ja testien onnistumisen vuoksi (Kuva 6).

Tiivistetty näyte puristettiin sylinteristä hydraulisen männän avulla ja näyte sullottiin ylä- ja alapäästä avonaiseen ilmatiiviiseen noin 0,5 mm paksuun lateksi-kalvoon. Lateksikalvon sisään näytteiden molempiin päihin asetettiin huokoslevyt. Lateksikalvon ylä- ja alapää tiivistettiin testikehiä vasten o-renkailla. (Kuva 7)

Näyte asetettiin ilmatiiviiseen näytekammioon. Kuormituslaitteen männän yläosan kammiion ulkopuolista teräslattaan vasten asetettiin männän aksiaalista asemaa mittaavat liikesensorit (linear variable displacement transducers, LVDT). Kokeissa ei käytetty radiaalista muodonmuutosta mittaavia antureita.



Kuva 7. a) Kiertotiivistetty BEM-näyte, b) lateksikalvoon sullottu ja vakuumiletkuihin kiinnitetty näyte sekä c) näyte ilmatiiviissä kuormituskammiossa kuormituskappissa. Näytteen korkeus 200±5 mm ja halkaisija 100 mm.

Näytettä kuormitettiin UTM 25 laitteella dynaamisesti eripituisia kuormitussarjoja riippuen testattiinko resilient moduulia vai pysyvää muodonmuutosta. Sykliset kuormitustestit tehtiin avoimella konsolidaatiolla (drained). Kuormitustapahtuma ja testidatan keruu suoritettiin servo-ohjatulla keskusyksiköllä, joka oli yhteydessä pc:hen datan tallennusta ja käyttöliittymä tapahtuvan kokeen ohjauksen kautta. Kuormitus ja muodonmuutostiedot tallennettiin .csv-tiedostomuotoon.

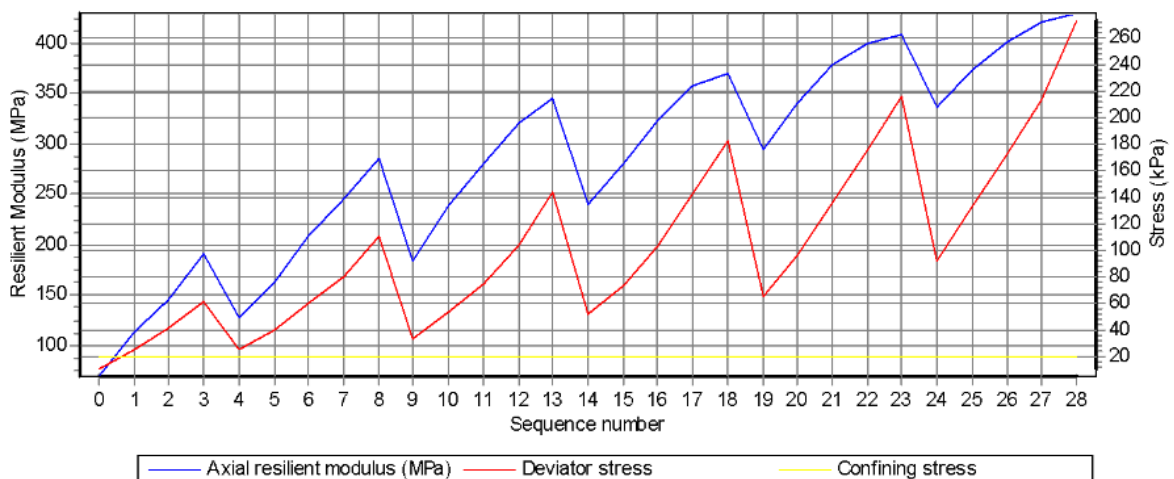
Resilient moduuli -testin kuormitustaaajuutena käytettiin 1 Hz ja pysyvän muodonmuutoksen testauksessa pitkäkestoisen kuormitussarjan vuoksi 10 Hz. Resilient moduulin testauksessa yhdellä kuormitusportaalla näytettä kuormitettiin 100 kertaa, pysyvän muodonmuutoksen

testissä 60000 kertaa. Molemmissa testeissä sellipaine  $\delta_3$  pidettiin testin ajan vakiona ja molemmissa testeissä käytettiin useampaa pystyjännityksen  $\delta_1$  kuormitusporrasta.

Resilient moduuli testin jälkeen näytteille tehdyssä staattisessa kuormituskokeessa sellipaine ja staattinen pystykuormitus nostettiin vakioarvoon, jonka jälkeen näytettä kuormitettiin vakioaika.

## Resilient moduulin määrittäminen

BeM ja KaM 0/16 mm -näytteiden resilient moduuli  $M_r$  [MPa] määritettiin kiertotiivistyistä korkeudeltaan  $200 \pm 5$  mm ja halkaisijaltaan 100 mm näytteille työohjeen SFS-EN 13286-7:2004 periaatteiden mukaan, kuitenkin testilaitteen rajoitteiden puitteissa. Testilaitteistolla ei päästy sellipaineessa tavoite-arvoihin, joten kokeet suoritettiin 20 kPa vakiosellipaineessa. Näytteitä säilöttiin muovipussilla peitettynä huoneen lämpötilassa noin  $+21$  °C valolta ja kosteudelta suojattuna. 0, 1, 7 ja 28 vkr ikäisille BeM näytteille ja 0 vkr ikäisille KaM näytteille tehtiin taulukon 2. mukainen syklinen kuormitusarja resilient moduulin määrittämiseksi. Testi koostui 29 kuormitusportaasta (Taulukko 2 ja Kuva 8). Kokeen 29 kuormitusportaassa oli pääjännitysten summan 10 eri kuormitustasoa (Taulukko 2), joiden mukaan näytteille piirrettiin pääjännitysten summan (kPa) resilient moduuliarvojen  $M_r$  kuvaaja.



Kuva 8. UTM –laitteiston resilient moduulitestin sellipaine, aksiaalinen jännitys ja resilient moduuli-kuvaaja kuormitussekvensseittäin

Näytettä kuormitettiin  $\delta_3 = 20$  kPa sellipaineessa ja vaihtelevalla aksiaalisella jännityksellä  $\delta_1$  kullakin kuormitusportaalla 100 kertaa, 1 Hz kuormitustaajuudella. Kuormitusyksi koostui 0,1 s mittaisesta kuormituksesta ja 0,9 s lepovaiheesta. Yhteensä 29 kpl kuormitusportaasta valittiin 10 kuormitustasoa, joissa deviatorisen jännityksen arvo muuttui. Kokeessa kirjattiin ylös laitteiston laskemat resilient moduulin arvot kullekin kuormitusportaalalle ja arvoista piirrettiin kuvaaja resilient moduulien arvoista deviatorisen jännityksen funktiona.

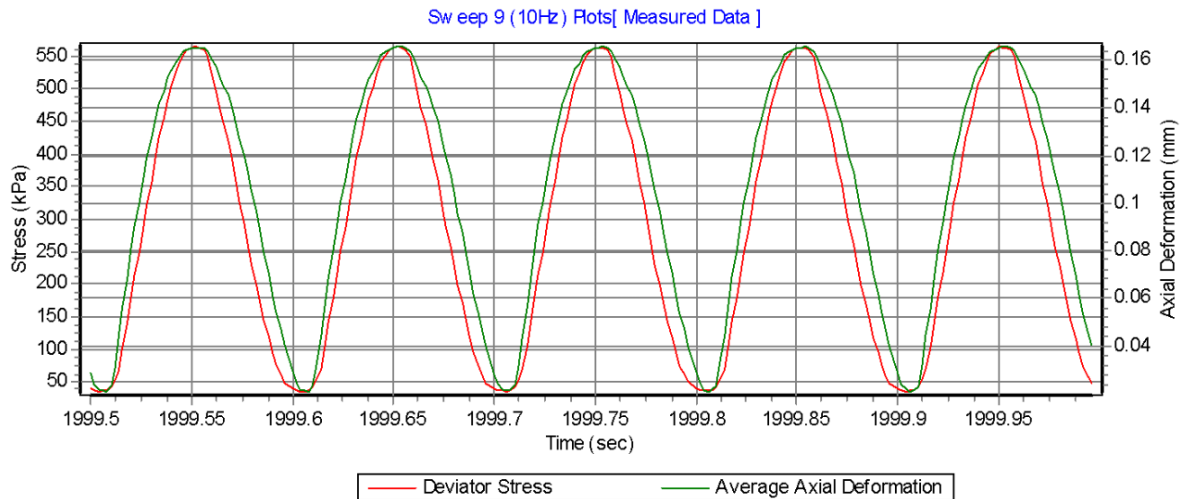
*Taulukko 2. Resilient moduulin määrittämisessä käytetyt sellipaineen  $\delta_3$ , aksiaaliset  $\delta_1$  ja pääjännitysten summien arvot.*

Sykli numero	Sellipaine $\delta_3$ [kPa]	Pystyjännitys $\delta_1$ [kPa]	Deviatorinen jännitys d [kPa]	Sykli numero	Sellipaine $\delta_3$ [kPa]	Pystyjännitys $\delta_1$ [kPa]	Deviatorinen jännitys $\delta_d$ [kPa]
1)*	20	20	0	15)	20	70	50
2)*	20	35	15	16)	20	90	70
3)*	20	50	30	17)	20	120	100
4)*	20	70	50	18)	20	160	140
5)	20	35	15	19)*	20	200	180
6)	20	50	30	20)	20	90	70
7)	20	70	50	21)	20	120	100
8)*	20	90	70	22)	20	160	140
9)*	20	120	100	23)	20	200	180
10)	20	50	30	24)*	20	240	220
11)	20	70	50	25)	20	120	160
12)	20	90	70	26)	20	160	140
13)	20	120	100	27)	20	200	180
14)*	20	160	140	28)	20	240	220
				29)*	20	300	280

*Resilient moduuli -kuvaajissa käytettiin \* -merkittyjä kuormitustasoja ja niitä vastaavia resilient moduulin arvoja.*

## **Pysyvän aksiaalisen muodonmuutoksen $\epsilon_1^P$ määrittäminen**

Eri ikäisten BeM näytteistä ja 0 vrk ikäisistä KaM näytteiden pysyvän muodonmuutoksen kokeet tehtiin kolmelle rinnakkaiselle näytteelle. Näytteitä kuormitettiin yhteensä 180000 kertaa aksiaalisella 10 Hz syklisellä kuormituksella. Kuormitus sarja koostui kolmesta aksiaalisen jännityksen kuormitusportaasta. Aksiaalisen jännityksen  $\Delta\delta_1$  kuormitusportaat olivat 250, 380 ja 530 kPa. Sellipaine oli jokaisella kuormitusportalla  $\delta_1=50$  kPa ja kuormitus-syklin minimijännitys  $\delta_{1min} = 35$  kPa, jolloin kuormituksen  $\delta_{1max}$  jännityksenä käytettiin 35 kPa suurempaa arvoa kuin tavoitejännitys. Kokeen aksiaalisenä jännityksenä minimi arvona käytettiin  $\delta_{1min} > 0$  kPa, jotta kuormitus-sykli olisi stabiili. Käytetty kuormitus-pulssi oli sini-muotoinen (sinusoidal) ja kuormitustaajuutena käytettiin 10 Hz (Kuva 9).



Kuva 9. Aksiaalisen muodonmuutoksen ja pystyjännityksen muutos ajan funktiona syklisessä kuormituksessa. Kuormitustaajuus 10 Hz ja kuormitusjaksen kesto 0,1 s.

Näytettä kuormitettiin kussakin kuormitusportaassa yhteensä 60000 kertaa kolmessa 20000 kuormituskerran sekvenssissä ennen kuin siirryttiin seuraavaan kuormitusportaaseen. Jokaisen kuormitusvaiheen jälkeen oli minuutin lepoa ennen seuraavaa kuormitusvaihetta. Kuormitus oli jaettu kolmeen sekvenssiin yhden 60000 toiston kuormituksen sijaan laitteiston muistikapasiteetin rajallisuuden takia. Yhteensä näytettä kuormitettiin syklisesti 180000 kertaa, yhdeksässä kuormitussekvenssissä kolmella eri kuormitusportalla (Taulukko 3).

Taulukko 3. Pysyvän muodonmuutoksen testauksessa käytetyt sellipaineen  $\delta_3$ , deviatorisen ja aksiaalisen  $\delta_1$  jännityksen arvot

Sellipaine $\delta_3$ (kPa)	Aksiaalinen minimijännitys $\delta_{1min}$ (kPa)	Aksiaalinen maksimijännitys $\delta_{1max}$ (kPa)	Aksiaalinen pysyväjännitys $\delta_1 = \delta_{1max} - \delta_{1min}$ (kPa)	Deviatorinen jännitys $\delta_d = \delta_1 - \delta_3$ (kPa)	Pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	Kuormituskerrat
50	35	285	250	200	350	20000
50	35	285	250	200	350	20000
50	35	285	250	200	350	20000
50	35	415	380	330	480	20000
50	35	415	380	330	480	20000
50	35	415	380	330	480	20000
50	35	565	530	480	630	20000
50	35	565	530	480	630	20000
50	35	565	530	480	630	20000
Yhteensä						180000

Näytteen muodonmuutosta mitattiin automaattisesti ICM 25 laitteiston avulla 50 kertaa yhden kuormitusjaksen aikana eli 500 kertaa sekunnissa. Pysyvä muodonmuutoksen arvo määritettiin syklin minimijännityksen aikana  $\delta_{1min} = 35$  kPa. Pysyvän muodonmuutoksen kuvaaja piirrettiin kullekin näytteelle kolmen rinnakkaisen kokeen keskiarvona valiten kaikille näytteille samat kuormitussekvenssien numerot. Syklinumerot valittiin niin että ne antavat riittävästi informaatiota muodonmuutoksesta ja ne on datankäsittelyllisesti helpompia poimia testauslaitteiston .csv -tiedostomuotoisesta toistuvasta taulukko-datasta.

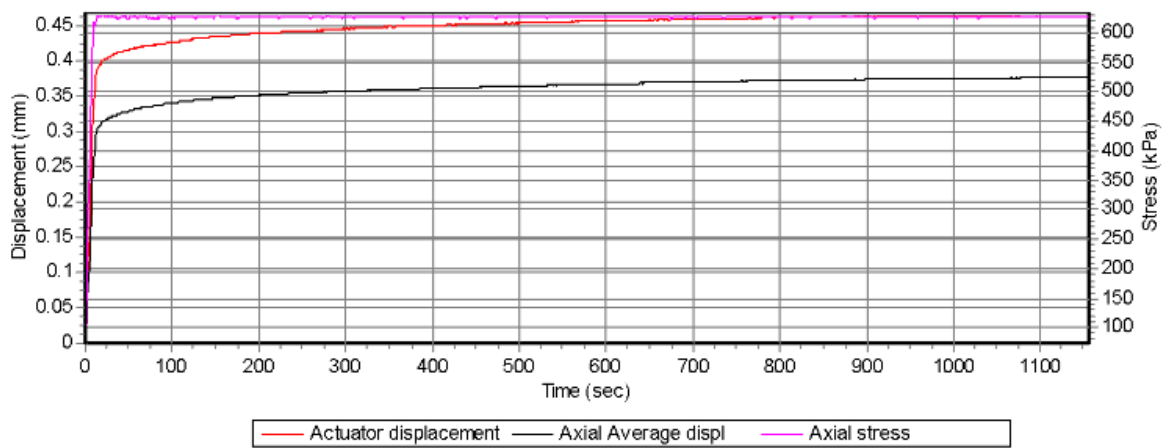
Näytteen pysyvän aksiaalinen muodonmuutos  $\epsilon_1^p$  määritettiin testilaiston siirtymien ja näytteen tunnetun korkeuden perusteella testisarjasta (Kaava 11. SFS-EN 13286-7:2004). Muodonmuutos laskettiin kolmella eri kuormitusportalla;  $\Delta\delta_1 = 280$  kPa, 380 kPa ja 530 kPa peräkkäin yhteen kuvaajaan valikoiden kattava otos syklinumeroiden 1 - 180000 arvoista. Kokeessa ei mitattu radiaalista muodonmuutosta.

$$\varepsilon_1^p = (L_r(N) / L_0) \quad (11)$$

missä  $\varepsilon_1^p$  on pysyvä aksiaalinen muodonmuutos [%]  
 $L_r(N)$  aksiaalinen muodonmuutos N. syklin jälkeen [mm]  
 $L_0$  on näytteen korkeus alussa [mm]

## Muodonmuutoksen määrittäminen staattisessa kuormituksessa

Resilient moduulin määrittämisessä olleille 0,1, 7 ja 28 vrk ikäisille BeM näytteille ja 0 vrk KaM-näytteille määritettiin staattisella  $\delta_1 = 625$  kPa pystyjännityksellä ja sellipaineella  $\delta_3 = 20$  kPa aksiaalista  $\varepsilon_1$  muodonmuutosta 1000 s kestoisen kuormituksen aikana. Muodonmuutoksesta piirrettiin muodonmuutoskuvaaja kuormitushetkellä 0; 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 400, 500, 800 ja 1000 sekuntia kuormituksen alkamisen jälkeen. Näytteille tehtiin muodonmuutoskuvaaja ajan funktiona



Kuva 10. Staattisen kuormituksen muodonmuutoskuvaaja ajan funktiona. Näytteen korkeus kuormituksen alussa  $200 \pm 5$  mm. Pystyjännitys 625 kPa.

