



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

DRI-POHJAISEN VALOKAARIUUNIKUONAN GEOTEKNISET OMINAISUUDET

Fiia Koskela

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Huhtikuu 2025

TIIVISTELMÄ

DRI-pohjaisen valokaariunikuonan geotekniset ominaisuudet

Fiia Koskela

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2025, 95 s. ja 3 liitettä

Työn ohjaajat yliopistolla: TkT Anne Tuomela & DI Salla Konttinen

Tämän diplomityön tavoitteena oli alustavasti selvittää DRI-pohjaisen valokaariunikuonan (EAF-kuonan) teknistä soveltuvuutta maarakentamiseen ja edistää näin terästeollisuuden sivutuotteiden hyödyntämistä ja uusiutumattomien luonnonvarojen kestäväää käyttöä. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksen ja laboratoriokokeiden avulla. Kirjallisuuskatsaus tarjosi pohjan EAF-kuonan mahdolliselle käytölle maarakentamiseen, ja laboratoriokokeissa selvitettiin kuonan geoteknisiä ja luokitusominaisuuksia, jotka ovat keskeisiä ominaisuuksia materiaalin teknisen soveltuvuuden arvioinnissa. Tulosten vertailtavuuden ja luotettavuuden parantamiseksi kokeet suoritettiin myös ilmajäähdytetylle masuunikuonamurskeelle ja kalliomurskeelle. Masuunikuona ja kalliomurske ovat yleisesti maarakentamisessa käytettäviä materiaaleja, joiden ominaisuudet tunnetaan hyvin. Vertailemalla näitä materiaaleja toisiinsa ja kirjallisuudesta löytyviin arvoihin, saatiin käsitys EAF-kuonan ominaisuuksien soveltuvuudesta maarakentamiseen.

Työn teoriaosassa selvitettiin terästeollisuuden kuonien teknisiä ominaisuuksia ja niiden käyttöä maarakentamisessa. Lisäksi tarkastelussa oli erityisesti EAF-kuonasta löytyvät tutkimukset sekä kiviaineksilta vaaditut ominaisuudet maarakentamisessa. Tällä hetkellä EAF-kuonasta löytyvät tutkimukset painottuvat maailmanlaajuisesti romupohjaiseen kuonaan, jota hyödynnetään yleisimmin tien päällysteissä sen korkean lujuuden, hyvän kitkaominaisuuden ja mekaanista rasitusta kestäväan rakenteen ansiosta. EAF-kuonan käyttöä on rajoittanut maarakentamisessa kemiallisen koostumuksen vaihtelu sekä epävarmuus raskasmetallien liukenemisestä ja paisumisominaisuuksista.

Tässä työssä tutkittava EAF-kuona on tuotettu vetypelkistetyn rautasienen (H-DRI) sulatuksessa pilottivalokaariuunissa. Kuonasta selvitettiin Oulun yliopiston geoteknisessä laboratoriossa rakeisuus, optimivesipitoisuus, maksimikuivatilavuuspaino, kapillaarisuus, leikkauskestävyyskulma, vedenläpäisevyys, vedenpidätyskyky, kiintotiheys, routivuus sekä paisunta varastoinnin jälkeen. Tuloksien perusteella EAF-kuona on routimaton materiaali, jolla on korkea kiintotiheys ja alhainen hienoainespitoisuus. Masuunikuonaan ja kalliomurskeeseen verrattuna EAF-kuonalla on myös korkea maksimikuivatilavuuspaino sekä alhainen kapillaarisuus ja heikompi vedenpidätyskyky. Vastaavasti taas kaikkien materiaalien vedenläpäisevyyden ja leikkauskestävyyskulman arvot olivat samankaltaisia. Lisäksi kuonille tyypilliseen tapaan EAF-kuonalla oli vaikea saavuttaa haluttua tiiviysastetta, mikä heikentää tulosten vertailtavuutta erityisesti kalliomurskeeseen. Tavoitellusta tiiviysasteesta jäätiin erityisesti rasialeikkauskokeessa ja routanousukokeessa. Epävarmuutta aiheutti myös EAF-kuonan hienontuminen Proctor-kokeessa.

Teknisten ominaisuuksien perusteella EAF-kuonan potentiaalisin soveltamiskohde on tien sitomattomat rakennekerrokset. EAF-kuonan ominaisuuksista routimattomuus, alhainen kapillaarisuus, suuri leikkauskestävyyskulma ja heikompi vedenpidätyskyky osoittavat materiaalin sopivuutta tien kantavaan, jakavaan ja suodatinkerrokseen. Jatkotutkimusta tarvitaan kuitenkin tuoreen kuonan paisuntaominaisuuksien, kantavuusominaisuuksien, hienonemisherkkyiden sekä jäätymis-sulamiskestävyyden selvittämiseksi. On myös huomioitava, että tässä työssä tutkittiin vain yhdenlaista EAF-kuonaa, ja tulevaisuudessa teräksen valmistukseen käytetään samaan aikaan vetypelkistettyä rautasientä ja teräsromua, mikä vaikuttaa myös tuotettavan EAF-kuonan ominaisuuksiin.

Asiasanat: EAF-kuona, valokaariuunikuona, geotekniset ominaisuudet, maarakentaminen

ABSTRACT

Geotechnical properties of DRI-based electric arc furnace slag

Fiia Koskela

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2025, 95 pp. and 3 Appendices

supervisors at the university: D.Sc.(Tech.) Anne Tuomela & M.Sc.(Eng.) Salla Konttinen

The aim of this master's thesis was to preliminarily assess the technical suitability of DRI-based electric arc furnace slag (EAF slag) for civil engineering applications and thereby promote the utilization of by-products from the steel industry while preserving non-renewable natural resources. The study was carried out through a literature review and laboratory testing. The literature review provided a foundation for understanding the potential applications of EAF slag in earthworks. In the laboratory, the geotechnical and classification properties of the EAF slag were examined, as these characteristics are essential for assessing the material's technical suitability for earthworks purposes. To improve the comparability and reliability of the results, the tests were also carried out on air-cooled blast furnace slag and crushed rock. These materials are commonly used in earthworks, and their properties are well known. By comparing these results with each other and with values found in the literature, understanding of the applicability of EAF slag in earthworks was formed.

The theory part of the thesis examined the technical properties of steel industry slags and their use in earthworks. In addition, the review focused particularly on studies related to EAF slag and the required properties of aggregates used in earthworks. Currently, research on EAF slag mainly focuses on scrap-based EAF slag, which is most commonly utilized in bound layers of roads due its high strength, high skid resistance and resistance to mechanical wear. The use of EAF slag in earthworks has been limited by variations in its chemical compositions, potential heavy metal leaching and uncertainties regarding its expansion properties.

The EAF slag examined in this study was produced in a pilot electric arc furnace during the melting of hydrogen direct reduced iron (H-DRI). The following properties of the EAF slag were investigated at the geotechnical laboratory of the University of Oulu: particle size distribution, optimum moisture content, maximum dry density, capillarity, angle of shear resistance, permeability, water retention capacity, specific gravity, frost susceptibility, and expansion after storage. Based on the results, the EAF slag is a non-frost-susceptible material with high specific gravity and low fines content. Compared to blast furnace slag and crushed rock, the EAF slag also exhibited higher maximum dry density, lower capillarity, and weaker water retention capacity. On the other hand, all three materials showed similar values for permeability and internal friction angle. Like with other iron and steelmaking slags, there where difficulty to achieve the desired compaction with EAF slag, which weakens the comparability of the results, especially with crushed rock. The target compaction level was not reached particularly in the direct shear box test and frost heave test. Uncertainty was also caused by the crushing of EAF slag in the Proctor test.

Based on its technical properties, the most potential application of the EAF slag is in unbound layers of road structures. Characteristics such as frost resistance, low capillarity, high internal friction angle, and lower water retention capacity indicate the material's suitability for use in base, subbase and filter layer of roads. However further research is needed to investigate the expansion behaviour of fresh slag, its bearing capacity, fines generation, and freeze-thaw resistance. It should also be noted that this study focused on only one type of EAF slag, and in the future, steel production will involve the simultaneous use of hydrogen direct reduced iron and steel scrap, which affect the properties of the forming EAF slag.

Keywords: EAF slag, electric arc furnace slag, geotechnical properties, earthworks

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin työsuhteessa Oulun yliopiston Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimusyksikölle syyskuun 2024 ja huhtikuun 2025 välisenä aikana. Haluan kiittää ohjaajiani Anne Tuomelaa, Salla Konttista, Marko Mäkikyröä ja Jaakko Louhisalmea työn ohjaamisesta ja kommentoimisesta. Kiitokset myös Marko Sorjaselle työn kommentoinnista. Lisäksi haluan osoittaa kiitokset Tuomo Pitkäselle ja Tapani Mäntykentälle isosta avusta laboratoriotöiden tekemisessä.

Tämä diplomityö päättää samalla yhdyskuntatekniikan diplomi-insinöörin opintoni Oulun yliopistossa. Haluan kiittää opiskelukavereitani yhteisistä hetkistä niin opiskeluiden parissa kuin muuallakin. Olette olleet korvaamaton tuki ensimmäisestä yliopistopäivästä lähtien. Kiitokset myös perheelleni ja työkavereilleni WSP:llä kannustuksesta opintojen ja diplomityön aikana.

Oulu, 10.04.2025

Tiia Koskela

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	12
1.1	Työn tavoitteet ja rajaukset	13
1.2	Tutkimusmenetelmät	14
2	TERÄKSEN VALMISTUKSEN KUONAT	15
2.1	Masuunikuonan tuotanto ja tekniset ominaisuudet	16
2.2	Konvertterikuonan tuotanto ja tekniset ominaisuudet	20
2.3	Senkkakuonan tuotanto ja tekniset ominaisuudet	23
2.4	Valokaariuunikuonan tuotanto	24
3	EAF-KUONAN AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET	27
3.1	Laboratoriokokeet	27
3.2	Kokemukset väylärakenteissa	28
4	KUONIEN KÄYTTÖ MAARAKENTAMISESSA	30
4.1	Käyttökohteet	30
4.2	Materiaalin teknisessä hyväksynnässä noudatettavat ohjeet ja määräykset	31
4.3	Tekniset vaatimukset tierakenteissa	34
4.4	Vaatimukset muissa infrarakenteissa	39
4.5	Kuonien pitkäaikaiskestävyys ja kiertotaloudellinen merkitys	40
5	MATERIAALIT JA MENETELMÄT	42
5.1	Tutkittavat materiaalit ja näytteiden valmistus	42
5.2	Kemiallinen analyysi	44
5.3	Kuiva- ja pesuseulonta	45
5.3.1	Kokeen tarkoitus	45
5.3.2	Kokeen suoritus	46
5.4	Parannettu Proctor-koe	49
5.4.1	Kokeen tarkoitus	49
5.4.2	Kokeen suoritus	49
5.5	Kapillaarisuus	54

5.5.1	Kokeen tarkoitus.....	54
5.5.2	Kokeen suoritus	55
5.6	Rasialeikkaukoe	56
5.6.1	Kokeen tarkoitus.....	56
5.6.2	Kokeen suoritus	58
5.7	Vedenpidätyskoe.....	59
5.7.1	Kokeen tarkoitus.....	59
5.7.2	Kokeen suoritus	60
5.8	Vedenläpäisevyys	63
5.8.1	Kokeen tarkoitus.....	63
5.8.2	Kokeen suoritus	63
5.9	Kiintotiheyden määrittäminen	65
5.9.1	Kokeen tarkoitus.....	65
5.9.2	Kokeen suoritus	65
5.10	Paisuntakoe.....	67
5.10.1	Kokeen tarkoitus.....	67
5.10.2	Kokeen suoritus	67
5.11	Routanousukoe	68
5.11.1	Kokeen tarkoitus.....	68
5.11.2	Kokeen suoritus	69
6	TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	72
6.1	Kemiallinen analyysi	72
6.2	Toimitusvesipitoisuus	73
6.3	Rakeisuus.....	73
6.4	Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus	74
6.5	Kapillaarinen nousukorkeus	75
6.6	Leikkauskestävyyskulma.....	76
6.7	Vedenpidätyskyky.....	77
6.8	Vedenläpäisevyys	79
6.9	Kiintotiheys	80
6.10	Paisunta.....	81
6.11	Routivuus.....	82
6.12	Koostetaulukko koetuloksista.....	83

7	JOHTOPÄÄTÖKSET	84
8	YHTEENVETO.....	86

LÄHDELUETTELO

LIITE 1: PROCTOR-KOKEEN TULOKSET

LIITE 2: RASIALEIKKAUSKOKEEN TULOKSET

LIITE 3: ROUTANOUSUKOKEEN TULOKSET

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	Pinta-ala
c'	Tehokas koheesio [kPa]
C_u	Raekokosuhde
d	Paisuntalaitteiston sylinterin sisähalkaisija [mm]
d_{10}	Materiaalin rakeiden tehokas läpimitta [mm]
d_{50}	Materiaalin rakeiden keskiläpimitta [mm]
h	Routanousu [mm]
H	Roudan syvyys [mm]
h_n	Näytteen korkeus
H_p	Painekorkeus vedenläpäisevydessä [m]
h_c	Kapillaarinen nousukorkeus [cm]
h_p	Näytteen pystysiirtymä paisuntakokeen jälkeen [mm]
k_T	Vedenläpäisevyys lämpötilassa T [m/s]
m_a	Vedellä täytetyn pyknometrin massa [g]
m_b	Pyknometrin, näytteen ja veden massa [g]
m_k	Kuivan näytteen massa [g]
m_m	Kostean näytteen massa [g]
m_s	Kiintoaineksen massa [g]
m_w	Veden massa [g]
$m\%$	Massaprosentti [%]
PS	Tilavuuden muutos [%]
Q	Vedenläpäisevyyskokeessa näytteen läpi virrannut vesimäärä ajassa t [m ³]
SP	Segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh]
T	Lämpötila [°C]
t	Aika
V	Tilavuus
V_s	Näytteen tilavuus paisuntalaitteiston sylinteriin tiivistämisen jälkeen [cm ³]
w_{opt}	Optimivesipitoisuus [%]
$w^0\%$	Vesipitoisuus painoprosentteina [%]
$w_{til}\%$	Tilavuusvesipitoisuus [%]

γ	Tilavuuspaino [kN/m ³]
γ_{dmax}	Maksimikuivatilavuuspaino [kN/m ³]
ρ_d	Kuivairtoteihs [g/cm ³]
ρ_s	Kiintoteihs [g/cm ³]
ρ_w	Veden teihs [g/cm ³]
ρ_{wT}	Veden teihs lämpötilassa T [g/cm ³]
σ'	Tehokas normaaliännitys [kPa]
τ_f	Leikkauslujuus [kPa]
ϕ'	Tehokas leikkauskestävyyskulma [°]
DRI	Suorapelkistetty rauta (Direct reduced iron). Tyypillisesti maakaasulla pelkistetty
EAF	Valokaariuuni (Electric arc furnace)
HBI	Kuumapuristettu rauta (Hot briquetted iron)
H-DRi	Vedyllä suorapelkistetty rauta (Hydrogen direct reduced iron)
Hk	Hiekka
HkMr	Hiekkamoreeni
KaM	Kalliomurske
LD-MaHk	LD-masuunihiekka (teräskuonan ja masuunihiekan sekoitus)
MaKu	Ilmajähdytetty masuunikuonamurske
PANK	Päällystealan neuvottelukunta
PSV	Kiviaineksen kiillottumisarvo (Polishing stone value)
SiMr	Silttimoreeni
Sr	Sora
SrMr	Soramoreeni

1 JOHDANTO

Teräs on keskeinen materiaali yhteiskunnassamme, ja sitä hyödynnetään laajasti muun muassa rakentamisessa, liikennevälineissä sekä uusiutuvan energian tuotantoon liittyvissä rakenteissa, kuten tuulivoimaloissa ja aurinkopaneeleissa. Teräksen vuosituotanto on noin 1,9 miljardia tonnia ja sen oletetaan edelleen kasvavan kulutuksen lisääntyessä ja infrastruktuurien laajentuessa. Kuitenkin samaan aikaan teräksen tuotanto on yksi merkittävimmistä hiilidioksidin päästölähteistä vastaten noin 7–9 % globaaleista kasvihuonepäästöistä. Teräksen valmistuksesta noin 70 % teräksestä tuotetaan masuunikonvertteriprosessilla, jossa ainoastaan rautamalmin pelkistäminen kivihiilellä tuottaa 1,2 tonnia suoria hiilidioksidipäästöjä yhtä raakaterästonnia kohden. Tämän vuoksi terästuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on ratkaisevan tärkeää alan ilmastovaikutusten pienentämiseksi. (International Energy Agency 2020)

Yksi keino vähentää terästeollisuuden päästöjä on korvata masuuniprosessin kivihiilipohjainen rautamalmin pelkistys vedyllä tapahtuvalla suorapelkistyksellä, jossa reaktion ainoana sivutuotteena muodostuu vettä. Tämän jälkeen rautasieneksi pelkistetty rautalmi voidaan syöttää sähköllä toimivaan valokaariuuniin. Yhdessä muiden terästeollisuuden uudistusten kanssa tämän arvioidaan vähentävän Euroopan unionin terästeollisuuden päästöjä 30 % vuoteen 2030 mennessä. Pitkän aikavälin tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius viimeistään vuoteen 2050 mennessä. (EUROFER 2022) Muutokset prosessissa tuottavat myös uudenlaisia sivutuotteita, joille on tärkeää löytää jatkokäyttömahdollisuuksia kiertotalouden ja fossiilivapaan tuotannon edistämiseksi. Teräksen sivutuotteiden hyödyntäminen vähentää kaatopaikkajätteen määrää, pienentää hiilidioksidipäästöjä sekä edistää luonnonvarojen säilyttämistä. (World Steel Association 2021)

Teräksen valmistuksessa tuotetaan vuosittain sivutuotteena yli 400 miljoonaa tonnia erilaisia kuonia, joiden koostumukseen ja ominaisuuksiin vaikuttaa teräksen valmistukseen käytetty prosessimenetelmä, raaka-aineet sekä muun muassa kuonan jäähtymisprosessi. Muutoksien myötä valokaariuuniin voidaan syöttää raaka-aineena vetypelkistettyä rautasientä (eng. hydrogen direct reduced iron, H-DRI), joka vaikuttaa siten tuotettavan valokaariuunikuonan (eng. electric arc furnace slag, EAF slag)

ominaisuuksiin. Masuunikuonan, konvertterikuonan ja romupohjaisen EAF-kuonan käyttökohteet ja ominaisuudet maarakentamisessa tunnetaan, mutta uuden H-DRI pohjaisen EAF-kuonan mahdollisuuksia ei tiedetä. Jotta EAF-kuonaa pystyttäisiin hyödyntämään maarakentamisessa, on sen geotekniset ominaisuudet selvitettävä. (World Steel Association 2021) Kuonien hyödyntäminen maarakentamisessa vähentää myös luonnon kiviaineksien käyttöä, mikä puolestaan pienentää louhinnan aiheuttamia haitallisia vaikutuksia ympäröiville ekosysteemeille. Lisäksi luonnonkiviainekset ovat uusiutumaton luonnonvara. (Suomen ympäristökeskus 2015)

1.1 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tämän työn päämääränä on selvittää fossiilivapaan teräksen valmistuksessa syntyvän kuonan käyttömahdollisuuksia maarakentamisessa. Työssä tutkitaan H-DRI-pohjaisen EAF-kuonan geoteknisiä ominaisuuksia. Kuona on peräisin vetypelkistetyn rautasiemen koesulatuksesta pilottivalokaariuunissa. Tavoitteena on arvioida kuonamateriaalin soveltuvuutta eri infrarakenteisiin, jotta sitä voitaisiin tulevaisuudessa käyttää koerakentamiseen.

Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan aiempia tutkimuksia EAF-kuonan ominaisuuksista ja käytöstä maarakentamisessa. Lisäksi perehdytään yleisesti teräksen valmistuksessa syntyviin kuoniin, niiden geoteknisiin ominaisuuksiin sekä niille asetettuihin vaatimuksiin maarakentamisessa.

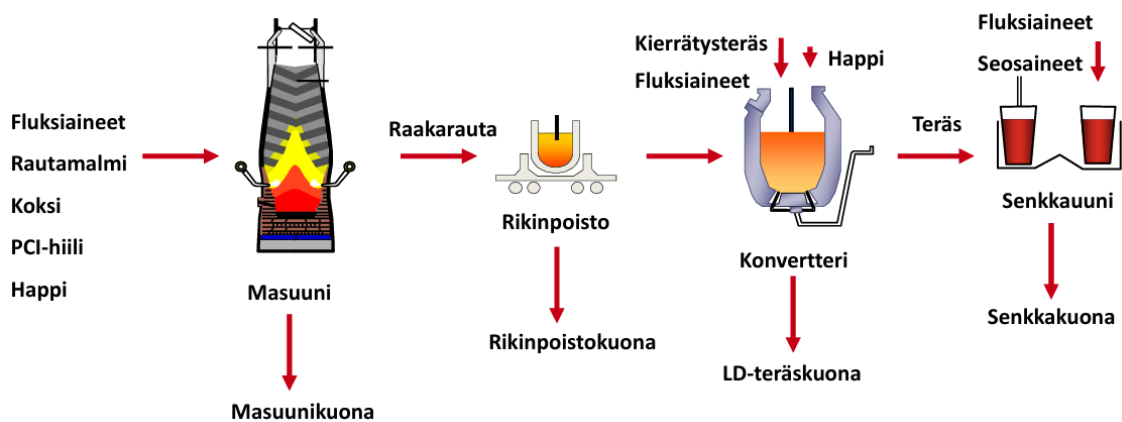
Tämä työ keskittyy tutkimaan ainoastaan kuonan teknistä soveltuvuutta maarakentamiseen. Tutkimuksessa ei oteta huomioon mahdollisia kuonaan käyttöön liittyviä ympäristövaikutuksia, eikä käyttöä rajoittavia tekijöitä, kuten saatavuutta, logistiikkaa tai kustannuksia. Lisäksi tässä työssä tutkitaan vain yhdessä erässä syntynyttä H-DRI-pohjaista EAF-kuonaa, eikä käsitellä sitä, kuinka mahdollisen romun määrän vaihtelu teräksen raaka-aineena vaikuttaa myös kuonan laatuun ja ominaisuuksiin.

1.2 Tutkimusmenetelmät

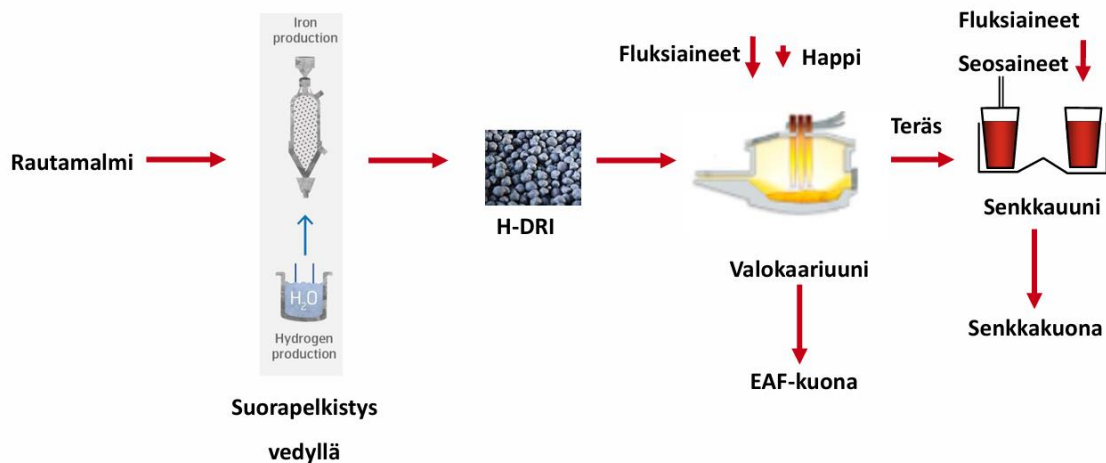
Tutkimusosiossa tutkitaan EAF-kuonan, ilmajähdytetyn masuunikuonan (MaKu) ja kalliomurskeen (KaM) rakeisuus, optimivesipitoisuus, maksimikuivatilavuuspaino, leikkauskestävyyskulma, vedenläpäisevyys ja vedenpidätyskyky, sekä kiintotiheys ja routivuus. Lisäksi EAF-kuonalta ja masuunikuonalta tutkitaan paisumisominaisuudet. Osiossa kuvataan ensin käytetty koemenetelmä ja sen tarkoitus sekä esitetään luonnonkiviainesten tyypillisiä ominaisarvoja. Tämän jälkeen käsitellään tutkittavat materiaalit, kokeen suoritus sekä käytetyt laitteistot. Samalla käsitellään myös tuloksien luotettavuuteen ja vertailtavuuteen vaikuttavat tekijät. Lopuksi esitellään saadut tulokset ja niiden analyysi.

2 TERÄKSEN VALMISTUKSEN KUONAT

Teräksen valmistuksessa muodostuvalla kuonalla tarkoitetaan sulatusprosessissa muodostuvaa mineraalipitoista sivutuotetta, joka koostuu pääasiassa eri alkuaineiden oksideista, kuten pii-, kalsium-, alumiini ja rautaoksideista. Sen roolina prosessissa on toimia muun muassa epäpuhtauksien poistajana ja hapettumisen estäjänä. Yleisimmät teräksen valmistuksessa syntyvät kuonat ovat masuunikuona, konvertterikuona ja valokaariuunikuona. Ne voidaan karkeasti lajitella raudanvalmistuksen kuonaksi ja teräksen valmistuksen kuonaksi sen mukaan, mitä kyseisessä prosessivaiheessa valmistetaan. (World Steel Association 2021) Muita perinteisessä raudanpelkistys- ja teräksen valmistuksessa tuotettavia kuonia ovat rikinpoistokuona ja senkkakuona. Rikinpoistokuonaa ei kuitenkaan yleisesti käytetä infrarakentamisessa sen korkean vapaan kalkin ja rikkipitoisuuden vuoksi. (Liu ym. 2021, s. 586) Kuvassa 1 on yksinkertaistettuna teräksen valmistus masuuni-konvertteriprosessilla sekä kuvassa 2 suorapelkistys-valokaariuuniprosessilla.



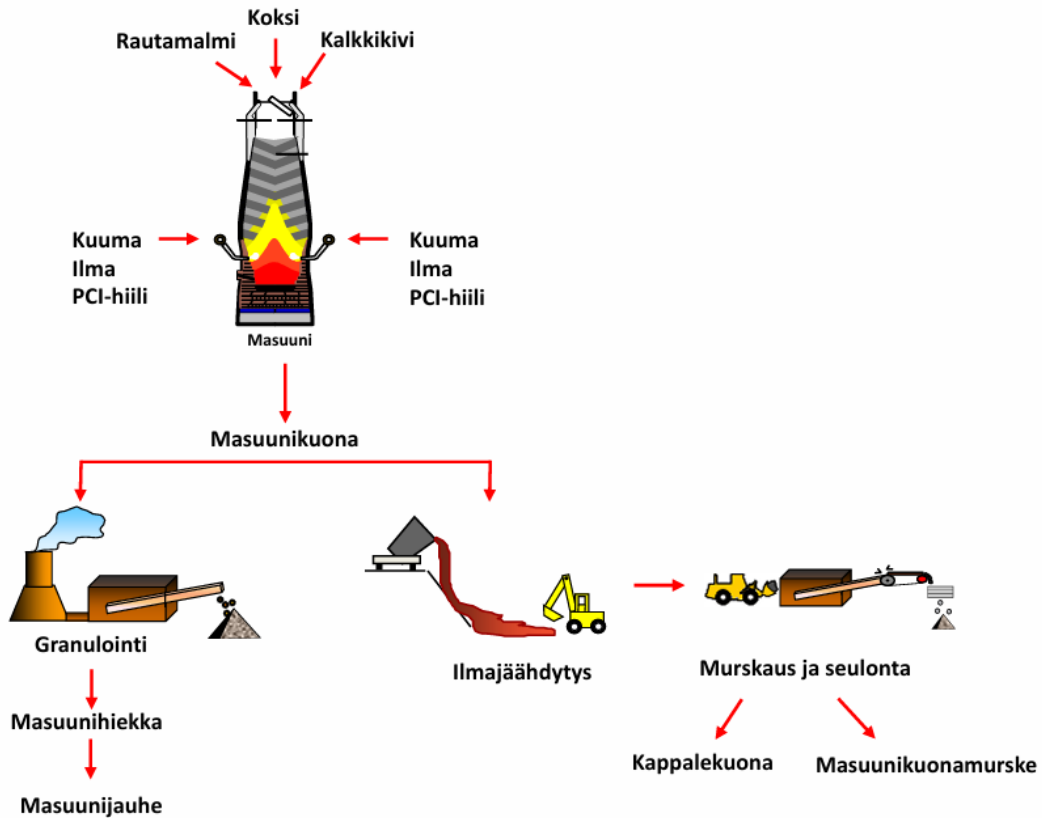
Kuva 1. Teräksen valmistus masuuni-konvertteriprosessilla (mukailten SSAB 2025).



Kuva 2. Teräksen valmistus suorapelkistys-valokaariuuniprosessilla (mukaiillen SSAB 2025).

2.1 Masuunikuonan tuotanto ja tekniset ominaisuudet

Masuunikuonaa tuotetaan, kun teräksen valmistusprosessissa rautaoksidit pelkistetään korkeassa lämpötilassa raakaraudaksi. Pelkistys tapahtuu kivihiilestä valmistetun koksen avulla, joka palaessaan muodostaa hiilimonoksidia, ja joka puolestaan reagoi raaka-aineena käytettävän rautamalmin kanssa. Palamisen mahdollistamiseksi masuuniin puhalletaan alaosasta suuttimien kautta tasaisesti kuumaa ilmaa, johon voidaan lisätä PCI-hiiltä (eng. pulverized coal injection) koksen kulutuksen vähentämiseksi. Uuniin syötetään myös fluksiaineita, joiden avulla sulan metallin päälle saadaan muodostumaan kuonakerros, johon epäpuhtaudet, kuten rikki saadaan sidottua. Fluksiaineina käytetään yleensä kalkkikiveä (CaCO_3), dolomiittia ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) tai pelleteinä ja sintrattuina lisättyjä kalsiumoksidi- (CaO) ja magnesiumoksidiyhdisteitä (MgO). Epäpuhtauksien poistamisen lisäksi kuonan tehtävänä on luoda uuniin olosuhteet, jotka mahdollistavat raaka-aineiden tasaisen sulamisen sekä estää raudan liika hapettuminen ilmakehän vaikutuksesta. (Cameron ym. 2019) Kuvassa 3 on havainnollistettu masuunikuonatuotteiden valmistaminen granuloimalla ja ilmajähdyttämällä lähtien masuuniin syötettävistä raaka-aineista.



Kuva 3. Masuunikuonatuotteiden valmistusprosessi yksinkertaistettuna (mukaiillen SSAB 2025).

Kuona muodostuu pääosin hajonneista fluksiaineista ja oksideihin sitoutuneista malmin epäpuhtauksista, kuten piidioksidista ja alumiinioksidista. Kemiallisen koostumuksensa vuoksi kuona on emäksistä. Prosessi edellyttää tarkasti hallittuja olosuhteita, minkä vuoksi syntyvä kuona on masuunikohtaisesti tasalaatuista ilman suuria vaihteluja koostumuksessa. (Cameron ym. 2019) Taulukossa 1 on esitetty masuunikuonan tyypillisiä kemiallisia koostumuksia.

