

Rikastushiekan hyödyntäminen geopolymeerilaastin runkoaineena, tulokset

Jouni Rissanen, TkT

28.8.2025

KEKO

Geopolymeerit Oy



Työn taustaa ja tarkoitus

- Työ toteutettiin osana GTK:n Setelit-projektia, jossa selvitettiin mm. suomalaisten rikastushiekkojen hyötykäyttöpotentiaalia.
- Työn tarkoituksena oli testata kahta suomalaista rikastushiekkaa (Sibelco ja Yara) geopolymeerin täyteaineena, sillä aiempien tutkimusten ja alustavan karakterisoinnin perusteella kyseiset rikastushiekat vaikuttavat suhteellisen inerteiltä, mikä rajoittaa niiden käyttöä esim. sementin seosaineena tai geopolymeerisideaineen raaka-aineena.
- Työssä rikastushiekkoja hyödynnettiin geopolymeerilaastissa, joka voisi ominaisuuksiltaan sopia esimerkiksi sisustustuotteiden valmistusmateriaaliksi.

Työn sisältö

- Rikastushiekkanäytteiden karakterisointi
 - Raekokojakauma
 - Seulonta
 - Laserdifraktio
 - Tiheys
 - Veden imeytyminen
- Esikokeet
 - Sopivan sideainereseptin kehitys
 - Geopolymeerilaastin koostumus
- Lujuuden määrittäminen laastiprismoista sekä pöytälevystä saatuista koekappaleista
 - Puristuslujuus
 - Taivutuslujuus
 - 1, 2, 7 ja 28 vrk iässä
- Kaupallisen tuotteen valmistuksen demonstrointi
 - Pöytälevy

Laastiprismoja



Esikokeet

- Esikokeiden tavoitteena oli kehittää geopolymeerisideaineeseen pohjautuva laasti, jossa voitaisiin hyödyntää täyteaineena mahdollisimman paljon tutkittavia rikastushiekkoja.
- Esikokeiden aikana testattiin 24 sideainereseptiä, joissa testattiin erilaisia geopolymeerin raaka-aineita sekä aktivaattoriliuoksia. Haasteeksi osoittautui kehittää sideaineresepti, joka tuotti riittävän nopean lujuuden kehityksen sekä tilavuudeltaan stabiilin lopputuotteen.
- Kokeissa testattavaksi sideaineeksi valikoitui lopulta metakaoliiniin pohjautuva geopolymeeri.
- Sideainekokeiden jälkeen esikokeita jatkettiin laasti näytteiden avulla. Näiden näytteiden tavoitteena oli määrittää sopiva sideaineen ja täyteaineen suhde, sekä täyteainesekoituksen koostumus (rikastushiekan ja tavallisen hiekan välinen suhde).

Materiaalit

- Rikastushiekat

- Sibelco
- Yara
- Ennen käyttöä rikastushiekat kuivattiin 105 °C lämpötilassa.

- Tavanomaiset hiekat

- 1 – 3 mm
- 0,5 – 1,2 mm
- 0,1 – 0,6 mm

- Metakaoliini

- Aktivaattoriliuos

- Sekoitus geopolymeereille tyypillisiä kemikaaleja vesiliuoksessa



Menetelmät

- Rikastushiekkojen karakterisointi
 - Partikkelikokojakauma
 - Pesuseulonta (SFS-EN 933-1:2012)
 - Laserdifraktio, vesidispersio, Fraunhofer-malli
 - Kiintotiheys, näennäinen (SFS-EN 1097-6:2022)
 - Vedenimeytyminen (SFS-EN 1097-6:2022)
- Lujuusominaisuudet
 - Prismanäytteet
 - Sekoitus planetaarisella sekoittimella
 - 2 min 30 s hidas sekoitus ja 1 min 30 s nopea sekoitus
 - Laasti tiivistettiin muotteihin kahdessa 20 mm paksuisessa kerroksessa. Molempien kerrosten jälkeen muotteja täryytettiin tärypöydällä 1 min ajan.
 - Muotit peitettiin muovikalvolla ja niiden annettiin lujittua korkeammassa lämpötilassa ensimmäiset 24 h. Tämän jälkeen lujittuneet prismat poistettiin muoteista ja säilytettiin muovipusseissa huoneenlämmössä lujuusmittauksiin asti.
 - Geopolymeerilaasti tarttui tiukasti jopa voideltuihin metallipintoihin, joten prismamuottien sisäpinnat pinnoitettiin muovikalvolla.
 - Lujuudet määritettiin 1, 2, 7 ja 28 päivän iässä.
 - Pöytälevystä leikatut näytteet
 - 12 min sekoitus laastipaljussa laastinsekoittamiseen tarkoitetulla vispilällä
 - Näytettä pidettiin muotissa 4 vrk peitettynä, jonka jälkeen se poistettiin muotista ja annettiin kuivua huoneenlämmössä lujuusmittauksiin asti.
 - Näytteestä leikattiin laastiprismoja vastaavat koekappaleet, joista määriteltiin puristus ja taivutuslujuus seitsemän ja 28 päivän iässä.
 - Lujuuksien määrittäminen standardin EN 196-1 mukaisesti:
 - Taivutuslujuus: Kuormitusnopeus: 50 ± 10 N/s
 - Puristuslujuus: Kuormitusnopeus: 2400 ± 200 N/s
- Työstettävyyttä
 - Aistinvarainen arviointi

Näytteiden koostumus

		Referenssi	Sibelco 20 %	Sibelco 40 %	Yara 20 %	Yara 40 %
Rikastushiekka, Sibelco	m-%	-	13,35	26,66	-	-
Rikastushiekka, Yara	m-%	-	-	-	12,74	25,44
Hiekka 0,5 - 1,2 mm	m-%	6,68	6,68	6,68	6,35	6,35
Hiekka 1,0 - 3,0 mm	m-%	33,33	33,33	33,33	31,84	31,84
Hiekka 0,1 - 0,6 mm	m-%	26,66	13,31	-	12,70	-
Geopolymeerisideaine*	m-%	33,33	33,33	33,33	36,37	36,37
Kosteuspitoisuus	m-%	11,28	11,28	11,28	12,31	12,31
Täyteaine/sideaine -suhde		2,00	2,00	2,00	1,75	1,75
Rikastushiekan osuus täyteaineesta	m-%	0	20	40	20	40