## 3.2 *Betonimurskeen sekoituskokeet, kuvaus ja vierasaineiden määrän arviointi*

### 3.2.1 Käytetyt materiaalit

Sekoituskokeissa käytettiin puhdasta betonimursketta, johon lisättiin eri painoprosenttia punatiiltä, puuta, metallia, muovia sekä kelluvina materiaaleina eri tilavuuksilla painoyksikkö kohti ( $\text{cm}^3/\text{kg}$ ) XPS-eristelevyn paloja ja lasivillaa (Kuva 8). Kokeiden betonimurske oli Parma-betonin Tuusulan Hyrylän betonimurskaamon puhdasta BeM I luokan 0/45 mm raekokoista betonimursketta. Sekoituskokeissa käytetty 0/90 mm raekokoinen betonimurske oli puhtaan 0/45 mm betonimurskeen ja laboratoriossa murskatun 45/90 mm betonimurskeen seos

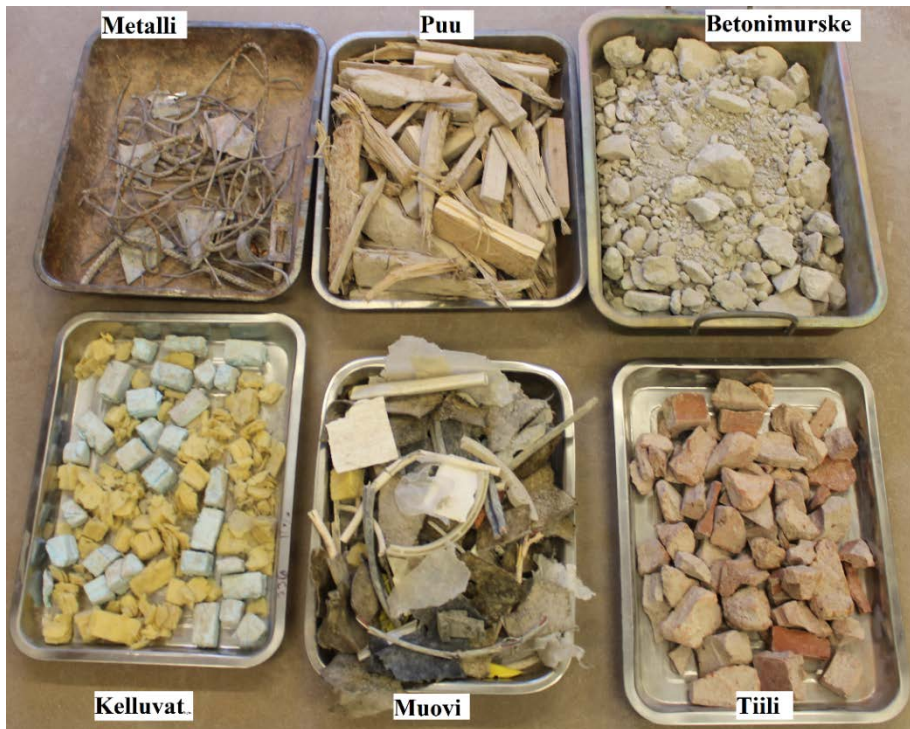
Muut käytetyt jättemateriaalit punatiili (murskattu reikätiili ja kokotiili), metallijäte (4 – 8 mm vahvuisten harjateräksen ja verkon palat ja sekalainen metallin kappaleet), muovi (pakkausmuovin palat, PVC-putken pätkät, kumibitumi), puu (lankun ja laudan palat, oksan ja juurten palat) ja kelluvat jätteet (sininen XPS-levy, lasivilla) on kerätty Ruduksen Helsingin Konalan betonimurskausasemalta sekä murskattu/paloiteltu laboratoriossa ehjistä rakennusmateriaaleista. (Kuva 11.)

Kuvattavien näytteiden tiilipitoisuudet olivat 0, 5, 10, 20 ja 30 paino-%. BeM 0/45 mm -murskeeseen lisättävä tiilijäte oli raekooltaan 8 – 70 mm on murskattua punaista reikätiiltä ja kokotiiltä. Tätä pienempää tiilimursketta ei lisätty huonon tunnistettavuuden takia, mutta tiiliä jauhaantui näytteeseen sekoituskokeiden edetessä. Murskattu reikätiili on muodoltaan usein pitkittäistä, murskattu kokotilli massamaisempaa. Reikätiili murskattiin niin että tiilen paloihin ei jäänyt reikiä tai onteloita.

Kokeeseen valittu muovi on satunaista rakennusjättemuovia kerätystä ja palotellusta Muovien kappaleiden muoto ja koko vaihteli yli 100 x 100 mm kokoisten kalvomaisista pakkausmuovipaloista, 150 mm putken pätkistä ja muutaman sentin kokoiisiin levymäisiin tiiviste/kumibitumipaloihin. (Kuva 11.)

Käytetty puu oli kuivaa 50 – 150 mm kokoisia laudan, oksan ja puun juuren osia. Kelluvana jätteenä käytettiin sinistä 1 - 5 cm XPS-levyn palasia, lasivillaa ja harmaata solumuovia. Lisättävän kelluvan materiaalin dimensiot mitattiin viivaimella ennen paloittelua ja lisäystä.

Tiilen tiheyden kirjallisuusarvo on reikätiilelle 1200 – 1700  $\text{kg}/\text{m}^3$  (RT 38089, 2011) ja täysitiilelle 1800 – 2000 (RT 38089, 2011), kiinteälle betonille 2200 – 2400 (Betoinormit 2017), betonimurskeelle noin 1600  $\text{kg}/\text{m}^3$  (itse mitattu), rakennuspuu männylle ja kuuselle 300 – 550 (Puuinfo 2017), raudalle 7850  $\text{kg}/\text{m}^3$  (Teräsrakenneyhdistys 2017), muilla rakennusmetalleilla vaihtelee samoin kuin muovilla ja kelluvilla materiaaleilla. Esimerkkinä kelluvista materiaaleista solumuovien tyypillinen tilavuuspaino on 30 - 50  $\text{kg}/\text{m}^3$  (Finnfoam 2017).



Kuva 11. Sekoituskokeissa käytettyjä materiaaleja

### 3.2.2 Materiaalien sekoitus

Kuvauslaatikossa kuvattava betonimurske 86 kg (0/45 mm sekä 0/90 mm kuivana ja märkänä) ja sekoitettavat jätemateriaalit (murskattu punainen tiili, puun palat, metallin palat, muovin kappaleet ja kelluvat materiaalit) punnittiin/mitattiin, sekoitettiin lattialle muovin päällä ja lapiotiin kuvauslaatikkoon mahdollisimman homogeenisesti. (Kuva 12) Näytelaatikko kuvattiin laboratorion ulkopuolella luonnon valossa päiväaikaan. Sekoituskoe toistettiin samalla vieras-ainemäärällä ja valokuvattiin. Kuvaussarjaa jatkettiin lisäämällä ja sekoittamalla punnittu/mitattu vierasaineita sekoitus-ohjelman (Taulukko 4.) mukaisesti.

Kuivat näytteet sekoitettiin uunikuivasta betonista ja kuivista vierasaineista. Märät näytteet tehtiin käyttämällä 86 kg kuivaa betonimursketta ja kuivia vierasaineita ja kastelemalla näyte pinnalta. Näytelaatikon dimensiot olivat 600 x 600 x 200 mm.



Kuva 12. Näytelaatikko ja materiaalin sekoitus muovin päällä. Kuvassa näkyy hienomman ja rakeisemman betonimurskeen lajittumista ja punatiiltä.

### 3.2.3 Kuvatut BeM I-IV -näytesarjat ja vierasaineiden pitoisuudet

BeM I - IV näytesarjat (Taulukko 4) kuvattiin sekä kuivista ja märistä betoninäytteistä rae-  
kokojakaumilla 0/45 mm ja 0/90 mm eri vierasainepitoisuuksilla. Kutakin näytesarjan näy-  
tettä kuvattiin kaksi kertaa sekoittaen näyte välillä muovialustan päällä.

Taulukko 4. BeM I-IV ja luokittelemattomien näytteiden kuvauksen näytesarjat: BeM-luokka  
ja lisätyt vierasainemäärät.

Näyte	BeM-luokka	Tiilien osuus [paino- %]	Muut ma- teriaalit [paino-%]	Kelluvat ma- teriaalit [cm <sup>3</sup> /kg]	Muiden ja kelluvien materiaalien erittely					Kelluvien tilavuus-%
					Muut [paino-%]			Kelluvat [cm <sup>3</sup> /kg]		
					Puu	Rauta	Muovi, Kumi	XPS	Solumuovi yms.	
1	I	0	0,45	0	0,15	0,15	0,15	0	0	0
2	I	0	0,45	5	0,15	0,15	0,15	2,5	2,5	0,8
3	I	0	1	5	0,33	0,33	0,33	2,5	2,5	0,8
4	II/III	5	1	5	0,33	0,33	0,33	2,5	2,5	0,8
5	II/III	5	1	7,5	0,33	0,33	0,33	3,75	3,75	1,2
6	II/III	10	1	10	0,33	0,33	0,33	5	5	1,6
7	IV	20	1	10	0,33	0,33	0,33	5	5	1,6
8	IV	30	1	10	0,33	0,33	0,33	5	5	1,6
Ei sallittavat, huomattavan roskainen										
9	Luokittelematon*	30	3,0	10	1	1	1	5	5	1,6
10	Luokittelematon*	30	5,0	10	2	2	1	5	5	1,6

\*) Luokittelemattomien näytteiden muiden materiaalien kuin tiili paino-% ylitti betonimurskeen laatuluokan  
BeM IV raja-arvot.



### 3.2.4 Kuvaaminen ja kuvien käsittely

Kuvaaminen suoritettiin ulkona vaihtelevissa sääolosuhteissa helmi- ja maaliskuussa klo 9 - 16 välisenä aikana, kuitenkin välttämällä lumi-, räntä- ja vesisadetta sekä suoraa auringonpaistetta. Sää kuvausaikaan oli vaihteleva.

Kuvauskalustona käytettiin Canon EOS 600D kameraa, EFS 18-55 mm objektiivia ja kameran rakennettua puukehikkojalustaa. (Kuva 13.)



*Kuva 13. Kuvausjalusta, kuvauslaatikko, lattamitta ja kuvausasetelma*

Kameran jalustana toimi kolmijalka, joka oli kiinnitetty laudasta rakennettuun kehikkoon. Kuvasten aikana näytelaatikko siirrettiin kuvauskehikon alapuolelle. Näytelaatikon pinta oli noin 93 cm etäisyydellä kameran linssistä. (Kuva 13) Näytelaatikon reunalle asetettiin näytteen tunnistustietolappu, referenssivärikortti ja mittalatta. Kamera-asetuksina käytettiin linsin säätöä 18 mm ja kameran automaattista kuvaustilaa. Kuvien lopulliset korjaukset ja balansointi tehtiin jälkikäteen kuvankäsittelyohjelmalla (Kuva 14).

Jpg-muotoisia kuvia käsiteltiin Photoshop CC 2016 -ohjelmalla. Kuva rajattiin koelaatikon ympäriltä, kuviin tehtiin linssikorjaus EFS 18-55 mm linssille, kuvan suoristus ja valkotasapainokorjaus valokuvassa käytetyn referenssiväriin-kortin avulla. Kuviin lisättiin tunnistamista varten nimiö, joista selvisi BeM -laatuluokka, maksimiraekoko ja lisättyjen jätteiden määrä. (Kuva 14)

a)



b)

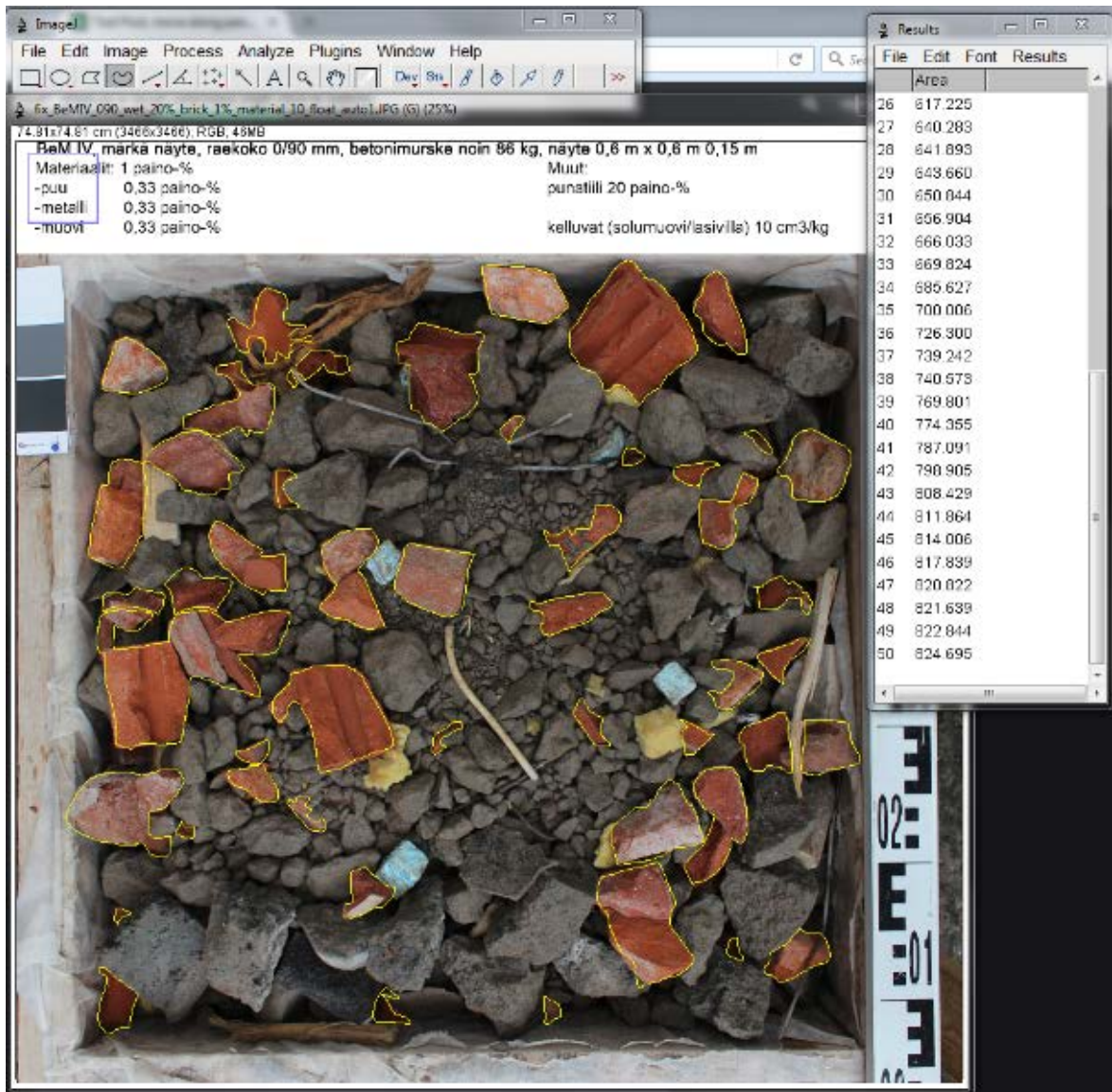
ISO 1, kuiva näyte, rakekoko 0/80 mm, betonimurske noin 88 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m  
 Materiaalit: 0,5 paino-%  
 Muut:  
 -puu 0,15 paino-%  
 -metalli 0,15 paino-%  
 -muovi 0,15 paino-%  
 kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



Kuva 14. a) Käsittelemätön ja b) käsitelty ulkokuva näytetietoineen

### 3.2.5 Jätteiden tunnistaminen betonimurskekuvista

Jätteiden määrää arvioitiin näytekuvista ilmaisen ImageJ -kuvankäsittelysovelluksen avulla. Ohjelman mittaustyökalulle annettiin mittakaava, jätteepartikkelit rajattiin kuvista ja partikkelin pinta-ala laskettiin. Kunkin jätetyypin kokonaispinta-alaa verrattiin näytelaatikon 600 x 600 mm pinnan pinta-alaan. (Kuva 15) Kunkin kuvan jätteiden pinta-alat lisättiin taulukko-ohjelmaan ja tunnetuille ja lasketuille jätemäärille tehtiin tilastollista vertailua.



Kuva 15. ImageJ-ohjelman käyttöä murskeiden ja jätteiden pinta-alojen mittaamisessa. Kuvassa rajattuna jättepartikkeleita ja oikealla partikkelien pinta-aloja  $\text{cm}^2$ .

### 3.2.6 Jätteiden lisätyt määrät ja mitatut pinta-alat prosentit

Kuvista mitattuja eri jätelaatujen pinta-ala-prosentteja verrattiin tunnettuihin lisättyihin jättemääriin (Taulukko 2.) Tiiltä oli neljää eri painoprosenttia 5, 10, 20 ja 30 %, muita vierasaineita kuin tiiltä oli kahta eri painoprosentti-arvoa näytemäärää kohti sekä kelluvia epäpuhauksia kolmea eri tilavuusmäärää massayksikköä kohti ( $\text{cm}^3/\text{kg}$ ).

2D-kuvista lasketuille tiilen pinta-ala-% arvoille laskettiin muunnos painoprosentiksi. Muunnoksessa tiilen kiintotiheytenä käytettiin  $1900 \text{ kg/m}^3$  ja betonin  $2300 \text{ kg/m}^3$ , muunto-kertoimeksi saatiin 0,826. (Kaavat 12.)

$$\text{tiilen tiheyskorjauskerroin} = \frac{\text{tiilen kiintotiheys kg/m}^3}{\text{betonin kiintotiheys kg/m}^3} = \frac{1,9 \text{ kg/m}^3}{2,3 \text{ kg/m}^3} = 0,826 \quad (12.1)$$

BeM näytteiden puulle tiheysarvona käytettiin  $450 \text{ kg/m}^3$  ja raudalle  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Tiheyskorjauskertoimeksi puulle laskettiin betonimurskeen tiheydellä  $1600 \text{ kg/m}^3$  arvo 0,28 ja raudalle arvo 4,9.

$$\text{puun tiheyskorjauskerroin} = \frac{\text{raudan kiintotiheys kg/m}^3}{\text{betonimurskeen tiheys kg/m}^3} = \frac{0,45 \text{ kg/m}^3}{1,6 \text{ kg/m}^3} = 0,28 \quad (12.2)$$

$$\text{raudan tiheyskorjauskerroin} = \frac{\text{raudan kiintotiheys kg/m}^3}{\text{betonimurskeen tiheys kg/m}^3} = \frac{1,9 \text{ kg/m}^3}{1,6 \text{ kg/m}^3} = 4,9 \quad (12.3)$$

### 3.2.7 Tilastolliset muuttujat pinta-ala- ja paino-% -arvoille

Tunnetuille ja kuvista mitatuille vierasainemäärille laskettiin pinta-alaprosenttien keskiarvo eri tunnetuilla vierasaineiden määrillä kaavan 13 mukaisesti, keskihajonta SD luokitellulle aineistolle kaavan 14 mukaisesti, havaintojen pinta-alaprosenttien ala ( $Q_1$ )- ja yläkvartiilit ( $Q_3$ ), mediaani sekä minimi- ja maksimi-arvot.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

missä  $x_i$  = havaintoarvo  
 $n$  = havaintojen lukumäärä

$$SD = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)} \quad (14)$$

missä  $SD$  = luokitellun muuttujan keskihajonta  
 $\bar{x}$  = havaintoarvojen keskiarvo

Muiden tilastollisten muuttujien selityksiä:

Minimi on havaintojen pienin arvo

Alakvartiili  $Q_1$  on arvo, jota pienempiä arvoja havainnoista on 25 % ,

Mediaani havaintojen keskimmäisin arvo tai kahden keskimmäisen arvon keskiarvo

Yläkvartiili  $Q_3$  on arvo, jota pienempiä arvoja havainnoista on 75 %

Maksimi on havaintojen suurin arvo

Tiilen edellä mainittujen muuttujien arvot ovat koostettuna tulokset osion taulukkoon x, puu, rauta ja muovi taulukkoon x. ja kelluvat taulukkoon x.

