



GEOSOLUTIONS

Hienon romuttamojätteen stabilointi betoniin

Tiivistelmä GeoSolutions-projektissa tutkitun romuttamoalitteen stabiloinnista betoniin.

Minna Sarkkinen, Seppo Gehör ja Kauko Kujala



KAMK - University
of Applied Sciences



KAINUUN VOIMA OY



Juuan
Dolomiittikalkki Oy



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

GEOSOLUTIONS

Hienon romuttamojätteen stabilointi betoniin

Projektin toteutus

GeoSolutions-projektin päärahoittaja oli EAKR ja osarahoittajia Tapojärvi Oy, Juuan Dolomiittikalkki Oy, Kainuun Voima Oy, Solid Liner Oy ja Kajaanin Romu Oy. Projekti 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 projektin osallistuneille!

ISBN 978-952-7219-47-8,
B 95

B. Raportteja ja
selvityksiä
ISSN 1458-915X

Kajaani
Kajaanin
ammattikorkeakoulu
2019

www.geosolutions.fi

Tiivistelmä

Autojen romutusprosessissa syntyvän hienon prosessialitteen eli fluffin (tai Automotive Shredder Residue, ASR) osuus on noin 20-25 % ja määrän on arvioitu kasvavan. Tällä hetkellä suurin osa fluffista sijoitetaan kaatopaikoille. Kaatopaikkasijoitus on kuitenkin huono vaihtoehto fluffin sisältämän DOC:n ja raskasmetallien vuoksi.

ASR-jätteen hyötykäyttö rakentamisessa edellyttää sen inertiksi tekemistä eli raskasmetallien kapselointia liukenemattomaan muotoon. Raskasmetallien kapselointi sideaineiden avulla on yksi yleisimpiä menetelmiä lämpökäsittelyn ohella vähentää raskasmetallien aiheuttamia haittavaikutuksia ympäristössä. GeoSolutions-projektissa tutkittiin romuttamoprosessissa syntyvän hienoimman alitteen stabilointia betonissa korvaamalla filleri alitteella. Koetutkimuksissa vertailtiin eri sementtilaaduilla valmistettujen betonien mekaanisia ja stabilointiominaisuuksia käyttämällä kriteerinä MARA-rajat.

Tulosten perusteella eri sementtilaatujen stabilointitehokkuus vaihteli. Stabiloinnin kannalta parhaat tulokset saatiin käyttämällä portlandseossementtejä. Alkaliaktivoidulla sementillä saavutettiin kuitenkin selvästi parempi puristuslujuus. Kokonaisarvion perusteella paras tulos saatiin alkaliaktivoidulla sementillä, kun arvioissa huomioitiin sideaineiden ympäristövaikutukset, tekniset ominaisuudet ja kustannukset.

Sisällys

Projektin toteutus.....	2
Tiivistelmä	2
Johdanto.....	4
Fluffin hyötykäyttö rakennusmateriaaleissa.....	5
Tutkimuksessa käytetyt materiaalit	6
Sementit	6
Stabiloitava romuttamojättemateriaali.....	8
Prosessialitteen koostumus.....	9
Koetutkimuksessa käytetyt betonireseptit	11
Betonin valmistusprosessi	12
koebetonien puristuslujuus ja säänkestävyys.....	19
Betonimassojen stabilointitehokkuus	21
Koemassojen kustannukset ja ympäristövaikutukset	23
Koemassojen tulosten integrointi	24

Johdanto

Autojen romutusprosessissa syntyvän hienon prosessialitteen eli fluffin (Automotive Shredder Residue, ASR) osuus on noin 20-25 %¹ ja määrän on arvioitu kasvavan. Hienon ASR-jätteen koostumus vaihtelee suuresti ja koostumukseen vaikuttavat syötteen laatu ja käsittelyprosessi. Tyypillisesti ASR sisältää muovia, inerttiä hienoaainesta, tekstiiliä, metallijäämiä, kumia ja selluloosaa²³. Erilaisia käsittelyprosesseja on kehitetty ASR:n kierrätyksen parantamiseksi. Käsittelymenetelmät ovat pääasiassa mekaanisia lajittelumenetelmiä ja termisiä menetelmiä energian tuottamiseksi. Myös esikäsittelymenetelmiä on kehitetty tarkoituksena vähentää haitallisten aineiden määrää ennen varsinaista prosessointia⁴. ASR luokitellaan usein myös partikkelikoon mukaan hienon osan rakeisuuden vaihdella $<2 \dots <20 \text{ mm}^5$. Hienoimmalla ASR-fraktiolla on suurin tuhka- ja pienin öljypitoisuus sekä matalin lämpöarvo. ASR:n jälkikäsittelyä varten se voidaan luokitella kevyeen, raskaaseen ja hiekka-ainekseen, joista kevyt osa (n. 75 %) erotetaan yleisesti ilmaluokituksella. ASR:n heterogeisuus vaikeuttaa sen luokittelua ja karakterisointia ja on syy, miksi käsittelyssä yhdistellään tavallisesti eri menetelmiä kuten ilmaluokittelua, magneetti- tai pyörrevirtaerotusta (eddy current) ja seulontaa tai rumpuerotusta⁶. Pellettoimalla voidaan lisätä ASR:n tiheyttä kuljettamisen helpottamiseksi.

Tällä hetkellä suurin osa fluffista sijoitetaan kaatopaikoille materiaalin heterogeisuuden vuoksi. Direktiivin 2000/53/EC tavoitteena on 95 % kierrätysaste autoille, jonka toteuttaminen vaatii uusien menetelmien kehittämistä myös ASR:n kierrätykselle. Tutkimuksissa suositeltavana käsittelyvaihtoehtona pidetään kierrätyksen ja energiaksi muuttamisen yhdistämistä. Kaatopaikkasijoitusta pidetään huonoimpana vaihtoehtona DOC:n ja raskasmetallien vuoksi.

¹ Cossu, R., Lai, T. (2015) Automotive shredder residue (ASR) management: An overview, Waste Manage. 45, 143–151.

² Cossu, R., Lai, T. (2013) Washing treatment of automotive shredder residue (ASR). Waste Manage. 33,8, 1770–1775.

³ Morselli, L., Santini, A., Passarini, F., Vassura, I. (2010) Automotive shredder residue (ASR) characterization for a valuable management. Waste Manage. 30,11, 2228–2234.

⁴ Granata, G., Moscardini, E., Furlani, G., Pagnanelli, F., Toro, L. (2011) Automobile shredded residue valorisation by hydrometallurgical metal recovery. J. Hazard. Mater. 185,1,44–48.

⁵ Tai H.-S., Chang S.-C., Su W.-S. (2006) Investigation of the derived fuel rod formation from auto shredder residue using an extrusion apparatus, Environ. Prog. 25,235–242.

⁶ Vermeulen I., Van Caneghem J., Block C., Baeyens J., Vandecasteele C. (2011) Automotive shredder residue (ASR): reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorization. J. Hazard. Mater. 190,1,8–27.

Fluffin hyötykäyttö rakennusmateriaaleissa

Hienokokaisen (<20 mm) fraktion erottaminen rauta- ja ei-rautapitoisista metalleista, muoveista yms. on hankalaa. Hienolla fraktiolla on myös huonoimmat poltto-ominaisuudet, jonka seurauksena useissa tutkimuksissa on ehdotettu hienojakoisen ASR-fraktion suoraa käyttöä erilaisissa rakennusmateriaaleissa kuten komposiiteissa, betonissa ja asfaltissa⁷. Useat sovellutukset ovat vielä tutkimusvaiheessa ja vaativat lisäselvitystä.

ASR-jätteen hyötykäyttö rakentamisessa edellyttää sen inertiksi tekemistä eli raskasmetallien kapselointia liukenemattomaan muotoon. Hieno ASR-fraktio voidaan käyttää suoraan fillerinä betonissa tai sideaineena ja kiviaineena asfaltissa⁸⁹. ASR voi asfalttiin lisättynä vähentää asfaltin hapettumista ja lisätä elastisuutta estäen halkeilua.

Synteettisen kiviaineksen valmistusta ASR:stä käytettäväksi betoneissa ja asfaltissa pidetään lupaavana vaihtoehtona erityisesti maissa, joissa kiviaineksesta on puutetta¹⁰. Kiviaineksen käyttö voi kuitenkin vaatia soveltuvaa esikäsittelyä¹¹¹²¹³¹⁴. ASR:n sisältämä sinkki ja lyijy hidastavat tavallisen portlandsementin sitoutumista¹⁵, jonka vuoksi on ehdotettu termo-kemiallista käsittelyä synteettisen kiviaineksen valmistamisessa tavallista sementtiä käytettäessä tai suoraa sekoitusta normaaliin betoniin käyttämällä kalsiumsulfoaluminaattisementtiä. Liukoisuustutkimusten mukaan menetelmä kapseloi raskasmetallit hyvin.

Muovipitoista fluffia on käytetty lecasoratyypisten pellettien valmistuksessa käyttämällä seosaineena savea¹⁶. Italiassa on tutkittu betonia, jossa kiviaine on

⁷ Vermeulen I., Van Caneghem J., Block C., Baeyens J., Vandecasteele C. (2011) Automotive shredder residue (ASR): reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorization. *J. Hazard. Mater.* 190,1,8–27.

⁸ Rossetti V.A., Di Palma L., Ferraro A. (2011) Production and Characterization of Aggregate from Nonmetallic Automotive Shredder Residues, *J. of Mat. in Civ. Eng. ASCE*, June,747-751.