* Sisältää metakaoliinin ja aktivaattoriliuoksen

- Yaran rikastushiekan litteä partikkelimuoto heikensi laastin työstettävyyttä merkittävästi.
 - Täyteaineen määrä suhteessa sideaineeseen hiukan pienempi
 - Rikastushiekkojen osuus täyteaineesta maltillinen
- Standardin EN 196-1 mukaisessa sementtipohjaisessa laastissa:
 - Täyteaine/sideaine -suhde: 2,00
 - Kosteuspitoisuus: 11,11 %

Pöytälevyjen valmistus

- Projektin aikana valmistettiin kaksi pöytälevyä, joilla oli tarkoitus kokeilla geopolymeeripohjaisen laastin soveltuvuutta esimerkiksi sisustustuotteiden valmistukseen.
- Molempien pöytälevyjen valmistuksessa käytettiin Sibelco 40 % reseptiä.
- Geopolymeerilaasti sekoitettiin laastin sekoitukseen tarkoitetulla kädessä pidettävällä sekoittimella.
 - Sekoitusaika 7-12 min (sisältäen raaka-aineiden vaiheittaiset lisäykset)
- Ensimmäinen pöytälevy:
 - 570*570*40 mm
 - Ei raudotteita tai muita vahvikkeita (vertailukelpoinen laastiprismojen kanssa)
 - Lujittuminen huoneenlämmössä
 - Levyä pidettiin muotissa 4 vrk peitettynä, jonka jälkeen se poistettiin muotista ja annettiin kuivua huoneenlämmössä lujuusmittauksiin asti.
 - Näytteestä leikattiin laastiprismoja vastaavat koekappaleet, joista määriteltiin puristus ja taivutuslujuus seitsemän ja 28 päivän iässä.
 - 5 vrk iässä levyssä havaittiin muutamia suurehkoja halkeamia.
- Toinen pöytälevy:
 - 570*570*30 mm
 - Vahvikkeena 3 kpl 540*540 mm lasikuituverkkoja, verkot aseteltiin eri syvyyksiin.
 - Lujittuminen korkeammassa lämpötilassa
 - Levy pidettiin muotissa peitettynä 9 vrk, jolla pyrittiin minimoimaan halkeamien riski.
 - Pöytälevyissä ei havaittu halkeamia.



Pöytälevyjen laastin sekoitukseen käytetyt välineet

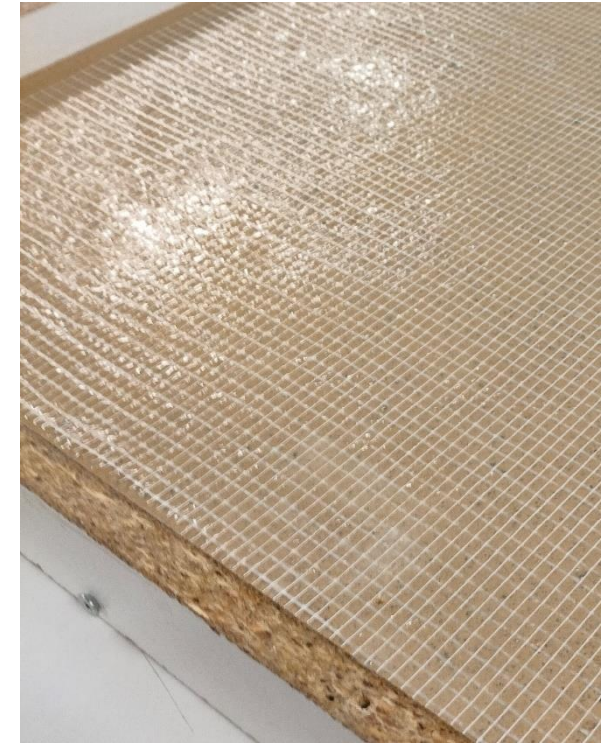
Pöytälevyjen valmistus



Pöytälevyjen valmistukseen käytetty muotti

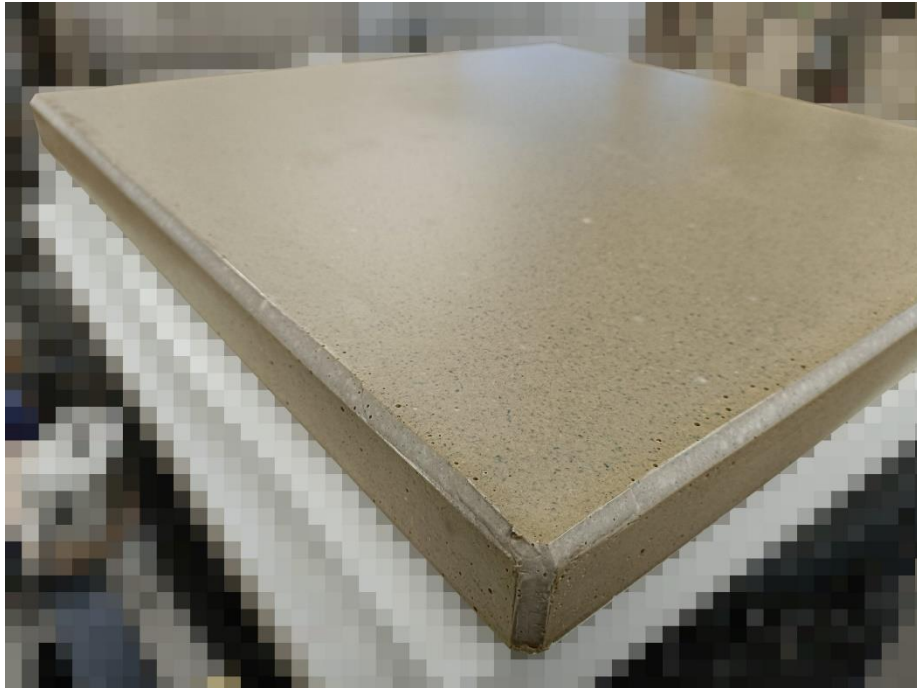


Laastin levitys muottiin oli haastavaa.



Toiseen levyyn lisättiin vahvikkeeksi lasikuituverkkoa.

Pöytälevyjen valmistus



Ensimmäinen pöytälevy heti muotista poiston jälkeen



Muotista poiston jälkeen pinta näytti hyvältä.