Taulukko 1. Masuunikuonan tyypillisiä kemiallisia koostumuksia (Lewis 1982).

Alkuaine/Yhdiste	Määrä (m-%)
CaO	32-44
SiO ₂	32-42
Al ₂ O ₃	7-16
MgO	5-15
FeO, Fe ₂ O ₃	0,1-1,5
MnO	0,2-1,0
S	1-2

Ilmajähdytettyä kuonaa valmistetaan kaatamalla nestemäinen kuona penkkaan ja antamalla sen jäähtyä ulkoilman vaikutuksesta. Jäähtymistä voidaan nopeuttaa suihkuttamalla penkkaan vettä, mikä samalla vähentää kuonan pölyämistä. Pitkän jäähtymisajan vuoksi kuona saavuttaa kiteisen ja kovan rakenteen, josta se myöhemmin murskataan haluttuun raekokoon. (Cameron ym. 2019, s. 642) Ilmajähdytettyä masuunikuonaa kutsutaan kappalekuonaksi, kun sen raekoko on 0–200 mm, ja masuunikuonamurskeeksi, kun kuona on murskattu tätä pienemmäksi. Murskattu kuona on huokoinen ja siten rakeisuudeltaan sitä vastaavaa luonnonmursketta kevyempi. Rakeet ovat pääasiassa muodoltaan teräväsärmäisiä ja karheita, mikä johtaa suureen leikkauskestävyyskulmaan. Masuunikuonamurskeen rakeiden muodon ja kemiallisen koostumuksen vuoksi sillä tehdyillä rakenteilla saavutetaan luonnonmateriaaleja parempi lämmöneristävyys ja kantavuus. Rakeet särkyvät tiivistettäessä enemmän kuin luonnon kiviainekset, mutta tämän ei ole huomattu vaikuttavan kantavuusominaisuuksiin. (Liikennevirasto 2011, s. 38–39)

Masuunihiekka vastaavasti tuotetaan vesijähdyttämällä eli granuloimalla masuunista saatava sula kuona. Tällöin kuona juoksutetaan paineelliseen vesisuihkuun, joka rikkoo kuonan 0–5 mm rakeiksi. Nopeasta jäähtymisestä johtuen kuona ei ehdi kiteytyä, jolloin muodostuu amorfinen eli lasimainen rakenne. (Rakennustieto 2020) Masuunihiekka vastaa rakeisuudeltaan hiekkaa, mutta sen tilavuuspaino on pienempi johtuen jäähdytysprosessin aikana muodostuneista ilmakuplista. Rakeet ovat myös luonnonhiekkaa teräväsärmäisempiä. Masuunihiekka voidaan edelleen jauhaa masuunijauheeksi, jota käytetään erityisesti betonin sideaineena. (Hara & Nasu 2024, s. 1)

Masuunihiekka sitoutuu, kun se reagoi veden kanssa emäksisissä olosuhteissa. Uudelleen sitoutuminen johtuu sen kemiallisista ominaisuuksista ja lasimaisesta rakenteesta, jolloin siitä liukenevat kalsium- ja silikaatti-ionit muodostavat kalsiumsilikaattihydraattia (C-S-H), joka on sementtimäinen yhdiste. Kuitenkin suurin osa kalsium- ja silikaatti-ioneista on sitoutunut stabiileihin mineraaleihin, jonka vuoksi ioninen liukeneminen on hidasta ja sitoutuminen tapahtuu pitkän ajan kuluessa. (Hara & Nasu 2024, s. 1–2) Sitoutuessaan masuunihiekasta tulee puolijäykkä rakenne, jolla on luonnon kiviaineksia parempi kantavuus. Rakenteen kantavuutta ja käyttöikää parantaa myös ajan kuluessa pinnan rikkoutuminen, jolloin sitoutuminen käynnistyy uudelleen uusien reaktiivisten pintojen tullessa esille. Lisäksi sitoutumista voidaan nopeuttaa alkaliaktivaattoreilla, jossa siitä on erityisesti hyötyä, kun masuunihiekkaa käytetään rakenteiden stabiliteetin parantamiseen. Alkaliaktivaattorina käytetään stabiloinnissa tyypillisesti sementtiä, joka liuottaa ja aktivoi amorfisia silikaattiyhdisteitä. Masuunihiekalla toteutettujen rakenteiden kaivu voi olla myöhemmin hankalaa lujittumisen takia kasvaneen kaivuvastuksen vuoksi. (Rakennustieto 2020) Masuunikuonamurskeella tapahtuu myös sitoutumista, mutta se on vähäisempää ja hitaampaa verrattuna masuunihiekkaan. Tämä johtuu suuremmasta rakeisuudesta, mikä pienentää reaktiivisten pintojen määrää. (Hara & Nasu 2024, s. 2; Väylävirasto 2022a, s. 59)

Masuunihiekalla toteutettavat rakenteet voidaan masuunikuonamurskeen tapaan tehdä luonnonkiviaineksilla tehtyihin rakenteisiin verrattuna ohuemmaksi hyvän lämmöneristävyuden vuoksi. Kevyt rakenne on myös hyödyksi heikosti kantavilla alustoilla, sillä se vähentää maapohjaan kohdistuvan kuorman suuruutta. (Rakennustieto 2020) Lisäksi masuunikuonat ovat on hyvin vettä läpäisevää ja niillä on alhainen kapillaarisuus. (Hara & Nasu 2024, s. 1) Taulukossa 2 on esitetty kappalekuonalle, masuunikuonamurskeelle ja masuunihiekalle tyypillisiä teknisiä arvoja.

Taulukko 2. Masuunikuonille tyypillisiä teknisiä arvoja (Liikennevirasto 2011; Liikennevirasto 2018; Väylävirasto 2022a; Rakennustieto 2020; Eerola 2002).

Ominaisuus	Kappale-kuona	Masuunikuona-murske	Masuuni-hiekka
Raekoko (mm)	0–200	0–64	0–5
Tilavuuspaino (kN/m ²)	15–18	16–19	14–15,5
Irtotiheys (t/m ³)	1,15–1,45	1,15–1,45	1,0–1,15
Kiintotiheys (g/cm ³)	2,6–2,7	2,6–2,7	2,6–2,7
Vedenläpäisevyys (m/s)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0,9–1,5x10 ⁻⁴
Leikkauskestävyyskulma (°)	40–45	40–45	45
Lämmönjohtavuus (W/mK)	0,7	0,9	0,35
Kapillaarisuus (m)			
Vastaavuuskerroin (a _i)*	-	-	0,1–0,2
	1,6	1,6	1,7

*Vastaavuuskertoimella tarkoitetaan suodatinkerroksen hiekkaan verrattavaa roudan eristävyyttä.

Masuunikuonaa voidaan myös pelletoida, mutta tämä ei ole yleistä. Pelletoinnissa sula kuona ohjataan pyörivään rumpuun, jossa kuonaan suihkutetaan vettä. Samalla rumpun siivekkeet sinkoavat kuonapisarat ilmaan, jolloin ne ehtivät muotoutua pyöreiksi ja sileäpintaisiksi pelleteiksi ennen jäähtymistä. Pelletointiprosessi kuluttaa huomattavasti vähemmän vettä kuin granulointi. Pellettien koko vaihtelee 13–150 mm, ja kuona on kevyt sekä huokoinen, minkä lisäksi sillä on alhainen lämmönjohtavuus. Hienoksi jauhettuna sillä on sementin kaltaisia ominaisuuksia, jonka vuoksi sitä käytetään pääasiassa vain betonin seosaineena. (Emery 1980)

2.2 Konvertterikuonan tuotanto ja tekniset ominaisuudet

Konvertterissa masuunista peräisin oleva sula raakarauta, romumetalli ja fluksiaineet syötetään reaktioastiaan, jossa tapahtuu raudan hiilipitoisuuden alentaminen ja epäpuhtauksien poistaminen. Prosessin tavoitteena on erilaisten teräslaatujen saavuttaminen säätämällä prosessin olosuhteita ja syötettävän romumetallin laatua. Linz-Donawitzin (LD) menetelmässä konvertteriin lasketaan ylhäältä lanssi, jonka kautta puhalletaan korkeapaineista happea. Happi sekoittaa panoksia ja reagoi raudan hiilen sekä epäpuhtauksien kanssa muodostaen hiilimonoksidia sekä piin, mangaanin, fosforin ja

raudan oksideja. Fluksiaineina käytetään yleisimmin poltettua kalkkia eli kalsiumoksidia (CaO) ja dolomiittia (CaMg(CO₃)₂), jotka sitovat epäpuhtaudet muodostaen LD-teräskuonaa. Puhalluksen loputtua nestemäinen teräs kaadetaan valusenkkään ja LD-teräskuona jää konvertteriin, josta se myöhemmin kaadetaan kuonavaunuihin. Jäähdyntä teräskuonaa käsitellään yleensä vielä myöhemmin poistamalla siitä magneettisesti rautaa, jota voidaan käyttää uudelleen prosessissa. (Shi 2004, s. 230)

LD-teräskuona muodostuu pääasiassa kalsiumoksidista (CaO), magnesiumoksidista (MgO), piidioksidista (SiO₂) sekä rautaoksidista (FeO). Yhdisteiden ja alkuaineiden pitoisuudet vaihtelevat sen mukaan, minkälaista terästä valmistetaan. (Shi 2004, s. 231) Erona masuunikuonaan on alhaisempi piidioksidin (SiO₂) ja alumiinioksidin (Al₂O₃) pitoisuudet sekä korkea rautaoksidipitoisuus. Suomalainen LD-kuona sisältää ulkomaisiin kuoniin verrattuna keskimääräisesti enemmän kalsiumoksidia ja vähemmän magnesiumoksidia. (Mäkikyrö 1996, s. 9-10) Taulukossa 3 on esitetty LD-teräskuonan tyypillisiä koostumuksia.

Taulukko 3. LD-teräskuonan tyypillisiä kemiallisia koostumuksia (Shi 2004, s. 231).

Alkuaine/Yhdiste	Määrä (m-%)
CaO	30-55
SiO ₂	8-20
Al ₂ O ₃	1-6
MgO	5-15
FeO	10-35
MnO	2-8
TiO ₂	0,4-2
S	0,05-0,15
P	0,2-2
Cr	0,1-0,5

LD-teräskuonalla on masuunikuoniin verrattuna suurempi taipumus paisua vapaan kalkin reagoitessa veden kanssa. Laajeneminen johtuu reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin (Ca(OH)₂) suuremmasta tilavuudesta verrattuna reaktion lähtöaineeseen. Paisumista lisää kuonan korkea emäksisyys, jota yleisimmin kuvataan CaO/SiO₂ suhteella. Myös magnesiumoksidi voi hydratoitua, mutta siitä aiheutuva paisuminen on hitaampaa ja

vähäisempää. LD-teräskuonan vapaa kalkki koostuu fluksiaineen reagoimatta jääneestä jäännöskalkista sekä sulasta kuonasta saostuneesta kalkista. Kun vapaan kalkin kokonaispitoisuus on alle 4 %, se koostuu pääosin saostuneesta kalkista. Saostuneen kalkin määrä kasvaa suurimmillaan n. 2,8 %, jonka jälkeen vapaan kalkin kokonaispitoisuuden ollessa yli 4 %, koostuu se pääasiassa jäännöskalkista. Näin ollen LD-teräskuonan tilavuuden muutokset ovat riippuvaisia jäännöskalkin määrästä. Paisumista voidaan kuitenkin hallita usealla eri tavalla, joista varastointi eli kuonan vanhentaminen on yleisin keino. Tällöin suurin osa vapaasta kalkista reagoi ulkoilman veden kanssa. Vanhentamisen lisäksi paisumista voidaan ehkäistä sekoittamalla LD-teräskuonaa muihin materiaaleihin, kuten masuunikuonaan tai lentotuhkaan. Nämä materiaalit voivat sitoa LD-teräskuonan vapaata kalkkia ja magnesiumoksidia, mikä samalla nopeuttaa materiaaliseoksen sitoutumista. Myös eri jäähdytysmenetelmillä voidaan vaikuttaa vapaan kalkin määrään kuonassa. (Shi 2004, s. 232–234)

Suurella vapaan kalkin määrällä on myös hyödyllisiä vaikutuksia. Korkean vapaan kalkki ja magnesiumoksidipitoisuuden, emäksisyyden ja LD-teräskuonan sisältämän kalsiumsilikaatin (C_3S) vuoksi kuonassa tapahtuu myös sitoutumista siten, että sitä pidetään heikkona portlandklinkkerinä. (Shi 2004, s. 233) Portlandklinkkeriä käytetään maailman yleisimmän sementtityypin, portlandsementin, valmistamiseen. Portlandklinkkeri on tyypillisesti sementtiuunissa sulatettu kalkkikivipohjainen tuote, joka jauhetaan hienoksi. Klinkkerin pääasiallinen tarkoitus on antaa sementille lujuutta hydrataatioreaktioiden kautta. (Shi 2004, s. 233; Suomen Betoniyhdistys 2025)

LD-teräskuonalla on kulutuskestävyydeltään paremmat ominaisuudet kuin luonnon kiviaineilla, minkä vuoksi sitä käytetään pääasiassa tien päällystekerroksissa. Lisäksi sillä on suurempi puristuslujuus, korkea kovuusaste ja se tarjoaa hyvän kitkan asfaltissa. Kuitenkin LD-teräskuonaa käytettäessä tierakenteissa, tulee se varastoida vähintään 6 kuukautta ennen käyttöönottoa, ellei sen vapaan kalkin määrää alenneta jäähdytysmenetelmällä tai materiaaliseoksilla. LD-teräskuonan kiintotiheys on pääsääntöisesti yli $3,2 \text{ g/cm}^3$, mikä on huomattavasti korkeampi kuin masuunikuonalla ja luonnonkiviaineilla. Tämä voi rajoittaa LD-teräskuonan käyttöä erityisesti pehmeiköillä ja rakenteiden päällä, jotka ovat alttiita vaurioitumiselle. Korkeampi paino johtuu LD-teräskuonan sisältämästä rautaoksidien määrästä ja raskaista mineraaleista.

(Mahieux ym. 2008, s. 743–744; Motz & Geiseler 2001, s. 287) Taulukossa 4 on esitetty LD-teräskuonalle tien päällysteissä käytettävistä kiviaineksista mitattavia arvoja. Vertailuna on yleisenä rakennuskivenä käytetyn graniitin arvoja. Murskausarvo kuvaa kiviaineksen lujuutta puristuskuormitusta vastaan ja iskuarvo iskunkestävyyttä. Arvot kertovat testissä muodostuneen hienoaineksen määrän prosentteina. Kiviaineksen kiillottumisarvo (eng. polishing stone value, PSV) taas kuvaa kiviaineksen vastustuskykyä kiillottumiselle liikenteen vaikutuksesta. Suurempi arvo viittaa parempaan kitkaan.

Taulukko 4. LD-teräskuonan, masuunikuonamurskeen ja graniitin laatuarvoja tien päällystekerrosmateriaalina (Motz & Geiseler 2001, s. 287; Mäkikyrö 1996, s. 287).

Ominaisuus	LD-teräskuona	Masuunikuonamurske	Graniitti
Kovuusaste (Mohsin kovuusaste)	5–7	6	6
Kiintotiheys (g/cm ³)	≥3,2	2,6–2,7	2,5
Murskausarvo (m-%)	15	-	17
Iskuarvo (m-%)	22	-	12
Kiillottumisarvo (PSV)	58	-	48

2.3 Senkkakuonan tuotanto ja tekniset ominaisuudet

Senkkakuonaa tuotetaan, kun konvertterista valutetusta teräksestä poistetaan edelleen siihen jääneitä epäpuhtauksia tai lisätään seosaineita teräksen kemiallisen koostumuksen parantamiseksi. Prosessin tavoitteena on lopullisen rikki- ja happipitoisuuden vähentäminen, hapen, typen ja vedyn poistaminen sekä epäpuhtauksien erottaminen. Senkassa säädetään myös teräksen hiilipitoisuutta valmistettavan teräslaadun vaatimusten mukaisesti. Syntyvä kuona suojaa samalla senkan vuorauksia ja toimii lämpöeristeenä. (Jacob 2023, s. 61) Käytettävät fluksiaineet ja niiden määrä vaihtelevat, minkä vuoksi syntyvän kuonan ominaisuudet poikkeavat huomattavasti masuunikuonasta. Osassa teräksen valmistusprosesseissa senkkateräksen puhdistamiseen käytetään alumiinia, jolloin kuonassa on korkea Al_2O_3 -pitoisuus ja osassa taas kalsiumfluoridia, jolloin senkkakuona koostuu pääasiassa CaO :sta ja SiO_2 :sta. (Shi 2004, s. 231) Taulukossa 5 on esitetty senkkakuonan tyypillisiä kemiallisia koostumuksia.

Taulukko 5. Senkkakuonan tyypillisiä kemiallisia koostumuksia (Shi 2004, s. 231).

Alkuaine/Yhdiste	Määrä (m-%)
CaO	30–60
SiO ₂	2–35
Al ₂ O ₃	5–35
MgO	1–10
FeO	0,1–15
MnO	0–5
S	0,1–1
P	0,1–0,4
Cr	0–0,5

Senkkakuona on teräskuonien tapaan tiheä, kova ja sillä on hyvä sitoutumiskyky, mutta sen vaihtelevat ominaisuudet sekä suuri taipumus paisua tekevät siitä vaikeasti hyödynnettävän infrarakentamisessa. Senkkakuonalla tehdyt asfalttipäällysteet on huomattu tutkimuksissa olevan mekaanisilta ominaisuuksiltaan heikompia, kun vastaavia luonnonmateriaaleja käytettäessä. Senkkakuona voi myös hajota pölyksi, jos se jäädytetään nopeasti. (Jaboc 2023, s. 62–67)

2.4 Valokaariuunikuonan tuotanto

Valokaariuunia käytetään uuniin lisättävien panoksien sulattamiseen ja se mahdollistaa monipuolisen raaka-aineiden käytön teräksen valmistuksessa. Valokaariuuniin voidaan syöttää teräsromua, suorapelkistettyä rautaa (DRI), kuumapuristettua suorapelkistettyä rautaa (eng. hot briquetted iron, HBI), masuunista saatavaa rautaa tai sulaa metallia. Kaikki teräs voitaisiin teoriassa valmistaa kierrätetystä teräksestä, mutta tämä ei ole kuitenkaan tällä hetkellä mahdollista teräksen kulutuksen kasvaessa ja romun vähäisemmän saatavuuden vuoksi. Suorapelkistyksessä rautamalmi pelkistetään maakaasun tai vedyn avulla. Vety tarjoaa ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon masuunissa tapahtuvaan pelkistämiseen, sillä se vähentää hiilidioksidipäästöjä eikä edellytä fossiilisten polttoaineiden käyttöä. (Ehrenberg 2024, s. 3–5)

Valokaariuunissa käytettyjen raaka-aineiden sulattamiseen käytetään sähkövirtaa, joka johdetaan uunin sisällä oleviin grafiittielektrodeihin. Sulatusprosessin aikana uuniin voidaan myös lisätä seosaineita halutun kemiallisen koostumuksen saavuttamiseksi. Fluksiaineina käytetään kuonan muodostusta varten yleisimmin poltettua kalkkia tai dolomiittia. Epäpuhtauksien poiston tehostamiseksi uuniin puhalletaan happea. (Shi 2004, s. 231) Prosessissa tuotettua kuonaa kutsutaan EAF-kuonaksi, jonka määrä vaihtelee käytettyjen raaka-aineiden mukaan (World Steel Association 2010, s. 60).

EAF-kuonan pääkomponentteja ovat LD-teräskuonan tapaan CaO, MgO, SiO₂ ja FeO. Vapaan kalkin määrä on kuitenkin pienempi kuin LD-teräskuonassa. Valokaariuunilla tuotettujen kuonien koostumus vaihtelee merkittävästi käytettyjen raaka-aineiden ja valmistettavan teräksen laadun mukaan. (Shi 2004, s. 231) Tuotantolaitoksissa, jotka käyttävät pelkästään romumetallia, on havaittu, että kuonan kokonaisrautapitoisuus on pienempi kuin sekasyötöllä. Sen sijaan kalsiumoksidin, rikin, fosforin ja fluorin pitoisuudet ovat korkeammat. Kuonan kromipitoisuutta pidetään seurattavana arvona, sillä siinä oleva kolmen arvoinen kromi (Cr³⁺) voi ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta hapettua kuuden arvoiseksi kromiksi (Cr⁶⁺), joka on haitallinen sekä ihmisten terveydelle että ympäristölle. Hiiliteräksen valmistuksessa syntyvät EAF-kuonat ovat kemialliselta koostumukseltaan hyvin samantapaisia kuin LD-teräskuonat, kun taas osassa ruostumattoman teräksen valmistuksessa syntyvissä kuonissa on alhaisempi FeO-pitoisuus ja korkea kromipitoisuus. Kuonan käsittelyyn käytetään pääasiassa murskausta, seulontaa ja metallin talteenottoa, kun sitä käytetään tienrakennukseen. (World Steel Association 2010, s. 62, 67–68) Yildirim ja Prezzi (2011) ovat keränneet EAF-kuonan kemiallisia koostumuksia eri tutkimuksista (taulukko 6).

Taulukko 6. EAF-kuonan tyypillisiä kemiallisia koostumuksia (Yildirim & Prezzi 2011, s. 5)

Alkuaine/Yhdiste	Määrä (m-%)
CaO	23-60
SiO ₂	9-20
Al ₂ O ₃	2-12
MgO	3-15
FeO	1-30
MnO	2-8
TiO ₂	0,5-0,8
SO ₃	0,1-0,6
P ₂ O ₅	0-0,6
Cr	0,01-2,52

3 EAF-KUONAN AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET

EAF-kuonista toteutetut tutkimukset keskittyvät kuoniin, jotka ovat syntyneet pääraaka-aineena romua käyttävistä teräksen valmistusprosesseista. Kuonia käytetään yleisimmin tienrakennuksessa, ja betonin valmistuksessa luonnon kiviaineksen korvikkeena. Kuitenkin EAF-kuonien vaihteleva kemiallinen koostumus sekä epävarmuus paisumaominaisuuksista ja raskasmetallien liukoisuudesta ovat rajoittaneet sen käyttöä maarakentamisessa. Lisäksi tutkimuksissa havaittu korkea kiintotiheys hankaloittaa kuonan käyttöä kauempana muodostumispaikasta kuljetuskustannusten noustessa. (Teo ym. 2020, s. 7–9)

3.1 Laboratoriokokeet

EAF-kuonat vastaavat rakeisuudeltaan yleisimmin luonnon kiviaineksista soraa ja hienojakoisimmat hiekkaa. Eri kirjallisuuslähteiden mukaan kiintotiheys vaihtelee 3,0–4,5 g/cm³ välillä. Suuri vaihteluväli johtuu pääasiassa rautaoksidipitoisuuden ja huokoisuuden vaihtelusta. (Santamaria ym. 2018, s. 600–601) Muodostuvan kuonan mineraloginen ja kemiallinen koostumus vaikuttaa myös sen sitoutumisominaisuuksiin. EAF-kuonan korkea rautaoksidipitoisuus johtaa kiteiseen rakenteeseen, mikä vastaavasti vähentää kuonan sitoutumiskykyä. Osassa kuonista on havaittu myös erittäin alhaisia vapaan kalkin ja magnesiumoksidin pitoisuuksia. (Frías Rojas & Sánchez de Rojas 2004)

Maghool ym. (2018) on määrittänyt tutkimuksessaan EAF-kuonan geoteknisiä ominaisuuksia. Kuonanäytteenä on käytettyä 0–20 mm seulottua valokaariuunissa teräsromun kierrätyksessä syntyvää kuonaa. Kuonan maksimikuivairtoteheydeksi on saatu 2,43 g/cm³, optimivesipitoisuudeksi 2,9 % ja vedenläpäisevyydeksi 1,19x10⁻⁶ m/s. Tutkimuksessa toteutetussa avoimessa, konsolidoituneessa rasialeikkauskokeessa 60 kPa ja 120 kPa pystykuormalla leikkauskestävyyskulman arvo vaihteli 71–69° ja koheesio 82–102 kPa välillä. Tutkimuksessa havaittiin kuonan omaavan hyvän vedenläpäisevyyden sekä rakeiden vaihtelevasta muodosta johtuvan lukkiutumisoimaisuuden.

Santamaria ym. (2018) on tutkinut EAF-kuonan paisumista standardin EN 1774-1 mukaisella kokeella. Kokeet toteutettiin tuoreelle kuonalle ja ulkoilmassa 3 kuukautta vanhennetulle kuonalle. Näistä ensimmäiselle kuonalle saatiin paisumisen arvoksi 1,54–2,06 % ja jälkimmäiselle 0,33–0,72 %. Tutkittujen kuonanäytteiden CaO-pitoisuus oli 26,8 m-% ja MgO-pitoisuus 2,8 m-%. Myös Pasetton & Baldon (2010) toteuttamissa paisuntatesteissä molemmat tutkittavat näytteet näyttivät 0 % paisumaa 168 tunnin jälkeen.

EAF-kuonaa on tutkittu myös sepelin korvikkeena rautateissä. Alves ym. (2024) suorittamassa kokeessa pyrittiin simuloimaan ratarakenteeseen kohdistuvia olosuhteita ja määrittämään materiaalin tekniset ominaisuudet sen käyttäytymisen arvioimiseksi eri rasiutilanteissa. Kolmiakσιαalikokeista saatujen tuloksien mukaan EAF-kuona kestää hyvin eri kuormituksia ja sillä havaittiin olevan suuri leikkauskestävyyskulma ja vähäinen pysyvä muodonmuutos. EAF-kuonan todettiin siis soveltuvan näiden ominaisuuksien perusteella hyvin alusrakennekerroksen materiaaliksi.

3.2 Kokemukset väylärakenteissa

Väylärakenteissa kokemukset liittyvät lähinnä EAF-kuonan käyttöön tiepäällysteissä, jossa voidaan hyödyntää sen suurta lujuutta sekä hyvää kitkaa ja kestävyyttä mekaanista rasitusta vastaan. EAF-kuonan ominaisuudet ovat osoittautuneet yhtä hyväksi kuin vastaavilla luonnonmateriaaleilla, ja lisäksi sillä on hyvä kemiallinen yhteensopivuus sidosaineiden kanssa. Kuitenkin matalissa lämpötiloissa jäykät seokset voivat altistaa päällysteen halkeilulle ja lyhentää väsymisikää vuorokauden lämpötilavaihteluiden seurauksena. (Pasetto & Baldo 2010) Tutkimuksissa on myös huomattu, että EAF-kuonaa käytettävissä asfalttiseoksissa on havaittu makrostruktuurin vähenemistä (15–20 %), mikä voi johtua partikkeleiden uudelleen järjestäytymisestä liikennekuormituksen alla (Kehagia 2009).

Suer ym. (2009) on tutkinut ikääntymisprosesseja 10 vuotta vanhassa asfalttitiessä, jonka alusrakenteessa oli käytetty EAF-kuonaa. Tien rakenne koostui 100 mm paksusta asfalttipäällysteestä, 50 mm sitomattomasta murskekerroksesta ja 450 mm paksusta EAF-kuonakerroksesta raakoissa 0–300 mm. Tien keskeltä ja reunoilta otettuja näytteitä

verrattiin toisiinsa sekä tuoreeseen kuonaan. Molemmista näytteistä oli huomattavissa kuonarakeiden halkeilua ja kalsiumsilikaatin muodostumista rakeiden pinnalle. Lisäksi tien reunalta otettu näyte oli altistunut karbonatisoitumiselle ja liukenemisprosesseille. Muuten tien keskeltä otettu näyte oli lähes täysin identtinen tuoreen kuonan kanssa. Tieolosuhteissa vanhentuneelle kuonalle ja tuoreelle kuonalle suoritettiin myös Proctor-koe, kimmomoduulin määrittäminen sekä kolmiaksoaalikoe, mutta näissäkin erot olivat pieniä.

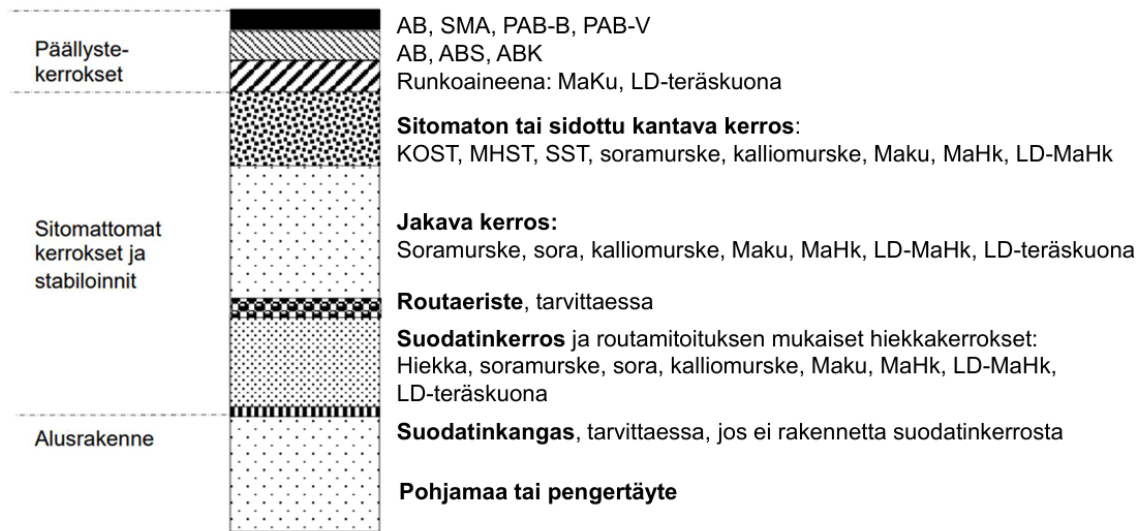
4 KUONIEN KÄYTTÖ MAARAKENTAMISESSA

Kuonia voidaan käyttää maarakentamisessa korvaamaan neitseellisiä kiviaineksia, edistämään kiertotaloutta, säästämään rakentamiskustannuksissa sekä vähentämään rakentamisen ja rakenteen elinkaaren aikaisia hiilidioksidipäästöjä. Kun kuonia käytetään maarakentamisessa, ne luokitellaan uusiomateriaaleiksi. Väylähankkeilla kiviainesta tarvitaan rakennekerrokseen (sidottuihin ja sitomattomiin), penkereisiin, täyttöihin ja kevennyksiin. (Väylävirasto 2022a) Lisäksi uusiomateriaaleja voidaan käyttää luonnon kiviainesten sijasta esimerkiksi stabilointiin, viherrakentamiseen, patoihin, meluvalleihin, ulkoliikuntapaikkoihin sekä jätehuoltoalueisiin. Suomessa uusiomateriaaleja ei käytetä ratarakenteisiin, mutta niitä voidaan hyödyntää muun muassa ratahankkeilla toteutettavilla teillä ja meluvalleissa. (Liikennevirasto 2014) Euroopassa kuonien ulkoisista käyttökohteista n. 30 % käytetään teiden rakentamiseen. (World Steel Association 2017)

4.1 Käyttökohteet

Suomessa masuunikuona ja niistä tehdyt tuotteet on todettu valmistajan ympäristöluvassa tuotteeksi. Myös ainoa tuotteistettu konvertteriteräskuona (LD-teräskuona) on todettu valmistajan ympäristöluvassa tuotteeksi. Maarakentamisessa kuonia käytetään Suomessa eniten teiden ja kenttien sitomattomissa kerroksissa, päällysteen runkoaineena ja stabiloinnin sideaineena. (Väylävirasto 2022a).