### 3.2.8 Sekoitusaineistolle tehdyt tilastolliset kuvaajat

BeM sekoitusnäytteiden tiili- ja muille vierasainepitoisuuksille piirrettiin kullekin vierasainelle omat Box & Whisker –kuvaajat mediaanin, kvartiilien, keskihajonnan, minimi ja maksimiarvojen perusteella. (kuvat 18, 25-28).

Tiilelle luokitellulle näytteille (5, 10, 20 ja 30 paino-% tiiltä) piirrettiin pistekuvaajat koko aineiston pohjalta ja aineistolle tehtiin lineaarinen sovite olettaen, että tiilen pinta-ala-% kasvaa lineaarisesti näytteeseen tiiltä lisäämällä. laskettiin lineaarinen regressio

BeM näytteiden tiilen havaintoaineistolle tehtiin lineaarinen sovite  $y = a + bx$  pienimmän neliösumman menetelmällä MS Excelin automaattisella PNS-sovitteella sovite asetettiin alkamaan origosta, jolloin sovituksen yhtälö on muotoa  $y = bx$ . Lineaarille mallille laskettiin korrelaatiokerroin  $R_{xy}$ , ja mallin selitysastetta kuvaava korrelaatiokertoimen neliö  $R^2$ :

$$R = \frac{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2\right) \left(\frac{1}{n-1} \sum (y_i - \bar{y})^2\right)}} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \sqrt{S_{yy}}} \quad (15)$$

missä

$n$  = näytemäärä

$x_i$  = näytteeseen lisätyn tiilen paino-%

$y_i$  = näytteen havaittu tiilen pinta-ala-% tai pinta-alasta laskettu paino-%

$\bar{x}$  ja  $\bar{y}$  = havaintojen keskiarvot

$S_{xx} = S_x^2$  = näytteiden tunnettujen vierasainemäärien summien neliö

$S_{yy} = S_y^2$  = havaintoarvojen summien neliö

$S_{xy} = S_y * S_x$  = näytteiden tunnettujen vierasainemäärien ja havaintoarvojen pinta-alaprosenttien summien kertominen

## 4 Tulokset ja pohdinta

### 4.1 Betonimurskeen mekaaniset ominaisuudet

#### 4.1.1 Raekokojakauma

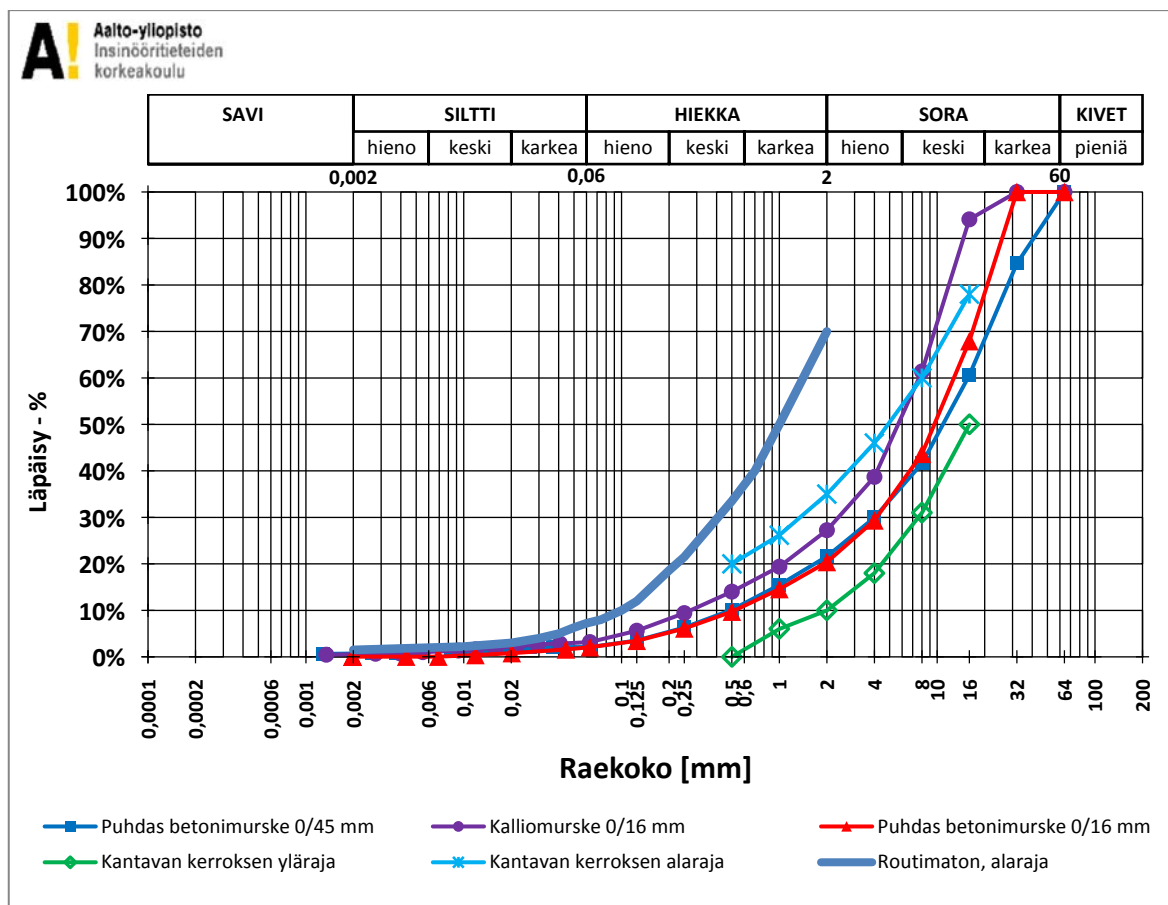
Sekä 0/16 mm betonimurskeen, että Sorilan kalliomurskeen raekokojakauma vastasivat routimattomia maalajeja (Taulukko 5 ja Kuva 16). Kantavassa kerroksessa käytettävän kalliomurskeen hienoainepitoisuuden sallittu enimmäisarvo on 7 % ja soramurskeiden 9 % (InfraRYL 2009). Kokeissa kuivaseulonnalla saatu BeM 0/45 mm hienoainespitoisuus oli 1,7 %, BeM 0/16 mm 2,5 % ja KaM 0/16 mm hienoainepitoisuus oli 3,2 %. Kokeiden kalliottä betonimurskeiden rakeisuudet kuuluivat luokkaan G<sub>0</sub>- ja ne ovat routimattomia materiaaleja. (Taulukko 5) Kalliomurskeen rakeisuuskäyrä nousee hieman pystyyn eli se sisältää paljon rakeista materiaalia (Kuva 16).

*Taulukko 5. Betonimurskeen ja kalliomurskeen rakeisuuden mitatut läpäisevyysprosentit seuloilla ja sitomattoman kantavan kerroksen materiaalien rakeisuuden ohjealueet.*

Seulakoko (mm)	BeM 0/45 mm (läpäisy-%)	BeM 0/16 mm (läpäisy-%)	KaM 0/16 mm (läpäisy-%)	*Jakava 0/32 mm G <sub>o</sub> Ohjealue	**Jakava 0/32 mm G <sub>A</sub> Ohjealue	Routimattoman yläraja, kalliomurske (InfraRYL)
32	83,2		100			
16	56,5	100	94,1	50...78	55...85	
8	36,3	58,8	61,4	31...60	35...65	
4	24,4	35,3	38,7	18...46	22...50	
2	16,9	22,9	27,3	10...35	15...40	70
1	12,1	16,3	19,4	6...26	10...35	50
0,5	8,1	11,2	14	0...20	0...20	33,5
0,25	5,1	7,1	9,4			21,5
0,125	2,9	4,2	5,6			12
0,063	1,7	2,5	3,2			7

\*G<sub>o</sub> = avoin rakeisuus, kapea ohjealue (Suomessa yleisemmin käytetty)

\*\*G<sub>A</sub> = normaali, kapea ohjealue (muualla Euroopassa yleisemmin käytetty) (InfraRYL 2009).



Kuva 16. Betonimurskeen 0/45 ja 0/16 mm sekä kalliomurskeen 0/16 mm rakeisuusjakamakäyrät. Kantavan kerroksen G<sub>0</sub>-luokan ala- ja yläraja sekä routimattoman materiaalin alarajojen arvot löytyvät taulukosta 5.

Kallio ja betonimurskeen rakeisuus selvitettiin kuivaseulomalla. Murskeet jauhautuvat hie-man siivilöitäessä, jolloin hienomman aineen määrä lisääntyy verrattuna lähtömateriaaliin. Kuivaseulontaa tarkempi seulontamenetelmä on märkaseulonta, mutta siitä luovuttiin näissä kokeissa laiteteknisistä ja ajankäytöllisistä syistä. Kuivaseulontojen perusteella KaM- ja BeM-materiaalit kuuluvat molemmat raekokojakauman ja hieno-ainespitoisuuden perusteella routimattomiin, InfraRYL:n luokan G<sub>0</sub> kantavan kerroksen murskeisiin.

#### 4.1.2 Betoni- ja kalliomurskeen kiintotiheys

Betoni- ja kalliomurskeen kiintotiheys määritettiin 4/12 mm kokoisista uunikuivista rakeista. Betonimurskeella kiintotiheydeksi saatiin  $\rho_d = 2608 \text{ kg/m}^3$  ja kalliomurskeen  $\rho_d = 2671 \text{ kg/m}^3$ . Betonimurskeen 0/45 mm kiintotiheys kotimaisessa kirjallisuudessa on 2340 – 2650  $\text{kg/m}^3$  (Varin 2007; Eerola 2001). Kalliomurskeen tyypillinen kiintotiheys on  $\rho_d = 2670 \text{ kg/m}^3$ , mutta kirjallisuusarvot kiintotiheydelle vaihtelevat 2600 - 3000  $\text{kg/m}^3$  riippuen kivi-materiaalin mineraalikoostumuksesta. Hienompirakeisella betonimurskeella kiintotiheyden arvot voivat olla isompirakeista materiaalia matalampia hienoaineksen huokoisuuden vuoksi.

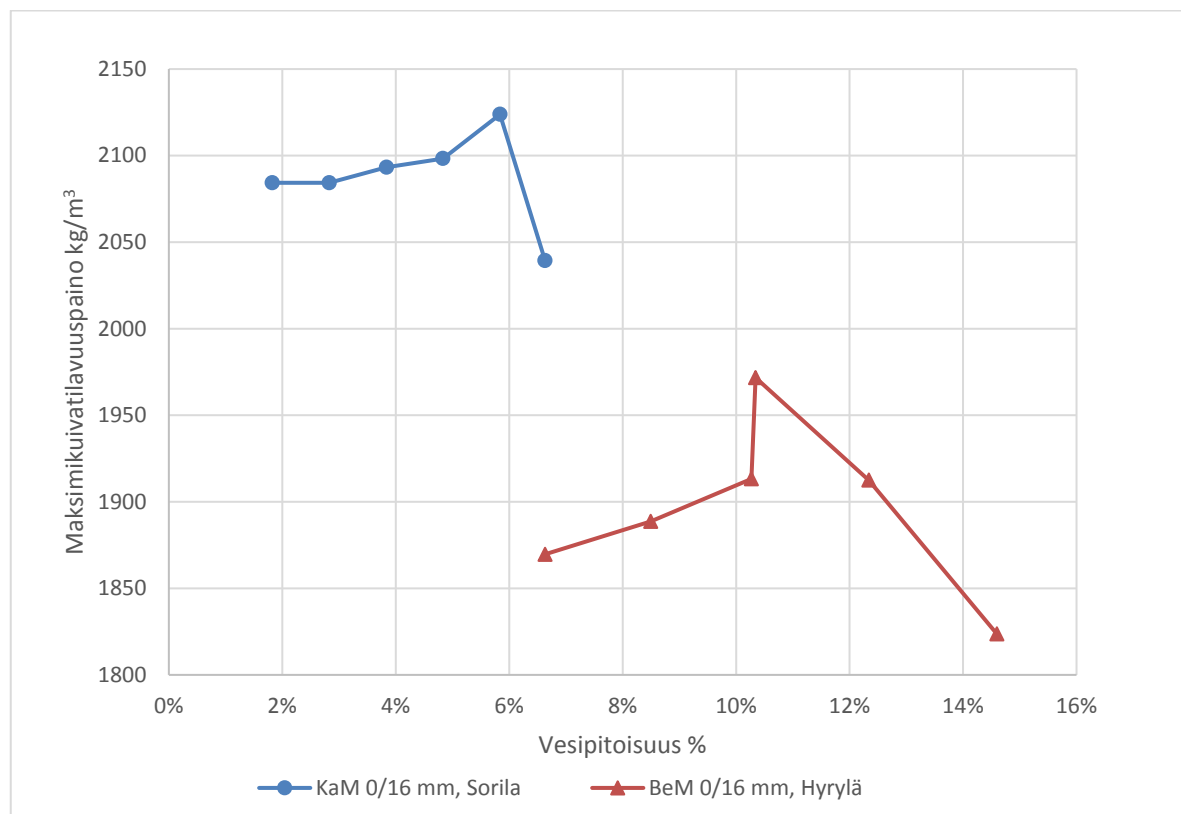
### 4.1.3 Betoni- ja kalliomurskeen maksimikuivatilavuuspaino (proctor-tiiveys)

Betonimurskeen maksimi kuivatilavuuspainoksi saatiin parannetulla proctor-kokeella 1972 kg/m<sup>3</sup> ja kalliomurskeen vastaavaksi 2134 kg/m<sup>3</sup>. (Taulukko 6. ja Kuva 17). Parannetussa proctor-kokeessa betonimurskeelle käytettiin vesipitoisuuksia 6,6 - 14,6 paino-% ja kalliomurskeelle 2,8 - 6,6 paino-%.

Taulukko 6. Betonimurskeen ja kalliomurskeen maksimikuivatilavuuspaino (proctor-tiiveys) eri vesipitoisuuksilla

BeM		BeM I-III kirjallisuusarvo		KaM	
Vesipitoisuus paino-%	Kuivatilavuuspaino (kg/m <sup>3</sup> )	*Optimivesipitoisuus paino-%	*Maksimi kuivatilavuuspaino (kg/m <sup>3</sup> )	Veden määrä paino-%	Kuivatilavuuspaino (kg/m <sup>3</sup> )
6,63 %	1869,7			2,83 %	2084,3
8,49 %	1888,7			3,84 %	2093,2
<b>10,34 %</b>	<b>1971,7</b>	8 -12	1750 -2050	4,83 %	2098,3
12,34 %	1912,5			<b>5,84 %</b>	<b>2123,8</b>
14,59 %	1823,7			6,63 %	2039,3

\* BeM I–III kirjallisuusarvot (Helsinki 2015)



Kuva 17. Kallio- ja betonimurskeen kuivatilavuuspaino parannetulla proctor-kokeella. Kuvaaja piiretty taulukon 6. arvoilla. Betonimurskeen maksimikuivatilavuuspaino oli 1972 ja kalliomurskeella 2124 kg/m<sup>3</sup>.



Jotta näytteen maksimi kuivatilavuuspainolle saataisiin luotettavampi arvo, proctor-kokeita tulisi suorittaa isommalle määrälle näytteitä. Sullonnan jälkeen proctor-muotin pinnan tasmaaminen pienessä muotissa rakeiselle 0/16 mm materiaalille on epätarkkaa ja tulkinnan varaista.

Automaattiset proctor-kokeet ja viidellä rinnakkaisella näytteellä kullakin vesipitoisuuksilla yhden näytteen sijasta antaisivat tarkemman arvion betoni- ja kalliomurskeen kuivatilavuuspainosta.

#### 4.1.4 Betonimurskeen kulutuskestävyyden määrittäminen micro-Deval testillä

Betoni- ja kalliomurskeen kulutuskestävyys määritettiin kahdelle rinnakkaiselle näytteelle micro-Deval testillä. Kalliomurskeen kulutuskestävyyden kirjallisuusarvot vaihtelevat riippuen kivimateriaalin mineraalikoostumuksesta. Kulutuskestävyyden määrittäminen on yleisempää päällysteiden tekemisessä käytetyille murskeille, raide sepelille ja tierakenteen sitomattomille rakeisille materiaaleille.

*Taulukko 7. Kalliomurskeen ja betonimurskeen mitatut micro-Deval arvot ja kirjallisuusarvot*

Mursketyyppi	Mitattu M <sub>DE</sub> 10/14 mm	Mitattu M <sub>DE</sub> 31,5/50 mm	Kirjallisuusarvo * M <sub>DE</sub> 10/14 mm	Kirjallisuusarvo ** M <sub>DE</sub> 31,5/50 mm	Kantavan kerroksen laatuvaatimus (InfraRYL 2009)
KaM	21,4		4-15	4 - 15	<30
BeM	44,3	10,3	28		

\* ja \*\* lähde: (Varin 2007)

Kokeissa saatu betonimurskeen micro-Deval – arvo on huomattavasti suurempi kuin kirjallisuuden arvo ja ylittää kantavan kerroksen materiaaleille asetetun laatuvaatimuksen. Kokeissa saatu kalliomurskeen micro-Deval-arvo on myös melko korkea, mutta alittaa kantavan kerroksen laatuvaatimusten sallitun arvon ylärajan.

#### 4.1.5 Betonimurskeen iskunkestävyys LA-kokeella

Betonimurskeen 10/14 mm ja kalliomurskeen 10/14 mm kokoisilla rakeilla määritetty iskunkestävyys kuvaava Los Angeles –luku määritettiin LA-testillä kahdella rinnakkaisella näytteellä. Kalliomurskeella saatiin LA-luku = 25,1 ja betonimurskeella 32,1. Kokeissa molempien murskeiden arvot vastasivat kirjallisuusarvoja (Taulukko 8.) Kalliomurskeen LA-luku täyttää kantavan kerroksen 0/32 mm kalliomurskeen iskunkestävyyden vähimmäisvaatimukset. (Taulukko 8.) Kalliomurskeen iskunkestävyys vaihtelee kivimateriaalin mineraalikoostumuksen mukaan. Betonimurskeen iskunkestävyys on kalliomurskeita pienempi, johon tuen betonin sideaineen heikommasta kulutus- ja iskunkestävyydestä. Näissä kokeissa betonimurskeen iskunkestävyys kuvaava LA-arvo ylitti InfraRYL-ohjeen kantavan kerroksen materiaaleille asetetun enimmäisarvon 30. Tarkemman LA-luvun arvo saavutettaisiin useammalla rinnakkaisella näytteellä.