Levyyn ilmestynyt halkeama

Pöytälevyjen valmistus



Toinen pöytälevy muotista poiston jälkeen

Pöytälevyjen valmistus



Toisen pöytälevyn pinnassa ei ollut juurikaan jälkiä kuplista



Pöytälevyn reuna

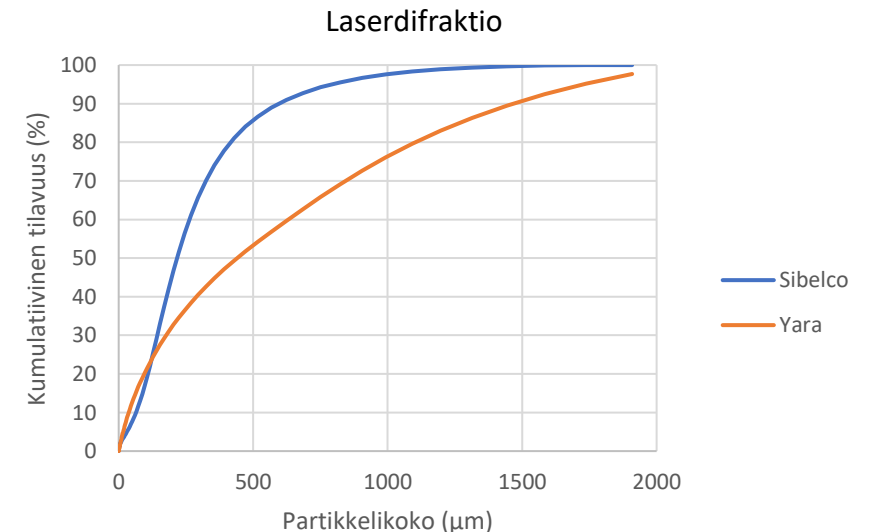
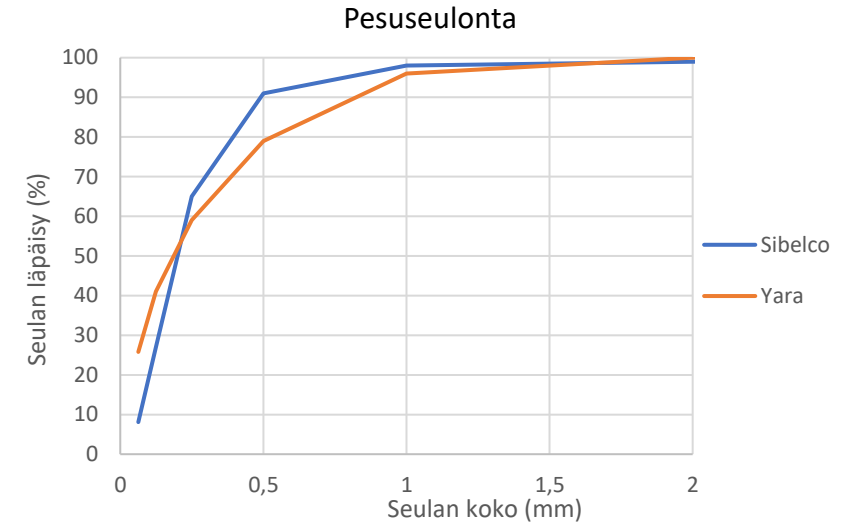


Levyn kulma

Tulokset

Rikastushiekköjen ominaisuudet

- Sibelco
 - Kiintotiheys: 2730 kg/m³
 - Vedenimeytyminen: 0,3 %
- Yara
 - Kiintotiheys: 2880 kg/m³
 - Vedenimeytyminen: 1,1 %
- Näytteiden partikkelimuoto vaikuttaa luultavasti laserdifraktion tuloksiin:
 - Yaran rikastushiekassa runsaasti laattamaisia partikkeleita
 - Laserdifraktion taustalla optinen malli joka olettaa partikkelit pyöreän muotoisiksi

