



GEOSOLUTIONS

KAKSOISHARDPAN RIKASTUSHIEKKA-ALTAAN PEITERAKENTEENA: CASE PYHÄSALMI

Tiivistelmä GeoSolutions-projektissa tehdyistä peiterakennetutkimuksista

Minna Sarkkinen, Seppo Gehör ja Kauko Kujala



KAINUUN VOIMA OY



Juuan
Dolomiittikalkki Oy



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

GEOSOLUTIONS

KAKSOISHARDPAN RIKASTUSHIEKKA-ALTAAN
PEITERAKENTEENA: CASE PYHÄSALMI

Tiivistelmä

Rikastushiekka-altaalle tehty koerakenne ja tutkimukset liittyivät osin Pyhäsalmen kaivoksen ja rikastushiekka-altaan sulkemissuunnitelmiin. Tutkimuksen ja koerakenteen tavoitteena oli saada uutta tietoa sivuvirtapohjaisten sideaineratkaisujen toimivuudesta rikastushiekan stabiloinnissa ja kehittää rikastushiekka-altaiden peiteratkaisujen kestävyttä pitkällä aikavälillä.

Hankkeessa tutkittiin tavallisen portlandsementin vaihtoehtona alkali-aktivoitua sideainekomposiittia rikastushiekan stabiloinnissa. Tulosten perusteella sivuvirtapohjainen komposiittisideaine oli stabilointitehokkuudeltaan parempi kuin normaali sementti. Stabiloitu rikastushiekkakerros muodosti osan koerakenteena toteutettua kaksoiskovakuorirakennetta. Koerakenteen ympäristövaikutuksia ja kustannustehokkuutta verrattiin vaihtoehtoihin ratkaisuihin, jotka koostuivat moreenipeitteestä, biotuhkan ja teräskuonan yhdistelmästä ja pelkästä joko sementillä tai alkaliaktivoidulla komposiitilla stabiloidusta käsittelystä. Kokonaisarvion perusteella kaksoiskovakuorirakenne oli vaihtoehtoista paras erityisesti ympäristövaikutusten ja pitkäaikaiskestävyyden kannalta.

Projektin toteutus

GeoSolutions-projektin
päärahoittaja oli EAKR ja
osarahoittajia Tapojärvi
Oy, Juuan Dolomiittikalkki
Oy, Kainuun Voima Oy,
Solid Liner Oy ja Kajaanin
Romu Oy. Projektin
toteutettiin vuoden 2017-
2019 aikana. Toteutuksesta
vastasi Kajaanin
ammattikorkeakoulun
kone- ja kaivostekniikan
yksikkö. Projektin
ohjausryhmässä olivat
mukana rahoittajien lisäksi
ELY, Pyhäsalmi Mine Oy ja
Infrasuunnittelu Oy. Suuret
kiitokset kaikille projektiin
osallistuneille!

ISBN 978-952-7219-46-1,
B 94
B. Raportteja ja selvityksiä
ISSN 1458-915X

Kajaani
Kajaanin ammattikorkeakoulu
2019

Sisällys

Projektin toteutus.....	2
Tiivistelmä	2
Johdanto	4
Koekohteen kuvaus.....	6
Rikastushiekan stabilointi sideaineella.....	7
Materiaalit	9
Materiaalien karakterisointitutkimukset.....	10
Rikastushiekan karakterisointi.....	10
Sideainetutkimukset.....	12
Tiivistymisominaisuudet.....	12
Puristuslujuus	12
Stabiloitujen massojen vedenläpäisevyys	12
Stabiloitujen massojen rasitustestit	13
Diffuusio- ja liukoisuustestit	15
Peiterakennevaihtoehtojen vertailu.....	22
Rakennevaihtoehtojen elinkaariarviointi.....	24
Rakennevaihtoehtojen kustannusvertailu	25
Teknisten, taloudellisten ja ympäristövaikutusten arvioinnin yhdistäminen	27
Analyttinen hierarkinen prosessi (AHP)	27
Koerakenne.....	33
Koerakenteen toteutus	34
Loppuyhteenveto	40

Johdanto

Kestävän kehityksen periaatteiden huomioiminen pilaantuneiden maiden kunnostuksessa koskee lainsäätäjiä, vastuullisia omistajia, konsultteja, rakentajia ja teknologian tarjoajia¹. Kestävä kunnostaminen on monimutkainen ja -vaiheinen kysymys, joka sisältää kolme osatekijää: 1) kunnostuksen aiheuttamien sekundääristen ympäristövaikutusten huomioiminen (esim. kasvihuonepäästöt, ilman saastuminen, energian kulutus ja jätteiden tuottaminen), 2) Sidosryhmän vaatimukset taloudellisesti kestäväälle kunnostukselle sekä ekologisille käytännöille ja 3) kestäviä käytäntöjä (uusiutuva energia, ekologinen rakentaminen ja kierrätys) edistävät institutionaaliset vaatimukset (esim. sosiaaliset normit ja julkinen politiikka).

Kaivostoiminnan luonteeseen kuuluu luonnonvaroja hyödyntävä teollinen toiminta ja siitä aiheutuvien vaikutusten, kuten syntyneiden sivutuotteiden ja kaivosten sulkemisen, hallinta pitkällä aikavälillä². Rikastushiekka-altaat muodostavat potentiaalisen ympäristöriskin, joiden arvioinnin on todettu olevan osittain vielä kehitysvaiheessa^{3,4,5}. Metallien prosessoinnissa käytetyt kemikaalit voivat säilyä rikastushiekkoissa ja tehdä rikastushiekkoista haitallisia⁶. Kemikaalien sijasta haitallisempi vaikutus on yleensä itse rikastusjätteellä kuten sulfidimalmin rikastusjätteillä. Rikastushiekkojen varastoinnin on todettu esimerkiksi Kiinassa olevan joissakin tutkimuksissa sijalla 18/93 piilevien vaaralähteiden luokituslistalla⁷. Kaivostoiminnan aiheuttamat vakavat ympäristöonnettomuudet ympäri maailmaa ovat synnyttäneet tarpeen kaivosteollisuuden toimintaan liittyvän ympäristölainsäädännön, ympäristövaikutusten ja riskien arvioinnin sekä hallintamenetelmien kehitykselle.

¹ Hou D. & Al-Tabbaa A. (2014) Sustainability: A new imperative in contaminated land remediation, *Env. Sci. & Policy*, 39, 25-34.

² Jordan G. & Abdaal A. (2013) Decision support methods for the environmental assessment of contamination at mining sites, *Environ Monit Assess*, 185:7809-7832

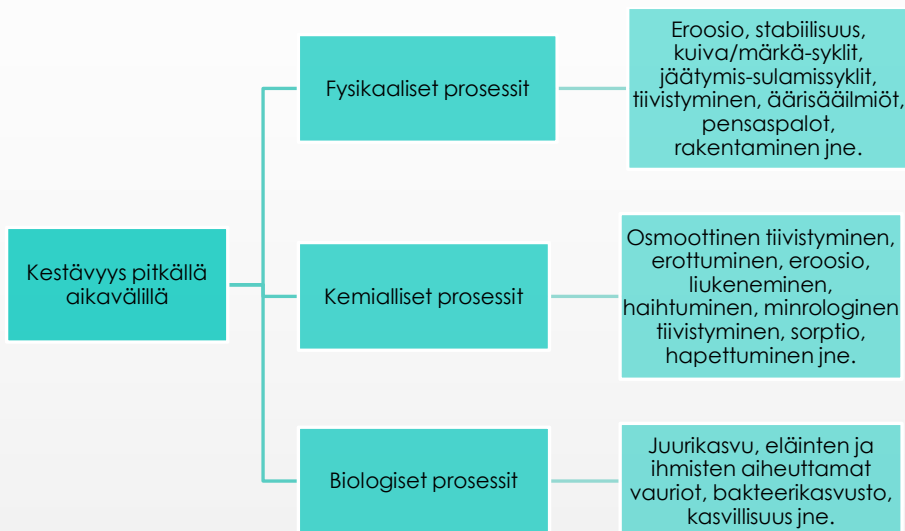
³ Sun X., Ning P., Tang Xiao-long, Yi Hong-hong, Li Kai, Zhou Lian-bi & Xu X. (2013) Environmental risk assessment system for phosphogypsum tailing dams. *The Scientific World Journal*, 5-9.

⁴ Meriem L, Teresa T, Jose A.P., Rachid H., Azzouz K., Roger G., Mohammed J., & Lahcen Z. (2012) Electrical and seismic tomography used to image the structure of a tailings pond at the abandoned Kettara mine, Morocco. *Mine Water and the Environment*, 31(1): 53-61.

⁵ Grangei C., Ávila P., Matias M. & Silva F. D. (2011) Mine tailings integrated investigations: The case of Rio tailings (Panasqueira mine, central Portugal). *Engineering Geology*, 123(4): 359-372.

⁶ Manjunatha.L.S. & B.M.Sunil (2013) Stabilization/solidification of iron ore mine tailings using cement, lime and fly ash, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol.02, 12:625-636

⁷ Xie Xu-yang, Tian Wen-qj, Wang Yun-hai, ZHANGhang Xing-kai (2009) The safety analysis of current situation and management countermeasure on tailing reservoir in China. *Journal of Safety Science and Technology*, 5(2): 5-9.



KUVA 1 PEITERAKENTEEN KESTÄVYYDESSÄ HUOMIOITAVIA TEKIJÖITÄ PITKÄLLÄ AIKAVÄLILLÄ (SOVELLETTU SRK CONSULTING).

Ensisijainen rikastushiekka-altaan peiterakenteen tavoite on vähentää pitkällä aikavälillä ympäristöriskejä, jossa on huomioitava useita fysikaalisesti, kemiallisesti ja biologisesti vaikuttavia tekijöitä (Kuva 1). Tuulen ja veden aiheuttaman eroosion on todettu olevan suurin ongelma kestävyyskannalta pitkällä aikavälillä⁸. Peiterakenteilla pyritään estämään hapen ja/tai veden pääsy rikastushiekkaan, hallitsemaan eroosiota sekä estämään haitta-aineiden muodostumista ja liukenemista veteen. Eräs ongelma on yleisesti käytettyjen peiterakenteiden toimivuudesta puuttuva kokemus useiden satojen vuosien ajalta. Käytännössä suunnitelmat tehdään väliaikaisiksi, koska peiterakenteet toimivat alati muuttuvassa luonnon ympäristössä⁹. Riskiä pitkän ajan toimivuuden kannalta lisää ohuiden, alle 1500 mm paksujen, peiterakenteiden rakentaminen. On myös todennäköistä, että tulevaisuudessa rikastushiekkojen aiheuttamat riskit kasvavat ilmastomuutoksen aiheuttamien äärimmäisten sääilmiöiden lisääntymisen seurauksena¹⁰.

Syntyvien jätteiden määrä on kasvava ja niiden käsittelyyn liittyvät ongelmat yhä monimutkaisempia. Käytännössä kokonaisvaltaiseen arviointiin perustuva päätöksenteko vaatii monialaista ja alojen välistä yhteistyötä ja menetelmiä, joissa huomioidaan ympäristövaikutusten lisäksi teknisiä ja taloudellisia tekijöitä. Vaikuttavista tekijöistä kuitenkin monet ovat luonteeltaan kvalitatiivisia, jonka

⁸ Robertson, A.M., and Skemer, N.A. (1988). Design considerations for the long-term stability of mine wastes. http://www.robertsongeoconsultants.com/publications/long_term.pdf (30.4.2018).

⁹ Wilson G.W., Williams D.J. & Rykaart E.M. (2003) The Integrity of Cover Systems — An Update, Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Cairns, Australia, 1-8.

¹⁰ M. Edraki, T. Baumgartl, E. Manlapig, D. Bradshaw, M. Franks, C. J. Moran (2014) Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches, Journal of Cleaner Production, 84,411-420

seurauksena yleisesti käytetyt arviointikäytännöt ovat yksinkertaistettuja ja keskittyneet kapea-alaisesti arvioimaan vain esimerkiksi suoria kustannuksia tai lyhyellä aikavälillä mitattavissa olevia ympäristövaikutuksia¹¹. Arviointimenetelmien tulee olla lisäksi sovellettavissa tapauskohtaisesti. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin viittä eri peiterakennevaihtoehtoa teknisen toimivuuden, kustannusten ja ympäristövaikutusten näkökulmasta ja esitetään päätöksentekomalli, jossa voidaan integroida kaikki tarvittavat eri tekijät ja kriteerit tapauskohtaisesti.

Koekohteen kuvaus

Pyhäsalmen kaivos sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla Pyhäjärven kunnassa. Alueen keskilämpötila vuositasolla on 3-4°C ja vuosisade 500-650 mm¹². Kaivos on Euroopan syvin metallimalmikaivos. Rikastushiekkaa syntyy vuositasolla noin 400 000- 700 000t, joka sijoitetaan Pyhäjärven lähellä sijaitseviin altaisiin. Altaiden yhteispinta-ala on 150 ha ja D-altaan ala noin 31 ha. Koerakenne tehtiin Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-altaan D pohjoisosaan (Kuva 2).



KUVA 2 KOERAKENTEEN SIJAINTI KAIVOSALUEELLA JA OIKEALLA KUVA KOERAKENTEEN PAIKASTA ALTAAN TÄYTTÖVAIHEESSA.

D-allas sisälsi aikaisemmin pyriittirikasta rikastushiekkaa ja nykyään sinkin, kuparin ja pyriitin rikastushiekkaa. Rikastushiekan fysikaaliset perusominaisuudet on esitetty alla olevassa taulukossa.

¹¹ Tomei M.C., Bertanza G., Canato M., Heimersson S., LAera G. & Svanström M. (2016) Techno-economic and environmental assessment of upgrading alternatives for sludge stabilization in municipal wastewater treatment plants, *Journal of Cleaner Production*, 112:3106-3115.

¹² Ilmatieteen laitos, ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot

**TAULUKKO 1. PYHÄSALMEN K D-ALTAAN RIKASTUSHIEKAN FYSIKAALISET OMINAISUUDET¹³.
NÄYTE OTETTU RIKASTAMOLLA KALKIN LISÄYKSEN JÄLKEEN.**

Ominaisuus	Keskiarvo
Väri	Tummanruskea
pH	11,7
Redox (mV)	-359
EC (mS/m)	90,5
Ominaispaino (g/cm ³)	4,03
Kosteus (%)	0,52

Aikaisempien tutkimusten¹³ mukaan rikastushiekka on happoa tuottavaa ja monet sulfidiset metallit ja metalloidit liukenevat ja pysyvät liukoisena rikastushiekan hapettuessa eli rikastushiekka voi muodostaa metallipitoisia happamia valumavesiä altistuessaan hapettuville olosuhteille. Rikastushiekka on emäksistä ja erittäin pelkistävää. D-altaan rikastushiekka koostuu pääosin sulfidisesta rikistä ja raudasta (n. 58%). Materiaalitutkimukset koostuivat stabilointisideaineen teknistä toimivuutta ja ympäristökelpoisuutta edustavista analyyseistä ja kokeista. Potentiaalisia koerakennevaihtoehtoja vertailtiin taloudellisin perustein, teknisen toimivuuden osalta ja ympäristövaikutuksia arvioimalla.

Rikastushiekan stabilointi sideaineella

Haitallisten aineiden liukeneminen luontoon on tyypillinen ongelma, jonka estämiseksi stabilointi on yksi tunnettu menetelmä. Stabilointi estää tai vähentää haitallisten aineiden vapautumista ympäristöön sitomalla ne kemiallisin sidoksien ja mineraalisen muutoksen avulla. Stabiloinnin avulla haitalliset aineet kapseloidaan liikkumattomaan muotoon sideainematriisiin¹⁴. Fysikaalinen stabilointi parantaa teknisiä ominaisuuksia kuten kantavuutta ja tiiviyyttä, kemiallisen stabiloinnin tavoitteena on haitallisten aineiden liukenemisen estäminen tai vähentäminen¹⁵. Sementti on yleisimmin käytetty sideaine stabiloinnissa masuunikuonajauheen ja kalkin ohella. Toisin kuin tavallisessa betonissa, sementin reaktio rikastushiekassa muodostuu kahdesta vaiheesta¹⁶. Ensimmäisessä vaiheessa sementin liukenemisreaktiossa trikalsiumsilikaatti (C_3S) tai $(3CaO \cdot SiO_2)$ vapautuu Ca^{2+} ,

¹³ Räisänen ML & Backnäs S. (2014) Pyhäsalmen kaivoksen kaivannaisjätteiden geokemialliset ominaisuudet, hapontuotto- ja metallien liukenemispotentiaali, GTK, Dnro M44K2013, p.58

¹⁴ Lange, L., Hills, C. & Poole, A. (1996) Preliminary investigation into the effects of carbonation on cement-solidified hazardous wastes. Environ. Sci. Technol. 30: 25–30.