*Taulukko 8. Kalliomurskeen ja betonimurskeen mitatut LA-luvut ja kirjallisuusarvot. Kantavan kerroksen 0/32 mm raekokoisen kalliomurskeen enimmäisarvo.*

Mursketyyppi	Mitattu LA-luku 10/14 mm	Kirjallisuusarvo LA-luku 10/14 mm	LA-luku kantavan kerroksen enimmäisarvo
KaM	25,1	10 – 30 *	30 ***
BeM	32,1	27 – 39 **	

\* ja \*\* lähde: (Varin 2007)

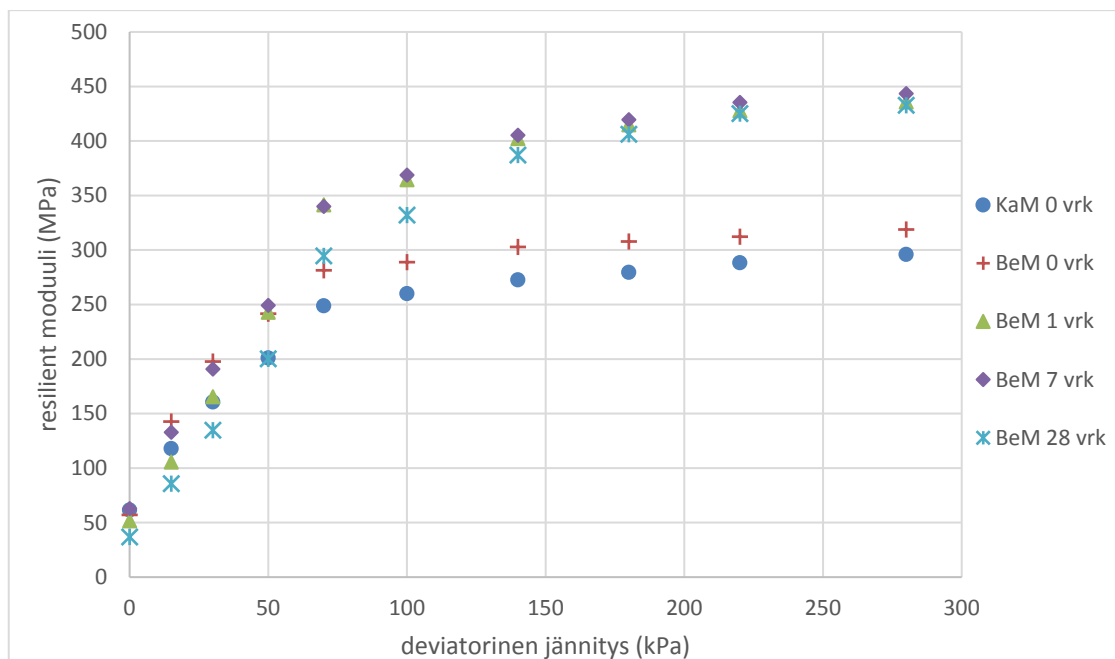
\*\*\* lähde: (InfraRYL 2009)

#### 4.1.6 Resilient moduuli

Resilient moduuli  $M_r$  (MPa) määritettiin 0 vrk ikäisille kalliomurskenäytteille ja 0, 1, 7 ja 28 vrk ikäiselle betonimurskenäytteille syklisellä kolmiaksaali laitteistolla kolmelle rinnakkaiselle näytteelle. Taulukossa on kokeissa käytetyt sellipaineita ja deviatoriset jännityksen ja ja mitatut resilient moduulin  $M_r$  (MPa) arvot.

*Taulukko 9. KaM 1 vrk ja BeM 0, 1, 7 ja 28 vrk näytteiden resilient moduulin  $M_r$  arvot eri deviatorisen jännityksen arvoilla. Sellipaine kaikissa kuormitusportaissa oli 20 kPa.*

Selli- paine (kPa)	Aksiaali- nen pysty- jännitys (kPa)	Deviatori- nen jänni- tys (kPa)	Pääjänni- tysten summa $\theta$ (kPa)	KaM 0 vrk $M_r$ (MPa)	BeM 0 vrk $M_r$ (MPa)	BeM 1 vrk $M_r$ (MPa)	BeM 7 vrk $M_r$ (MPa)	BeM 28 vrk $M_r$ (MPa)
20	20	0	60	6,5	57,1	51,6	62,7	36,8
20	35	15	75	117,8	142,6	105,5	132,7	85,6
20	50	30	90	160,5	197,7	165,4	190,8	134,7
20	70	50	110	201,0	241,5	242,9	249,2	200,2
20	90	70	130	248,8	281,3	341,4	340,0	294,5
20	120	100	160	259,9	288,8	364,4	368,7	332,0
20	160	140	2000	272,5	302,8	402,2	405,2	387,1
20	200	180	220	279,5	307,8	414,8	419,5	406,1
20	240	220	280	288,3	312,1	427,7	435,3	425,0
20	300	280	340	295,8	318,8	435,7	443,4	432,7



Kuva 18. KaM 1 vrk ja BeM 0, 1, 7 ja 28 vrk näytteiden resilient moduulin arvot (MPa) eri deviatorisen jännityksen (kPa) arvoilla. Sellipaine kaikissa kuormitusportaisissa oli 20 kPa taulukon 9 mukaisesti.

Testimenettelyssä päästiin vain 20 kPa sellipaineisiin, jolloin deviatorinen jännitys muodostui suurimmaksi osaksi aksiaalisesta pystyjännityksestä. Standardissa SFS-EN 13286-7:2004 muuttuvilla sellipaineen arvot resilient moduuli -testissä ovat 20 – 150 kPa.

Kokeissa matalimmat resilient moduulin arvot olivat kalliomurskeella ja 0 vuorokauden ikäisillä kalliomurskenäytteillä. Suurimmat resilient moduulin arvot olivat 7 vrk ikäisillä BeM näytteillä. Tuoreen betonimurskeen E-moduuli ja deformaatio-ominaisuudet ovat kalliomursketta vastaavia.

Kokeissa betonimurskeen resilient moduulin arvot todettiin kalliomurskeen vastaavia paremmiksi, mutta kokeissa ei todettu samanlaista betonimurskeen lujittumista 28 vrk ikäisissä näytteissä, mitä pysyvän muodonmuutoksen testinäytteillä todettiin. 28 vrk ikäiset BeM näytteet olivat päässeet hieman kuivumaan säilytyksen aikana huoneen lämpötilassa riittämättömän näytteiden suojaamisen vuoksi, jolloin näytteissä oli havaittavissa kuivumista.

Kokeiden tulokset eivät ole aikaisempien kirjallisuudessa olleiden testien kanssa täysin vertailukelpoisia, sillä kokeessa käytetyt sellipaineet eivät olleet kuormituslaitteistosta johtuvien rajoitteiden vuoksi standardin SFS-EN 13286-7:2004 mukaisia. Kirjallisuudessa mm. Arm 2003 resilient moduuli kokeissa käytetyt pystyjännitykset ja sellipaineet ovat olleet suurempia, mitä tässä testissä.

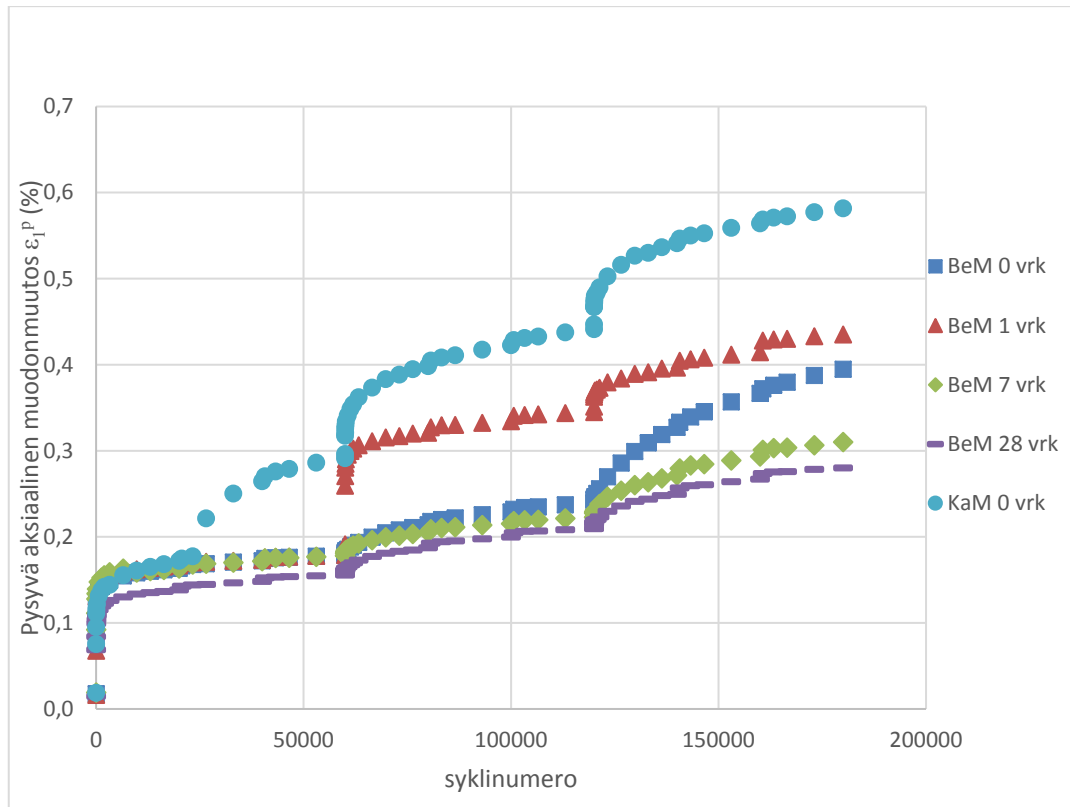
#### 4.1.7 Pysyvä muodonmuutos dynaamisessa kuormituksessa

Betonimurskeen ja kalliomurskeen pysyvä aksiaalinen muodonmuutos  $\varepsilon_1^P$  (%) määritettiin kolmella rinnakkaisella 0 vuorokauden ikäisestä kalliomurskenäytteellä ja kolmella rinnakkaisella 0, 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisellä betonimurskenäytteellä. Betonimurskenäytteet olivat proctor-tiiveydeltään 93 - 97 % ja kalliomurskenäytteet 95 - 99 %. Kokeessa käytettyjen näytteiden kalliomurskenäytteen vesipitoisuudet olivat 3 - 3,5 % ja betonimurskeen 6,7 - 8,4 paino-%.

Kalliomurskenäytteiden pysyvä aksiaalinen muodonmuutos 180000 kuormitusyökin jälkeen oli suurempi kuin betonimurskenäytteiden muodonmuutokset (taulukko x). Pienet kynnykset muodonmuutoskuvaajassa 20000 syklin välein johtuvat laitteiston sekvenssien välissä olevasta 1 minuutin lepovaiheesta, jolloin näytteessä tapahtuu hiukan palautuvaa muodonmuutosta, mikä kuroutuu kiinni seuraavan sekvenssin alussa. Tämä johtuu kuormituksesta käytetystä aksiaalisesta minimijännityksestä  $\delta_{1\min} = 35$  kPa, joka menee nolnaan sekvenssien välillä.

*Taulukko 10. Kalliomurskeen ja betonimurskenäytteiden 0 vrk, 1 vrk, 7 vrk ja 28 vrk pysyvä muodonmuutos 180000 kuormitusyökin jälkeen.*

Syklinumero	Aksiaalinen pystyjännitys $\delta_1$ [kPa]	KaM 0 vrk $\varepsilon_1^P$ (%)	BeM 0 vrk $\varepsilon_1^P$ (%)	BeM 1 vrk $\varepsilon_1^P$ (%)	BeM 7 vrk $\varepsilon_1^P$ (%)	BeM 28 vrk $\varepsilon_1^P$ (%)
1	250	0,019	0,018	0,016	0,019	0,015
20000	250	0,172	0,163	0,167	0,163	0,138
40000	250	0,264	0,172	0,173	0,172	0,148
60000	250	0,291	0,178	0,179	0,178	0,156
80000	380	0,398	0,214	0,321	0,205	0,187
100000	380	0,423	0,229	0,334	0,215	0,200
120000	380	0,441	0,239	0,345	0,223	0,209
140000	530	0,541	0,327	0,396	0,271	0,249
160000	530	0,564	0,367	0,414	0,293	0,267
180000	530	0,582	0,395	0,435	0,310	0,280



Kuva 16. KaM 0 vrk ja BeM 0, 1, 7, 28 vrk näytteiden aksiaalinen pysyvä muodonmuutos  $\varepsilon_1^p$  (%) syklisessä aksiaalisessa 250, 380 ja 530 kPa kuormituksessa ja 50 kPa sellipaineessa. Kuormitussyklien kokonaismäärä kuormitussyklejä kussakin kuormitusportaalla 60000 ja yhteensä 180000.

Suurimmat muodonmuutokset kuormituksessa olivat kalliomurskeella ja pienimmät 28 vrk ikäisellä betonimurskeella. Kokeissa 28 vrk betonimurskenäytteen pysyvä aksiaalinen muodonmuutos oli kaksi kertaa kalliomurskenäytettä pienempi ja 1,4 kertaa 0 vrk ikäistä BeM-näytettä pienempi. Betonimurskenäytteissä tapahtui lujittumista 28 vrk aikana, mikä tukee aikaisempia tuloksia betonimurskeen muodonmuutuskokeissa 0/16 mm isommilla raekoilla (Ydrevik 2000). Vuorokauden ikäisen BeM-näytteen pysyvät muodonmuutokset olivat 0 vrk ikäisiä suurempia. Tämä voi johtua näytteiden ympärillä olevan membraanin vuotamisesta, minkä ehjänä pysymistä ei varmistettu testien jokaisessa vaiheessa. Tulos voi olla myös tilastollista hajontaa. Näytteiden ilma- ja vesitiivyyttä ei myöskään varmistettu säilytyksen aikana, vaikka näytteet säilöttiin kahteen muovipussiin käärittynä huoneen lämmössä.

Betonimurskeen kalliomurskettä pienempi aksiaalinen muodonmuutos ja lujittumisesta johtuva muodonmuutoksen pieneminen vastaavat aikaisempia tutkimuksia kyseisillä materiaaleilla (Ydrevik 2000).

Syklisten kuormituskokeiden onnistumiseksi näyte tulee valmistaa niin että membraania vasten asettuvassa näytteen ulkopinnassa on mahdollisimman vähän huokoisia ja isoja rakeita. Näytteen liian rakeinen pinta voi korkeassa sellipaineessa puhkaista kalvon, jolloin näyte on herkempi muodonmuutoksille ja testin epäonnistumiselle.

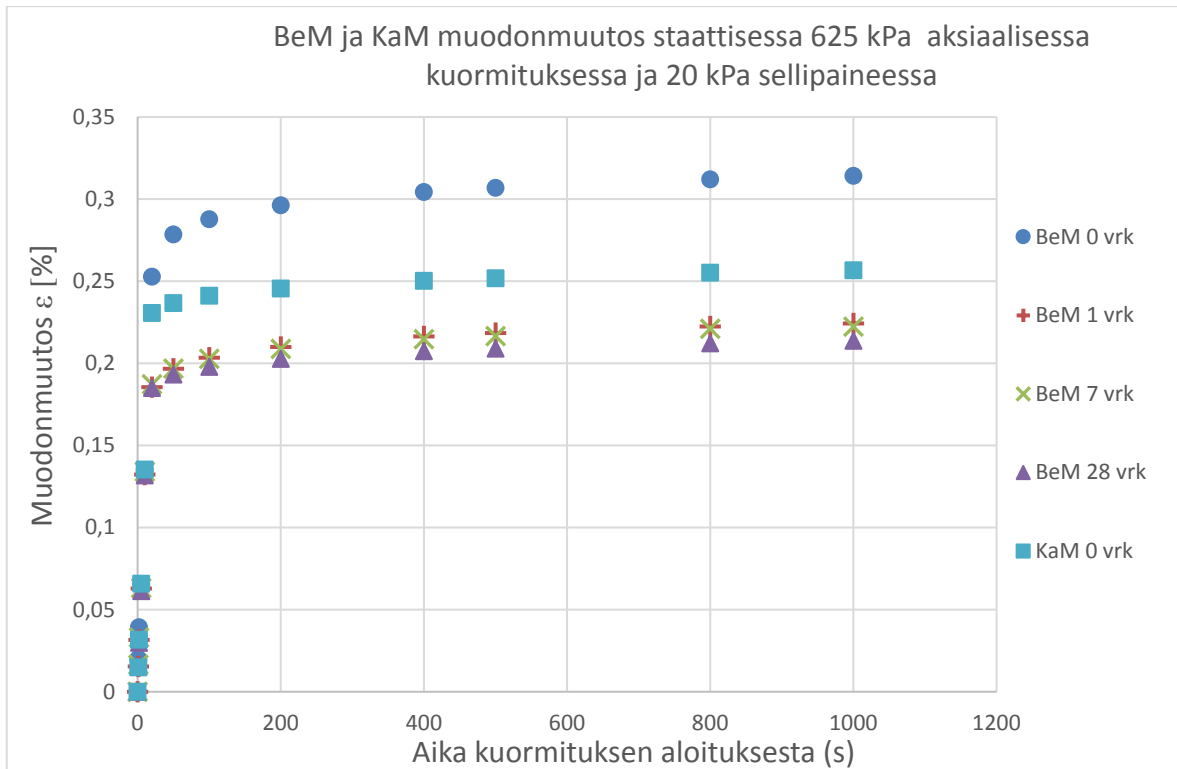
#### 4.1.8 Muodonmuutos staattisessa leikkauskokeessa

Resilient moduuli testissä olleiden betoni- ja kalliomurskenäytteiden aksiaalista muodonmuutosta mitattiin kolmiaksaalilaitteistolla staattisella 625 kPa aksiaalisella kuormituksella 20 kPa sellipaineessa kolmesta rinnakkaisesta näytteestä. Sekä kallio- että betonimurskeen muodonmuutoksesta 90 % tapahtui kuormituksen ensimmäisen 20 sekunnin aikana ja 1000 sekunnin kuormituksen jälkeen muodonmuutosta ei käytännössä enää tapahtunut.

Kalliomurskeen keskimääräinen aksiaalinen muodonmuutos  $\varepsilon_1$  oli 1000 s staattisen kuormituksen jälkeen 0,26 % näytteen korkeudesta ja 0 vuorokauden ikäisen betonimurskeen 0,31 %, 1 vrk ja 7 vrk ikäisellä 0,22 % ja 28 vrk ikäisellä näytteellä 0,21 %.

