

Tero Gullsten

PASTAN KOOSTUMUKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

PASTAN KOOSTUMUKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tero Gullsten
Opinnäytetyö
Syksy 2023
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulu ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Tero Gullsten

Opinnäytetyön nimi: Pastan koostumukseen vaikuttavat tekijät

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Factors That Affect the Consistency of Paste.

Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari, Sofia Veki ja Riina Ahtiainen

Työn valmistuslukuksi ja -vuosi: Syksy 2023

Sivumäärä: 51

Opinnäytetyön antoi Kittilän kaivos, joka on Agnico Eagle Finlandin omistuksessa oleva kultakaivos. Työssä tutkittiin partikkelikoon ja pastan kiintoainepitoisuuden vaikutusta pastan laatuun. Lisäksi vertailtiin keskenään painumatestejä ja kiintoaineanalysointoreita, jotka ovat pastan laatu arvioivia mittausmenetelmiä. Partikkelikoon on huomattu aikaisemmissa tutkimuksissa vaikuttavan pastan laatuun, joten sen mittaaminen aloitettiin myös kaivoksella. Pastan laatuun vaikuttaa useita erilaisia tekijöitä esimerkiksi rikastushiekka, sidosaine ja vesi sekä veden ja sementin suhde sekoituksessa.

Opinnäytetyössä tutkittiin pastaan vaikuttavista tekijöistä rikastushiekan partikkelikokoa ja kiintoainepitoisuutta. Lisäksi työssä tutkittiin pastan painumaa, kiintoainepitoisuutta ja puristuslujuutta. Partikkelikokoa arvioitiin Mastersizer 3000 analysointorilla, jonka tulosten arvioiminen perustuu valonsirontaan. Kiintoainepitoisuudet määritettiin kiintoaineanalysointoreilla, jotka määrittävät massan eroa tietyssä lämpötilassa. Painuman testaamiseen käytettiin ASTM-standardin mukaista painumatestiä. Puristuslujuudet mitattiin yksiaksiaalisella puristuskojeella, joka mittaa näytteen puristusvoimaa ja kokoonpuristuvuutta. Puristuslujuudet mitattiin pastanäytteistä, jotka valmistettiin pastalaitosten tuotannon aikana kerätyistä rikastushiekasta, sementistä ja vedestä.

Opinnäytetyössä vertailtiin eri aikaan tapahtuvia louhostäyttöjä. Louhostäyttöjen näytteistä vertailtiin partikkelikojakauman ja rikastushiekan kiintoainepitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen. Tulosten perusteella hienojen partikkeleiden määrällä (alle 20 µm partikkelikoko) oli vaikutusta puristuslujuuteen. Rikastushiekassa hienojen partikkeleiden määrän lisääntyessä, rikastushiekan kiintoainepitoisuus laskee, tarvittavan sementin määrää nousee sekä veden säilytyskyky pastassa kasvaa. Hienojen partikkeleiden vaikutusta voidaan vähentää: parantamalla suodatusta (kiintoainepitoisuus nousee), pidentämällä kuivumisaikaa (pidempi kovettumisaika) ja nostamalla sementin määrää.

Asiasanat: pasta, partikkelikoko, louhos, kiintoainepitoisuus, painumatesti, puristuslujuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy technology

Author: Tero Gullsten

Title of thesis: Factors That Affect the Consistency of Paste.

Supervisors: Jukka Ylikunnari, Sofia Veki, Riina Ahtiainen

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2023

Number of pages: 51

The thesis was given by Kittilä mine, which is a gold mine owned by Agnico Eagle Finland. In the thesis, the effect of particle size and the solids content on the quality of the paste was investigated. In addition, slump tests and solids analyzers, which are measuring methods that evaluate the quality of paste, were compared. It has been noticed in previous studies that the particle size affects the quality of the paste, so it was also started to be measured at the mine. The quality of the paste is affected by several different factors, for example, sand, binder, and water, as well as the ratio of water and cement in the mixture.

In the thesis, among the factors affecting the paste, the particle size, and solids content of the tailings, as well as the slump, solids content and compressive strength of the paste were measured. The particle size was measured with a Mastersizer 3000 analyzer, whose measurement is based on light scattering. Solids concentrations were measured with solids analyzers that measure the difference in mass at a certain temperature. A slump test according to the ASTM standard was used to measure the slump. The compressive strengths were measured with a uniaxial compression tester, which measures the compression value and compressibility of the sample. The compressive strengths were measured from pasta samples that were prepared from tailings, cement and water collected during the production of pasta plants

In the thesis, stope fillings that took place at different times were compared. The effect of the particle size distribution and the concentration of tailings solids on the compressive strength was compared from samples of stope fills. The results showed that the amount of fine particles (particle size less than 20 μm) had an effect on the compressive strength. As the amount of fine particles in the tailings increases, the solid content of the tailings decreases, the amount of cement required increases and the water retention capacity in the paste increases. The effect of fine particles can be reduced: by improving filtration (the solids content increases), by extending the drying time (longer hardening time) and by increasing the amount of cement.

Keywords: paste, particle size, stope, solids content, slump test, compressive strength

ALKULAUSE

Haluaisin kiittää Lauri Vekiä, joka jaksoi uutterasti kyselemällä hankkia minulle opinnäytetyön. Sofia Vekiä ja Riina Ahtiaista, että he jaksoivat opastaa ja auttaa minua opinnäytetyön tekemisessä, sekä kaikkia muita metallurgeja ja tuotannon työntekijöitä, jotka jaksoivat vastaila kysymyksiini. Kiitokset vielä Ville Aspegrenille, joka oli mukana metsästävässä mittausvälineitä. Kiitokset myös nopeista vastauksista Jukka Ylikunnarille, joka toimi koulun puolelta ohjaavana opettajana.

Kittilässä 5.5.2023

Tero Gullsten

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	10
2	AGNICO EAGLE.....	11
3	KAIVOKSEN PROSESSIT	13
3.1	Maanalaisen prosessit.....	13
3.1.1	Peränajo.....	13
3.1.2	Tuotantolouhinta	15
3.1.3	Louhostäytön valmistelut kaivoksessa	16
3.2	Rikastamon prosessit	16
3.3	Kittilän kaivoksen pastatäyttö	20
3.3.1	Yleiset kaivostäytöt	20
3.3.2	Pastalaitosten prosessit	22
4	PASTAN LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	23
4.1	Rikastushiekka	23
4.2	Sidosaine.....	24
4.3	Prosessivesi	24
4.4	Pastan sekoittaminen	25
5	MITTAUSMENTELMÄT	26
5.1	Painumatesti.....	26
5.2	Kiintoaineen määrittäminen	27
5.3	Puristuslujuus määrittäminen.....	29
5.4	Partikkelikoon määrittäminen.....	31
6	MITTAUSTULOKSET JA ARVIOINTI	35
6.1	Louhosnäytteiden vertailu.....	36
6.2	Jauhatusnäytteiden vertailu.....	39
6.3	Kiintoainepitoisuuden vertailu	42
6.4	Kiintoaineanalysaattoreiden vertailu	46
6.5	Painumatestien vertailun tulokset ja arviointi.....	47
7	YHTEENVETO	49
	LÄHTEET.....	51

SANASTO

AEF	Agnico Eagle Finland
Aran	Pastalaitos
ASTM testi	ASTM-stantardin mukainen painumatesti
Boger testi	Painumatesti
CCD	Counter Current Decantation eli vastavirtapesu
CIL	Carbon in Leach eli prosessi, jossa kulta liuotetaan rikasteesta syanidilla ja absorboidaan aktiivihilleen
Lajittuminen	Kiviaineet kerrostuvat omiksi tasoiksi
Malmi	Mineraaliesiintymä, josta voidaan taloudellisesti tuottaa metalleja
Painumatesti	Mittaustapa, jolla mitataan, kuinka paljon kartion muotoiseen astiaan laitettu pasta laskeutuu
Partikkelikoko	Kuvaa partikkeleiden kokoa
Pasta	Rikastehiekan, veden ja sementin muodostama seosaine, jolla täytetään louhoksia
Perä	Ennen louhosta sijaitseva tunneli, jonka kautta kuljetaan malmi pois
P&C	Paterson and Cooke
Rikastushiekka	Sivutuote, jota syntyy malminrikastamisessa
RPP	Lyhennelmä Rimpi-pastalaitoksesta

SAG -mylly

Semiautogeenimylly

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Agnico Eagle Finland Oy, jonka toimipaikka sijaitsee Kittilän kunnassa. Opinnäytetyön aiheena on partikkelikoon vaikutus pastan puristuslujuuteen. Pasta on rikastushiekan, sidosaineen ja veden muodostama seos, jota käytetään kaivoksissa louhoksien täyttöaineena. Pastan puristuslujuudesta oli saatu huonoja testituloksia ja haluttiin selvittää mitkä tekijät siihen vaikuttavat. Heikkolaatuinen pasta (, jossa puristuslujuus jää alle tavoitteen) voi vaikuttaa kaivoksen louhintasuunnitelmaan ja pahimmillaan aiheuttaa jopa vaaratilanteita. Pastan puristuslujuutta ja varmuuskerrointa pyritään nostamaan sidosaineen määrällä, jolloin kustannukset kasvavat. Partikkelikoko valittiin opinnäytetyössä tarkemmin tarkasteltavaksi muuttujaksi, koska pastassa käytettävän rikastushiekan tiedetään sisältävän enemmän hienoja partikkeleita kuin pidetään yleisenä suosituksena.

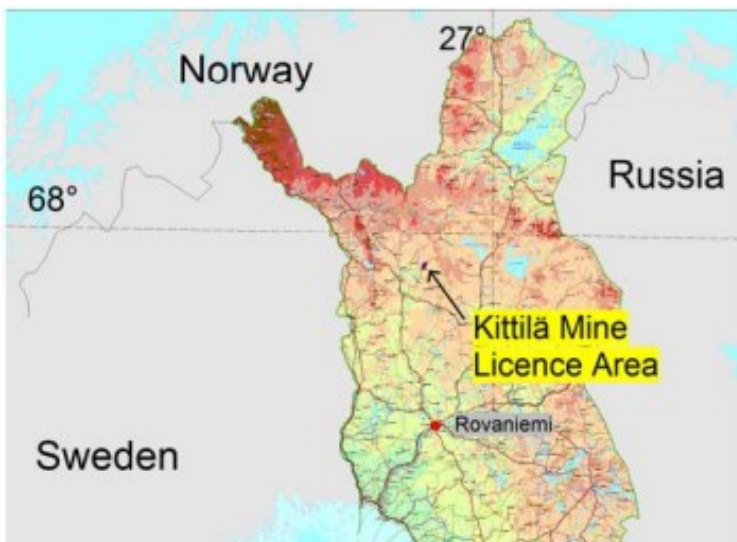
Pastan koostumukseen vaikuttavia tekijöitä ovat rikastushiekan, sidosaineen (esimerkiksi sementin) ja veden fysikaaliset, kemialliset sekä mineralogiset ominaisuudet. Pastan koostumukseen vaikuttavat myös sekoituksen ominaisuudet: sementin ja veden suhde ja pastan kiintoainepitoisuus sekä louhoksen ominaisuudet: vallitseva paine ja lämpötila. Opinnäytetyössä keskitytään enemmän rikastushiekan fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten partikkelikoon mittaamiseen, kuin veden tai sidosaineen ominaisuuksiin. Pastan puristuslujuusmittaukset teetetään ulkopuolisessa laboratoriossa, Envitop Oulu. Kaivoksella tehtäviä mittauksia ovat partikkelikoko (Mastersizer), kiintoainepitoisuus (kiintoaineanalyysointilaitteisto) ja painuma.

Työn tavoitteina on tutkia partikkelikoon ja pastan kiintoainepitoisuuden vaikutusta pastan puristuslujuuteen. Lisäksi työssä vertailtiin nykyistä tuotannossa käytössä olevaa ASTM-standardin painumatestin ja Bogerin painumatestimenetelmän käytettävyyttä ja soveltavuutta pastan laadun mittaamiseen sekä arvioitiin kiintoaineanalyysointilaitteistojen tulosten luotettavuutta.

2 AGNICO EAGLE

Agnico Eagle Mines Limited on kanadalainen kaivosyhtiö, jolla on kaivoksia Kanadassa, Australiassa, Meksikossa ja Suomessa. Lisäksi malminetsintää ja kehitystyötä harjoitetaan Pohjois-Amerikassa, Euroopassa ja Australiassa. Agnico Mines Limited historia alkaa vuodesta 1953, jolloin viisi hopeakaivosta fuusioitui yhteen ja muodostivat Cobalt Consolidated Mining Companyn. 1957 yhtiö uudelleen organisoitui ja vaihtoi nimensä Agnico Mines Limited:ksi. 1972 Agnico Mines Limited yhdistyi Eagle Gold Mines Limitedin kanssa muodostaen Agnico Eagle Mines Limitedin. Agnico Eagle Mines Limited on ostanut useita kaivosyhtiöitä ympärimaailmaa, kuten Goldex Minesin (Quebecin suurimman kaupallistamattoman kultaesiintymän) 1993 ja Riddarhyttan Resources AB:n (Suurikuusikon kultaesiintymän) 2006. Viimeisimpänä Agnico Eagle yhdistyi Kirkland Lake Goldin kanssa vuonna 2022, joka omisti useita kultakaivoksia Kanadassa ja Australiassa. (1; 2.)

Agnico Eagle Finland Oy on Agnico Eagle Mines Limitedin sisaryhtiö, joka omistaa Kittilän kultakaivoksen. Kittilän kultakaivos sijaitsee Kiistalassa noin 50 km päässä Kittilästä (kuva 1). Ensimmäiset kultaesiintymät Kiistalassa löydettiin vuonna 1986, ja siellä aloitettiin kaupallinen toiminta 2009, jolloin myös ensimmäiset kultaharkot valettiin. Agnico Eagle Mines osti Kiistalan kultaesiintymän Riddarhyttanilta 2006. Kaivoksen toiminta-aika riippuu malmin etsinnän tuloksista, nykyisen arvion perusteella toiminta jatkuu vuoteen 2034 asti. (3.)



KUVA 1. Kittilän kultakaivos (4, s. 17)

Vuonna 2008 toiminta aloitettiin louhimalla malmia kahdesta avolouhoksesta. Maanalainen louhinta aloitettiin 2010. Avolouhostoiminta päättyi vuonna 2012, jolloin siirryttiin kokonaan maanalaiseen louhintaan. Kaivoksesta louhitaan noin 2 miljoonaa tonnia malmia vuodessa ja tuotanto on noin 7000 kg kultaa. Kaivos työllistää 500 omaa työntekijää ja 600 eri urakoitsijoiden työntekijää. Työntekijöistä noin puolet tulevat Kittilästä ja suurin osa Lapin alueelta. (3.)