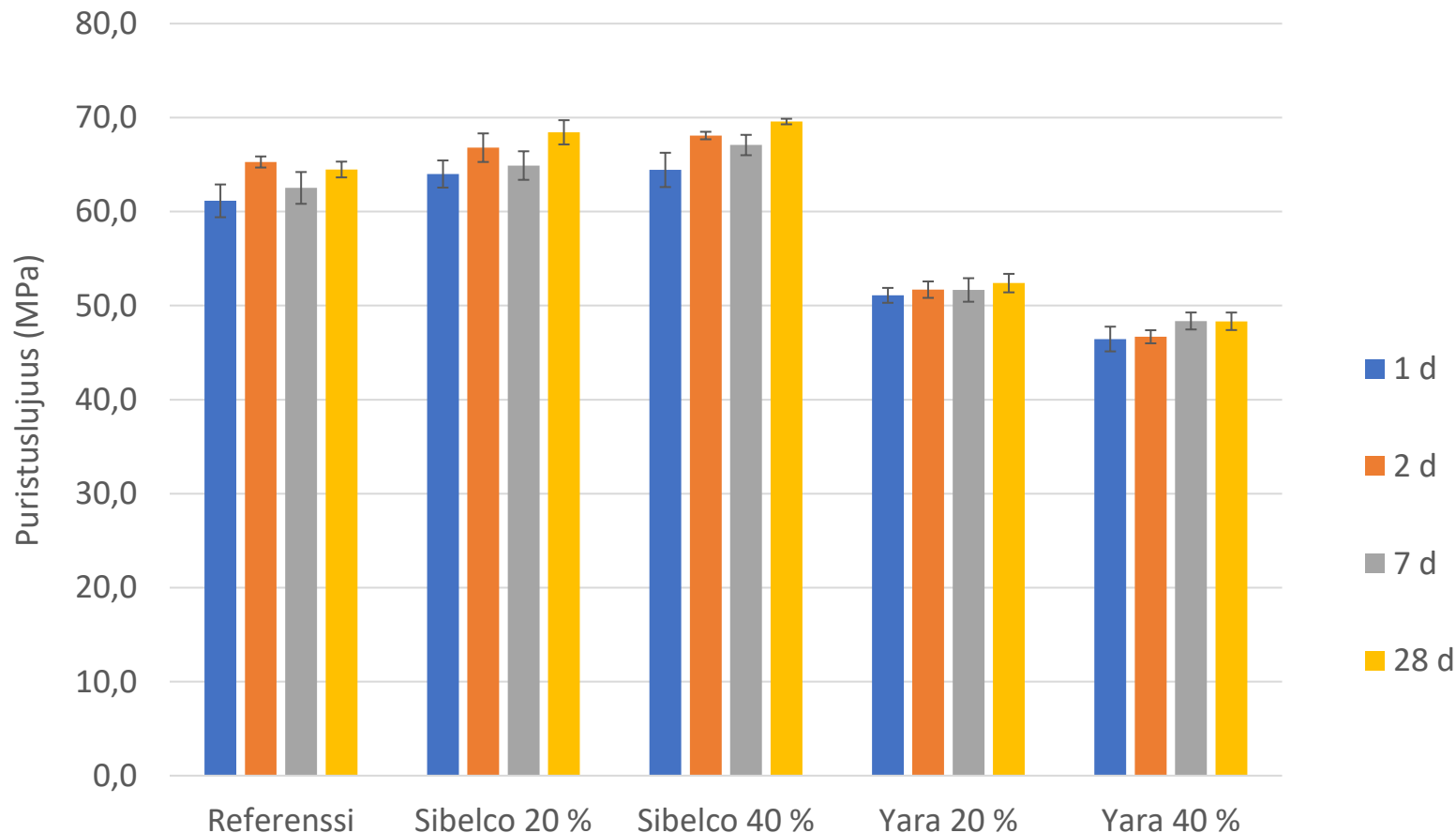


Näytteiden työstettävyys

- Työstettävyydeltään geopolymeerilaastit erosivat merkittävästi standardin EN196-1 mukaan valmistetuista sementtipohjaisista laasteista.
- Geopolymeerilaastit olivat notkeita ja valuvia (tiettyyn pisteeseen asti), mutta hyvin tahmeita, mikä vaikeutti laastin käsittelyä sekä työvälineiden puhdistusta.
- Laastiin jäi myös sekoituksessa muodostuneita ilmakuplia, jotka eivät poistuneet laastista tärytyksestä huolimatta.
- Sibelcon rikastushiekka ei vaikuttanut havaittavasti laastintyöstettävyyteen, kun sillä korvattiin osittain tai kokonaan referenssilaastissa käytetty hieno hiekka (0,1 – 0,6 mm).
- Yaran rikastushiekka heikensi merkittävästi laastin työstettävyyttä, kun sillä korvattiin hienoa hiekkaa. Työstettävyyden heikkeneminen korreloi voimakkaasti korvausasteen kanssa.

Puristuslujuus, laastiprismat

KEKO

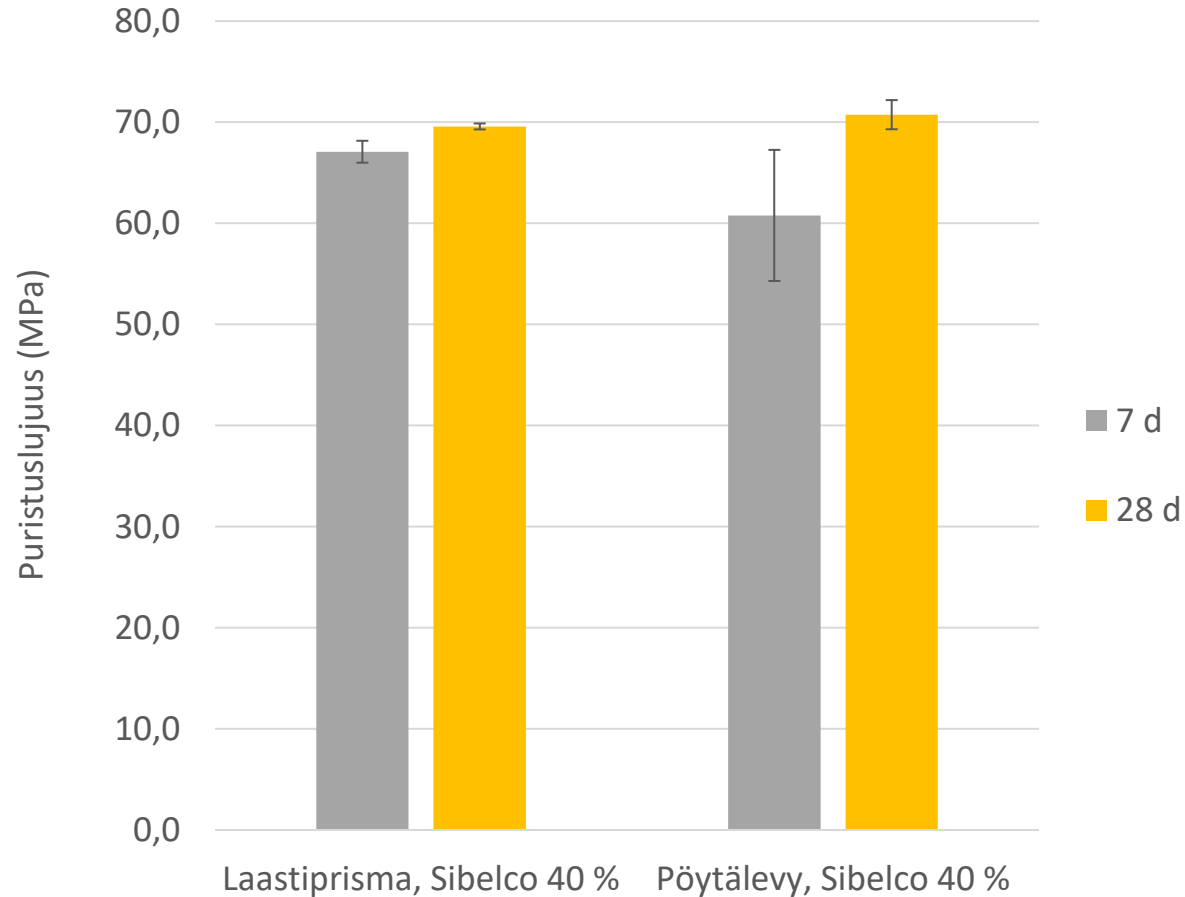


Virhepalkki (positiivinen ja negatiivinen) = näytteiden lujuuksien keskihajonta

- Geopolymeerilaastien varhainen lujuudenkehitys erittäin nopeaa
- Ensimmäisen vuorokauden jälkeen lujuudessa tapahtuvat muutokset hyvin vähäisiä
- Sibelcon rikastushiekalla ei merkittävää vaikutusta lujuuden kehitykseen
- Yaran rikastushiekkaa sisältävillä näytteillä lujuus merkittävästi pienempi
- Näytteiden lujuuksien sisäinen hajonta hyvin pieni

Puristuslujuus, laastiprismat VS pöytälevy

KEKO



- Erot "optimi olosuhteissa" ja huoneenlämmössä lujittuneiden näytteiden välillä olivat yllättävän pieniä 7 ja 28 vrk:n iässä.
- Toisaalta huoneenlämmössä laastin varhainen lujuuden kehitys oli hyvin hidasta, minkä vuoksi 1 ja 2 vrk:n lujuuksia ei voitu määrittää.
- Pöytälevyn 7d lujuudessa enemmän hajontaa, mikä voi johtua levyssä olleista halkeamista, joita tosin yritettiin välttää näytteiden leikkauksen aikana.