¹⁵ Mayers, T.E. & Eapen, M.E. (1992) Laboratory evaluation of stabilization/solidification technology for reducing the mobility of heavy metals in New Bedford Harbor superfund site sediment. In Stabilization and solidification of hazardous, radioactive, and mixed wastes. 2nd ed. Edited by T.M. Gilliam. ASTM, Philadelphia, Pa. p. 304.

¹⁶ Nehdi, M. & Tariq A. (2007) Stabilization of sulphidic mine tailings for prevention of metal release and acid drainage using cementitious materials: a review. J. Environ. Eng. Sci. 6: 423–435.

$\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ -ja OH^- ioneja. Kalsiumionienpitoisuus kasvaa alkuvaiheessa nopeasti kyllästymispisteeseen saakka. Toisessa vaiheessa sideaineen hydrataatiofaasit (esim. C-S-H) edesauttavat rikastushiekka-sementtipastan lujuudenkehitystä. Sementillä rikastushiekan stabilointisideaineena on yleisesti saatu aikaan hyvä puristuslujuus, mutta sulfaatti aiheuttaa pitkällä aikavälillä lujuuden heikkenemistä sementissä johtuen trikalsiumaluminaatin herkkyydestä sulfaatille. Tiedetään, että korkea pH, liukoinen Al, Ca, sulfaatit ja vesi yhdessä muodostavat riskin paisumista aiheuttavan ettringiitin syntymiselle¹⁷. Siten sulfaattipitoisissa rikastushiekoissa suositellaan käytettäväksi seossementtejä¹⁸. Sementin ja kalkin korvaaminen masuunikuonajauheella parantaa sulfaattirasituksen kestävyyttä ja muodostaa sementtiä tiiviimmän matriisin vähentäen vedenläpäisyä¹⁹. Lisäksi tiedetään useiden metallien vaikuttavan sementin hydrataatioprosessiin haitallisesti, mikä tulee huomioida käytettäessä sementtiä stabilointisideaineena.

Viime vuosina on lisääntynyt tutkimus, jossa on pyritty löytämään vaihtoehtoja nestemäisille alkaliaktivaattoreille, joiden käyttö on teknisesti ja taloudellisesti ongelmallista sekä ekologisesti kyseenalaista. Masuunikuonan sideainereaktioita on aktivoitu ja modifioitu esimerkiksi reaktiivisella magnesiumilla ja erilaisilla magnesium, dolomiitin, kalsiumhydroksidin ja -oksidin yhdistelmillä²⁰²¹. Magnesiasta tuotetaan maailmassa noin 20 Mt vuodessa pääasiassa Kiinassa ja sen hinta vaihtelee yleisimmin välillä US\$180-US\$350/t Kiinassa²², mikä on vähemmän kuin esimerkiksi yleisimmin käytetyllä masuunikuonajauheen alkaliaktivaattorilla NaOH (n. US\$500/t Kiinassa). Silti erityisesti korkeassa lämpötilassa kalsinoidun magnesium (Dead Burned Magnesia, DBM) hinta on korkea ja reaktiivisen eli matalamassa lämpötilassa (n. 700°C) kalsinoidun sivutuotepohjaisen magnesiumin hyödyntämisen kehittäminen on taloudellisesti ja ekologisesti kannattavaa.

Tutkimusten perusteella aktivaattorien seossuhteita ja määrää muuttamalla voidaan vaikuttaa reaktionopeuteen ja muodostuviin hydrataatiotuotteisiin kuten C-S-H ja hydrotalsiitti (Ht) ja siten optimoida sideainetta tarpeen mukaan kulloiseenkin käyttötarkoitukseen sopivaksi. Lisäksi tiedetään, että aktivaattorien laadulla ja prosessoinnilla (kalsinointiaste, partikkelikoko) voidaan vaikuttaa niiden hydrataatio-ominaisuuksiin²³. Tutkimuksissa on todettu esimerkiksi MgO:n kiihdyttävän

¹⁷ A. Seco, L. Miqueleiz, E. Prieto, S. Marcelino, B. García, P. Urmeneta (2017) Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders, *Applied Clay Science*, 135, 457-464.

¹⁸ Nehdi, M. (2001) Ternary and quaternary cements for sustainable development. *Concr. Int.* 2001(April): 35-42.

¹⁹ Obuzor G.N., Kinuthia J.M., Robinson R.B. (2012) Soil stabilisation with lime-activated- GGBS—A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains. *Eng. Geol.* 151, 112-119.

²⁰ Sarkkinen M., Tuomikoski S., Kujala K., Kemppainen K., Gehör S. (2017) Replacement of Portland Cement in Portland Blast-Furnace Slag Cement for Cold-Agglomerated Briquetting, *proceedings of Slag Valorisation Symposium 2017*: 1-4.

²¹ K. Gu, F. Jin, A. Al-Tabbaa, B. Shi & J. Liu (2014) Mechanical and hydration properties of ground granulated blastfurnace slag pastes activated with MgO-CaO mixtures, *Construction and Building Materials* 69:101-108.

²² Beijing HL Consulting Company. Market research report on magnesia (MgO) industry in China 2009. 2009.

²³ F. Jin, A. Abdollahzadeh1 & A. Al-Tabbaa (2013) Effect of different MgO on the hydration of MgO-activated granulated ground blastfurnace slag paste, *Proceedings of 3rd Int. Conf. on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Kyoto, Japan.

hydrotalsiitin syntymistä tiivistäen huokosrakennetta²⁴. Magnesian tiedetään myös kapseloivan raskasmetalleja tehokkaammin kuin sementin, mikä on lisännyt kiinnostusta tutkia magnesian käyttöä pilaantuneiden maiden kunnostuksessa²⁵. MgO:n reaktiossa syntyy raskasmetallien kapseloinnin kannalta sopiva pH (noin 10,5) ja reaktiossa muodostuva brusiitti ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) kapseloi tehokkaasti eri raskasmetalleja ja orgaanisia aineita vetysidoksilla tai ionivaihdon avulla²⁶. Liika MgO voi kuitenkin aiheuttaa paisumista magnesian hydrataatiossa muodostuneen brusiitin seurauksena ja halkeilua liiallisen magnesian ja masuunikuonan reaktiossa syntyvän hydrotalsiitin seurauksena²⁷.

Magnesiolla aktivoidun masuunikuonan toimivuudesta sulfaattipitoisten maiden stabiloinnissa on jossain määrin ristiriitaisia tutkimustuloksia. Joidenkin tutkimusten mukaan (esim. Gu et al., 2014) sulfaatti voi aiheuttaa ettringiitin muodostumista ja paisumisreaktioita pitkällä aikavälillä. Joissakin tutkimuksissa todetaan puolestaan magnesiolla aktivoidun masuunikuonan olevan paremmin sulfaattia ja happoa kestävä kuin normaali portlandsementti stabilointiaineena, eikä aiheuttavan paisumisreaktiota ettringiitin muodostumisen seurauksena²⁸. Magnesian on kalkkiin verrattuna masuunikuonan aktivaattorina todettu parantavan paremmin sulfaattimaiden stabiloinnissa mekaanisia ominaisuuksia eikä muodostaneen paisuvia mineraaleja²⁹. Materiaalitutkimuksissa vertailtiin MKJ+MgO sideaineen toimivuutta tavallisella portland-sementillä stabiloituun rikastushiekkaan.

Materiaalit

Rikastushiekanäytteet kerättiin neljässä eri vaiheessa vuoden 2017 aikana Pyhäsalmen kaivoksen D-altaalta 0-500 mm syvyydeltä. Näytteissä erottui purkuputken lähellä oleva hienompi rikastushiekka ja purkuputkesta kauempana oleva karkeampi aines. Näytteet säilytettiin suljetuissa muoviasioissa ja tutkittiin KAMK:n laboratoriossa Kajaanissa.

Rikastushiekan stabilointitutkimuksissa käytettiin sideaineina normaalisti kovettuvaa portlandseossementtiä (PC) Plussementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N (Finnsementti Oy), jauhattua masuunikuonaa (MKJ, Finnsementti Oy), sekä magnesian kaupallisia eri laatuja.

²⁴ Jin F. (2014) Characterisation and Performance of reactive MgO-based cements, PhD thesis. University of Cambridge, UK.

²⁵ Al-Tabbaa A., Evans C.W., Barker P. (2011) Soil mix technology for land remediation: recent innovations. Proc. Inst. Civ. Eng. Ground Improv. 164, 127–137

²⁶ S. Tresintsi, K. Simeonidis, M. Katsikini, E.C. Paloura, G. Bantsis, M. Mitrakas (2014) A novel approach for arsenic adsorbents regeneration using MgO, J. Hazard.Mater. 265, 217–225.

²⁷ K. Gu, F. Jinc, A. Al-Tabbaa, B. Shi, C. Liua, L. Gao (2015) Incorporation of reactive magnesia and quicklime in sustainable binders for soil stabilisation, Eng. Geology, 195,53-62

²⁸ Yi Y., Li C., Liu S.Y., Al-Tabbaa A. (2014) Resistance of MgO–GGBS and CS–GGBS stabilised marine soft clays to sodium sulfate attack. Geotechnique

²⁹ A. Seco, L. Miqueleiz, E. Prieto, S.Marcelino, B. García, P. Urmeneta (2017) Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders, Applied Clay Science, 135,457-464.

Materiaalien karakterisointitutkimukset

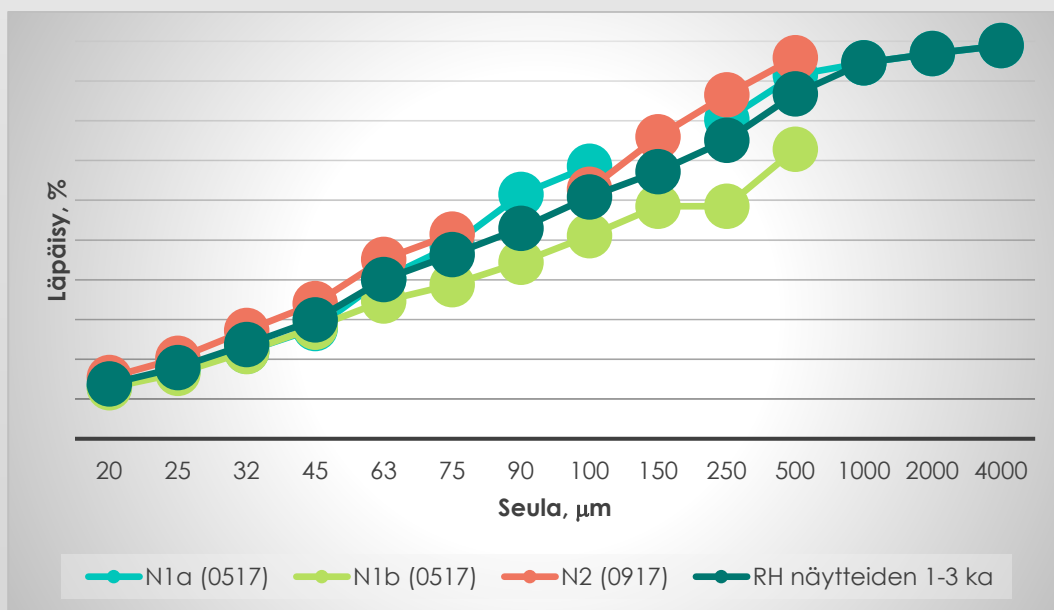
Raaka-aineiden ja lujittuneiden rikastushiekka (RH) -sideaineseosten kemiallinen koostumus määritettiin röntgenfluoresenssi- eli XRF-analyysin avulla. Mineraloginen koostumus analysoitiin röntgendiffraktio- eli XRD-analyysillä ja termogravimetri- eli TGA-analyysillä. XRD-tulosten tulkinta tehtiin HighScore Plus-ohjelman Rietveld-menetelmällä. Rakeisuudet määritettiin kuivaseulontamenetelmällä normaaliseulasarjalla ja Alpine-tuuliseulalla.

Rikastushiekan karakterisointi

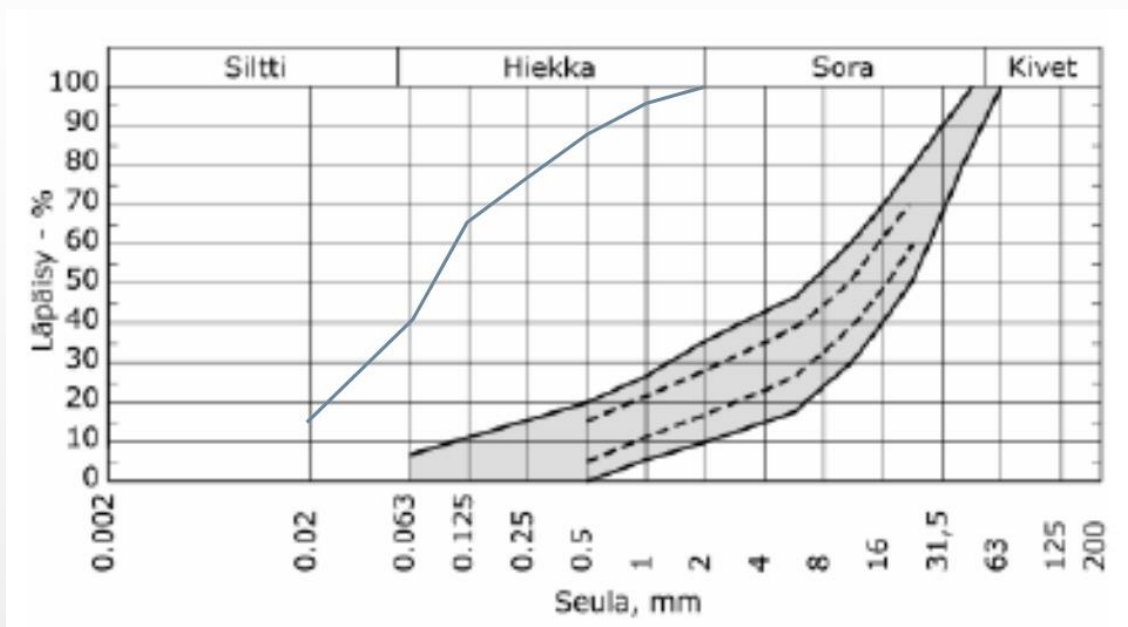
Rikastushiekan partikkelikokojakauma vaikuttaa sen reaktiivisuuteen (hienempi on reaktiivisempaa). Näytteiden perusteella rikastushiekan rakeisuus vaihteli ollen lähellä purkuputkea otetuissa näytteissä hienompaa kuin kauempana. Keskiarvo on neljästä eri näyte-erästä. Rikastushiekan näytteiden rakeisuusjakaumat ovat alla taulukossa 2 ja kuvassa 3.

TAULUKKO 2 RIKASTUSHIEKAN RAKEISUUS.

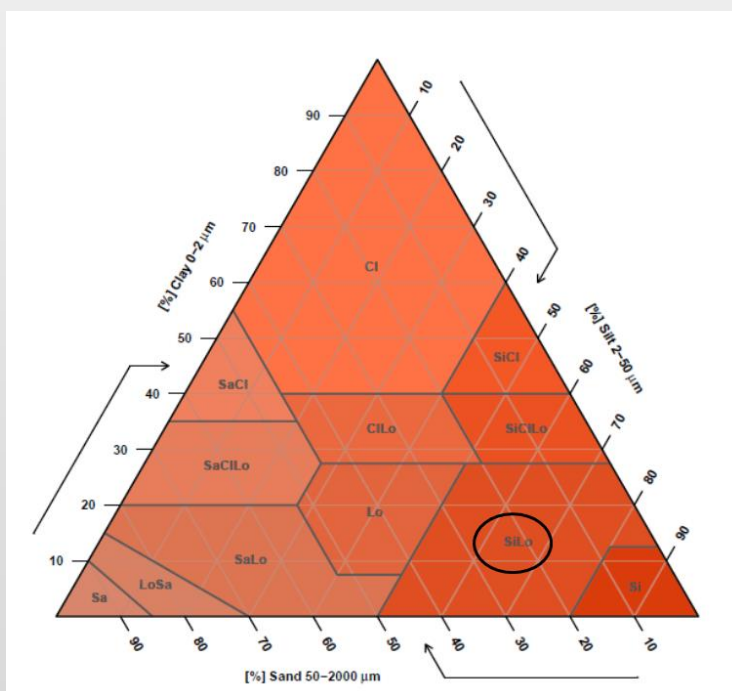
Ominaisuus	Keskiarvo
Hiekka (75 µm -4,75 mm)	40 %
Siltti (2-75 µm)	46 %
Läpäisy D20	18 µm
Läpäisy D30	45 µm
Läpäisy D60	100 µm



KUVA 3 RIKASTUSHIEKAN RAEKOKOJAKAUMA.