⁹ Dutta U., Ibadat I., Klempner D., Keshawar M.S. (1997) Laboratory performance of ASR modified asphalt binders, *J. Elastomers Plast.* 29,326–342.

¹⁰ Rossetti V.A., Di Palma L., Ferraro A. (2011) Production and Characterization of Aggregate from Nonmetallic Automotive Shredder Residues, *J. of Mat. in Civ. Eng. ASCE*, June,747-751.

¹¹ Xu G.J., Watt D.F., Hudec P.P., MacDonald K.A., Northwood D.O. (1995) Recycling automotive related wastes in concrete. *J. Mater. Process. Technol.* 48,1,385–390.

¹² Pera J., Ambroise J., Chabannet M. (2004) Valorization of automotive shredder residue in building materials. *Cem. Concr. Res.* 34,4,557–562.

¹³ Alunno Rossetti V., Di Palma L., Ferraro A. (2011) Production and characterization of aggregate from nonmetallic automotive shredder residues. *J. Mater. Civ. Eng.* 23,6,747–751.

¹⁴ Alunno Rossetti V., Di Palma L., Medici F. (2006) Production of aggregate from nonmetallic automotive shredder residues. *J. Hazard. Mater.* 137,2,1089–1095.

¹⁵ Péra J., Ambroise J., Chabannet M. (2004) Valorization of automotive shredder residue in building materials. *Cem. Concr. Res.* 34,4, 557–562.

¹⁶ Liu P., Farzana R., Rajarao R., Sahajwalla V. (2017) Lightweight expanded aggregates from the mixture of waste automotive plastics and clay, *Const. Build. Mat.* 145,283–291.

korvattu kevytsoran tapaisella pelletoidulla ja granuloidulla fluffilla, jossa sideaineena käytettiin lentotuhkaa ja sementtiä (kuva alla)¹⁷¹⁸.

Raskasmetallien kapselointi sementtien avulla on yksi yleisimpiä menetelmiä lämpökäsittelyn ohella vähentää raskasmetallien aiheuttamia haittavaikutuksia ympäristössä. Sementtistabiloinnissa raskasmetallit kapseloidaan sekoittamalla ne sideaineeseen, joka kiinteyttää ja sitoo raskasmetallit. Lujuusreaktion seurauksena muodostuu kestävä rakenne, joka eristää haitta-aineet ympäristöstä fysikaalisesti ja kemiallisesti. Stabiloinnin tarkoitus on vähentää haitallisten aineiden liukenemistä ja ehkäistä ympäristövaikutuksia. GeoSolutions-projektissa tutkittiin ja pyrittiin kehittämään fluffin käyttöä fillerin korvikkeena betonissa tai betonimurskeena maarakentamisessa.

Tutkimuksessa käytetyt materiaalit

SEMENTIT

Perinteisesti yleisimmin käytetty sementti raskasmetallien kapseloinnissa on ollut *Portlandsementti (OPC)*. OPC koostuu neljästä päälinkkerifaasista (aliitti, beliitti, aluminaatti ja ferriitti), jotka muodostavat eri hydrataatiotuotteita, joista yleisimmin kalsiumsilikaattihydraattia (CSH) sekä portlandiittia. OPC:n käytön suosio perustuu sen koostumuksen tasalaatuisuuteen sekä hyvään tuntemukseen sen sitoutumis- ja lujittumisprosesseista. Vaaralliseksi luokitelluiden jättemateriaalien, kuten esimerkiksi öljypitoisten liejujen, sementtipohjainen stabilointi on hyvä vaihtoehto, jos sen avulla voidaan muuttaa jätteen luokitusta vaarattomaksi ja välttää kustannuksiltaan kalliimpien käsittelymenetelmien kuten polttamisen käyttö. Kiinteät jättemateriaalit toimivat sementin kanssa sekoitettaessa joko runkoaineena tai saattavat vaikuttaa sideaine- ja stabilointireaktioon. Tyypillisiä tunnettuja vaikutuksia ovat sitoutumisreaktion hidastuminen tai nopeutuminen, betonin kestävyys heikkeneminen ja lujuuden heikkeneminen. Portlandsementillä stabiloidut jätteet ovat lisäksi herkkiä erilaisille fysikaalisille ja kemiallisille vauriomekanismeille. Vaurioitumisherkyyteen vaikuttavat useat tekijät kuten läpäisevyys, kemiallinen ja mineraloginen koostumus sekä mikrorakenne.

Viime vuosikymmenellä on yleistynyt myös muiden sementtityyppien kuten alkaliaktivoitujen sementtien tutkimus ja käyttö stabilointisideaineena. *Alkali-*

¹⁷ Colangelo F., Messina F., Di Palma L., Cioffi R. (2017) Recycling of non-metallic automotive shredder residues and coal flyash in cold-bonded aggregates for sustainable concrete, *Composites Part B* 116,46-52.

¹⁸ Rossetti V.A., Di Palma L., Ferraro A. (2011) Production and Characterization of Aggregate from Nonmetallic Automotive Shredder Residues, *J. of Mat. in Civ. Eng. ASCE*, June,747-751.

aktivoitunut sementti (AAC) ovat normaaleille Portlandsementille vaihtoehtoisia sementtejä, joilla on todettu olevan parempia kestävyysominaisuuksia kuin OPC:llä. Useita eri materiaaleja voidaan käyttää AAC:n lähtöaineina, joista yleisimpiä ovat masuunikuona, metakaoliini ja kivihiilientotuha. Geopolymeerisementit (GP) ja alkaliaktivoitunut kuonat (AAS) luokitellaan molemmat alkali-aktivoituihin sementteihin niiden samankaltaisten ominaisuuksien pohjalta, mutta erotetaan lähtöaineiltaan ja reaktiotuotteiltaan. AAS muodostuu tyypillisesti alkalien ja Ca-Si pitoisen materiaalin välisessä reaktiossa muodostaen pääasiassa kalsiumsilikaattihydraattia (CSH). GP muodostuu tyypillisesti Si-Al pitoisen materiaalin ja alkalien välisessä reaktiossa muodoten lähinnä amorfista epäorgaanista polymeerisidosta. Alkaliaktivoitujen kuonien aktivaattoreina käytetään yleisimmin natrium- ja kaliumhydroksideja ja -silikaattihydraatteja, jotka nostavat sementtipastan pH-arvoa, joka edistää jätteissä olevien reaktiivisten metallien korroosiota. Myös tutkimuksissa, joissa hiilivetyjä sisältävää pilaantunutta maa-ainesta stabiloitiin sementillä, todettiin jätteen kapseloituvan sementtimatriisiin makrorakenteena ja liukoisuuden lisääntyvän sementtirakenteen rikkoutuessa ja korkeamman sementtimäärän lisäävän liukoisuutta¹⁹. Siten edullisinta on pyrkiä lisäämään reaktiivisuutta nostamatta pH-arvoa.

Matala-alkalisia sementtejä ovat esimerkiksi seossementit, jotka sisältävät suuria määriä masuunikuonaa, kivihiilientotuhaa ja lisäksi mikrosilikaattia sekä 5-30 % Portlandsementtiä. Muita matala-alkalisia sementtejä ovat OPC-pohjaiset kalsiumsilikaattisementit, kalsiumalumiinatsementit, fosfaattisementit ja magnesiasementit, jotka ovat kuitenkin kalliimpia kuin matala-alkaliset kuonapohjaiset sideaineet. Matala-alkalisten AAS-sideaineiden aktivaattoreina voidaan käyttää esimerkiksi magnesiumia tai sulfaattiaktivaattoreita²⁰. PC on myös yleisesti käytetty kuonan aktivaattori. Matala-alkalisten AAS-sideaineiden käyttöä betoneissa rajoittaa yleensä niiden hidastuva lujuuden kehitys ja matalampi loppulujuus. Mikrosilikaatin ja kuonan käytön seurauksena sementtipastan huokosveden alkalisuus on matala ja mikrorakenne poikkeaa pelkän PC-pastan rakenteesta siten, että C-S-H geelin CaO/SiO₂ suhde pienempi ja voi sitoa alkaliioneja²¹. Mikrosilikaatin sen korkean SiO₂-osuuden ansiosta alentaa tehokkaammin alkalisuutta kuin kuona. Masuunikuona-mikrosilika-PC sementeissä sideainekomponenttien reaktiot tapahtuvat yhtäaikaaisesti, mutta eri nopeudella. Masuunikuonan reaktio voi kestää 3,5 vuotta, kun taas mikrosilikaatin reaktionopeus ja -asteeseen vaikuttaa sen suhteellinen määrä ja pH²².

¹⁹ Athanasios K. Karamalidis, Evangelos A. Voudrias, Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge:

Leaching behavior of alkanes and PAHs

²⁰ N.C. Collier, X. Li, Y. Bai, N.B. Milestone, Journal of Nuclear Materials 464 (2015) 128–134

²¹ J.L. García Calvo, A. Hidalgo, C. Alonso, L. Fernández Luco, Cement and Concrete Research 40 (2010) 1290–1297

²² Barbara Lothenbach, Daniel Rentsch, Erich Wieland, Physics and Chemistry of the Earth 70–71 (2014) 3–16

Seossementtien pH pysyy arvossa 11-12 riippuen sementin ja silikan määrästä, joka on selvästi alempi kuin PC-sementeillä mitattu²³.