Kuvassa 4 on esitetty tien rakennekerrokset ja taulukossa 7 rakennekerroksissa käytettävät kuonamateriaalit ja vastaavasti yleisimmät käytettävät luonnon kiviainekset. LD-masuunihiekalla (LD-MaHk) tarkoitetaan LD-teräskuonan ja masuunihiekan sekoitusta, joiden sekoitussuhteet ovat 30/70 ja 50/50, ja rakeisuus 0–8 mm (Rakennustieto 2020) Näiden lisäksi kuonia käytetään muun muassa siirtymäkiiloina tasaamaan routanousu- ja kantavuuseroja sekä vaihtelevasti pengerryksissä ja putkiarinoissa. (Väylävirasto 2022a; InfraRYL 2024a)



Kuva 4. Tien rakennekerrokset ja niissä käytettäviä kuonamateriaalia ja luonnon kiviaineksia (mukaiillen Liikennevirasto 2018).

Taulukko 7. Tien rakennekerroksissa käytetyt kuonat ja luonnon kiviainekset (Rakennustieto 2020; Väylävirasto 2022a; InfraRYL 2024a).

Käyttökohde	Kuonamateriaali	Luonnon kiviainekset
Päällyste (runkoaine)	MaKu, LD-teräskuona	Kalliomurske
Kantava kerros	Maku, (LD)-MaHk (stabilointi)	Soramurske, Kalliomurske
Jakava kerros	MaKu, MaHk, LD-MaHk, LD-teräskuona	Sora(murske), Kalliomurske
Suodatinkerros	MaKu MaHk, LD-MaHk LD-teräskuona	Hiekka, Sora(murske), Kalliomurske

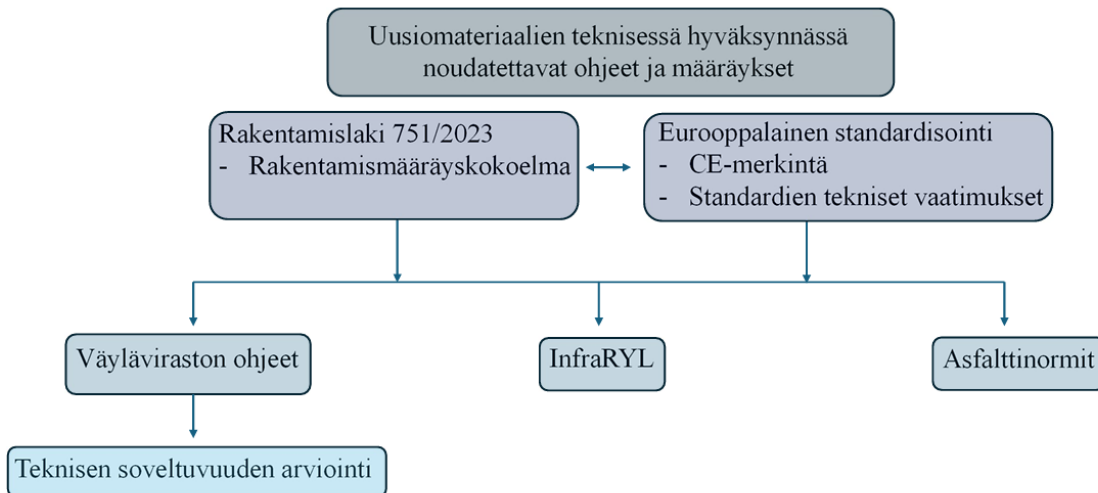
4.2 Materiaalin teknisessä hyväksynnässä noudatettavat ohjeet ja määräykset

Materiaalin teknisen hyväksynnän lähtökohtana väylärakentamiseen on, että materiaali täyttää käyttökohteelta ja rakennusosalta vaaditut tekniset vaatimukset, materiaali on riittävän tasalaatuinen ja sen pitkäaikaiskestävyys tunnetaan. Tekninen kelpoisuus osoitetaan standardoiduilla tutkimusmenetelmillä sekä koerakentamisesta ja pitkäaikaisseurannasta saatavilla tuloksilla. Uusiomateriaalista tulee selvittää seuraavat ominaisuudet laboratoriotutkimuksilla:

- rakeisuus
- vesipitoisuus ja optimivesipitoisuus
- routivuus
- tiivistettävyys
- Leikkauskestävyyskulma
- vedenläpäisevyys
- hienonemisherkkyys
- jäätymis-sulamiskestävyys
- kapillaarisuus.

Lisäksi jos uusiomateriaaleja suunnitellaan käytettävän päälly- ja kevennysrakenteissa, tulee materiaalista selvittää myös routaturpoama (%), mitoitusmoduuli (MPa), vaurioitumisherkkyys painumille ja routanousuille, eristävyyskerroin (a_i) sekä tilavuuspaino eri kosteustiloissa (kN/m^3). (Väylävirasto 2022a, s. 45–46) Laboratoriossa suoritettavat tutkimusmenetelmät ovat kehitetty luonnonmateriaaleille, joten joissakin tapauksissa poikkeavien menetelmien käyttö on tarpeen todenmukaisten tulosten saamiseksi. Tällöin menetelmä tulee kuvata tarkasti ja sen vertailtavuus vastaaviin luonnonmateriaalien arvoihin tulee osoittaa. (Liikennevirasto 2014, s. 30)

Uusiomateriaalien tekniset vaatimukset ja testausmenetelmät perustuvat Suomessa pääasiassa Väyläviraston ohjeisiin, InfraRYL-julkaisuun ja eurooppalaiseen standardisointiin. Lisäksi hankkeissa voidaan myöhemmin esittää tarkempia tuotevaatimuksia. Uusiomateriaalien käyttöä ohjaa myös rakentamislaki (751/2023), jota täydentää rakentamismääräyskokoelma. Rakentamislaki ei määrittele yksityiskohtaisesti teknisiä vaatimuksia, mutta lain mukaan rakenteiden tulee täyttää olennaiset tekniset vaatimukset koskien muun muassa rakenteiden lujutta ja vakautta. InfraRYL sisältää infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset ja rakennustavat Suomessa. Sen sisältämät vaatimukset perustuvat enenevässä määrin eurooppalaisiin standardeihin, joita on täydennetty Suomen olosuhteisiin sopivammaksi. Se sisältää myös viittauksia esimerkiksi Asfalttiorneihin ja Väyläviraston ohjeisiin. (Liikennevirasto 2014, s. 12, 26; Rakentamislaki 751/2023) Kuvassa 5 on esitetty kaaviomuodossa uusiomateriaalien tekniseen hyväksyntään liittyvät ohjeet ja määräykset.



Kuva 5. Uusiomateriaalien tekniseen hyväksyntään liittyvät ohjeet ja määräykset.

Uusiomateriaalit tulee CE-merkitä EU:N rakennustuoteasetuksen (EU 305/2011) mukaisesti, mikäli se kuuluu harmonisoidun tuotestandardin piiriin tai jos rakennustuotteelle kuuluu eurooppalainen arviointi (ETA). Tämä koskee esimerkiksi maa- ja vesirakentamisessa sekä tierakenteissa käytettäviä sitomattomia ja hydraulisesti sidottuja kiviaineksia. CE-merkinnällä valmistaja vakuuttaa, että tekniset tiedot on varmistettu Euroopan unionin harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen arvioinnin mukaisesti, ja se saavuttaa tuotestandardin mukaiset suoritusvaatimukset. Lisäksi CE-merkinnällä tuotteen ominaisuudet on ilmoitettu yhdenmukaisesti eurooppalaisella tavalla. (Koivisto ym. 2016, s. 3) Jos materiaalia ei voida CE-merkitä, se voidaan tuoda markkinoille vain, jos se täyttää lain eräiden rakennustuotteiden hyväksynnästä (954/2012) ja sitä täydentävän asetuksen eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä (555/2013) asettamat vaatimukset. CE-merkintä ei kuitenkaan riitä teknisen kelpoisuuden osoittamiseksi väylärakentamisessa Väyläviraston ja ELY:n hankkeilla vaan siihen vaaditaan lisäksi Väyläviraston yleinen tai hankekohtainen materiaalin teknisen soveltuvuuden arviointi. Joissakin tapauksissa materiaali-kohtaista arviointi ei tarvita, jos materiaali ja sen käyttökohde täyttävät alan yhteisen ohjeen ja arvioinnin vaatimukset. (Väylävirasto 2022a, s. 25)

4.3 Tekniset vaatimukset tierakenteissa

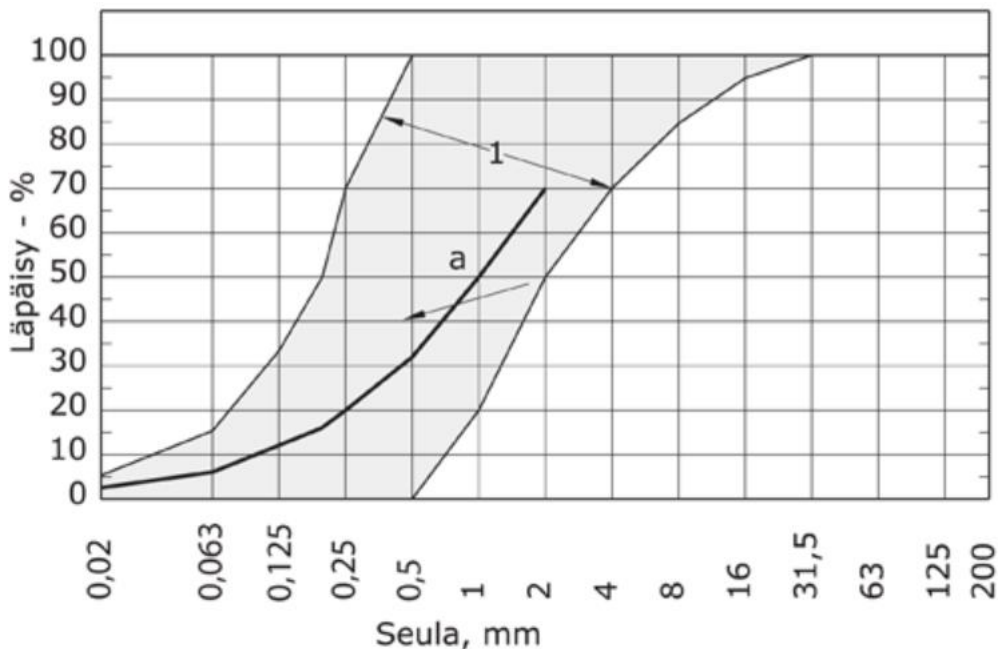
Uusiomateriaali käyttäytyy yleensä samalla tavalla kuin rakeisuudeltaan samaa vastaava luonnonmateriaali, mutta se voi poiketa esimerkiksi materiaalin paisumisalttiudeltaan, keveydeltään tai sitoutumiskyvyltään. Poikkeavien ominaisuuksien käyttäytyminen rakenteessa tulee selvittää Väyläviraston teknisen soveltuvuuden arvioinnissa. (Väylävirasto 2022a, s. 17) Lähtökohtaisesti uusiomateriaalin tulee täyttää luonnon kiviaineksille asetetut vaatimukset rakennusosakohtaisesti, mutta joissain tapauksissa on mahdollista, että uusiomateriaali ei täytä kaikkia teknisiä vaatimuksia rakenteiden turvallisuutta tai laatua vaarantamatta. Tällöin uusiomateriaalille muodostetaan omat mitoitusparametrit ja vaatimukset. (Koivisto ym. 2016, s. 20) Näihin voi sisältyä myös tierakenteissa vaatimukset ylä- ja alapuolisille rakennekerroksille, kuten vaatimus suodatinkankaan käytölle tai kapillaarikatkolle. (Väylävirasto 2022a, s. 31) Taulukkoon 8 on koottu kuonilta vaadittavia ominaisuuksia tierakenteissa.

Taulukko 8. Teräksen valmistuksessa syntyviltä kuonilta vaadittavia ominaisuuksia tien eri rakennekerroksissa

Ominaisuus	Suodatinkerros	Jakava kerros	Kantava kerros
Yleistä	- Ei saa sisältää savea eikä haitallisia epäpuhtauksia	- Ei saa sisältää savea eikä haitallisia epäpuhtauksia - Tulee olla riittävän tasalaatuinen - Ei rapautumis-herkkää - Tulee kestää jäätymis-sulamis-rasituksia	- Ei saa sisältää savea eikä haitallisia epäpuhtauksia - Tulee olla riittävän tasalaatuinen - Ei rapautumis-herkkää - Tulee kestää jäätymis-sulamis-rasituksia
Rakeisuus	- Rakeisuus kuvan 6 mukainen	- Masuunihiekka: G _F 80 - Muut kuonat: G _A 80	G _A 85
Hienoaines-pitoisuus	≤ 7 %	≤ 7 %	≤ 7 %
Kokonais-rikki	- ilmajähdytetty masuunikuona: ≤ 2 - Muut kuonat: ≤ 1	- ilmajähdytetty masuunikuona: ≤ 2 - Muut kuonat: ≤ 1	- ilmajähdytetty masuunikuona: ≤ 2 - Muut kuonat: ≤ 1
Litteysluku			≤ 50

Suodatinkerroksen sekä jakavan ja kantavan kerroksen kelpoisuus osoitetaan CE-merkinnällä, suoritustasoilmoituksella ja rakeisuudella, jonka laadunvarmistus on tehty standardin SFS-EN 13242 mukaisesti. Uusiomateriaalit eivät saa aiheuttaa korroosiota, jos kohteeseen on tarkoitus sijoittaa korroosiolle alttiita rakenteita. Lisäksi uusiomateriaalien pitkäaikaiskestävyys on osoitettava esimerkiksi koerakentamisella. SFS-EN 13242 on standardi maa- ja vesirakentamisessa ja tierakenteissa käytettävistä sitomattomista ja hydraulisesti sidotuista kiviaineksista, joihin sisältyy luonnonmateriaalien lisäksi myös uusiomateriaalit. (InfraRYL 2024a)

Suodatinkerroksessa (21110 InfraRYL) on luonnonkiviainekselle esitetty vaatimukset rakeisuudesta ja maksimiraekoosta. Suodatinkerroksen tehtävänä on estää tai vähentää kapillaarista veden nousua, jolloin se suojaa rakennetta routimiselta. (Forsman ym. 2022, s. 21) Lisäksi se estää rakennekerroksien ja pohjamaiden sekoittumisen sekä lisää rakenteen kantavuutta. Suodatinkerros voidaan rakentaa luonnon kiviaineksesta tai uusiomateriaalista, jos se noudattaa kuvan 6 mukaista rakeisuutta. Suodatinkerroksessa ei saa olla savikerrostumia eikä haitallisia epäpuhtauksia. Suodatinkerroksen tiiviysvaatimus on keskimäärin 92 % ja yksittäisen koetuloksen minimi on 90 %. Kuonilla tiiviysuhteen saavuttaminen voi olla hankalaa, mutta tästä poikkeaminen ei ole kuitenkaan heikentänyt rakenteen ominaisuuksia. (InfraRYL 2024a)



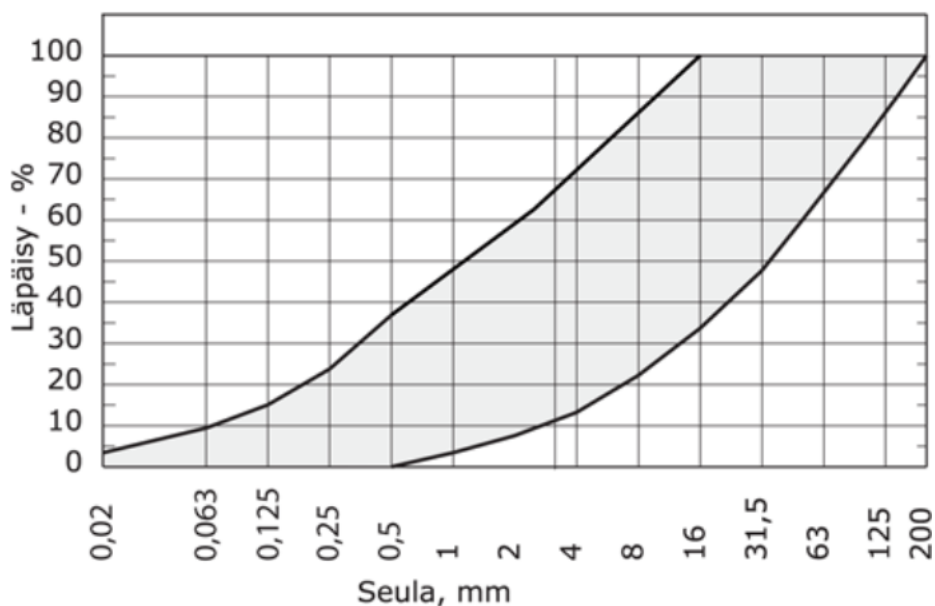
Kuva 6. Suodatinkerroksen rakeisuuden tulee sijoittua alueelle 1 ja rakeisuuskäyrä ei saa ylittää paksua viivaa nuolen suunnassa (InfraRYL 2024a).

Jakavan (21210 InfraRYL) ja sitomattoman kantavan (21310 InfraRYL) kerroksen rakeisuusvaatimukset perustuvat luonnon kiviaineksilla standardiin SFS-EN 13285:en ja kiviainesvaatimukset standardiin SFS-EN 13242. Kuonilla myös rakeisuusvaatimukset perustuvat jälkimmäiseen standardiin. Standardi SFS-EN 13285 koskee sitomattomia kiviainesseoksia. Kerroksille voidaan asettaa myös hankekohtaisia vaatimuksia esimerkiksi vedenläpäisevyydelle, routanousulle ja liukoisuuksille. Jakavan kerroksen tehtävänä on jakaa liikenteen aiheuttamaa kuormitusta sekä parantaa rakenteen kuivatusta

ja kantavuutta. Vastaavasti kantavan kerroksen tehtävänä on pitää tien rakenne riittävän jäykkänä, jakaa kuormituksia sekä estää liiallisia muodonmuutoksia. (InfraRYL 2024a)

Molemmissa kerroksissa käytettävän kiviaineksen tulee olla riittävän tasalaatuinen, eikä se saa sisältää savikerrostumia ja haitallisia epäpuhtauksia. Materiaali ei myöskään saa olla rapautunutta tai rapautumisherkkää ja sen tulee kestää jäätymis-sulamisrasituksia. Nämä ominaisuudet tutkitaan petrografisella tutkimuksella ja vedenimeytymistestillä. Pehmeiden rapautumistuotteiden, kuten kloriitin ja talkin, yhteenlaskettu osuus kiviaineksessa saa olla korkeintaan 5 %. Lisäksi helposti liukenevia ja murenevia karbonaattimineraaleja, kuten kalsiittia ja dolomiittia, saa olla kasaantuneina korkeintaan 5 % ja hajallaan enintään 10 %. Hienoainespitoisuus saa kalliomurskeella ja kuonilla olla korkeintaan 7 % ja soramurskeella 9 %. Sallittua suurempi hienoainespitoisuus ei jakavassa ja suodatinkerroksessa heikennä niin paljon tien kestävyyttä kuin kantavassa. Tämän vuoksi ennen tiivistystä kantavan kerroksen hienoainespitoisuus tulisi olla pienempi kuin sallittu raja-arvo mahdollisten isompien rakeiden murskautuessa. Kokonaisrikin pitoisuus tulee tien rakennekerroksissa ilmajähdytetyllä masuunikuonalla olla ≤ 2 % ja muilla kuonilla ≤ 1 %. Kiintotiheydelle ei ole asetettu raja-arvoa, mutta se tulee ilmoittaa. (InfraRYL 2024a)

Jakavassa kerroksessa käytettävän luonnonsoran rakeisuuden tulee täyttää kuvan 7 rakeisuusvaatimukset. Jakavassa kerroksessa voidaan käyttää rakeisuudeltaan 0/32, 0/40, 0/45, 0/56, 0/63, 0/80 ja 0/90 olevaa mursketta ja sen tulee olla standardin SFS-EN 13285:en rakeisuusluokan G_p tai G_c mukainen. (InfraRYL 2024a) Standardin rakeisuusluokat (G-koodit) ilmoittavat sallitut vaihteluvälit massan läpäisyprosentteille tietyiltä seuloilta, jotka vaihtelevat maksimirakoon mukaan. Rakeisuusluokka G_p (eng. poorly grained) kuuluu avoimien rakeisuuksien luokkaan eli se ei sisällä tasaisesti kaikkia raekokoja. Vastaavasti taas rakeisuus luokkaa G_c (eng. coarse-grained) tarkoittaa, että materiaalissa on pääasiassa karkeaa aineosaa ja vähemmän hienoainesta. (SFS-EN 13285) Masuunihiekalla rakeisuuden tulee noudattaa rakeisuutta $G_F 80$ (eng. fine-grained) ja muilla kuonilla rakeisuutta $G_A 80$ (eng. well-grained) standardin SFS-EN 13242 mukaan. Luku 80 viittaa suurimman seulakoon läpäisyprosenttiin. (InfraRYL 2024a; SFS-EN 13242)



Kuva 7. Jakavassa kerroksessa käytettävän luonnonsoran rakeisuusvaatimus (InfraRYL 2024a).

Kantavassa kerroksessa voidaan käyttää rakeisuudeltaan 0/32, 0/40, 0/45, 0/56 ja 0/63 olevia materiaaleja, jotka kuuluvat standardin SFS-EN 13285:en rakeisuusluokkaan G_0 (eng. open graded) tai G_A . Suositeltava rakeisuusluokka on G_0 , joka on roikkuva rakeisuuskäyrä ja siten hyvin vettä läpäisevä. Soramurskeella voidaan käyttää G_A rakeisuusluokkaa vähemmän kantavuutta vaativilla teillä. Kuonilla vaatimuksena on rakeisuusluokka G_{A85} standardin SFS-EN 13242 mukaan. (InfraRYL 2024a)

Luonnon kiviaineksille iskunkestävyyttä kuvaava Los Angeles-luku saa korkeintaan olla 30. Luku kuvaa Los Angeles-testissä murskautuneen ja kuluneen materiaalin määrää prosentteina eli pienempi LA-luku tarkoittaa parempaa iskunkestävyyttä. Uusiomateriaalille ei ole LA-luvulle asetettu vaatimusta, koska sen vaikutuksesta käyttöikäen ja toimivuuteen ei ole tarpeeksi tietoa. Kantavalle kerrokselle on myös annettu kiviaineksen muotoa kuvaavan litteysluvun raja-arvo, joka kuonilla on alle ≤ 50 . Litteysluku kertoo litteiden rakeiden määrän suhteessa koko kiviaineksen määrään. (InfraRYL 2024a; SFS-EN 13242)

Maanteiden asfalttimassoissa ja pintauksissa noudatetaan tuotestandardia SFS-EN 13043, ja ne on esitetty Päällystealan neuvottelukunnan (PANK) julkaisussa Asfalttinormit 2023. Muiden rakennekerroksien tapaan myös asfalttipäällysteissä voidaan käyttää

uusiomateriaaleja, jotka teknisiltä ominaisuuksiltaan ja maanrakennuskelpoisuudeltaan soveltuu kohteeseen. (InfraRYL 2024a) Uusiomateriaaleille käytetään soveltuvien osien luonnon kiviaineksille asetettuja vaatimuksia. Väylien päällysteen tehtävä on parantaa liikenteen sujuvuutta ja turvallisuutta sekä suojata alempia rakennekerroksia. Sidottu kulutuskerros estää veden tunkeutumisen alempiin kerroksiin vähentäen näin routavaurioiden ja painumien riskiä. Lisäksi se myös parantaa ajomukavuutta, pidentää ajoneuvojen käyttöikää, ja oikein valitulla pinnoitteella voidaan vähentää pölyämistä sekä meluhaittoja. Päällysrakenteen tulee kestää liikennekuormituksesta ja ympäristöstä aiheutuvia rasituksia. Liikennekuormitus vaihtelee suunniteltavan väylän mukaan, joten ohjearvot ja vaatimukset ovat väyläriippuvaisia. (Koivisto ym. 2016, s. 25) Asfalttiin käytettävästä kiviaineksesta tulee ilmoittaa vähintään raekoko, rakeisuusluokka, litteysluku, kiintotiheys, hienoainespitoisuus, kemiallinen koostumus, vedenimeytyminen ja nastarengaskulutuskestävyys. Joidenkin kiviainesten osalta myös esimerkiksi tilavuuden pysyvyys voidaan ilmoittaa. (Väylävirasto 2022b, s. 13–14)

4.4 Vaatimukset muissa infrarakenteissa

Materiaaleille asetetut vaatimukset esimerkiksi penkereissä ja kaivantojen täytöissä eivät ole yhtä tiukat kuin tierakenteissa. Penkereissä tärkeimpinä ominaisuuksina ovat tilavuuspaino, rakennettavuus, lujuus sekä pitkäaikainen säilyminen. Vaatimukset riippuvat myös siitä, onko penger liikennekuormitettu. Liikenteen aiheuttamat mekaaniset rasitukset voivat rajoittaa joidenkin uusiomateriaalien käyttöä erityisesti, jos materiaali on altis hienonemiselle tai kokoonpuristumiselle. Materiaalin lujuus eli leikkauskestävyyskulma ja koheesio määrittelee suurelta osin, missä luiskakaltevuudessa penger voidaan toteuttaa. Vastapenkereissä ja esikuormituspenkereissä käytetään pääasiassa vain luonnonmateriaaleja. Pengerrakentaminen on kuitenkin alempi käyttökohde, jonka vuoksi kuonia käytetään harvemmin pengermateriaalina. (Forsman ym. 2022, s. 23–25)

Täyttöjen vaatimukset perustuvat suurelta osin rakenteen toiminnallisten ja teknisten vaatimusten perusteella. Jos täyttö jää esimerkiksi osaksi kantavaa kerrosta, tulee sen rakeisuudeltaan ja muilta vaatimuksilta täyttää kantavalle kerrokselle esitetyt vaatimukset. Lopputäytöt (18330 InfraRYL) eli putkien, johtojen, salaojien, kaivojen

lopputäytöt tehdään materiaalista, joka on tiivistämiskelpoista ja vastaa routivuudeltaan samaa kuin kaivannosta poistettu materiaali. Täyttömateriaali ei saa vahingoittaa putkia tai liitosmateriaalia. Lisäksi lopputäytöissä tulee ottaa huomioon uudelleen kaivettavuus, mikä voi olla ongelmallista kuonilla toteutetuissa rakenteissa hydraulisen sitoutumisen vuoksi. (InfraRYL 2024b)

4.5 Kuonien pitkäaikaiskestävyys ja kiertotaloudellinen merkitys

Masuunihiekalla toteutettujen rakenteiden kantavuuden on havaittu paranevan ajan myötä sen sitoutumisominaisuuksien ansiosta, jolloin päällysrakenteelta vaadittu kantavuus on voitu saavuttaa luonnon kiviaineksia verrattuna ohuemmalla ja kevyemmällä rakenteella. Nurmijärven Haikalan asuinalueen katurakentamisessa (1999) tutkittiin masuunihiekan toimivuutta kadun suodatinkerroksessa. Rakentaminen tapahtui savipehmeikölle, jossa masuunihiekalla saavutettiin luonnon kiviaineksilla rakennettuun tavalliseen päällysrakenneteratkaisuun routaa eristävämpi, ohuempi ja kevyempi rakennekerros. Kantavuus parantui ajan myötä, mutta kantavuusmittauksissa esiintyi vaihtelua, joka johtui paitsi pohjamaan kantavuuden vaihtelusta myös sitoutuneen kerroksen lujustason vaihtelusta eri mittauspisteissä. (Väylävirasto 2019, s. 59–60)

Myös LD-teräskuonasta ja masuunikuonamurskeesta rakennettujen kerrosten käyttöikä on ollut pitkä hydraulisen sitoutumisen ansiosta. LD-teräskuonaa sisältävien asfalttikerrosten on havaittu pitkällä aikavälillä kestävästi hyvin muodonmuutoksia, urautumista ja kiillottumista. Rankkasateilla ei ole todettu vaikutusta sitomattomien kerrosten kantavuuteen. Lisäksi teräskuonaseoksista rakennetut kerrokset ovat pysyneet vakaina, kun paisumiselle asetetut raja-arvot on täytetty. (Motz & Geiseler 2001, s. 287–292)

Maa- ja kallioperän kiviainekset ovat uusiutumattomia luonnonvaroja, ja niiden kaivu voi vaikuttaa haitallisesti ympäristöön, maisemaan sekä geologisiin ja biologisiin ekosysteemeihin. Kiviainesten kestävä käyttöä tulisi edistää, jotta niiden saatavuus voidaan turvata pitkällä aikavälillä ilman, että luonnon monimuotoisuus kärsii. (Suomen ympäristökeskus 2025) Suomi on asukasmäärään suhteutettuna yksi Euroopan unionin suurimmista kiviaineksen kuluttajista. Vuosittain Suomessa käytetään noin 100 miljoonaa

tonnia luonnonkiviainesta rakentamiseen ja rakenteiden ylläpitoon, josta noin 70 miljoonaa tonnia on jalostettua kiviainesta. Suurin osa tästä materiaalista hyödynnetään liikenneväylien perustamiseen. Suomessa on runsaasti sora-, hiekka- ja kalliokiviainesvarantoja, mutta niiden saatavuus ja laatu vaihtelevat huomattavasti alueittain. Varantojen epätasainen jakautuminen aiheuttaa haasteita erityisesti suurten asutuskeskusten ympärillä, joissa hyvälaatuista luonnonsoraa on niukasti saatavilla. Etelä-Suomessa suurta osaa hiekka- ja soravarannoista ei voida hyödyntää maa-ainesten ottoon, sillä ne sijaitsevat alueilla, joilla on merkittävä arvo luonnonsuojelun, maisemasuojelun tai pohjaveden muodostumisen ja käytön kannalta. (Lonka & Loukola-Ruskeeniemi 2015, s. 9–12, 26)

Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa vähentää luonnon kiviaineksien tarvetta ja samalla pienentää kaatopaikalle sijoitettavan materiaalin määrää. Kuonien käyttö maarakentamisessa tukee Euroopan komission (KOM 2011) resurssitehokkuutta ja kestävän infran luomista, jonka mukaan resurssien käytössä tulee huomioida jätteen määrän minimointi ja luonnonvarojen kestävä hallinta. (Koivisto ym. 2016, s.1) Kuonien hyödyntäminen niiden muodostumispaikan lähellä vähentää kuljetuksesta aiheutuvia päästöjä. Suomessa raudan ja teräksen valmistuksessa syntyviä kuonia on käytetty jo vuosikymmenten ajan korvaamaan neitseellisiä kiviaineksia. Kuonien käyttö on erityisesti ollut yleistä Oulun seudulla. (Forsman ym. 2020, s. 7–8)

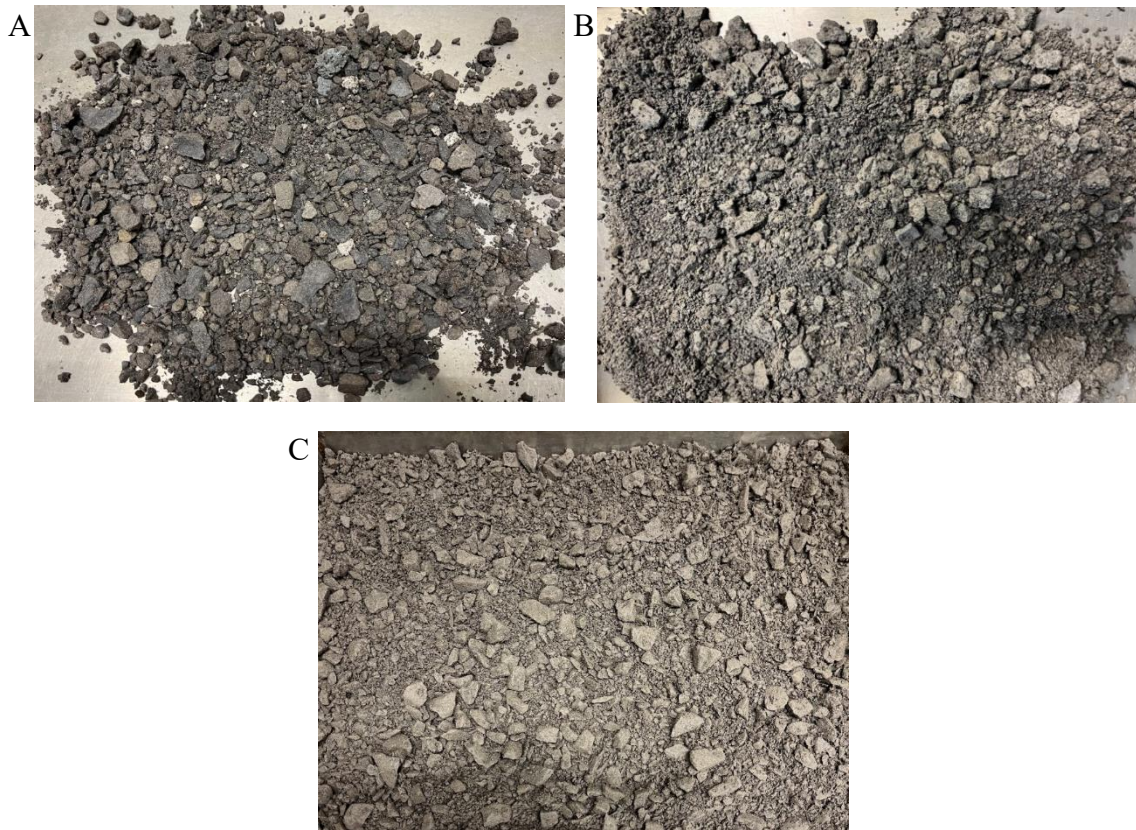
5 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

5.1 Tutkittavat materiaalit ja näytteiden valmistus

Tutkimusmateriaalina käytettiin pilottivalokaariuunissa DRI-pohjaisen teräksen valmistuksessa syntyvää EAF-kuonaa. Kuona on valmistettu marraskuussa 2021, jonka jälkeen se on myöhemmin vuonna 2023 murskattu raekokoon 0/32 mm ja varastoitu ulkona avonaisessa laatikossa. Näyte kerättiin lapioidulla kuonaa eri puolilta laatikkoa. Referenssimateriaaleina käytettiin ilmajäähdytettyä SSAB:n Raahan tehtaan masuunikuonaa (MaKu) ja Oulun Vittakankaan kalliomursketta (KaM). Masuunikuona on murskattu samoilla asetuksilla kuin tutkittava EAF-kuona. Ennen EAF-kuonan toimitusta sille suoritettiin kemiallinen analyysi Raahan laboratoriossa.