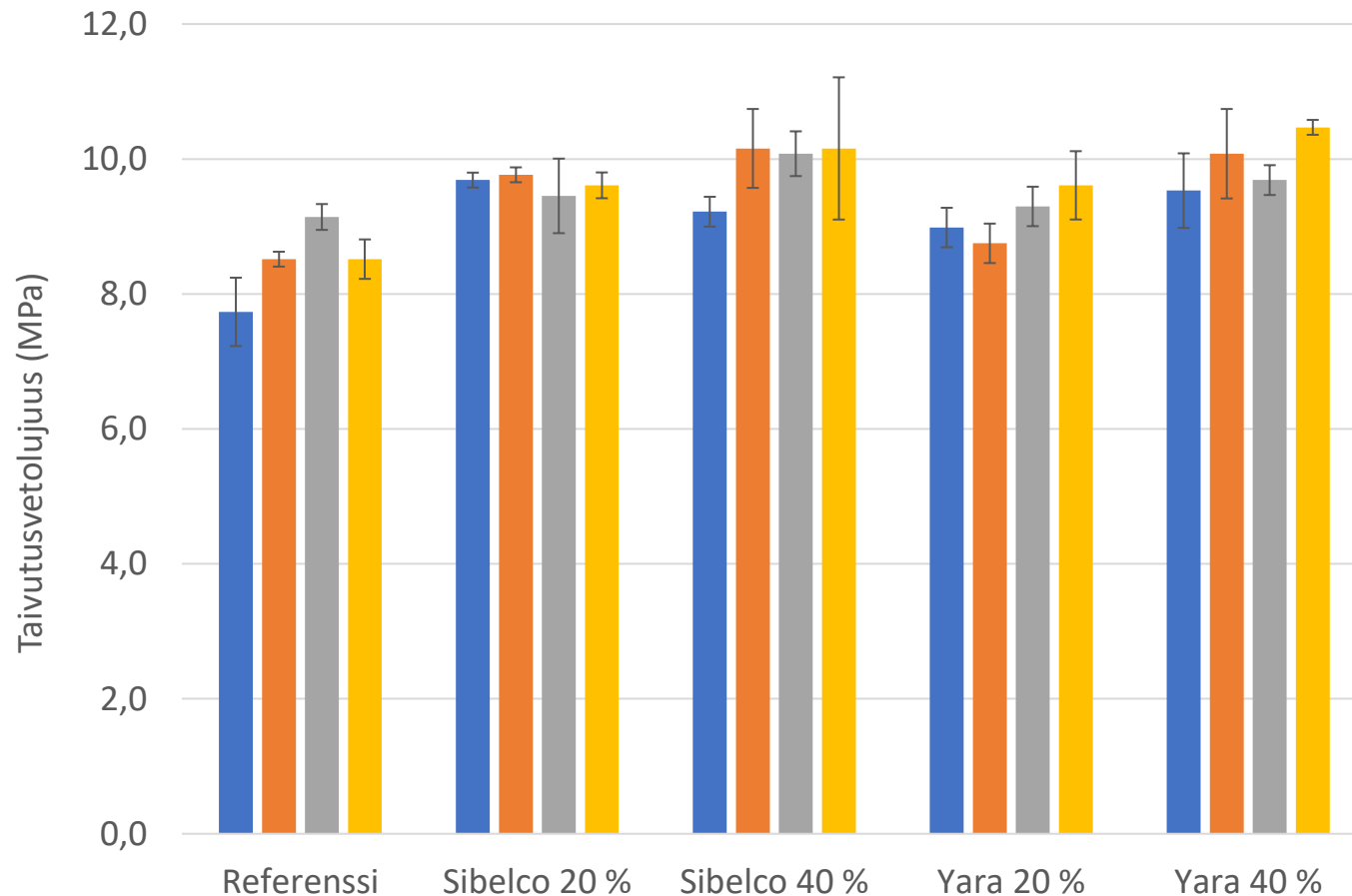


Pöytälevystä sahattu laastiprisma

Virhepalkki (positiivinen ja negatiivinen) = näytteiden lujuuksien keskihajonta

Taivutusvetolujuus, laastiprismat

KEKO

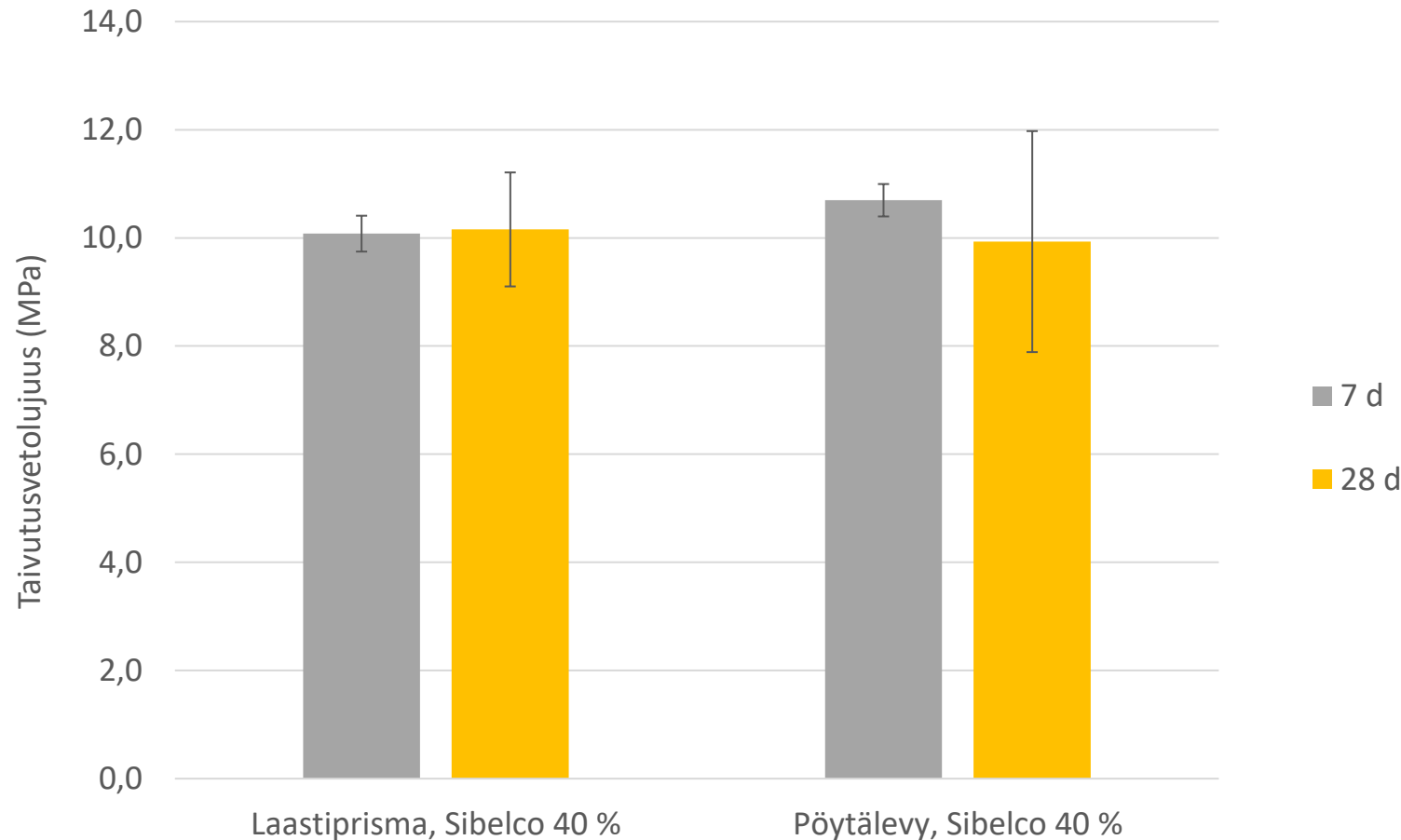


Virhepalkki (positiivinen ja negatiivinen) = näytteiden lujuuksien keskihajonta

- Taivutusvetolujuuksien kehittyminen samankaltaista kuin puristuslujuuksien
- Hienon hiekan osittainen korvaaminen rikastushiekoilla jopa hiukan parantaa taivutusvetolujuutta
- Yaran rikastushiekalla ei negatiivista vaikutusta taivutusvetolujuuteen
- Näytteiden sisäinen hajonta hiukan suurempaa kuin puristuslujuuden kohdalla, mitä voidaan pitää tyypillisenä

Taivutusvetolujuus, laastiprismat VS pöytälevy

KEKO



Virhepalkki (positiivinen ja negatiivinen) = näytteiden lujuuksien keskihajonta

- Taivutusvetolujuuksienkin kohdalla erot prismojen ja pöytälevyn välillä hämmästyttävän pieniä
- 28 d kohdalla pöytälevyn tuloksissa suurempi hajonta, mahdollisesti halkeama yksittäisessä koekappaleessa