*Taulukko 11. KaM 0 vrk ja BeM 0, 1, 7, 28 vrk näytteiden aksiaalinen muodonmuutos  $\varepsilon$  (%) staattisessa aksiaalisessa 625 kPa kuormituksessa 20 kPa sellipaineessa. Arvot on laskettu kolmen näytteen keskiarvona*

Aika (s)	KaM 0 vrk $\varepsilon_1$ (%)	BeM 0 vrk $\varepsilon_1$ (%)	BeM 1 vrk $\varepsilon_1$ (%)	BeM 7 vrk $\varepsilon_1$ (%)	BeM 28 vrk $\varepsilon_1$ (%)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.015	0.020	0.015	0.016	0.015
2	0.032	0.039	0.032	0.033	0.030
5	0.066	0.065	0.063	0.063	0.061
10	0.135	0.135	0.132	0.134	0.132
20	0.231	0.253	0.186	0.187	0.185
50	0.237	0.278	0.197	0.197	0.193
100	0.241	0.288	0.203	0.203	0.198
200	0.245	0.296	0.210	0.209	0.203
400	0.250	0.304	0.216	0.215	0.207
500	0.252	0.307	0.218	0.217	0.209
800	0.255	0.312	0.222	0.221	0.212
1000	0.257	0.314	0.224	0.222	0.214



Kuva 17. KaM 0 vrk ja BeM 0, 1, 7, 28 vrk näytteiden muodonmuutos  $\varepsilon_1$  (%) staattisessa aksiaalisessa 625 kPa kuormituksessa 20 kPa sellipaineessa. Arvot on laskettu kolmen näytteen keskiarvona

0 vrk betonimurskenäytteen muodonmuutos staattisessa kuormituksessa oli suurin ja toiseksi suurin oli kalliomurskeella. 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisten betonimurskenäytteiden muodonmuutos on samaa suuruusluokkaa. Staattisten kuormituskokeiden tulosten perusteella ei voida arvioida, tapahtuuko BeM-näytteissä lujittumista vaikka 1 – 28 vrk ikäisten näytteiden muodonmuutos onkin 0 vrk ikäisiä BeM-näytteitä vähäisempää.

## 4.2 Vierasaineiden tunnistaminen 2D-kuvista

### 4.2.1 Yleistä

Laatuluokkien BeM I - IV raekooltaan 0/45 ja 0/90 mm kuivien ja märkien betonimurskenäytteiden 2D-näytekuviin tunnistettiin kukin vierasaine tyyppi erikseen; tiilen, puun, raudan, muovin ja kelluvien materiaalien pinta-ala-prosentit laskettiin 2D-kuvista tunnetuilla lisätyillä vierasaineiden määrillä.

Tiiltä oli neljää eri pitoisuutta, puuta, metallia ja muovia kahta ja kelluvia materiaaleja kolme eri pitoisuutta (Taulukko 12.). Materiaalien kuvista tunnistetut pinta-ala-prosentit muutettiin materiaalien tiheyskorjauksella vastaamaan materiaalien **painoprosentteja** kaavojen 12.1. – 12.3. avulla ja kelluvilla materiaaleilla vastaamaan tilavuusprosentteja. Taulukossa

12 on sekoitunäytteiden lukumäärä kullekin näytetyypille, näytteiden tunnetut vieras-ainemäärät ja 2D-kuvista lasketut kunkin näytteryhmän pinta-ala-% keskiarvot ja tiilen kohdalla lisäksi tiheyskorjattu laskettu painoprosentti.

*Taulukko 12. Kuvattujen näytteiden vierasaineiden tunnetut lisätyt painoprosentit/tilavuudet ja kuvista mitat vierasaineiden pinta-ala-% keskiarvot sekä tiilen pinta-alaprosentista tiheyskorjaamalla saatu paino-% ja näytetyypin näytteiden lukumäärä.*

Näyte- määrä	Lisätty tiili paino- %	Tiilen pinta-ala-% /paino-% keskiarvo	Lisätyt epäpuh- taudet paino-% keskiarvo	Lisätyt kelluvat cm <sup>3</sup> /kg /tilavuus-%	Puun pinta-ala-% keskiarvo	Metallin pinta-ala-% keskiarvo	Muovin pinta-ala-% keskiarvo	Kelluvat pinta- ala%
16	5	7,5 /6,2						
8	10	12,8 /10,6						
8	20	21,9/18,1						
8	30	32,6/26,9						
13			0,15		1,01 %			
47			0,33		2,65 %			
13			0,15			0,14 %		
47			0,33			0,39 %		
13			0,15				0,66 %	
47			0,33				1,74 %	
24				5/0,8				1,38 %
8				7,5/1,2				2,27 %
23				10/1,6				2,10 %

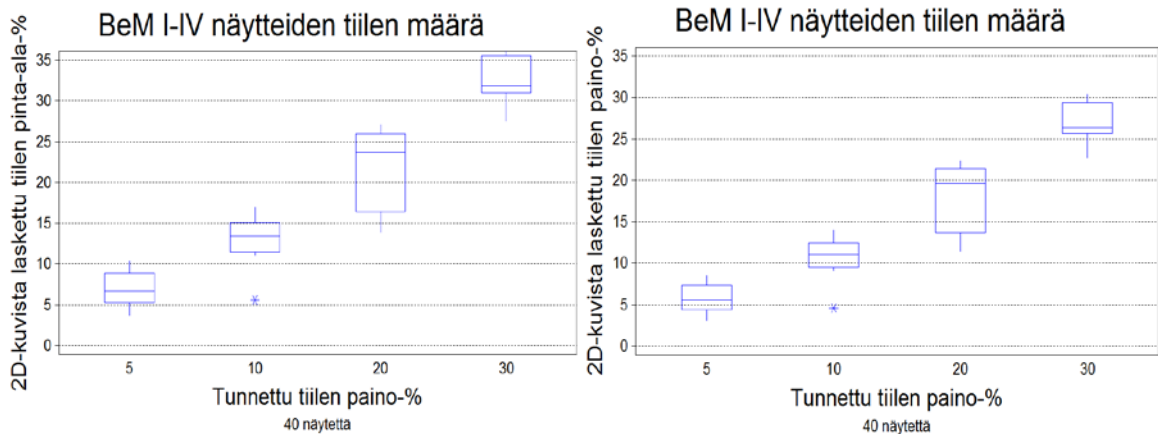
#### 4.2.2 Tiilen tunnistaminen 2D-kuvista

BeM I- IV 0/45 ja 0/90 mm sekä kuivien että märkien näytteiden 2D-näytekuviin laskettiin tiilimurskeen kappaleiden näytelaatikon peittämälle pinta-alaprosentit ja tiheyskorjauksen avulla painoprosentti. Painokorjauksessa tiilen tiheytenä käytettiin 0,826 \* betonin tiheys (Kaava 10). Saman tunnetun vierasaineen painoprosentin näytteille lasketut tiilen pinta-alaprosenttien keskiarvot ja tiheyskorjattu painoprosentti sekä eri tiilen painoprosentti-näytteryhmille lasketut tilastolliset muuttujat; havaintojen minimi- ja maksimiarvo, kvartiilit sekä keskihajonta.

*Taulukko 13. BeM I-IV näytteiden lisätyt tiilen paino-%, näytteiden määrä, 2D-kuvista laskettu tiilen pinta-ala-% ja tummennettuna vastaavat tiheyskorjatut kuvista lasketut paino-% arvot tilastollisille muuttujille.*

Näytteen tunnettu tiilen paino-%	Näyte- määrä	Havaintojen keskiarvo pinta-ala % /paino-%	Minimiarvo	Alakvartiili Q <sub>1</sub>	Mediaani	Yläkvartiili Q <sub>3</sub>	Maksi- miarvo	Keski- hajonta SD
5	16	6,94/5,73	3,72/3,07	5,24/4,33	6,75/5,58	8,94/7,39	10,33/5,72	2,11/1,74
10	8	12,84/10,61	5,56/4,59	11,42/9,43	13,43/11,09	15,13/12,50	16,94/13,99	3,45/2,85
20	8	21,89/18,08	13,89/11,47	16,4/13,55	23,72/19,6	26,04/21,5	27,06/22,35	5,06/4,18
30	8	32,57/26,90	27,5/22,72	30,93/25,55	31,84/26,3	35,58/29,4	36,83/30,42	3,07/2,54

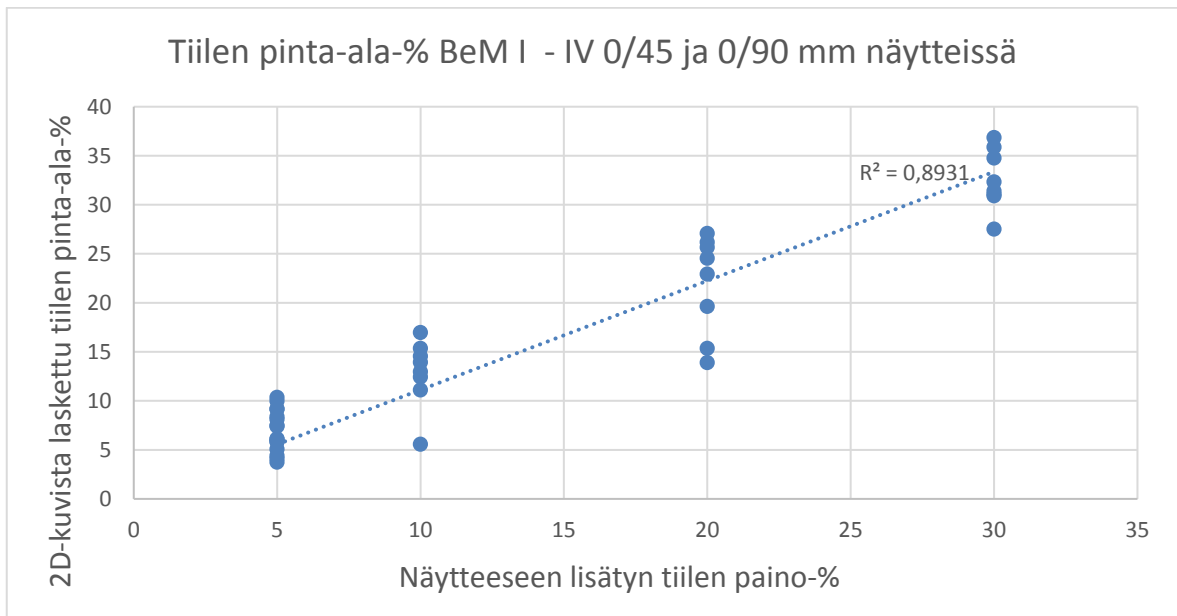




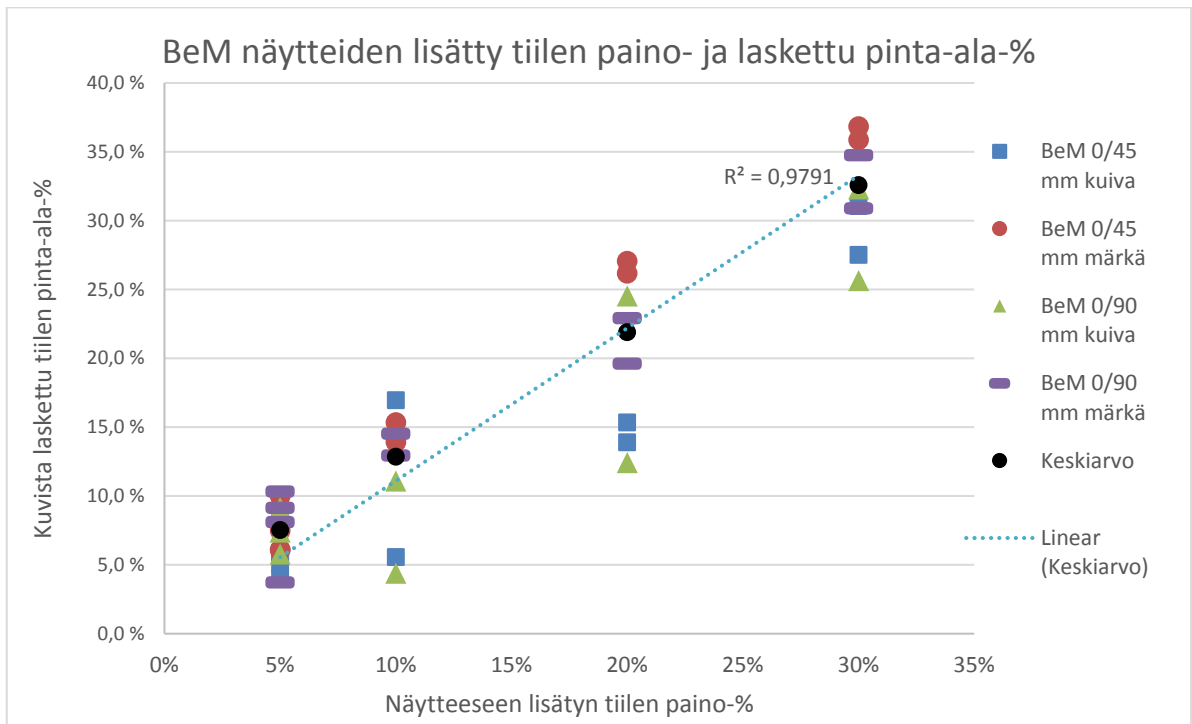
Kuva 18. Box & Whisker-kuvaajat BeM I – IV -näytteiden tiilen tunnetuista paino-% ja 2D-kuvista mitatuista pinta-ala-% ja lasketuista paino-% (Taulukko 13. arvot). Laatikon yläpuolinen viiva kuvaa havaintojen maksimiarvoa, laatikon yläreuna 75 % yläkvartiilia, poikittainen viiva mediaania, laatikon alareuna 25 % alakvartiilia ja laatikon alapuolinen viiva havaintojen minimiarvoa.

Taulukosta 13 ja kuvasta 18 voidaan havaita että, että tiilen painoprosenteilla 20 % näytteiden lasketun tiilen määrän hajonta näytteiden kesken on suurinta. Tiilen painoprosentilla 5 näytteitä oli 16 kpl eli kaksinkertainen määrä verrattuna muihin paino-% luokkiin.

BeM näytteiden tiilen määrille tehty lineaarisen sovituksen korrelaatiokerroin R saa parempia arvoja, kuin sovitetta ei laiteta kulkemaan origon kautta. Tämä ei vastaa kuitenkaan oikeaa tilannetta. Aineistosta puuttuu BeM I-luokan 0 % tiiltä sisältäneet näytteet. BeM I näytteiden mukana ollessa mallin korrelaatiokerroin R olisi suurempi ja mallin selitysaste  $R^2$  olisi parempi.



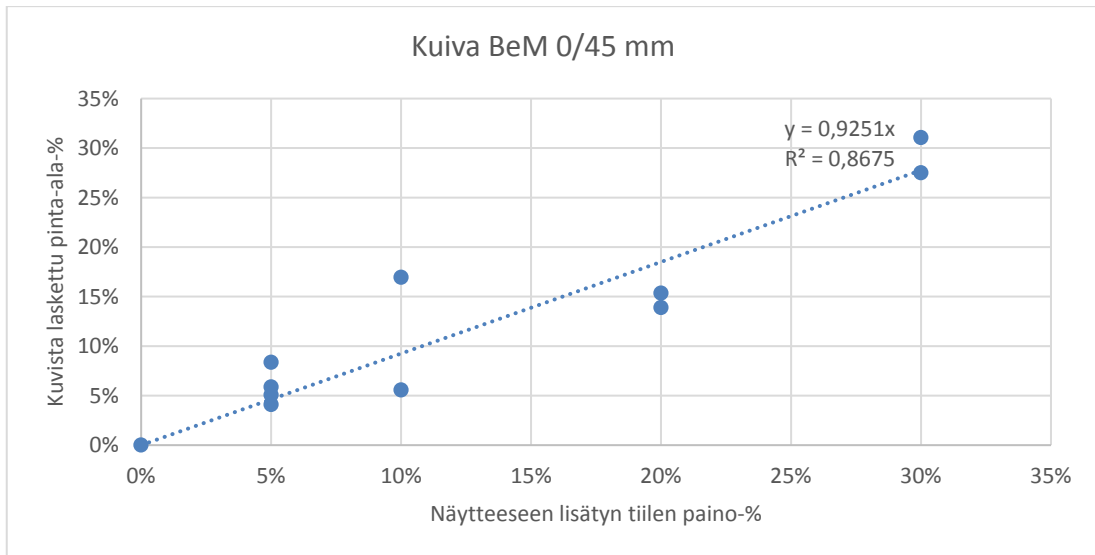
Kuva 19. BeM sekoitusnäytteiden lisätyn tiilen paino-% ja 2D-kuvista laskettu tiilen pinta-ala-%. Korrelaatiokerroin aineistolle  $R = 0,945$  ja selitysaste  $R^2 = 0,893$ . Aineiston kokonaisnäyttemäärä 40, näyttemäärät painoprosenttiluokittain eritelty taulukossa 13.



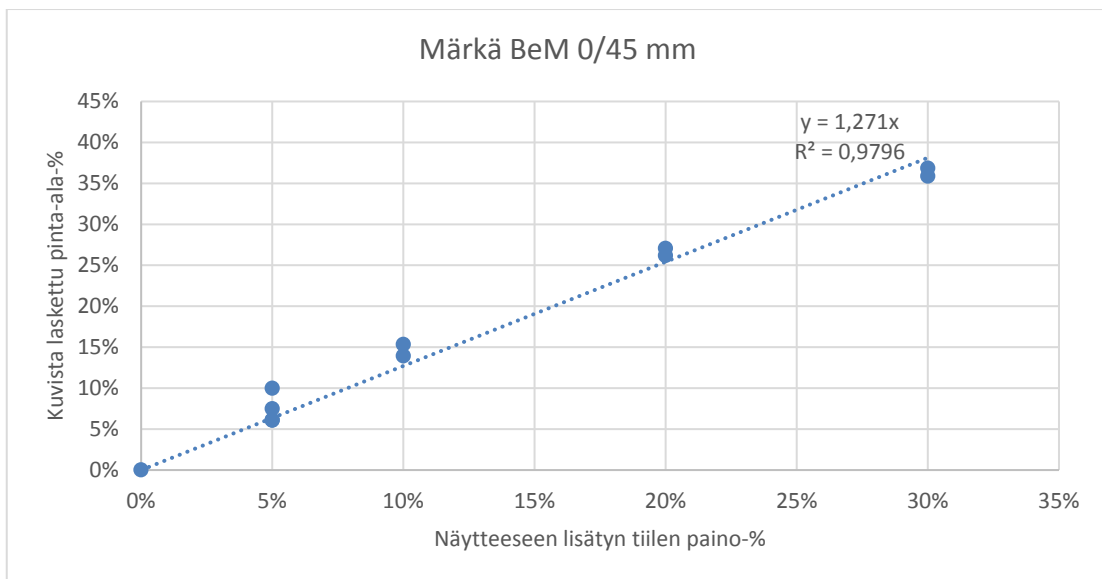
Kuva 20. BeM I – IV 0/45 ja 0/90 mm näytteiden lisätyn tiilen paino-% ja kuvista mitattu tiilen pinta-ala-%. Lineaarinen sovite on tehty mitattujen tiilimurskeiden pinta-ala-prosenttien keskiarvoille. Pienimmän neliösumman suoran (PNS) korrelaatiokerroin koko aineiston ( $n=40$ ) keskiarvoille  $R = 0,989$  ja  $R^2 = 0,979$ .