EAF-kuona ja masuunikuona toimitettiin raekoossa 0/32 mm, joista ne seulottiin käsin Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa raekokoon 0/16 mm, jossa myös tutkimukset suoritettiin. Kalliomurske toimitettiin raekoossa 0/16 mm, joka myöhemmin osoittautua sisältävän myös suurempia rakeita. Nämä rakeet poistettiin muita kokeita varten rakeisuuden määrittämisen jälkeen. Seulonnan jälkeen saatu EAF-kuonan määrä tutkimuksia varten oli 79,8 kg, masuunikuonan 53,7 kg ja kalliomurskeen 71,29 kg. Yli 16 mm rakeita painosta oli masuunikuonassa 35 % ja EAF-kuonassa 36 %.

Näytteen jakaminen suoritettiin standardin SFS-EN 932-1 mukaisesti. Kalliomurskeen homogenisointiin käytettiin Soroto-tasosekoitinta, josta materiaali jaettiin tasaisesti säilytysastioihin. Laite koettiin kuitenkin hankalaksi käyttää, joten muilla materiaaleilla näytteen jakaminen suoritettiin jakavan lapioidin avulla. Näytteitä säilytettiin tutkimusten ajan kannellisissa säilytysastioissa, joista näytteet siirrettiin edelleen muovisäkkeihin kattavamman otoksen saamiseksi. Kuvassa 8 on esitetty tutkittavat näytteet seulonnan ja sekoituksen jälkeen. Näyte A on EAF-kuonaa, B masuunikuonaa ja C kalliomursketta.



Kuva 8. A) EAF-kuona raakoossa 0/16 mm, B) masuunikuona raakoossa 0/16 mm ja C) kalliomurske raakoossa 0/16 mm homogenisoinnin jälkeen.

EAF-kuonasta tutkittiin tässä työssä maanrakennuksen kannalta tärkeitä ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan alustavasti päätellä sen sopivuutta erilaisiin infrarakenteisiin. Tutkittavat ominaisuudet liittyvät materiaalin luokitusominaisuuksiin, hydraulisiin ominaisuuksiin, lujuus- ja kantavuusominaisuuksiin sekä myös teräskuonilla esiintyviin paisumisominaisuuksiin. Lisäksi kuonan soveltuvuutta arvioidaan erityisesti Suomen olosuhteisiin sopivaksi, jolloin myös materiaalin routivuudella on keskeinen merkitys. Tuloksien luotettavuuden ja vertailtavuuden parantamiseksi kokeet suoritettiin myös masuunikuonalle ja kalliomurskeelle. Materiaaleilta selvitettiin seuraavat ominaisuudet:

- kemiallinen analyysi
- rakeisuus (kuiva- ja pesuseulonta)
- maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus (Proctor-koe)
- kapillaarinen nousukorkeus (Sahi-kapillaarimetri)
- Leikkauskestävyyskulma (rasialeikkauskoe)
- vedenpidätyskyky (pF-koe)

- vedenläpäisevyys (jäykkäseinäisellä sellillä vakiopaineessa)
- kiintotiheys (pyknometrimenetelmä)
- paisunta (vesihöyryyn perustuva paisuntakoe)
- routivuus (routanousukoe).

5.2 Kemiallinen analyysi

Kemiallinen analyysi suoritetaan, koska maarakentamisessa käytettävien materiaalien on oltava keskenään kemiallisesti yhteensopivia. Lisäksi uuden materiaalin vaikutus ympäristöön on arvioitava ennen sen käyttöönottoa. Mahdolliset kemialliset reaktiot, poikkeava pH, liukenevat ainesosat tai kaasunmuodostus voivat vaikuttaa rakenteen pitkäaikaiskestävyyteen. (Väylävirasto 2022a, s. 14)

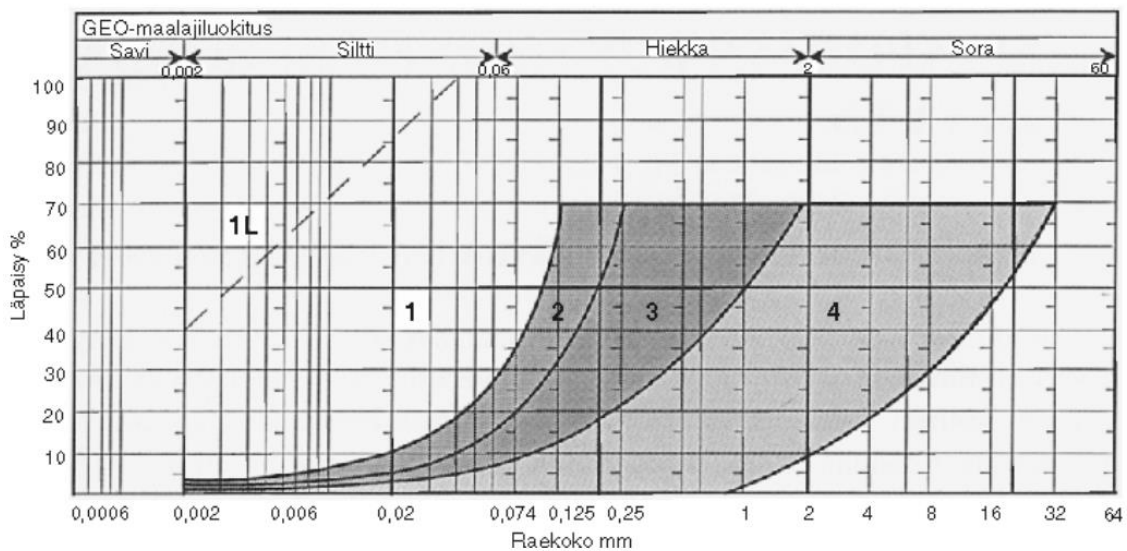
Kuonan kemiallisen koostumuksen tunteminen on myös tärkeää materiaalin ympäristökelpoisuuden määrittämisessä. Uusi materiaali voi vaatia Euroopan unionin alueella REACH-asetuksen täyttämistä, jos materiaali on hyväksytty ympäristöluvassa sivutuotteeksi, tai jäte on hyväksytty tuotteeksi End-of-Waste menettelyn kautta. Tämä edellyttää tuotteen sisältämien kemikaalien selvittämistä ja ymmärrystä niiden ominaisuuksista käyttötavoista ja turvallisesta käsittelystä. REACH-asetus on Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus N:o 1907/2006 kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista. Rekisteröinti ei kuitenkaan koske EU:n jätedirektiiviin lukeutuvia jätteitä. (Koivisto ym. 2016, s. 14)

Kemiallinen analyysi on suoritettu EAF-kuonalle 29.06.2023 SSAB:n Raahan laboratoriossa. Analyysissä määritettiin seuraavat alkuaineet ja yhdisteet: F, Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P, S, Cl, K₂O, CaO, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Nb, Mo, Sn, Ba, La, Ce, Ta, Pb, Th, U, Hf. Tässä työssä esitetään ainoastaan CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO, S, P ja Cr, koska nämä ovat tyypillisesti kuonien pääkomponentteja, ja vaikuttavat eniten kuonan käytettävyyteen maarakentamisessa.

5.3 Kuiva- ja pesuseulonta

5.3.1 Kokeen tarkoitus

Kuiva- ja pesuseulontaa tarvitaan materiaalin rakeisuuden määrittämistä varten. Rakeisuudella tarkoitetaan eri kokoisten rakeiden suhteellista painojakaumaa, ja sitä käytetään pääasiassa maalajin nimitysperusteena, mutta rakeisuustietoja tarvitaan myös muun muassa tutkiessa materiaalin routivuutta, tiivistettävyyttä, vedenläpäisevyyttä sekä soveltuvuutta erilaisiin infrarakenteisiin ja stabilointiin. (Suomen geoteknillinen yhdistys 1985, s. 10) Kuvassa 9 on esitetty maalajien routivuus rakeisuuden perusteella. Maalajit, joiden rakeisuuskäyrä sijoittuu alueelle 1 ovat routivia ja alueelle 1L lievästi routivia. Alueilla 2–4 olevat maalajit eivät ole routivia, ellei rakeisuuskäyrä ylitä vasemmanpuoleista rajaa. (RIL 261-2013 s. 42)



Kuva 9. Maalajin routivuus rakeisuuskäyrän perusteella (RIL 261-2013 s. 42).

Kuiva- ja pesuseulonnan saatavista tuloksista muodostetaan rakeisuuskäyrä, joka ilmaisee, miten suuri osuus prosentteina maalajista on läpäissyt tietyn suuruisen seulan. Rakeisuuskäyrä piirretään puolilogaritmiseen koordinaatistoon, jossa läpäisyprosentti esitetään y-akselilla ja raekoko logaritmisella x-akselilla. Tarkoituksena on erottaa paremmin isomman raekoon välit, joilla on maalajiluokituksessa suurempi merkitys.

Rakeisuuskäyrältä tärkeimpinä tietoina saadaan kivennäismaan rakeiden keskiläpimitta d_{50} eli raekoko, jossa puolet näytteestä on läpäissyt isommat seulat sekä hienoainespitoisuus eli alle 0,063 mm halkaisijaltaan olevien rakeiden suhteellinen määrä prosentteina. Rakeisuuskäyrältä saadaan myös raekokosuhte C_u , joka tarkoittaa läpäisyprosenttien 60 ja 10 välistä suhdetta. Raekokosuhte kuvaa materiaalin lajittuneisuutta, joka vaikuttaa muun muassa materiaalin tiivistymis- ja vedenjohtamisominaisuuksiin. Suurempi raekokosuhte tarkoittaa yleensä sitä, että materiaali pystytään tiivistämään tiiviimmäksi kuin vastaava pienemmän raekokosuhteen omaava materiaali. Vedenläpäisevyyteen vaikuttaa materiaalin tehokas läpimitta d_{10} , jonka mukaan suurempi läpäisyprosentti vastaa parempaa vedenjohtavuutta. (Rantamäki ym. 1979, s. 55–56)

5.3.2 Kokeen suoritus

Tutkimus suoritettiin geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85) mukaisesti EAF-kuonalle, masuunikuonalle ja kalliomurskeelle. Tutkimus aloitettiin kuivattamalla näytteitä vähintään yön yli n. 105 °C asteisessa uunissa, jonka jälkeen näytteistä määritettiin vesipitoisuus (toimitusvesipitoisuus), jossa näytteet olivat ennen ensimmäisen kokeen suorittamista kaavalla:

$$w\% = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100, \quad (1)$$

missä $w\%$ on vesipitoisuus painoprosentteina (%),

m_w on veden massa (g) ja

m_s on kiintoaineksen massa (g).

Vesipitoisuuden määrittämisen jälkeen materiaaleille suoritettiin pesuseulonta. Päätös pesuseulonnan suorittamisesta tehtiin Teräskuonaprojektin loppuraportti -julkaisun (Mäkikyrö 2001) perusteella, jossa teräskuonille tehdyissä kokeiluseulonnoissa huomattiin, että kuivaseulonnassa voi jäädä 0,063 mm seulalle 20–30 % tätä hienomman lajitteen määrästä, joka vääristäisi hienoaineksen määrää materiaalissa. Näytettä pestiin 1 mm ja 0,063 mm seulan läpi tärytyksen kanssa, jonka jälkeen näyte asetettiin uuniin

kuivumaan kuivaseulontaa varten. Kuivaseulonnassa seulakokoina käytettiin 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 ja 0,063 mm seuloja, jotka olivat halkaisijaltaan 300 mm. Tärytysaikana käytettiin vähintään 10 min tärytysaikaa. Kuvassa 10 on esitetty käytetty pesuseulontalaitteisto ja kuvassa 11 kuivaseulontalaitteisto.



Kuva 10. Kokeessa käytetty pesuseulontalaitteisto.



Kuva 11. Kokeessa käytetty kuivaseulontalaitteisto.

Standardin SFS-EN ISO 17892-4 mukaan masuunikuonan ja EAF-kuonan kohdalla osalla seuloista ylittyi yksittäisen seulan maksimimäärä painona. Tämän vuoksi masuunikuonalla kuivaseulonta suoritettiin uudestaan 10 min tärytyksellä, mutta läpäisyprosentit eivät muuttuneet. EAF-kuonan kohdalla tärytysaikana käytettiin 20 min, joten seulontaa ei suoritettu uudestaan ylityksen ollessa vähäinen. Seulonnoissa hankaluuksia tuotti rakeiden luja tarttuminen pienimpiin seulakokoihin. Lisäksi kalliomurskeen kohdalla huomattiin, että saatu näyte sisältää yli 16 mm halkaisijaltaan olevia rakeita, mikä johtuu luultavasti siitä, että murskeen seulontaan raekokoon 0/16 mm oli käytetty välppäseulaa.

Tuloksia varten pesuseulonnassa syntynyt pesutappio laskettiin vertaamalla alkuperäisen kuivatun ja pestyn, ja kuivatun näytteen massoja. Saatu erotus lisättiin lopuksi kuivaseulonnassa pohjalle jääneen, 0,063 mm seulan läpäisseen, aineksen määrään. Kuivaseulonnassa punnittiin kullekin seulalle jäänyt ainemäärä ja laskettiin jokaiselle seulalle läpäisyprosentti. Kalliomurskeen kohdalla rakeisuuden määrittystä ei suoritettu uudestaan, mutta saatu tulos korjattiin poistamalla kokonaismassasta 16 mm seulalle jääneet rakeet. Seuraavia tutkimuksia varten yli 16 mm rakeet seulottiin pois.

5.4 Parannettu Proctor-koe

5.4.1 Kokeen tarkoitus

Proctor-kokeella selvitetään tiiviyden ja vesipitoisuuden välistä riippuvuutta eli suurinta kuivatilavuuspainoa, joka voidaan materiaalilla saavuttaa. Vesipitoisuus, jossa tämä saavutetaan, kutsutaan optimivesipitoisuudeksi (w_{opt}). Tiiviyttä käytetään arvioimaan erityisesti karkeiden maalajien kantavuus- ja lujuusominaisuuksia, jotka ovat ratkaisevia tekijöitä mietittäessä maaperän sopivuutta perustus pohjaksi ja erilaisia maarakenteita suunniteltaessa. Proctor-kokeen tuloksia käytetään suoraan tiivistämisen suunnittelussa ja tiiviystarkkailussa. Tiiviysvaatimus esitetään tiiviysasteena, jolla tarkoitetaan mitatun kuivatilavuuspainon suhdetta Proctor-kokeella saavutettuun maksimi kuivatilavuuspainoon. Infrarakenteissa rakennekerrosten tiivistämisen tulisi tapahtua optimivesipitoisuudessa parhaimman tiivistymistuloksen saavuttamiseksi. Proctor-kokeista saadaan myös määritettyä materiaalin kuivairtotiheys, joka kuvaa kuivan massan suhdetta tilavuuteen. (Rantamäki ym. 1979, s. 82, 87–89) Taulukossa 9 on esitetty soran (Sr), sora-moreenin (SrMr), hiekan (Hk), hiekkamoreenin (HkMr) ja silttimoreenin (SiMr) kirjallisuudesta löytyvät maksimikuivatilavuuspainojen ja optimivesipitoisuuksien vaihteluvälit.

Taulukko 9. Maalajien optimivesipitoisuusalueet ja maksimikuivatilavuuspainot. (Rantamäki ym. 1989, s. 90)

Maalaji	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
Sr ja SrMr	5-10	20-22
Hk	5-15	17-20
HkMr ja SiMr	5-10	20-23

5.4.2 Kokeen suoritus

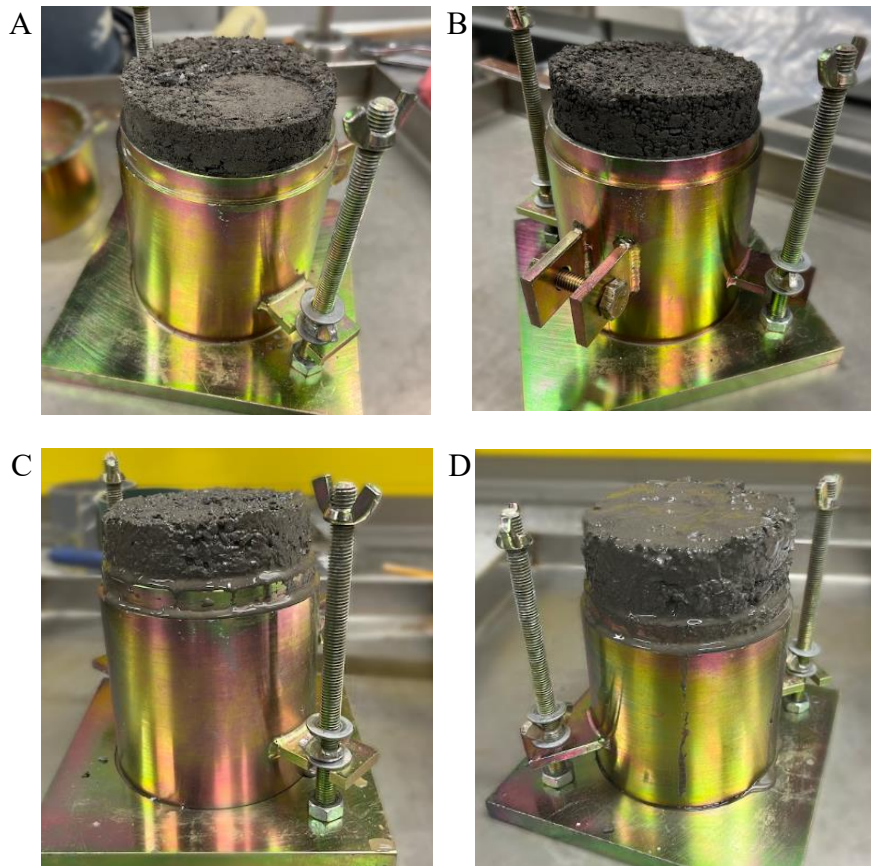
Tutkimus suoritettiin geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85) mukaan. Kalliomurskeella ja EAF-kuonalla Proctor-koe suoritettiin neljässä eri vesipitoisuudessa ja masuunikuonalla viidessä eri vesipitoisuudessa. Kokeet aloitettiin kalliomurskeen ja masuunikuonan osalta toimituskosteuksista (4 % ja 7,2 %) ja EAF-kuonalla 6 %

toimitusvesipitoisuuden ollessa matala. Kalliomurskeen Proctor-kokeessa käytetty muotti oli halkaistava, jolloin sen mahdollinen löystyminen, rakeiden pyrkiminen loveen ja huonompi istuvuus muotin alustaan tuotti epävarmuutta, jonka vuoksi kuonien kohdalla päädyttiin käyttämään eri muottia. Taulukkoon 10 on koottu sullonnassa käytettyjen muottien koot, tiivistyskerrosten ja iskujen lukumäärä sekä tavoitellut vesipitoisuudet.

Taulukko 10. Proctor-kokeessa käytetyt muottien koot, tiivistyskerrosten ja iskujen lukumäärä sekä tavoitellut vesipitoisuudet.

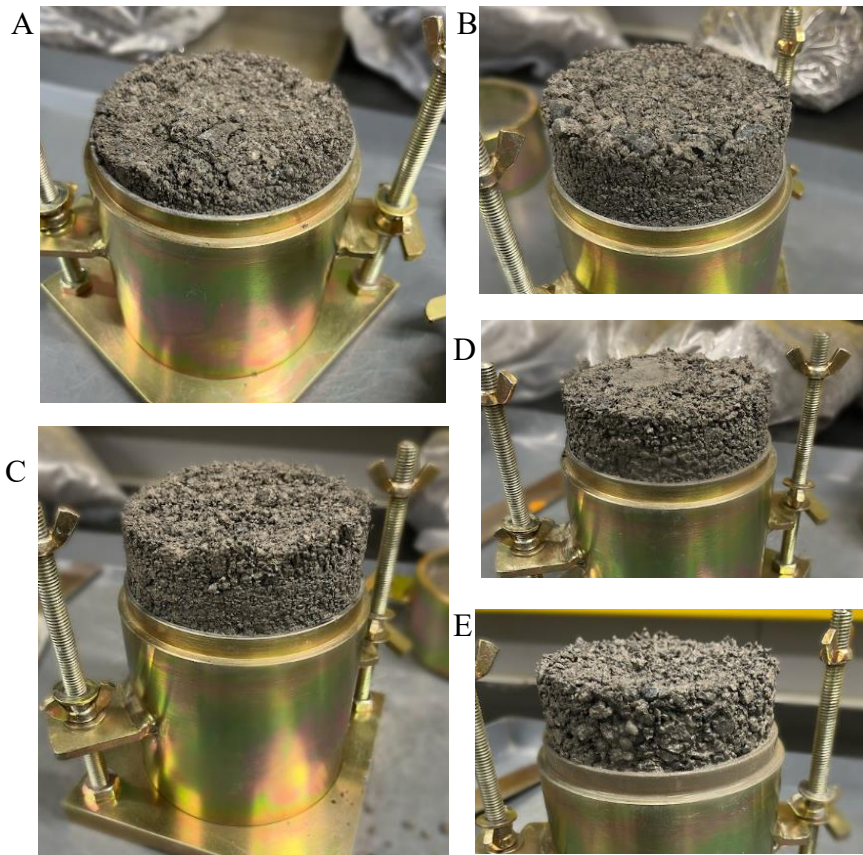
Materiaali	Muotin koko (cm³)	Tiivistyskerrosten lukumäärä	Iskumäärä yhtä tiivistyskerrosta kohden	Tavoitellut vesipitoisuudet (%)
KaM	953,6	5	25	4%, 5,5%, 7%, ja 8,5%
MaKu	1001,9	5	27	7,2 %, 9 %, 11 %, 13 % ja 15 %
EAF-kuona	1001,9	5	27	6 %, 7,5 %, 9 % ja 10,5 %

Kokeet aloitettiin kalliomurskeesta, jossa tavoitellut vesipitoisuudet olivat 4 %, 5,5 %, 7 % ja 8,5 %. Suurimman vesipitoisuuden kohdalla näytteen annettiin asettua noin kaksi vuorokautta ennen kokeen suorittamista, kun taas muilla vesipitoisuuksilla tiivistäminen suoritettiin välittömästi veden lisäyksen jälkeen. Tarkka vesipitoisuus määritettiin lopuksi punnitsemalla ja kuivattamalla näyte kokeen jälkeen. Proctor-muotin tilavuus oli 953,6 cm³ ja näyte tiivistettiin muottiin viidessä eri kerroksessa. Kutakin kerrosta tiivistettiin pudotusvasaralla 25 iskua. Vasaran paino oli 4,54 kg ja pudotuskorkeus 45,7 cm. Näytettä, jonka vesipitoisuus oli 7 % tiivistäessä, näytteen pinnalla alettiin havaita kosteutta kolmannen tiivistyskerroksen aikana. Viimeisessä vesipitoisuudessa (8,5 %) kosteutta oli havaittavissa jo ensimmäisen lyöntikerroksen jälkeen. Kuvassa 12 on esitetty kalliomurskenäytteet Proctor-kokeen jälkeen tarkoilla vesipitoisuuksilla. Näytteiden A, B, C ja D vesipitoisuudet ovat 4,3 %, 5,3 %, 6,1 % ja 7,0 %.



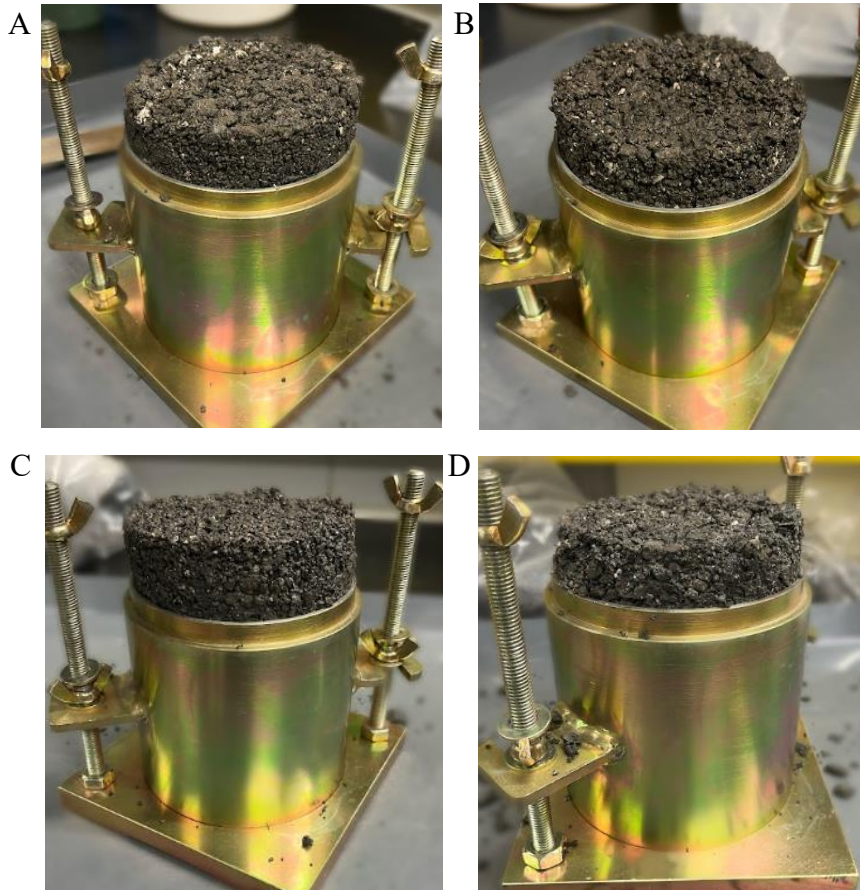
Kuva 12. Kalliomurske 0/16 mm Proctor-kokeen jälkeen vesipitoisuuksilla: A) 4,3 %, B) 5,3, C) 6,1 % ja D) 7,0 %.

Masuunikuonalla tavoitellut vesipitoisuudet olivat 7,2 %, 9 %, 11 %, 13 % ja 15 %. Veden lisäyksen jälkeen veden annettiin imeytyä ja asettua näytteeseen vähintään yön yli. Käytetyn Proctor-muotin tilavuus oli $1001,9 \text{ cm}^3$ ja iskumääränä käytettiin 27 iskua kierrosta kohden. Vesipitoisuuksilla 11 %, 13 % ja 15 % kosteutta oli havaittavissa muotin pohjalla. Sullonnassa oli havaittavissa rakeiden litistymistä ja hienontumista. Kuvassa 13 on esitetty masuunikuonanäytteet Proctor-kokeen jälkeen tarkoilla vesipitoisuuksilla. Näytteiden A, B, C, D ja E vesipitoisuudet ovat 7,1 %, 8,6 %, 10,9 %, 12,5 % ja 14,5 %.



Kuva 13. Masuunikuona 0/16 mm Proctor-kokeen jälkeen vesipitoisuuksilla: A) 7,1 %, B) 8,6 % C) 10,9 %, D) 12,5 % ja E) 14,5 %.

EAF-kuonalla tavoitellut vesipitoisuudet olivat 6 %, 7,5 %, 9 % ja 10,5 %. Vesipitoisuuksilla 6 % ja 7,5 % näytteiden annettiin tekeytyä muutama tunnin ajan, kun taas lopuilla vesipitoisuuksilla tekeytymisaika oli vähintään yön yli. Ensimmäisellä vesipitoisuudella havaittiin näytteen pölyämistä ja sähköistymistä. Silmin havaittavaa kosteutta ei esiintynyt. Seuraavalla kahdella vesipitoisuudella pölyämistä ei ollut enää havaittavissa ja muotin pohjalle oli kertynyt kosteutta. Viimeisellä vesipitoisuudella muotin pohjasta valui vettä muottia irrottaessa pohjasta, mutta kosteutta ei kertynyt lyöntikierroksilla näytteen päälle kuten kalliomurskeen kohdalla. Sullonnassa oli masuunikuonan tapaan havaittavissa rakeiden litistymistä ja hienontumista. Kuvassa 14 on esitetty EAF-kuonanäytteet Proctor-kokeen jälkeen tarkoilla vesipitoisuuksilla. Näytteiden A, B, C ja D vesipitoisuudet ovat 6,2 %, 7,1 %, 8,7 % ja 9,6 %.



Kuva 14. EAF-kuona 0/16 mm Proctor-kokeen jälkeen vesipitoisuuksilla: A) 6,2 %, B) 7,1 %, C) 8,7 %, D) 9,6 %.