Kuvia näytteistä



Referenssi

Kuvia näytteistä



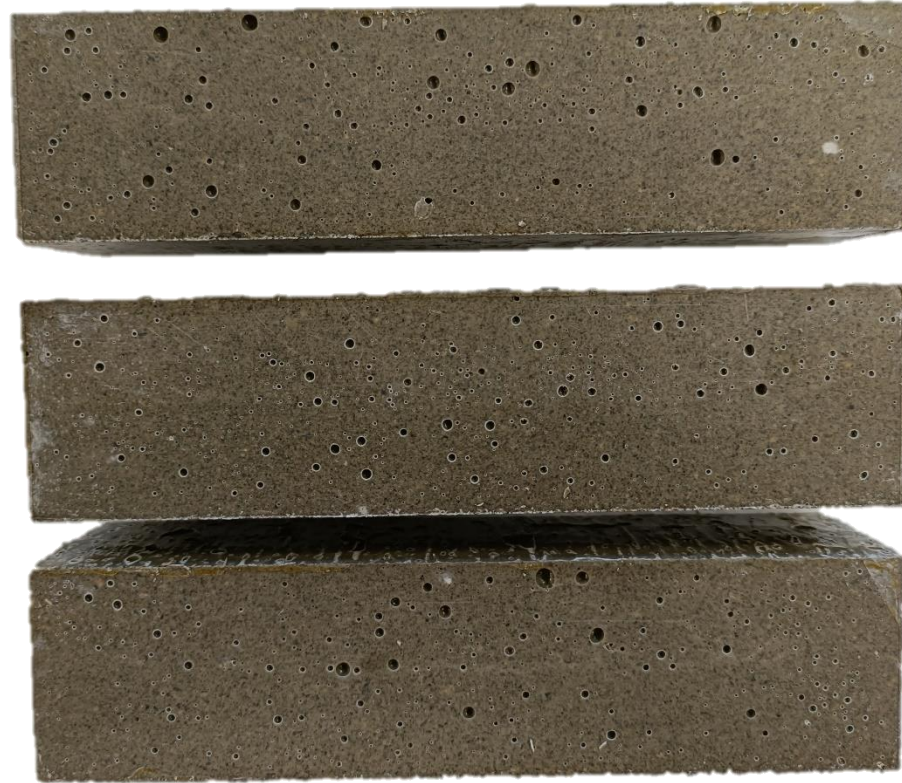
Sibelco 20 %

Kuvia näytteistä



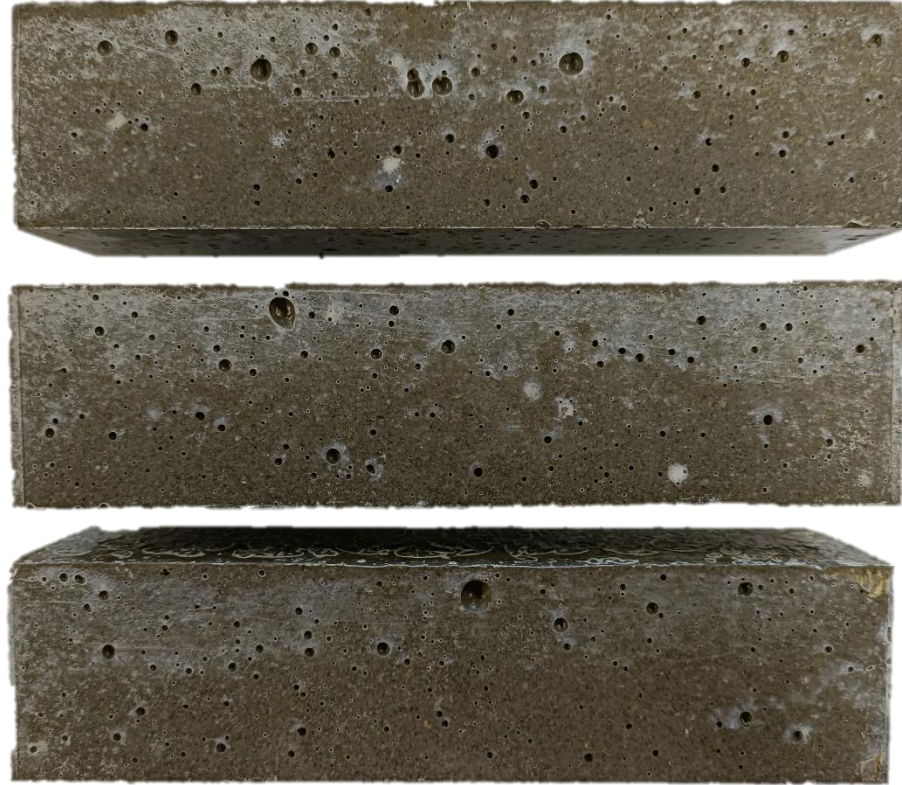
Sibelco 40 %

Kuvia näytteistä



Yara 20 %

Kuvia näytteistä



Yara 40 %

Pohdintaa

Pohdintaa, Rikastushiekkojen ominaisuudet

- Mineralogian perusteella rikastushiekkojen voidaan olettaa olevan melko inerttejä, jolloin ne eivät sovellu sideaineen raaka-aineeksi. Näin ollen hyödyntäminen täyteaineena luultavasti järkevämpää.
- Partikkelikoon (varauksella), tiheyden ja veden imeytymisen puolesta molemmat rikastushiekat soveltuvat täyteaineeksi laastiin tai betoniin.
 - Rikastushiekan partikkelikojakauman tulisi kuitenkin täydentää muun runkoaineen partikkelikojakaumaa sopivalla tavalla.
- Sibelcon rikastushiekka:
 - Partikkelimuoto ei luultavasti poikkea merkittävästi tavanomaisesta hienosta hiekasta.
 - Väriltään kellertävä, mikä vaikuttaa merkittävästi myös laastin ulkonäköön (positiivisesti)
 - Ei havaittu negatiivisia vaikutuksia lujuudenkehitykseen
- Yaran rikastushiekka:
 - Partikkelimuoto laattamainen, jonka vuoksi laastin työstettävyys kärsii.
 - Tämä pätee luultavasti myös sementtipohjaiseen laastiin ja betoniin.
 - Ominaisuudesta voisi ehkä olla joissain sovelluksissa hyötyäkin (esim. ruiskutettavat massa)
 - Hienon hiekan osittainen korvaaminen lasi merkittävästi puristuslujuutta. Tässä vaiheessa on kuitenkin hankala arvioida johtuuko lujuuden lasku rikastushiekan ominaisuuksista vai onko se seurausta laastin mahdollisesta ilmamäärän noususta (silmämääräisesti Yaran rikastushiekkaa sisältäneissä laasteissa oli enemmän suuria kuplia kuin muissa laasteissa).
 - Ei negatiivista vaikutusta taivutuslujuuteen, mikä on hyvin yllättävää varsinkin jos oletetaan, että laastien ilmamäärät olivat muita suurempia.
 - Kun hiekkaa korvattiin Yaran rikastushiekalla laastien lopullinen väri muistutti tavanomaisen laastin väriä. Rikastushiekan sisältämä kiille näkyi hienosti kovettuneen laastin pinnoilla.

Pohdintaa, Näytteiden työstettävyys **KEKO** ilmakuplat