### BeM I – IV tiilen sekoitusnäytteet luokittain 0/45 ja 0/90 mm sekä kuiva ja märkä

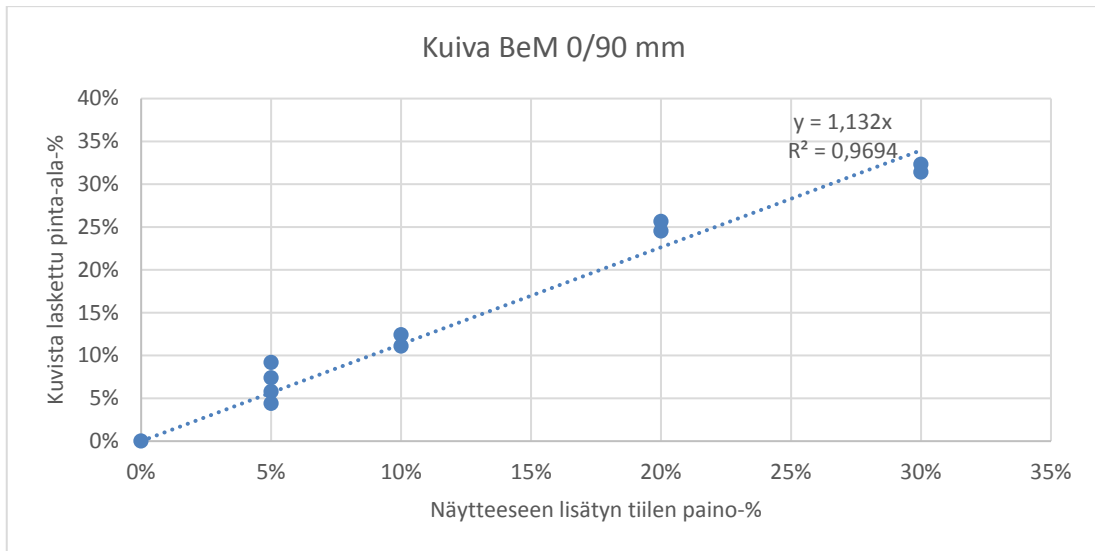
BeM I – IV näytteiden tiilen pinta-ala-% yksilöintiin luokittain 0/45 mm kuiva ja märkä sekä 0/90 mm kuiva ja märkä. Jokaisesta näyteluokasta oli 11 havaintopistettä. 1 kpl 0 % tiilen painoprosentilla, 4 kpl 5 % tiilen painoprosentilla, 2 kpl tiilen painoprosentilla 10 %, 2 kpl tiilen painoprosentilla 20 ja 2 kpl tiilen painoprosentilla 30 %.



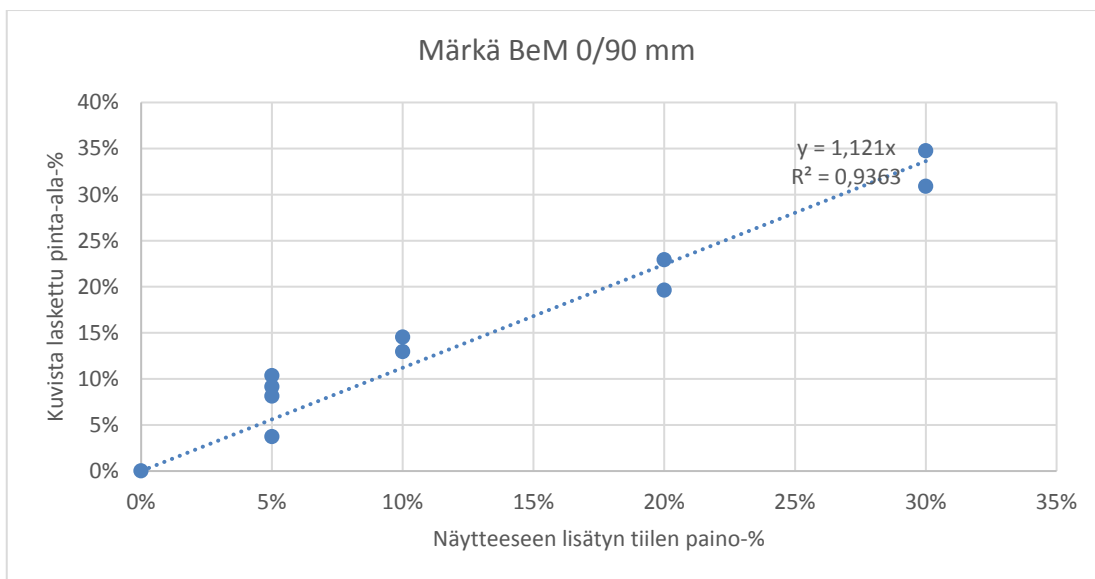
Kuva 21. Kuivien BeM I – IV 0/45 mm näytteiden lisätyn tiilen paino-% ja kuvista mitattu tiilen pinta-ala-%. Kuivien BeM I – IV 0/45 mm painoprosentin ja näytteistä lasketun pinta-alaprosentin selitysaste oli  $R^2 = 0,87$ . Lineaarisen sovituksen avulla näytteiden pinta-alaprosentin ja näytteisiin lisätyn tiilen välinen suhde oli 0,93



Kuva 22. Märkien BeM I – IV 0/45 mm näytteiden lisätyn tiilen paino-% ja kuvista mitattu tiilen pinta-ala-%. Märkien BeM I – IV 0/45 mm painoprosentin ja näytteistä lasketun pinta-alaprosentin selitysaste oli  $R^2 = 0,98$ . Lineaarisen sovituksen avulla näytteiden pinta-alaprosentin ja näytteisiin lisätyn tiilen välinen suhde oli 1,27.



Kuva 23. Kuivien BeM I – IV 0/90 mm näytteiden lisätyn tiilen paino-% ja kuvista mitattu tiilen pinta-ala-%. Kuivien BeM I – IV 0/90 mm painoprosentin ja näytteistä lasketun pinta-alaprosentin selitysaste oli  $R^2 = 0,97$ . Lineaarisen sovituksen avulla näytteiden pinta-alaprosentin ja näytteisiin lisätyn tiilen välinen suhde oli 1,13



Kuva 24. Märkien BeM I – IV 0/90 mm näytteiden lisätyn tiilen paino-% ja kuvista mitattu tiilen pinta-ala-%. Kuivien BeM I – IV 0/90 mm painoprosentin ja näytteistä lasketun pinta-alaprosentin selitysaste oli  $R^2 = 0,94$ . Lineaarisen sovituksen avulla näytteiden pinta-alaprosentin ja näytteisiin lisätyn tiilen välinen suhde oli 1,12

Selkein yhteys tunnetun tiilen määrän ja mitattujen pinta-ala-% välillä oli märillä 0/45 mm raekokoisilla BeM-näytteillä ja huonoin kuivilla 0/45 mm BeM näytteillä. Kuivien ja märkien 0/90 mm raekokoisten tiilen pinta-ala-% ja tunnetun paino-% suhde on  $\sim 1,125$  mikä on melko lähellä tiilen ja betonin tiheyden korjauskerrointa 1,26.

## Tiili näytteissä

2D-kuvista laskettujen punaisen tiilen pinta-alaprosenttien (paino-%) ja lisätyn tiilen tunnetun paino-% välillä oli kokeissa yhteys selityksasteen ollessa  $R^2 = 0,893$ . Tämä selittyy tiilen ja betonimurskeen samankaltaisilla tilavuuspainoilla ja rakeisuudella. 2D-kuvista laskettujen pinta-alaprosenttien avulla lasketut tiilen paino-% olivat hieman alhaisempia mitä sekoitusnäytteisiin lisätyt tunnetut tiilen paino-% olivat. Tämä saattaa osittain selittyä näytteiden muiden vierasaineiden läsnäololla. 2D-kuvissa näytteen pinnalla oleva tiili peittyy osittain näytteiden muiden vierasainepartikkelien alle. Tiili on helpompi tunnistaa silmämääräisesti märästä kuin kuivasta näytteestä märän tiilen ja betonin selvemman värikontrastin ansiosta.

Vaikka märkyys helpottaa punatiilen tunnistamista, näiden kokeiden perusteella ei voida sanoa onko raekoolla tai märkyydellä/kuivuudella yhteyttä tunnistetun ja lisätyn tiilen väliseen selityksasteeseen. Kuivalla BeM 0/45 mm selityksastetta kuvaava  $R^2 = 0,87$ , märälle BeM 0/45 mm  $R^2 = 0,98$ , kuivalla BeM 0/90 mm  $R^2 = 0,97$  ja märällä BeM 0/90 mm  $R^2 = 0,94$ . Märästä 0/45 ja 0/90 mm näytteistä lasketun tiilen pinta-ala-% on hieman suurempi kuin vastaava kuivissa näytteissä (lineaarisen sovituksen kulmakerroin on suurempi märissä näytteissä). Jos oletetaan että betonimurske ja tiili sekoittuvat täysin homogeenisesti ja otetaan huomioon tiilen tiheyden korjauskerroin 0,826, tiilen pinta-alaprosentin ja näytteeseen lisätyn tiilen painoprosentin suhde tulisi olla 1,21. Lähimmäksi tätä päästiin märillä BeM I–IV 0/45 mm näytteillä joissa tämä suhdeluku oli 1,27 ja kauimmaksi jäätiin kuivilla BeM I–IV 0/45 mm joilla tämä suhde oli 0,86.

Näytteisiin lisätty tiilimurske oli karkearakeista ja raekooltaan selvästi kuvista erottuvaa (noin 8 – 90 mm). Reikätiili murskattiin niin että siihen ei jäänyt reikiä/huokoisia. Normaalisti murskausprosessissa syntyvä tiilimurske sisältää myös hienompaa ainesta, jota näissä sekoituskokeissa ei käytetty. Hienompi tiilimurske sekoittuu betonimurskeeseen huonommin tunnistettavasti ja värjää näytteen punertavaksi.

Rakennusjätteen tiili voi olla kokotiiltä, reikätiiltä, kahitiiltä tai tiililaattaa jolloin tiilen väri ja rakeiden muoto vaihtelevat. Myös rakennustyömaalla betonimurskeen seassa olevien tiilenkappaleiden huokoisuus/reikäisyys vaihtelee. Muun kuin punaisen tiilen tunnistaminen betonimurteen seasta värin perusteella on hankalampaa. Tunnistamista voidaan helpottaa kastelemalla näyte, jolloin kahitiili erottuu betonimurskeesta vaaleamman värinsä puolesta (Kuva 29).

### 4.2.3 Puun, metallin ja muovin materiaalien tunnistaminen sekoitusnäytteiden 2D-valokuvista

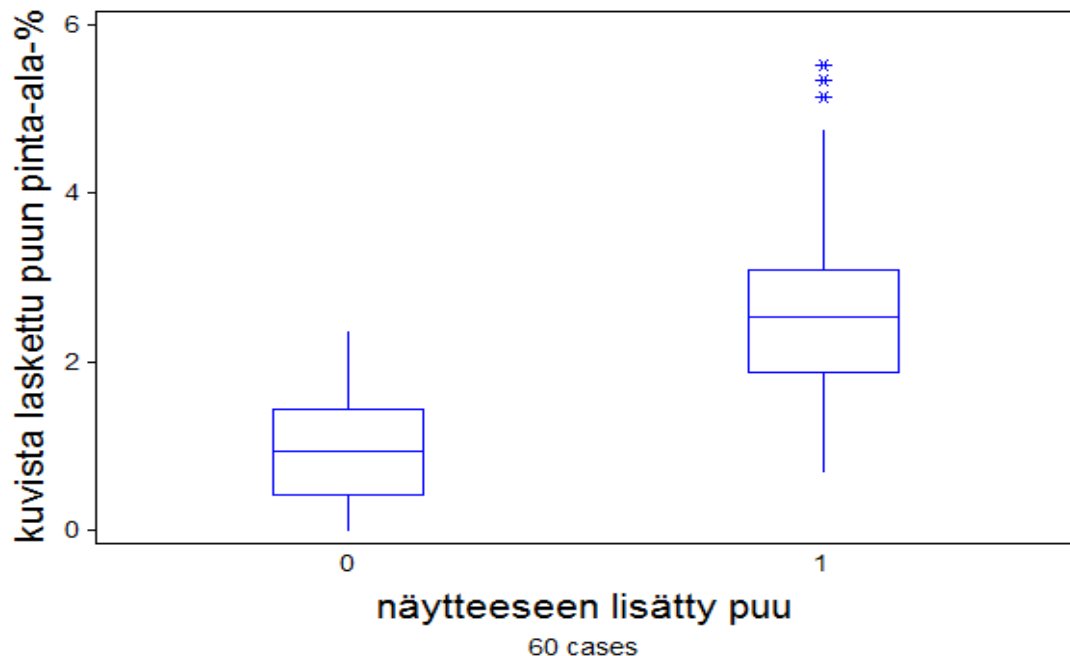
Puuta, metallia ja muovia lisättiin näytteisiin painoprosenttina näytemäärää kohti. Lisätyt painoprosentit olivat 0,15 ja 0,33 painoprosenttia kutankin jätetyyppeä (Taulukko 14.) Taulukossa 14 yhteenvedona 2D-kuvista lasketuille vierasaineiden näytemäärät, pinta-alaprosenteille ja lasketuille tilastollisille muuttujille.

Taulukko 14. BeM I-IV näytteiden lisätyt puun, raudan ja muovin paino-%, näytteiden määrä, 2D-kuvista laskettu pinta-ala-% keskiarvo, minimiarvo, alakvartiili, mediaani, yläkvartiili, havaintojen maksimiarvo ja keskihajonta. **Tummennettuna** vastaavat tiheyskorjatut kuvista lasketut paino-% -arvot. Puun ja raudan tiheyskorjauskertoimet kaavoista 3 ja 4.

Näytteen tunnettu puun paino-%	Näyttemäärä	Pinta-ala% / Paino-% Keskiarvo	Min	Alakvartiili Q <sub>1</sub>	Mediaani	Yläkvartiili Q <sub>3</sub>	Max	Keskihajonta s
0,15	13	1/ <b>0,28</b>	0/0	0,39/ <b>0,11</b>	0,94/ <b>0,26</b>	1,46/ <b>0,41</b>	2,36/ <b>0,66</b>	0,72/ <b>0,2</b>
0,33	47	2,65/ <b>0,73</b>	0/0	1,86/ <b>0,52</b>	2,53/ <b>0,71</b>	3,11/ <b>0,87</b>	5,53/ <b>1,55</b>	1,16/ <b>0,34</b>
Raudan paino-%								
0,15	13	0,13/ <b>0,62</b>	0/0	0,03/ <b>0,14</b>	0,08/ <b>0,41</b>	0,19/ <b>0,95</b>	0,42/ <b>2,04</b>	0,13/ <b>0,62</b>
0,33	47	0,85/ <b>4,14</b>	0/0	0,22/ <b>1,09</b>	0,53/ <b>2,59</b>	1,44/ <b>7,08</b>	3,02/ <b>14,84</b>	0,81/ <b>3,99</b>
Muovin paino-%								
0,15	13	0,66	0	0,29	0,56	0,79	1,92	0,55
0,33	47	1,74	0,30	1,17	1,72	2,19	4,47	0,81

## Puu

Näytekuvista mitatut puun pinta-alaprosentit ja tiheyskorjatut mitatut painoprosentit olivat selvästi korkeampia kuin näytteeseen lisätyt tunnetut puumäärät. Myös hajonta kuvista lasketuissa puun määrissä oli suurta (Taulukko 14 ja kuva 25). Puukappaleiden muoto ja koko eroavat betonimurskeesta ja betonimurskettä kevyempänä, puu erottuu näytteen pinnalle ja reunoille helpommin.

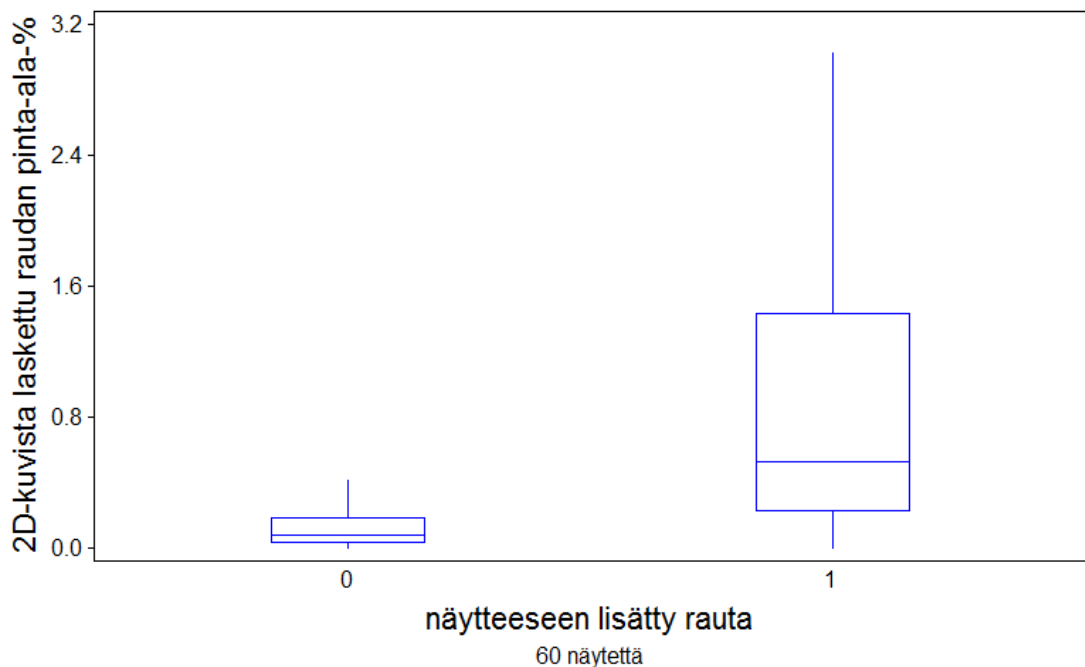


Kuva 25. Box & Whisker-kuvaaja BeM-näytteiden puun tunnetuista ja 2D-kuvista mitatuista pinta-alaprosenteille. Ryhmä 0 on 0,15 paino-% puuta sisältävät näytteet, ryhmä 1 on 0,33 paino-% puuta sisältävät näytteet. Laatikon yläpuolinen viiva kuvaa havaintojen maksimiarvoa, laatikon yläreuna 75 % yläkvartiilia, poikittainen viiva mediaania, laatikon

alareuna 25 % alakvartiilia ja laatikon alapuolinen viiva havaintojen minimiarvoa. Kuvaajan arvot löytyvät taulukosta 14.