Stabiloinnin kannalta stabilointimassan vesisideainesuhde tulisi olla mahdollisimman pieni, mutta riittävä maksimaalisen tiivistymisen kannalta pienen vedenläpäisevyyden saavuttamiseksi, massan puristuslujuuden tulisi olla riittävä mekaanisen kestävyuden ja säänkestävyyden kannalta (min. 10 MPa). Stabilointimassan jätemäärä pyritään maksimoimaan suhteessa sideaineeseen ja mahdollisesti käytettäviin kiviaineksiin käyttötarkoituksesta riippuen (betoni, maarakennus, mahd. muu). Sideainemäärän ja käytettävien osa-aineiden kustannusten tulisi olla mahdollisimman alhainen. Lisäksi stabilointimenetelmän tavoitteena on olla yksinkertainen, helppo toteuttaa ja laitekustannuksiltaan pieni.

STABILOITAVA ROMUTTAMOJÄTEMATERIAALI

Tutkittu jättemateriaalinäyte oli otettu Kajaanin Romu Oy:n Mustakankaan käsittelylaitoksen kasasta keväällä 2018. Syksyllä 2018 valettiin kaksi betonikoeblokkia, joihin jättemateriaali toimitettiin erikseen. Tyypillisesti se sisältää vaihtelevia määriä seuraavia aineita:

Tekstiiliä ja vaahtomuovia	27 %
Muovia	20 %
Metalleja	1-5 %
Kumia	3-7 %
Selluloosaa	0-1 %
Hienoaineita	45 %

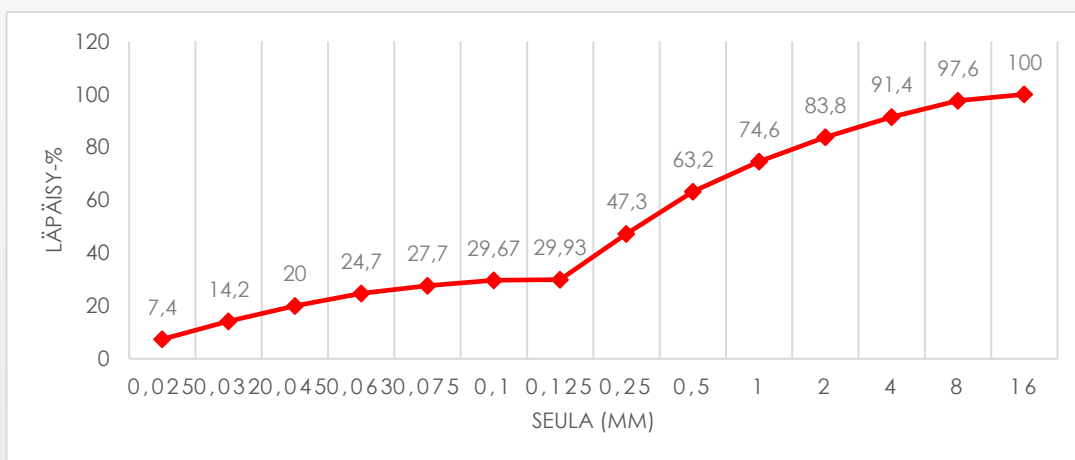


KUVA 1. HIENO ROMUTTAMOPROSESSIALITE.

²³ Barbara Lothenbach, Gwenn Le Saout, Mohsen Ben Haha, Renato Figi, Erich Wieland, Cement and Concrete Research 42 (2012) 410–423

Prosessialitteen koostumus

Betonikokeissa käytetty prosessialite oli koostumukseltaan heterogeeninen. Alitteen kosteusprosentti oli keväällä 23,8 % ja noin 15 % syksyllä. Alitteen pH oli 8,6. Näytteen partikkelikokojakauma määritettynä seulomalla ja alle 0,125 mm osuus tuuliseulalla on esitetty alla olevassa kaaviossa.



KUVA 2. HIENON PROSESSIALITTEEN RAEKOKOJAKAUMA.

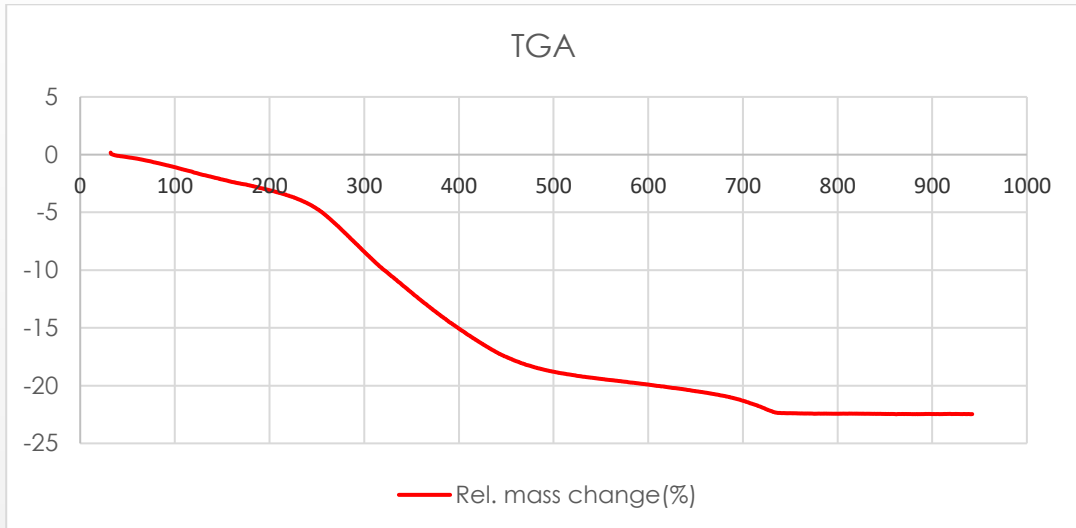
Alitteesta toimitetusta näyte-erästä seulottiin alle 0,125 mm osuus, jonka koostumus XRF-analyysin perusteella on alla olevassa taulukossa.

TAULUKKO 1. ALITTEEN XRF-ANALYYSIN TULOS.

%	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Ti	V	Cr
Alite <125µm	0,863	2,71	9,62	26,02	0,91	0,11	1,18	8,83	0,66	0,01	0,10

%	Br	Sr	Mo	Ag	Ba	Pb	Mn	Fe ₂ O ₃	Ni	Cu	Zn
Alite <125µm	0,03	0,28	0,01	0,12	0,52	1,57	0,26	28,95	0,07	0,75	3,16

Klorideilla, vapaalla kalkilla ja magnesiumilla sekä sulfaateilla voi olla betonien kestävyttä heikentävä vaikutus. Kloridi- ja nitraattisuolat vaikuttavat kiihdyttävästi sementin hydrataatioon. Analyysien perusteella, alite sisälsi sulfaattia. Alitteen orgaanisen aineksen osuutta indikoi alitteesta tehty TGA (Kuva alla), jonka perusteella orgaanisen aineksen osuus oli n. 23 %.



KUVA 2. PROSESSIALITTEEN TGA-KUVAAJA.

Orgaanisella aineksella on suuri merkitys betonin lujuuden kehitykseen, joka on yleensä heikentävä²⁴. Näyte sisälsi vaaralliselle jätteelle yli sallitun määrän kuparia, lyijyä ja sinkkiä (Taulukko alla).

TAULUKKO 2. ALITTEEN PITOISUUKSIA VERRATTUNA VAARALLISEN JÄTTEEN KAATOPIIKAN RAJA-ARVOIHIN.

	Prosessialitteen pitoisuuksia (mg/kg)									
	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg	Zn mg/kg	C10- C40	TOC (%)
Alite	25	15	490	<u>5130</u>	490	<u>4950</u>	120	<u>15100</u>	5300	5.7
Raja-arvo	1000	100	1000	2500	1000	2500	2500	2500	(10000)	6

Orgaaniset aineet vaikuttavat sementin hydrataatiokinetiikkaan hidastaen reaktioita muodostamalla suojaavan kalvon sementtipartikkeleiden ympärille, joka edelleen estää kalsiumhydroksidin muodostumista ja kiihdyttää sementtipartikkelin ympärille varhaisessa vaiheessa muodostuvan kolloidisen C-S-H:n geelin muuntumista²⁵. Orgaanisten jätteiden stabilointi on mahdollista esimerkiksi sorptiolla. Vaikka orgaanisella materiaalilla on laaja sementillä käsitelty pinta-ala, pinnat ovat polaarisia ja siten eivät sovellu orgaanisen materiaalin poistoon kiinteänä yhdessä ei-polaarisen pinnan kanssa²⁶. Orgaaninen aines yleensä muodostaa heikon sidoksen sementin kanssa, jolloin niiden pysyvyys riippuu olennaisesti fysikaalisesta tarttumisesta²⁷. Kapseloinnin

²⁴ A. Faschan, M. Tittlebaum, F. Cartledge, H. Eaton, Environ. Monit. Assess. 18 (1991) 145–161.

²⁵ D. Botta, G. Dotelli, R. Biancardi, R. Pelosato, I.N. Sora, Waste Management. 24 (2004) 207–216.

²⁶ B. Batchelor, Waste Management. 26 (2006) 689–698.

²⁷ S. Trussell, R.D. Spence, Waste Management. 14 (6) (1994) 507–519.

(liukoisuuden) kannalta haitallisia ovat kupari, sinkki ja lyijy, joiden kokonaispitoisuudet ylittävät vaarallisen raja-arvot, mutta eivät liukoisia pitoisuuksia. Liukoiset pitoisuudet ylittävät pysyvän jätteen raja-arvon kuparin, molybdeenin, lyijyn antimonin, sulfaattien ja TDS:n osalta. Toisaalta, alitteen hienojakoisella ja heterogeenisellä koostumuksella voi olla positiivinen vaikutus betonimassan koossapysyvyyteen erityisesti notkeissa massoissa.