3 KAIVOKSEN PROSESSIT

Kaivoksessa tapahtuvat prosessit on jaettu kolmeen osaan: maanalaiseen, rikastamon ja pastan prosesseihin. Maanalaisessa prosesseissa malmi louhitaan kallioperästä ja kuljetetaan maanpinnalle. Rikastamon prosesseissa malmi murskataan ja rikastetaan eli se käsitellään siten, että siitä saadaan kulta talteen. Sivutuotteena tulee rikastushiekkaa. Pastalaitosten prosesseissa osa rikastamolta tulevasta rikastushiekasta sekoitetaan sementin ja veden kanssa pastaksi, jolla täytetään louhoksia. Loput rikastushiekasta johdetaan rikastushiekka-altaille.

3.1 Maanalaisen prosessit

Maanalainen prosessi koostuu peränajosta, tuotantolouhinnasta ja louhostäytöstä. Peränajon tarkoituksena on louhia tunneli, jota pitkin pääsee louhimaan malmiesiintymää. Tuotantolouhinnassa malmiesiintymä louhitaan ja kuljetetaan murskaimelle. Pastatäytön valmistelussa rakennetaan louhoksen täyttämiseen tarvittavat pastapadot sekä ohjataan pastalinjasto oikeaan louhokseen.

3.1.1 Peränajo

Kittilän kaivoksessa tunnelilouhinta eli peränajo (kuva 2) aloitetaan porauksella. Poraus suoritetaan sähköhydraulisilla porausajoneuvoilla ja porareivät sijoitetaan louhokseen keskilinjaa ja leikkausmerkkejä apuna käyttäen. Kun porauskoneet on oikein asemoitu, porataan ennalta määritetyn porauskaavion mukaan. Porauksen jälkeen tapahtuu panostus ja siinä käytetään apuna panostusajoneuvoa, jolla pystytään pääsemään nostokoria apuna käyttäen myös korkealla sijaitseviin reikiin. Panostuksessa porattuihin reikiin asetetaan räjäytysnallit sekä räjähdysaine. Räjäytyksen jälkeen alue tuuletetaan ja räjähdystulos tarkastetaan. (5, s. 150 - 152; 6.)

Peränajo



KUVA 2. Peränajon vaiheet Kittilän kaivoksessa (2, s. 12)

Tarkastuksen jälkeen lastaaja käy vielä tarkastamassa, että alueella on turvallista aloittaa lastaaminen. Ennen lastaamista kivet pitää kastella, jotta niistä ei irtoaisi haitallista pölyä ja savua. Kivet lastataan kuorma-autoihin ja kuljetetaan varatuille paikoille maan pinnalle tai alle. Malmi ja sivukivet erotellaan, sekä malmi erotellaan toisistaan malmilaadun mukaan ja kuljetetaan omiin kasoihin murskaimen läheisyyteen. Sivukivet pyritään käyttämään maan alla louhostäytössä tai maanpäällisissä töissä. (5, s. 152 - 153; 6.)

Lastauksen jälkeen suoritetaan rusnaus eli irtokivien poistaminen katosta ja seinistä. Rusnaus suoritetaan rusnauslaitteella, jolla joko raavitaan tai vasaroidaan perän pinnat. Kun rusnaus on suoritettu, tuetaan perä tuentastandardin mukaan. Tuenta suoritetaan ruiskubetonoinnilla, pulttauksella (harjateräs, swellex tai dynaaminen) tai verkotuksella. Tuentamenetelmät koostuvat yhdestä näistä tai näiden menetelmien yhdistelmästä. Standardi määräytyy ajettavan perän kivilaadun ja käyttötarkoituksen mukaan. Pulttauksen, verkotuksen ja ruiskubetonoinnin tarkoitus on vahvistaa perää ja estää irtokivien tippuminen. Pulttauksissa käytetään mekaanista konetta, joka poraa ensin reiät ja sitten kiinnittää pultit. Verkotuksissa suojaverkko sijoitetaan pulttien aluslevyjen alle pulttien asennuksen yhteydessä. Ruiskubetonoinnissa betonimassa suihkutetaan ruiskubetonointikoneella perän seinämiin ja kattoon. (5, s. 239 - 244; 6; 7, s. 9 - 14.)

3.1.2 Tuotantolouhinta

Kun peränajo on suoritettu, aloitetaan malmin louhinta eli tuotantolouhinta (kuva 3). Ensimmäiseksi pitää varmistaa perän turvallisuus, mikä tehdään vaijeripulttaamisella eli kalliota lujittamaan asennetaan vaijereita, jotka kiristyessä tukevat kalliota. Louhoksen katto ja lastausaukko vaijeripulttaaan 6 - 8 m mittaisilla sementtijuotetuilla vaijereilla louhinnan aikaisen stabiliteetin parantamiseksi. Sen jälkeen louhoksen avaamisen tarvittava tyhjä tila luodaan erillisellä nousulouhinnalla. Nousulouhinta tehdään joko nousuporaus koneella tai pitkäreikäkoneella. Nousuporaus koneella tehdään yleensä 1 - 2 reikää, halkaisijaltaan 660 mm, ja niiden ympärille porataan tihennetty porauskuvio. Nousulouhinnan jälkeen suoritetaan tuotantoporaus, jossa porataan panostusta varten tarvittavat reiät. (5, s. 195 - 196; 6.)

Tuotantolouhinta



KUVA 3. Tuotantolouhinnan vaiheet (2, s. 13)

Tuotantoporaamiset voidaan suorittaa joko yläkätisenä tai alakätisenä eli louhoksen yläpuolelta tai alapuolelta. Kittilässä käytetään yleensä alakätistä porausmenetelmää. Porauksen jälkeen asetetaan räjähdysaineet ja nallit ja tehdään räjäytys. Räjäytys voidaan suorittaa useassa osassa riippuen louhoksen koosta. Vähimmillään suoritetaan avausnousu eli räjäytetään ensin sopivan kokoinen alue, jolloin saadaan tilaa loppuräjäytyksen paisumiselle ja sitten suoritetaan loppuräjäytys eli loput louhoksesta räjäytetään kerralla. Räjäytyksen jälkeen tapahtuu lastaaminen louhoksen alapuolelta ja malmi kuljetaan murskaimien lähelle ja lajitellaan. Kun louhos on valmis, aloitetaan louhostäytön valmistelut. (5, s. 195 - 196; 6.)

3.1.3 Louhostäytön valmistelut kaivoksessa

Ennen louhostäytön aloitusta pitää varmistua, että louhintatyöt ja valmistelut on saatettu valmiiksi. Kun louhoksen lastaus on valmis, louhoksen tilavuus skannataan ja aloitetaan rakentamaan pastapatoa. Pastapadon tarkoitus on estää pastan valuminen louhoksesta, ja se rakennetaan louhimisesta saatavasta peräkivistä eli sivukivistä. Pastapadon pituus pitää olla yläosasta vähintään 4,5 m paksu, jos perän pituus riittää. Pastapato tiivistetään huolellisesti yrittäen saada padon ja perän katon välinen rako mahdollisimman pieneksi. Padon yläreunan ja perän katon väliin asetetaan kaivosverkkoa tukemaan raon ruiskubetonointitiivistystä. Pastapadon eteen rakennetaan suotopenkka, jonka tarkoitus on estää pastapadon läpi vuotanutta pastaa leviämästä pidemmälle. (6; 8, s. 33 - 36.)

Ennen täyttämistä täytyy myös louhokseen johtaa pastatäyttölinja. Täyttö tapahtuu louhoksen yläpuolelta. Teräspastalinjaston runkolinja alkaa pastalaitokselta ja sitä on rakennettu kaivoksen syväosiin asti tuotannon perässä. Pastalinjasto johdetaan kaivoksen eri tasoilla oleviin pastaperiin putkitettujen kallioreikien eli pastareikien kautta. Pastaperästä pastaputkilinjasto johdetaan samalla tasolla olevaan louhokseen tai pastaperästä lähtevää pastareikää pitkin alemman tason pastaperään. Pastaperistä johdetaan pasta runkolinjasta tasolinjoja pitkin louhokseen. Tasolinja rakennetaan rautaputkesta ja louhospää muoviputkesta, jonka maksimi pituus on 200 m. Teräslinjaston asentaminen tapahtuu aina kattoon. Kattoon asennetaan tartunta pultit, ja niihin kiinnitetään U-palkki. Putkiston kiinnittäminen U-palkkeihin tapahtuu U-sangoilla. Muoviputket kiinnitetään joko kattoon tai seinille ja kiinnittäminen tapahtuu joko kiila-ankkureilla tai Dywidag-pulteilla. Muoviputket tuetaan U-palkeilla ja -sangoilla. Maassa olevat putket tuetaan louheella tai murskeella. (6; 8, s. 33 - 36.)

3.2 Rikastamon prosessit

Rikastamon prosessit (kuva 4) alkavat maan alta tulevan malmin murskaamisella. Murskattu malmi kulkee usean eri prosessin läpi ja johdetaan lopuksi rikastushiekkana pastalaitoksille (kuva 5).

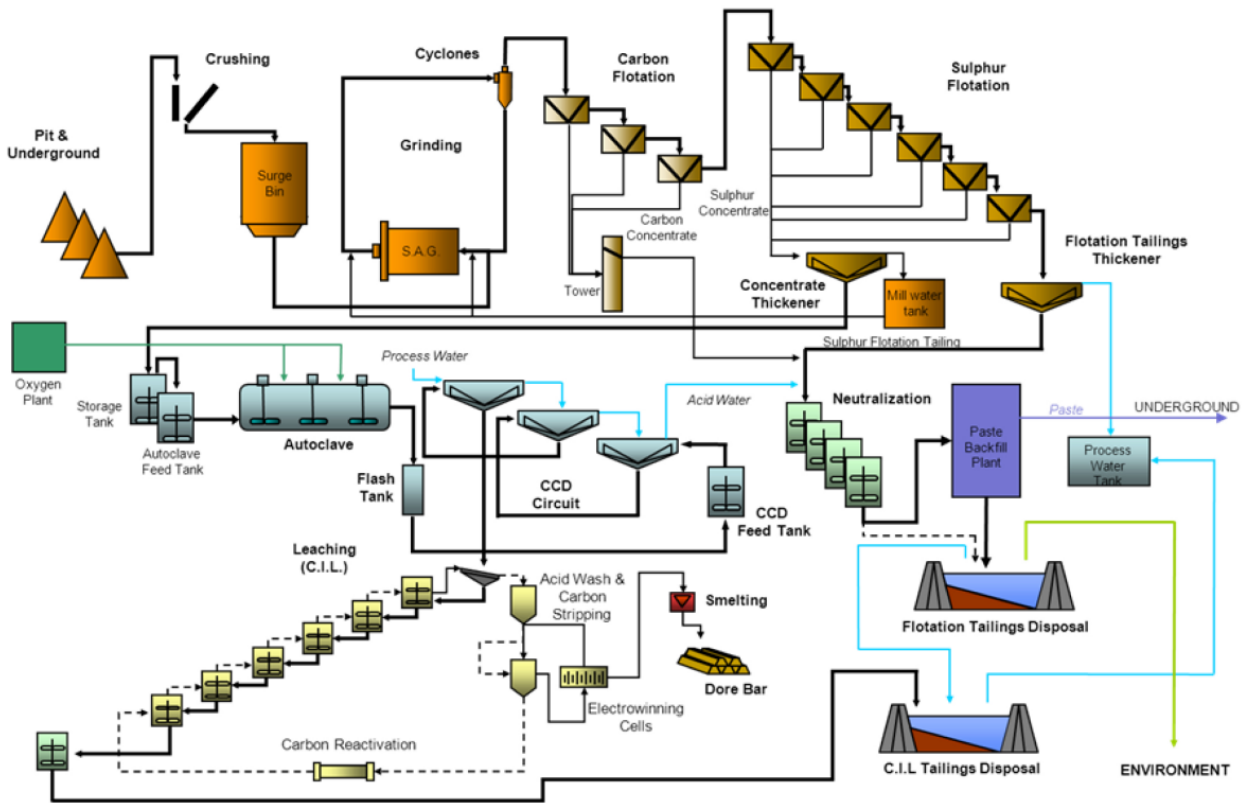
Murskaaminen tapahtuu leuka- ja karamurskalla. Murskaamisen jälkeen tapahtuu kaksiosainen jauhatus: ensin SAG-myllyllä ja lopuksi kuulamyllyllä. Jauhatuksen tavoitteena on jauhaa malmi optimaaliseen partikkelikokoon vaahdotusta varten. Jauhettu malmi seulotaan täryseuloilla. Seulanylite (seulankokoa karkeampi materiaali) palautetaan takaisin myllyille uudelleen jauhettavaksi. Seulanalite (seulan läpäisevä materiaali) jatkaa matkaa hydrosykloneille. Hydrosykloneilla tapahtuu malmin partikkelikokoon luokitus. Karkeampi tavara painuu syklonissa pohjalle ja se kierrätetään takaisin myllyille. Hienompi tavara nousee syklonissa ylöspäin ja se johdetaan hiilivaahdotukseen. (9; 10.)

Rikastusprosessi



KUVA 4. Rikastusprosessin vaiheet (2, s. 14)

Syklonien jälkeen seulottu malmi syötetään hiilivaahdotukseen, jossa poistetaan mahdollisimman suuri osa orgaanisesta hiilestä. Orgaaninen hiili huonontaa kullan talteensaantia prosessin myöhemmissä vaiheissa. Hiilirikaste syötetään neutraloinnin kautta edelleen rikastushiekan mukana pastaan. Hiilivaahdotuksen jäännös toimii sulfidivaahdotuksen syötteenä. Sulfidivaahdotuksessa sulfidit vaahdottuvat, jolloin sulfidien sisältämä kulta rikastuu samanaikaisesti sulfidien kanssa. Sulfidirikaste (rikaste) pumpataan rikastesakeuttimien kautta eteenpäin prosessissa. Sulfidivaahdotuksen pohjalle jäävä sulfidivaahdotuksen jäännös johdetaan sakeuttimien kautta neutralointiin. (9; 10.)



KUVA 5. Rikastamon rikastusprosessin yksinkertaistettu kulkukaavio (11)

Sakeuttimien tarkoitus on nostaa kiintoainepitoisuutta poistamalla liuosta sakeuttimen syötteestä. Kittilän kaivoksella sakeuttimiin lisätään flokkulanttia, joka auttaa partikkeleiden laskeutumisessa pohjalle ja parantaa yliteveden kirkkautta. Rikastesakeuttimen alite, jossa on korkeampi kiintoainepitoisuus, johdetaan autoklaaviin. Autoklaavissa alitteen sisältävät sulfidit (esimerkiksi pyriitti ja arsenopyriitti) hapetetaan korotetussa paineessa ja lämpötilassa hapen toimiessa hapettimena. Sulfideihin sitoutunut kulta vapautuu niiden hapettuessa. Autoklaavista alite puretaan flash-tankkiin paineen alentamiseksi. Paineen ja lämpötilan alentumisen seurauksena muodostuu kuumaa vesihöyryä. Vesihöyry johdetaan ensin kaasupesurin läpi, jonka jälkeisestä puhdistetusta höyrystä voidaan lämmönsiirtimillä ottaa lämpö talteen ja käyttää hyödyksi kaukolämpönä. Autoklaavin jäännös syötetään edelleen CCD-piiriin. (9; 10.)