Proctor-kokeista saaduista tuloksista määritettiin tilavuuspaino, kuivatilavuuspaino ja kuivairtoteiheys. Tilavuuspaino lasketaan kaavalla:

$$\gamma = \frac{m_m}{V} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2, \quad (2)$$

missä γ on materiaalin tilavuuspaino (kN/m^3)
 m_m on kostean näytteen massa (g) ja
 V on muotin tilavuus (cm^3).

Kuivatilavuuspaino saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$\gamma_d = \frac{m_k}{V} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2, \quad (3)$$

missä γ_d on materiaalin kuivatilavuuspaino (kN/m³)
 m_k kuivatun näytteen massa (g) ja
 V on muotin tilavuus (cm³).

Vastaavasti kuivairtoteiheys saadaan kaavalla:

$$\rho_d = \frac{m_k}{V}, \quad (4)$$

missä ρ_d on materiaalin kuivairtoteiheys (g/cm³)
 m_k on kuivatun näytteen massa (g) ja
 V on muotin tilavuus (cm³).

Lopuksi sullontakokeista saadut kuivatilavuuspainot eri vesipitoisuuksilla kuvataan koordinaatistossa, jonka vaaka-akselina on vesipitoisuus ja pystyakselina kuivatilavuuspaino. Pisteitä mukaillen piirretään käyrä, josta saadaan luettua maksimikuivatilavuuspaino ja sitä vastaava optimivesipitoisuus.

5.5 Kapillaarisuus

5.5.1 Kokeen tarkoitus

Kapillaarisuudella tarkoitetaan nesteen kykyä nousta ohuita putkistoja pitkin ylöspäin, mikä johtuu nesteen ja seinämien välisestä vetovoimasta ja nesteen pintajännityksestä. Vesi nousee maan huokosketjuja pitkin pohjavedenpinnan yläpuolelle siihen tasoon asti, missä vesimassaan kohdistuvat paino- ja kapillaarivoimat ovat yhtä suuret. Tätä tasoa kutsutaan kapillaariseksi nousukorkeudeksi (h_c). Se on kääntäen verrannollinen maalajin raekokoon, eli mitä pienempi raekoko on, sitä korkeammalle vesi materiaalissa nousee.

(Rantamäki ym. 1979, s. 113) Maa-aines sisältää kuitenkin erikokoisia rakeita, jotka tunkeutuvat toisensa väleihin erityisesti tiiviissä tilassa ja siten vaikuttaa kapillaaristen käytävien muodostumiseen. (Jääskeläinen 2011, s. 38)

Kapillaarisuudella on vaikutusta materiaalin lujuteen ja routimiseen. Maan kapillaarivyöhykkeellä huokosvedenpaine on negatiivinen ja raepaine normaalia suurempi, jolloin maarakeiden välillä on enemmän kitkaa. Tämä tarkoittaa lisääntyntä maan lujutta. Lisäksi kyllästämättömässä tilassa vesi esiintyy rakeiden kosketuspinnissa ja huokosnurkissa ns. huokoskulmavetenä, jolloin veden pintajännitys yhdistää rakeita aiheuttaen näennäistä koheesiota. Kapillaarinen vesi aiheuttaa rakenteen routimista sen imeytyessä kerrosroudan jäämuodostumiin. Materiaalia pidetään routivana, kun sen kapillaarinen nousukorkeus on yli 100 cm. (Rantamäki ym. 1979, s. 113–114, 117) Taulukossa 11 on esitetty kirjallisuudesta löytyviä kapillaarisen nousukorkeuden arvoja eri maalajeissa.

Taulukko 11. Kapillaarisen nousukorkeuden arvoja maalajeissa eri tiiviystiloissa (mukaillen Jääskeläinen 2011, s. 39; Soveri & Kauranne 1972, s. 77).

Maalaji	Raekoko (mm)	Kapillaarisuus (cm)	
		Löyhä	Tiivis
Hienosora	2–6	1–5	1–5
Karkeahiekka	0,6–2	3–12	4–15
Keskihiekka	0,2–0,6	10–35	12–50
Hienohiekka	0,06–0,2	30–200	40–350

5.5.2 Kokeen suoritus

Koe suoritettiin Tie- ja vesirakennushallituksen (1970) ohjeiden mukaisesti. Kapillaarinen nousukorkeus määritettiin Sahi-kapillaarimetrillä (kuva 15), jossa näytteeseen vaikuttavan alipaineen suuruus säädetään kuvassa 15 näkyvillä venttiileillä A ja B. Laitteiston periaatteena on muodostaa vedellä kyllästettyyn näytteeseen niin suuri alipaine, että siinä oleva vesi ei voi enää vastustaa ilman kulkeutumista laitteen läpi. Tällöin näytteen alaosaan tippuvat vesipisarot muuttuvat ilmakupliksi. Saavutettu

alipaine vastaa kapillaarista imukykyä ja on sama kuin kapillaarinen nousukorkeus h_c . Kapillaarimetrin tuloksia ei pidetä luotettavina, mutta niitä voidaan pitää suunta antavina.



Kuva 15. Kapillaarisen nousukorkeuden määrittämiseen käytetty Sahi-kapillaarimetri.

Kokeet suoritettiin raakoissa 0/16 mm. Yön yli kyllästetyt näytteet tiivistettiin kevyesti kolmessa eri kerroksessa suodatinpaperin päälle ilmakuplien poistamiseksi. Koe suoritettiin jokaiselle näytteelle vähintään neljä kertaa, josta ensimmäinen koe oli likimääräinen määrittäminen. Imua kasvatettiin 5 cm/1 min niin kauan, kunnes pohjasta valuvat pisarat muuttuivat ilmakupliksi, ja kapillaarinen nousukorkeus saavutettiin. Varsinaisissa kokeissa imu nostettiin 2 min sisällä 80 % likimääräisen kokeen tuloksesta ja koetta jatkettiin tahdilla noin 2 cm /1 min.

5.6 Rasialeikkauskoe

5.6.1 Kokeen tarkoitus

Rasialeikkauskokeella määritetään materiaalin leikkauslujuus, joka on maaperän tärkein lujuusominaisuus. Se määrää suurilta osin maan kantavuuden, maaluiskien vakavuuden

ja tukiseiniin aiheutuvat paineet. Maaperä murtuu, kun maahan aiheutuvat leikkausjännitykset ylittävät maan leikkauslujuuden. Ylittyminen voi aiheuttaa kaivantojen sortumista sekä rakenteiden painumisia, kallistumisia ja sortumisia. Maan leikkauslujuutta τ_f kuvataan seuraavalla kaavalla:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan\varphi', \quad (5)$$

missä τ_f on leikkauslujuus (kPa),
 c' on tehokas koheesio (kPa),
 σ' on leikkauspinnassa vaikuttava tehokas normaalijännitys (kPa) ja
 φ' on maan tehokas leikkauskestävyyskulma (°).

Kitkamaalajeilla leikkauslujuus muodostuu leikkauskestävyyskulmasta φ' (sisäisestä kitkakulmasta), jolloin kaavasta supistuu koheesio c' pois. Leikkauskestävyyskulman suuruuteen vaikuttaa voimakkaimmin materiaalin tiiviysaste, raemuoto ja raekoostumus. Suhteistuneella ja särmikkäitä rakeita sisältävällä materiaalilla on keskimääräisesti suurempi leikkauskestävyyskulma kuin tasarakeisella ja pyöreärakeisella materiaalilla. (Rantamäki ym. 1979, s. 122–123) Taulukossa 12 on esitetty maarakennuksessa käytettävien luonnonkiviaineksien keskimääräisiä leikkauskestävyyskulman arvoja.

Taulukko 12. Soran ja hiekan leikkauskestävyyskulman arvoja (Jääskeläinen 2011, s. 117; Löfman ym. 2024, s. 71).

Materiaali	Leikkauskestävyyskulma löyhässä tilassa φ (°)	Leikkauskestävyyskulma tiivistettynä φ (°)
Kalliomurske	28,6–37,9	40,1–46,2
Sora	32–35	41–48
Hiekka	30–35	38–46

5.6.2 Kokeen suoritus

Rasialeikkauskoe suoritettiin mukailien standardia SFS-EN ISO 17892-10. Näytteet seulottiin koetta varten raekokoon 0/8 mm ja valmistettiin optimivesipitoisuuteen. Kuvassa 16 on esitetty kokeessa käytetty rasialeikkauslaitteisto.



Kuva 16. Kokeessa käytetty rasialeikkauslaitteisto.

Kokeessa tavoiteltiin 92 % tiivysastetta Proctor-kokeesta saavutetusta maksimitiiviydestä, mutta tätä ei saavutettu masuunikuonan ja EAF-kuonan kohdalla. Kokeessa saavutettiin kalliomurskeen kohdalla 92–93 % tiivys, masuunikuonan kohdalla 85–86 % ja EAF-kuonan kohdalla 80–81 %. Erot tiivysasteessa johtuvat siitä, että kalliomurskeen koe tehtiin ensimmäisenä, jonka jälkeen kuonilla ei päästy samaan tiivysasteeseen isompien murskaantuvien rakeiden puuttuessa. Lisäksi kuonien tiivistäminen vaatii enemmän voimaa kuin kalliomurskeella. Näytteet tiivistettiin rasiaan huokoskivien väliin kolmessa kerroksessa. Käytetyn rasian mitat olivat 10x10x4,5 cm. Näytteitä kuormitettiin 30, 60 ja 120 kg normaalijännityksen aiheuttavalla pystykuormalla ja leikkausnopeutena käytettiin 0,3019 mm/min.

Ennen varsinaisen kokeen aloittamista pystysuorasta kellosta luettiin painon lisäämisen jälkeen aiheutuneen painuman määrä, joka huomioitiin tuloksissa näytteen alkuperäisessä

korkeudessa. Laitteiston pystykellon tarkkuus oli 0,01 mm ja vaakakellon 0,002 mm. Koe lopetettiin, kun vaakasuoran kellon lukema pysähtyi tai alkoi pienenemään. Tuloksia varten laitteistosta luettiin voimarenkaan supistuman suuruus eri pystykuormilla ja lukemat kalibroitiin vastaamaan oikeaa leikkausvoimaa ja sen aiheuttamaa murtoleikkausjännitystä. Koetulokset merkitään $\sigma' - \tau_f$ -koordinaatistoon, jolloin tulosposteista saadaan piirrettyä suora, jonka yhtälö on $\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan\varphi'$. Leikkauskestävyyskulma saadaan suoran kaltevuuskulmasta ja koheesio suoran ja τ_f -akselin leikkauspisteestä.

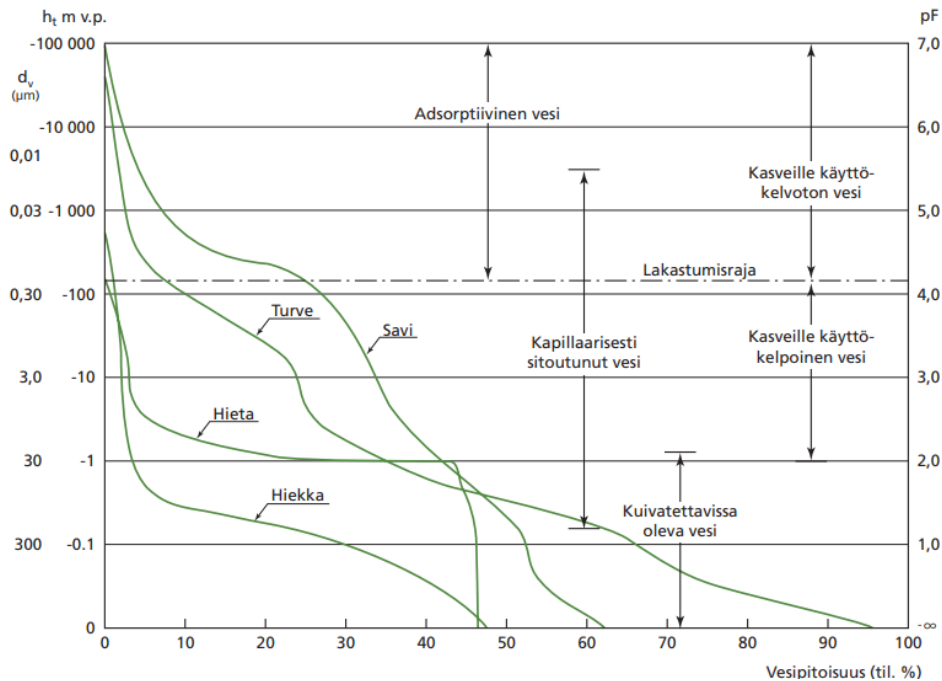
5.7 Vedenpidätyskoe

5.7.1 Kokeen tarkoitus

Vedenpidätyskokeella eli pF-kokeella selvitetään materiaalin kykyä pidättää vettä eri imuvoimilla. Itse pF-luku kuvaa imun suuruutta, ja se on kymmenkantainen logaritmi paineesta, joka on muutettu vesipatsaan korkeudeksi. (Paasonen-Kivekäs ym. 2016) Materiaalin vedenpidätyskyky vaikuttaa maaperän kantavuuteen, lujuteen ja painumisaikaan. Suurella vedenpidätyskyvyn omaavalla materiaalilla kuormituksen aiheuttama painuminen tapahtuu pitkän ajan kuluessa huokosveden muuttuessa hitaasti raepaineeksi. Suuri huokosvedenpaine vähentää myös maaperän kantavuutta ja lujutta. Materiaalin vedenpidätyskykyyn vaikuttaa huokoskokojakauma, huokosten jatkuvuus, hienoaineksen määrä sekä materiaalin tiiviysaste. (Rantamäki ym. 1979, s. 107)

Kokeesta saatava vedenpidätyskäyrä kuvaa paine-eron ja maan vesipitoisuuden välistä suhdetta. Koordinaatistossa x-akselina on tilavuusvesipitoisuus prosentteina ja y-akselina pF-luku. On myös todettu, että paine-eron ja huokoskoon välillä on lineaarinen yhteys, jolloin vedenpidätyskäyrä kuvastaa myös materiaalin huokoskokojakaumaa. Kuvaajasta saadaan myös materiaalin jäännösvesipitoisuus, jolloin kosteuden muutos lähenee nollaan. Suuri jäännösvesipitoisuus voi lisätä materiaalin routivuutta ja altistaa materiaalin muodonmuutoksille kuormituksen alaisena. Suomalaisen määritelmän mukaan maa on kenttäkapasiteetissa, kun pF on 2. Tämä tarkoittaa sitä vesipitoisuutta, jonka maa pystyy pidättämään sen jälkeen, kun painovoiman vaikutuksen alainen vesi on

kadonnut. Kuvassa 17 on esitetty eri maalajien vedenpidätyskäyriä. (Paasonen-Kivekäs ym. 2016 s. 94–95, 109)

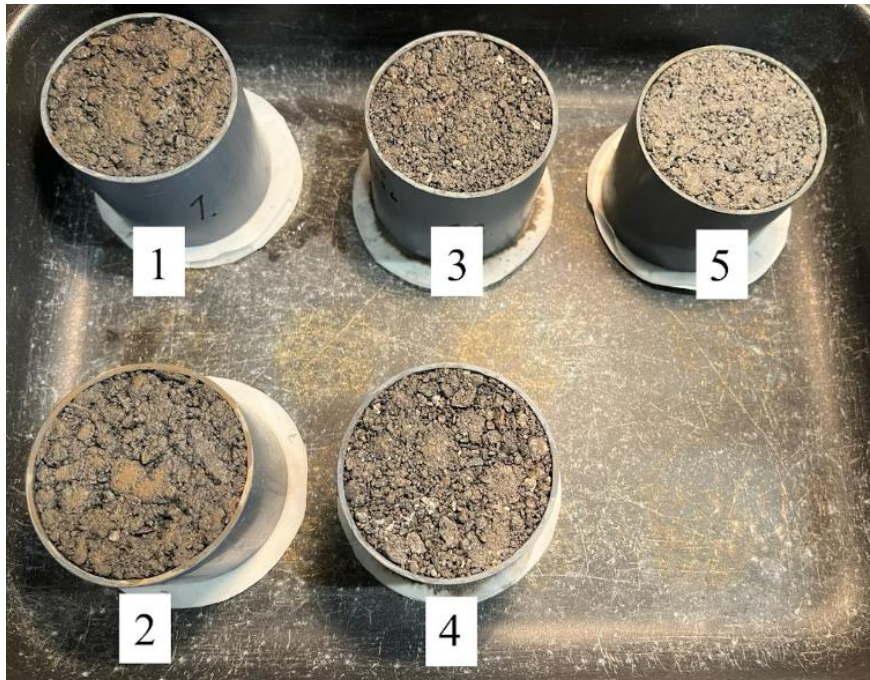


Kuva 17. Maalajien vedenpidätyskäyriä (Paasonen-Kivekäs ym. 2016, s. 95).

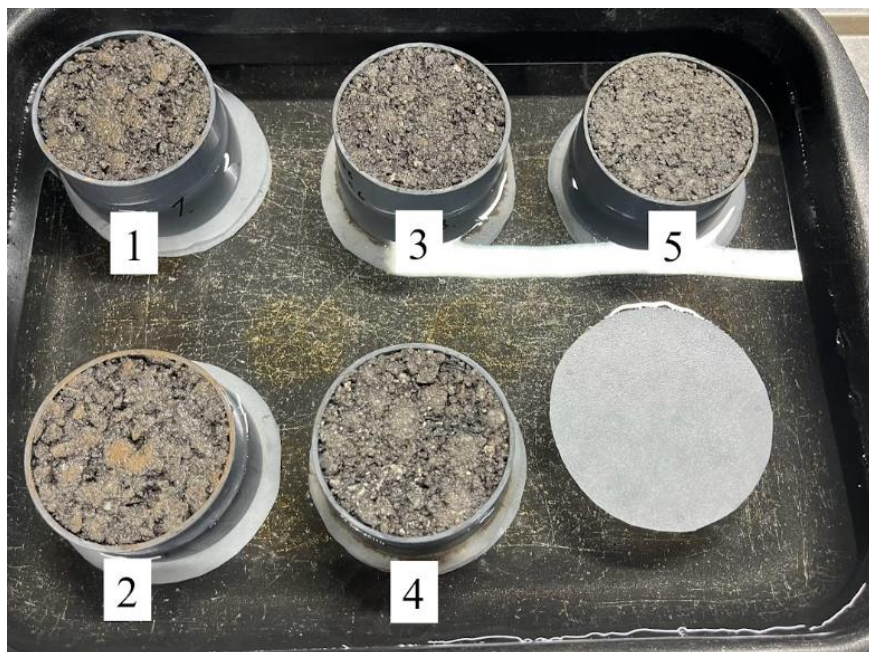
5.7.2 Kokeen suoritus

PF-kokeessa 0/12 mm raekokoon seulotut näytteet sullottiin optimivesipitoisuudessa kolmena kerroksena näyterenkaisiin. Sullonnassa tavoiteltiin 92 % Proctor-kokeessa saavutetusta tiivyydestä, josta EAF-kuonalla jäätii 0,3–0,4 %. Näyterenkaiden halkaisija oli 7 cm ja korkeus vaihteli 6,0–6,60 cm välillä. EAF-kuonalle ja kalliomurskeelle valmistettiin rinnakkaisnäytteet.

Ennen kokeen alkua käytetyt renkaat ja huokospaperit punnittiin, jonka jälkeen näytteet tiivistettiin renkaisiin ja punnittiin uudelleen. Näyterenkaat huokospapereineen sekä verrattava ”nollapaperi” asetettiin deionisoidulla vedellä täytetylle alustalle niin, että näytteiden annettiin imeä kapillaarisesti yön yli vettä. Kuvassa 18 on näytteet ennen kyllästystä ja kuvassa 19 kyllästytyn jälkeen. Näytteet 1 ja 2 ovat kalliomursketta, 3 ja 4 EAF-kuonaa ja näyte 5 masuunikuonaa.



Kuva 18. Näytteet sullottuna muotteihin pF-koetta varten. Näytteet 1 ja 2 ovat kalliomurskettä, 3 ja 4 EAF-kuonaa ja näyte 5 masuunikuonaa.



Kuva 19. Yön yli vedellä kyllästetyt näytteet ja huokospaperi pF-koetta varten. Näytteet 1 ja 2 ovat kalliomurskettä, 3 ja 4 EAF-kuonaa ja näyte 5 masuunikuonaa.

Koe aloitettiin seuraavana päivänä näytteiden, nollapaperin ja imulevyn ollessa kyllästynyt vedellä. Näytteet punnittiin ja asetettiin kuvassa 20 esitettyyn paineastiaan, jonka pohjalla käytettiin aluksi 1 bar imulevyä. Ensimmäisenä paineportaana käytettiin

0,010 bar painetta ja näytteiden annettiin olla jokaisella paineportaalla niin kauan, kunnes paineastiasta ei enää poistunut vettä. Jokaisen paineen noston välissä nollapaperi ja näytteet punnittiin, asetettiin takaisin paineastiaan ja kostutettiin deionisoidulla vedellä imulevyn kanssa. Painetta kaksinkertaistettiin jokaisella portaalla 0,160 bar asti, jonka jälkeen paineportaina käytettiin 0,4, 0,95, 2,2 ja 4,9 bar. Imulevy vaihdettiin 0,95 bar jälkeen 5 bar imulevyyn. Kokeessa ongelmaksi muodostui huokospaperien rikkoutuminen näytteiden alla, jonka vuoksi niitä jouduttiin lisäämään punnituskertojen jälkeen. Koe suoritettiin 12.11.2024-23.1.2025 välisenä aikana.



Kuva 20. PF-kokeessa käytetty paineastia. Vesi poistuu näytteistä ja imulevystä kuvassa näkyvän muoviputken kautta.

Koe päätettiin lopettaa 4,9 bar punnituskerran jälkeen painon muutoksen ollessa muuttumaton tai vähäinen. Näytteet ja nollapaperi annettiin kuivua lämpökaapissa näytteen lopullisen vesipitoisuuden määrittämiseksi. Tilavuusvesipitoisuus lasketaan kaavalla:

$$W_{til\%} = \frac{(m_m - m_k)}{V} \cdot \rho_w \cdot 100, \quad (6)$$

missä $W_{til\%}$ on tilavuusvesipitoisuus (%),
 m_m on märän näytteen massa (g),
 m_k on kuivan näytteen massa (g) ja
 ρ_w on veden tiheys (g/cm³).

5.8 Vedenläpäisevyys

5.8.1 Kokeen tarkoitus

Vedenläpäisevyys on yksi maan hydraulisista ominaisuuksista. Veden virtaus maassa noudattaa Darcyn lakia, jolloin veden virtausnopeus on suoraan riippuvainen vedenläpäisevyydestä ja hydraulisesta gradientista. Materiaalin vedenläpäisevyyden merkitys korostuu erityisesti pohjarakenteiden kuivana pidossa, maarakenteiden painumisajan määrittämisessä sekä esimerkiksi maapatojen suunnittelussa. Huonosti vettä läpäisevä maa voi aiheuttaa veden kertymistä rakenteisiin, lisätä pintavaluntaa, aiheuttaa epätasaista painunutta ja suurentaa hydraulisen murtuman riskiä. Maan vedenläpäisevyyteen vaikuttaa muun muassa materiaalin hienoaineksen määrä ja tiiviysaste. Luonnon kiviaineksista soran vedenläpäisevyys on luokkaa 10⁻²-10⁻⁴ m/s ja hiekan 10⁻⁴-10⁻⁶ m/s. (Rantamäki ym. 1979, s. 99–101)

5.8.2 Kokeen suoritus

Koe suoritettiin Tie- ja vesirakennushallituksen (1970) ohjeiden mukaisesti jäykkäseinäisellä sellillä vakiopaineessa. Koe suoritettiin raekoossa 0/16 mm. Ennen näytteen tiivistämistä koeastian pohjalle lisättiin metallinen seulaverkko, kvartsikivikerros ja seulakangas estämään näytteen valumisen poistoputkeen ja varmistamaan veden tasainen jakautuminen astiassa. Tiivistämisessä tavoiteltiin 92 % Proctor-kokeesta saavutetusta maksimitiiviydestä. Tiivistäminen tapahtui neljässä eri kerroksessa, siten, että näytteen kokonaispaksuudeksi tuli n. 10 cm. Tiivistämisessä hankalinta oli masuunikuonan tiivistämisen, jossa rakeiden rikkoutuminen ja litistymisen

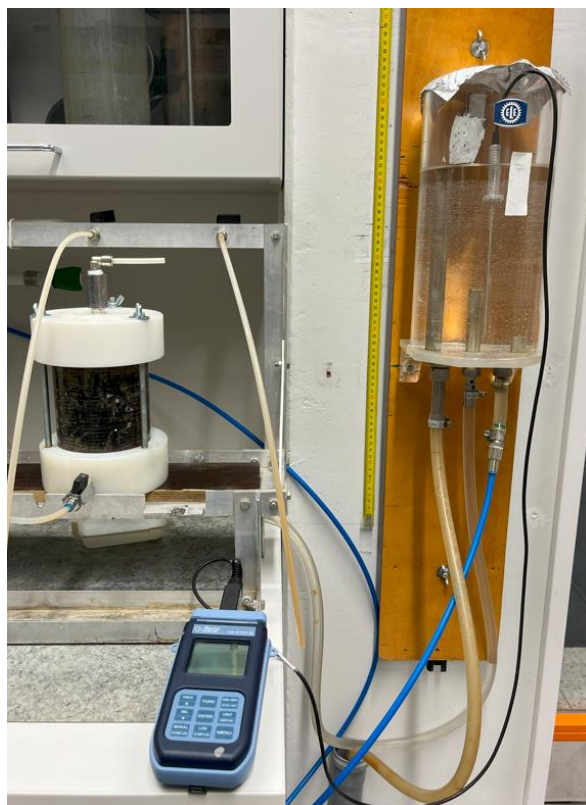
vaatii suurempaa voimaa. Lopuksi näytteen päälle rakennettiin vastaavanlainen kerros kuin sen alapuolelle käänteisessä järjestyksessä.

Ennen kokeen aloittamista näytteistä poistettiin ilmakuplat johtamalla näytteeseen vettä alhaalta päin niin kauan, kunnes vettä alkoi poistumaan näytteen yläosasta. Kokeessa vettä juoksutettiin näytteen läpi 10 cm painekorkeudella ja kerättiin tietyssä ajassa (t) kertynyt vesimäärä (Q) mittalasiin. Samalla mitattiin veden lämpötila. Vedenläpäisevyys saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$k_T = \frac{Q \cdot h_n}{A \cdot t \cdot H_p}, \quad (7)$$

missä k_T on vedenläpäisevyys lämpötilassa T (m/s),
 Q on näytteen läpi virrannut vesimäärä ajassa t (m^3),
 h on näytteen korkeus (m),
 A on näytteen pinta-ala (m^2) ja
 H_p on painekorkeus (m).

Koe suoritettiin jokaiselle näytteelle kaksi kertaa siten, että molemmista kokeista laskettiin kolmeen mittalasiin kertyneen vesimäärän ja siitä saadun materiaalin vedenläpäisevyyden keskiarvo. Saatu vedenläpäisevyyden arvo lämpötilassa T on korjattava ohjeen mukaisella käyrästäoltä saatavalla lämpötilakertoimella, koska veden viskositeetti vaihtelee lämpötilan mukaan. Kuvassa 21 on esitetty kokeessa käytetty laitteisto.



Kuva 21. Vedenläpäisevyyden määrittämiseen käytetty laitteisto.

5.9 Kiintotiheyden määrittäminen

5.9.1 Kokeen tarkoitus

Kiintotiheys (ρ_s) on yksi maalajin koostumusominaisuuksista. Sillä kuvataan kuivan huokosettoman aineksen massan suhdetta tilavuuteen ja se määräytyy maalajin syntyaineksena olleen kivilajin tiheyden mukaan. Jos kivennäismaalajin kiintotiheyttä ei tiedetä, sen oletetaan olevan $2,65 \text{ g/cm}^3$. Kiintotiheys kertoo materiaalin painosta, jolloin voidaan päätellä sen sopivuutta esimerkiksi pehmeikkörakentamiseen. (Rantamäki ym. 1979 s. 78 Lisäksi kiintotiheyttä tarvitaan muun muassa arvioidessa rakenteen tiiviyyttä ja tiivistystyön laatua. (Suomen geoteknillinen yhdistys 1985, s. 25)

5.9.2 Kokeen suoritus

Tutkimus suoritettiin geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85) mukaan. Kiintotiheyden määrittämiseen käytettiin pyknometrimenetelmää, ja koe suoritettiin jokaisella materiaalilla kahdella rinnakkaisnäytteellä. Käytetyn pyknometrin tilavuus oli

250 cm³ ja näytemääränä n. 100 g. Kuvassa 22 on esitetty kokeessa käytetyt pyknometrit. Koe suoritettiin materiaalille, jonka rakeisuus oli 0/16 mm.



Kuva 22. Kiintotiheyden määrittämiseen käytetyt pyknometrit.

Koe aloitettiin kuivattamalla näytteet vähintään 12 tuntia 105 °C asteisessa uunissa, jonka jälkeen niiden annettiin jäähtyä eksikaattorissa. Jäähdytetty näyte ja käytetyt pyknometrit punnittiin, ja pyknometriin lisättiin tislattua vettä n. 20 mm näytteen yläpuolelle asti. Ilmakuplien poistamiseksi näytteitä keitettiin n. 20 min välillä sekoittaen. Näytteiden ja veden annettiin jäähtyä yön yli huoneenlämpöiseksi, jonka jälkeen pyknometrit täytettiin merkkiviivaan asti keitettyllä vedellä, mitattiin lämpötila ja punnittiin. Lopuksi pelkällä keitettyllä vedellä täytetty pyknometri lämpötilassa T punnittiin. Materiaalin kiintotiheys saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$\rho_s = \frac{m_k}{m_k - (m_b - m_a)} \cdot \rho_{WT}, \quad (8)$$

missä ρ_s on kiintotiheys (g/cm³),
 w_k on kuiva näyte (g),
 w_b on pyknometrin, näytteen ja veden massa (g),

w_a on vedellä täytetyn pyknometrin massa (g) ja
 ρ_{WT} on veden tiheys punnituslämpötilassa (g/cm^3).

5.10 Paisuntakoe

5.10.1 Kokeen tarkoitus

Materiaalin paisuminen voi aiheuttaa rakenteissa epätasaista nousua, sidottujen rakenteiden halkeilua ja lopulta lyhentää rakenteiden käyttöikää. Materiaalin paisuntaominaisuuksien tunteminen auttaa ennakoimaan kuonan käsittelytarpeita, kuten varastointia ennen sen käyttöönottoa rakenteissa. Erityisesti teräskuonissa on havaittu paisumista, minkä vuoksi sille on asetettu raja-arvot maa- ja vesirakentamiseen standardissa SFS-EN 13242. Arvot koskevat myös ilmajäähdytettyä masuunikuonaa. Alin asetettu raja-arvo paisumiselle sitomattomissa kerroksissa on 5 %, mutta standardissa on myös annettu 7,5 % ja 10 % raja-arvot eri käyttökohteiden mukaisesti. Jos kuonan paisumisen maksimiarvo alittaa sille määrätyn luokan raja-arvon, pidetään sitä tilavuuden suhteen stabiilina.

5.10.2 Kokeen suoritus

Koe suoritettiin sovelletusti masuunikuonalle ja EAF-kuonalle standardin SFS-EN 1744-1 mukaisesti kahdella rinnakkaisnäytteellä. Standardista poiketen koe suoritettiin raekoossa 0/16 mm, sen sijaan, että käytettäisiin standardissa taulukossa 2 esitettyä raekokojakauman mukaista näytettä. Näytteiden tiivistyksessä pyrittiin saavuttamaan 92 % Proctor-kokeella saavutetusta maksimitiiviydestä. EAF-kuonalla tiiviysasteeksi saatiin 91,3 % ja 91,5 % ja masuunikuonalla 91,1 % ja 89,5 %. Masuunikuonalla toisessa näytteessä saavutettu alhaisempi tiiviysaste johtui luultavasti näytteen huonosta otoksesta, jolloin hienoainesta päätyi vähemmän näytteeseen.