- Geopolymeerilaastin työstettävyys poikkeaa merkittävästi sementtipohjaisten laastien työstettävyydestä (usein negatiivisesti). Tämän tutkimuksen laastit olivat suhteellisen helppoja sekoittaa ja tiivistää muottiin, mutta laastit olivat hyvin tahmeita, jonka vuoksi valupinnan tasoittaminen ja työvälineiden puhdistaminen oli hankalaa. Ilmiön taustalla ovat ainakin aktivaattoriliuosten korkea viskositeetti ja tässä tapauksessa myös metakaoliinin sekä Yaran rikastushiekan laattamainen partikkelimuoto. Hyvänä puolena mainittakoon se, että laasti tasoittui suhteellisen hyvin pelkän tärytyksen aikana ja lujittuneesta valupinnasta puuttui huomattomalle sementtilaastille sekä betonille tyypillinen pöly ja hilseily.
- Sideainepastan korkean viskositeetin vuoksi laastiin sekoituksen aikana muodostuvat ilmakuplat eivät poistu valusta.
- Kuplien poistumisnopeuteen vaikuttaa olennaisesti sideainepastan viskositeetti, kuplien koko sekä paine-ero massan pinnan ja kuplan välillä. Näin ollen kuplien poistumista voidaan edistää ainakin seuraavin tavoin:
 - Kuplien koon kasvattaminen kemikaalien avulla
 - Sideainepastan viskositeetin pienentäminen reseptiikkaan vaikuttaen
 - Sideainepastan viskositeetin hetkellinen pienentäminen tärytyksen avulla (geopolymeeripastat ovat tyypillisesti voimakkaasti leikkausohenevia)
 - Massaa ympäröivän ilman paineen pienentäminen (esim. tyhjiökammio)
- Tämän tutkimuksen aikana kuplien poistumista pyrittiin edistämään ainoastaan tärytyksellä. Täryytys poisti suurimmat kuplat massasta, mutta kun kuplien koko oli riittävän pieni ne eivät liikkuneet enää lainkaan. Tärytyksestä huolimatta massan viskositeetti oli ilmeisesti niin suuri, että pienimpien kuplien noste ei riittänyt niiden liikuttamiseen.
- Betoniteknologiaa tunteville ilmamäärän vaikutus puristuslujuuteen on tuttu ilmiö, mutta geopolymeerejä käsittelevässä kirjallisuudessa tähän ei ole kiinnitetty niin paljoa huomiota, vaikka yleisesti tiedetään, että aktivaattoriliuoksen koostumuksella on merkittävä vaikutus sideainepastan viskositeettiin.
- Geopolymeeripastan korkea viskositeetti tulisi huomioida myös koko systeemin partikkelikokojakauman suunnittelussa. Korkean viskositeetin vuoksi geopolymeerilaastissa (ja betonissa) veden erottuminen ja massan koheesion säilyttäminen ei ole niin suuri ongelma kuin tavanomaisessa laastissa tai betonissa. Tämän vuoksi geopolymeerilaastiin ei ehkä tarvita niin paljoa hyvin hienojakoista täyteainetta, millä on puolestaan taas positiivinen vaikutus laastin työstettävyyteen.