CCD-piiriin tarkoituksena on pestä autoklaavissa muodostunut hapan liukoisia metalleja sisältävä liuos kiintoaineesta. CCD-piiri koostuu kolmesta sakeuttimesta. Autoklaavin liuosjäännös syötetään ensimmäiseen sakeuttimeen. Edeltävän sakeuttimen alitetta käytetään aina seuraavan sakeuttimen syötteenä. Pastasakeuttimen ylitevettä käytetään CCD-piirissä pesuvetenä ja se syötetään

ensimmäiseksi viimeiseen sakeuttimeen. Sakeuttimissa ylitevesi johdetaan aina edeltävään sakeuttimeen. Näin ollen kiintoainetta sisältävä alite ja pesuvettä sisältävä ylitevesi virtaavat vastakaisiin suuntiin. Viimeisen sakeuttimen alite syötetään kullan liuotukseen CIL-piireille ja ensimmäisen sakeuttimen ylitevesi neutraloidaan neutraloinnissa. (9; 10.)

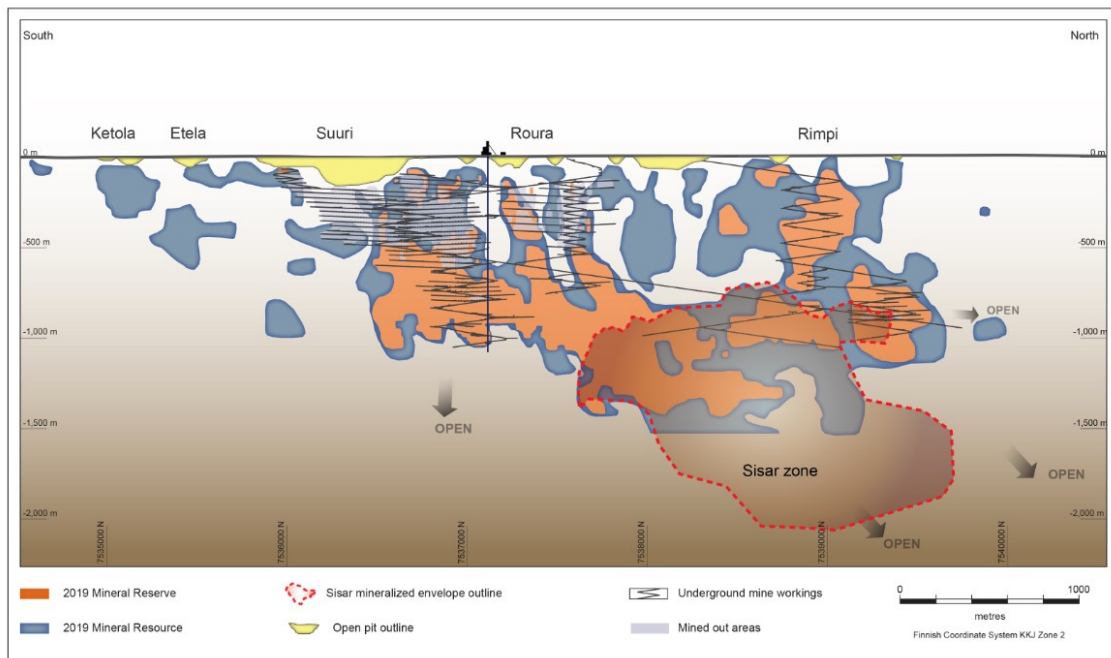
Ennen syanidiliuotusta alitteen pH tulee nostaa emäksiselle alueelle, jotta syanidi ei hajoa vetycyanidiksi. Kalkkimaitoa eli kalsiumhydroksidilietettä käytetään neutralointi kemikaalina. Kulta liuotetaan CIL-piirissä käyttäen apuna syanidia, ilmassa olevaa happea ja aktiivihiihtä. Kultasyanidikompleksi absorboidaan aktiivihiiheen samassa reaktiossa liuotuksen kanssa. Aktiivihiihtä siirretään vastaavasti vastavirtaan lietteen kanssa. Ensimmäisessä CIL-liuotusreaktorista ladattu aktiivihiihtä pumpataan ladatun hiilen seulalle. Seulalla liete erotetaan karkeammasta aktiivihiihtestä. Kullan liuotuksesta liete siirtyy syanidihajoitusreaktoreihin. Syanidi hajotetaan rikkidioksidin ja hapen avulla kuparin ollessa katalyyttinä. Rikkidioksidin lähteenä käytetään natriummetabisulfidia (SMBS) ja ilman happea. Syanidin hajotuksen jälkeen liete pumpataan CIL-altaalle. Altaalla kiintoaine jää altaalle ja vesi kierrätetään takaisin rikastamon prosessiin. (9; 10.)

Seulotut aktiivihiihtet siirretään huuhteluun ja happopesuun. Happopesussa laimealla typpihapolla pestään epäorgaaniset epäpuhtaudet, esimerkiksi kalkkia, rautaa ja kuparia. Happopesty aktiivihiihtet huuhdellaan ensin vedellä ja myöhemmin laimealla natriumhydroksidilla. Neutraloidut aktiivihiihtet siirretään strippauskolonneihin. Strippauksessa kulta takaisinuuutetaan liuokseen korotetussa paineessa ja lämpötilassa, käyttäen syanidiliuotusta korkeampaa syanidipitoisuutta strippausliuoksessa. Kultapitoinen strippausliuos pumpataan elektrolyyysikemenoille, jossa kulta pelkistetään kulta-lietteeksi. Kultaliete suodatetaan, sulatetaan ja valetaan harkoiksi. Stripatut aktiivihiihtet regeneroidaan uunissa korotetussa lämpötilassa orgaanisten epäpuhtauksia poistamiseksi ennen aktiivihiihten palautusta viimeiseen CIL-reaktoriin. (9; 10.)

Sulfidivaahdotuksen jäännös, hiilivaahdotuksen rikaste ja CCD-piirin ensimmäisen sakeuttimen ylite reagoivat neutraloinnissa muodostaen rikastushiekan. Neutraloinnissa CCD-piirin ensimmäiseltä sakeuttimelta tuleva hapan ylite neutraloidaan sulfidivaahdotuksen jäännöksen sisältävillä karbonaateilla. Säiliöihin syötetään myös ilmaa hapettamaan rauta (II) rauta (III):si. Karbonaattien vaikutuksesta pH nousee neutraloinnissa, jolloin osa liuenneista metalleista saadaan saostettua. Viimeisimpiin neutralointireaktoreihin lisätään kalkkimaitoa tavoite pH:n saavuttamiseksi. Neutraloinnista rikastushiekka siirretään pastalaitoksille. Kuvassa 5 on esitettyä yksinkertaistettu kulukaavio rikastamon prosesseista murskauksesta pastalaitoksille. (8, s. 37 - 39; 9; 10.)

3.3 Kittilän kaivoksen pastatäyttö

Kaivostäytön yleisimmät menetelmät ovat sivukivitäyttö, hydraulinen täyttö ja pastatäyttö. Kaivostäytöllä tarkoitetaan aikaisemmin louhittujen louhoksien täyttämistä uudelleen, jotta pystytään vahvistamaan kaivosta ja tekemään siitä turvallisempi uusien louhoksien louhimiselle. Täyttämällä louhoksia pystytään myös käyttämään hyväksi sivukivet sekä osan rikastehiekasta. Kittilän kaivoksella käytetään pastatäyttöä ja sekundäärisenä täyttönä kivitäyttöä. Kaivoksella sijaitsee kaksi pastalaitosta. Vanhempi Aran-pastalaitos on ollut käytössä jo vuodesta 2012, ja uudempi Rimpi-pastalaitos aloitti 2019. Aranin-pastalaitos täyttää Suurikuusikon (Suuri) ja Ruoravaaran (Roura) louhoksia ja Rimpi-pastalaitos täyttää Rimpivuoman (Rimpi) louhoksia (kuva 6).



KUVA 6. Kittilän kaivoksen malmiot (11)

3.3.1 Yleiset kaivostäytöt

Sivukivitäyttö tapahtuu louhoksien karkeasta sivukivestä, jota saadaan peränajosta ja nousunajosta. Sivukivitäyttöä käytetään yleensä kaivoksissa, sekundääri täyttöinä sekä kaivoksilla, joissa ei pystytä tuottamaan riittävästi rikastushiekkaa tai sitä ole ollenkaan saatavilla. Sivukivien raekoko määräytyy kuljetustavan mukaan ja voi vaihdella huomattavasti. Pienin raekoko on putkistoissa,

joissa se ei saa olla suurempi kuin neljäsosa putken halkaisijasta ja suurin raekoko on lastauskoneissa. Sivukivien kuljetustapoina on erilaiset lastauskoneet, hihnat, kuilut tai putkilinjastot. Sivukivitäytön hyviä puolia on käytettävän veden vähäinen määrä, sivukivet saadaan hyötykäyttöön maan alle ja sivukivien kuljetus on suhteellisen helppoa. Huonoina puolina sivukivitäytössä on kivien murskaamisesta johtuva kustannusten nousut sekä puristuslujuudet eivät ole niin korkeita. (5, s. 258 - 259; 12, s. 5183 - 5184.)

Sivukivitäytöstä voidaan myös tehdä kovettuva sivukivitäyttö lisäämällä sidosainetta kivien sekaan. Sidosaime voidaan suoraan sekoittaa sivukivitäytteen kanssa tai sekoittaa rikastushiekan sekaan ja johtaa putkilinjastoilla täytössä olevaan louhokseen yhdessä sivukivien kanssa. Sidosaimeesta voi myös tehdä lietettä, jonka voi kaataa sivukivitäytön jälkeen louhokseen. Sivukivien raekoko täytyy silloin olla sopiva, että liete pääsee murskattujen kivien väliin. Kovettuvan sivukivitäytön tarkoitus on nostaa täytteen puristuslujuusvaatimusta, täyttämällä kivien välissä olevia rakoja. Kovettuvan sivukivitäytön hyviä puolia ovat samat kuin sivukivitäytössä, mutta siinä on myös korkeat puristuslujuusarvot. Huonoina puolina on epätasalaatuinen kovettuminen ja täyteaineen lajittuminen. (5, s. 258 - 259; 12, s. 5183 - 5184.)

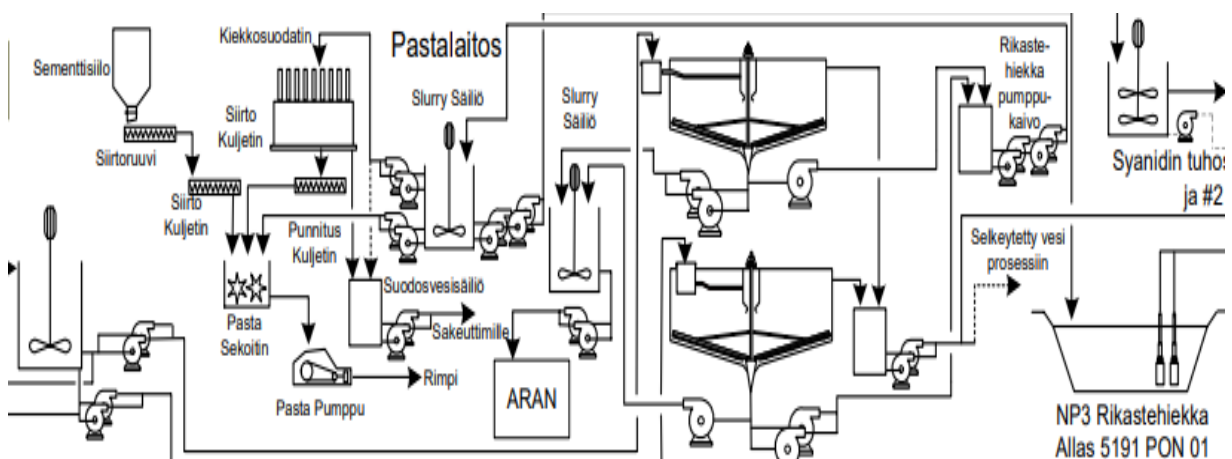
Hydraulisessa täytössä käytetään vedestä ja kiintoaineesta koostuvaa lietettä. Lietteen kiintoaineena käytetään rikastushiekkaa, hiekkaa tai soraa. Hydraulisessa täytössä lietteen kuljettaminen louhokseen tapahtuu yleensä painovoimalla tai tarvittaessa pumppaamalla. Täytön aikana louhokseen kerääntynyt ylimääräinen vesi suotautuu pois suotoputkien ja patojen avulla. Lietteeseen voidaan lisätä sementtiä kovettamaan, mutta haittana on suuresta vesimäärästä johtuva lajittuminen. Hyvinä puolina on lietteen laadun helppo varmistaminen ja siirrettävyys louhokseen. Lisäksi saadaan rikastushiekkaa hyödynnettyä ja vähennettyä ympäristövaikutuksia. Huonoina puolina on suuri vesimäärä, joka kasvattaa lajittumista. Lisäksi ylimääräinen vesi pitää suotautua louhoksesta ja myöhemmin pumputa pois kaivoksesta. Nämä vaiheet vaativat aikaa ja nostavat kustannuksia. (5, s. 257 - 258; 12, s. 5183 - 5186.)

Pastatäytössä louhokset täytetään sidosaimeesta, rikastushiekasta ja vedestä koostuvalla pastalla. Pastassa on suurempi kiintoainepitoisuus ja ylimääräistä vettä ei tarvitse pumpata louhokseen kuten hydraulisessa täytössä. Rikastushiekkalietteestä poistetaan ylimääräinen vesi laskeuttamalla (sakeutemilla), sykloimalla ja/tai suodattamalla. Pastatäytön hyviä puolia ovat rikastushiekan hyödyntäminen, täytössä käytetyn pastan tasalaatuisuus ja sidosaimeen vähäisempi kulutus. Pas-

tatäytössä lyhyempien kuivumisaikojen vuoksi voidaan louhia viereisiä louhoksia nopeammin, jolloin tuotanto mahdollisesti kasvaa. Huonoja puolia pastatäytössä puolestaan on kalliimpi alkuinvestointi ja monivaiheisempi prosessi, jonka operointiin tarvitaan osaavia operaattoreita. (5, s. 259; 13, s. 73.)

3.3.2 Pastalaitosten prosessit

Kittilän kaivoksella neutraloinnista tulevan rikastushiekan kiintoainepitoisuutta nostetaan sakeuttimilla ennen kuin se pumpataan pastalaitoksille (kuva 7). Sakeuttimen ylitteestä osa kierrätetään takaisin prosessiin ja ylimääräinen ylitevesi pumpataan varastoaltaalle, josta myöhemmin se johdetaan jatkokäsittelyyn. Liete puolestaan pumpataan pastalaitoksille tai rikastehiekka-altaalle. Pastalaitoksella lietteestä poistetaan vettä kiekkosuotimilla, jotta rikastushiekan kiintoainepitoisuus saadaan mahdollisimman korkeaksi ennen sementin lisäystä. Kiekkosuotimissa olevat kangaskiekkot imevät vakuumin avulla kiintoaineen kankaan pinnalle, jolloin lietteessä oleva vesi läpäisee kankaat. Kiekkotiputtavat kiintoaineen (rikastushiekan) paineilman avulla suppilon kautta siirtokuljettimelle. Kuljettimelta rikastushiekka menee pastasekoittimeen. Pastasekoittimessa sekoitetaan keskenään rikastushiekka, sementti ja tarvittava määrä vettä. Aranilla sementin lisääminen tapahtuu pastasekoittimen alkupäähän, ja Rimmellä sementti lietetään veteen erillisessä liettoreaktorissa ennen kuin se lisätään pastasekoittimeen. Pastasekoittimessa vesi, sementti ja rikastushiekka sekoitetaan pastaksi, joka siirretään pastapumpulla louhoksiin. (14, s. 2 - 3.)