Koetutkimuksessa käytetyt betonireseptit

Koemassoja tehtiin tavallisella sementillä (OPC1-3), alkali-aktivoitulla sementillä (AAC) ja geopolymeerisementillä (GPC). Resepteissä käytetyt seossuhteet on esitetty alla olevissa taulukoissa.

TAULUKKO 3. ALITTEEN ESISEKOITUKSESSA KÄYTETYT SEOSSUHTEET.

ASR esisekoitus (%)						
	ASR	NaOH 2M	NaOH 5M	NaSilikaatti	TKF	Total
OPC1	8.7	3.8	0.0	0.0	0.0	12.5
OPC2	8.0	4.8	0.0	0.0	3.5	16.3
OPC3	8.3	4.7	0.0	0.0	3.5	16.6
AAC1	8.6	0.0	9.5	1.9	0.0	20.0
GPC1/2	7.6	4.4	0.0	0.0	3.2	15.2

TAULUKKO 4. ESISEKOITETTUIHIN SEOKSIIN LISÄTYT BETONIOSA-AINEET.

Betonimassojen seossuhteet (%)													
	vesi	NaOH 10M	NaSil	TKM/FC 0/10 mm	TKM/FC 10/20 mm	OPC	MKJ	FA	Go.	Dol.	MgO	AEA	SP
OPC1	8.0	0.0	0.0	36.9	25.9	16.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.002	0.05
OPC2	4.0	0.0	0.0	39.1	25.9	8.0	6.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.02	0.2
OPC3	4.1	0.0	0.0	40.6	26.9	8.3	6.2	0.0	0.0	0.4	0.8	0.02	0.2
AAC1	2.8	0.0	0.0	34.3	23.9	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GPC1/2	1.0/0	4.8	1.9	39.0	25.0	0.0	7.1	7.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0

MKJ= masuunikuona
FA= kivihiilientotuhka
Go.= götiitti
Dol. = dolomiittifilleri

TKM= teräskuonamurske
TKF= teräskuonafilleri
FC= ferrokromikuona

MgO = magnesiumoksidi
AEA= huokoistin
SP= notkistin

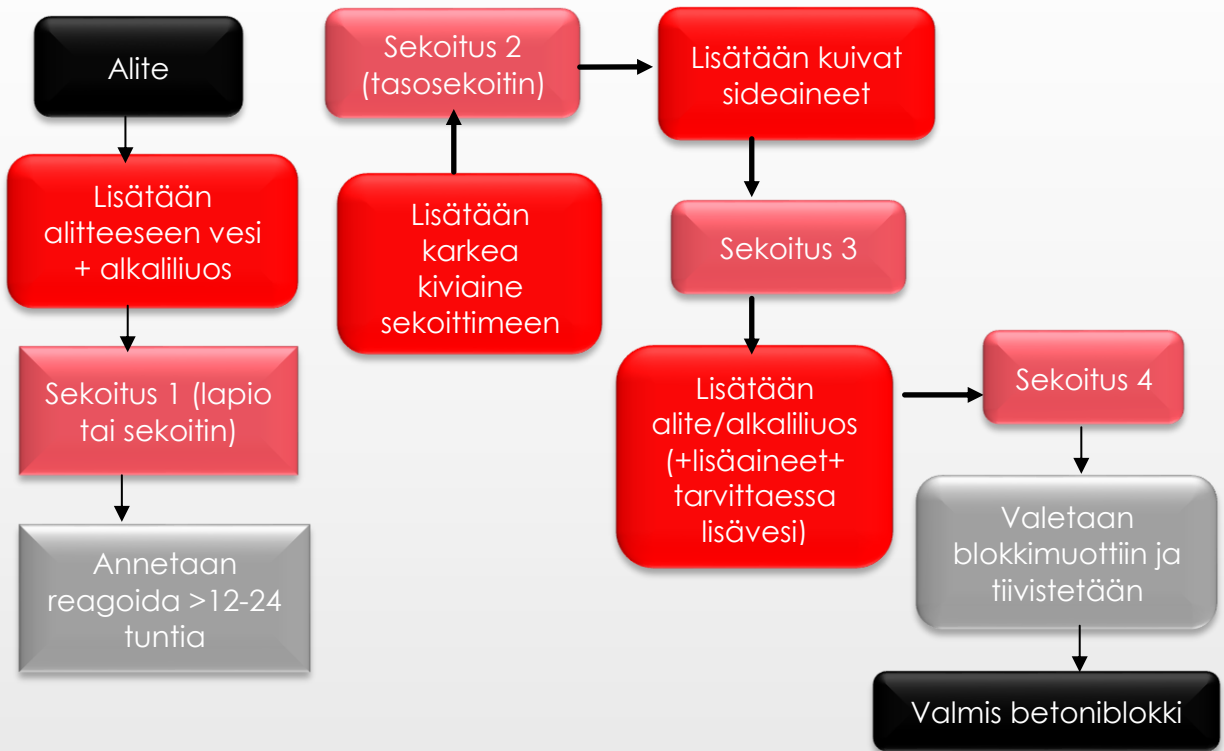
Betonin valmistusprosessi

Alitteelle tehtyjen analyysien perusteella todettiin, että alite sisältää metallista alumiinia, joka reagoi alkalisessa ympäristössä muodostaen vetykaasua aiheuttaen paisumista ja halkeilua sekä OPC- että AAS-betoneissa. Alumiini aiheuttaa betonikoekappaleissa paisumista ja halkeilua, joka edelleen vaikuttaa betonikoekappaleiden lujuuteen ja kestävyYTEEN heikentävästi. Metallisen alumiinin haitallisen vaikutuksen estämiseksi jättemateriaali vaatii esikäsitteilyn, johon soveltuu esimerkiksi mieto alkaliliuos (esim. 2M NaOH) tai CaO. Sekoitusvaiheessa 1 alite reagoi alkaliliuoksen kanssa vapauttaen kaasun, jonka jälkeen seokseen voitiin lisätä muut osa-aineet. Lisätty alkaliliuos hyödynnettiin edelleen AAS:n aktivaattorina. Karkeat kiviaine/kuonamurskeet punnittiin ja sekoitettiin sekoittimessa ensin, koska tasosekoittimessa pelkän sideaine-alitemassan sekoitus onnistui huonosti. Murskeiden jälkeen lisättiin kuiva kiinteä sideaine (sementti tai masuunikuona tms), joka sekoitettiin murskeeseen. Sen jälkeen lisättiin alite-alkaliliuosseos ja tarvittava lisävesi.

Alla on kuvattu vaiheittain alitetta sisältävän betoni(bloki)massan valmistusprosessi.

- Vaihe 1** Betonimassa valmistetaan kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa prosessialite sekoitetaan veteen (tarvittava vesimäärä riippuu alitteen kosteudesta). Veden annetaan imeytyä ja sen jälkeen lisätään alkaliliuos ohjeen mukaan. Massa sekoitetaan ja seoksen annetaan reagoida n.12 -48 tuntia ennen betonimassan valmistusta. Reagointia nopeuttaa lämpimän veden käyttö ja massan säilytys lämpimässä.
- Vaihe 2** Kiviaine tai kuonamurskeet punnitaan, kaadetaan sekoittimeen ja sekoitetaan keskenään tasaiseksi. Sen jälkeen lisätään kuiva kiinteä sideaine (esim. masuunikuonajauhe tai sementti) ja sekoitetaan tasaiseksi.
- Vaihe 3** Esisekoitettu alite-alkaliliuosseos lisätään sekoittimeen. Massaa sekoitetaan kunnes se on tasalaatuinen. Sen jälkeen lisätään lisäaineet. Huokostimen annostus tarkistetaan mittaamalla ilmamäärä (n. 5-7 %).

	<p>Tarvittaessa lisätään annostusta. Sekoitusaika riippuu sekoittimen tehosta ja annoskoosta. Tarvittaessa lisätään vettä. Lisäveden tarpeeseen vaikuttaa alitteen ja murskeen vesipitoisuus. Massan notkeuden tulee olla riittävä, jotta massa tiivistyy hyvin muottiin tärytettäessä. Veden yliannostusta tulee välttää, koska se alentaa lujuutta, hidastaa lujuudenkehitystä ja lisää kutistumishalkeilua.</p>
Vaihe 4	<p>Massa kaadetaan muottiin ja tiivistetään tarvittaessa sauvatäryttimellä. Valupinta tasoitetaan hierontamalla. Tuore betonipinta suojataan muovilla valun jälkeen.</p>
Jälkihoito	<p>Pinnan kovettuttua, pintaa jälkihoidetaan joko jälkihoitoaineella tai kastelemalla vedellä 3-7 vuorokauden ajan olosuhteista riippuen. Betonimuotti puretaan massan kovettuttua riittävästi. Lujuudenkehitykseen vaikuttaa lämpötila. Suositeltava lämpötila on n. 15...30°C. Matalassa lämpötilassa lujuudenkehitys hidastuu.</p>
Olosuhteet	<p>Kaikkien sekoitusvaiheiden aikana ilman, raaka-aineiden ja massan lämpötilan tulee olla vähintään 5°C sekä vähintään viikko massan valmistuksen jälkeen. Säilytys lämpimässä (15-40°C) edistää lujuudenkehitystä. Voimakkaalla auringonpaisteella ja tuulisella säällä massa on suojattava liian nopealta veden haihtumiselta ja sateella liialliselta kastumiselta.</p>
Jätteenkäsittely	<p>Kovettunut ylimääräinen massa voidaan toimittaa kaatopaikalle.</p>

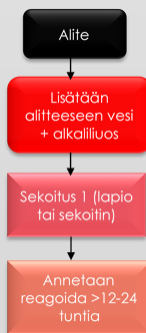


KUVA 2. BETONIBLOKKIMASSAN VALUPROSESSI

Koeblokin valu on kuvattu alla olevassa kuvasarjassa ja videossa:

<https://edukainuu->

my.sharepoint.com/:v/g/personal/minna_sarkkinen_kamk_fi/ERr0iAP_cjLLskiGBgBp1wEBu-uQqEqBrWjmxhgydzwVkJQ?e=D9YTgN



KUVA 1. KR-ALITE, JOHON ON SEKOITETTU RESEPTIN 2 ALKALILIUOS.