KUVA 4 RIKASTUSHIEKAN RAKEISUUSLUOKITUS (SINISELLÄ KESKIARVO).



KUVA 5 SiLo VIITTAA SILTISEEN SAVIMAAHAN USDA:N MAARAKENNELUOKITUKSEN MUKAAN ³⁰.

³⁰ Soil Survey Division Staff. *Soil survey manual*, volume Handbook 18, chapter 3. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, 1993.
http://soils.usda.gov/technical/manual/print_version/chapter3.html

Partikkelikokoanalyysin perusteella kolmen näytteen keskiarvo alittaa 75 µm seulan 46 %. Maarakenneluokituksen mukaan raekokojakauman perusteella se on osin silttistä ja savista. Kaaviokuvan mukaan rikastushiekka vastaa silttistä savimaata USDA-luokituksen mukaan (Kuva 5).

Sideainetutkimukset

Stabilointisideainekokeissa verrattiin normaalin portlandsementin toimivuutta magnesiumilla aktivoituun masuunikuonaan.

Tiivistymisominaisuudet

Massojen optimivesipitoisuus määritettiin tärypöydän avulla soveltaen CSV-menetelmää (Cabrera Slump Value). CSV-menetelmässä massa tiivistetään sullomalla painumakartioon tai muottiin, tärytetään tärypöydällä 20 s, jonka jälkeen mitataan massan painuma³¹. Kokeissa käytettiin 100x100x100 mm muotteja.

Puristuslujuus

Puristuslujuuskokeita tehtiin eri rikastushiekka-sideaineseoksille. Koemassat tiivistettiin optimivesipitoisuudella tärypöydällä. Koemassojen puristuslujuus määritettiin 100x100x100 mm kuutioilla 28 vuorokauden säilytyksen jälkeen. Koekuutiot säilytettiin huonelämpötilassa muoteissa muovin alla. Puristuslujuus määritettiin Matest:n 200 kN puristuslujuuslaitteistolla.

Sideaine reagoi rikastushiekassa olevan veden kanssa muodostaen hydrataatiotuotteita ja täyttäen huokosia parantaen rikastushiekan vesitiiviyttä. Rikastushiekan tiheys oli keskimäärin 2250 kg/m³. Koesarjan perusteella massojen tiheys korreloi heikosti puristuslujuuden kanssa, mihin osasyynä voi olla sideaineiden erilainen hydrataatiomekanismi. Sementin käyttö sideaineena toimi hyvin rikastushiekan stabiloijana. Parhaimmat tulokset saatiin sideainesoksilla MKJ+MgO. Magnesian laatu vaikutti tulokseen. Paras tulos saatiin hienoksi jauhetulla (<20µm) magnesiumilla (24 MPa). Kaksi heikointa tulosta kokeissa saatiin magnesian kahdella karkeammalla versiolla. Toiseksi paras tulos saavutettiin rikastushiekalla (10,8 MPa) sideainemäärällä 16,5%.

Stabiloitujen massojen vedenläpäisevyys

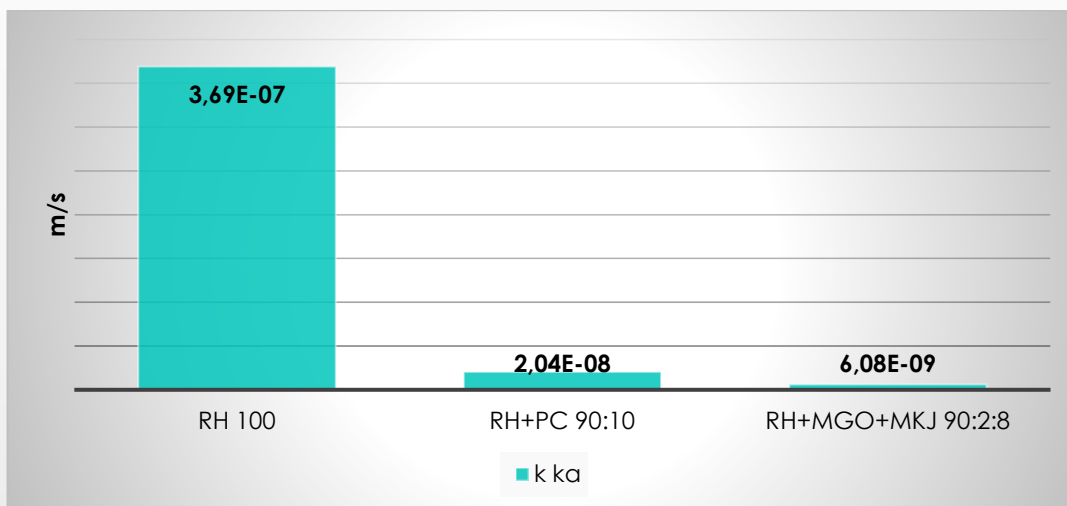
Vedenläpäisevyyteen vaikuttavat useat tekijät kuten materiaalien partikkelikokojakauma ja tiiviysaste, sideainereaktiotuotteet, sideainepastan ja rikastushiekkapartikkelien välisen rajavyöhykkeen (ITZ) välinen tiiviys ja tiivistymisaste ³². Ympäristölupa Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekan peiterakenteelle määritti vain vaatimuksen vedenläpäisevyydelle.

Kaksi vertailukoetta MgO+MKJ sideaineseoksella 5% ja 10% annostuksilla tehtiin MITTA Oy:n laboratoriossa joustavaseinäisellä sellillä standardin ASTM D5084

³¹ Hazaree C.V. et al. (2010). PCA R&D Serial No.3243Portland Cement Association, p.54.

³² Nehdi, M. & Mindess, S. (1999) A quantitative approach to predicting the performance of blended cements, Concrete Science and Engineering, Vol. 1, pp. 205-214.

mukaan. Koemassat olivat testaushetkellä noin 21 vuorokauden ikäisiä. Tulosten mukaan vedenläpäisevyys 5 % sideainemäärällä oli $7,6\text{E-}09$ ja sideainemäärällä 10 % $5,0\text{E-}09$ m/s.



KUVA 6 RIKASTUSHIEKAN JA STABILOIDUN RH:N VEDENLÄPÄISEVYYS.

Sideaineseos (MgO+MKJ) toimi kokeen perusteella sementtiä (PC) paremmin rikastushiekan vedenläpäisevyyden pienentämisessä. Sideaineseokset pienensivät selvästi vedenläpäisevyyttä verrattuna pelkän rikastushiekan vedenläpäisevyyteen ($3,69\text{E-}07$). Rikastushiekan mitattu vedenläpäisevyys oli pienempi kuin yleensä rikastushiekoilla ($(1,0\text{--}18,7)\text{E-}06$ m/s)³³. Mittauksia tehtiin lisäksi vaihtoehtoisissa peiterakenteissa käytetyillä materiaaleilla ja niiden yhdistelmillä. Pelkällä moreenilla ja heikompileatuksilla lentotuhkilla ei saatu mittaustulosta mittausteknisistä syistä.

Stabiloitujen massojen rasitustestit

Stabiloitujen massojen säärasituskestävyyttä tutkittiin vesirasituskokeella ja jäädytys-sulatusrasituskokeella. Koekappaleet säilytettiin ilmasäilytyksessä (n. 18°C) ennen pakkasrasituskoetta.

Vesirasitustesti

Vesirasitustesti tehtiin koemassalla RH+MKJ+MgO PR 90:8:2 asettamalla 28 vuorokauden ikäinen koekappale $100\times 100\times 100$ mm vesialtaaseen 10 vuorokauden ajaksi. Vesirasituksen jälkeen mitattiin koekappaleen massan muutos ja muutos puristuslujuudessa.

³³ M.A. Zardari (2010) Mechanical properties of fine grained, sulphur rich silty soils, Research report, Department of Civil, Mining and environmental Engineering, Luleå University of Technology, Sweden, p.100.

TAULUKKO 4 STABILOIDUN RIKASTUSHIEKAN (RH+MKJ+MgO) PAINON JA PURISTUSLUJUUDEN MUUTOS VESIRASITUKSESSA.

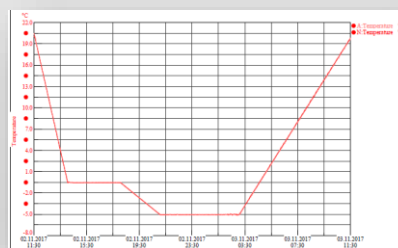
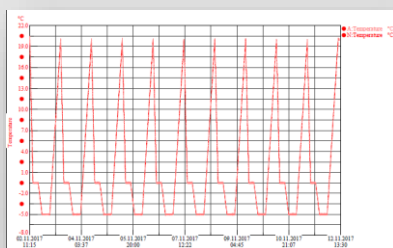
	Ennen vesirasitusta	Vesirasituksen jälkeen
Puristuslujuus (MPa)	8,9	9,6
Tiheys (kg/m ³)	2213	2251

Puristuslujuus kasvoi vesirasituksen aikana n. 8 %. Myös koekappaleen paino nousi rasituksen aikana, mikä indikoi hyvää vesirasituksen kestävyyttä.

Jäädytys-sulatusrasitustesti

Kylmillä ilmastoseuduilla toistuvat sulamis-jäätymissyklit voivat aiheuttaa fysikaalista vauriota stabiloidussa matriisissa hydrataatiotuotteiden vaurioitumisen kautta, joka on seurausta veden jäätymisestä huokosissa ja paisumisen aiheuttamasta halkeilusta.

Testissä sovellettiin standardiluonnoksessa *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 54: Test method for the determination of frost susceptibility - Resistance to freezing and thawing of hydraulically bound mixtures FINAL DRAFT FprCEN/TS 13286-54 (2014)* kuvattua menetelmää, sillä erotuksella, että minimilämpötila oli noin -5°C. Standardista poikkeavaa minimilämpötilaa käytettiin, koska käytännössä lämpötila ei stabiloidussa rakenteessa laske alemmaksi. Testi suoritettiin sääsimulaattorissa, johon alla olevissa kuvassa esitetty lämpötilavaihtelu oli ohjelmoitu.



KUVA 7. JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKÄYNTIEN GRAAFISET KUVAAJAT.

Jäädytys-sulatusrasitustesti tehtiin koemassoilla RH+PC 90:10 ja RH+MKJ+MgO 90:8:2. Koekappaleiden massan ja puristuslujuuden muutos mitattiin pakkasrasituksen jälkeen samoin kuten vesirasituskokeessa.

TAULUKKO 5 STABILOIDUN RIKASTUSHIEKAN PAINON JA PURISTUSLUJUUDEN MUUTOS PAKKASRASITUKSESSA.

	Ennen pakkasrasitusta		Pakkasrasituksen jälkeen	
	RH+PC 90:10	RH+MKJ+MgO 90:8:2	RH+PC 90:10	RH+MKJ+MgO 90:8:2
Puristuslujuus (MPa)	8,9	10,2	11,42	13,5
Tiheys (kg/m ³)	2281	2385	2321	2408

Koekappaleiden lujuus ja paino nousivat kokeen aikana. Lujuuden nousua selittää sitoutumisreaktiota edistänyt lisäkosteus vesirasituskokeen aikana, koska koekappaleet oli ennen vesirasituskoetta säilytetty huonelämpötilassa ilmasäilytyksessä. Sementillä stabiloidun koekappaleen lujuus kasvoi noin 15% ja MKJ+MgO -sideaineella stabiloidun noin 18% kokeen aikana. Ilmiötä selittää jäädytys-sulatussykliin sulatusjakso noin 20°C lämpötilassa ja lisäkosteus, joka koekappaleihin oli kyllästetty ennen kokeen alkua. Molemmat edistivät sitoutumisreaktiota.

Diffuusio- ja liukoisuustestit

Diffuusiotestit tehtiin laboratoriokoekappaleista vertailemalla sementillä (10%) stabiloitua rikastushiekkaa magnesiolla aktivoidulla masuunikuonajauheella (10%) stabiloituun rikastushiekkaan. Analyseissä sovellettiin kolmea eri menetelmää: Diffuusiotesti NEN 7347 / CEN/TS 16637-2, Modifioitu diffuusiotesti NEN 7345 / 7347 / CEN TS 16637-2 ja Läpivirtaustesti CEN/TS 14405.

Modifioidussa diffuusiotestissä (NEN 7345) koekappale säilytettiin 64 vrk vedessä, jonka aikana vesi vaihdettiin määräajoin. Testi antaa tietoa eri aineiden diffuusion kautta tapahtuvasta liukenemisesta, liukenevien aineiden määristä suhteessa pinta-alan suhteessa aikaan sekä aineiden kemiallisesta ja fysikaalisesta sitoutumisesta.

Taulukossa alla on esitetty kiinteytetyille rakennusmateriaaleille enimmäisliukoisuusarvoja diffuusiotestin NEN 7345 mukaan. Hollantilaiset raja-arvot on määritetty kahdelle sijoituspaikkaluokalle: 1A pysyvästi kostea ja 1B ajoittain kostea³⁴. Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ohjearvot ovat ajoittain kostealle sijoituspaikalle³⁵.

³⁴ Aalbers, Th.G., de Wilde, P.G.M., Rood, G.A., Vermij, P.H.M., Saft, R.J., van den Beek, A.I.M., van de Broeckman, M.H., Masereeuw, P., Kamphuis, Ch., Dekker, P.M. & Valtinjn, E. 1993. Milieuhygiënische kwaliteit van primaire en secundaire ouwmaterialen in relatie tot hergebruik en bodem- en oppervlaktewateren-bescherming. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, RIVM-rapport no 771 402 006. 456 s.

³⁵ Sorvari, J. 2000. Ympäristökriteerit mineraalisten teollisuusjätteiden käytölle maarakentamisessa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 421. 119 s. + liitt. 25 s.

TAULUKKO 6 MAX LIUKOISUUSOHJEARVOJA DIFFUUSIOTESTILLE KIINTEYTETTYILLE RAKENNUSMATERIAALEILLE (DIFFUUSIOKERROIN <10-11 M/S).

Kiinteä rakennusmateriaali (V>50cm³), max mg/m²/64 vrk			
	Sijoituspaikkaluokka 1A (hollantilainen)	sijoiutspaikka-luokka 1B (hollantilainen)	SYKE
As	41	140	58
Ba	600	2000	2800
Cd	1,1	3,8	2,1
Co	29	95	280
Cr	140	480	550
Cu	51	170	250
Hg	0,4	1,4	1,6
Mo	14	48	70
Ni	50	170	270
Pb	120	400	210
Sb	3,7	12	36
Se	1,4	4,8	14
Sn	29	95	280
V	230	760	700
Zn	200	670	330
Br	29	95	ei määritetty
Cl	18000	54000	ei määritetty
CN-kompleksinen	7,1	24	ei määritetty
CN-vapaa	1,4	4,8	14
F	1300	4400	2800
SO4	27000	80000	ei määritetty

Sementillä stabiloitu rikastushiekka ylitti sekä hollantilaiset että SYKE:n ohjearvot molybdeenin osalta. Sen sijaan RH+MKJ+MgO alitti molybdeenin raja-arvot selvästi. RH+MKJ+MgO ylitti hollantilaisen raja-arvon antimonin ja sulfaatin osalta, mutta alitti SYKE:n raja-arvot kaikilta osin (Liiite 1). Suurin ero murskatulla näytteellä tehtyihin kokeisiin verrattuna monoliittisestä kappaleesta tehtyihin tuloksiin oli murskatun näytteen korkeampi antimonin liuennut määrä ja pienempi fluoridien määrä. Monoliittisestä kappaleesta liukenivat enemmän myös Br, Cd, Cr, Sn, V, Cl, F ja SO₄, mutta vähemmän Zn.

Taulukossa alla on ohjearvot granuloidulle tai rakeiselle materiaalille kolonnitestissä (NEN7343, NT ENVIR002) liuenneiden aineiden määrille liuos-kiinteäainesuhteella L/S 10. Oletusarvona laskelmissa käytettiin materiaalin paksuutta 0,7 m. Ryhmän 1 raja-arvot sallivat maarakennusmateriaalin lähes rajoittamattoman käytön maarakentamisessa. Ryhmän 2 raja-arvot edellyttävät, että materiaaliin ei pääse vettä ja materiaalin pääsy pohjavedestä on estetty vähintään 0,5 metriä.