Tiivistys suoritettiin täryvasaralla kolmessa kerroksessa niin, että näytteen korkeudeksi tavoiteltiin 6 cm ja tilavuudeksi $2078,4 \text{ cm}^3$. Tärytysaikana käytettiin 20–40 sekuntia kerrosta kohden. Sylinterin pohjalle ja päälle asetettiin suodatinkangas sekä yläpuolelle lasikuulia tasaamaan paisumisen aiheuttamia korkeuseroja. Tämän jälkeen sylinteri

asetettiin paisuntalaitteistoon ja kiinnitettiin siirtymämittari näytteen päällä olevan levyn keskikohtaan. Näyte alkaa paisua, kun siihen ohjataan alhaalta kuumaa höyryä. Tilavuuden muutos prosentteina saadaan laskettua pystysiirtymän (PS) ja sylinterin keskihalkaisijan avulla seuraavalla kaavalla:

$$PS = \frac{\pi \cdot h \cdot d^2}{4 \cdot V_s} \cdot 100, \quad (9)$$

missä PS on näytteen tilavuuden muutos (%),
 h_p on näytteen pystysiirtymä kokeen jälkeen (mm),
 d on näytesylinterin sisähalkaisija (mm) ja
 V_s on kuonanäytteen tilavuus sylinteriin tiivistämisen jälkeen (cm³).

5.11 Routanousukoe

5.11.1 Kokeen tarkoitus

Routivuudella tarkoitetaan maan tai materiaalin kokonaistilavuuden kasvua sen jäätyessä. Routimista eli jäälinsien ja kerrosten muodostumista aiheuttaa kapillaarisen veden nouseminen routakerrokseen sekä maakerroksen heikompi vedenläpäisevyys, jolloin vesi ei pääse pakenemaan huokosista. Routivuus on riippuvainen pääasiassa siis materiaalin rakeisuudesta, mutta siihen vaikuttaa myös materiaalin tiiviys sekä jäätymisvyöhykkeeseen kohdistuvat kuormitukset. (Rantamäki ym. 1979, s. 117) Routiminen voi aiheuttaa muun muassa rakenteiden epätasaista nousua ja painumia, kantavuuden heikkenemistä, rakenteiden halkeilua sekä putkien ja kaapeleiden vaurioitumista. (Jääskeläinen 2011, s. 89–90)

Maalajin routivuuden voimakkuutta voidaan kuvata segregatiopotentiaalilla (SP), jolla tarkoitetaan osittain jäätyneessä maakerroksessa veden virtausnopeuden ja lämpötilagradientin suhdetta (mm²/Kh). Segregatiopotentiaali riippuu maan rakeisuudesta, huokoisuudesta, maakerrokseen virtaavan veden määrästä, kapillaarisuudesta, lämpötilagradientista ja vallitsevasta jännitystilasta. (Hentilä ym. 1994, s. 12)

5.11.2 Kokeen suoritus

Materiaalien routivuutta tutkittiin routanousukokeella Variksen (2015) kandidaatintyön ohjeiden mukaan. Koe suoritettiin EAF-kuonalle, masuunikuonalle ja kalliomurskeelle raekoossa 0/16 mm. Kokeen pystyi suorittamaan samaan aikaan kahdelle materiaalille, joten koe suoritettiin EAF-kuonalle kaksi kertaa. Ennen tiivistämistä astian pohjalle asetettiin huokoskivilevy ja suodatinkangas estämään näytteen karkaamisen vesiputkeen. Näytteet pyrittiin tiivistämään mahdollisimman tiiviiksi optimivesipitoisuudessa käytettävään astiaan, siten, että näytteen korkeudeksi tuli 10 cm ja tilavuudeksi 785,4 cm³. EAF-kuonalla saavutettiin 83,9 % ja 86 %, masuunikuonalla 85,9 % ja kalliomurskeella 92 % tiiviyssaste. Tiivistämisen yhteydessä astiaan asetettiin 2 cm välein termolangat, joiden avulla seurattiin lämpötilan kehitystä näytteessä. Taulukossa 13 on esitetty näytteiden vesipitoisuudet, tiiviyssasteet ja tilavuuspainot ennen routanousukokeen aloittamista.

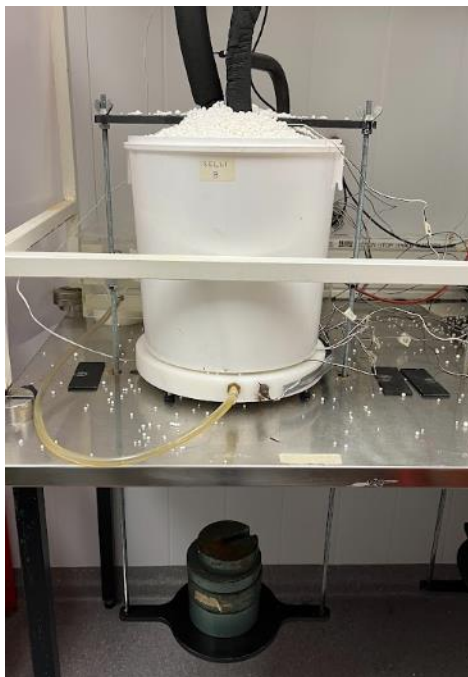
Taulukko 13. Näytteiden vesipitoisuudet, tiiviyssasteet ja tilavuuspainot ennen routanousukokeen aloittamista.

Näyte	Vesipitoisuus (%)	Tiiviyssaste (%)	Tilavuuspaino (kN/m ³)
EAF-kuona 1	8	83,9	21,7
EAF-kuona 2	8	86	21,9
MaKu	12,4	85,9	18,9
KaM	6	92	22,2

Tiivistämisen jälkeen näytteen päälle asetettiin laitteisto, jonka kautta näytettä jäähdytettiin ylhäältä päin sekä siirtymäanturi, jonka avulla seurattiin routanousun kehitystä. Kuvassa 23 on esitetty routalaitteeseen tiivistetyt masuunikuonanäyte ja EAF-kuonanäyte. Näytteisiin ohjattiin vettä kuvassa 23 sivuilla näkyvistä astioista näytteen alaosaan. Syöttöveden lämpötila pidettiin +3 °C. Lopuksi näytteeseen asetettiin 20 kPa kuormitus ja laitteisto eristettiin paisutetulla polystyreenimuovirouheella kuvan 24 mukaisesti. Huoneen lämpötila säädettiin +2 °C ennen kokeen aloitusta. Kokeen kesto oli jokaisella näytteellä vähintään 4 vuorokautta.

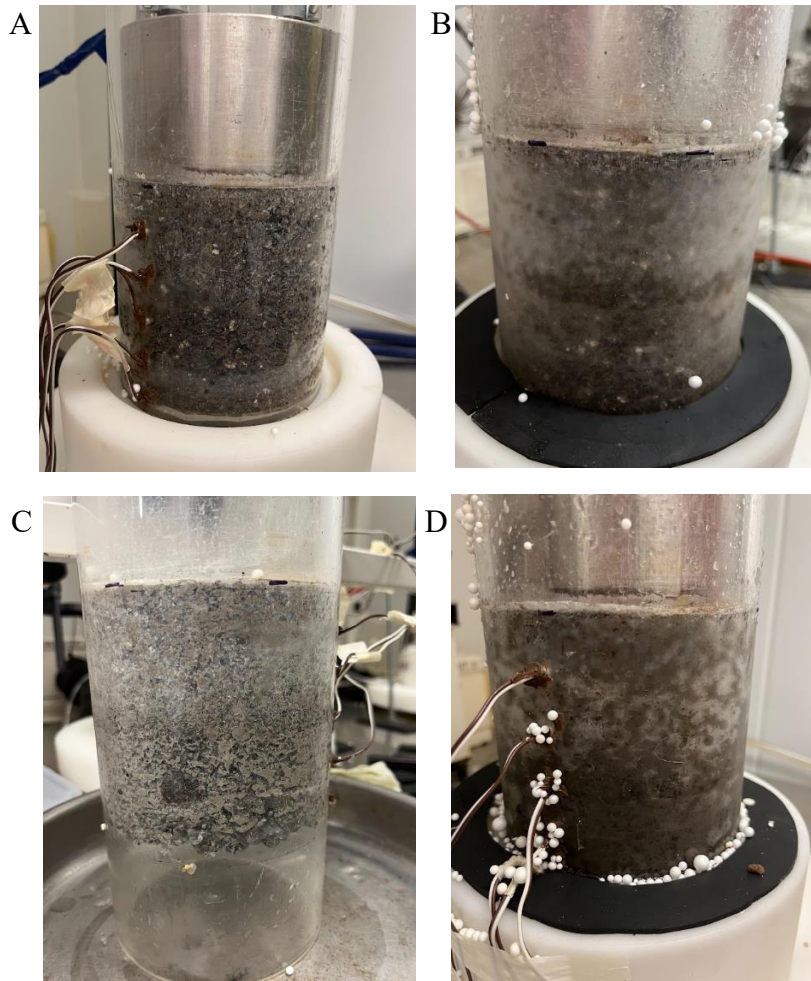


Kuva 23. Masuunikuona ja EAF-kuona tiivistettynä routalaitteistoon.



Kuva 24. Routalaitteisto eristettynä ennen kokeen aloitusta.

Routanousukokeesta saadaan kuusi erilaista kuvaajaa, joista kolme ovat suoraa antureiden antamaa dataa routanoususta, syöttö- ja jäädytyslämpötiloista sekä näytteen lämpötiloista. Tuloksista lasketaan routanoususuhde, roudan syvyys sekä segregatiopotentiaali. Kuvassa 25 on esitetty näytteet kokeen jälkeen. Näyte A on EAF-kuona 1, B on EAF-kuonan 2, C on masuunikuona ja D kalliomurske.



Kuva 25. Tutkittavat materiaalit routanousukokeen jälkeen. Näytteet A ja B ovat EAF-kuonaa, C masuunikuonaa ja D kalliomurskettä.

6 TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä osiossa tulokset esitetään taulukoiden ja erilaisten kuvaajien avulla. Kapillaarisuudesta, vedenläpäisevyydestä ja kiintotiheydestä ilmoitetaan materiaalien tuloksien vaihteluväli ja keskiarvo. Tutkittavien materiaalien tulosten vertailun lisäksi saatuja arvoja verrataan osiossa 1, 2 ja 5 esitettyihin kuonien ja luonnon kiviaineisten kirjallisuudesta löytyviin arvoihin. Tulosten analysoinnissa arvioidaan myös tuloksien luotettavuutta.

6.1 Kemiallinen analyysi

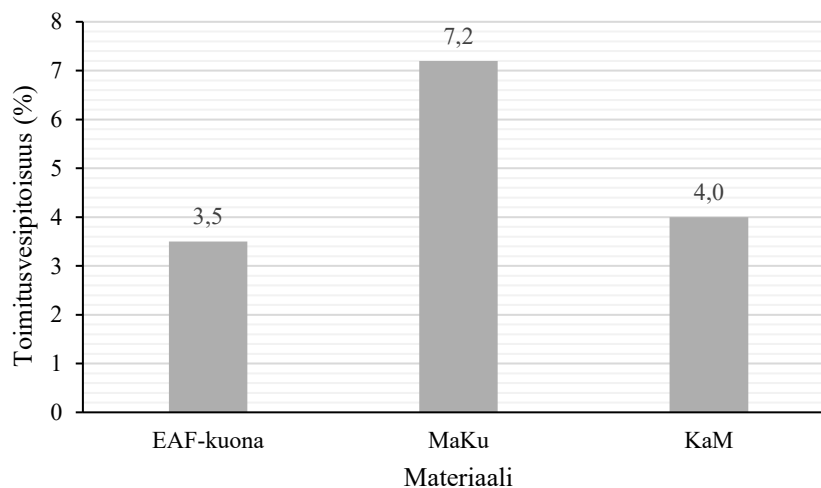
Taulukossa 14 on esitetty EAF-kuonanäytteen kemiallinen koostumus. EAF-kuonan kalsiumoksidipitoisuus, 23,7 m-% on DRI-pohjaisen kuonalle tyypillisen matala ja LD-teräskuonaa alhaisempi (30–55 m-%). Piidioksidin (17,1 m-%), alumiinioksidin (10 m-%) ja magnesiumoksidin (8,4 m-%) pitoisuudet sijoittuvat taulukossa 6 esitettyjen EAF-kuonalle kirjallisuudesta löytyvien arvojen vaihteluväleihin. Näistä piidioksidin ja magnesiumoksidin pitoisuudet sijoittuvat myös taulukossa 4 esitettyjen konvertterikuonan arvojen vaihteluväleihin, mutta alumiinioksidin pitoisuus on konvertterikuonan vaihteluväliä alhaisempi (1–6 m-%). Lisäksi EAF-kuonanäytteellä on korkea rautaoksidipitoisuus (27,4 m-%), joka viittaa korkeaan kiintotiheyteen. Kuonan kromipitoisuus, 0,062 m-% on alhainen verrattuna taulukossa 6 esitettyyn EAF-kuonien kromipitoisuuden vaihteluväliin.

Taulukko 14. EAF-kuonanäytteen kemiallinen koostumus

Alkuaine/Yhdiste	Määrä (m-%)
CaO	23,7
SiO ₂	17,1
Al ₂ O ₃	10
MgO	8,4
FeO	27,4
S	0,23
P	0,14
Cr	0,062

6.2 Toimitusvesipitoisuus

Toimitusvesipitoisuudet on esitetty kuvassa 26. EAF-kuonalle toimitusvesipitoisuudeksi saatiin 3,5 %, masuunikuonalle 7,2 % ja kalliomurskeelle 4,0 %. Kalliomurskeen kohdalla toimitusvesipitoisuus raekoolla 0/16 mm on luultavasti saatua tulosta hieman suurempi, koska näyte, joka tutkittiin, sisälsi tätä suurempia rakeita.



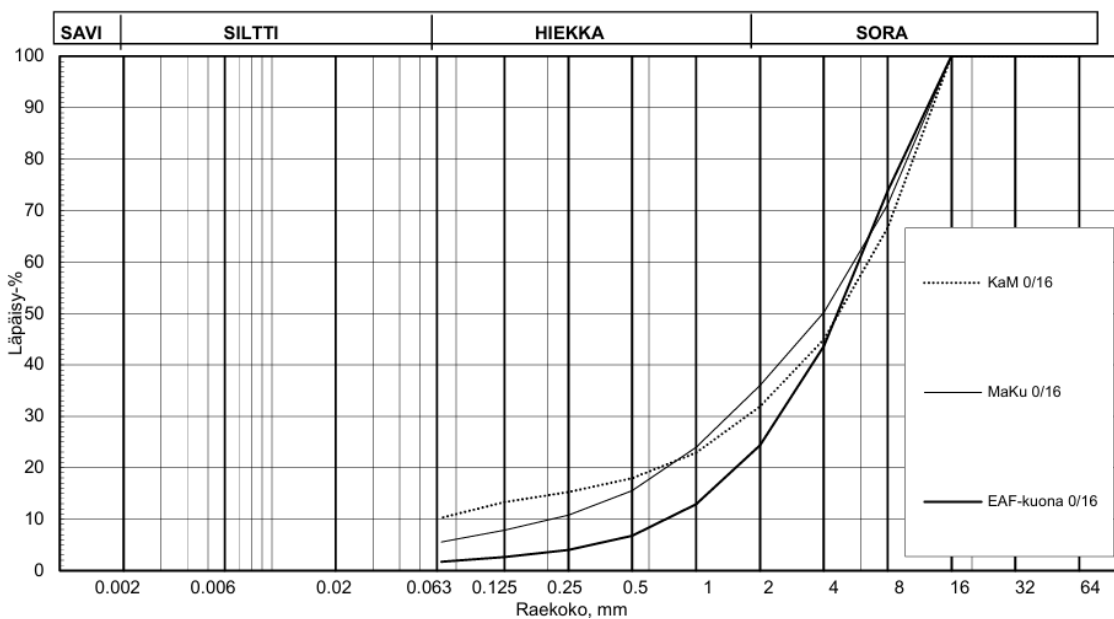
Kuva 26. Tutkittavien materiaalien toimitusvesipitoisuudet vaihtelivat näytteissä 3,5 ja 7,2 % välillä.

6.3 Rakeisuus

Materiaalit ovat rakeisuudeltaan suhteellisen lähellä toisiaan (kuva 27). Taulukossa 15 on esitetty rakeisuuden tunnuslukuja. Taulukosta huomataan, että tutkituista materiaaleista EAF-kuonalla on selvästi alhaisin hienoainepitoisuus (1,7 %) ja kalliomurskeella suurin (10,3 %). Vastaavasti taas hiekkalajitteen määrä vaihteli materiaaleilla 21,7–30,5 % ja soralajitteen 64–75,6 % välillä. Geoteknisen maalajiluokituksen mukaan EAF-kuona vastaa soraa, kun taas masuunikuona luokiteltaisiin hiekkaiseksi soramoreeniksi ja kalliomurske soramoreeniksi. Raekokosuhteeltaan ($C_u=d_{60}/d_{10}$) EAF-kuona on sekarakeinen, masuunikuonan ja kalliomurskeen ollessa suhteistuneita. Kalliomurskeen rakeisuutta on korjattu poistamalla tuloksista yli 16 mm olevat rakeet, joiden määrä painoprosenttina oli 4 %. EAF-kuona ja masuunikuona eivät ole rakeisuuskäyrien mukaan routivia mutta kalliomurske on.

Taulukko 15. Rakeisuuden tunnusluureita.

Parametri	EAF-kuona	MaKu	KaM
<0,063 mm, % (hienoaines)	1,7	5,5	10,3
0,063–2,0 mm, % (hiekkalajite)	22,7	30,5	21,7
2,0–60 mm, % (soralajite)	75,6	64,0	68,1
d ₁₀ , mm	0,75	0,2	0,06
d ₅₀ , mm	4,6	4,0	4,6
d ₆₀ , mm	6	5,8	6,9



Kuva 27. Tutkittavien näytteiden rakeisuuskäyrät.

6.4 Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus

Materiaalien maksimikuivatilavuuspainot vaihtelivat 19,57–23,93 kN/m³ ja optimivesipitoisuudet 6–12,4 % välillä. Masuunikuonalle saatiin pienin kuivatilavuuspaino ja suurin optimivesipitoisuus, mikä oli odotettavaa huokoisen rakenteen vuoksi. EAF-kuonan optimivesipitoisuus asettui masuunikuonan ja kalliomurskeen (8 %) väliin tilavuuspainon ollessa suurin (23,93 kN/m³). EAF-kuonan maksimikuivatilavuuspaino on myös suuri verrattuna taulukossa 9 esitettyihin luonnonkiviainesten maksimikuivatilavuuspainoihin. Optimivesipitoisuudet poikkeavat molemmilla kuonilla n. 5,2–5,5 prosenttiyksikön verran toimitusvesipitoisuudesta. Kalliomurskeella ero on 2 %. Taulukossa 16 on esitetty materiaalien

maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet. Liitteessä 1 on esitetty Proctor-kokeiden yksityiskohtaisemmat tulokset, joista ilmenee näytteiden tilavuuspainot, kuivatilavuuspainot ja kuivairtoteiheydet eri vesipitoisuuksilla sekä kuvaajat, joista maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuuden arvot on määritetty.

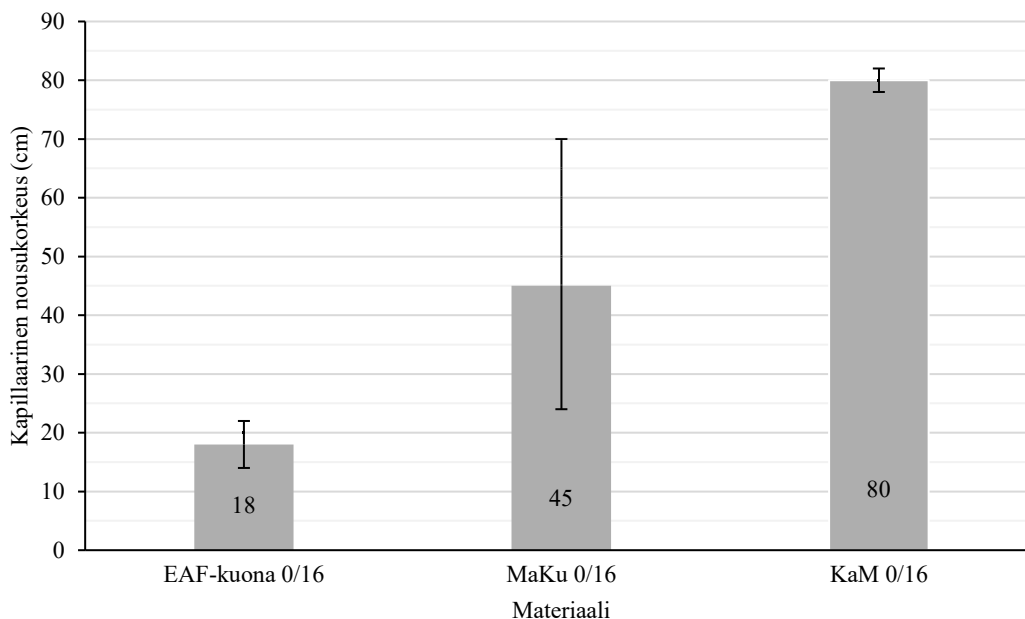
Taulukko 16. Tutkittavien näytteiden maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet.

	EAF-kuona	MaKu	KaM
Maksimikuivatilavuuspaino γ_{dmax} (kN/m ³)	23,93	19,57	22,61
Optimivesipitoisuus (%)	8	12,4	6

6.5 Kapillaarinen nousukorkeus

Näytteiden keskimääräiset kapillaariset nousukorkeudet sekä niiden vaihteluvälit on esitetty kuvassa 28. EAF-kuonalla kapillaarinen nousukorkeus vaihteli 14–22 cm välillä ja kalliomurskeella 78–82 cm välillä. Masuunikuonan kohdalla vaihteluväli oli 46 cm, jonka vuoksi varsinainen koe päätettiin toistaa neljä kertaa yksittäisen poikkeamien eliminoimiseksi. Tuloksiksi saatiin 24, 61, 25 ja 70 cm. Suurin kapillaarisiin nousukorkeuksiin johtaneissa kokeissa oli kuitenkin huomattavissa pienen kuplan muodostusta alipaineen ollessa 25–30 cm kapillaarisen nousukorkeutena ilmoitettuna. Vaihteleviin tuloksiin osasyynä luultavasti oli hienoaineksen määrän vaihtelu ja näytteen alla käytetyn suodatinpaperin tukkeutuminen.

Vaikka saatuja kapillaarisuuden arvoja ei voida pitää luotettavina, tulokset antavat suuntaa antavaa tietoa. Rakeisuudesta saadut hienoainespitoisuudet viittaavat siihen, että EAF-kuonalla on pienin ja kalliomurskeella suurin kapillaarisuus. Lisäksi kapillaarisen nousukorkeuden perusteella EAF-kuona ei ole routivaa ($h_c < 100$ cm).



Kuva 28. Näytteiden kapillaarisen nousukorkeuden keskiarvot ja vaihteluvälit.

6.6 Leikkauskestävyyskulma

Rasialeikkauskokeen tulokset on esitetty taulukossa 17. Suurin leikkauskestävyyskulma saavutettiin ilmajähdytetyllä masuunikuonalla (56°) ja pienin EAF-kuonalla (49°). Tuloksien keskinäistä vertailua heikentää saavutetun tiiviysasteen vaihtelu. Kuonilla tavoitellusta tiiviysasteesta jääminen johtui luultavasti pienemmästä raekoosta kuin Proctor-kokeessa käytetystä, jolloin suuremmat murskaantuvat rakeet puuttuivat. Lisäksi kuonien murskaantuminen vaatii enemmän voimaa kuin kalliomurskeella. Lisäksi saadut arvot ovat suuria verrattuna taulukossa 2 esitettyihin masuunikuonan arvoihin sekä taulukossa 12 esitettyjen luonnonmateriaalien arvoihin. Kokeiden tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä 2.

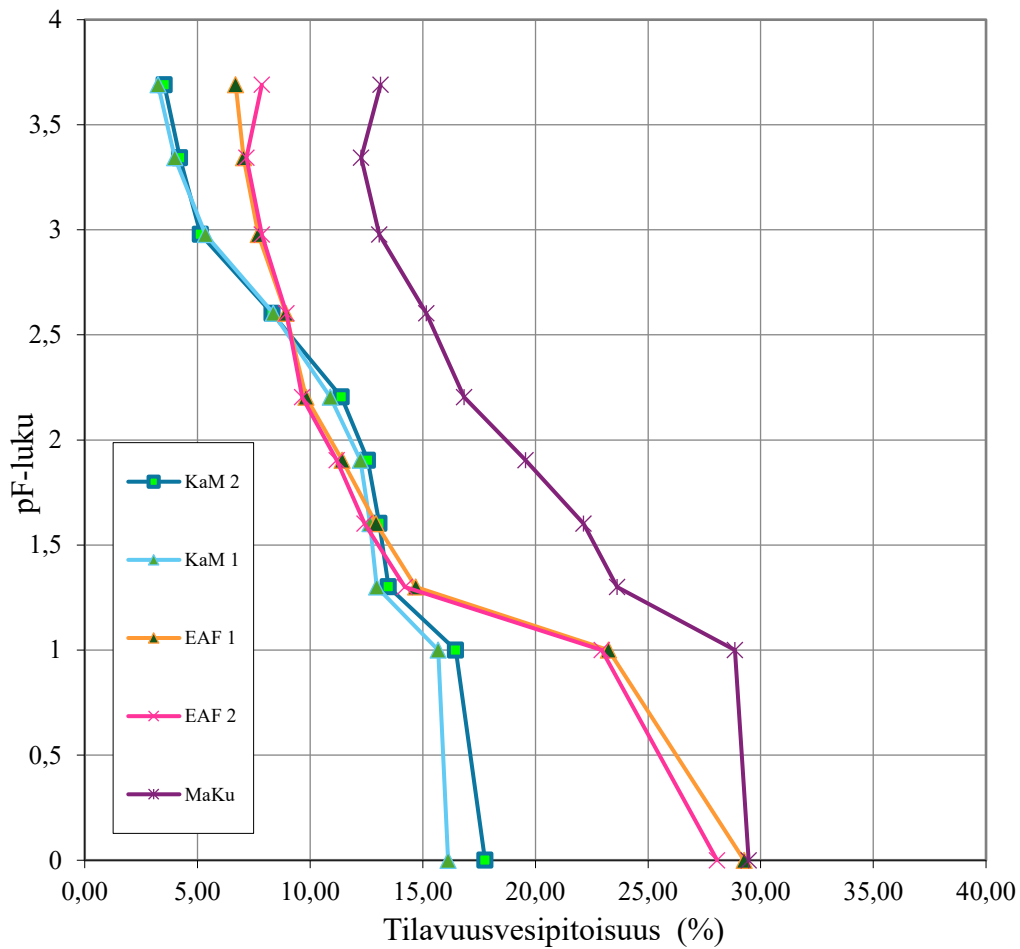
Tuloksissa poikkeuksellista on myös EAF-kuonan suurin koheesion arvo (14,3 kPa) ja kalliomurskeen pienin (7,4 kPa), sillä EAF-kuonalla on pienin hienoainespitoisuus ja kalliomurskeella suurin. EAF-kuonan suurempi koheesion arvo voi johtua sähköisesti varautuneista hiukkasista, jotka synnyttävät vetovoimia niiden välille, tai mahdollisista kemiallisista sidoksista.

Taulukko 17. Näytteiden rasialeikkauskoe tulokset.

Näyte	Tiivysaste (%)	Leikkauskestävyys- kulma φ (°)	Koheesio σ (kPa)
EAF-kuona 0/8	80,4–81,6	49	14,3
MaKu 0/8	85,1–88,1	56	13,3
KaM 0/8	92,7–93	51	7,4

6.7 Vedenpidätyskyky

Kuvassa 29 on esitetty näytteiden vedenpidätyskäyrät. Tuloksista huomataan, että EAF-kuonanäytteet luovuttivat eniten vettä kokeen aikana tilavuusvesipitoisuuden muutoksen ollessa 20,9 % ja 22,6 %. Masuunikuonalla muutos oli 17,2 % ja kalliomurskeella 12,8 % ja 14,3 %. EAF-kuonan veden luovutus alkoi jo ensimmäisellä paineportaalla (0,01 bar). Suurin muutos tilavuusvesipitoisuudessa tapahtui kuitenkin jokaisella näytteellä 0,02 bar paineportaalla pF-luvun ollessa 1,30. Tällöin voidaan olettaa, että vesi on poistunut suurimmista huokosista. Viimeisellä paineportaalla osassa näytteistä havaittu tilavuusvesipitoisuuden kasvu selittyy lyhyemmällä mittausaikavälillä verrattuna edelliseen paineportaaseen. Rinnakkaisnäytteiden välillä ei ole juurikaan eroja, vaan ne käyttäytyvät hyvin samantapaisesti molemmilla materiaaleilla.



Kuva 29. Näytteiden vedenpidätyskäyrät.

Tilavuusvesipitoisuus kuvastaa myös materiaalin huokoisuutta, jolloin kuvaajasta voidaan päätellä masuunikuonan olevan huokoisinta. Tarkkaa huokoisuuden arvoa ei voida kuitenkaan päätellä, sillä kaikki huokokset eivät todennäköisesti ole täyttyneet vedellä kokeen alussa. Taulukossa 18 on esitetty saavutetut tiiviysasteet ja pF-käyrältä saatavia arvoja.

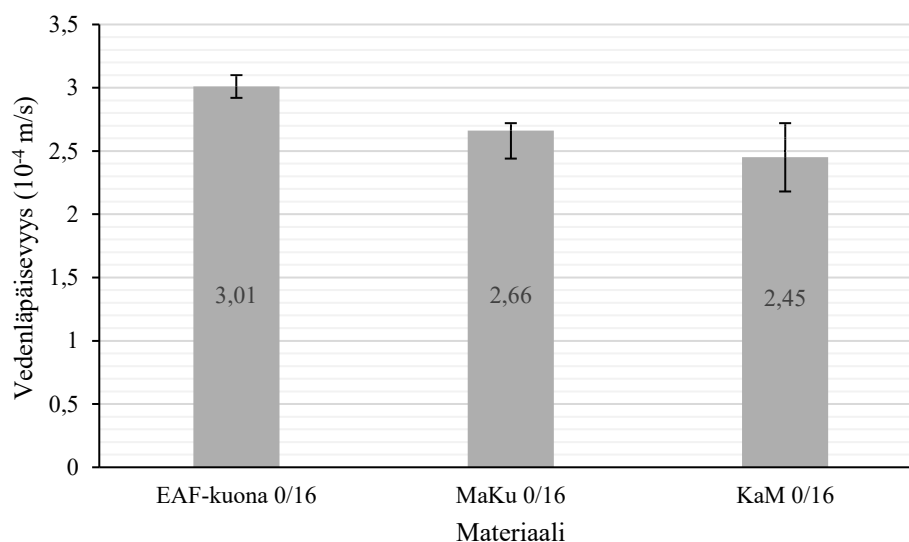
Taulukko 18. Näytteiden pF-kokeen tulokset.