KUVA 2. SEKOITIMEEN LISÄTTIIN ENSIN MURSKEET.



KUVA 3. MURSKEET 0/10 JA 10/20 SEKOITETTIIN ENSIN



KUVA 4. MURSKEEN JÄLKEEN LISÄTTIIN MASUUNIKUONAJAUHE.





KUVA 5. KUONAN JA MURSKEEN SEKOITUKSEN JÄLKEEN LISÄTTIIN ALITE-ALKALISEOS.



KUVA 6. MASSA SEKOITUI HELPOSTI ILMAN NOTKISTINTA JA LISÄVETTÄ.



KUVA 7. MASSA SIIRRETTIIN TRAKTORILLA VALUPAIKALLE.



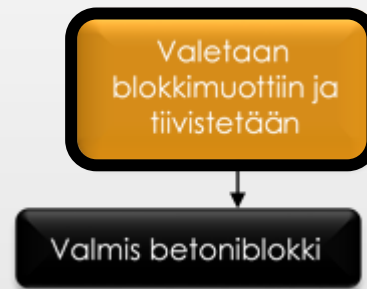
KUVA 8. MUOTTIÖLJYN RUISKUTUS MUOTTIIN



KUVA 9. ITSETIIVISTYVÄ KOEMASSA 2.



KUVA 10. PINNAN VIIMEISTELY HIERTÄMÄLLÄ.





KUVA 11. PEITETTY BLOKIVALU.



KUVA 12. BLOKI 2 ON 4 VRK:N JÄLKEEN VIELÄ MUOTISSA.



KUVA 29. MUOTIN PURKU.

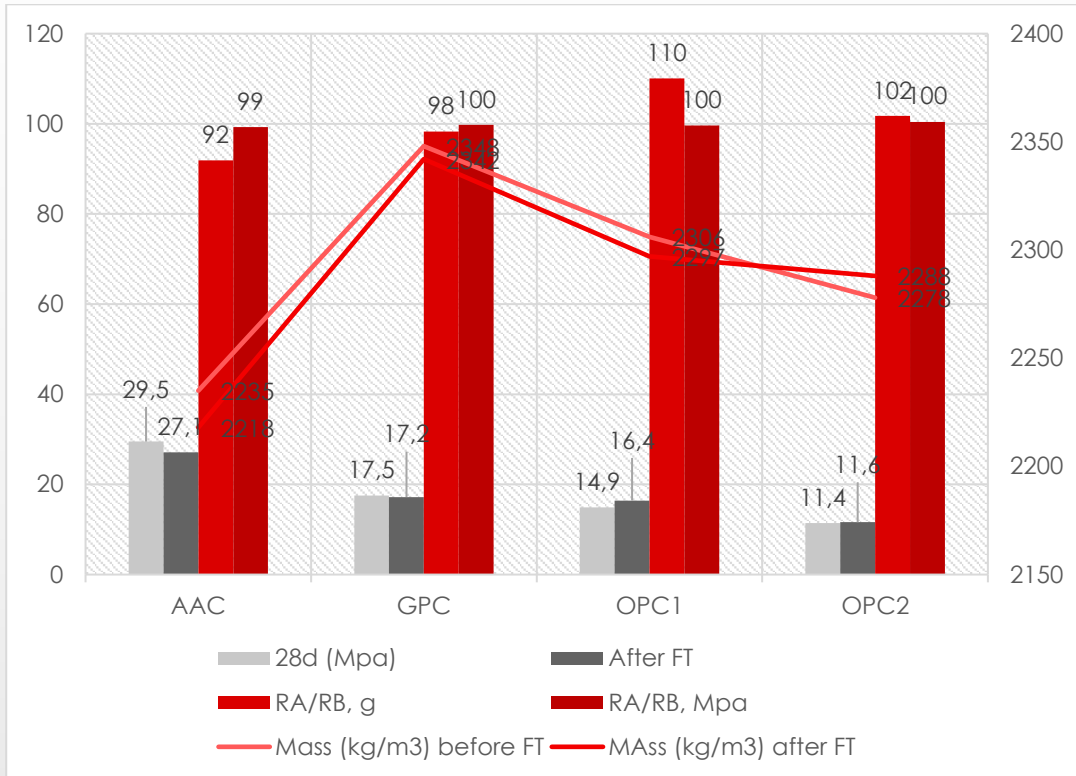


KUVA 30. BETONIBLOKI JA STABILOITU BETONIMURSKKE.

Alkali-aktivoitu betoni (AAS) oli helposti valettavaa ja kokeen perusteella itsetiivistyvää. Alitteen koostumus esti massan erottumista, vaikka massa oli notkeaa. Blokien valmistus ja jälkihoito lämpimässä on suositeltavaa. Sinkin tiedetään aiheuttavan sideainereaktion alkuvaiheen (C_3S) hidastumista erityisesti, jos sideaine sisältää kalkkia. Käytettäessä masuunikuonaa sinkin hidastava vaikutus korostuu. Hidastavaa vaikutusta voi kompensoida joko käyttämällä kiihdytintä tai korvaamalla masuunikuona osin tai kokonaan muulla sideaineella kuten kivihiililentotuhkalla tai metakaoliinilla. Toisaalta, kupari, lyijy, kromi ja korkeampi pH edistävät aliitin hydrataatiota myöhemmässä vaiheessa. Kupari ja lyijy adsorboituvat pääasiassa kalsiumsilikaattihydraatti (CSH) –geeliin vaikuttaen sen nanorakenteeseen ja tiheyteen ja siten lisäävät sementin mekaanista lujuutta. Sinkki puolestaan saostuu hydroksidina partikkelin välisen huokosrakenteen eikä siten vaikuta merkittävästi puristuslujuuteen.

KOEBETONIEN PURISTUSLUJUUS JA SÄÄNKESTÄVYYS

Pakkasrasituskoeket tehtiin säsimulaattorissa käyttämällä 56 jäädytys-sulatussykliä. Koesarjassa verrattiin neljän eri betonireseptin mekaanista kestävyyttä (puristuslujuus ja säänkestävyys). AAC tarkoittaa alkali-aktivoitua masuunikuonalla valmistettua betonia, GPC-betonimassa sideaineena oli geopolymeerisementti, joka koostui kivihiililentotuhkasta, masuunikuonasta sekä alkaliaktivaattorista. OPC1-betonissa käytettiin tavallista portlandseosementtiä ja OPC2-betonissa osa sementistä oli korvattu masuunikuonalla ja lisäaineena oli götiitti. Kaikissa normaali fillerin osuus (n. 10 %) korvattiin alitteella, joka oli esikäsitelty miedolla alkaliliuoksella (NaOH 2M tai 5M) ennen betonivalua.



KUVA 13. KRB-BETONIMASSOJEN LUJUUS ENNEN JA JÄLKEEN 56 JÄÄDYTYS-SULATUSSYKLIIN SEKÄ PURISTUSLUJUUKSIEN SUHDE RA/RB.

Kaikki koemassat kestivät hyvin 56 syklin pakkarasituksen. Puristuslujuus määritettiin 28 vuorokauden säilytyksen jälkeen normaaliolosuhteissa ja vertailuarvo (RA/RB, MPa) säärasitustestin jälkeen. RA/RB-arvot olivat yli 90, mikä tarkoittaa riittävää pakkarasituksen kestävyttä. Vastaavasti massan muutos määritettiin ennen ja jälkeen säärasitustestin. Koekappaleissa ei tapahtunut pakkarasituksen aiheuttamaa massahävikkiä (rapautumista) tulosten perusteella.

Lujuudenkehityksen suhteen AAC-betoni oli selvästi paras ja soveltuvin betonikäyttöön. OPC-betonien lujuus (n. 10-15 MPa) on paremmin soveltuva maarakennuskäyttöön. Betonin GPC alkulujuudenkehitys oli selvästi parempi kuin AAC-betonin.

Betonimassojen stabilointitehokkuus

Stabilointitutkimuksissa analysoitiin eri reseptien liukoisuuksia käyttäen menetelmänä ja kriteereinä MARA-asetuksen arvoja, joiden mukaan betonin käyttö vallirakenteessa tai murskattuna maarakentamisessa tutkitaan liukoisuuksien tai kokonaispitoisuuksien perusteella (Hyödynnettävän jätteen suurin sallittu haitallisten aineiden liukoisuus (mg/kg L/S-suhteessa 10 l/kg) ja pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta) määritettynä murskatusta betonista.