TAULUKKO 7 HOLLANTIALISET JA SYKE:N OHJEARVOT GRANULOIDULLE TAI RAKEISELLE MATERIAALILLE KOLONNITESTISSÄ (NEN7343, NT ENVIR002) LIUENNEIDEN AINEIDEN MÄÄRILLE LIUOS-KIINTEÄAINESUHITELLA L/S 10.

	Kolonnitestissä liuenneiden aineiden max ohjearvot, mg/kg			
	Ryhmä 1A (hollantilainen)	Ryhmä 1B (hollantilainen)	SYKE Ryhmä 1	SYKE Ryhmä 1
As	0,88	7,0	0,14	0,85
Ba	5,5	58	10	28
Cd	0,032	0,066	0,011	0,015
Co	0,42	2,5	1,1	2,5
Cr	1,3	12	2,0	5,1
Cu	0,72	3,5	1,1	2,0
Hg	0,018	0,076	0,014	0,032
Mo	0,28	0,91	0,31	0,50
Ni	1,1	3,7	1,2	2,1
Pb	1,9	8,7	1,0	1,8
Sb	0,045	0,43	0,12	0,40
Se	0,044	0,10	0,060	0,098
Sn	0,27	2,4	0,85	3,1
V	1,6	32	2,2	10
Zn	3,8	15	1,5	2,7
Br	2,9	4,1	n.d.	n.d.
Cl ⁻	600	8800	250	n.d.
CN-kompleksinen	0,067	0,38	n.d.	n.d.
CN-vapaa	0,013	0,076	0,06	0,098
F	13	100	11	25
SO ₄	750	22000	1500	n.d.

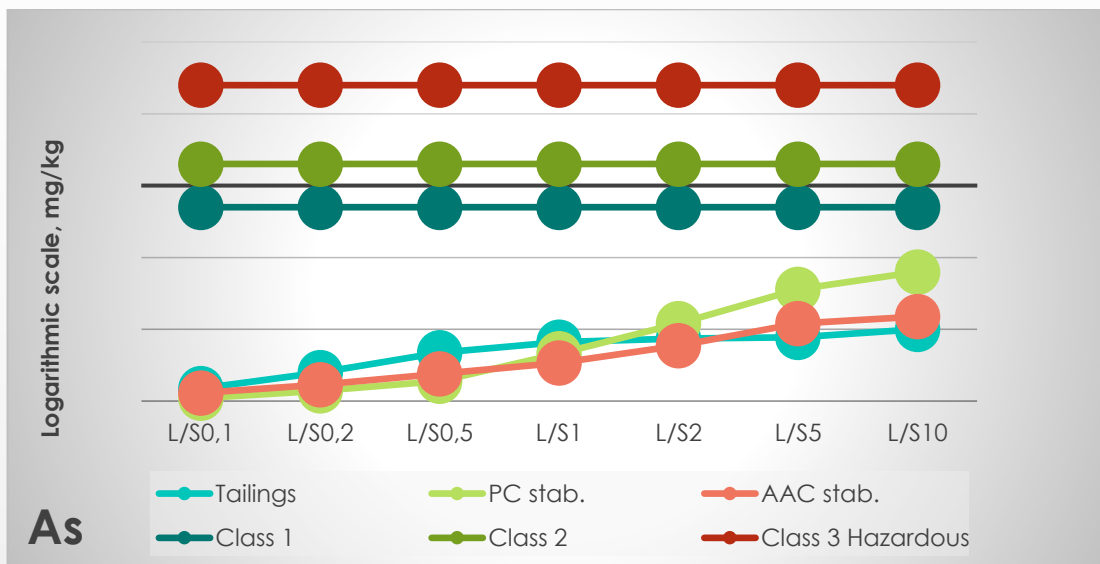
Tulosten perusteella hollantilaiset ja SYKE:n raja-arvot antoivat samanlaisen lopputuloksen. PC-stabiloitu ei täyttänyt raja-arvoja seleenin ja molybdeenin osalta. Sen sijaan, MKJ+MgO -stabiloitu rikastushiekka täytti luokan 1 vaatimukset molybdeenin liukoisuuden suhteen ja luokan 2 vaatimuksen seleenin suhteen. Molemmat täyttivät luokan 2 vaatimuksen myös sulfaatin osalta. Eli MKJ+MgO -stabiloitua rikastushiekkaa voidaan käyttää maarakentamisessa, kun materiaali ei ole kosketuksissa pohjaveden kanssa (min 0,5 m pohjaveden yläpuolella) ja veden pääsy materiaaliin on estetty. Lopputulos oli vastaava myös diffuusiotestien perusteella, eli MKJ+MgO -stabiloitua rikastushiekkaa voitaisiin käyttää SYKE:n ohjearvojen mukaan ajoittain kostealla sijoituspaikalla. GTK:n raportin mukaan, molybdeeni saattoi olla peräisin koneiden voitelurasvoista tai pH:n säädössä käytetystä kalsiumoksidista³⁶. Myös kalkin poltossa käytetyt raskas polttoöljy tai jäteöljy voivat aiheuttaa metallikontaminaation (Liite 3).

Kolme eri testimenetelmää antoivat samansuuntaisia tuloksia ilman menetelmään liittyviä merkittäviä eroja verrattaessa PC- ja MKJ+MgO -stabiloitujen rikastushiekkojen liukoisuuseroja. Kokonaistuloksia verrattaessa kahden eri stabilointisideaineen tehokkuuden välillä, keltaisella korostettujen komponenttien määrä osoitti selvästi MKJ+MgO -stabiloinnin paremman tehokkuuden PC-stabilointiin verrattuna. Ero oli osin seurausta MgO-aktivoidun kuonan reagoimattomien MgO- ja kuonapartikkeleiden adsorptiosta. Ainoastaan vanadiinin suhteen PC-stabilointi oli tehokkaampi kuin MKJ+MgO, mutta ero ei ohjearvojen suhteen ollut merkittävä (Liite 4).

Vertailu rikastushiekan ja stabiloidun rikastushiekan välillä

Rikastushiekan liukoisuus määritettiin standardin CEN/TS 14405:04 mukaan Eurofins-laboratoriossa. Tuloksia verrattiin samalla menetelmällä määritettyihin stabiloitujen rikastushiekkojen liukoisuuksiin ja suomalaisiin kaatopaikkaluokitukseen (kuvat alla). Kaavioissa esitetään liukoisuus logaritmisesti eri liuos/kiinteäainesuhteilla (L/S). Tulosten perusteella stabilointi pienensi erityisesti kuparin, nikkelin, kadmiumin ja sinkin liukoisuutta siten, että nikkelin, kadmiumin ja sinkin osalta stabilointi vaikutti positiivisesti luokitukseen.

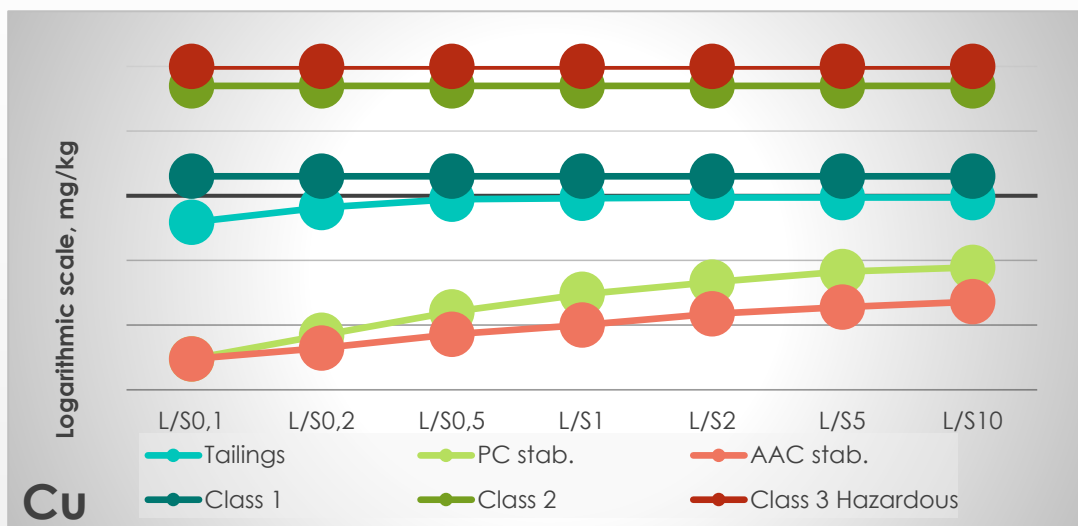
³⁶ Räisänen ML & Backnäs S. (2014) Pyhäsalmen kaivoksen kaivannaisjätteiden geokemialliset ominaisuudet, hapontuotto- ja metallien liukenemispotentiaali, GTK, Dnro M44K2013, p.58



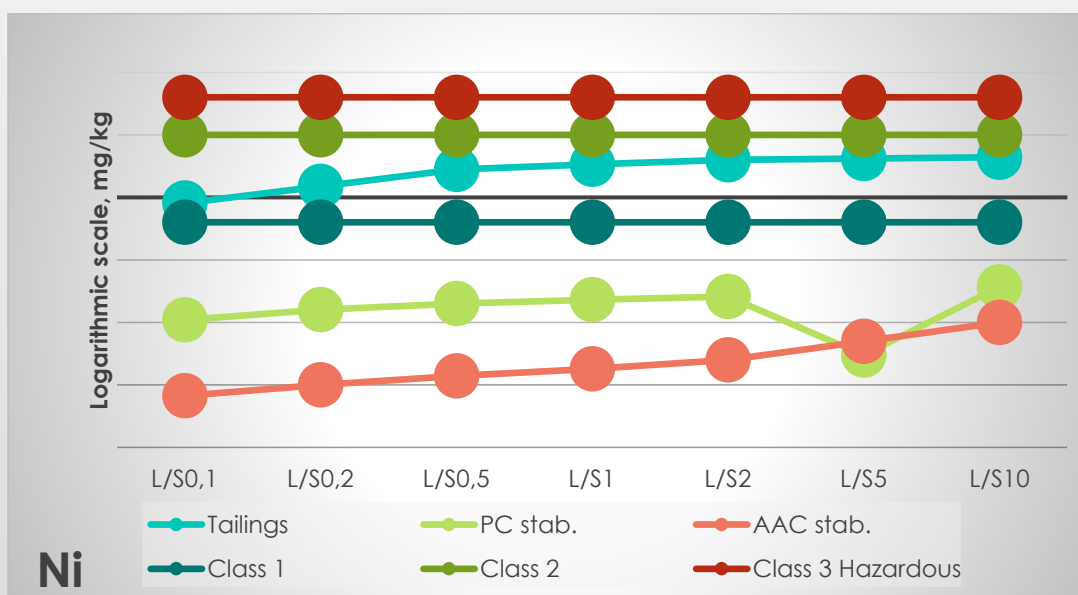
KUVA 8. ARSEENIN LIUKOISUUS (CEN/TS 14405:04).



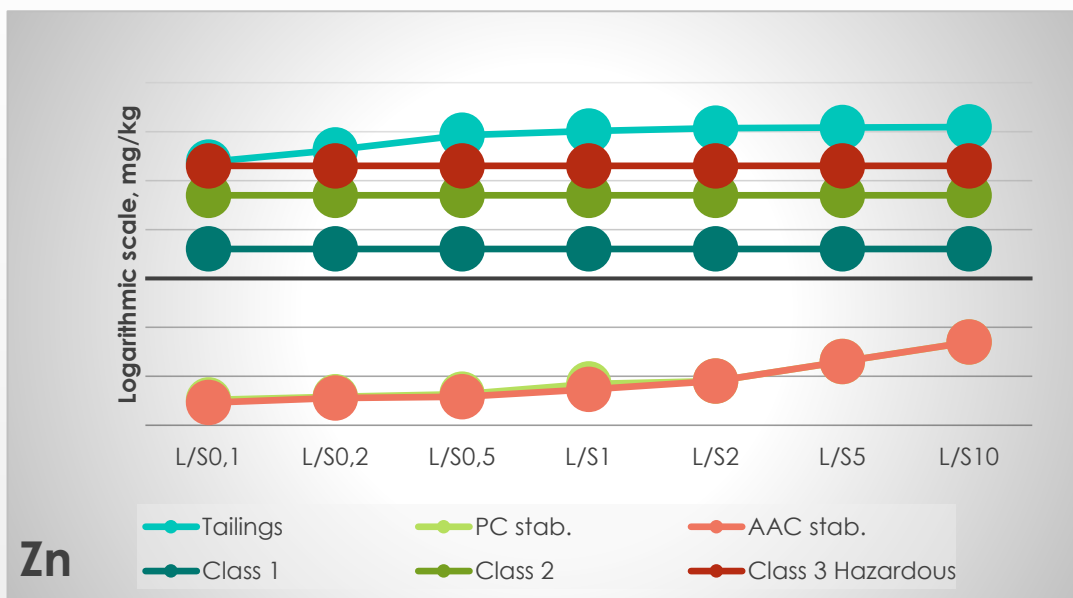
KUVA 9. KADMIUMIN LIUKOISUUS (CEN/TS 14405:04).



KUVA 10. KUPARIN LIUKOISUUS (CEN/TS 14405:04).



KUVA 11. NIKKELIN LIUKOISUUS (CEN/TS 14405:04).



KUVA 12. SINKIN LIUKOISUUS (CEN/TS 14405:04).

Arseenin osalta sementtistabiloidussa materiaalissa liukoisuus kasvoi L/S-suhteen kasvaessa suuremmaksi kuin pelkässä rikastushiekassa ja MKJ+MgO -stabiloidussa rikastushiekassa. Liukoisuudet olivat alle pysyvän jätteen raja-arvon kaikissa materiaaleissa. Kadmiumin osalta rikastushiekan liukoisuus ylitti pysyvän jätteen raja-arvon, mutta sekä sementti- että MKJ+MgO -stabiloidussa pysyivät selvästi alle sallitun. Kuparin osalta rikastushiekan liukoisuus oli niukasti alle pysyvän jätteen raja-arvon ja selvästi pienempi molemmissa stabiloiduissa rikastushiekoissa. Nikkelin osalta rikastushiekan liukoisuus ylitti pysyvän jätteen raja-arvon ja oli lähellä tavanomaisen jätteen raja-arvoa, mutta oli molemmissa stabiloiduissa materiaaleissa selvästi alle pysyvän jätteen raja-arvon. Sinkin suhteen rikastushiekka ylitti selvästi vaarallisen jätteen raja-arvon, mutta oli alle pysyvän jätteen raja-arvon molemmissa stabiloiduissa rikastushiekoissa.

Alla olevassa taulukossa on koostetusti esitetty sementin (PC) ja MKJ+MgO -stabiloinnin (PC rel. ja AAC rel.) vaikutus sekä pelkän rikastushiekan liukoisuus.

TAULUKKO 8 SEMENTILLÄ JA MKJ+MGO (AAC)-STABILOIN RIKASTUSHIEKAN (PC STAB. JA AAC STAB) SEKÄ RIKASTUSHIEKAN LIUKOISUUS. REL. (PC REL. JA AAC REL.) TARKOITTAAN SUHTEELLISTA STABILOINTITEHOKKUUTTA VERRATTUNA RIKASTUSHIEKKAAN.