Näyte	Tiivysaste (%)	Tilavuusvesipitoisuus täysin kyllästyneenä (%)	Tilavuusvesipitoisuuden muutos (%)	Jäännösvesipitoisuus (%)
EAF-kuona 1	91,6	29,3	22,6	6,7
EAF-kuona 2	91,7	28,1	20,9	7,2
MaKu	92,8	29,5	17,2	12,3
KaM 1	92	16,1	12,8	3,3
KaM 2	92	17,8	14,3	3,5

6.8 Vedenläpäisevyys

Kuvassa 30 on esitetty saadut vedenläpäisevyyden tulokset. EAF-kuonalla vedenläpäisevyys vaihteli $2,92\text{--}3,10 \cdot 10^{-4}$, masuunikuonalla $2,44\text{--}2,87 \cdot 10^{-4}$ ja kalliomurskeella $2,18\text{--}2,72 \cdot 10^{-4}$ m/s välillä. Tuloksien perusteella EAF-kuonan vedenläpäisevyys on suurin ($3,01 \cdot 10^{-4}$ m/s), ja kalliomurskeella pienin ($2,45 \cdot 10^{-4}$ m/s), mutta saadut tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Tuloksista voidaan päätellä hienoainespitoisuuden olevan yhteydessä materiaalin hydraulisiin ominaisuuksiin. Saadut arvot vastaavat myös luonnon soran vedenläpäisevyyttä.

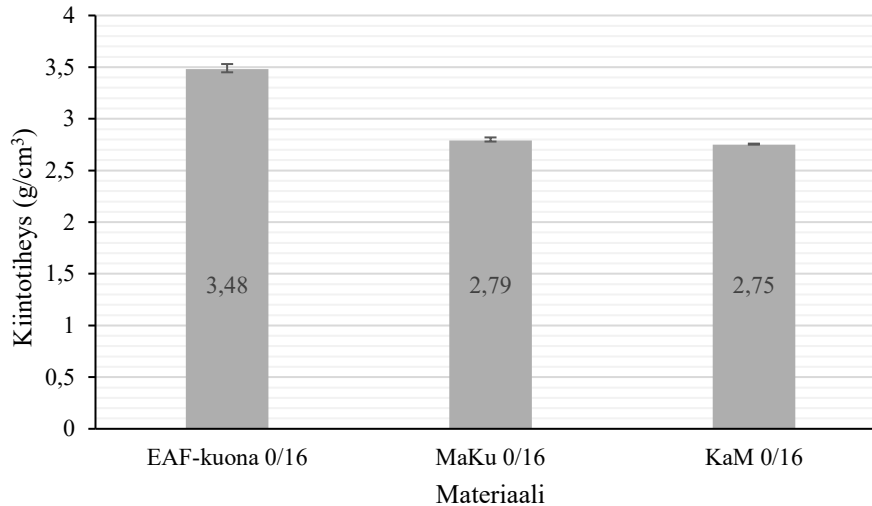
Tuloksissa on kuitenkin syytä ottaa huomioon saavutettu tiivysaste. Kalliomurskeella tiivysaste oli molemmissa näytteissä 92 %, kun taas kuonilla se vaihteli 90–92 % välillä. Lisäksi kalliomurskeella oli ensimmäisessä kokeessa havaittavissa hienoaineksen kulkeutumista veden mukana ulos, joka mahdollisesti alensi vedenläpäisevyyden arvoa.



Kuva 30. Näytteiden vedenläpäisevyyden keskiarvot ja vaihteluvälit.

6.9 Kiintotiheys

Kuvassa 31 on esitetty materiaaleiden kiintotiheyden keskiarvot ja vaihteluvälit. EAF-kuonalla kiintotiheyden arvo vaihteli välillä 3,45–3,53 g/cm³, masuunikuonalla 2,78–2,82 g/cm³ ja kalliomurskeella 2,75–2,76 g/cm³. EAF-kuonalla on teräskuonien tapaan korkea kiintotiheyden arvo johtuen korkeasta rautaoksidipitoisuudesta. Jokaisen materiaalin koetulosten vaihteluvälit ovat pieniä. Masuunikuonan arvo on hieman suurempi kuin taulukossa 2 esitetty kiintotiheyden vaihteluväli.



Kuva 31. Näytteiden kiintotiheyden keskiarvot ja vaihteluvälit.

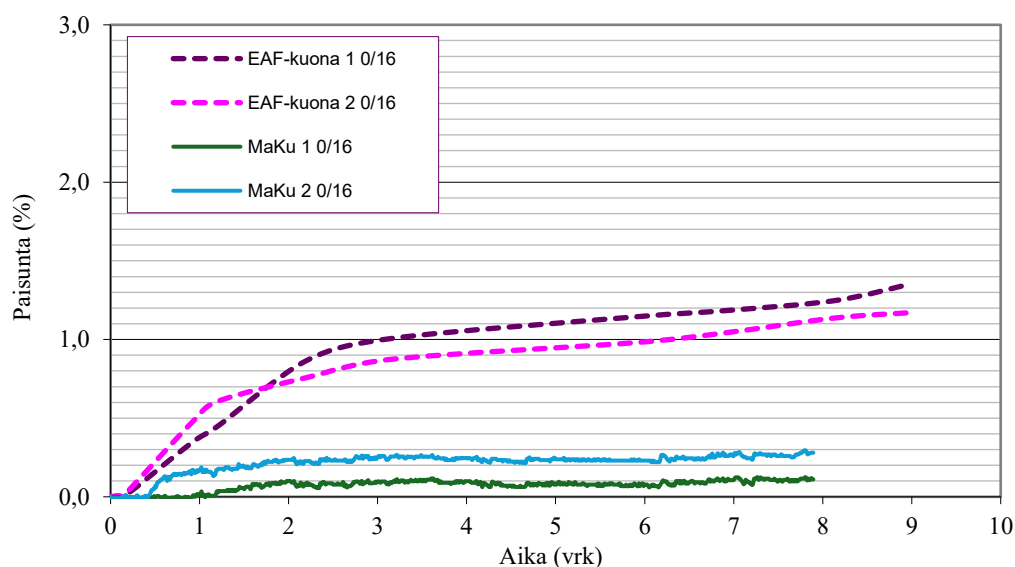
6.10 Paisunta

Taulukossa 19 ja kuvassa 32 on esitetty paisumakokeiden tulokset. Tavoiteltua tiivistysastetta ei saavutettu millään näytteellä. MaKu 2 näytteellä suurempi poikkeama tiivistysasteesta johtuu todennäköisesti siitä, että näytteestä ei saatu tarpeeksi kattavaa. Tämä myös näkyi paisuntakokeen tuloksissa, jossa kyseinen kuona on paisunut enemmän. EAF-kuonanäytteet paisuivat 1,35 % ja 1,17 % ja masuunikuonanäytteet 0,11 % ja 0,28 %. EAF-kuonanäytteillä on huomattavissa alkupaisuma noin 1–2 vuorokauden sisällä, jonka jälkeen paisunta tasaantuu.

Saadut tulokset tukevat kappaleessa 3.1 esitettyjä tutkimuksia, joissa suurin piirtein samalla CaO-pitoisuudella paisumatulokset ovat olleet alle 2,5 %. EAF-kuonanäytettä voidaan pitää standardin SFS-EN 13242 mukaisesti tilavuuden suhteen stabiilina paisumisen ollessa alle 5 %. Tuloksia arvioitaessa on kuitenkin huomioitava, että EAF-kuona on säilytetty ulkona kasassa yli vuoden ennen kokeen tekoa, minkä seurauksena suurin osa vapaasta kalkista on ehtinyt hydratoitua. Tällöin suurin osa kuonan paisumisesta on jo tapahtunut varastoinnin aikana.

Taulukko 19. Näytteiden paisuntakokeen tulokset.

Näyte	Tilavuus (cm ³)	Tiiviysaste (%)	Paisumisaika (vrk)	Paisuma (%)
EAF-kuona 1	2094,1	91,3 %	9	1,35
EAF-kuona 2	2090,63	91,5 %	9	1,17
MaKu 1	2099,99	91,1 %	7,9	0,11
MaKu 2	2137,39	89,5 %	7,9	0,28



Kuva 32. EAF-kuonan ja masuunikuonan paisunta ajan suhteen.

6.11 Routivuus

Taulukkoon 20 on koottu routanousukokeiden tulokset. Tuloksista nähdään, että ainoastaan kalliomurskeella tapahtui routanousua (0,3 mm). Kaikkien näytteiden segregaatiopotentiaalit olivat kuitenkin 0 mm²/Kh. Tuloksissa on jälleen huomioitava erot tiiviysasteessa ja kuonilla huomattavasti tavoitellusta tiiviysasteesta jääminen. Tiiviimmässä materiaalissa kapillaarinen routanousu voi olla suurempaa ja löyhällä materiaalilla vesi voi jäättyä huokosiin ilman tilavuuden muutosta. Tulokset kuitenkin tukevat rakeisuuskäyrän perusteella (kuva 9) arvioitavaa routivuutta. Liitteessä 3 on esitetty routanousukokeiden tarkemmat tulokset

Taulukko 20. Näytteiden routakokeen tulokset.

Näyte	Tiivysaste (%)	Kuormitus (kPa)	Routanousu (mm)	Segregaatio-potentiaali (mm ² /Kh)
EAF-kuona 1	83,9	20	0	0
EAF-kuona 2	86	20	0	0
MaKu	85,9	20	0	0
KaM	92	20	0,3	0

6.12 Koostetaulukko koetuloksista

Taulukkoon 21 on koottu materiaaleille tehtyjen kokeiden tulokset. Kapillaarinen nousukorkeus, vedenläpäisevyys ja kiintotiheys on ilmoitettu tuloksien keskiarvona. Taulukosta puuttuu vedenpidätyskokeen tulokset, jotka näkyvät parhaiten kuvassa 29. Monien tuloksien pohjana on hienoainespitoisuuden määrä, joka EAF-kuonalla on selvästi alhaisin. Pieni hienoainespitoisuus näkyy erityisesti EAF-kuonan alhaisessa kapillaarisuudessa ja heikossa vedenpidätyskyvyssä. EAF-kuona on masuunikuonaan ja kalliomurskeeseen verrattuna painava materiaali, joka myös osittain näkyy Proctor-kokeessa saadusta maksimikuivatilavuuspainossa. Kuitenkin materiaalien leikkauskestävyyskulmat ja vedenläpäisevydet ovat hyvin samankaltaisia.

Taulukko 21. Materiaaleille suoritettujen kokeiden tulokset

Ominaisuus	EAF-kuona	MaKu	KaM
Toimitusvesipitoisuus (%)	3,5	7,2	4,0
Rakeisuudeltaan vastaava luonnonmateriaali	Sora	Hiekkainen soramoreeni	Soramoreeni
Hienoainespitoisuus (%)	1,7	5,5	10,3
Raekokosuhte (d ₆₀ /d ₁₀)	Tasarakainen	Suhteistunut	Suhteistunut
Maksimikuivatilavuuspaino (kN/m ³)	23,93	19,57	22,61
Optimivesipitoisuus (%)	8	12,4	6
Kapillaarinen nousukorkeus (cm)	18	45	80
Leikkauskestävyyskulma (°)	49	56	51
Vedenläpäisevyys (m/s)	3,01·10 ⁻⁴	2,66·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻⁴
Kiintotiheys (g/cm ³)	3,48	2,79	2,75
Paisunta (%)	1,17–1,35	0,11–0,28	-
Routanousu (mm)	0,0	0,0	0,3

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

EAF-kuonalle tehtyjen kokeiden tulokset olivat johdonmukaisia ja materiaalilla havaittiin teräskuonille tyypillisiä ominaisuuksia, kuten korkea kiintotiheys ja vaikea tiivistettävyys. EAF-kuonalla tehdyt rinnakkaisnäytteet käyttäytyivät keskenään hyvin samankaltaisesti, ja tulosten vaihteluvälit olivat pieniä. Kokeet osoittivat myös, että EAF-kuonalla on hyviä, tien sitomattomissa rakennekerroksissa tarvittavia ominaisuuksia, kuten korkea leikkauskestävyyskulma, hyvä vedenläpäisevyys, alhainen kapillaarisuus sekä routimattomuus. Kuitenkin kokeissa epävarmuutta aiheutti tiiviysasteesta jääminen ja toisaalta taas materiaalin pölyäminen ja murskaantuminen Proctor-kokeessa.

Masuunikuonaan ja kalliomurskeeseen verrattuna EAF-kuona osoitti samantapaisia ominaisuuksia vedenläpäisevyydeltään, leikkauslujuudeltaan sekä routimattomuudeltaan. EAF-kuona ja masuunikuona jäivät myös kokeissa samantapaisesti tavoitelluista tiiviysasteesta. Tierakenteissa tiiviysasteesta jääminen ei masuunikuonalla ole kuitenkaan havaittu heikentävän tierakenteen ominaisuuksia. EAF-kuona erottui muista tutkittavista materiaaleista korkean kiintotiheyden lisäksi heikolla vedenpidätyskyvyllä, korkealla maksimikuivatilavuuspainolla, pienellä hienoainespitoisuudella ja alhaisella kapillaarisuudella. Rakeisuudelta ja hydraulisilta ominaisuuksiltaan EAF-kuona muistuttaa luonnon soraa.

Tulosten perusteella EAF-kuona voisi teknisiltä ominaisuuksiltaan soveltua tien sitomattomiin kerroksiin. EAF-kuona on routimaton materiaali, jolla on alhainen hienoainespitoisuus ja kapillaarisuus sekä heikko vedenpidätyskyky. Nämä ominaisuudet vähentävät veden kertymistä rakenteeseen sekä routavaurioiden riskiä. Näiden tulosten perusteella EAF-kuona osoittautui myös tasalaatuiseksi, mikä on vaatimus kiviainekselle tien sitomattomiin rakennekerroksiin. Tuloksista voidaan kuitenkin huomioda EAF-kuonan korkea paino, joka voi rajoittaa sen käyttöä pehmeällä pohjamaalla. Lisäksi on huomioitava, että laboratoriokokeet eivät aina korreloi uusiomateriaaleilla todellisen käyttäytymisen kanssa samalla tavalla kuin luonnonmateriaaleilla.

Jotta EAF-kuonan soveltuvuudesta maarakentamiseen voidaan tehdä lisää johtopäätöksiä, tulee kuonasta selvittää lisäksi ainakin seuraavat ominaisuudet: paisunta

tuoreena, hienonemisherkkyys, kantavuusominaisuudet sekä jäätymis-sulamiskestävyys. Paisuntaominaisuuksien selvittäminen tuoreena auttaa varautumaan mahdollisiin varastointitarpeisiin ennen kuonan käyttöönottoa maarakentamisessa. Proctor-kokeessa havaittiin materiaalin hienontumista, jonka määrä vaikuttaa materiaalin kestävyYTEEN, tiivistettävyyteen sekä vedenläpäisevyyteen. Tämän vuoksi hienonemisherkkyuden selvittäminen on tarpeen. Kantavuusominaisuuksien tutkiminen auttaa taas vastaavasti selvittämään EAF-kuonan kestävyyttä liikenteen aiheuttamaa kuormitusta vastaan. Suomessa tierakenteissa on tärkeää, että käytettävät materiaalit kestävät jäätymis-sulamissyklejä, koska vaihteleva sää ja lämpötilan vaihtelut talvella voivat aiheuttaa materiaalien vaurioitumista ja lyhentää rakenteen käyttöikää.

Tuloksien varmistamiseksi ja laadunvaihtelun selvittämiseksi voidaan tässä työssä suoritettuja kokeita toistaa uudelleen. Erityisesti rasialeikkauskokeessa ja routanousukokeessa jäätiin tavoitellusta tiiviysasteesta, joka vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Mielenkiinnon kohteena on myös sähköjohtavuus Proctor-kokeessa ilmenneen sähköistymisen ja rasialeikkauskokeessa ilmenneen suuremman koheesion arvon vuoksi. Lisäksi tulevaisuudessa teräksen raaka-aineena käytetään vetypelkistetyn rautasienen rinnalla teräsromua, joten tällaisessa prosessissa syntyvän kuonan geoteknisten ominaisuuksien selvittäminen on tarpeen.

8 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli arvioida uuden H-DRI-pohjaisen EAF-kuonan soveltuvuutta maarakentamiseen. Soveltuvuutta arvioitiin suorittamalla EAF-kuonalle, ilmajähdytetylle masuunikuonalle sekä kalliomurskeelle geoteknisiä laboratorioskokeita ja vertaamalla saatuja tuloksia toisiinsa. Työssä perehdyttiin myös teräksen valmistuksessa syntyvien kuonien geoteknisiin ominaisuuksiin ja niiden käyttöön maarakentamisessa sekä EAF-kuonasta aiheesta tehtyihin tutkimuksiin.

Tällä hetkellä EAF-kuonalle tehdyt tutkimukset keskittyvät maailmanlaajuisesti romupohjaiseen EAF-kuonaan, jota hyödynnetään erityisesti tien sidotuissa kerroksissa. Masuunikuonan ja LD-teräskuonan käyttö on Suomessa vakiintunut maarakentamisessa ja niille on esitetty kantavaan, jakavaan ja suodatinkerrokseen omat vaatimukset. Näiden kuonien soveltuvuus tierakenteisiin perustuu suurilta osin hyviin eristys- ja kantavuusominaisuuksiin. Uuden uusiomateriaalin tekninen hyväksyntä perustuu suurelta osin eurooppalaiseen standardisointiin, Väyläviraston ohjeisiin ja InfraRYL julkaisuun.

Teräksen valmistuksen fossiilivapaamman tuotannon tukemiseksi on tärkeää löytää sivutuotteena muodostuvalle EAF-kuonalle jatkokäyttömahdollisuuksia. Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa tukee myös luonnon kiviainesten kestäväää käyttöä ja vähentää louhinnasta aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Suoritettujen kokeiden perusteella EAF-kuona voisi soveltua tien sitomattomiin rakennekerroksiin sen rakeisuuden, routimattomuuden, hydraulisten ominaisuuksien sekä leikkauskestävyyskulman puolesta. EAF-kuona vastasi rakeisuudeltaan luonnonmateriaaleista soraa ja sen vedenläpäisevyys oli keskiarvallisesti $3,01 \cdot 10^{-4}$ m/s, mikä oli samassa suuruusluokassa masuunikuonan ja kalliomurskeen tuloksien kanssa. Vedenläpäisevyyden arvo vastaa myös luonnonsorasta löytyviä arvoja. Leikkauskestävyyskulmaksi EAF-kuonalle saatiin 49° , joka on hieman suurempi kuin kirjallisuudesta löytyvät leikkauskestävyyskulman arvot kalliomurskeelle ja luonnonsoralle.

Tuloksien luotettavuutta heikentää kuitenkin vaihtelut tiiviysasteesta ja osassa kokeissa huomattava jääminen tavoitellusta tiiviysasteesta. Referenssimateriaaleista EAF-kuona erosi erityisesti korkean kiintotiheyden ($3,48 \text{ g/cm}^3$) ja maksimikuivatilavuuspainon ($23,93 \text{ kN/m}^3$), heikon vedenpidätyskyvyn sekä alhaisen hienoainespitoisuuden (1,7 %) ja kapillaarisen nousukorkeuden (18 cm) vuoksi.

Ennen laajempia johtopäätöksiä tulee EAF-kuonasta selvittää paisunta tuoreena, hienonemisherkyys, kantavuusominaisuudet sekä jäätymis-sulamiskestävyys. Tässä työssä tutkittavia kokeita voidaan myös toistaa tulosten varmistamiseksi. On myös huomioitava, että tulevaisuudessa teräksen raaka-aineena käytetään vetypelkistetyn rautasienen lisäksi myös teräsromua, jonka vuoksi tutkimuksia tulisi suorittaa myös H-DRI/romu pohjaiselle kuonalle. Lisäksi materiaalin ympäristövaikutukset on tutkittava erityisesti raskasmetallien liukoisuuden osalta.

LÄHDELUETTELO

Alves R., Ramos A., Castanheira-Pinto A., Rios S. & Fernández-Ruiz J., 2024. Steel Slag Sub-Ballast for Sustainable Railway Track Infrastructure. *Infrastructures*, 9 (7).

Cameron I., Sukhram M., Lefebvre K. & Davenport W., 2019. *Blast Furnace Ironmaking, Analysis, Control and Optimization*. Amsterdam: Elsevier, 802 s. ISBN: 978-0-12-814227-1

Ehrenberg A., 2024. The steelmaking transformation process and its consequences for slag utilization. *Steel research*, 96 (4), Artikkelin 2300234.

Eerola M., 2002. Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/arkisto/rakentajainkalenteri> [13.2.2025].

Emery J.J., 1980. *Pelletized lightweight slag aggregate*. Lontoo: National Slag Association.

EUROFER, 2022. Low-CO₂ emissions projects in the EU steel industry [verkkodokumentti]. Bryssel: The European Steel Association. Saatavissa: <https://www.eurofer.eu/issues/climate-and-energy/maps-of-key-low-carbon-steel-projects> [viitattu 29.1.2025].

Forsman J., Harju I., Dettenborn T. & Lahtinen P., 2022. Uusiomateriaalit tierakenteissa. Opas tierakenteiden suunnitteluun [verkkodokumentti]. Ramboll Finland Oy: Espoo. Saatavissa: <https://uusiomaarakentaminen.fi/aineisto/uusiomateriaalit-tierakenteissa-opas/> [viitattu 8.2.2025].

Forsman J., Dettenborn T., Suikkanen T., Harju I., Järkkä H., Kivimäki J., Teittinen T., Koivulahti M. & Lahtinen P., 2020. Uusiomateriaalit kaupunkien infrarakentamisessa - käsikirja [verkkodokumentti]. Helsinki: UUMA-ohjelma. Saatavissa: <https://uusiomaarakentaminen.fi/aineisto/uusiomateriaalit-kaupunkien-infrarakentamisessa-kasikirja/> [viitattu 10.2.2025].

Frías Rojas M. & Sánchez de Rojas M., 2004. Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds. *Cement and Concrete Research*, 34 (10), S. 1881-1888.

Hara H. & Nasu E., 2024. Hardening characteristics of granulated blast furnace slag with different degrees of saturation, *Construction and Building Materials*, 424 (artikkeli 135942).

Hentilä V., Slunga E., Palolahti A., 1994. Roudan vaikutusten mallintaminen. Tielaitoksen selvityksiä 8/1994. Helsinki: Tielaitos, 96 s, ISBN: 951-47-8741-2

InfraRYL, 2024a. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Päälly- ja pintarakenteet. InfraRYL 2024/2. Helsinki: Rakennustieto Oy.

InfraRYL, 2024b. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Maa-, pohja- ja kalliorakenteet. InfraRYL 2024/2. Helsinki: Rakennustieto Oy.

International Energy Agency, 2020. Iron and steel technology roadmap [verkkodokumentti]. Pariisi: International Energy Agency. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> [viitattu 29.3.2025].

Jacob L., 2023. Ladle Furnace Slag: Synthesis, Properties, and Applications. *ChemBioEngReview*, 11 (1), S. 60-78.

Jääskeläinen R., 2011. Geotekniikan perusteet. 5 painos. Helsinki: Tammertekniikka, 387 s. ISBN: 978-952-5491-50-0

Kehagia F., 2009. Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates. *Waste Management & Research*, 27 (3), S. 288–294.

Koivisto K., Forsman J &, Vaajasaari K., 2016. Uusiomateriaalien tuotteistamisohje maarakentamisessa [verkkodokumentti]. Helsinki: UUMA-ohjelma. Saatavissa: <https://uusimaarakentaminen.fi/aineisto/uusiomateriaalien-tuotteistamisohje-maarakentamiseen/> [viitattu 22.12.2024].

Lewis D., 1982. Properties and uses of iron and steel slag: Report no. 182-6. Yhdysvallat: National slag Association.

Liikennevirasto, 2018. Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: <https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto> [viitattu 8.2.2025].

Liikennevirasto, 2014. Uusiomateriaaliopas: Uusiomateriaalien käytön kehittäminen UUMA2-ohjelman väylähankkeilla (luonnos) [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: <https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto> [viitattu 22.12.2024].

Liikennevirasto, 2011. Kevennysrakenteiden suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 5/2010 [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: <https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto> [viitattu 13.2.2025].

Liu X., Gao P. & Han Y., 2021. Resource utilization of slag from desulphurization and slag skimming: A comprehensive recycling process of all components. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32 (3), S. 585–593.

Lonka H. & Loukola-Ruskeeniemi K., 2015. Kiviaines- ja luonnonkiviteollisuuden kehitysnäkymät. Työ- ja elinkeinoministeriönjulkaisu 54/2015. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö, 75 s. ISBN: 978-952-327-047-3

Löfman M., Tuisku J., Knuuti M., 2024. Kitkamaalajien lujuus- ja painumaominaisuudet -Väliraportti [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/190525> [viitattu 3.4.2025].

Maghool F., Arulrajah A., Suksiripattanapong C., Horpibulsuk S. & Mohajerani A. Geotechnical properties of steel slag aggregates: Shear strength and stiffness. *Soils and Foundations*, 59 (2019), S. 1591–1601.

Mahieux P-Y., Aubert J-E. & Escadeillas G., 2008. Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. *Construction and Building Materials*, 23 (2), S. 742-474.

Motz H. & Geiseler J., 2001. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*, 21 (3), S. 285–293.

Mäkikyrö M., 2001. Teräskuonaprojektin loppuraportti. Tekes-projekti. *Rautaruukki Steel*, 35 s.

Mäkikyrö M., 1996. LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. Tielaitoksen selvityksiä 46/1996. Oulu: Tielaitos, 41 s. ISBN: 951-726-253-1

Paasonen-Kivekäs M., Peltomaa R., Vakkilainen P. & Äijö H., 2016. Maan vesi- ja ravinnetalous: Ojitus, kastelu ja ympäristö. 2. täydennetty painos. Helsinki: Salaojayhdistys ry, 488 s. ISBN: 978-952-5345-34-6

Pasetto M. & Baldo N. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*, 181 (1), S. 938–948.

Rakennustieto, 2020. RT-kortisto: Masuunihiekka, LD-masuunihiekka-SSAB Europe Oy. [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20103195?page=2> [viitattu 8.1.2025].

Rakentamislaki 751/2023. Annettu Helsingissä 21.4.2023. Saatavilla: <https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2023/751#Pidm46111191016768>

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 1979. *Geotekniikka*. 8 painos. Espoo: Otakustantamo, 293 s. ISBN 951-672-257-1

RIL 261-2013. *Routasuojaus - rakennukset ja infrarakenteet*. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 257 s. ISBN: 978-951-758-547-7

Santamaria A., Faleschini F., Giacomello G., Brunelli K., Jose J-T., Pellegrino C. & Pasetto M., 2018. Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. *Journal of Cleaner Production*, 205 (2018), S. 599–609.

SFS-EN 932-1, 1997. *Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Näytteenottomenetelmät*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS: 14+14 s.

SFS-EN 13242+A1, 2008. *Maa- ja vesirakentamisessa ja tierakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS: 31+9 s.

SFS-EN 13285, 2018. *Sitomattomat kiviainesseokset. Tuotevaatimukset*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS: 24+3 s.

SFS-EN ISO 17892-4, 2016. Geotekninen tutkimus ja testaus. Maaperän laboratoriotestit. Osa 4: Rakeisuuskoee. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS: 39+7 s.

SFS-EN ISO 17892-10, 2018. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 10: Direct shear tests. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS: 23+6 s.

SFS-EN 13043, 2003. Kiviainekset teiden, lentokenttien ja muiden liikennöityjen alueiden asfalttimassoihin ja pintauksiin. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS: 25+15 s.

Shi C., 2004. Steel slag- Its Production, Processing, Characteristics and Cementitious Properties. Journal of Materials in Civil Engineering, 16 (3), S. 230–236.

Soveri U. & Kauranne L.K., 1976. Rakennusgeologia I. 5. muuttumaton painos. Espoo: Otakustantamo, 194 s. ISBN: 951–671–029–8.

Suomen Betoniyhdistys, 2025. Portlandklinkkeri [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen betoniyhdistys. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/portlandklinkkeri.html> [viitattu 31.3.2025].

Suomen ympäristökeskus, 2025. Maa-ainesten otto [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus (Syke). Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/fi/kestava-kierto-ja-biotalous/luonnonvarojen-ja-raaka-aineiden-kaytto/maa-ainesten-otto> [viitattu 19.2.2025].

Suomen geoteknillinen yhdistys, 1985. Geotekniset laboratorio-ohjeet: GLO-85. 1 Luokituskokeet. Helsinki: Rakentajain kustannus Oy, 107 s. ISBN 951-676-308-1

Suomen standardisoimisliitto, 2008. SFS-käsikirja 179–2. Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 2, Maan laboratorionkokeet. 1. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 216 s. ISBN: 978–952–5650–59–4

Suer P., Lindqvist J-E., Arm M., Frogner-Kockum P., 2009. Reproducing ten years of road ageing – Accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag. *Science of total environment*, 407 (18), S. 4975–5198.

Tie- ja vesirakennushallitus, 1970. Maanrakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita. Osa 2: Laboratoriotutkimukset [verkkodokumentti]. Helsinki: Tie- ja vesirakennushallitus. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/132000> [viitattu 15.2.2025].

Varis K., 2015. Routanousukokeen suorittaminen ja tulosten analysointi. Kandidaatintyö. Oulu: Oulun yliopisto.

Väylävirasto, 2022a. Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa. Väyläviraston ohjeita 20/2022 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: <https://vayla.fi/ymparisto/materiaalit-jatteet/uusiomateriaalien-teknisen-soveltuvuuden-arviointi> [viitattu 13.11.2024].

Väylävirasto, 2022b. Tien kiviainesten laadun tarkastaminen. Väyläviraston oppaita 4/2022 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: <https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto> [viitattu 9.2.2025].

Väylävirasto, 2019. Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteissa. Väyläviraston tutkimuksia 7/2019 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/168323> [viitattu 19.2.2025].

World Steel Association, 2021. Steel industry co-products [verkkodokumentti]. Bryssel: World Steel Association. Saatavissa: <https://worldsteel.org/publications/fact-sheets/> [viitattu 15.11.2024].

World Steel Association, 2017. Steel industry co-products [verkkodokumentti].
Saatavissa: <https://worldsteel.org/wider-sustainability/steel-industry-co-products/>
[viitattu 22.01.2025].

World Steel Association, 2010. Steel industry by-products. Project group report 2007–
2009. Bryssel: World Steel Association, 190 s. ISBN: 978–2–930069–61–6

Yildirim I. & Prezzi M., 2011. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of
Steel Slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011 (1), Artikkelin numero 463638.

LIITE 1: PROCTOR-KOKEEN TULOKSET

Taulukko 22. EAF-kuonan proctor-kokeen tulokset.