Potentiaalisia käyttösovellusvaihtoehtoja betonille tai betonimurskeelle:

- Kaatopaikkasijoitus (varastointi tulevaa hyödyntämistä varten)
- Uusiokäyttö rakennuskomposiiteissa (betonissa) kapseloimalla.
- Betonimurskeena käyttö maarakentamisessa.

TAULUKKO 5. BETONEISTA MÄÄRITETYT PAH, PCB, pH, EC JA DOC JA MARA-ARVOT.

	total PAH	total PCB	C10-C40	L/S 10	L/S 10	L/S 10
				pH	EC mS/m	DOC
OPC1	<3.0	0.09	<u>560</u>	12.1	700	438
OPC2 (OPC+MKJ+G)	<3.0	0.11	320	11.9	260	360
OPC3 (OPC+MKJ+D+MgO)	<3.0	0.13	340	12.0	380	479
AAC	<3.0	0.12	<u>760</u>	11.9	380	<u>688</u>
GPC1 (TKM)	<3.0	0.09	79	12.1	490	<u>875</u>
GPC2 (Ferrok)	<3.0	0.12	260	12.0	420	<u>886</u>
Raja-arvo	30	1	500 (L6=300)	n.d.	n.d.	500

OPC=Portlandseossementti
D=dolomiittifilleri
AAC=Alkaliaktivoitu sementti

MKJ=masuunikuonajauhe
TKM=teräskuonamurske
GPC=geopolymeerisementti

G=götiitti

L-arvot ovat MARA-ohjeen raja-arvoja eri käyttökohteille. Taulukoissa on alleviivattu arvot, jotka ylittävät ylimmät raja-arvot. Ylempi ja alempi taulukko osoittavat, että OPC2 oli ainut neljästä vertailussa olevasta, joka täytti ylempät raja-arvovaatimukset, mutta sekään ei täyttänyt alempaa raja-arvoa molybdeenin, fluoridin ja C10-C40:n osalta (eli soveltuu luokkaan L3 ja on lähellä luokkaa L2). OPC-massojen liukoisuus verrattuna AAC- ja GPC- betoneihin oli pienempi. Alkali-aktivoitunut betoni ylittivät DOC-raja-arvon ja vanadiinin raja-arvon. GP-betonit ylittivät myös Antimonin raja-arvon. Tulosten perusteella paras vaihtoehto kapseloinnin kannalta olisi suosia sementtiä korvaavien seosaineiden käyttöä ja välttää voimakkaita alkali-aktivaattoreita. Kuonamurskeilla (TKM ja ferrokromi) ei ollut merkittävää vaikutusta liukoisuuksiin (vrt. GPC1 ja GPC2).

TAULUKKO 6. BETONIMASSOJEN PITOISUUKSIA VERRATTUNA ERI MARA-RAJA-ARVOIHIN.

	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Pb	Ni	Sb	Se	Zn	V	Hg	Cl ⁻	SO ₄	F ⁻
OPC1	<0.1	12	<0.01	<0,1	0,8	0,9	1.0	<0,1	<0,05	<0,03	<0.8	<0,4	<0.002	<160	<200	12
OPC2	<0.1	<4.0	<0.01	<0.01	1.9	1.7	0.2	0.3	<0.05	<0.03	<0.8	<0.4	<0.002	<160	<200	12
OPC3	<0.1	4.3	<0.01	0.1	2	2.3	0.4	0.4	<0.05	<0.03	<0.8	<0.4	<0.002	<160	284	7.3
AAC	<0.1	<4.0	<0.01	0,9	1,9	<u>8,9</u>	<0,1	0,3	0,25	0,17	<0.8	<u>7,3</u>	<0.002	<160	1736	28
GPC1	<0.1	4.0	<0.01	0.4	3.2	1.8	0.2	1.1	<u>0.87</u>	0.25	0.9	<u>15</u>	<0.002	<160	1002	67
GPC2	0.9	<4.0	<0.01	0.6	4.2	1.3	0.1	1.1	<u>0.89</u>	0.21	<0.8	<u>19</u>	<0.002	<160	1017	27
L1	0.5	20	0.04	1	10	1	0.5	1.2	0.7	1	15	2	0.03	1800	3400	30
L2	1.0	40	0.04	2	10	1.5	0.5	2	0.7	1	15	2	0.03	3200	5900	50
L3	2.0	100	0.06	10	10	6	2	2	0.7	1	15	3	0.03	11000	18000	150
L4	0.5	20	0.04	0.5	2	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	4	2	0.01	800	1200	10
L5	1.5	60	0.06	5	10	6	2	1.2	0.7	1	12	3	0.03	2400	10000	50
L6	2.0	100	0.06	10	10	6	2	2	0.7	1	15	3	0.03	11000	18000	150

L1= valli ≤ 5.0 m peitetty

L2= väylä ≤ 1.5 m peitetty maalla tai kiviaineksella

L3= väylä ≤ 1.5 m päällystetty asfaltilla

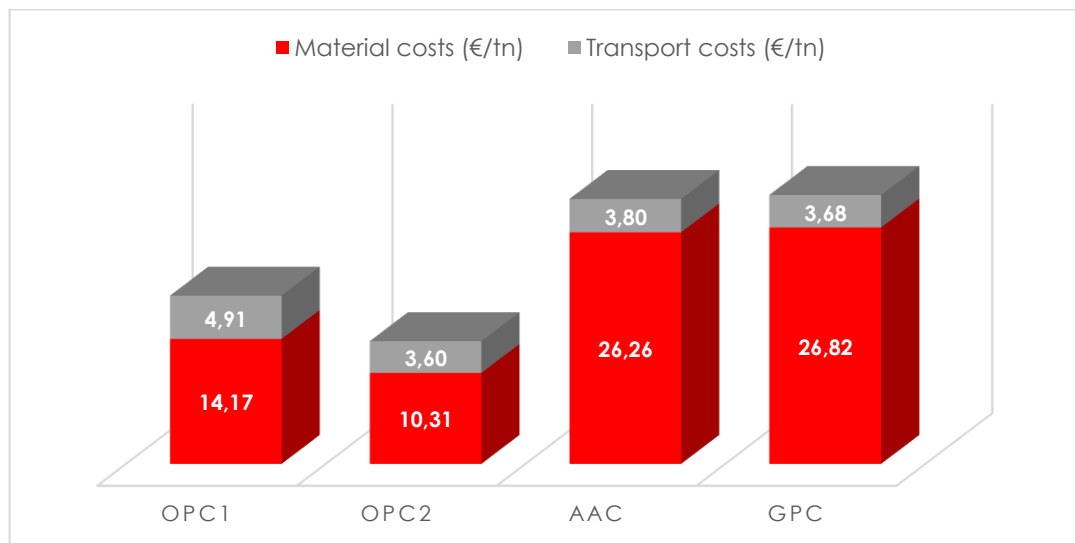
L4= kenttä ≤ 1.5 m peitetty maalla tai kiviaineksella

L5= kenttä ≤ 1.5 m päällystetty asfaltilla

L6= varaston pohja ≤ 1.5 m

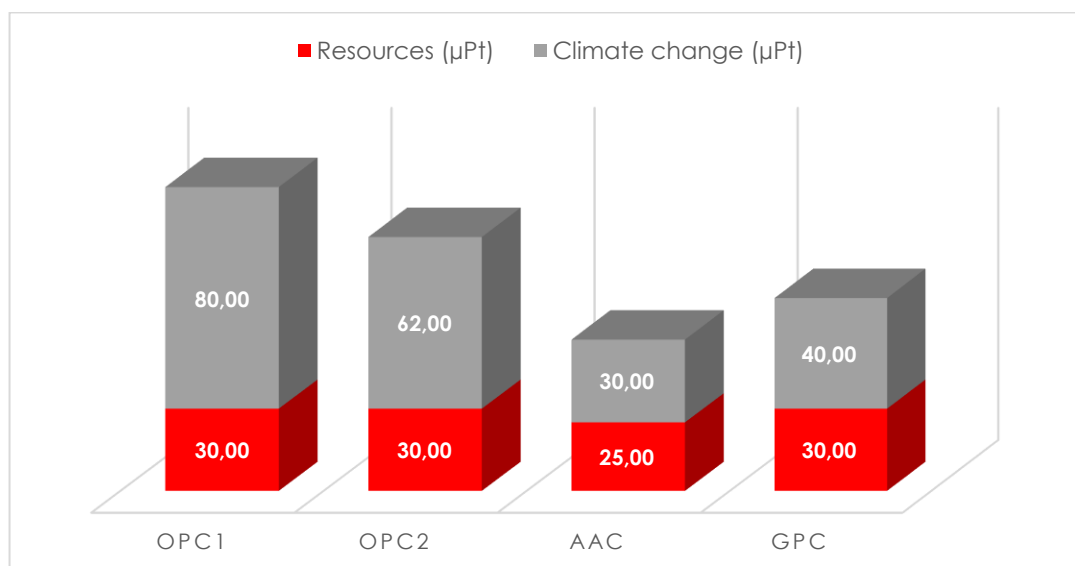
KOEMASSOJEN KUSTANNUKSET JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Alla olevat kuvat esittävät kustannusvertailua ja ympäristövaikutuksia käytettyjen sideainevaihtoehtojen materiaali- ja rahtikustannusten osalta sekä vastaavasti niiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia resurssien ja ilmastomuutoksen suhteen.



KUVA 30. BETONIMASSOJEN KUSTANNUKSET VERTAILU €/TN.