Pohdintaa, lujuuden kehitys

- Laastiprismojen lujuuden kehitys lämpimässä oli hyvin jyrkkää, eikä näytteiden lujuuksissa tapahtunut juurikaan muutoksia 1 ja 28 päivän välillä.
 - Huoneenlämmössä lujittuvien sementtipohjaisten laastien lujuus kasvaa yleensä vastaavassa ajassa.
- Lujuuden puolesta lämpimässä lujittuneet referenssilaasti ja Sibelcon rikastushiekkaa sisältävät laastit täyttävät jopa eurooppalaisen sementtistandardin EN 197-1 vaatimukset korkealujuussementeille (lujuusluokka 52,5). Yaran rikastushiekkaa sisältävät laastitkin täyttivät lujuusluokan 42,5 vaatimukset.
- Huoneenlämmössä lujittuneen laastin varhainen lujuus kehittyi huomattavasti hitaammin kuin tavanomaisen sementtipohjaisen laastin, mikä luultavasti rajoittaisi sideaineen hyödyntämistä monissa käyttökohteissa (huoneenlämmössä lujittuvaa laastia ei voinut poistaa muotista vielä seuraavana päivänä). Tästä huolimatta huoneenlämmössä lujittuneen laastin puristuslujuus seitsemän päivän iässä saavutti jo 60 MPa ja 28 päivän iässä hiukan yli 70 MPa.
- Taivutusvetolujuudet olivat varhaisessa iässä (1-7 päivää) huomattavasti korkeampia kuin mitä on totuttu näkemään tavanomaisissa sementtilaasteissa. 28 päivän iässä referenssilaastin ero perinteisiin sementtilaasteihin oli kaventunut, rikastushiekkaa sisältävissä laasteissa taivutuslujuus oli vielä erinomaisella tasolla.
- Tavallisesta sementtistä poikkeava lujuudenkehitys kertoo luultavasti eroista sideaineiden reaktiotuotteissa ja reaktiomekanismeissa.
- Yaran rikastushiekkaa sisältäneissä näytteissä havaitun lujuuden laskun syy jäi epäselväksi. Johtuiko se pelkästään laastin lisääntyneestä huokoisuudesta, vai aiheuttiko sen jokin rikastushiekan fysikaalinen tai kemiallinen ominaisuus? Samaan aikaan kuitenkin laastien taivutuslujuus nousi jopa hiukan referenssiä korkeammaksi.

Pohdintaa, halkeilu

- Huoneenlämmössä lujittuneen pöytälevyn halkeilun lopullinen syy ei selvinnyt, mutta mahdollisia syitä voisivat olla:
 - Kuivumiskutistuma
 - Halkeamat havaittiin 1 vrk muotista poistamisen jälkeen.
 - Sideaineen tilavuuden muutokset geopolymeerin rakenteen muuttuessa
 - Ilmiöstä raportoitu aihetta käsittelevässä kirjallisuudessa
 - Voidaan vaikuttaa sideaineen Si/Al- suhteella sekä lujittumisolosuhteilla
 - Kappaleen kuormitus liian varhaisessa vaiheessa
 - Materiaalin taivutuslujuus mahdollisesti liian pieni muotista poistettaessa

Yhteenveto

- Sibelcon rikastushiekka soveltuu kokeiden perusteella hyvin geopolymeerilaastin täyteaineeksi. Oletettavasti rikastushiekka toimii hyvin myös tavanomaisessa laastissa ja betonissa.
- Yaran rikastushiekka ei sovellu hyvin geopolymeerilaastiin (eikä luultavasti myöskään tavanomaiseen laastiin tai betoniin). Syynä tähän on rikastushiekan sisältämät laattamaiset partikkelit, jotka heikentävät voimakkaasti laastin työstettävyyttä. Rikastushiekka heikensi myös laastinäytteiden lujuutta, mikä oletettavasti selittyy ainakin osittain jäykemmän laastin lisääntyneellä huokoisuudella.
- Yaran rikastushiekalla ei ollut negatiivista vaikutusta laastien taivutuslujuuksiin, mitä voidaan pitää yllättävänä tuloksena.
- Ominaisuuksiltaan Yaran rikastushiekkaa sisältävä geopolymeerilaasti voisi soveltua ruiskutettaviin massoihin joissa laastin tahmeus ja tarttuvuus voi olla edullinen ominaisuus.
- Laastinäytteissä hyödynnetyn geopolymeerisideaineen lujuuden kehitys oli huomattavan nopea, kun ne lujittuivat huoneenlämpöä korkeammassa lämpötilassa. Sideaineen varhainen lujuuden kehitys oli kuitenkin hidasta huoneenlämpötilassa, mikä rajaa sideaineen mahdollisen käytön pienemmän volyymin korkean arvon tuotteisiin, joissa voidaan hyödyntää korkeampaa lujittumislämpötilaa.

KEKØ

Geopolymeerit Oy

www.kekogeopolymeerit.fi

jouni@kekogeopolymeerit.fi

+358505337475