	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn	Hg	F	Cl	SO ₄
RH	0,01	0,16	2,6	0,01	0,94	0,01	4,4	0,024	0,01	0,04	1240	0,004	5	50	35900
PC stab.	0,063	0,26	0,002	0,017	0,078	2,0	0,037	0,005	0,01	0,12	0,05	0,002	5	62	17100
PC rel.	0,16	0,62	1300	0,59	12,05	0	119	4,80	1,00	0,33	24800	2,00	1,00	0,81	2,10
AAC stab.	0,015	0,30	0,002	0,01	0,023	0,094	0,01	0,005	0,01	0,075	0,05	0,002	5	50	15700
ACC rel.	0,67	0,53	1300	1,00	40,87	0,11	440	4,80	1,00	0,53	24800	2,00	1,00	1,00	2,29

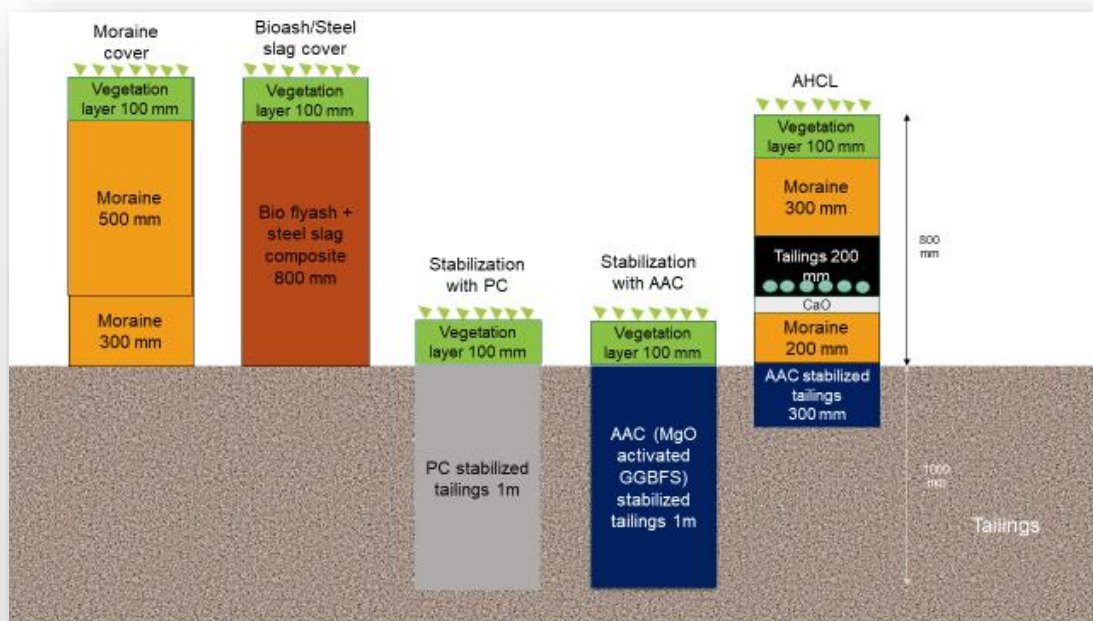
Stabilointi vähensi Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg ja SO₄ –liukoisuutta eli PC stab. ja AAC stab. < Tailings. Kokeessa tutkittu MgO-aktivoitu masuunikuona oli sementtistabilointia tehokkaampi (AAC rel > PC rel.) arseenin, kuparin, kromin, molybdeenin, nikkelin, seleenin, sulfaattien ja kloridien kapseloinnissa (keltaiset ruudut).

Peiterakennevaihtoehtojen vertailu

Rikastushiekka-altaiden peiterakenteiden tavoite on estää hapen ja/tai veden pääsy rikastushiekkaan, hallita eroosiota sekä estää haitta-aineiden muodostumista ja liukenemista veteen. Tässä vertailussa mukana oli rikastushiekan stabilointi kahdella eri sideaineella.

Peitetiivisteet rakennetaan kuivalle pinnalle tyypillisesti hienosta rikastushiekasta, savesta tai synteettisistä tiivisteistä ³⁷. Rakennevaihtoehtoverailussa oli moreenipeitteen (vertailurakenne) lisäksi mukana neljä erilaista peiterakennevaihtoehtoa: biotuhka/teräskuonapeite, stabilointi sementillä tai magnesiumilla aktivoidulla masuunikuonalla MgO+MKJ (AAC) ja kaksoishardpan (Advanced Hardpan Cover Liner, AHCL). Tutkitut peiterakennevaihtoehdot on esitetty alla olevassa kuvassa.

³⁷ S.G. Vick (1990) Planning, design, and analysis of tailings dams. 2nd edition. BiTech Publishers Ltd, Canada. ISBN 0-921095-12-0.



KUVA 13. VERTAILUSSA KÄYTETYT PEITERAKENNEVAIHTOEHDOT.

Teknis-taloudellis-ekologisessa kokonaisvertailussa oli mukana kaikki 5 rakennevaihtoa: moreenipeite vasemmalla, biotuhka/teräskuonapeite, stabilointi sementillä ja komposiittisideaineella sekä kaksoiskovakuorirakenne (AHCL) oikealla. Tässä sovellettua vertailumenetelmää ei ole aikaisemmin käytetty rikastushiekka-aldien peiterakenteiden suunnittelussa. Menetelmä on tarkemmin kuvattu julkaisussa Sarkkinen et al. (2019)³⁸.

Ympäristövaikutusten arvioinnissa käytettiin SimaPro-ohjelmaa ja Ecolnvent-tietokantaa. Tietokanta ei huomionnut moreenin käytön aiheuttamia ympäristövaikutuksia muuta kuin kuljetusmatkan osalta. Biotuhka/teräskuonan osalta, ohjelma ei tunne biotuhkan käyttöä, eikä säästyneen maa-aineksen tai pienentyneen jättemäärän vaikutuksia. Teräskuonan ympäristövaikutus oletettiin masuunikuonajauhetta vastaavaksi eli sisälsi jauhatuksen. Kaksoishardpan-rakenteen ympäristövaikutuksissa ei huomioitu säästyneen maa-aineksen osuutta tai jättemäärän pienentymistä. Stabilointivaihtoehdoissa ei myöskään huomioitu maa-aineksen säästöä ja pienempää jättemäärää sivutuotepohjaisen komposiitin käytön osalta.

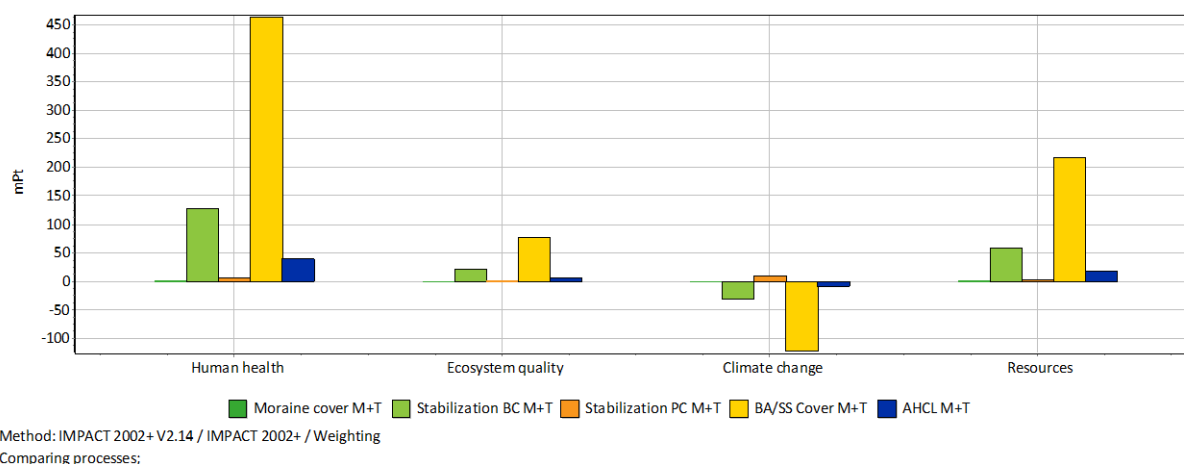
³⁸ Sarkkinen M., Kujala K., Gehör S. (2019) Decision support framework for solid waste management based on sustainability criteria: A case study of tailings pond cover systems, Journal of Cleaner Production, Volume 236.

Rakennevaihtoehtojen elinkaariarviointi

Elinkaariarvioinnissa (Life Cycle Assessment, LCA) sovellettiin ISO 14040 standardissa määritettyä menetelmää koostuen neljästä vaiheesta: tavoitteen määrittäminen ja rajaaminen, elinkaari-inventaario Life Cycle Inventory, LCI), vaikutusten arviointi (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) ja tulosten tulkinta.

LCA:n tavoitteena oli vertailla rakennevaihtoehtojen ympäristövaikutuksia niissä käytettyjen materiaalien perusteella. Arviointi rajautui materiaalien prosessoinnin ja kuljetuksen aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin. Vertailuyksikkönä käytettiin vaikutuksia neliömetrille. Arviointi tehtiin eri menetelmillä. Greenhouse Gas Protocol-menetelmä määrittää kasvihuonepäästövaikutukset CO₂-ekvivalentin eri kategorioissa, IPCC 2013 GWP keskittyy globaaliin lämpötilan nousuun fossiilisen CO₂-ekvivalentin perusteella, Ecological Scarcity 2013-menetelmä arvioi vaikutuksia eri ympäristöhaittojen suhteen, IMPACT 2002+ arvioi vaikutuksia neljän pääryhmän osalta ja ReCIPE 2016 Endpoint kolmen pääryhmän. Lisäksi arvioitiin kumulatiivista energiantarvetta ja rakennekohtaisesti ympäristövaikutusta kuvaavat prosessit. Eri menetelmillä saadut tulokset on esitetty alla olevissa kuvissa.

Rakennevaihtoehtojen vertailussa Greenhouse Gas Protocol-menetelmällä suurin määrällinen vaikutus oli biotuhka/teräskuonapeitteen fossiilista CO₂-ekvivalenttia kompensoiva osuus. Toiseksi suurin vaikutus oli komposiittistabiloinnilla samassa osiossa. Vaikutukset näkyvät vastaavasti positiivisina CO₂-nieluvaikutuksina. Metodi IPCC 2013 GWP indikoi globaalia lämpenemistä perustuen fossiilisten CO₂-ekvivalenttien määrään. Suurin ympäristöhaittoja aiheuttava vaikutus oli biotuhka/teräskuonapeiterakenteen ilmahiukkaspäästöillä ja karsinogeenisillä vaikutuksilla. Toiseksi haitallisin vaikutus oli komposiittistabiloinnilla kuonan prosessoinnin aiheuttamien vaikutusten kautta. Toisaalta ilmastolämpenemistä kompensoiva vaikutus oli suurin biotuhka/kuonapeitteellä ja komposiittistabiloinnilla.



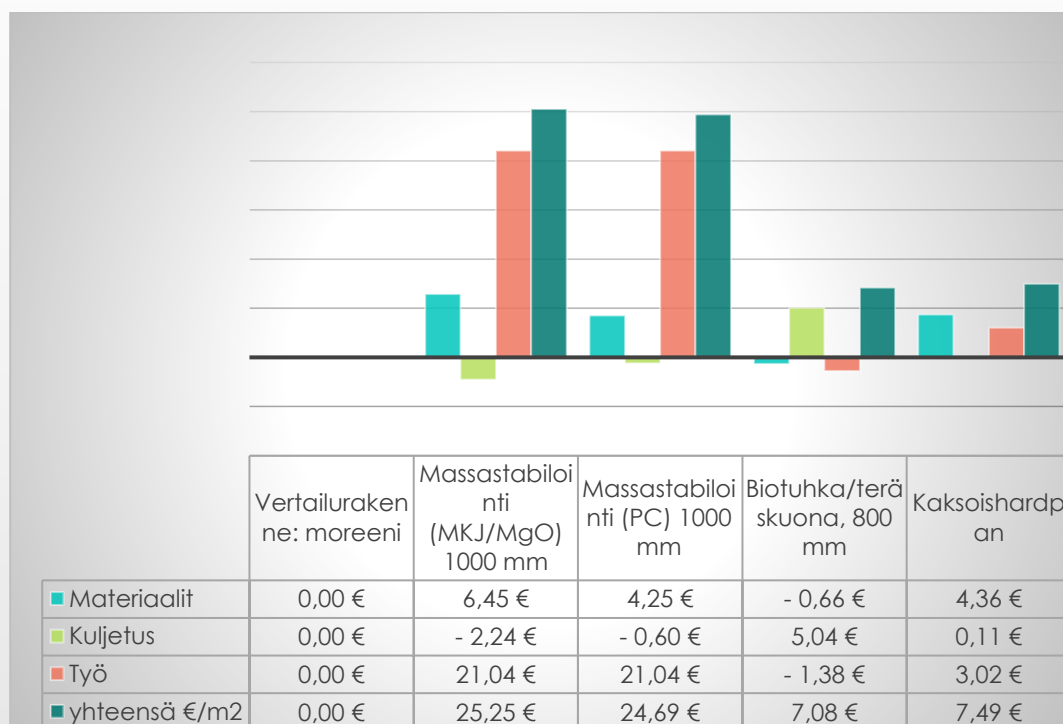
KUVA 14. MENETELMÄLLÄ IMPACT 2002+ TEHTY VERTAILU.

Menetelmä IMPACT 2002+ arvioi vaihtoehtoja suhteessa ihmisten terveyteen, ekosysteemin laatuun, ilmastomuutokseen ja resursseihin. Suurin merkitys oli biotuhka/kuonapeitteen ihmisille aiheuttama haitta ja toiseksi suurin saman rakenteen resursseille aiheuttama haitta. Tulokseen vaikutti kyseisen rakenteen suuri materiaalmäärä ja kuljetuksen vaikutus. Toisaalta suurin ilmastovaikutusta kompensoiva vaikutus oli samalla rakenteella perustuen kuonan käyttöön sementtiä korvaavana sideaineena. Menetelmä ReCIPE 2016 Endpoint sisälsi kolme pääkriteeriä: ihmisten terveys, ekosysteemi ja resurssit. Verrattuna arviomenetelmään (IMPACT 2002+), vaikutus resursseihin tulkitaan kompensoivaksi muiden kuin sementtistabiloinnin osalta. Cumulative Energy Demand-menetelmä määrittä eri rakenteille kohdistuvan energiantarpeen. Suurin energiantarve oli biotuhka/kuonapeitteellä uusiutumattoman fossiilisen energiantarpeen ja toiseksi uusiutuvan energian tarpeen perusteella.

Rakennevaihtoehtojen kustannusvertailu

Rakennevaihtoehtojen kustannusvertailussa oli mukana materiaalikustannukset, materiaalien kuljetuskustannukset sekä työkoneiden kustannukset. Kustannusarviot perustuivat parhaaseen saatavilla olleeseen tietoon. Koerakenteen osalta kustannukset poikkesivat ylöspäin verrattuna koko rikastushiekka-altaan peiterakenneluhiin. Kustannukset arvioitiin neliometriä kohden. Koerakennevaihtoehtojen teknis-taloudellisesta kannattavuudesta tehtiin lisäksi

tarkempi selvitys kuin mitä tässä raportissa on esitetty. Peiterakennevaihtoehtojen kustannusarviot koostetusti on esitetty alla olevassa taulukossa.



KUVA 15. RAKENNEVAIHTOEHTOJEN KUSTANNUKSET (€/M2) SUHTEESSA VERTAILURAKENTEeseen.

Verrattuna vertailukohtana käytettyyn moreenipeitteeseen, stabilointivaihtoehtojen kustannukset olivat selvästi korkeammat aiheutuen arvioidusta kordista stabilointilaitetekuluista. Stabilointilaitetekannuksiin vaikuttavat tilaustilanne, maantieteellinen sijainti ja kuljetusmatka kohteen laajuuden ja sideainemäärän lisäksi. Moreenipeitteen jälkeen edullisin vaihtoehto oli biotuhka/teräskuonapeite. Vaihtoehdon hintaan vaikuttavat biotuhkan ja teräskuonan hinta, josta ei ollut tarkempaa tietoa. Käytetty arvio esimerkiksi teräskuonalle (15€/tn) oli suhteellisen korkea. Vaihtoehdon kustannuksiin vaikutti oleellisesti materiaalien kuljetus, joka oli muihin vaihtoehtoihin verrattuna myös korkea. Vertailussa moreenipeitteen jälkeen toiseksi edullisin vaihtoehto oli AHCL-rakenne. AHCL-rakenteen edullisuuteen vaikuttivat suhteellisen pieni materiaali- ja kuljetustarve. Toisaalta rakennevaihtoehto sisälsi useita työvaiheita, mikä nosti vaihtoehdon hintaa. Kustannuksissa ei huomioitu sivutuotteiden hyödyntämisen kautta säästyviä kaatopaikkasijoituskustannuksia.

Teknisten, taloudellisten ja ympäristövaikutusten arvioinnin yhdistäminen

Monimuuttujapäätöksentekokoanalyysi (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA) viittaa päätöksenteon työkaluihin, joiden avulla voidaan hallitusti käsitellä suurta joukkoa päätöksenteossa huomioitavia tekijöitä. MCDA-menetelmät auttavat rakenteellisesti käsittelemään vaihtoehtoja, tavoitteita ja kriteereitä sekä arvioimaan niitä matemaattisten mallien avulla. Menetelmissä voidaan yhdistää määrällisiä ja laadullisia tekijöitä, eri epävarmuusasteita sekä yhdistellä keskenään kilpailevia ja vastakkaisia tekijöitä. MCDA-menetelmät jaetaan poissulkeviin, hyödyllisyysteoriaa soveltaviin, monitavoiteohjelmointiin ja ryhmäpäätöksentekoteoreettisiin³⁹. Analyttinen hierarkinen prosessi (Analytic Hierarchy Process, AHP) on yksi tunnetuimmista ja yleisimmin käytetyistä päätöksenteon työkaluista. AHP luokitellaan hyödyllisyysteoriaa soveltaviin menetelmiin⁴⁰.