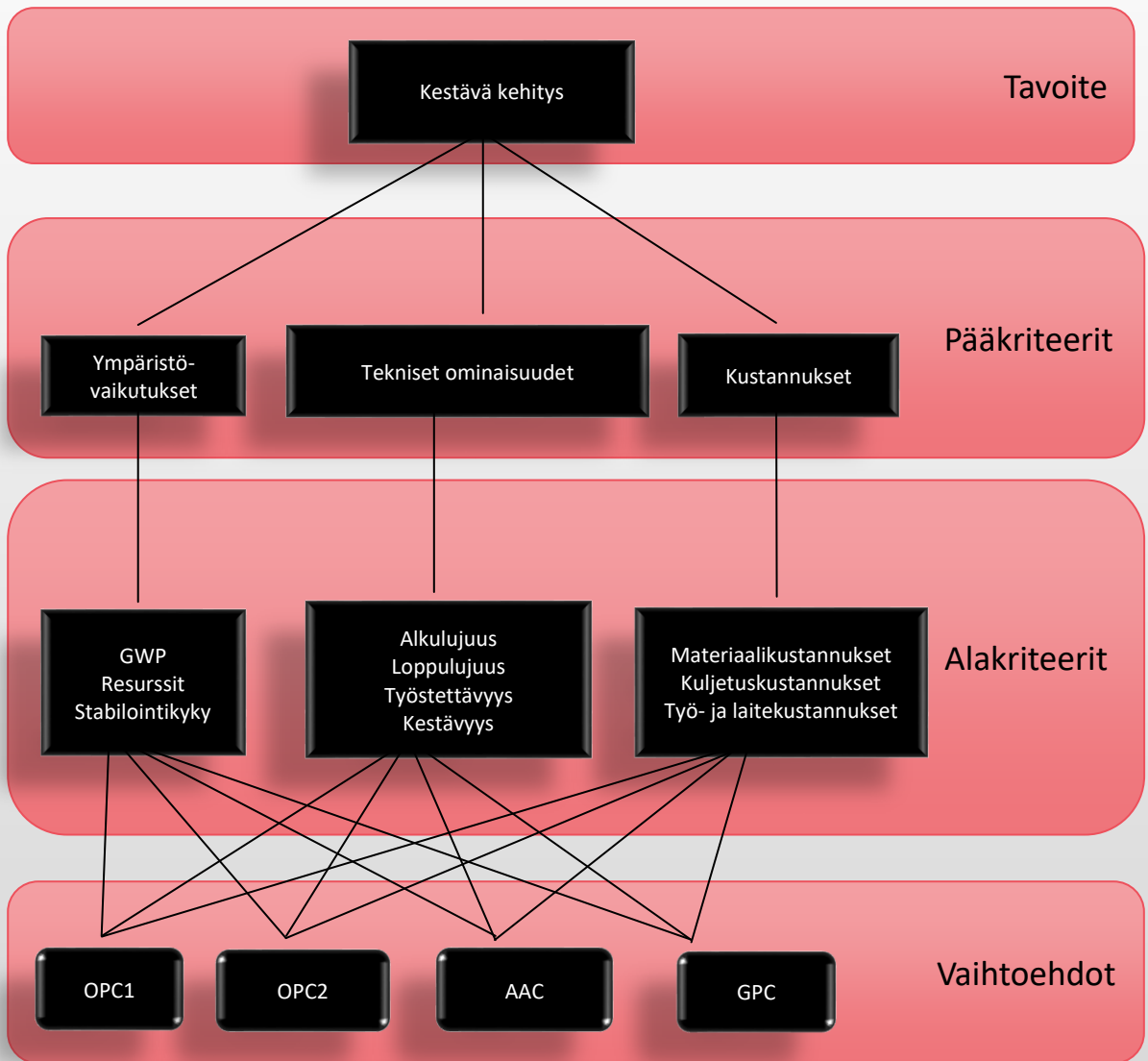
Kustannusten osalta OPC-vaihtoehdot olivat tässä tapauksessa edullisemmat kuin AAC ja GPC. Kuitenkin AAC- ja GPC-vaihtoehdot olivat erityisesti ilmastomuutosvaikutuksen (CO₂ eq) suhteen edullisemmat kuin OPC.



KUVA 31. BETONIMASSOJEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET.

Koemassojen tulosten integrointi

Koemassojen tekniset ominaisuudet (lujuudenkehitys, työstettävyys ja säänkestävyys), kustannukset ja ympäristövaikutukset integroitiin käyttämällä analyttistä hierarkiaprosessia (AHP). Alla olevassa kuvassa on AHP-hierarkiamalli.

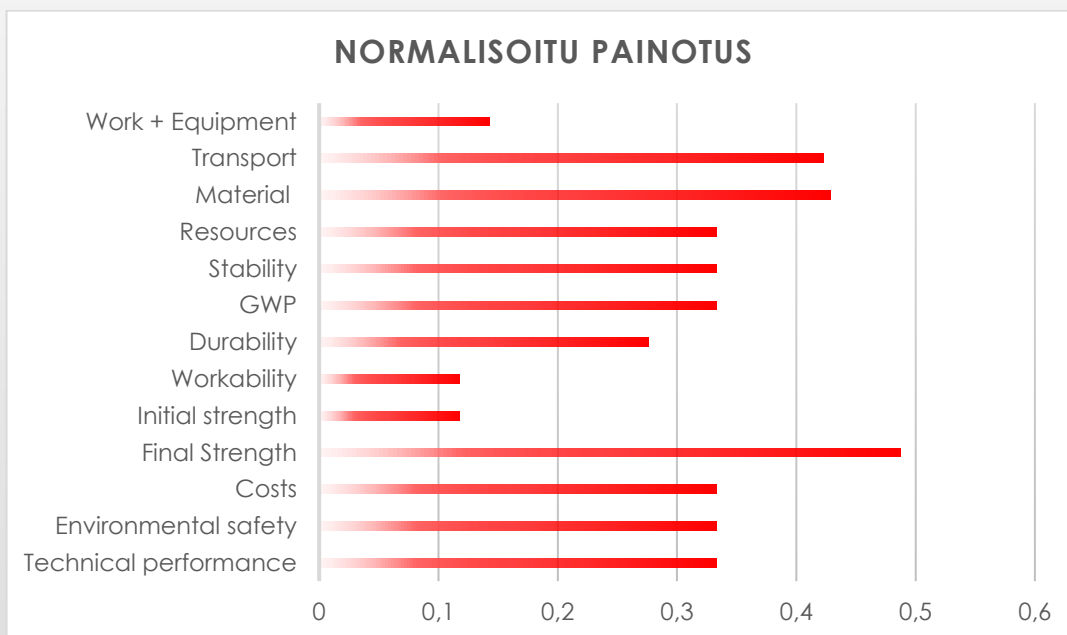


KUVA. 32. BETONIMASSOJEN VERTAILUTULOSTEN INTEGROINTI AHP-HIERARKIAMALLINA.

AHP-mallin ylätaso muodostuu kolmesta pääkriteeristä, jotka jakautuvat kukin alakriteereihin. Vertailussa käytetyt vaihtoehdot arvioitiin kaikkien kriteerien suhteen erikseen. AHP-menetelmä perustuu parivertailuun, mikä osaltaan rajoittaa käytettävien kriteerien ja vaihtoehtojen määrää

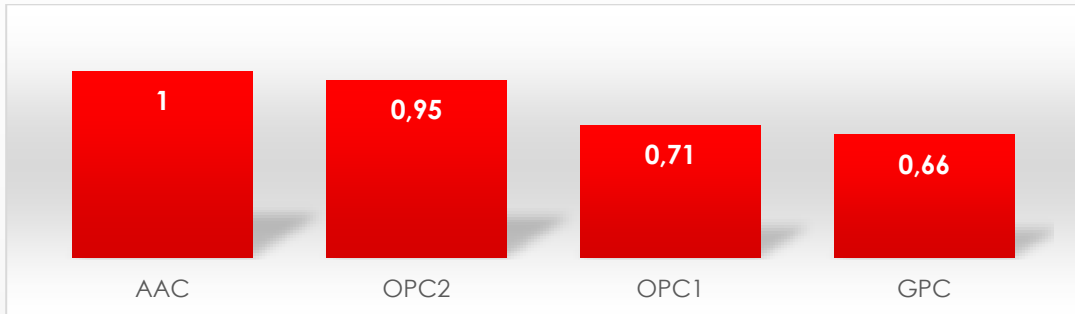
SUOSITELTU PRIORITEETTIJÄRJESTYS KOEMASSOILLE

Alla oleva kuva esittää AHP-vertailussa käytettyjä kriteerikohtaisia painotuksia, joissa betonien loppulujuutta sekä materiaali- ja kuljetuskustannuksia painotettiin enemmän kuin esimerkiksi massan työstettävyyttä, alkulujuutta ja työkustannuksia. Ympäristövaikutusten alakriteereiden ja kolmen pääkriteerin osalta painotukset olivat yhtäsuuret.



KUVA 33. KRITEERIEN PRIORISOINTI (PAINOARVOT).