KUVA 7. Pastalaitoksen yksinkertaistettu prosessi (15)

4 PASTAN LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Pastan lujuuteen vaikuttavat monet sisäiset ja ulkoiset tekijät. Sisäisiä tekijöitä ovat rikastushiekan, sidosaineen ja veden kemialliset, fysikaaliset ja mineralogiset ominaisuudet ja sekoituksen ominaisuudet esimerkiksi veden ja sidosaineen suhde ja pastan kiintoainepitoisuus. Ulkoisia pastan lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat louhoksessa vallitseva lämpötila ja paine, pohjaveden määrä ja räjähdyksistä tapahtuva värinä. Tässä opinnäytetyössä sementin ja veden laatu on pyritty pitämään vakiona ja keskitytty rikastushiekan fysikaalisiin ominaisuuksiin.

4.1 Rikastushiekka

Rikastushiekan mineralogia vaikuttaa pastassa veden säilytyskykyyn, puristuslujuuteen, kovettumiseen ja hankaavuuteen. Savi- ja kiillemineraalit sitovat itseensä vettä ja niistä veden poistamisen on hyvin haastavaa (aiheuttaa veden säilymiskyvyn kasvamista). Silikaattimineraalit (erityisesti kvartsi) on hyvin karkeaa ja voi aiheuttaa pastalinjojen kulumista. Sulfidimineraalit (esimerkiksi pyriitti) vaikuttavat pastan puristuslujuuteen reagoimalla ilman hapen ja kosteuden kanssa ja muodostamalla happoa ja sulfaattia. Sulfidin reagoiminen on riippuvainen sulfidin tyypistä, esimerkiksi arsenopyriitti reagoi voimakkaammin kuin pyriitti. Sulfidimineraalin hapettuessa syntyvä happo pystyy tuhoamaan kalsiumsilikaattihydraatin sidoksia ja täten heikentämään pastan kestävyttä. Sulfaatit puolestaan reagoivat sidosaineena käytetyn sementin hajoamisesti vapautuvien kalsiumionien kanssa ja voivat paisuttaa pastan saostuvien partikkeleiden tilavuutta. Partikkeleiden paisuminen aiheuttaa sisäistä jännitystä, joka voi tuottaa halkeamia kovettuneeseen pastaan ja aiheuttaa pastan materiaalien koheesion huononemista. (16, s. 25 - 27.)

Rikastushiekan partikkeleiden muoto ja ominaispaino voivat vaikuttaa pastatäytön käyttäytymiseen. Partikkelit, jotka ovat muodoltaan litteitä tasaantuvat hitaammin kuin saman ominaispainon omaavat pyöreät partikkelit. Partikkelin muoto voi myös vaikuttaa materiaalin partikkeleiden välisen tyhjän tilan kokoon, joissa pystytään säilyttämään ja kuljettamaan nesteitä. Tämä vaikuttaa pastatäytön sakeutumiseen, lujittumiseen ja veden poistumiseen. Rikastushiekan partikkeleiden ominaispaino vaikuttaa tarvittavan sidosaineen määrään. Mitä suurempi on ominaispaino sitä enemmän, tarvitaan sidosainetta. (16, s. 22 - 25.)

Rikastushiekan partikkelikokojakauma vaikuttaa pastan puristuslujuuteen, vakauteen, läpäisevyyteen ja sidosaineen määrään. Opinnäytetyössä hienoiksi partikkeleiksi kutsutaan alle 20 µm kokoisia partikkeleita. Hienojen partikkeleiden määrällä on tärkeä työ rikastushiekan kuljettamisessa putkistoissa. Hienot partikkelit parantavat pastan virtausominaisuuksia estämällä karkeampien partikkeleiden luokittumisen putkistoihin. Virtausominaisuuksiltaan oikeanlaisen pastan partikkelijakaumasta noin 15 % tulisi olla 20 µm kokoisia. Aikaisemmissa tutkimuksissa huomattiin, että hienojen partikkeleiden määrän lisääntyessä pastan puristuslujuus huononee. Lujuuden huononeminen oli erityisen selvää pitemmän eli 28 vuorokauden aikavälin puristuslujuustuloksissa. Pastan puristuslujuutta huonontaa hienojen partikkeleiden lisääntymisestä johtuva huokoisuuden kasvaminen sekä hienot partikkelit sitovat itseensä enemmän vettä, joka huonontaa rikastushiekan kiintoainepitoisuutta. Hienojen partikkeleiden määrän kasvaessa kuluu myös enemmän sidosainetta kaikkien partikkeleiden päällystämiseen, suuremman pinta-alan takia. Lisäksi hienommat partikkelit kasvattavat veden säilytyskykyä pastassa sekä heikentävät pastan läpäisevyyttä. Nämä aiheuttavat kuivumisajan pidentymistä ja vaikeuttavat veden virtaamista pastan lävitse. (16, s. 16 - 23.)

4.2 Sidosaaine

Sidosaineen mineraalinen ja kemiallinen koostumus ovat pastan puristuslujuuteen vaikuttavia tekijöitä sidosaineen pitoisuuden lisäksi. Sidosaaineena voidaan käyttää useita erilaisia aineita kuten lentotuhkaa, sementtiä, kuonaa tai pozzolaanisia lisäaineita. Kittilän kaivoksella käytetään sidosaaineena Oiva-sementtiä. Se on normaalisti kovettuvaa portlandseossementtiä, joka koostuu 65 - 79 % klinkkeristä ja 21 - 35 % seosaineista. (17, s. 118 - 119; 16.)

4.3 Prosessivesi

Pastassa käytettävän veden pH-arvo ja sulfaattipitoisuus vaikuttavat pastan lujuuteen. Sulfaatteja sisältävä vesi, jonka pH on alle 6,5 voi reagoida sementin komponenttien tai hydraattien kanssa huonontaan pastan pitkäaikaista puristuslujuutta. Sulfaatit aiheuttavat portlandsementissä sulfaattihyökkäyksen, jolloin pasta halkeilee saostuvien partikkeleiden tilavuuden kasvaessa. Liian alhainen veden pH kuluttaa enemmän sementtiä neutraloituakseen. Veden suolapitoisuudella on vaikutusta pastan virtausominaisuuteen ja puristuslujuuteen. Suolapitoisuuden kasvaessa veden tiheys myös kasvaa, joka vaikuttaa virtausominaisuuksiin ja puristuslujuuteen. Veden ja sementin suhteella on myös vaikutusta pastan puristuslujuuteen ja kovettumiseen. Liiallinen vesi nostaa pastan

kovettumisaikaa ja näin ollen huonontaa lyhytaikaista puristuslujuutta. Liiallinen vesi voi myös saada aikaan pastassa lajittumista, jolloin louhokseen ei muodostu tasalaatuisen vahvaa täytettä. (16, s. 119.)

4.4 Pastan sekoittaminen

Pastan kunnollinen sekoittuminen on tärkeää, ettei louhoksessa tapahdu myöhemmin lajittumista (pastan komponentit jakaudu omiksi tasoikseen). Hienojen partikkeleiden lisääntyessä sekoittumisesta tulee entistä tärkeämpää, jotta pystyttäisiin jokainen partikkeli päällystämään sementillä. (16, s. 125.)

5 MITTAUSMENTELMÄT

Pastan laatuun vaikuttavia tekijöitä seurataan mittaamalla niitä joko louhostäytön aikana tai sen jälkeen. Painuma, kiintoaine ja partikkelikoko mitataan täytön aikana ja puristuslujuus täytön jälkeen. Pastalaitoksen operaattori säättää pastaan lisättävän veden määrää kiintoainepitoisuuden ja painuman perusteella. Kiintoainepitoisuus mitataan kiintoaineanalysaattorissa ja painumaa varten tehdään painumatesti. Puristuslujuus voidaan määrittää vasta useamman päivän jälkeen, jotta näyte on ehtinyt kovettua ennen mittaamista.

5.1 Painumatesti

Painumatestillä tutkitaan pastan virtausominaisuuksia putkistoissa. Suurempi vesimäärä pastassa antaa suuremman painuman, jolloin pastan virtaavuus paranee putkistoissa ja pastapumpun paine laskee. Kittilän kaivoksella molemmille pastapumpuille on määritetty omat tavoitearvot paineille, joiden perusteelle voidaan olettaa pastan virtausominaisuuksien olevan oikeat. Tämä tarkastetaan painumatestin avulla, painuman pitäisi olla 16 - 18 cm. Painumatestissä käytetään mittausvälineenä metallista ASTM-standardin mukaista ympyräkartiota (kuva 8), jonka korkeus on 30 cm, pohjan halkaisija 20 cm ja yläosan halkaisija 10 cm. Lisäksi opinnäytetyössä käytettiin Bogerin painumalieriötä (kuva 8), jonka halkaisija on 8 cm ja korkeus 7,5 cm. (19.)



KUVA 8. Vasemmalla ASTM-standardin painumakartio ja oikealla Bogerin painumalieriö.

Painumatesti suoritetaan standardin ASTM C143/C143-98 mukaisesti. Painumatesti mitataan täytämällä mitta-astia kolmessa erässä, välillä tiivistämällä pastaa painelemalla sitä metallisella tikulla 25 kertaa. Kun mittausväline saadaan täyteen, sen yläosa tasoitetaan ja mittausväline nostetaan tasaisella nopeudella pois. Painuma mitataan, siitä kuinka paljon pasta laskeutuu mittausvälineen ylätasosta (kuva 9). Painumaa mitattaessa on tärkeää, että mittausväline on tukevasti tuettuna tasolla ja mittausvälinettä nostetaan sopivalla nopeudella. Liian nopea nostaminen aiheuttaa pastan leviämisen, kun taas liian hidas nostaminen voi johtaa pastan jähmettymisen keoksi. (19.)



KUVA 9. Painuman mittaaminen

5.2 Kiintoaineen määrittäminen

Kiintoaineen määrittämiseen käytetään Mettler Toledo HE53- ja Presica- halogeenikuivainta (kuva 10). Analysaattorit taarataan aluksi tyhjällä astialla eli tyhjän astian paino asetetaan nolaksi, sen jälkeen astiaan mitataan tarvittava määrä näytettä ja se levitetään tasaisesti näyteastian. Näyte laitetaan analysaattoriin, joka kuivattaa näytettä 105°C:ssa, kunnes vesi on haihtunut. Veden haihtuminen mitataan massan muutoksella, kun massassa ei enää tapahdu muutosta laite ilmoittaa

jäljelle jäävän kiintoainepitoisuuden. Kiintoainepitoisuutta mitattiin rikastushiekasta sekä pastasta. Pastan kiintoainepitoisuutta säädellään veden määrällä pastalaitoksen prosessissa.



Kuva 10. Kuva on Aranin-pastalaitoksesta. Vasemmalla puolella on uusi analysaattori ja oikealla vanhempi.

Opinnäytetyössä kiintoainepitoisuuden määrittämiseen käytettiin Aranin-pastalaitoksen vanhaa analysaattoria. Lisäksi yksi opinnäytetyön aiheista oli arvioida kiintoaineanalysointilaitosten luotettavuutta. Kiintoaineanalysointilaitosten tuloksia verrattiin lämpökaapissa (kuva 11) näytettä kuivattamalla saatuihin tuloksiin. Kiintoainepitoisuuden mittaaminen lämpökaapissa tapahtui asettamalla näytettä mitta-astiaan ja punnitsemalla näytteen massa. Näyte laitettiin lämpökaappiin 60 °C:seen 12 tunniksi kuivumaan, jonka jälkeen massa punnittiin uudelleen. Näytteen kuivuus varmistettiin jättämällä näyte vielä muutamaksi tunniksi lämpökaappiin ja toistamalla punnitus, jos näytteen massa ei ollut muuttunut todettiin näyte kuivaksi. Kiintoainepitoisuus saatiin jakamalla lopullinen massa alkuperäisellä massalla.



KUVA 11. Kuivattu näyte ja lämpökaappi

5.3 Puristuslujuus määrittäminen

Puristuslujuus määritettiin Oulussa Envitopin laboratoriossa pastalla täytetyistä sylinterinäytteistä (kuva 12). Opinnäytetyössä tehtiin kolme rinnakkaista sylinterinäytettä ja puristustulokset olivat niiden keskiarvot. Sylinterinäytteet tehtiin QA/QC ohjeen mukaisesti. Sylinterit täytetään pastalla kolmessa samankokoisessa erässä ja jokaisen erän jälkeen pastaa tiivistetään painelemalla sitä metallisella tikulla 20 kertaa. Tiivistämisen jälkeen sylinterin kylkiä taputetaan metallitikulla 7 kertaa ilmakuplien poistamiseksi. Lopuksi tasoitetaan sylinterin pinta ja sylinterit suljetaan huolellisesti. Sylinterin pinnan tasoittaminen sylintereiden tekovaiheessa vähentää myöhemmin tapahtuvaa sylinterin leikkaamista. (19.)



KUVA 12. Sylinterinäyte, johon on kirjattu louhoksen tunnistamista varten tietoja.

Envitopilla näytteet siirretään kovettumaan noin 20 °C:n lämpötilaan, ennalta määritettyjen päivien ajaksi. Kovettumiseen tarvittava aika määräytyy kaivoksen tarpeen mukaan. Mitä suurempi sementtipitoisuus on, sitä nopeammin kovettuminen tapahtuu. Opinnäytetyössä käytettiin kolmea kovettumisaikaa 7, 14 ja 28 päivän kovettumisaikojä. 7 päivän kovettumisaika oli 10 %:n sementillä, 14 päivän kovettumisajat olivat 7 ja 8 %:n sementeillä ja 28 päivän kovettumisajat olivat 3, 5 ja 6 %:n sementeillä (taulukko 1). Ennen mittausta näytteet leikataan irti sylintereistä ja niiden päät tasoitetaan. Näytteistä punnitaan massa sekä korkeus ja halkaisija mitataan. Lopuksi näytteet laitetaan puristuslaitteestoon.