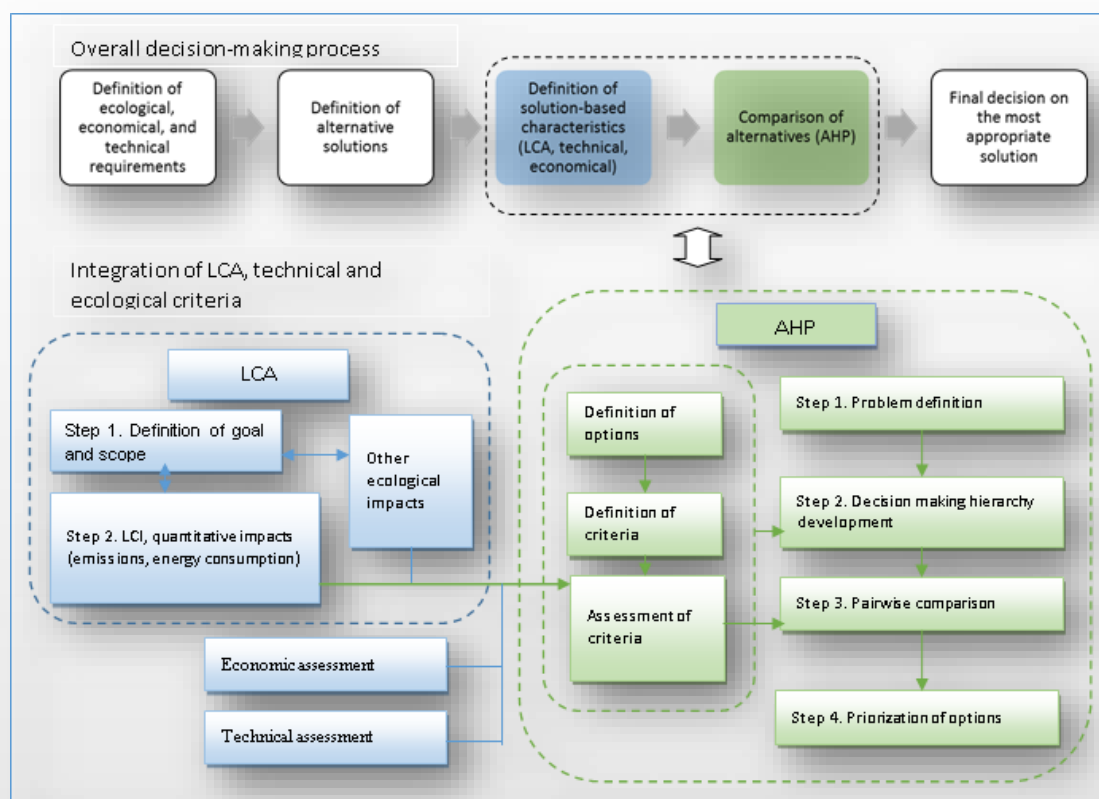
Analyttinen hierarkinen prosessi (AHP)

AHP:n tarkoitus on kompleksisten ongelmien strukturointi, suhteisiin perustuva mittaus ja kriteerien/vaihtoehtojen syntetisointi. AHP perustuu suhteelliseen parivertailumenetelmään. Menetelmä sisältää vaihtoehtojen ja kriteerien osituksen pienempiin ryhmiin ja painotusten (ns. eigenvalue) määrittämisen. Menetelmä soveltuu myös ryhmäpäätöksenteon työkaluksi, mikä on suositeltavaa, koska arvioinnin onnistumiseen vaikuttaa ensisijaisesti arvioinnin suorittajien asiantuntemus. AHP:n avulla voidaan myös mallintaa erilaisia skenaarioita. AHP-analyysin tuloksena saadaan suositusjärjestys eri vaihtoehdoille. Menetelmä sisältää herkkyyshanalyysin (Monte Carlo simulaatio) ja konsistenssianalyysin, joka kontrolloi tehtyjen arvioiden laatua. AHP-menetelmästä on kehitetty useita sovellutuksia kuten verkostomallinen analyysi (Analytic Network Process, ANP), sumeaa logiikka soveltava AHP (Fuzzy AHP, FAHP) ja intuitiivista sumeaa logiikkaa soveltava AHP. AHP-menetelmää on sovellettu laajasti eri päätöksentekoaalueilla ja menetelmän yhdistäminen esimerkiksi elinkaariarviointimenetelmiin on tunnettua. Aikaisempia esimerkkejä kaivosten peiterakenteiden vertailusta ei kirjallisuudesta löydy.

AHP:n tavoite (ongelma) tässä yhteydessä on parhaan ratkaisun löytäminen huomioiden ympäristö-, kustannus- ja teknologiakriteerit (kestävä kehitys). Menetelmä, jolla eri kategoriat yhdistettiin, on esitetty alla olevassa kuvassa.

³⁹ Carlsson C. & Fuller R. (1996) Fuzzy multiple criteria decision-making: recent developments. Fuzzy Set Syst 78:139–153

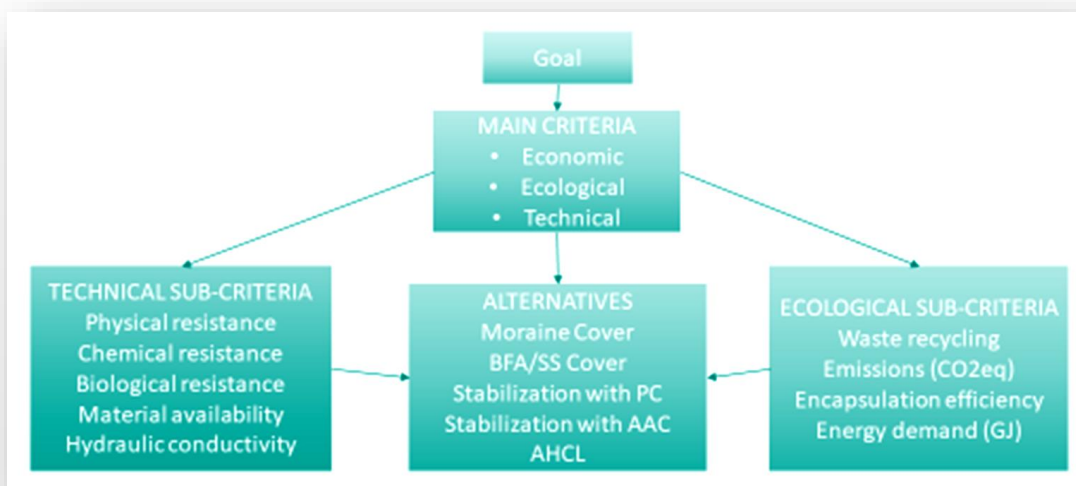
⁴⁰ Saaty TL (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structure. J Math Psychol (15):234–281



KUVA 16. TEKNISTEN, TALOUDELLISTEN JA YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN YHDISTÄMISEN MALLI.

Prosessikaavio kuvan yläosassa esittää periaatteellista päätöksentekoprosessia alkaen vaatimusten määrittelystä ja jatkuen vaihtoehtojen määrittelyyn, vaihtoehtojen analysointiin, vertailuun AHP-menetelmällä ja sen avulla saatavaan suositukseen parhaiten soveltuvasta vaihtoehdosta.

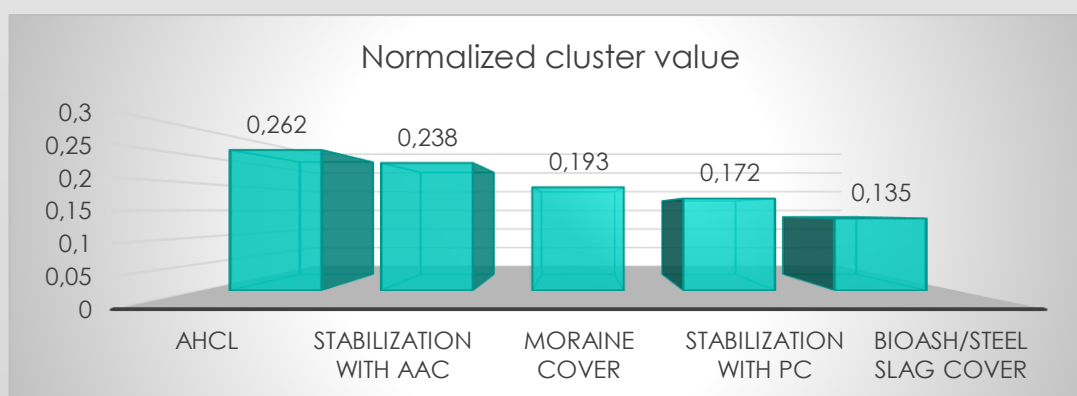
Alla oleva kaaviosarja esittää LCA:n ja AHP:n integrointia. LCA muodosti vain osan ympäristötekijöistä. LCA-ohjelman tuloksista malliin sisältyivät kvantitatiiviset arviot peiterakennemateriaalien päästöille ja energian kulutukselle. Lisäksi ympäristötekijöistä olivat mukana vaikutus jätteiden kierrätykseen ja rakenteiden kapselointikyky. Kierrätysvaikutus arvioitiin rakennevaihtoehtojen hyödyntävän kierrätysmateriaaliosuuden perusteella. Kapselointikyky arvioitiin rakenteiden sisältämän stabiloivan osuuden perusteella. Taloudelliset tekijät perustuivat suoraan rakennevaihtoehtojen tehtyihin kustannusarvioihin. Tekniset tekijät perustuivat laboratoriokokeiden perusteella saatuihin tuloksiin vedenläpäisevyydestä. Materiaalin saatavuus arvioitiin nykyisen tilanteen perusteella koerakennekohteessa. Biologiset, kemialliset ja fyysikaaliset prosessit perustuivat alla olevassa kaaviossa esitettyihin kriteereihin.



KUVA 17. AHP-MALLI, JOSSA YLIMPÄNÄ PÄÄKRITERIT JA ALAPUOLELLA SINISELLÄ JA VIHREÄLLÄ POHJALLA NIIHIN LIITTYVÄT ALAKRITERIT JA ORANSSILLA POHJALLA RAKENNEVAIHTOEHDOT.

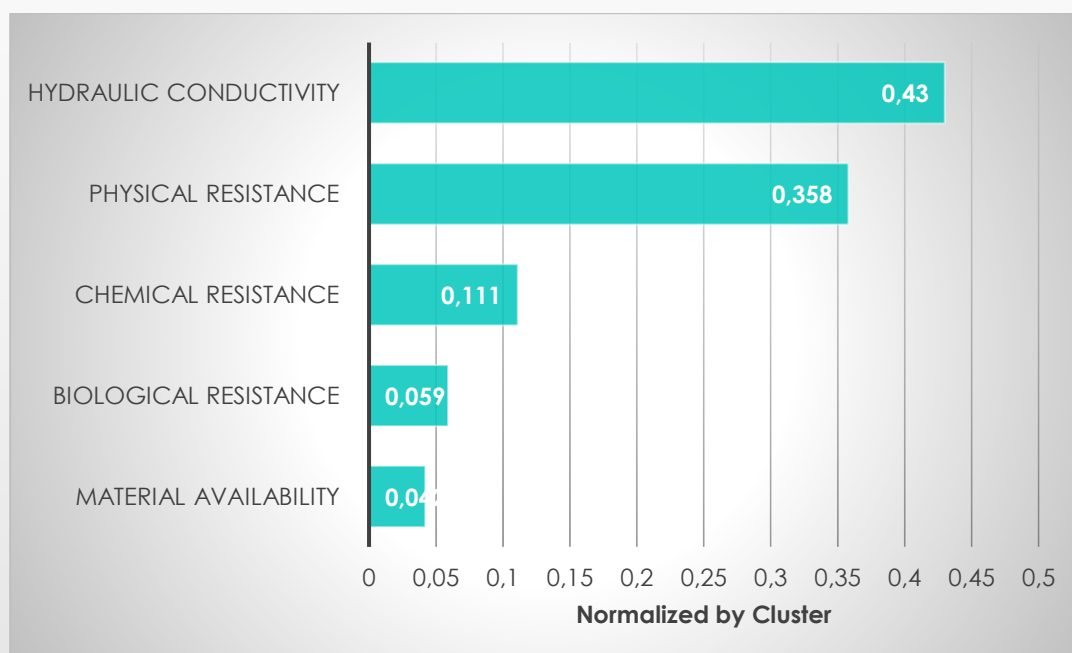
Tässä tutkimuksessa käytettiin perusmallin AHP-menetelmää ja SuperDecisions-ohjelmistoa. Päätöksentekorakenne sisälsi kolme pääryhmää: tekninen toimivuus, ympäristötekijät ja taloudelliset tekijät.

LCA-analyysin perusteella saadut tulokset sisältyivät osin ympäristötekijöihin. Tekniset ja ympäristötekijät jaettiin edelleen alakriteereihin. Lähtökohtaisesti teknisten tekijöiden, ympäristötekijöiden ja kustannusten painoarvot olivat yhtäsuuret. Lopputuloksena saatiin prioriteettijärjestys rakennevaihtoehdoille (Kuva 18).



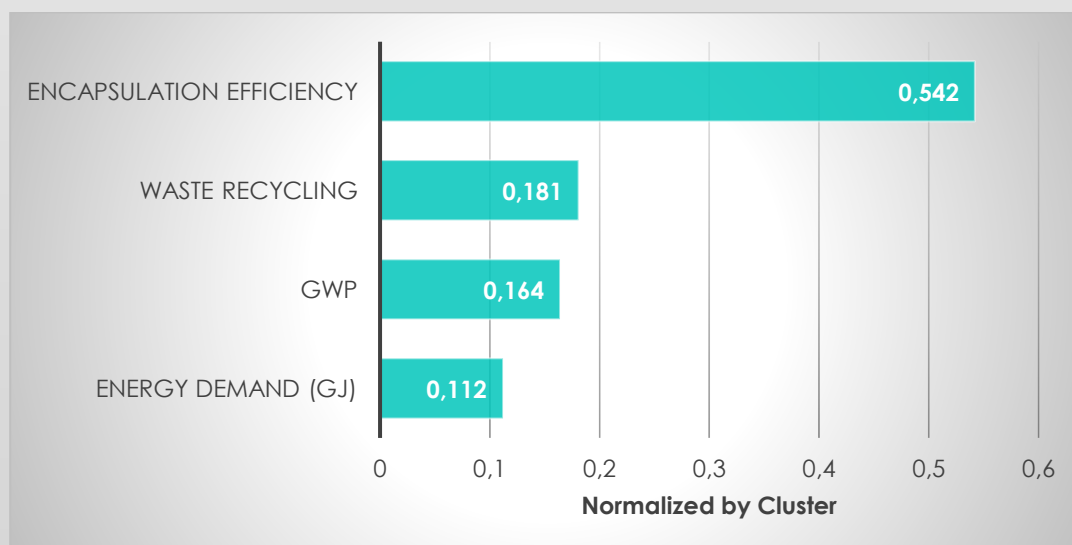
KUVA 18. RAKENNEVAIHTOEHTOJEN PRIORITEETTIJÄRJESTYS. LUKUARVOT KUVAAVAT ARVIOINNIN TULOSTA NUMERISESTI ELI AHCL ON ARVIOINNIN PERUSTEELLA NIUKASTI PAREMPI KUIN STABILOINTI KOMPOSIITTISIDEAINEELLA.

Rakennevaihtoehtojen prioriteettijärjestyksen mukaan AHCL oli niukasti parempi kuin stabilointi komposiitilla (Stabilization with AAC). Seuraavina moreenipeite (Moraine cover), stabilointi sementillä (Stabilization with PC) ja biotuhka/teräskuonapeite (Bioash/Steel slag cover). Kuvat 19 ja 20 erittelevät rakennevaihtoehtojen ja kriteerien prioriteetit klustereittain.



KUVA 19. PAINOTUKSET TEKNISILLE KRITEREILLE.