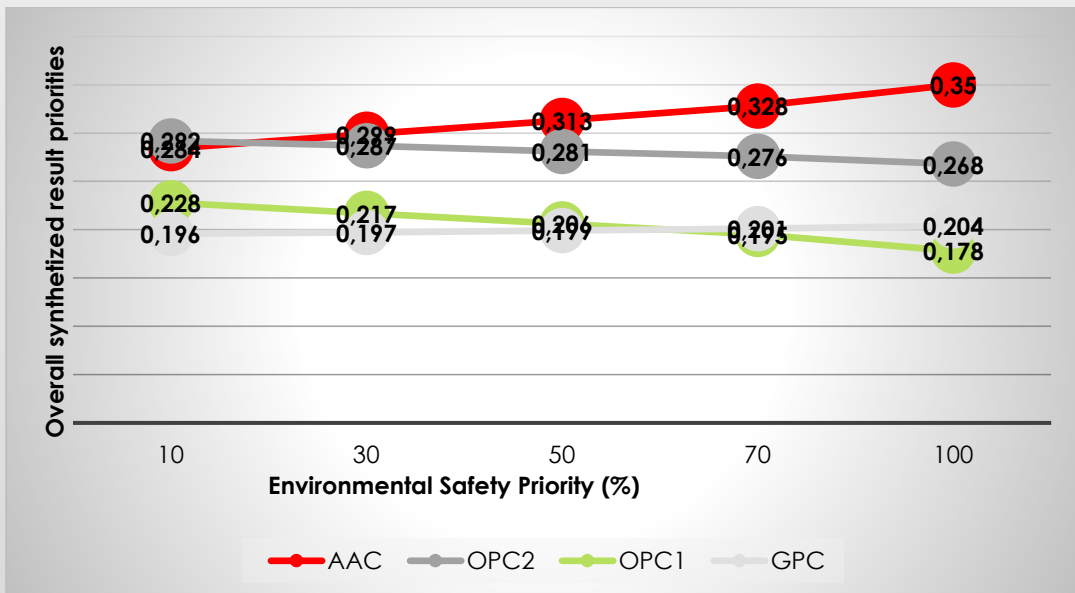
Alla oleva lopputulos AHP-analyysin kokonaisarvion perusteella suosittelee ensisijaisesti vaihtoehtoa AAC niukasti yli vaihtoehdon OPC2. Sen sijaan vaihtoehto GPC jäi neljästä vaihtoehdosta heikoimmalle.



KUVA 34. AHP-ANALYYSIN PERUSTELLA SUOSITELTU PAREMMUUSJÄRJESTYS ERI BETONIMASSOILLE.

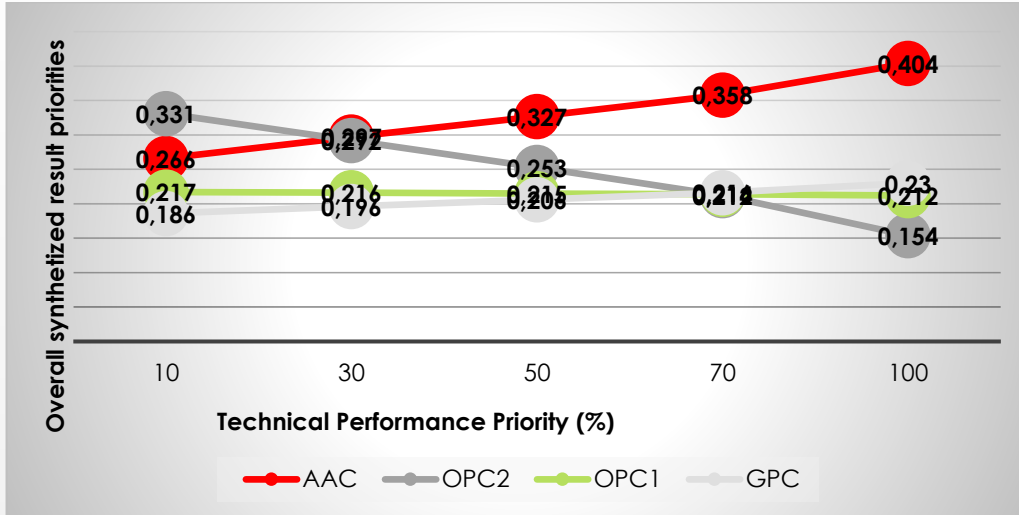
PÄÄKRITEERIEIN PAINOTUSTEN VAIKUTUS

Tarkasteltaessa AHP-tuloksen herkkyyttä painotusten muutosten suhteen pääkriteerien osalta, alla oleva kuva osoittaa, että vaihtoehdolla AAC on nouseva käyrä ympäristövaikutusten kasvun suhteen, mutta OPC-vaihtoehdoilla lievästi laskeva.



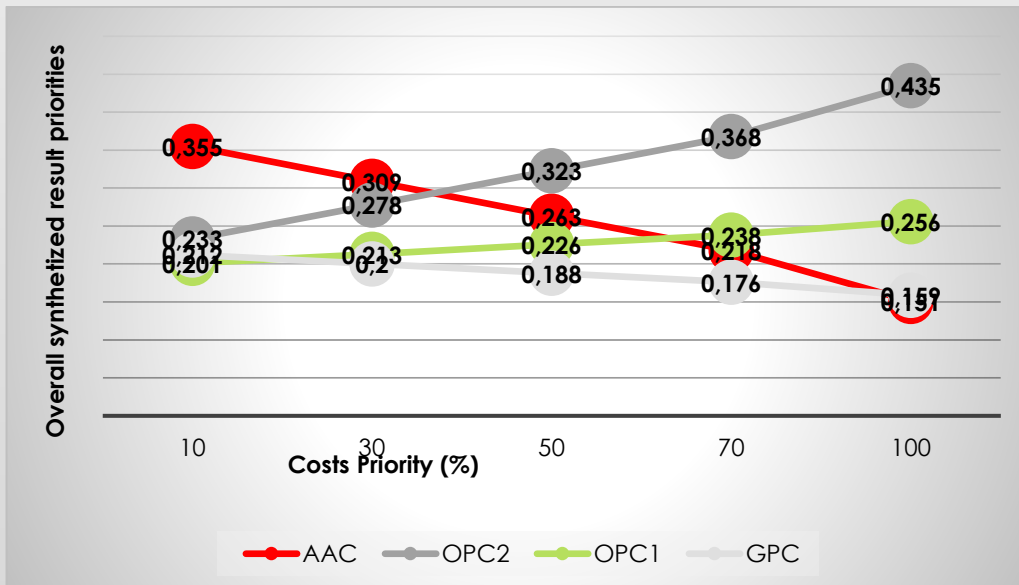
KUVA 35. YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN PAINOARVON MUUTOKSEN VAIKUTUS VAIHTOEHTOJEN PRIORITEETTIJÄRJESTYKSEEN.

Teknisen toimisuuden osalta AAC:lla on nouseva käyrä painotuksen kasvaessa, kun taas vaihtoehdolla OPC2 selvästi laskeva, joka muuttaa vaihtoehtojen keskinäistä paremmuusjärjestystä GPC-massan eduksi 70%:n painotuksen jälkeen (Kuva alla).



KUVA 35. TEKNISTEN OMINAISUUKSIEN VAIKUTUSTEN PAINOARVON MUUTOKSEN VAIKUTUS VAIHTOEHTOJEN PRIORITEETTIJÄRJESTYKSEEN.

Kustannusten osalta OPC2-betonilla on selvästi nouseva käyrä, joka ylittää muut vaihtoehdot, kun kustannuksien painotus kasvaa yli 40%. Vaihtoehdolla AAC on laskeva käyrä kustannusten painotuksen kasvaessa, ja vaihtoehto jää alle vaihtoehdon OPC1 n. 60%:n painotuksen jälkeen (Kuva alla).



KUVA 35. KUSTANNUSTEN PAINOARVON MUUTOKSEN VAIKUTUS VAIHTOEHTOJEN PRIORITEETTIJÄRJESTYKSEEN.

Yhteenveto

Yhteenvetona voi todeta, että romuttamoprosessialite on haastava materiaali kierrätyksen kannalta ja sen hyödyntämiseen on vaikea löytää yhtä yksinkertaista ja kustannustehokasta ratkaisua. Koetulosten perusteella alitteen käyttö betonissa ja betonimurskeena fillerin korvikkeena on mahdollista, mutta sen lisäksi tarvitaan muita ratkaisuja. Alitteessa olevan isomman muovi, puu yms. orgaanisen aineksen seulominen osaltaan helpottaisi alitteen kierrätystä betonimassoissa. Materiaalin heterogeenisyys, laatuvaihtelu ja logistiset kannattavuuskysymykset huomioiden paras ratkaisu todennäköisesti löytyisi useamman eri kierrätysmenetelmän edelleen kehittämistä ja jalostuksesta. Viimeisimpien tutkimustulosten ja tämän koesarjan perusteella alitteen hyötykäytön kehittämiseksi suositeltavin suunta olisi tarkempi hyödynnettävien orgaanisen materiaalin ja metallikomponenttien erottelu kierrätykseen.

Tämän tutkimuksen perusteella:

- Filleri voidaan betonissa korvata romuttamoprosessialitteella,
- Alkaliaktivaattori toimi hyvin myös alitteen esikäsitelyssä,
- Alkaliaktivoidulla sementillä saatiin paras tulos huomioiden sekä ympäristövaikutukset, tekninen toimivuus että kustannukset,
- Portlandsementtiseosmentillä liukoisuudet olivat pienempiä ja täyttivät kaikki MARA-kriteerit kuin tutkituilla alkaliaktivoiduilla sideaineilla.
- Alkali-aktivoidulla sideaineella voitiin valmistaa betoni, jossa kiinteät aineosat olivat 100 % jättemateriaalia.



KUVA 36. OPC- JA GEOPOLYMEERIBETONIKUUTIO.