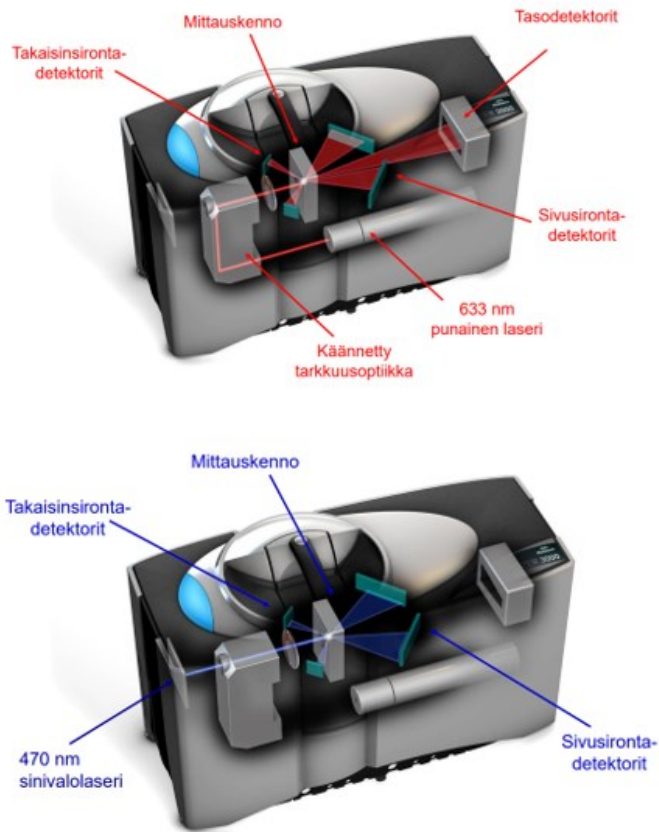
Puristuslujuuden mittaamiseen käytetään yksiaksaalista puristuskojetta, Controls Uniframea (kuva 13), joka mittaa puristusvoimaa kN ja kappaleen kokoonpuristuvuutta mm. Kun näyte on painunut yli 15 % alkuperäisestä korkeudestaan, puristuskoe lopetetaan ja tiedot syötetään tietokoneelle. Tietojen avulla lasketaan näytteen puristuslujuus MN/m², joka vastaa MPa. (20.)



KUVA 13. Uniframe yksiakselinen puristuskoje (20 s. 5)

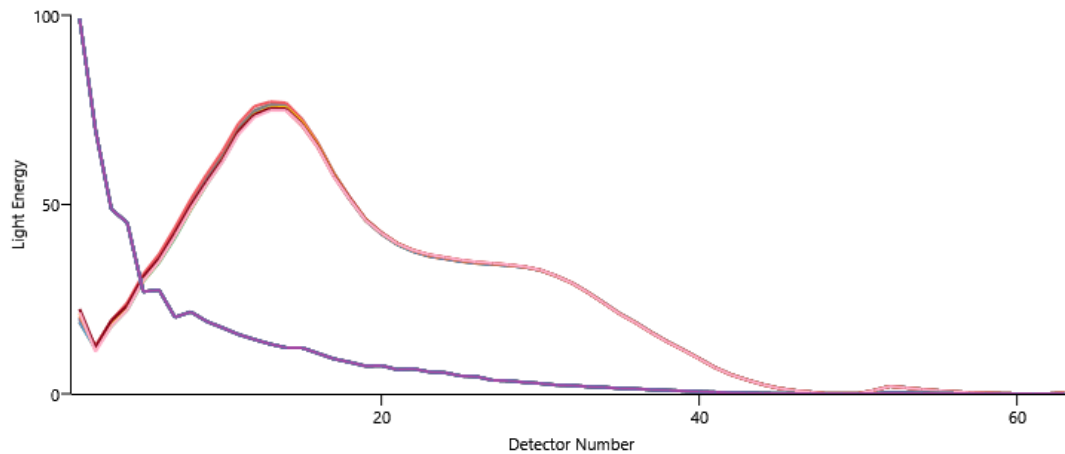
5.4 Partikkelikoon määrittäminen

Partikkelikoon määrittämiseen käytettiin Mastersizer 3000 partikkelikokoanalyysointilaitetta (kuva 14). Mastersizer koostuu sinisestä 470 nm laserista ja punaisesta 633 nm laserista, mittauskennosta ja detektoreista. (21.)



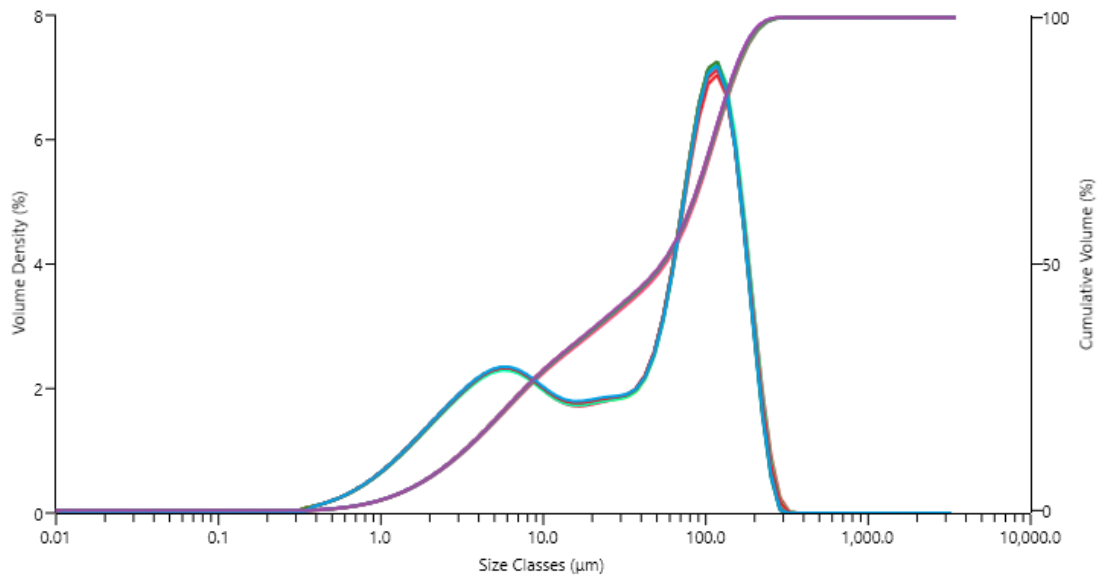
KUVA 14. Mastersizer 3000 optiikka (21)

Analysaattorin partikkelikoon määrittäminen perustuu laserdiffraaktioon eli valonsirontaan. Laserdiffraaktiossa mittauskennossa olevien linssien läpi johdetaan laservaloa, joka heijastuu kennon ympärillä oleviin detektoreihin. Detektorit mittaavat sirontadataa (kuva 15) eli sironneen valon energiaa ja kulmaa. Valon energia määräytyy partikkelin koon ja muodon mukaan. Valon hajontakulma perustuu valoa heijastavien detektorin lukumäärään. Mitä suurempi hajontakulman numero on, sitä pienempi partikkeli on kyseessä. Sirontadata ei ole sama asia kuin partikkelikokojakauma vaan se on optisesta mallista riippumaton mittaustulos. (21.)



KUVA 15. Sirondata

Lopullinen partikkelikokojakauma (kuva 16) saadaan optisia malleja apuna käyttäen. Optiset mallit ennustavat partikkeleiden aiheuttama sirontaa ja pystyvät sirondatan avulla esittämään arvion partikkelikokojakaumasta. Luotettavien tuloksien saamiseksi, verrataan mittauksista saatuja sirondatatoja teoriasta saatuihin sirondatatoihin. Optisina malleina voidaan käyttää Mie-teoriaa tai Fraunhoferin approksimaatiota. Mie-teoria soveltuu kaiken kokoisille partikkeleille ja se toimii parhaiten pienemmille eli alle $50 \mu\text{m}$ partikkeleille. Jotta Mie-teoriaa voisi käyttää oikein täytyy tietää näytteen optisia ominaisuuksia: dispersantin taitekerroin, näytteen absorptio- ja taitekerroin. Fraunhoferin approksimaatio sopii suuremmille eli yli $50 \mu\text{m}$ partikkeleille. Fraunhoferin approksimaatiossa oletetaan, että partikkelit ovat läpinäkymättömiä, jolloin ei tarvitse tietää optisia ominaisuuksia. Jos partikkelikoko on pientä, sirontakulma on suuri tai partikkelin taitekerroin on matala, Fraunhoferin approksimaatio ei anna täysin luotettavia tuloksia. Työssä käytettiin Fraunhoferin approksimaatiota, koska näytteen optisia ominaisuuksia ei tunnettu. (21.)



KUVA 16. Partikkelikokojakauma

Tärkeänä osana partikkelikokojakauman muodostamisessa oli mittausmenetelmän kehittäminen. Mittausmenetelmän kehittämisellä tarkoitetaan näytteen käsittelemistä ennen mittausta, mahdollisimman edustavan näytteen saamiseksi. Mittausmenetelmän kehittämiseen kuului: sopivan disper-santin löytäminen, kuivan näytteen liettäminen ja sopivan sekoitusajan löytäminen näytteelle. (21.)

6 MITTAUSTULOKSET JA ARVIOINTI

Työn tarkoituksena oli tutkia partikkelikokojakauman ja pastan kiintoainepitoisuuden vaikutusta pastan puristuslujuuteen sekä vertailla ASTM-standardin ja Bogerin testiä keskenään. Lisäksi tutkittiin eri kiintoaineanalysointimenetelmien vertailukelpoisuutta ja luotettavuutta verrattuna kiintoainepitoisuuteen, joka oli määritetty lämpökaapin avulla. Mittauksia varten tarvittavat näytteet kerättiin pastalaitoksilta niiden ollessa ajolla. Tulokset saatiin käyttäen aikaisemmin esiteltyjä (5 MITTAUSMENETELMÄT) mittausten menetelmiä. Rikastushiekasta mitattiin kiintoainepitoisuus sekä partikkelikokojakauma. Partikkelikokojakauma ilmoitettiin hienojen partikkeleiden pitoisuutena, joita olivat alle 20 µm partikkelit. Pastan valmistamiseen käytetyn rikastushiekan, sementin ja lisätyn veden massat punnittiin, jotta pystyttiin laskemaan pastan vesi-sementtisuhte ja sementtipitoisuus. Valmiista pastasta mitattiin painuma ja kiintoainepitoisuus. Puristuslujuuskokeet teetettiin Envitopilla. Puristuslujuustuloksien kovettumisajat määräytyivät sementtipitoisuuden mukaan taulukon 1 mukaisesti.

TAULUKKO 1. Sementtipitoisuuksien kovettumisajat

Sementtipitoisuus	Kovettumisaika
3 %	28 vuorokautta
5 %	28 vuorokautta
6 %	28 vuorokautta
7 %	14 vuorokautta
8 %	14 vuorokautta
10 %	7 vuorokautta

6.1 Louhosnäytteiden vertailu

Louhosnäytteiden vertailussa neljällä eri näytteenotokerralla kerätyistä rikastushiekkänäytteistä valmistettiin pastanäytteitä. Pastanäytteistä mitattiin eri parametrejä ja niiden tulokset on esitetty taulukossa 2.

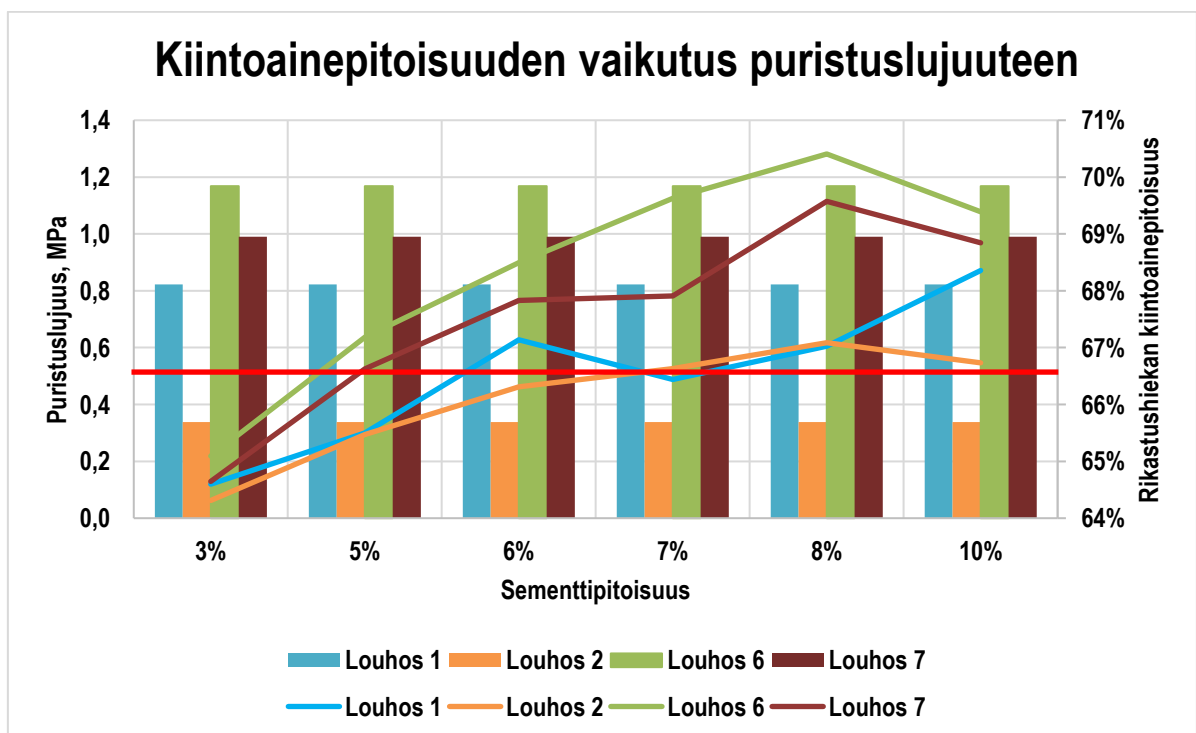
TAULUKKO 2. Louhosnäytteiden mittaustuloksia

Sementtipitoisuus	rikastushiekka kiintoainepitoisuus	pasta kiintoainepitoisuus	painuma cm	vesi- sementtisuhde	puristuslujuus MN/m ²	alle (20) µm
louhos 1, 3%	68.11 %	68.22 %	22	15.3	0.120	28.97 %
louhos 1, 5%	68.11 %	69.73 %	17.5	9	0.300	28.97 %
louhos 1, 6%	68.11 %	68.79 %	18.5	7.7	0.628	28.97 %
louhos 1, 7%	68.11 %	69.40 %	17	6.4	0.488	28.97 %
louhos 1, 8%	68.11 %	69.45 %	17	5.6	0.605	28.97 %
louhos 1, 10%	68.11 %	70.11 %	17	4.5	0.871	28.97 %
louhos 2, 3%	65.69 %	66.70 %	22.5	16.8	0.062	59.94 %
louhos 2, 5%	65.69 %	67.08 %	20.5	9.9	0.294	59.94 %
louhos 2, 6%	65.69 %	67.22 %	20	8.2	0.462	59.94 %
louhos 2, 7%	65.69 %	67.94 %	19.5	7	0.527	59.94 %
louhos 2, 8%	65.69 %	68.50 %	18	6	0.617	59.94 %
louhos 2, 10%	65.69 %	68.47 %	18.5	4.7	0.546	59.94 %
louhos 6, 3%	69.84 %	70.48 %	18	14.1	0.219	35.06 %
louhos 6, 5%	69.84 %	71.53 %	17	8.4	0.637	35.06 %
louhos 6, 6%	69.84 %	71.01 %	16.5	7.1	0.899	35.06 %
louhos 6, 7%	69.84 %	71.25 %	16.5	5.9	1.125	35.06 %
louhos 6, 8%	69.84 %	70.97 %	18	5.2	1.281	35.06 %
louhos 6, 10%	69.84 %	71.22 %	17.5	4.2	1.078	35.06 %
louhos 7, 3%	68.95 %	69.63 %	16	14.8	0.129	48.50 %
louhos 7, 5%	68.95 %	69.34 %	17	8.9	0.526	48.50 %
louhos 7, 6%	68.95 %	69.83 %	18	7.4	0.766	48.50 %
louhos 7, 7%	68.95 %	69.27 %	19	6.6	0.782	48.50 %
louhos 7, 8%	68.95 %	70.42 %	17.5	5.5	1.115	48.50 %
louhos 7, 10%	68.95 %	70.44 %	16.5	4.3	0.968	48.50 %