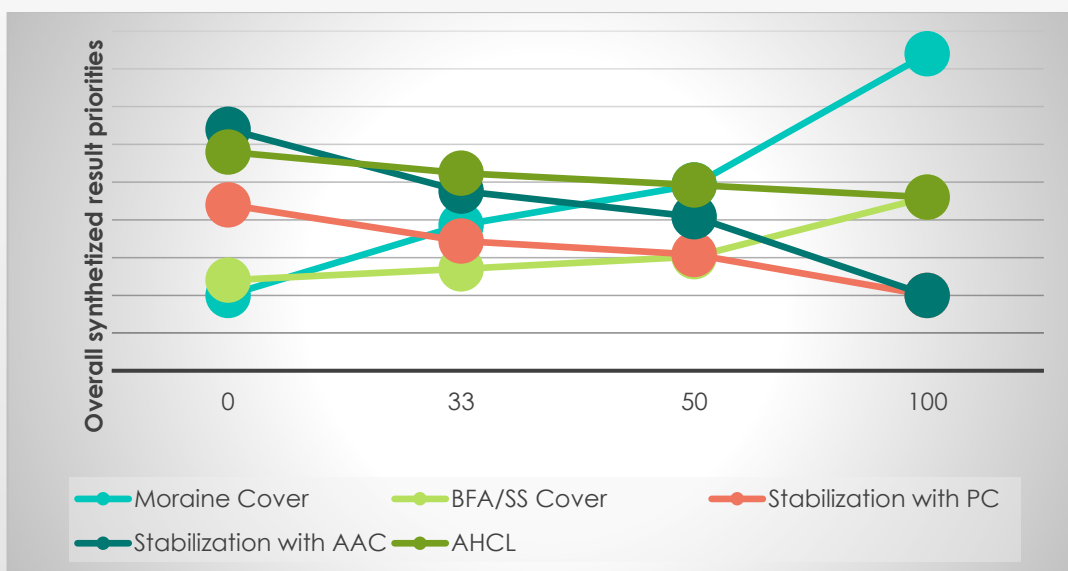
Teknisten tekijöiden alakriteereistä korkein painoarvo oli vedenläpäisevyydellä (0,43) ja pienin materiaalien saatavuudella (0,042).



KUVA 20. PAINOTUKSET YMPÄRISTÖVAIKUTUSKRITEREILLE.

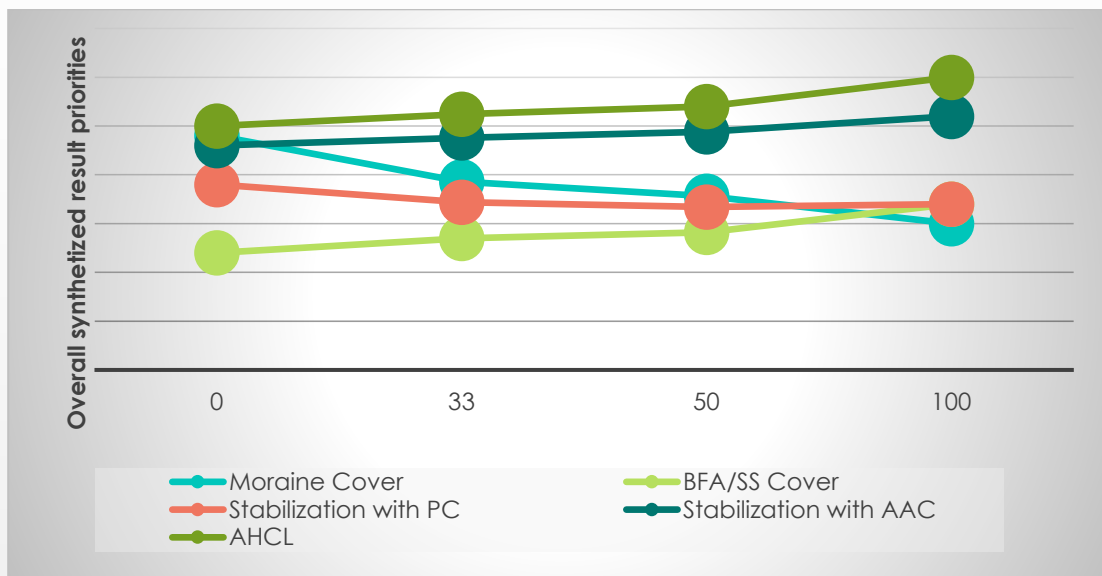
Normalisoiduissa klusteriarvioissa ympäristövaikutusten osalta kapselointikyvyllä (Encapsulation) oli korkein painoarvo (0,542) ja pienin energian kulutuksella (0,112).

Pääkriteereillä (tekninen toimivuus, ympäristövaikutukset ja kustannukset) oli yhtä suuri painoarvo (0,33). Pääkriteerien painoarvojen muuttaminen vaikuttaa rakennevaihtoehtojen prioriteettijärjestykseen. Painotuksen määrittämiseen vaikuttavat arvion tekijät ja heidän edustamansa asiantuntemus. Vaikutusta on demonstroitu alla olevissa kuvissa esitetyissä herkkyyksianalyysissä.



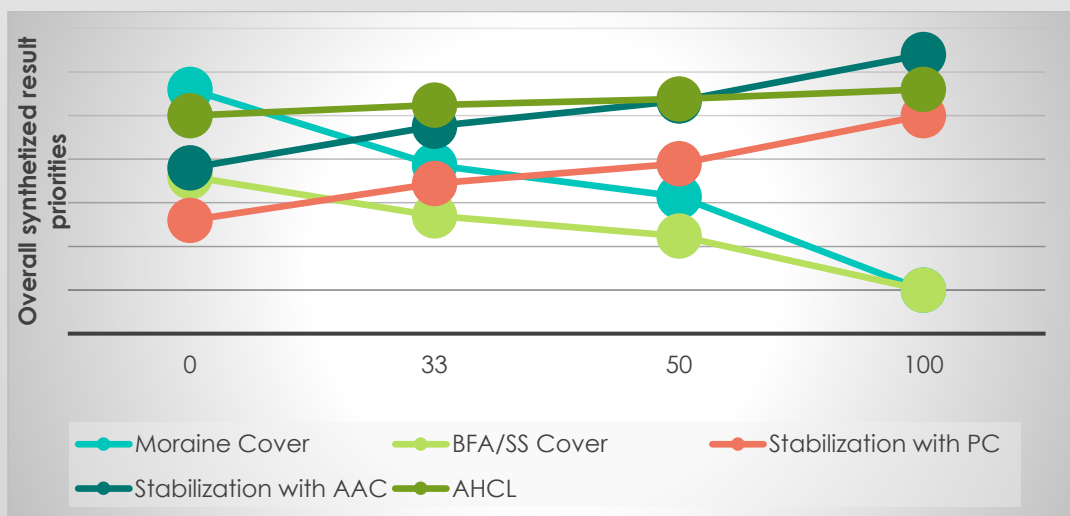
KUVA 21. HERKKYYSANALYYSI KUSTANNUSTEN PERUSTEELLA (%).

Yllä oleva kaavio esittää herkkyyksianalyysiä kustannusten painotusten suhteen. Jos kustannuksia painotetaan maksimaalisesti (vaaka-akselin arvo 100%), moreenipeite on ranking-järjestyksessä korkeimmalla, AHCL ja biotuhka/kuonapeite ovat toisena tasoissa ja stabilointiratkaisut viimeisenä. Painoarvo 33% kuvaa tilannetta, jossa kustannuksia on painotettu tasapuolisesti ekologisten ja teknisten tekijöiden kanssa, jolloin AHCL ja AAC ovat korkeimpana tasoissa. Jos kustannuksia painotetaan minimaalisesti (0%), stabilointi AAC-komposiitilla on prioriteettijärjestyksessä korkeimmalla, toisena AHCL ja moreenipeite alimpana.



KUVA 22. HERKKYYSANALYYSI YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN PERUSTEELLA (%).

Yläpuolella oleva kaavio osoittaa, että painotettaessa ympäristövaikutuksia maksimaalisesti, AHCL nousee prioriteettijärjestyksessä vaihtoehtoista korkeimmalle. Seuraavana ovat AAC, stabilointi sementillä ja biotuhka/teräskuonapeite ja moreenipeite jää viimeiseksi. Tasapuolisessa painotuksessa (33%) AHCL saa myös korkeimman prioriteettiä. Jos ympäristövaikutuksia painotetaan mahdollisimman vähän (0%), AHCL on prioriteettijärjestyksessä edelleen korkeimmalla, moreenipeite sen alapuolella toisena ja biotuhka/kuonapeite alimpana.

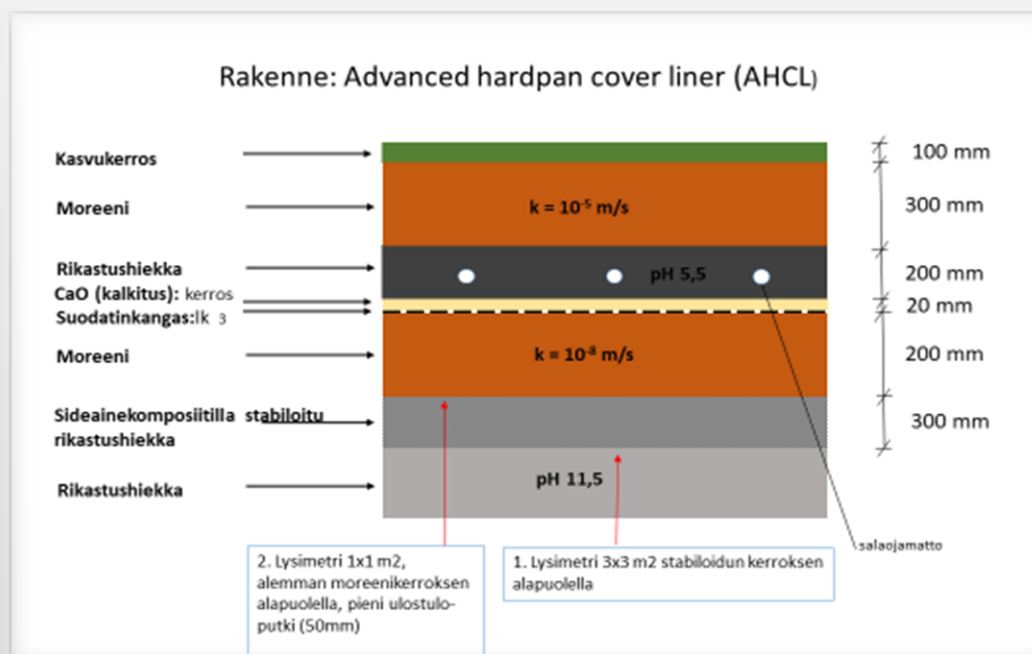


KUVA 23. HERKKYYSANALYYSI TEKNISEN TOIMIVUUDEN PERUSTEELLA (%).

Teknistä toimivuutta esittävä herkkyyssanalyysikaavio yläpuolella osoittaa, että painotettaessa maksimaalisesti teknisiä kriteerejä, stabilointi AAC-komposiitilla nousee korkeimmalle, sen alapuolella on toisena AHCL ja moreenipeite sekä biotuhka/kuonapeite jäävät alimmaksi lähes tasoissa. Painoarvoilla 33% AHCL saa korkeimman prioriteettiarvon. Minimaalessa teknisten tekijöiden painotuksessa (0%), moreenipeite on korkeimmalla ja stabilointi sementillä muita alempana.

Koerakenne

Koerakenne muodostui synteettisestä kaksoiskovakuorirakenteesta (Advanced Hardpan Cover Liner, AHCL), jonka rakenne on kuvattu alla. Koerakenteen pinta-ala oli 100 m².



KUVA 24. KAAVIOKUVA AHCL-KOERAKENTEESTA.

Kovakuorirakenteita voi muodostua luonnostaan rikastushiekkakerroksissa tai niiden pinnalla muodostaen haitallisten aineiden vaikutuksia stabiloivia vyöhykkeitä^{41 42 43}.

⁴¹ A. Schippers, P.G. Jozsa, W. Sand, Evaluation of the efficiency of measures for sulphidic mine waste mitigation, Appl. Microbiol. Biotechnol. 49 (1998) 698–701.

⁴² D.W. Blowes, E.J. Reardon, J.L. Jambor, J.A. Cherry, The formation and potential importance of cemented layers in active sulfide mine tailings, Geochim. Cosmochim. Acta 55 (1991) 965–978.

⁴³ R.G. McGregor, D.W. Blowes, The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings, J. Geochem. Explor. 76 (2002) 195–207.

Luonnostaan muodostuvat sulfaatit, karbonaatit ja sekundääriset silikaattimineraalit muodostavat sementtimäisiä kerroksia, jotka vähentävät läpäisevyyttä ja stabiloivat haitallisia aineita kovakuorikerrokseen. Luonnossa muodostuvien kovakuorikerrosten ongelmana on niiden epätasainen esiintyminen ja kerrospaksuuksien vaihtelu⁴⁴.

Koerakenne muodostui kahdesta lujittuvasta kerroksesta, joista ylempi koostui kalkin ja rikastushiekan välillä muodostuvasta tiivistä kerroksesta ja alempi stabiloidusta rikastushiekkakerroksesta. Lujitekerroksia erotti moreenikerros. Ylempi moreenikerros suojasi ylemmää kovakuori- ja rikastushiekkakerrosta, johon asennettiin ilmastusputkisto. Ylimmän kerroksen muodosti kasvukerros, joka ei sisältynyt koerakennusohjelmaan. Koerakenteen toimivuuden seuranta varten stabilointikerroksen alapuolelle ja alemman moreenikerroksen alle asennettiin lysimetrit.

Koerakenteen toteutus

Koerakenne toteutettiin loka-marraskuun vaihteessa. Sää rakentamisajankohtana oli poutainen ja lämpötila vaihteli välillä -5...5°C. Alla on kuvakooste koerakenteen toteutusvaiheista.



KUVA 25. SIDEAINESÄKIT PURETTIIN SIILOIHIN JA SEKOITETTIIN KESKENÄÄN.

⁴⁴ J. S. Ahna, H. Song, G-J. Yim, S. W. Ji, J-G. Kim (2011) An engineered cover system for mine tailings using a hardpan layer: A solidification/stabilization method for layer and field performance evaluation, Journal of Hazardous Materials, 197, 153-160.



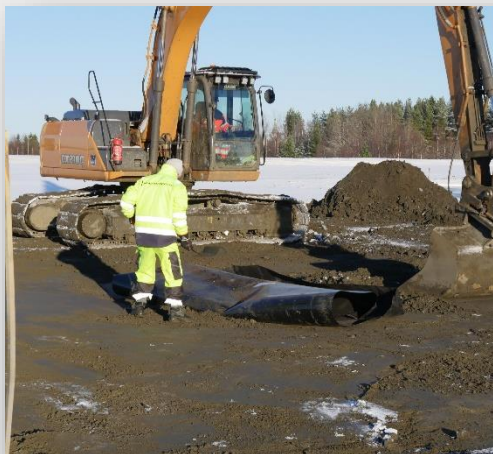
KUVA 26. SIDEAINESEOS SIIRRETTIIN HIHNAN KAUTTA TAKAISIN SIILOON. RIKASTUSHIEKKA OLI OMASSA SIILOSSA.



KUVA 27. RIKASTUSHIEKKA-ALLAS D VASEMMALLA JA KOEALUEEN PUHDISTUS LUMESTA OIKEALLA. KOERAKENNE TEHTIIN RIKASTUSHIEKKA-ALTAAN KUIVANA OLEVAAN PÄÄTYYN, JOHON RIKASTUSHIEKKA OLI Pengerretty.



KUVA 28. STABILOITU RIKASTUSHIEKKA KULJETETTIIN TRAKTORILLA SEKOITUSASEMALTA JA TIIVISTETTIIN KAIVINKONEELLA KERROKSITTAIN.



KUVA 29. ALEMMAN LYSIMETRIN ASENNUS VASEMMALLA STABILOIDUN RIKASTUSHIEKAN ALAPUOLELLE JA MURSKEELLA TÄYTETTY LYSIMETRI OIKEALLA.



KUVA 30. PIENEMMÄN YLEMMÄN LYSIMETRIN ASENNUS ALEMMAN MOREENIKERROKSEN ALAPUOLELLE.



KUVA 31. ALEMMAN MOREENIKERROKSEN TASAUSTA KAIVINKONEELLA VASEMMALLA JA TIIVISTYS TÄRYLLÄ OIKEALLA OLEVASSA KUVASSA.



KUVA 32. ALEMPI SUODATINKANGAS JA KALKKIKERROKSEN TASOITUS PÄÄLLE VASEMMALLA. OIKEALLA SALAOJAPUTKIEN ASENNUS YLEMPÄÄN RIKASTUSHIEKKAKERROKSEEN.



KUVA 33. RIKASTUSHIEKKAKERROKSEN TASAUS KAIVINKONEELLA SALAOJAPUTKIEN PÄÄLLE VASEMMALLA JA NÄYTTEENOTTO KERROKSESTA OIKEALLA.



KUVA 34. TASATTU RIKASTUSHIEKKAKERROS VASEMMALLA JA YLEMMÄN MOREENIKERROKSEN ASENNUSTA RIKASTUSHIEKKAKERROKSEN PÄÄLLE OIKEALLA.