## Metalli

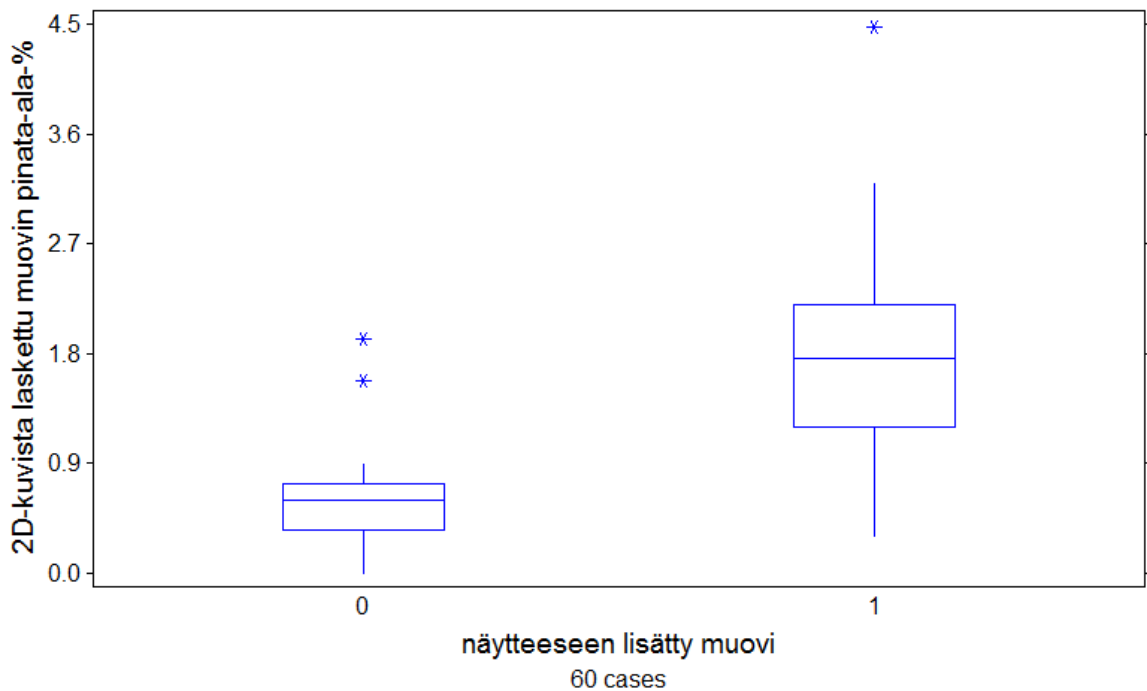
Metallia erottui näytteistä verraten melko paljon. 0,33 paino-% metallia sisältävistä näytteistä metallia laskettiin keskimäärin 4,1 paino-% keskihajonnan ollessa 4 paino-% eli melkein saman verran kuin lasketun määrän keskiarvo. 0,15 paino-% metallia tulkittiin kuvista olevan 0,62 paino-%. Metallin kuvista tulkitut meerät ylittivät täten moninkertaisesti lisätyn metallin määrän (Taulukko 14 ja Kuva 26).



Kuva 26. Box & Whisker-kuvaaja BeM-näytteiden raudan tunnetuista paino-% ja 2D-kuvista mitatuista pinta-ala-%. Ryhmä 0 on 0,15 paino-% rautaa sisältävät näytteet, ryhmä 1 on 0,33 paino-% rautaa sisältävät näytteet. Kuvaajan arvot löytyvät taulukosta 14.

## Muovi

Muovia 2D-kuvista tulkittiin olevan vaihtelevasti. Muovin kappaleiden heterogeenisuuden johtuen muoville ei voitu antaa tiheyskorjauskerrointa kuvasta tulkittujen pinta-alaprosenttien muuttamiseksi kuvista tulkituiksi painoprosenteiksi. Muovin tunnetulla määrällä 0,15 paino-% muovia laskettiin kuvista 0,66 pinta-ala-% verran ja 0,33 tunnetulla paino-% arvolla kuvista keskimäärin 1,7 pinta-ala-%. (Taulukko 14 ja kuva 27).



Kuva 27. Box & Whisker-kuvaaja BeM-näytteiden muovin tunnetuista paino-% ja 2D-kuvista mitatuista pinta-ala-%. Ryhmä 0 on 0,15 paino-% muovia sisältävät näytteet, ryhmä 1 on 0,33 paino-% muovia sisältävät näytteet. Kuvaajan arvot löytyvät taulukosta 14.

Muiden vierasaineiden kuin tiilen lisätyille määrille ja kuvista lasketuille pinta-ala- ja painoprosenteille ei saatu samanlaista korrelaatiota kuin tiilelle ja betonimurskeelle. Näissä kokeissa puun, metallin ja muovin painoprosenttiluokkia oli vain kaksi ja näytteiden mitattujen pinta-alaprosenttien välillä oli paljon hajontaa samoilla tunnetuilla painoprosentti-määrillä.

Mitattujen määrien vaihteluihin vaikuttaa puun, metallin ja muovin betonimurskeesta poikkeava tilavuuspaino sekä vaihteleva partikkelien muoto ja koko verrattuna betoni- ja tiilimurskepartikkeleihin.

Kokeessa käytetyt metallin kappaleet vaihtelivat muodoltaan; pitkittäinen, ristikkomainen ja peltilevyn palat. Levymäinen kappale peittää painoonsa verraten suuremman pinta-alan kuin vastaava pitkittäinen kappale. Raudan pinta-ala-% olikin yliedustettuna näytteissä verrattuna lisättyyn raudan painoprosenttiin (Taulukot 2 ja 4). Metallipartikkelien koon ja muodon vaihtelu aiheuttaa näytteiden välille hajontaa – saman painoprosenttia sisältävien näytteiden välinen keskihajonta on samaa kokoluokkaa kuvista mitatun raudan keskiarvon kanssa.

Metalli saadaan murskausprosessissa magneettien avulla melko hyvin eroteltua, mutta murskatessa isompiin murskepalasiin saattaa jäädä esim. rauditusrautaa ja kaikki metallijäte ei ole magneettista.

Puu ja muovit erottuvat sekoittaessa omiksi fraktioikseen tiiltä ja metallia helpommin pienemmän tilavuuspainonsa vuoksi. Kevyet materiaalit erottuvat sekoituksessa näytteen reunoille ja tämä aiheuttaa hajontaa näiden vieras-ainenäytteiden välillä sekoituskokeissa.

Purkutyökohteiden eri jätelaatujen suhteelliset osuudet ja laatu vaihtelevat kohteittain. Käytetty tiilimateriaali voi olla helpommin eriteltävissä olevaa punatiiltä tai esim. harmaata kahi-



tiiltä, jonka eritleminen betonimurskeesta on värinsä puolesta työläämpää. Kahi-tiili on kosteana vaaleampaa kuin betonimurske, mikä helpottaa sen tunnistamista märästä betonimurskeesta. Vierasaineiden erottelun tarkkuus vaihtelee purkutyömaittain samoin kuin kohteiden betonimurskeen laadun valvonta.

#### 4.2.4 Kelluvien materiaalien tunnistaminen sekoitusnäytteiden 2D-valokuvista

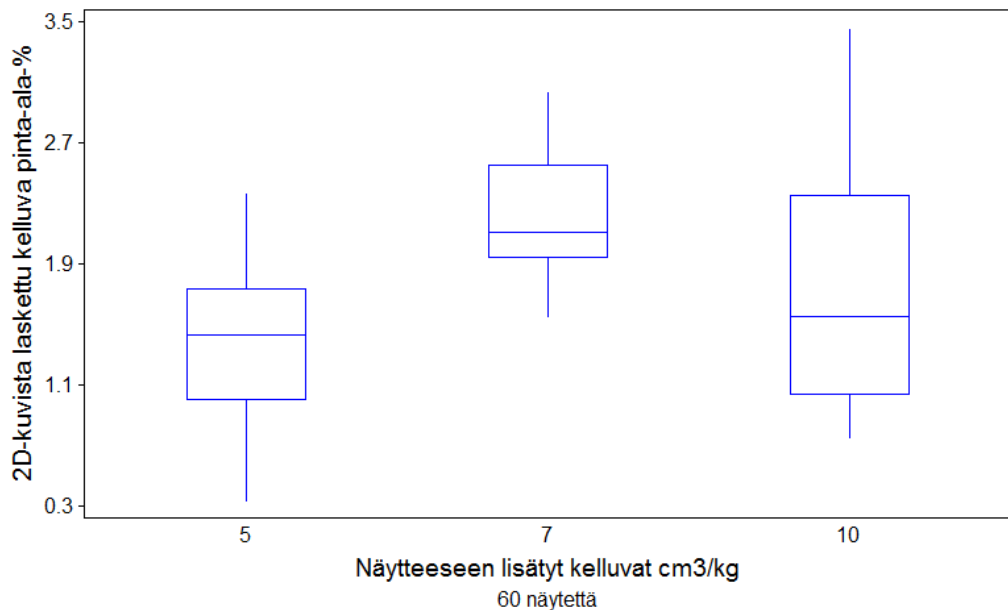
Käytetyt kelluvat materiaalit olivat lasivillaa ja xps-eristettä. Näiden tiheys ja koossapysymisominaisuudet ovat hieman erilaiset. Sekoittaessa kelluvat materiaalit erottuvat pinnalle ja sekoituksen reunalle murskeita kevyempinä materiaaleina, joten näiden materiaalien sekoittaminen sekoituskokeissa on haastavaa ja hieman keinotekoista. Lasivilla voi tarttua murskerakeisiin, kun taas xps-levyn palaset erottuvat murskeesta helpommin.

Kelluvien materiaalien määrissä oli paljon hajontaa ja 7,5 cm<sup>3</sup>/kg kelluvia materiaaleja sisältävistä näytteistä kelluvia materiaaleja tunnistettiin keskimäärin enemmän kuin 10 cm<sup>3</sup>/kg kelluvia materiaaleja sisältävistä näytteistä (Taulukko 15 ja kuva 28).

*Taulukko 15. BeM I-IV -näytteiden kelluvien tunnetut määrät (cm<sup>3</sup>/kg) / tilavuus-% näytteessä ja 2D-kuvista mitatut kelluvien materiaalien pinta-ala-%. Ryhmä 5: 5 cm<sup>3</sup>/kg / 0,8 tilavuus-%, Ryhmä 7: 7,5 cm<sup>3</sup>/kg / 1,2 tilavuus-%, Ryhmä 10: 10 cm<sup>3</sup>/kg / 1,6 tilavuus-%*

Näytteen tunnettu kelluvat (cm <sup>3</sup> /kg) ja tilavuus-%	Näytemäärä	Pinta-ala-% Keskiarvo	Min	Alakvartiili Q <sub>1</sub>	Mediaani	Yläkvartiili Q <sub>3</sub>	Max	Keskiahajonta
5 cm <sup>3</sup> /kg / 0,8 tilavuus-%	22	1,37	0,33	0,99	1,43	1,74	2,36	0,55
7,5 cm <sup>3</sup> /kg / 1,2 tilavuus-%	8	2,22	1,56	1,93	2,11	2,56	3,03	0,46
10 cm <sup>3</sup> /kg / 1,6 tilavuus-%	23	1,76	0,75	1,03	1,56	2,36	3,44	0,81

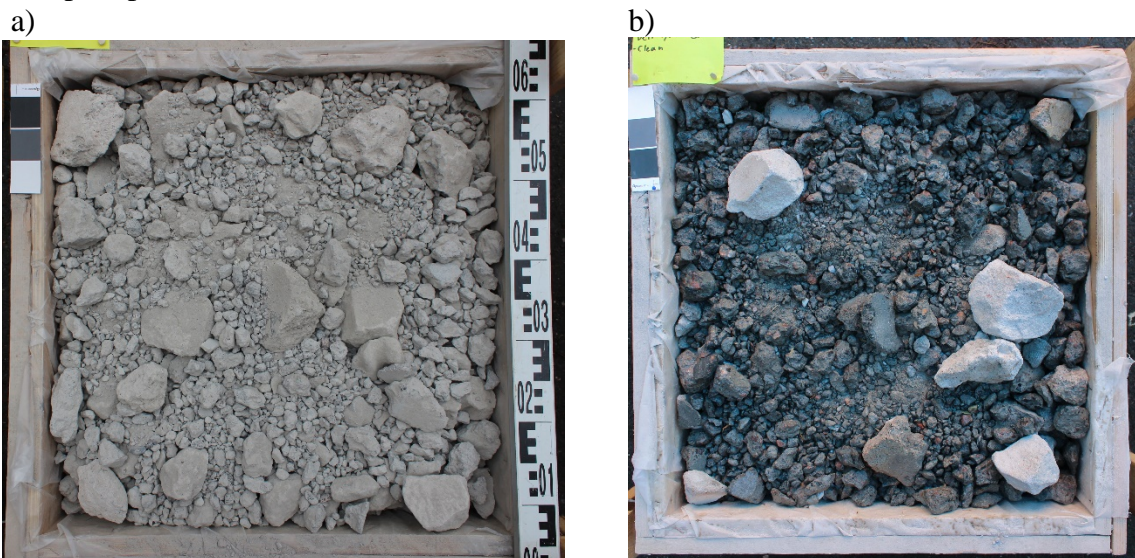
Taulukon 15. arvoista muodostettiin Box & Whisker –kuvaaja jolla havainnollistetaan kelluvien materiaalien laskettujen pinta-alaprosenttien minimi, maksimi, ala- ja yläkvartiileja ja mediaania (Kuva 28).



Kuva 28. Box & Whisker-kuvaaja BeM-näytteiden kelluvien tunnetuista määristä ( $\text{cm}^3/\text{kg}$ ) ja 2D-kuvista mitatut kelluvien materiaalien pinta-ala-%. Ryhmä 5:  $5 \text{ cm}^3/\text{kg}$  / 0,8 tilavuus-%, Ryhmä 7:  $7,5 \text{ cm}^3/\text{kg}$  / 1,2 tilavuus-%, Ryhmä 10:  $10 \text{ cm}^3/\text{kg}$  / 1,6 tilavuus-%.

#### 4.2.5 Muiden vierasaineiden tunnistaminen betonimurskeesta

Betonimurske voi sisältää tiilen, puun, metallien, muovin ja kelluvien materiaalien lisäksi erilaisia keraamisia tai kiviperäisiä materiaaleja kuten laasteja, kevytbetonia ja erilaisia kiviharkkoja. Näiden tunnistamisen onnistuminen betonimurskenäytteistä on vaihtelevaa, mihin vaikuttaa muun muassa partikkelien kokovaihtelu, määrä ja väri vaihtelut. Betonimurskeen seasta voidaan näytettä kastelemalla saada erottumaan märkänä vaaleampia materiaaleja kuten kahi-tiiltä. Myös tietyt laastit voivat erottua märistä betonimurskenäytteistä vaaleampina partikkeleina (Kuva 29).



Kuva 29. Kahi-tiiltä sisältävä a) kuiva ja b) kasteltu 0/90 mm raekokoinen BeM I -näyte. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyy kahi-tiilen palaisia vaaleampia rakeina, kuivasta näytteestä kahi-tiilen palaset eivät erotu betonimurskeesta.

## 5 Yhteenveto

Mekaaniset kokeet 0/16 mm puhtaalle betonimurskeelle ja Sorilan kalliomurskeelle antoivat saman suuntaisia tuloksia, mitä aikaisemmat kirjallisuudessa olleet tutkimukset ovat antaneet. Betonimurskeen muodonmuutosominaisuudet ovat kalliomursketta paremmat, kun taas kulutus- ja iskunkestävyys olivat kalliomurskeella testeissä paremmat.

### Rakeisuus

Testien betoni- ja kalliomurskeet kuuluivat raekokojakauman puolesta InfraRYL:n luokan G<sub>0</sub> mukaisiin routimattomiin murskeisiin ja niitä voidaan käyttää rakeisuuden puolesta kantavissa maarakenteissa. Menetelmänä kuivaseulonta ei ole paras mahdollinen: murskeet jauhautuvat siivilöitäessä ja hienomman aineen määrä lisääntyy verrattuna lähtömateriaaliin ja toisaalta kaikki hienempi aines ei erotu siivilöitäessä jäädessään kiinni isompiin rakeisiin. Kuivaseulontaa tarkempi seulontamenetelmä on märkaseulonta, mutta siitä luovuttiin näissä kokeissa laiteteknisistä ja ajankäytöllisistä syistä.

### Kulutuskestävyys

Betonimurskeen ja kalliomurskeen kulutuskestävyyttä kuvaava micro-Deval-arvot olivat odotettua matalammat. Betonimurskeen kulutus- ja iskunkestävyys olivat kokeissa odotetusti kalliomursketta huonompia. Tulosten luotettavuutta voitaisiin parantaa isommalla näytämäärällä ja testaamalla samoja materiaaleja muilla laitteistoilla.

### Iskunkestävyys

Los Angeles-kokeissa saatu betonimurskeen iskunkestävyyttä kuvaava LA-luku oli odotetunlainen. Betonimurskeelta ei odoteta samalla tavalla iskunkestävyyttä kuin raidesepeliltä ja sidotuissa päällysteissä käytettäviltä rakeisilta kivimateriaaleilta. Referenssimateriaalina toimineen Sorilan kalliomurskeen iskunkestävyys oli odotettua matalampi, mihin saattaa vaikuttaa kivilaadun pehmeämmät mineraalit kuten biotiitti.

### Pysyvä muodonmuutos

Suurimmat muodonmuutokset kuormituksessa olivat 0 vrk ikäisellä kalliomurskeella ja pienimmät 28 vrk ikäisellä betonimurskeella. Kokeissa betonimurskeessa tapahtuu lujittumista iän myötä, mikä tukee aikaisempia tuloksia betonimurskeen lujittumisominaisuudesta muodonmuutuskokeissa isommilla raekoilla. Jo vuorokauden ikäinen betonimurske lujittui testeissä. Lujittuminen oli hidastunut 28 vuorokauden ikäisillä betonimurskenäytteillä, mikä selittynee osittain näytteiden lievällä kuivumisella. Jatkotestit voivat olla esimerkiksi veden määrän vaikutuksen arvioiminen lujittumiseen ja hienoaineen määrän vaikutus murskeiden deformaatio-ominaisuuksiin.