Kuvassa 17 pylvädiagrammit kuvastavat rikastushiekan kiintoainepitoisuutta ja viivat puristuslujuutta kokeissa käytetyillä eri sementtipitoisuuksilla. Punainen viiva kuvaa tavoiteltavaa 0,5 MPa puristuslujuutta. Kiintoainepitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen huomattiin tarkastelemalla kuvan 17 louhoksen 2 ja 6 näytteitä. Louhoksen 2 näytteen rikastushiekan kiintoainepitoisuus oli noin 66 %, jolloin tavoiteltu puristuslujuus saavutettiin vain yli 7 % sementtipitoisuuksilla. Louhoksen 6 näytteissä oli korkeampi kiintoainepitoisuus noin 70 % ja tavoiteltuun puristuslujuuteen päästiin kaikissa muissa paitsi 3 % sementtipitoisuuksilla. Louhosnäytteiden kiintoainepitoisuudet eivät ole suoraan

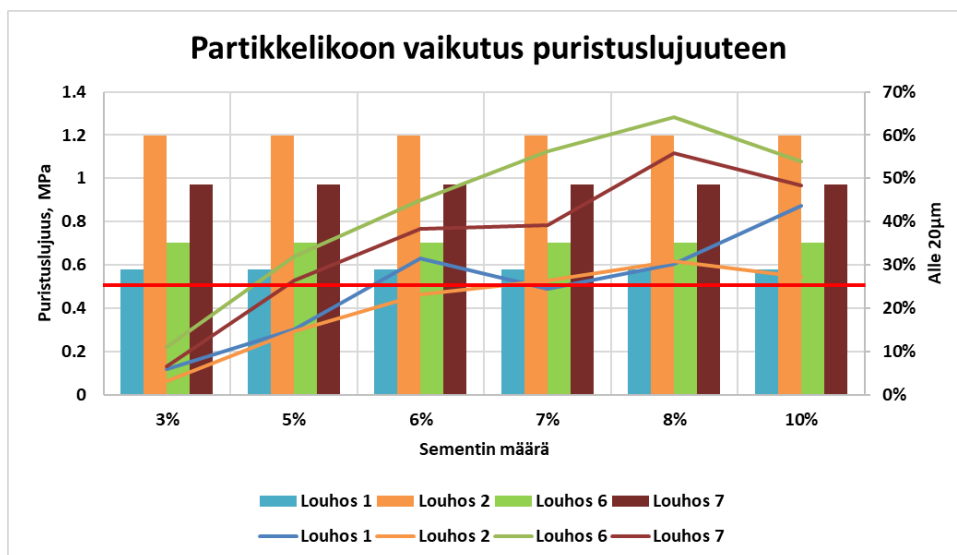
verrannollisia keskenään, koska näytteiden ominaisuudet olivat erilaisia, kuten partikkelikokoja-kauman osalta. Louhoksen 2 näytteessä hienojen partikkeleiden määrä oli noin 60 % ja louhoksen 6 näytteissä noin 35 %.

Vertailukelpoisemman tuloksen rikastushiekan kiintoaineen vaikutuksesta saa kuvan 17 louhoksen 1 näytettä sekä louhoksen 6 näytettä vertailemalla. Näytteiden hienojen partikkeleiden määrä oli lähellä toisiaan, louhos 1 näytteen hienojen partikkeleiden määrä oli noin 29 % ja louhoksen 6 näytteen noin 35 %. Louhoksen 1 näytteen rikastushiekan kiintoainepitoisuus oli noin 68 % ja louhoksen 6 näytteen oli noin 70 %. Louhoksen 6 näytteiden rikastushiekan korkeamman kiintoaineen avulla päästiin parempiin pastan kiintoainetuloksiin (taulukko 2), joka johti parempiin puristuslujuuksiin. Louhoksen 1 näytteiden puristustuloksissa nähdään myös 6 ja 7 %:n sementtipitoisuuden välillä puristuslujuuden huononeminen, joka voi johtua taulukossa 1 esitettyjen kovettumisaikojen takia. Suurimmillaan puristuslujuuden ero oli 7 %:n sementtipitoisuudessa, jossa louhoksen 1 näytteen puristuslujuus oli 0,49 MPa ja louhoksen 6 näytteen 1,1 MPa. Ero voi johtua rikastushiekan kiintoainepitoisuuden, veden ja sementin suhteen ja/tai pastan kiintoainepitoisuuden eroilla. Lisäksi havaittiin, että 3 %:n sementtipitoisuuksilla ei päästy yhdessäkään kokeessa yli tavoitellun puristuslujuuden, kun taas 10 %:n sementtipitoisuudella kaikki kokeet saavuttivat tavoitellun puristuslujuuden. Joten sementtipitoisuutta lisäämällä pystyttäisiin parantamaan pastan puristuslujuutta ja vähentämään hienojen partikkeleiden aiheuttamaa haittavaikutusta.



KUVA 17. Kiintoainepitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen. Pylväät kuvaavat kiintoainepitoisuutta, viivat puristuslujuutta ja punainen viiva kuvastaa tavoiteltavaa puristuslujuutta 0,5 MPa.

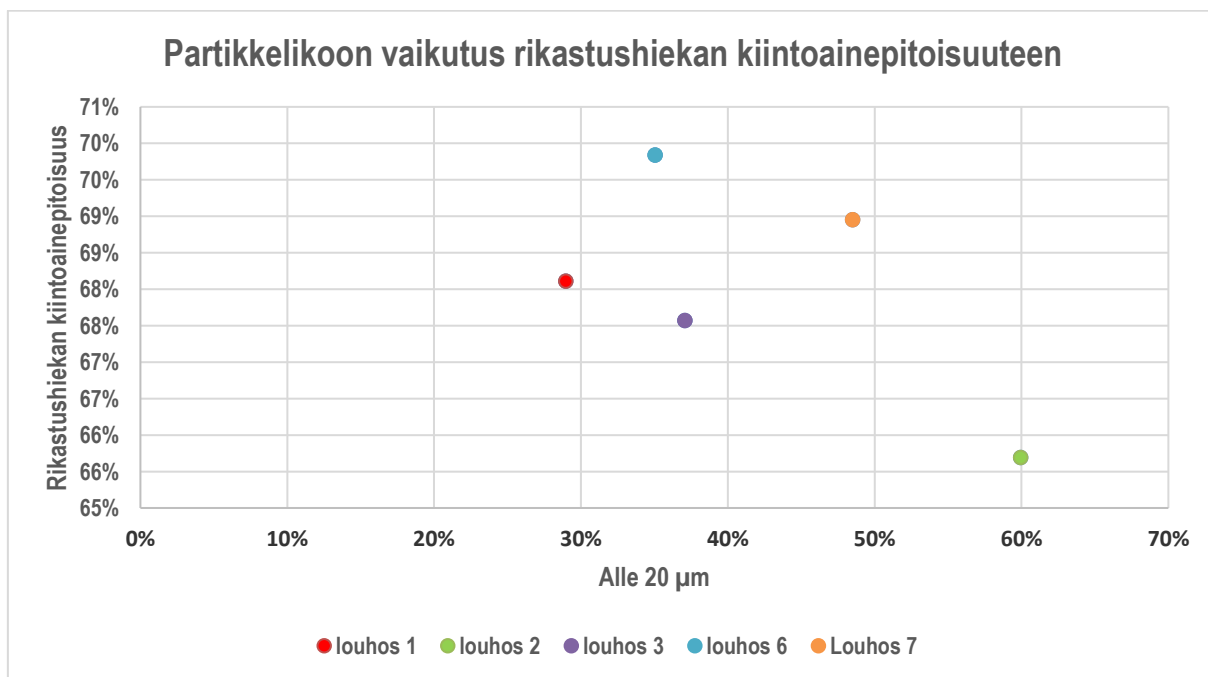
Kuvassa 18 esitetään alle 20 µm partikkeleiden osuuden vaikutusta puristuslujuuteen. Kuvassa rikastushiekan kiintoainepitoisuuden pylväsdigrammit on korvattu alle 20 µm partikkelikoko pitoisuudella. Parhaiten partikkelikoon vaikutus näkyi louhoksen 2 näytteessä, näytteen hienojen partikkeleiden määrä oli noin 60 %, jolloin myös rikastushiekan kiintoainepitoisuus oli alhaisin noin 66 % (kuva 17). Näillä parametreilla saavutettiin huonoimmat puristuslujuudet kaikilla sementtipitoisuuksilla. Verratessa louhoksen 1 ja 6 näytteiden partikkelikokoa ja kiintoainepitoisuutta huomattiin, etteivät ne ole verrannollisia keskenään. Louhoksen 1 näytteiden hienojen partikkeleiden määrä oli noin 29 % ja louhoksen 6 näytteiden noin 35 %, silti louhoksen 6 näytteiden kiintoainepitoisuus oli noin 2 prosenttiyksikköä suurempi. Sama tulos nähdään vertailemalla louhoksen 1 näytteitä louhoksen 7 näytteisiin. Louhoksen 7 näytteiden hienojen partikkeleiden pitoisuus oli 49 % ja kiintoainepitoisuus oli 69 %. Louhoksen 7 näytteessä hienojen partikkeleiden pitoisuus oli 20 prosenttiyksikköä enemmän kuin louhoksen 1 näytteissä ja silti kiintoainepitoisuus oli vain 1:n prosenttiyksikön suurempi. Erot rikastushiekan kiintoainepitoisuudessa voivat johtua rikastushiekan suodattumisesta pastalaitoksen prosessissa.



KUVA 18. Partikkelikoon vaikutus puristuslujuuteen. Pylväät kuvaavat alle 20 µm partikkelikoon pitoisuutta, viivat kuvaavat puristuslujuutta ja punainen viiva kuvastaa tavoiteltavaa puristuslujuutta 0,5 MPa.

Kuvassa 19 nähdään vielä tarkemmin partikkelikoon vaikutusta rikastushiekan kiintoainepitoisuuteen. Jokainen piste kuvassa edustaa rikastushiekasta otettua näytettä. Kuvasta huomataan, että

louhoksien 1, 3 ja 2 näytteet noudattavat laskevaa suoraa, jonka mukaan hienojen partikkeleiden määrän kasvaessa kiintoainepitoisuus alenee. Louhokset 6 ja 7 näytteet poikkeavat muista louhoksista, se voi johtua aikaisemmin mainituista syistä esimerkiksi kiekkosuodattimista. Louhoksien 1, 2 ja 3 näytteet ovat otettu Aranilta ja louhokset 6 ja 7 näytteet ovat Rimpi-pastalaitokselta. Vaikka louhokset 6 ja 7 eroavat muista louhoksista, myös niiden kohdalla rikastushiekan kiintoainepitoisuus kasvaa hienompien partikkeleiden määrän vähentyessä.



KUVA 19. Partikkelikoon vaikutus rikastushiekan kiintoainepitoisuuteen

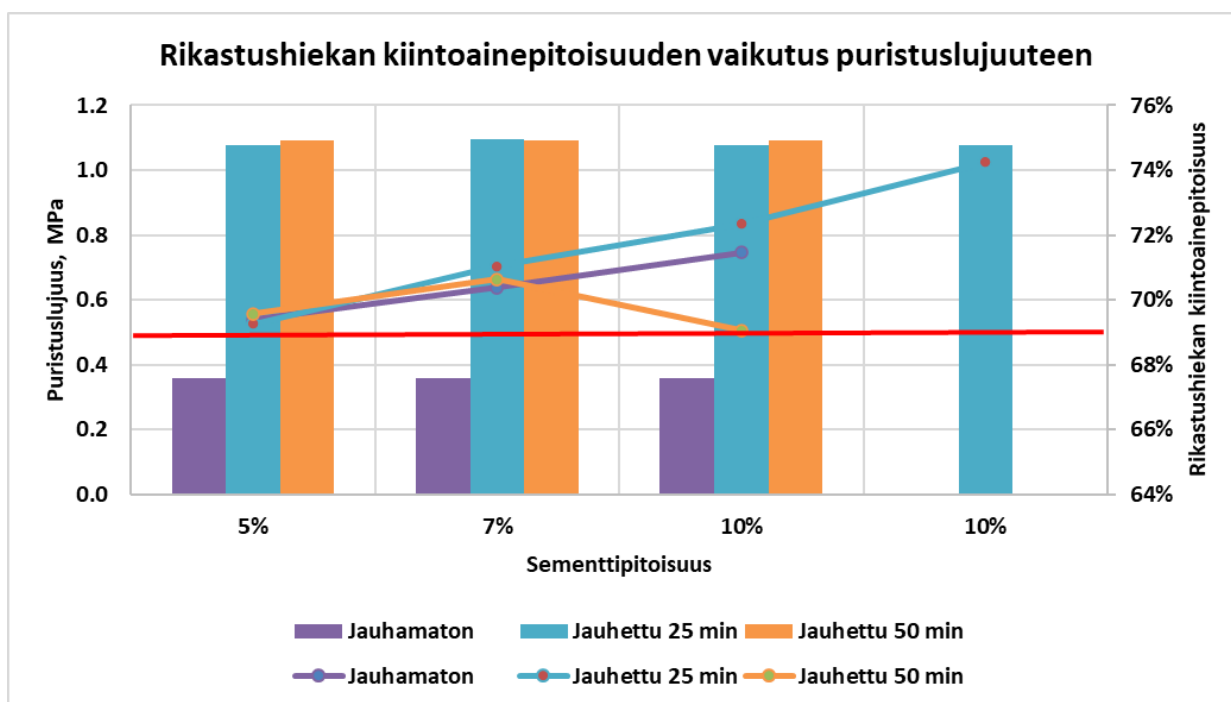
6.2 Jauhatusnäytteiden vertailu

Testeissä käytettiin yhtä pastalaitokselta otettua rikastushiekkaa näytettä, jota jauhettiin edelleen. Jauhettujen näytteiden vertailussa käytettiin jauhamatonta sekä 25 min ja 50 min jauhettuja rikastushiekanäytteitä. Näytteet nimettiin louhos 3, louhos 4 ja louhos 5. Louhos 3 oli jauhamaton näyte, louhos 4 oli jauhettu 25 min ja louhos 5 50 min. Jauhetut näytteet suodatettiin jauhatuksen jälkeen jauhatuksessa tarvittavan ylimääräisen veden poistamiseksi. Suodatuksen takia jauhettujen näytteiden kiintoainepitoisuus oli paljon korkeampi kuin jauhamattoman. Jauhatusnäytteiden tulokset on esitetty taulukossa 3, taulukossa louhoksen 4 näytteelle on ilmoitettu kaksi eri rikastushiekan kiintoainepitoisuutta, jotka johtuvat mittaustilanteesta tapahtuneesta virheestä.