KUVA 35. TASATTU YLEMPI MOREENIKERROS, JOSSA NÄKYVÄ SALAOJAPUTKIEN ULOSTULO VASEMMALLA. OIKEALLA NÄYTTEENOTTO YLEMMÄSTÄ MOREENIKERROKSESTA.

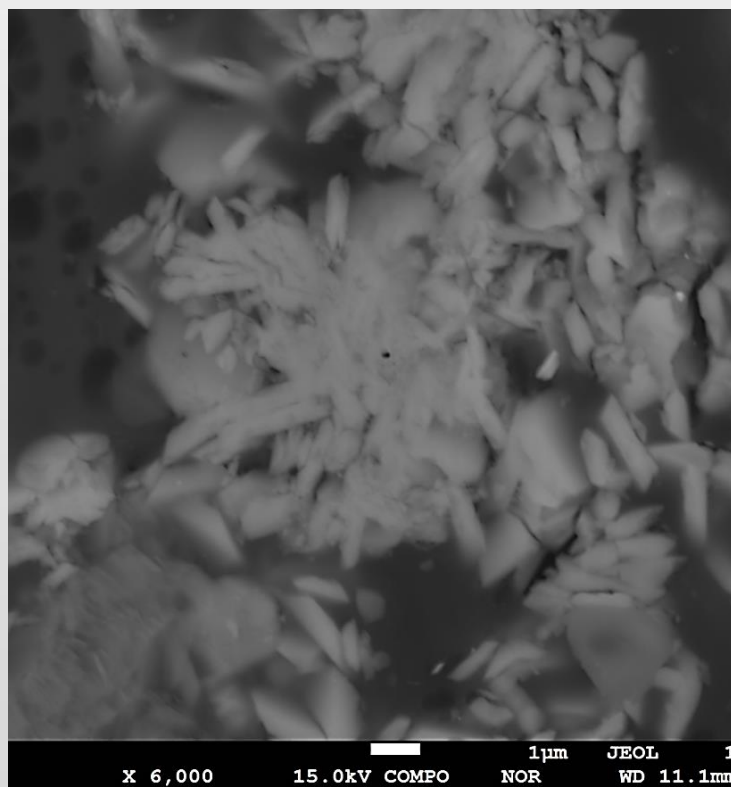
VIDEOLINKKI koerakenteen toteutuksesta: https://edukainuu-my.sharepoint.com/:v/g/person/minna_sarkkinen_kamk_fi/EV_2edsbF_hJponXXUQg1wEB_7TzWcwMoMMF-gwaBy-3UQg?e=nOQlmg

Loppuyhteenveto

Koerakenne on toiminut odotetusti kahden vuoden seurantajakson ajan sen rakentamisen jälkeen. Seurantahavaintojen perusteella kovakuorirakenne on muodostunut ja toimii suunnitellusti (kuva 36). Lysimetrikaivoissa ei ole ollut rakenteen läpi tapahtunutta vuotoa. Rakenneratkaisua kehitetään edelleen ja tutkitaan eri käyttösovellutuksia.

Tämän tutkimuksen perusteella:

- kaksoiskovakuorirakenne on toimiva rikastushiekka-altaiden peiterakennevaihtoehto,
- Magnesialla aktivoitu masuunikuona on tehokas stabilointisideaine sulfidisille rikastushiekoille,
- kovakuorirakenne saadaan muodostettua hallitusti rikastushiekkakerrokseen ja
- sovelletun monimuuttujamenetelmän avulla voidaan huomioida ympäristötekijät, tekninen toimivuus ja kustannukset sekä kohdekohtaisesti verrata ja optimoida eri peiterakennevaihtoehtoja.



KUVA 36. KUVA KOVAKUORIRAKENTEESSA SEKUNDAARISESTA RAUTASULFAATIN MUODOSTAMASTA KIDEKASAUMASTA.

LIITE 1 DIFFUUSIOTESTI MURSKATUSTA NÄYTTEESTÄ NEN7374. KOOSTE TULOKSISTA. PH N. 7,5 JA JOHTOKYKY FRAKTIOSSA 8, 2910 µS/CM.

Diffuusiotestin (NEN7345) max liukoisuusohjeavot (mg/m2/64d) kiinteytetyille maarakennusmateriaaleille.																		
Diffuusiotesti murskatusta näytteestä NEN7374																		
	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Cl	F	SO4
Fraktio 2/PC	0,060	10,684	0,003	0,054	0,025	0,142	<0,004	2,193	0,055	<0,004	2,608	0,190	<0,012	0,018	0,686	<560	<110	6340
Fraktio 2/AAC	0,048	13,522	0,003	0,048	0,019	0,099	<0,004	0,150	0,037	<0,004	2,619	0,116	0,044184	0,091	0,568	<560	<110	5680
Fraktio 3/PC	0,080	14,055	0,004	0,064	0,034	0,466	<0,006	5,494	0,104	<0,006	4,715	0,466	<0,018	0,031	1,967	<840	<165	14500
Fraktio 3/AAC	0,084	17,017	0,005	0,053	0,026	0,197	<0,006	0,353	0,049	<0,006	4,841	0,291	0,055231	0,223	1,130	<840	<165	12900
Fraktio 4/PC	0,135	17,174	0,006	0,075	0,034	0,872	<0,008	10,021	0,167	0,012924	6,969	0,818	<0,024	0,055	4,466	<1120	<220	24700
Fraktio 4/AAC	0,130	20,092	0,006	0,059	0,026	0,307	<0,008	0,621	0,061	<0,008	7,377	0,506	0,066277	0,446	2,051	<1120	<220	23200
Fraktio 5/PC	0,243	20,272	0,006	0,123	0,042	1,521	<0,01	18,220	0,274	0,018447	10,373	1,426	<0,03	0,110	6,888	<1400	<275	47700
Fraktio 5/AAC	0,215	23,217	0,006	0,183	0,032	0,626	<0,01	1,158	0,094	<0,01	11,684	0,888	0,088369	1,014	3,333	<1400	<275	46500
Fraktio 6/PC	0,423	22,606	0,007	0,133	0,057	2,439	<0,012	29,764	0,441	0,028399	14,248	2,251	<0,036	0,235	9,800	1800	<330	88200
Fraktio 6/AAC	0,295	25,945	<0,006	0,186	0,038	0,899	<0,012	1,772	0,127	<0,012	16,508	1,315	0,093963	1,727	4,796	<1680	<330	76700
Fraktio 7/PC	0,787	24,870	0,009	0,145	0,064	3,255	<0,014	53,004	0,768	0,031014	20,652	3,857	<0,042	0,510	12,777	3270	<385	170000
Fraktio 7/AAC	0,456	28,514	<0,007	0,189	0,045	1,505	<0,014	2,933	0,171	<0,014	22,469	2,193	0,101101	3,213	5,167	<1960	<385	147000
Fraktio 8/PC	1,201	27,191	0,009	0,154	0,070	3,884	<0,016	79,169	1,117	0,03512	26,368	5,781	<0,048	0,864	15,823	4830	<440	288000
Fraktio 8/AAC	0,687	30,795	<0,008	0,192	<0,048	2,013	<0,016	4,201	0,218	<0,016	26,775	3,061	0,101101	4,765	5,423	<2240	<440	246000
Lk 1A	41	600	1,1	29	140	51	0,4	14	50	120	3,7	1,4	29	230	200	18000	1300	27000
Lk 1B	140	2000	3,8	95	480	170	1,4	48	170	400	12	4,8	95	760	670	54000	4400	80000
SYKE max	58	2800	2,1	280	550	250	1,6	70	270	210	36	14	280	700	330	n.d.	2800	n.d.

LIITE 2. DIFFUUSIOTESTI MONOLIITTISESTA KAPPALEESTA. PH N. 7,0 JA JOHTOKYKY FRAKTIOSSA 8 SEMENTTISTABILOIDULLA RIKASTUSHIEKALLA 1217 $\mu\text{S}/\text{CM}$ JA KOMPOSIITTISTABILOIDULLA 638 $\mu\text{S}/\text{CM}$. KOOSTE TULOKSISTA.

Diffuusiotesti monoliittisesta kappaleesta CEN/TS 16637-2

Kappaleen avoinna olevan sivun pinta-ala: 0,0099 m², muut sivut peitetyt

	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Cl	F	SO ₄
Fraktio 2/PC	0,184	12,171	0,011	0,201	0,101	0,374		2,175	0,098			<0,2		0,161	2,121			31300
Fraktio 2/AAC	0,108	8,374		0,201		0,172		0,103	0,095			<0,2		0,227	1,277			30100
Fraktio 3/PC	0,347	18,339	0,016	0,221	0,167	0,478	<0,03	4,981	0,125	<0,03	<0,075	0,307	<0,075	0,312	2,506	<3630	<750	56600
Fraktio 3/AAC	0,213	12,619	<0,015	0,219		0,254	<0,03	0,190	0,128	<0,03	<0,075	<0,3	<0,075	0,600	1,277	<3630	<750	51100
Fraktio 4/PC	0,578	24,135	0,022	0,240	0,241	0,733	<0,04	8,620	0,161	<0,04	<0,1	0,554	<0,1	0,497	2,902	<4840	<1000	85900
Fraktio 4/AAC	0,361	17,083	<0,02	0,234		0,396	<0,04	0,301	0,128	<0,04	<0,1	0,483	<0,1	1,227	1,277	<4840	<1000	73200
Fraktio 5/PC	1,023	33,549	0,027	0,417	0,409	1,053	<0,05	18,169	0,229	<0,05	0,183	1,280	<0,125	0,838	3,310	<6050	<1250	146000
Fraktio 5/AAC	0,688	24,964	<0,025	0,420	0,146	0,598	<0,05	0,550	0,155	<0,05	<0,125	1,005	0,630303	3,116	1,277	<6050	<1250	113000
Fraktio 6/PC	1,561	42,712	<0,03	0,430	0,536	1,888	<0,06	30,824	0,336	<0,06	0,312	2,300	<0,15	1,151	3,797	<7260	<1500	218000
Fraktio 6/AAC	0,996	35,645	<0,03	0,420	0,214	0,971	<0,06	0,857	0,155	<0,06	0,150	1,522	0,630303	5,148	1,277	<7260	<1500	155000
Fraktio 7/PC	2,373	53,535	<0,035	0,452	0,685	2,668	<0,07	58,775	0,646	<0,07	0,569	4,402	<0,175	1,523	4,304	<8470	<1750	373000
Fraktio 7/AAC	1,298	48,650	<0,035	0,420	0,334	1,424	<0,07	1,470	0,202	<0,07	0,241	2,217	0,630303	7,839	1,277	<8470	<1750	240000
Fraktio 8/PC	3,173	63,635	<0,04	0,475	0,790	3,673	<0,08	85,295	0,965	<0,08	0,823	6,270	<0,2	1,832	5,005	<9680	<2000	539000
Fraktio 8/AAC	1,575	61,319	<0,04	0,420	0,405	1,793	0,091627	2,102	0,250	<0,08	0,333	3,288	0,630303	10,048	1,277	<9680	<2000	330000
Lk 1A	41	600	1,1	29	140	51	0,4	14	50	120	3,7	1,4	29	230	200	18000	1300	27000
Lk 1B	140	2000	3,8	95	480	170	1,4	48	170	400	12	4,8	95	760	670	54000	4400	80000
SYKE max	58	2800	2,1	280	550	250	1,6	70	270	210	36	14	280	700	330	n.d.	2800	n.d.

LIITE3. RAKEISELLE MATERIAALILLE ANNETUT MAX LIUKOISUUSARVOT (KOLONNITESTI NEN7343 14405) LIUENNEIDEN AINEIDEN MÄÄRÄLLE (L/S 10), KUN MATERIAALIN PAKSUUS 0,7 M.

Hollantilaisten raja-arvojen mukaan (mg/kg).

	Be	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb
L/S10_PC	<0,01	0,47	2,3	0,062	0,017	<0,04	<0,5	<0,004	0,037	0,078	<0,05	0,063	0,12	10,5	2	<0,002	<0,01	<0,01
L/S10_AAC	<0,01	0,62	2,1	0,34	<0,01	<0,04	<0,5	<0,004	<0,01	0,023	<0,05	0,015	0,075	18,2	0,094	<0,002	<0,01	<0,01
Lk 1 (hollantilainen)				1,6	1,3				1,1	0,72	3,8	0,88	0,044		0,28	0,032	0,27	0,045
Lk 2 (hollantilainen)				32	12				3,7	3,5	15	7	0,1		0,91	0,066	2,4	0,43

	Ba	Hg	Tl	Pb	U	Ca	K	Mg	Na	P	S	Si	Fluoridi	Kloridi	sulfaatti	pH	Johtokyky
L/S10_PC	0,26	<0,002	<0,002	<0,005	<0,001	6800	1100	18	520	<0,5	6400	34	<5	62	17100	9,6	220
L/S10_AAC	0,3	<0,002	<0,002	<0,005	<0,001	6600	750	3,8	440	<0,5	5800	65	<5	<50	15700	10,2	210
Lk 1 (hollantilainen)	5,5	0,018		1,9		0,032							13	600	750		
Lk 2 (hollantilainen)	58	0,076		8,7		0,066							100	8800	22000		

SYKE:n raja-arvojen mukaan (mg/kg).

	Be	B	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb
L/S10_PC	<0,01	0,47	2,3	0,062	0,017	<0,04	<0,5	<0,004	0,037	0,078	<0,05	0,063	0,12	10,5	2	<0,002	<0,01	<0,01
L/S10_AAC	<0,01	0,62	2,1	0,34	<0,01	<0,04	<0,5	<0,004	<0,01	0,023	<0,05	0,015	0,075	18,2	0,094	<0,002	<0,01	<0,01
Lk 1 (SYKE)				2,2	2				1,2	1,1	1,5	0,14	0,06		0,31		0,85	0,12
Lk 2 (SYKE)				10	5,1				2,1	2	2,7	0,85	0,098		0,5		3,1	0,4

	Ba	Hg	Tl	Pb	U	Mg	P	Ca	K	Na	S	Si	Fluoridi	Kloridi	sulfaatti	pH	Johtokyky
L/S10_PC	0,26	<0,002	<0,002	<0,005	<0,001	18	<0,5	6800	1100	520	6400	34	<5	62	17100	9,6	220
L/S10_AAC	0,3	<0,002	<0,002	<0,005	<0,001	3,8	<0,5	6600	750	440	5800	65	<5	<50	15700	10,2	210
Lk 1 (SYKE)	10	0,014		1				0,011					11	250	1500		
Lk 2 (SYKE)	28	0,032		1,8				0,015					25	n.d.	n.d.		

LIITE 4. KOLMELLA ERI MENETELMÄLLÄ SAATUJEN TULOSTEN VERTAILU. KELTAINEN= MERKITTÄVIMMÄT EROT AAC- JA PC-STABILOIDUISSA RIKASTUSHIEKOISSA AAC-STABILOIDUN HYVÄKSI, PUNAINEN= MERKITTÄVÄ ERO PC-STABILOIDUN RIKASTUSHIEKAN HYVÄKSI, SININEN=KORKEAMPI LIUKOISUUS MURSKATUSTA NÄYTTEESTÄ, VIHREÄ=KORKEAMPI LIUKOISUUS MONOLIITTISESTÄ NÄYTTEESTÄ, ORANSSI=KORKEAMPI LIUKOISUUS KOLONNITESTISSÄ.

	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Cl	F	SO4
Murskattu fraktio 8/PC	1,201	27,191	0,009	0,154	0,070	3,884	<0,016	79,169	1,117	0,035	26,368	5,781	<0,048	0,864	15,823	4830	<440	288000
Murskattu fraktio 8/AAC	0,687	30,795	<0,008	0,192	<0,048	2,013	<0,016	4,201	0,218	<0,016	26,775	3,061	0,101	4,765	5,423	<2240	<440	246000
Monoliittinen fraktio 8/PC	3,173	63,635	<0,04	0,475	0,790	3,673	<0,08	85,295	0,965	<0,08	0,823	6,270	<0,2	1,832	5,005	<9680	<2000	539000
Monoliittinen fraktio 8/AAC	1,575	61,319	<0,04	0,420	0,405	1,793	0,092	2,102	0,250	<0,08	0,333	3,288	0,630	10,048	1,277	<9680	<2000	330000
L/S10_PC	0,063	0,26	<0,002	<0,004	0,017	0,078	<0,002	2	0,037	<0,005	<0,01	0,12	<0,01	0,062	<0,05	62	<5	17100
L/S10_AAC	0,015	0,3	<0,002	<0,004	<0,01	0,023	<0,002	0,094	<0,01	<0,005	<0,01	0,075	<0,01	0,34	<0,05	<50	<5	15700