### Resilient moduuli

Kokeissa betonimurskeen resilient moduuli oli kalliomursketta suurempi. Jo 1 vrk betonimurske oli lujittunutta 0 vuorokauden ikäiseen näytteeseen verrattuna. Viikon ja 28 vuorokauden ikäisillä BeM-näytteillä resilient moduuli oli puolitoistakertainen kalliomurskeeseen

verrattuna. Testimenettelyssä päästiin vain 20 kPa sellipaineisiin, kun standardin mukaisia jännityksiä käyttäessä sellipaineet olisivat olleet 20 -150 kPa.

### **Muodonmuutos staattisessa kuormituksessa**

0 vrk betonimurskenäytteen muodonmuutos staattisessa kuormituksessa oli hieman kalliomursketta suurempi. 1 – 28 vuorokauden ikäisten betonimurskeiden muodonmuutos oli kalliomursketta ja 0 vrk betonimursketta hieman pienempi. Staattisten kuormituskokeiden perusteella betonimurskeen lujittuminen oli vähäisempää mitä se oli resilient moduuli testeissä ja pysyvän muodonmuutoksen testauksessa.

### **Sekoituskokeet**

Diplomityön yhteydessä tehtyjen sekoituskokeiden perusteella voidaan suositella laatikkomenetelmää betonimurskeen epäpuhtauksien tunnistamiseen myös työmaaolosuhteissa. Näytteen kuvaus suositellaan tehtävän kuivana ja märkänä, jotta vierasaineiden mahdolliset kontrastierot tulevat esille ja menetelmän tarkkuus parantuu. Menetelmä havaittiin toimivaksi erityisesti tiilen määrän tunnistamiseen betonimurskeen seasta.

### **Tiili betonimurskeessa**

BeM I-IV luokkien sekoituskoetuloksista saatiin hyvää tietoa punatiilen erottumisesta näytteistä. Betonimurskeen seasta erottuvalla näkyvällä tiilellä ja tiilen tunnetulla määrällä on selvä lineaarinen yhteys, johtuen tiili- ja betonimurskeen samankaltaisuudesta. Tiedosta voi olla hyötyä kehitettäessä automaattista kuvantunnistamista ja konenäköä helpottamaan BeM-näytteiden laatuluokittelussa. Kokeissa käytettyä laatikkomenetelmää voidaan hyödyntää kenttöolosuhteissa tiilen tunnistamiseen näytteistä.

### **Puu, metalli, muovi ja kelluvat materiaalit näytteissä**

Puu, metalli, muovi ja kelluvat materiaalit erottuvat betonimurskeesta vaihtelevasti, johtuen betonimurskeen ja näiden muiden materiaalien tilavuuspainojen eroista ja kappaleiden muotojen eroista. Metallia kuvista tulkittiin reilusti enemmän, mitä näytteisiin, lisätty tunnettu määrä oli. Myös muissa puun, muovin ja kelluvien materiaalien osalta näytekuvista tulkitut vierasainemäärät ylittivät tunnetut lisätyt vierasainemäärät. Näiden materiaalien osalta tulisi tehdä enemmän sekoituskokeita, jotta tunnistamisen avuksi saataisiin enemmän tietoa.

## Lähdeluettelo

- Arm, M. 2003. Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials - experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden. 66 s. + 58 s.
- Chandra, S. 2005. Conference report. *Cement & Concrete Composites* 27 (2005) 738–741.
- Concrete construction. 2017. Verkkodokumentti. [viitattu: 25.8.2017] saatavissa: [http://www.concreteconstruction.net/business/management/crushed-concrete-aggregate\\_o](http://www.concreteconstruction.net/business/management/crushed-concrete-aggregate_o)
- Delete Oy. 2017. Verkkodokumentti. [viitattu: 21.8.2017] saatavissa: <https://www.delete.fi/deletelehti/artikkelit/kierrattamalla-uusiomateriaaliksi/betonijate-hyotykayttoon-jopurkupaikalla?origin=item5>
- Dettenborn, T. 2013. Betonimurskerakenteiden pitkäaikaistoimivuus. Diplomityö. Aalto yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laitos. Espoo 151 s.
- Dettenborn, T., Forsman, J. & Korkiala-Tanttu, L. 2015. Crushed concrete in road structures - two decades of experience. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* ISSN 1747-650X. DOI: 10.1680/jcoma.15.00005
- ELY-keskus 2016. Jätteiden hyödyntäminen maarakentamisessa. Kuntien ympäristönsuojelun neuvottelupäivät, Rovaniemi, 21.-22.11.2016 [luettu 29.5.2017] [https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/18958121/LAPPI\\_YS\\_neuvottelupaivat\\_21\\_11\\_2016\\_esitysaineisto\\_Tiina\\_kamarainen\\_10.pdf/098bb993-06e0-43bf-9b64-9fb6c816d166](https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/18958121/LAPPI_YS_neuvottelupaivat_21_11_2016_esitysaineisto_Tiina_kamarainen_10.pdf/098bb993-06e0-43bf-9b64-9fb6c816d166)
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 305/2011 rakennustuotteiden kaupan pitämistä koskevien ehtojen yhdenmukaistamisesta ja neuvoston direktiivin 89/106/ETY kumoamisesta. Annettu 9.3.2011,
- Euroopan unionin rakennustuoteasetus L 305/2011 [verkkoaineisto] [viitattu 12.5.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LxUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:fi:PDF>
- Finnfoam 2017. Finnfoam ominaisuudet. [verkkoaineisto]. [viitattu 12.8.2017]. Saatavissa: <https://www.finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/ominaisuudet/muut-ominaisuudet/>
- Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupunki. 2015. Ohje betonimurskeen hyödyntäminen infrarakentamisessa pääkaupunkiseudulla. [verkkodokumentti] [viitattu 12.5.2017]. 11 s. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/ohjeet/betonimurske.pdf>
- InfraRYL 2009: Infrarakentamisen Yleiset Laatuvaatimukset 2009. Osa 1, Väylät Ja Alueet. Helsinki: Rakennustieto Oy, 2009.
- InfraRYL 2016: Infrarakentamisen Yleiset Laatuvaatimukset 2016. Osa 1, Väylät ja alueet. Helsinki: Rakennustieto Oy, 2009.

InfraRYL 20017: Infrarakentamisen Yleiset Laatuvaatimukset 2009. Osa 1, Liite T18 2017 Sitomattoman kantavan kerroksen ja jakavan kerroksen vaatimukset betonimurskeelle sekä suositukset testaustiheydeksi. Helsinki: Rakennustieto Oy, 2017.

Jin, R & Chen, Q. 2015. Investigation of concrete recycling in the U.S. construction industry. *Procedia Engineering* 118. 894 – 901 s.

JL 646/2011. Jätelaki. Annettu Helsingissä 17.6.2011.

Johansson, K., Merikallio, T., Haara, T., Mantila, A., & Tikanoja, T. 2016. *Betoninormit 2016*. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Joutsenoja, T. 2012. Betoroc –murskeet. Verkkodokumentti. [viitattu 20.8.2017]. Saatavissa: <http://www.lamk.fi/projektit/cleantech/koulutukset/Documents/Tuomo%20Joutsenoja.%20Betoroc%20-murskeet.%20Rudus%20Oy.pdf>

Kolisoja, P. 1997. Resilient deformation characteristics of granular materials, Thesis for the degree of Doctor of Technology. Tampere University of Technology, Publication 223, Tampere. 216 s.

Lahti, T. 2013. Purkubetonimurskeen tuotteistamisen edellytykset: CE-merkintä mahdollisuudet ja pH-neutralointi. Savonia-ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 1.6.2017] Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/57757>

Lekarp, F., Isacson, U. & Dawson, A. 2000. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering* Vol. 126, Issue 1.

Li, J., 2013. Permanent deformation and resilient modulus of unbound granular materials. . Graduate Theses and Dissertations. Paper 13114. Iowa State University. [Viitattu 9.6.2017] saatavilla <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4121&context=etd> Vancouver

Liikennevirasto. 2014. Uusiomateriaalien käytön kehittäminen UUMA2-ohjelman väylähankkeilla. Verkkoaineisto. [Viitattu 30.5.2017.] Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lr\\_2014\\_uusiomateriaaliopas\\_luonnos\\_28.2.2014\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lr_2014_uusiomateriaaliopas_luonnos_28.2.2014_web.pdf)

Lim S, Kestner D, Zollinger DG, Fowler DE. Highway Uses of Crushed Concrete Materials Texas Transportation Institute. <http://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/rtp/psr/7-4954-s.pdf>

McNeil, K. & Kang, THK. 2013. Recycled Concrete Aggregates: A Review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7:1, s. 61-69.

Oulu 2016. Resurssiviisas infra - Kiertotalous maarakentamisessa verkkodokumentti tekijät: Ukkola J ja Siikaluoma T. 10.11.2016. [viitattu 1.6.2017] saatavissa: [http://kuntatekniikka.fi/wp-content/uploads/sites/2/2016/12/KEHTO\\_Resussiviisas-infra-hanke-Oulussa\\_TapioSiikaluoma\\_JussiUkkola\\_10112016.pdf](http://kuntatekniikka.fi/wp-content/uploads/sites/2/2016/12/KEHTO_Resussiviisas-infra-hanke-Oulussa_TapioSiikaluoma_JussiUkkola_10112016.pdf)

Oulu 2017. Katurakenteiden suunnitteluohje. Verkkojulkaisu. [viitattu: 20.8.2017] [Saatavissa] [https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Oulun+kaupunki\\_Sunnitteluohje.pdf/55f8f719-9623-488b-a623-83965ab42778](https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Oulun+kaupunki_Sunnitteluohje.pdf/55f8f719-9623-488b-a623-83965ab42778)

Pieksemä, J. 2017. Kierrätysliiketoiminnan johtaja. Rudus Oy, Helsinki, Konala. Puhelinhaastattelu 23.8.2017.

Puuinfo 2017. Verkkoaineisto: Puu materiaalina-lujuusteknisiä ominaisuuksia. [viitattu: 25.6.2017][Saatavissa] <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/lujuusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>

Rakennusteollisuus 2017. Verkkoaineisto. [viitattu 30.5.2017] [Saatavissa] <https://www.rakennusteollisuus.fi/INFRA/Tietoa-infra-alasta/Purku-ja-kierratys/>

Rossi, M. 2012. Mineraalisen rakennusjätteen hyötykäyttö maarakentamisessa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta. Ympäristötekniikan koulutusohjelman diplomityö.

Routa-Lindroos, S. & Nenonen, N. 2014. Luonnonkiviainesten ja niitä korvaavien uusiomateriaalien käyttö Pirkanmaalla. Pirkanmaan liitto. ISBN: 978-951-590-323-5.

RT 38089, Terca-poltetut tiilet. Talo 2000. RT-kortti 2011, 8 s.

SFS 179-2. 2008. Geotekninen tutkimus ja koestus: Geotechnical Investigation and Testing. 2, Maan Laboratoriokokeet = Laboratory Testing of Soil. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 216 s.

SFS-EN 933-1. 2012. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 16 + 1 s.

SFS-EN 1097-1. 2011. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. part 1: determination of the resistance to wear (micro-deval). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 14 + 1 s.

SFS-EN 1097-2. 2010. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: iskunkestävyyden määrittämismenetelmät. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 30 + 1 s.

SFS-EN 1097-6. 2014. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimukyvyn määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 45 + 1 s.

SFS 5884. 2001. Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 16 s.

SFS-EN 13242 + A1. 2008b. Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 39 s.

SFS-EN 13286-7. 2004. Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 7: Syklinen kolmiakσιαalikoe sitomattomia kiviainesseoksia varten. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 37 + 1 s.

SFS-EN 13286-2. 2011. Unbound and hydraulically bound mixtures. part 2: test methods for laboratory reference density and water content proctor compaction. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 29 + 1 s.

Suojala, E. 2017. Projektinjohtaja. Helsingin kaupunki, Kaupunkiympäristön toimiala, katusuunnittelu. Puhelinhaastattelu 23.8.2017

Teräsrakenneyhdistys 2017. Verkkoaineisto. [viitattu: 12.8.2017] saatavissa: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/terasrakenneteollisuus/teras-materiaalina/terasta-ja-rautaa/>

Tiehallinto, 2004. Tierakenteen suunnittelu (TIEH 2100029-04). Tietohallinto Helsinki. 74 s.

Tiehallinto, 2005. Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D. Tiehallinto, tie- ja geotekniikka. 13 s.

Tielaitos, 2000. Betonimurskeen käyttö tien päällysrakennekerroksissa, Mitoitus- ja työohjeet, Tielaitoksen selvityksiä 5/2000, TIEL 3200594, Helsinki, 25 s. + liitt.

UUMA 2017. UUMA- ja UUMA2-kehityshankkeiden verkkoaineisto [viitattu 1.6.2017] saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi>

Ympäristöministeriö 2017. Verkkoaineisto. [Viitattu 29.5.2017.] Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Rakentamisen\\_ohjaus/Rakennustuotteiden\\_tuotehyvaksynta/CEmerkinta](http://www.ymparisto.fi/FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Rakennustuotteiden_tuotehyvaksynta/CEmerkinta)

Vakkuri, R. 2011. Purkubetoni hyödynnetään, mutta vielä yksipuolisesti. Betoni 2/2011. [verkkoaineisto] [Viitattu: 1.6.2017] Saatavissa: <http://betoni.com/betonilehti/22011/>

Vero 2017. Jätevero. Verkkoaineisto. [Viitattu 20.8.2017.] Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/valmisteverolajit/jatevero/>

VNa 179/2012. Valtioneuvoston asetus jätteistä. Annettu Helsingissä 19.4.2012.

VNa 591/2006. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Annettu Helsingissä 28.6.2006.

VNa 403/2009. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa annetun valtioneuvoston asetuksen liitteiden muuttamisesta. Annettu Helsingissä 4.6.2009.

VNa 1825/2009. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa annetun asetuksen muuttamisesta. Annettu Helsingissä 29.12.2009.



VNa 194/2017. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Luonnos uudeksi asetukseksi. Verkkoaineisto. [Viitattu 20.8.2017.] Saatavissa: <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/fi/search/?trisaction=search.detail&year=2017&num=194>

Vägverket. 2004. Allmän teknisk beskrivning - Krossad betong i vägkonstruktioner. Enheten för Samhälle och Trafik Teknikavdelningen Vägtekniksektionen. Vägverket, Butiken, 781 87 Borlänge.

YSL 527/2014. Ympäristönsuojelulaki. Annettu Helsingissä 27.6.2014.

Matinlauri S, Rossi J, Kalliainen, A ja Kolisoja, P. 2016. Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaalejasisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 52/2016. 172 s. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-340-8.

Ydrevik, K. 2000. Hållfasthetstillväxt hos ballast av krossad betong. [viitattu 28.5.2017] Saatavissa: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:669980/FULLTEXT01.pdf>

## **Liiteluettelo**

Liite 1. Betonimurskekuvat BeM I – IV kuiva/märkä 0/45 mm ja 0/90 mm

## BeM I – 0/45 ja 0/90 mm

BeM I, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM I, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM I – 0/45 ja 0/90 mm

BeM I, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM I, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM I – 0/45 ja 0/90 mm

BeM I, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



BeM I, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM I – 0/45 ja 0/90 mm

BeM I, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



BeM I, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM IV 0/90 mm

BeM IV, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 20 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



BeM IV, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 20 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM IV 0/90 mm

BeM IV, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM IV, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg





# BeM IV 0/90 mm

BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 20 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 20 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM IV 0/90 mm

BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/45 mm

BeM II, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM II, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/45 mm

BeM II, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM Ii, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/45 mm

BeM III, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM III, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/45 mm

BeM II, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM II, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/45 mm

BeM II, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM II, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/45 mm

BeM III, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM III, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg





## BeM II tai III 0/90 mm

BeM II, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM II, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/90 mm

BeM II, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg



BeM II, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/90 mm

BeM III, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



BeM III, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



# BeM II tai III 0/90 mm

BeM II, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

- puu 0,33 paino-%
- metalli 0,33 paino-%
- muovi 0,33 paino-%

Muut:

- punatiili 5 paino-%
- kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



BeM II, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

- puu 0,33 paino-%
- metalli 0,33 paino-%
- muovi 0,33 paino-%

Muut:

- punatiili 5 paino-%
- kelluvat (solumuovi/lasivilla) 5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/90 mm

BeM II, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg

BeM II, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 5 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 7,5 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM II tai III 0/90 mm

BeM III, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



BeM III, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 10 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM IV 0/45 mm

BeM IV, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM IV, kuiva näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



## BeM IV 0/45 mm

BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 20 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%  
-metalli 0,33 paino-%  
-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 20 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg





## BeM IV 0/45 mm

BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 1 paino-%

-puu 0,33 paino-%

-metalli 0,33 paino-%

-muovi 0,33 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



# BeM HYLÄTTY

BeM hylätty, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 3 paino-%  
-puu 1 paino-%  
-metalli 1 paino-%  
-muovi 1 paino-%

Muut:  
punatiili 30 paino-%  
kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm3/kg



BeM IV, märkä näyte, raekoko 0/45 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 3 paino-%  
-puu 1 paino-%  
-metalli 1 paino-%  
-muovi 1 paino-%

Muut:  
punatiili 30 paino-%  
kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm3/kg



# BeM HYLÄTTY

BeM hylätty, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 2,5 paino-%

-puu 1 paino-%

-metalli 1 paino-%

-muovi 0,5 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

BeM hylätty, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 2,5 paino-%

-puu 1 paino-%

-metalli 1 paino-%

-muovi 0,5 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



# BeM HYLÄTTY

BeM hylätty, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 5 paino-%  
-puu 2 paino-%  
-metalli 2 paino-%  
-muovi 1 paino-%

Muut:  
punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



BeM hylätty, kuiva näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 5 paino-%  
-puu 2 paino-%  
-metalli 2 paino-%  
-muovi 1 paino-%

Muut:  
punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



# BeM HYLÄTTY

BeM hylätty, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 3 paino-%  
-puu 1 paino-%  
-metalli 1 paino-%  
-muovi 1 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg



BeM hylätty, märkä näyte, raekoko 0/90 mm, betonimurske noin 86 kg, näyte 0,6 m x 0,6 m 0,15 m

Materiaalit: 3 paino-%  
-puu 1 paino-%  
-metalli 1 paino-%  
-muovi 1 paino-%

Muut:

punatiili 30 paino-%

kelluvat (solumuovi/lasivilla) 10 cm<sup>3</sup>/kg