TAULUKKO 3. Jauhatusnäytteiden tuloksia

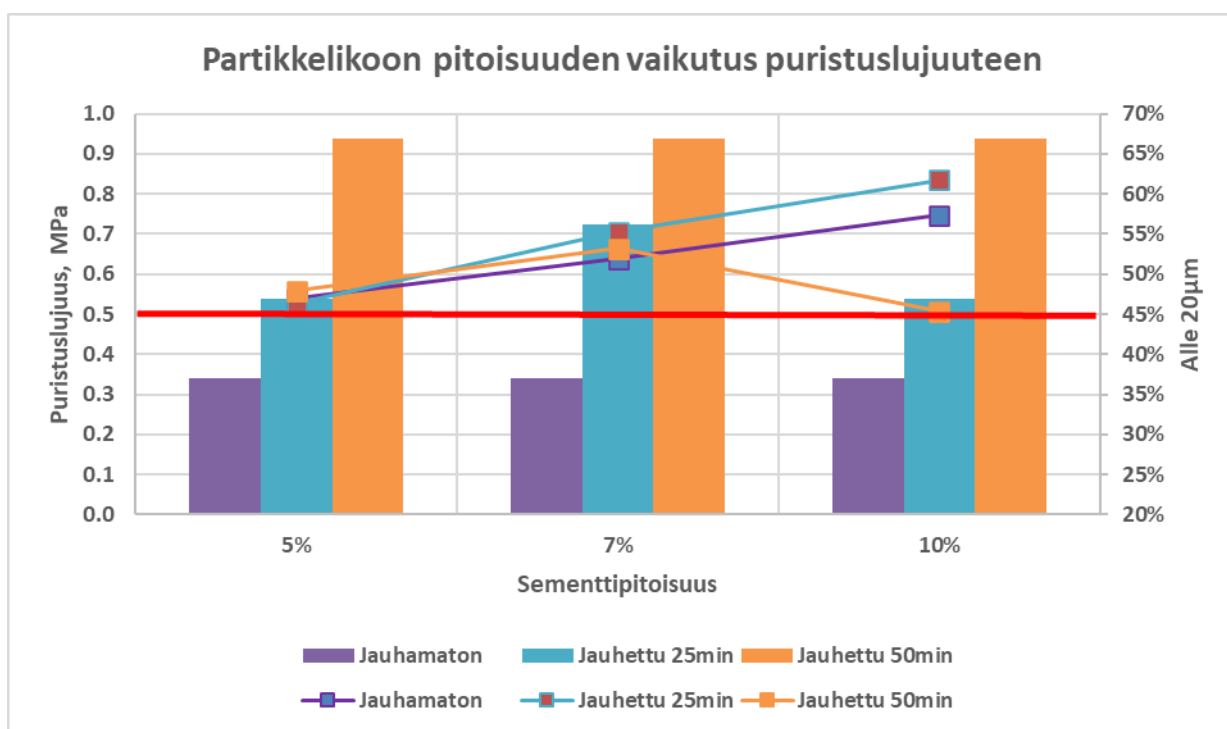
Sementtipitoisuus	rikastushiekka kiintoainepitoisuus	pasta kiintoainepitoisuus	painuma cm	vesi- sementtisuhte	puristuslujuus MN/m ²	alle (20) µm
louhos 3, 5%	67.57 %	69.67 %	16.5	9.2	0.540	37.07 %
louhos 3, 7%	67.57 %	69.70 %	16.5	6.6	0.638	37.07 %
louhos 3, 10%	67.57 %	70.36 %	16.5	4.5	0.747	37.07 %
louhos 4, 5%	74.77 %	71.09 %	16.5	8.4	0.526	46.96 %
louhos 4, 7%	74.94 %	71.04 %	16	6.1	0.705	56.26 %
louhos 4, 10%	74.77 %	71.57 %	17	4.1	0.834	46.96 %
louhos 4, 10%	74.77 %	71.44 %	17	4.2	1.026	46.96 %
louhos 5, 5%	74.92 %	70.90 %	15.5	8.6	0.558	66.94 %
louhos 5, 7%	74.92 %	70.08 %	16	6.1	0.663	66.94 %
louhos 5, 10%	74.92 %	70.20 %	15.5	4.4	0.506	66.94 %

Kuvassa 20 pylväsdigrammit ilmoittavat rikastushiekan kiintoainepitoisuutta, viivat puristuslujuutta eri sementtipitoisuuksilla ja viimeisen pylvään piste puristuslujuutta normaalia pidemmällä kovettumisajalla.



KUVA 20. Rikastushiekan kiintoainepitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen. Pylväät kuvaavat rikastushiekan kiintoainepitoisuutta, viivat kuvaavat puristuslujuutta ja punainen viiva kuvastaa tavoiteltavaa puristuslujuutta 0,5 MPa.

Kuvassa 21 esitetään alle 20 µm partikkeleiden pitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen. Kuvassa rikastushiekan pylväsdigrammit on vaihdettu alle 20 µm partikkelikoko pitoisuudella.



KUVA 21. Partikkelikoon pitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen. Pylväät kuvaavat alle 20 µm partikkelikoon pitoisuutta, viivat kuvaavat puristuslujuutta ja punainen viiva kuvastaa tavoiteltavaa puristuslujuutta 0,5 MPa.

Vertailemalla taulukon 3 puristuslujuustuloksia sekä kuvia 20 ja 21 huomattiin, että 5 ja 7 %:n sementtipitoisuuksilla puristuslujuustulokset olivat hyvin lähellä toisiaan. Louhoksen 3 näytteen puristuslujuudet olivat 5 %:n sementtipitoisuudella 0,54 MPa, louhoksen 4 0,53 MPa ja louhoksen 5 0,56 MPa. 7 %:n sementtipitoisuudella vastaavat olivat louhoksen 3 näytteellä 0,64 MPa, louhoksen 4 0,71 MPa ja louhoksen 5 0,66 MPa. Jauhatuksella ei havaittu huonontavaa vaikutusta puristuslujuuteen 5 ja 7 %:n sementtipitoisuuksilla, vaan jauhettujen näytteiden puristuslujuustulokset olivat useammin jopa parempia kuin jauhamattoman näytteen. Tämä johtui näytteiden rikastushiekan ja pastan kiintoainepitoisuuksien eroista.

Verrattaessa näytteiden kiintoainepitoisuuksia havaittiin, että louhoksen 3 näytteen rikastushiekan kiintoainepitoisuus oli paljon alhaisempi kuin jauhettujen, joka vaikutti näytteen puristuslujuustuloksiin. Louhoksen 3 näytteen rikastushiekan kiintoainepitoisuus oli noin 68 %, louhoksen 4 ja 5 näytteiden olivat noin 75 %. Vaikka jauhettujen näytteiden rikastushiekan kiintoainepitoisuudet olivat 7 prosenttiyksikköä korkeammat kuin jauhamattoman näytteen, niiden puristuslujuustuloksissa ei havaittu merkittäviä eroja.

Louhoksen 5 näytteiden kohdalla havaittiin 10 %:n sementtipitoisuudella puristuslujuuksien laskevan verrattuna 7 %:n sementtipitoisuuteen. Syy puristustuloksen heikkenemiseen johtuu kovettumisajasta. Taulukon 1 mukaan 10 %:n sementtipitoisuudella kovettumisaika oli 7 vuorokautta, jolloin louhoksen 5 näytteet eivät olleet vielä ehtineet kovettua. Hienojen partikkeleiden lisääntyessä veden poistuminen pastasta hidastuu, jolloin pastan puristuslujuus laskee ja kovettumisaikaa piteenee. Tämä huomattiin myös louhoksen 4 näytteellä 10 %:n sementtipitoisuudella, kun näytteen annettiin kovettua 7 vuorokautta pidempään. Ylimääräisen viikon aikana näytteen puristuslujuus nousi 0,8 MPa:sta yli 1 MPa:iin.

Tuloksista voidaan päätellä, että hienojen partikkeleiden pitoisuuden kasvaessa aiheutuvaa rikastushiekan kiintoainepitoisuuden huononemista pystytään kumoamaan parantamalla rikastushiekan suodattamista.

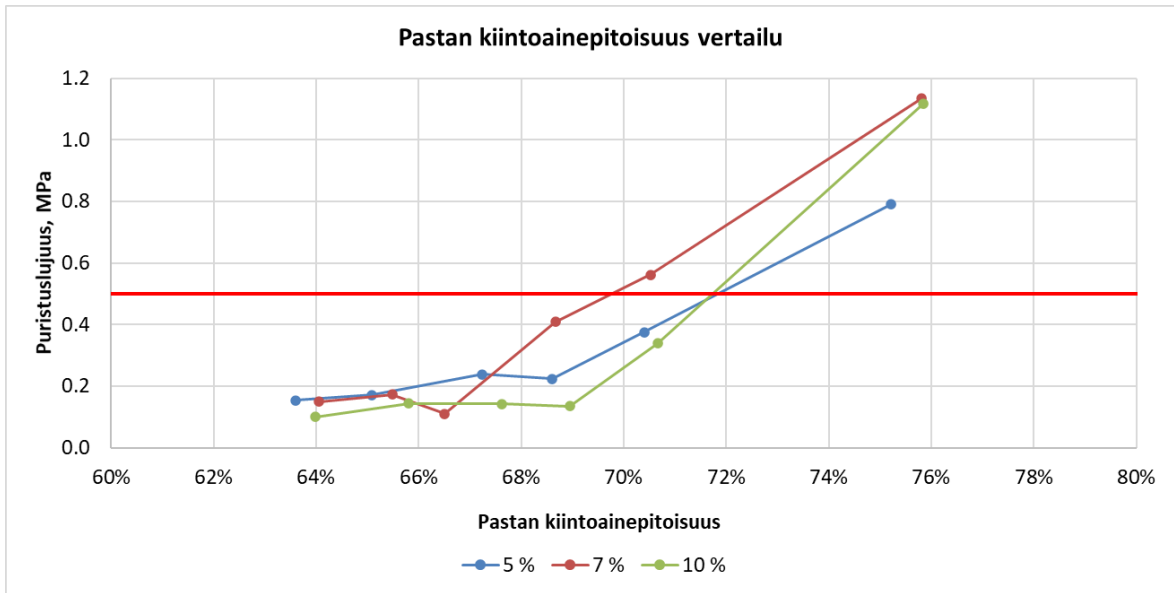
6.3 Kiintoainepitoisuuden vertailu

Kiintoainepitoisuuden vertailun tarkoituksena oli selvittää pastan kiintoainepitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen eri sementtipitoisuuksilla. Kokeissa käytettiin kolmea eri sementtipitoisuutta 5, 7 ja 10 ja kuutta pastan kiintoainepitoisuutta 62, 64, 66, 68, 70 ja 74,4. Näytteet nimettiin eri sementtipitoisuuksien mukaan louhos 8 (5 %), louhos 9 (7 %) ja louhos 10 (10 %). Pastan kiintoainepitoisuuksissa mittaustuloksen ja tavoitearvon välillä oli eroavaisuuksia, joka johtui kiintoaineanalysaattoreista. Näytteiden kovettumisajat ja lisättävän veden määrä erosivat sementtimäärän mukaan. Kaikissa näytteissä käytettiin samaa rikastushiekkää, jolloin rikastushiekan kiintoainepitoisuus (74,4 %) ja partikkelikoko pysyivät samana (alle 20 µm pitoisuus 33 %) (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Pastan kiintoainepitoisuus vertailun tuloksia

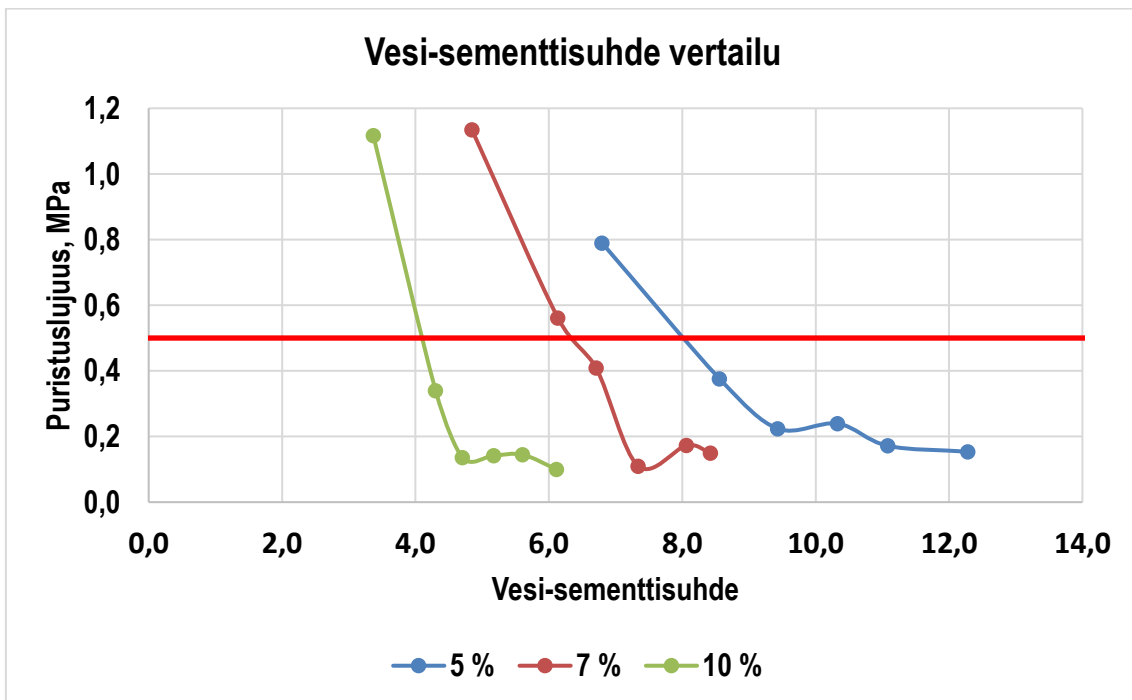
Sementtipitoisuus	pasta kiintoainepitoisuus	painuma cm	vesi- sementtis uhde	puristuslujuus MN/m ²
louhos 8, 5%	63.59 %	29	12.3	0.154
louhos 8, 5%	65.09 %	29	11.1	0.172
louhos 8, 5%	67.24 %	28.5	10.3	0.239
louhos 8, 5%	68.61 %	27	9.4	0.224
louhos 8, 5%	70.40 %	26.5	8.6	0.376
louhos 8, 5%	75.21 %	10.5	6.8	0.79
louhos 9, 7%	64.05 %	28.5	8.4	0.149
louhos 9, 7%	65.48 %	27	8.1	0.173
louhos 9, 7%	66.51 %	27	7.3	0.11
louhos 9, 7%	68.67 %	27	6.7	0.409
louhos 9, 7%	70.52 %	25.5	6.1	0.561
louhos 9, 7%	75.80 %	7	4.8	1.134
louhos 10, 10%	63.98 %	29	6.1	0.1
louhos 10, 10%	65.80 %	28	5.6	0.145
louhos 10, 10%	67.63 %	27	5.2	0.142
louhos 10, 10%	68.95 %	26.5	4.7	0.136
louhos 10, 10%	70.66 %	25.5	4.3	0.34
louhos 10, 10%	75.84 %	7	3.4	1.117

Kuvassa 22 nähdään pastan kiintoainepitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen eri sementtipitoisuuksilla. Tuloksista havaittiin 5 ja 10 %:n sementtipitoisuuksilla pastan kiintoainepitoisuuden tulisi olla 72 %, jotta päästäisiin tavoiteltuun puristuslujuuteen. 7 %:n sementtipitoisuudella pastan kiintoainepitoisuudeksi riittäisi 70 %.