EAF-Kuona 0/16	1	2	3	4
Muotin tilavuus V (cm ³)	1001,90	1001,90	1001,90	1001,90
Tavoiteltu vesipitoisuus (%)	6,0	7,5	9	10,5
Muotin paino (g)	4345	4345	4345	4345
Kostea näyte + muotti (g)	6780,3	6816,3	6863,2	6837,3
Kostea näyte m _m (g)	2435,3	2471,3	2518,2	2492,3
Kuivatuksella määritetty vesipitoisuus w _k (%)	6,23	7,12	8,70	9,60
Laskennallinen näytteen massa kuivana m _k (g)	2292,5	2307,0	2316,7	2274,0
Tilavuuspaino γ (kN/m ³)	25,05	25,42	25,91	25,64
Kuivatilavuuspaino γ _d (kN/m ³)	23,58	23,73	23,83	23,40
Kuivairtoteiheys ρ _d (g/cm ³)	2,40	2,42	2,43	2,39

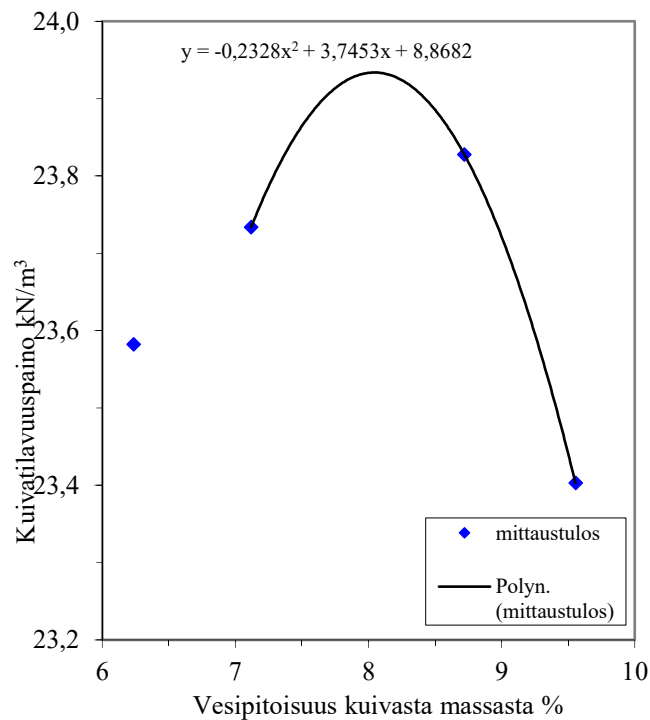
Taulukko 23. Masuunikuonan Proctor-kokeen tulokset.

MaKu 0/16	1	2	3	4	5
Muotin tilavuus V (cm ³)	1001,90	1001,90	1001,90	1001,90	1001,90
Tavoiteltu vesipitoisuus (%)	7,2	9	11	13	15
Muotin paino (g)	4345	4345	4345	4345	4345
Kostea näyte + muotti (g)	6320,7	6335,9	6399,4	6486,3	6500
Kostea näyte m _m (g)	1975,7	1990,9	2054,3	2141,3	2155
Kuivatuksella määritetty vesipitoisuus w _k (%)	7,13	8,56	10,9	12,5	14,49
Laskennallinen näytteen massa kuivana m _k (g)	1844,2	1833,9	1852,2	1902,7	1882,3
Tilavuuspaino γ (kN/m ³)	20,32	20,48	21,13	22,03	22,17
Kuivatilavuuspaino γ _d (kN/m ³)	18,97	18,87	19,05	19,57	19,36
Kuivairtoteiheys ρ _d (g/cm ³)	1,93	1,92	1,94	2,00	1,97

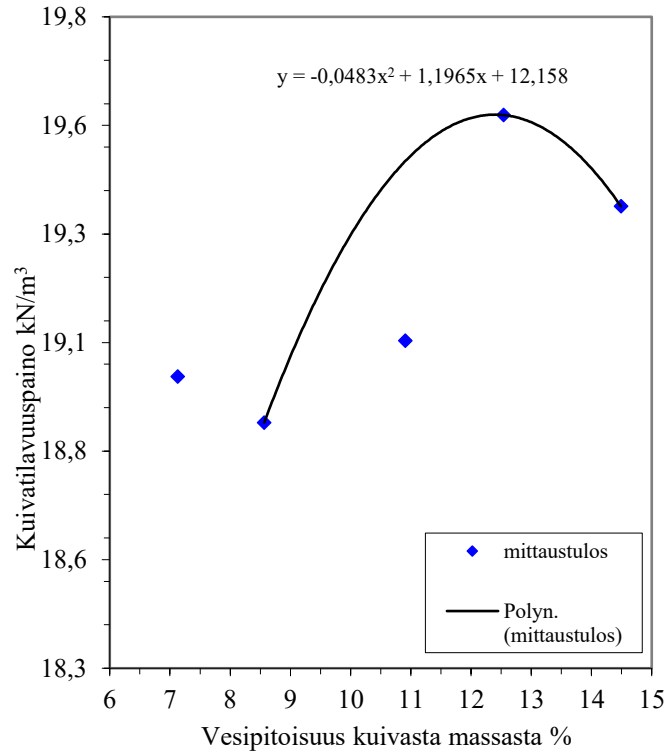
LIITE 1

Taulukko 24. Kalliomurskeen Proctor-kokeen tulokset.

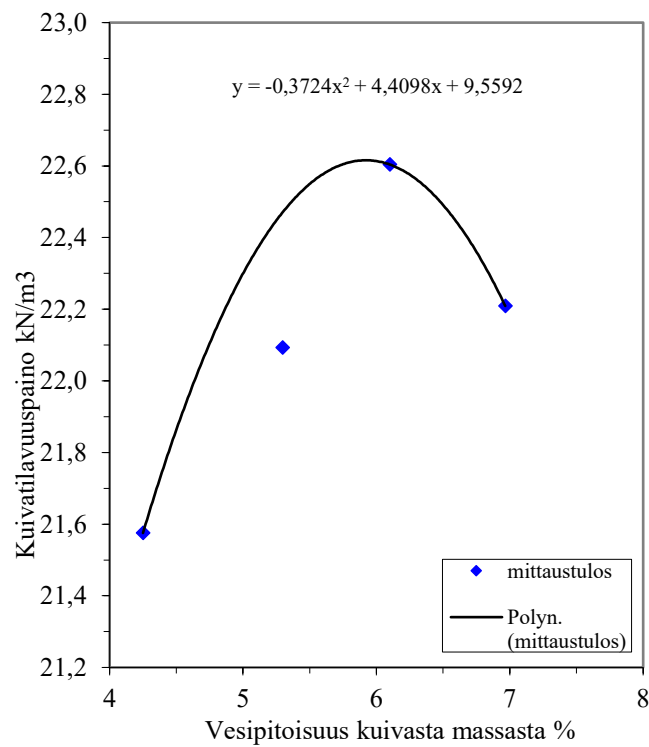
KaM 0/16	1	2	3	4
Muotin tilavuus V (cm ³)	953,60	953,60	953,60	953,60
Tavoiteltu vesipitoisuus (%)	4,0	5,5	7,0	8,5
Muotin paino (g)	5148	5148	5148	5148
Kostea näyte + muotti (g)	7334,1	7409	7479	7457
Kostea näyte m _m (g)	2186,4	2261,3	2331,3	2309,3
Kuivatuksella määritetty vesipitoisuus w _k (%)	4,25	5,30	6,10	7,00
Laskennallinen näytteen massa kuivana m _k (g)	2097,3	2147,5	2197,3	2158,2
Tilavuuspaino γ (kN/m ³)	22,49	23,26	23,98	23,76
Kuivatilavuuspaino γ _d (kN/m ³)	21,58	22,09	22,60	22,21
Kuivairtoteiheys ρ _d (g/cm ³)	2,20	2,25	2,30	2,26



Kuva 33. EAF-kuonan Proctor-kokeen tuloksista luotu kuvaaja maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden määrittämiseen.

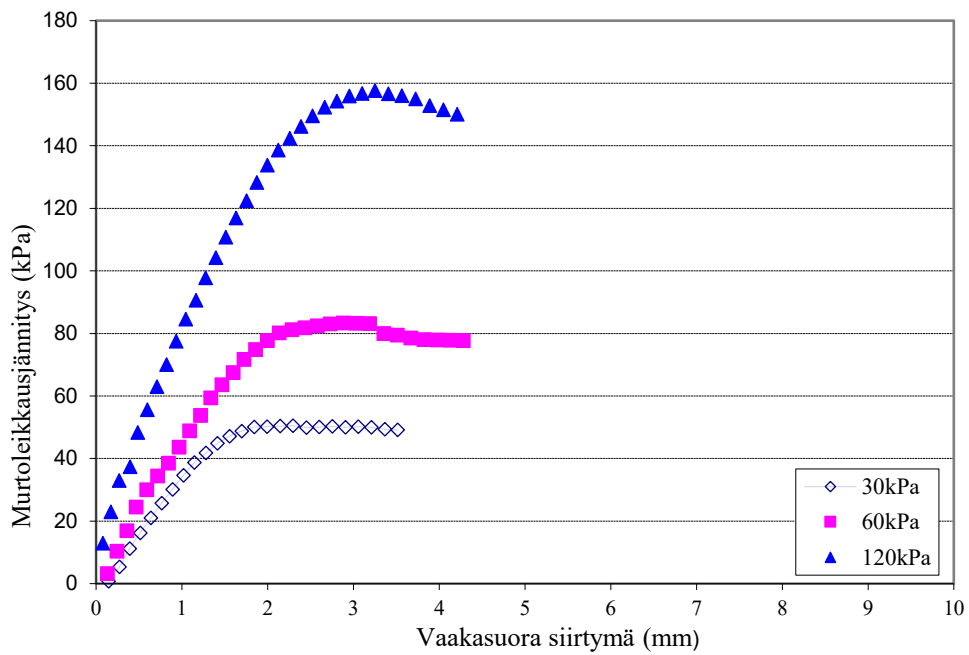


Kuva 34. Masuunikuonan Proctor-kokeen tuloksista luotu kuvaaja maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden määrittämiseen.

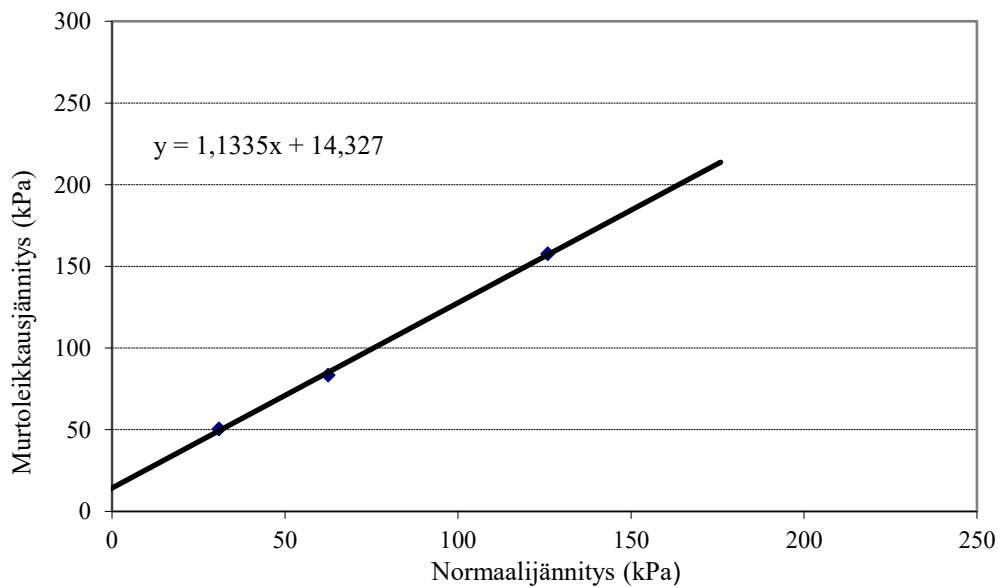


Kuva 35. Kalliomurskeen Proctor-kokeen tuloksista luotu kuvaaja maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden määrittämiseen.

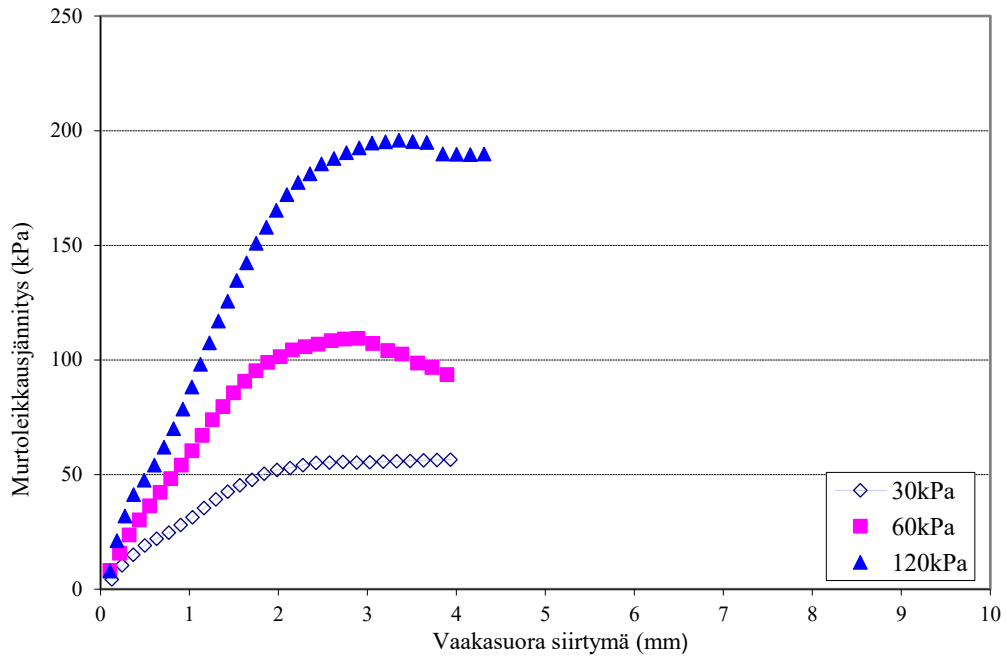
LIITE 2: RASIALEIKKAUSKOKEEN TULOKSET



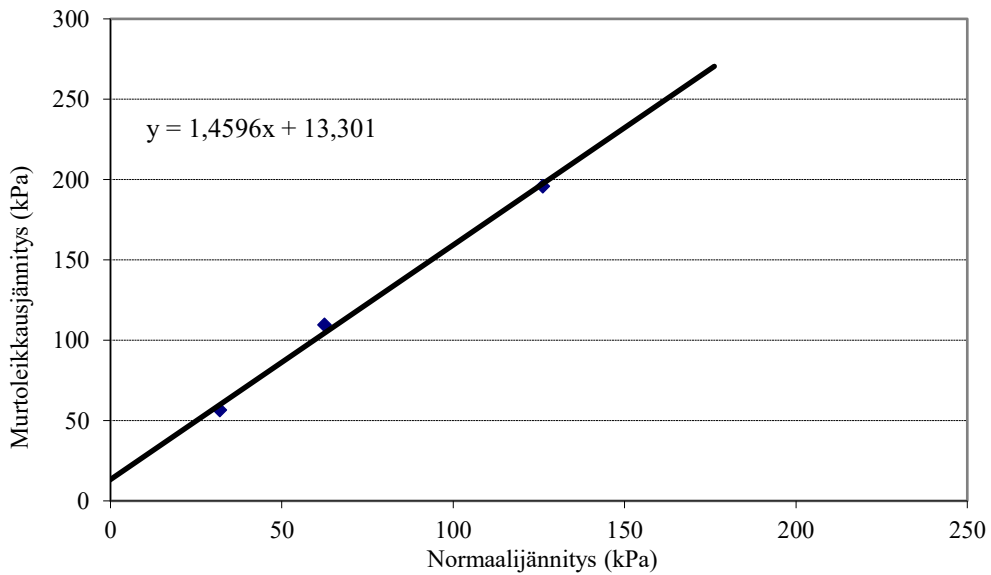
Kuva 36. Murtoleikkausjännityksen ja vaakasuoran siirtymän välinen yhteys eri pystykuormilla EAF-kuonalla.



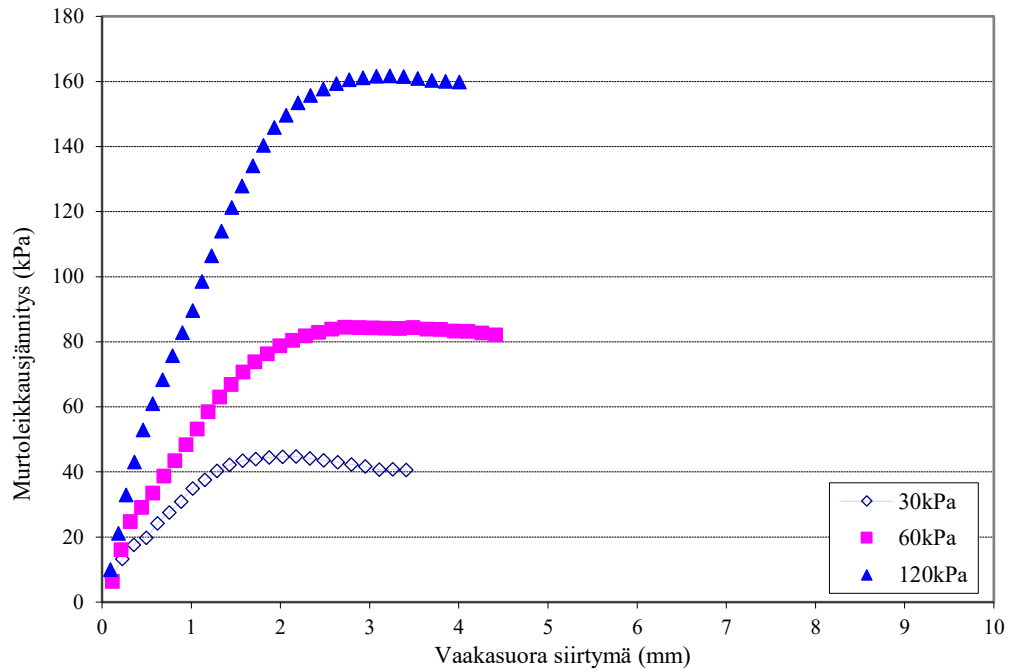
Kuva 37. EAF-kuonan murtoleikkausjännityksen ja normaalijännityksen välinen suhde.



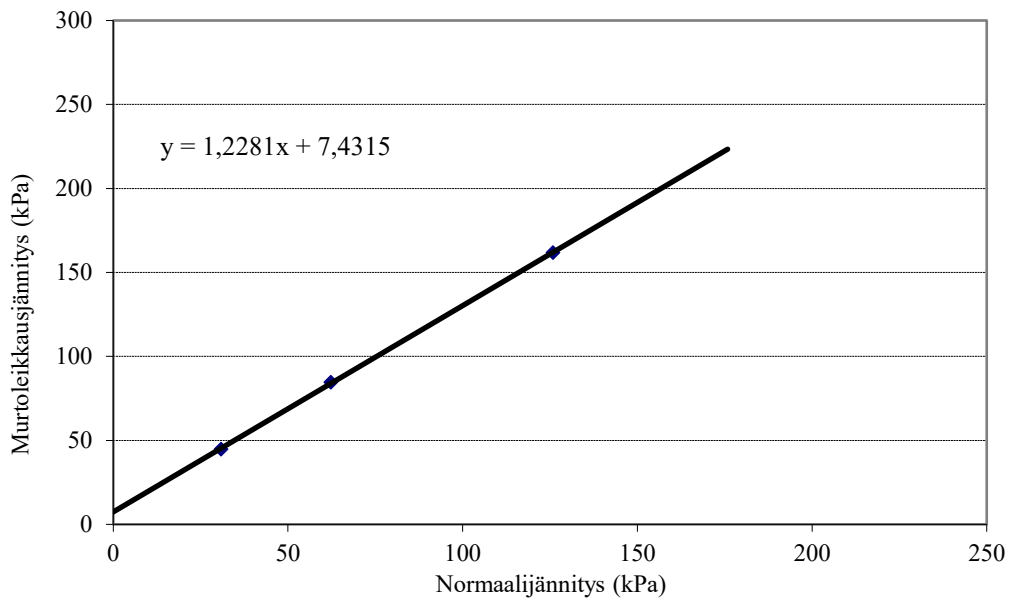
Kuva 38. Murtoleikkausjännityksen ja vaakasuoran siirtymän välinen yhteys eri pystykuormilla masuunikuonalla.



Kuva 39. Masuunikuonan murtoleikkausjännityksen ja normaalijännityksen välinen suhde.

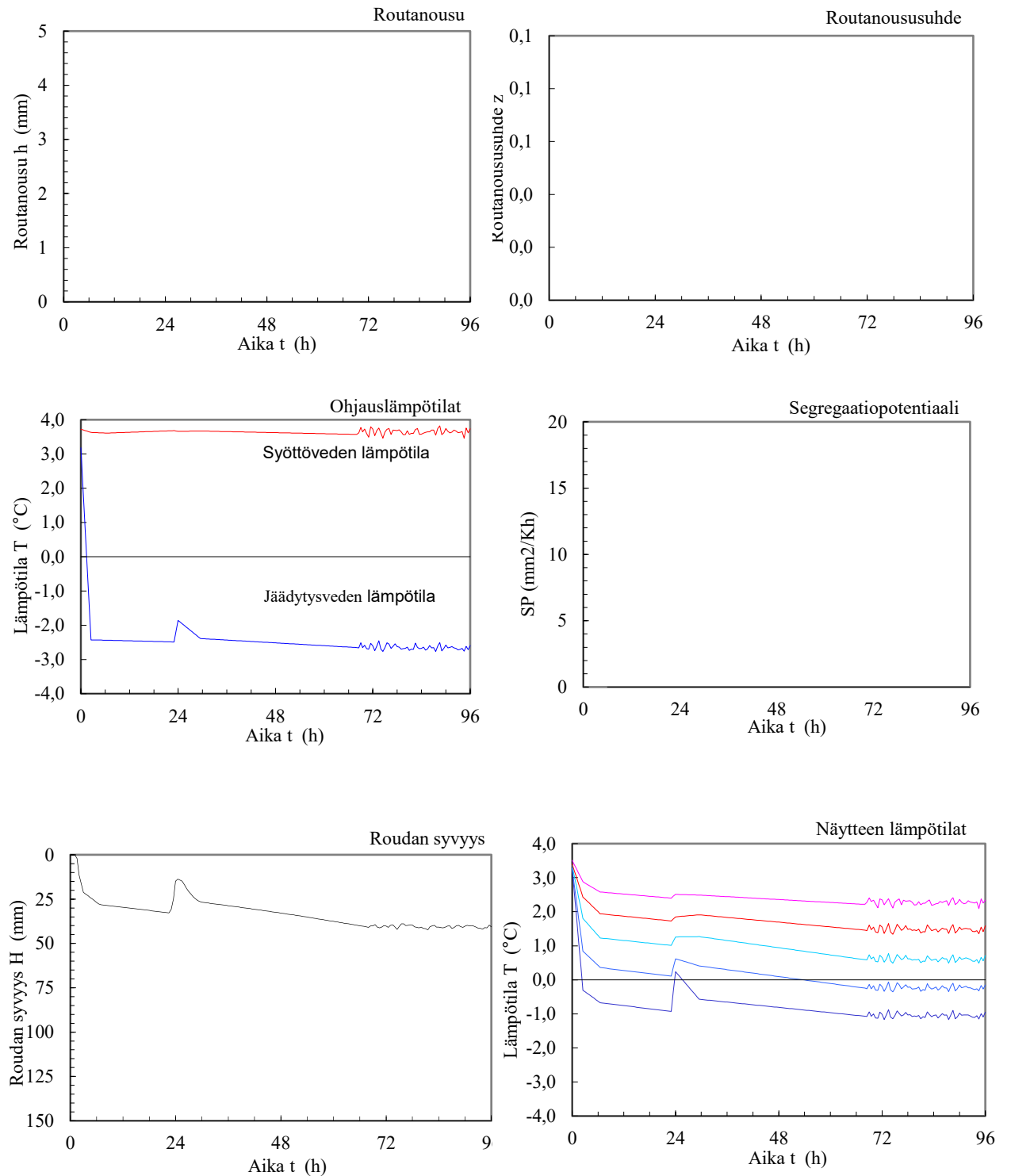


Kuva 40. Murtoleikkausjännityksen ja vaakasuoran siirtymän välinen yhteys eri pystykuormilla kalliomurskeella.

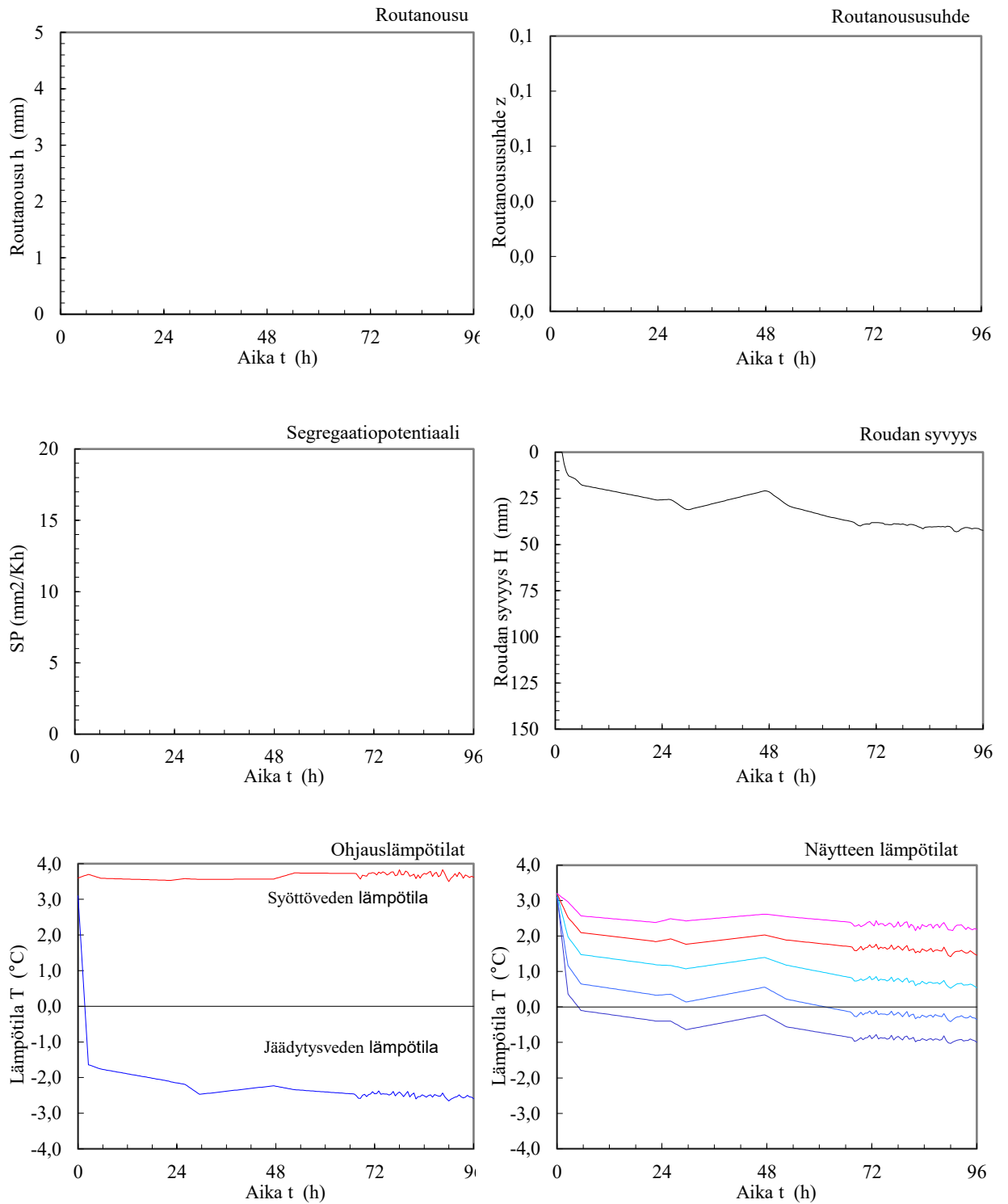


Kuva 41. Kalliomurskeen murtoleikkausjännityksen ja normaalijännityksen välinen suhde.

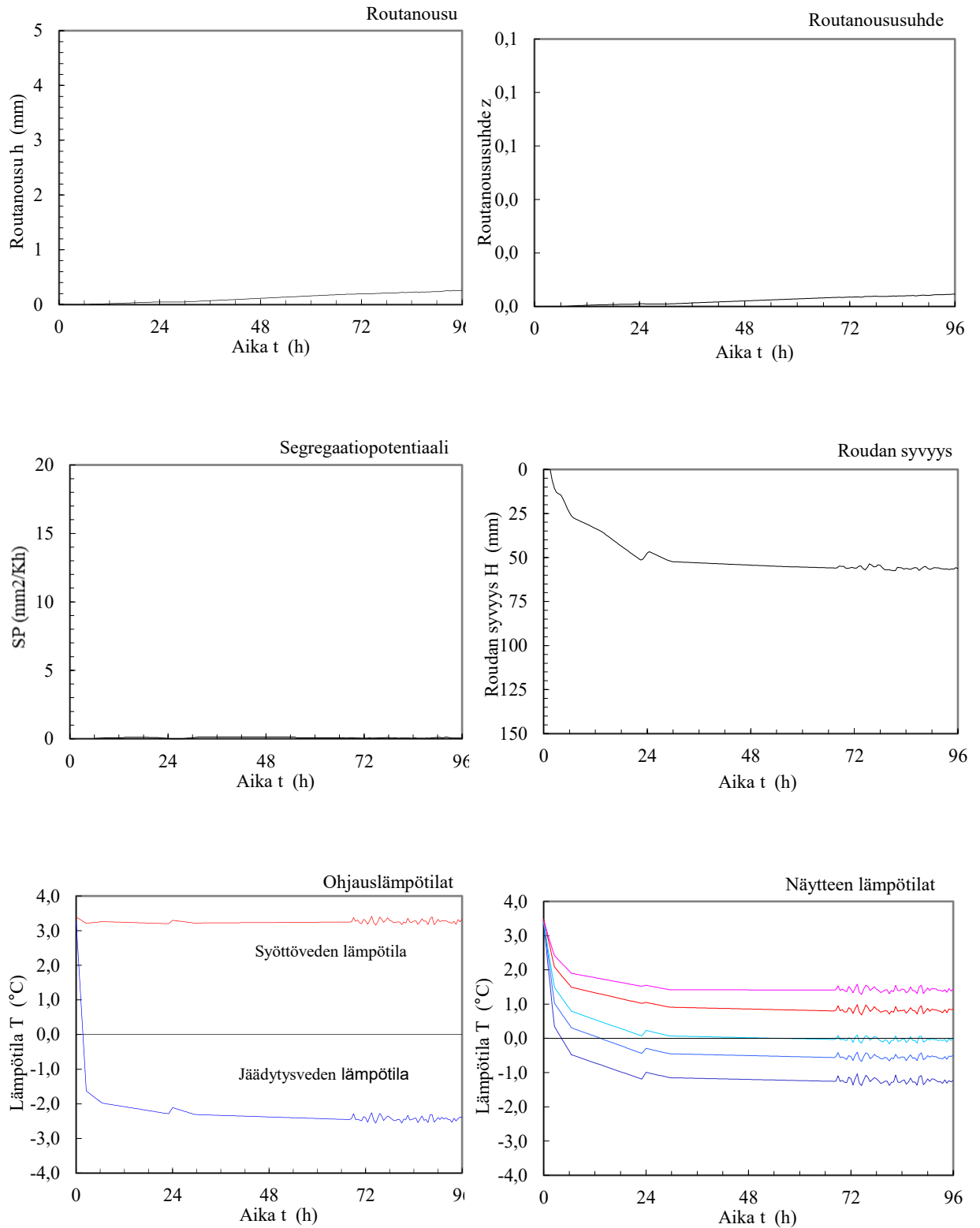
LIITE 3: ROUTANOUSUKOKEEN TULOKSET



Kuva 42. EAF-kuonanäytteen 2 routanousukokeen tulokset.



Kuva 43. Masuunikuonan routanousukokeen tulokset.



Kuva 44. Kalliomurskeen routanousukokeen tulokset.