KUVA 22. Pastan kiintoainepitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen, punainen viiva kuvastaa tavoiteltavaa puristuslujuutta 0,5 MPa.

Kuvassa 23 tutkittiin vesi-sementtisuhteen vaikutusta puristuslujuuteen eri sementtipitoisuuksilla. Vesi-sementtisuhteen vaikutus korostuu lyhyemmällä kovettumisajalla. 10 %:n sementtipitoisuudella (7 vuorokautta kovettumisaika) vesi-sementtisuhteen tulisi olla noin 4, että päästäisiin tavoiteltuun puristuslujuuteen. Kovettumisaikan kasvaessa 5 ja 7 %:n sementtipitoisuuksissa vesi-sementtisuhte voi olla korkeampi.



KUVA 23. Vesi-sementtisuhteen vaikutus puristuslujuuteen, punainen viiva kuvastaa tavoiteltavaa puristuslujuutta 0,5 MPa.

Vertailtaessa louhoksien 1, 2, 6 ja 7 näytteiden ja louhoksien 8, 9 ja 10 näytteiden pastan kiintoainepitoisuuksia. Louhoksien 8, 9 ja 10 näytteiden puristuslujuudet jäivät yllättävän alhaisiksi, vaikka pastan kiintoainepitoisuus oli korkea. Vastaavaa ei havaittu louhoksien 1, 2, 6 ja 7 näytteiden kohdalla (kappale 6.1 Louhosnäytteiden vertailu), joissa rikastushiekan kiintoainepitoisuudet olivat alhaisempia. Louhosnäytteillä päästiin silti yli tavoitellun puristuslujuuden alhaisemmista pastan kiintoainepitoisuuksista huolimatta. Louhosnäytteissä myös hienojen partikkeleiden pitoisuus oli korkeampi kuin pastan kiintoainepitoisuus näytteissä, jolloin partikkelikoon vaikutus ei voi selittää tuloksia.

Tutkimalla taulukkoa 2, 4 ja 5. Huomattiin että louhoksien 1, 2, 6 ja 7 näytteiden, joilla tavoitettiin 0,5 MPa:n puristuslujuus, vesi-sementtisuhte havaittiin olevan lähes sama kuin samassa sementtipitoisuudessa olevien louhoksien 8, 9 ja 10 näytteet. Louhosnäytteissä päästiin korkeammilla vesi-sementtisuhteilla tavoiteltuun puristuslujuuteen varsinkin 10 %:n sementtipitoisuuksissa. Puristus tuloksiin vaikuttavia syitä voisi olla painuma erot, jotka olivat todella suuret louhosnäytteiden ja vesi-sementtisuhteen vertailun näytteiden välillä. Louhosnäytteissä ylin painuma arvo oli 22,5 cm, joka oli 3 %:n sementtipitoisuuksissa. Vesi-sementtisuhteen vertailun näytteiden ainoa louhosnäytteiden painumaa 22,5 cm:ä pienempi tulos oli 74,8 %:n pastan kiintoainepitoisuudella, johon lisätyn veden määrä oli vähäinen.

TAULUKKO 5. Vesi-sementtisuhteen vertailua

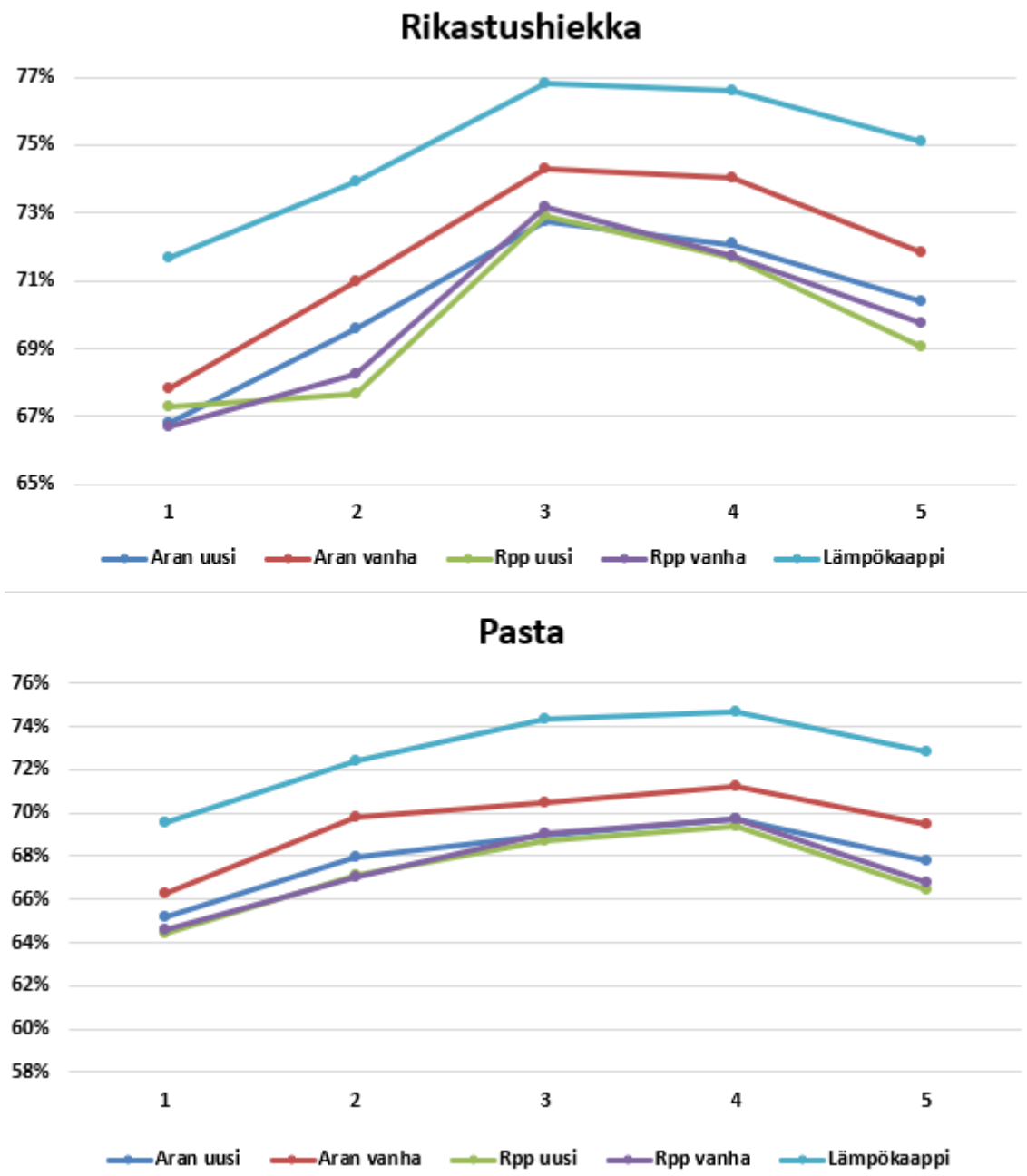
pastan tavoite sementtipitoisuus	vesi-sementtisuhte 5%	vesi-sementtisuhte 7%	vesi-sementtisuhte 10%
62 %	12.3	8.4	6.1
64 %	11.1	8.1	5.6
66 %	10.3	7.3	5.2
68 %	9.4	6.7	4.7
70 %	8.6	6.1	4.3
75 %	6.8	4.8	3.4

Syynä huonoihin puristuslujuustuloksiin oli lisätyn veden määrä pastassa. Päästäkseen pastan tavoite kiintoainepitoisuuksiin oli lisättävä näytteisiin paljon ylimääräistä vettä, rikastushiekan korkean kiintoainepitoisuuden takia. Tällöin vesi-sementtisuhte kasvoi liian suureksi. Pasta ei ollut ehtinyt sitoa kaikkea ylimääräistä vettä ennen puristuslujuusmittauksia, koska sylintereiden pinnalta piti

kaataa ylimääräinen vesi pois. Ylimääräinen vesi sylinterin pinnalla mahdollisesti vaikutti puristus-
lujuustuloksiin.

6.4 Kiintoaineanalysaattoreiden vertailu

Kiintoaineanalysaattoreiden vertailussa käytettiin kummastakin pastalaitoksesta prosessin aikana haettuja rikastushiekka- ja pastanäytteitä. Sama näyte mitattiin kummankin pastalaitoksen molemmilla analysaattoreilla. Saatuja tuloksia verrattiin lämpökaapilla kuivattuihin tuloksiin (kuva 24). Aran-pastalaitoksen vanhan analysaattorin tulokset olivat lähimpänä lämpökaapilla saatuja tuloksia. Tästä huolimatta analysaattorin antama tulos oli useamman prosenttiyksikön liian alhainen. Mittauksissa havaittiin analysaattoreiden mittausaikojen eroavan toisistaan, joka voi selittää eroavaisuudet analysaattoreiden välillä. Aran-pastalaitoksen analysaattorit mittaavat kiintoainepitoisuuden paljon nopeammin saavuttaen samalla korkeamman kiintoainepitoisuuden. Rimpi-pastalaitoksella analysaattoreiden toimintaa häiritsivät mittauspisteen sijainnista johtuva värinä ja lämpötilanvaihtelu.



KUVA 24. Kiintoaineanalysointimenetelmien vertailu

6.5 Painumatestien vertailun tulokset ja arviointi

Painuma testien vertailussa tarkoituksena oli selvittää eri mittaustapojen vertailtavuus keskenään ja arvioida Bogerin testin soveltuvuutta pastalaitoksella tehtäväksi mittaukseksi. Painumatestien vertailu tehtiin louhosnäytteille. Louhosnäytteistä mitattiin kummallakin painumatestillä painuma eri sementtipitoisuuksilla ja tulokset esitettiin taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Painumatestien vertailun tulokset

	louhos 1	louhos 1	louhos 2	louhos 2	louhos 6	louhos 6	louhos 7	louhos 7
sementtipitoisuus	Boger painuma cm	ASTM painuma cm	Boger painuma cm	ASTM painuma cm	Boger painuma cm	ASTM painuma cm	Boger painuma cm	ASTM painuma cm
3.00 %	2.6	22	2.4	22.5	-	18	1.8	16
3.00 %	2.6	22	2.4	22.5	-	18	1.8	16
3.00 %	2.6	22	2.4	22.5	-	18	1.8	16
5.00 %	2	17.5	2.2	20.5	1.8	17	1.8	17
5.00 %	2	17.5	2.2	20.5	1.8	17	1.8	17
5.00 %	2	17.5	2.2	20.5	1.8	17	1.8	17
6.00 %	2.5	18.5	2.1	20	1.7	16.5	1.9	18
6.00 %	2.5	18.5	2.1	20	1.7	16.5	1.9	18
6.00 %	2.5	18.5	2.1	20	1.7	16.5	1.9	18
7.00 %	2.1	17	2.5	19.5	1.9	16.5	2.2	19
7.00 %	2.1	17	2.5	19.5	1.9	16.5	2.2	19
7.00 %	2.1	17	2.5	19.5	1.9	16.5	2.2	19
8.00 %	2.2	17	2.2	18	2	18	1.9	17.5
8.00 %	2.2	17	2.2	18	2	18	1.9	17.5
8.00 %	2.2	17	2.2	18	2	18	1.9	17.5
10.00 %	1.8	17	2.3	18.5	1.8	17.5	1.7	16.5
10.00 %	1.8	17	2.3	18.5	1.8	17.5	1.7	16.5
10.00 %	1.8	17	2.3	18.5	1.8	17.5	1.7	16.5

Taulukosta 6 huomataan, että Boger testin tulokset eivät ole suoraan verrannollisia ASTM -testin tuloksiin. Boger testin tuloksissa oli enemmän hajontaa kuin ASTM testin tuloksissa. ASTM -testillä saadun painuman 17 cm tulokseksi Boger testi antoi lukuarvoja väliltä 2,2 – 1,7 cm. Virheet tuloksissa voivat johtua mittauksessa käytössä olleesta Boger testin mitta-astian koosta. Boger testin oli paljon pienempi kuin ASTM -testi, joten mittauksen aikana tapahtuvat virheet korostuvat. Boger testistä myös mitataan painumaa mm kun ASTM -testissä mitataan cm, mm mitattuna testaajan täytyy olla tarkkaavaisempi. Painumatestien vertailussa todettiin, että jo käytössä oleva ASTM-standardin mukainen testi sopii paremmin prosessin seurantaan. Testissä käytössä oleva Boger testin mitta-astia oli liian pieni, se lisäsi mittauksen virhemarginaalia.

7 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutkia pastan laatuun vaikuttavia tekijöitä erityisesti partikkelikokojakaamaa. Opinnäytetyössä tutkittiin rikastushiekan partikkelikoon ja kiintoainepitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen. Tulosten mittaamista varten kerättiin pastalaitosten ajojen aikana rikastushiekkaa, josta valmistettiin pastanäytteitä. Tulosten määrittämiseen käytettiin useita eri mittaamenetelmiä: painumatestit, kiintoaineen määrittäminen, puristuslujuustesti ja partikkelikoon määrittäminen. Tuloksista saatiin selville, että partikkelikoolla voi olla vaikutusta pastan laatuun, mutta sen vaikutusta voidaan vähentää parantamalla kiintoaine- ja sementtipitoisuuksia.

Näytteistä, joiden hienojen partikkeleiden pitoisuus oli lähes sama 29 - 35 %, havaittiin kuitenkin merkittävä ero rikastushiekan kiintoainepitoisuudessa ja puristuslujuudessa. Kiintoainepitoisuuden ollessa 68 % ja sementtipitoisuuden ollessa 10 %, saatiin puristuslujuudeksi 0,87 MPa. Vastaavasti kiintoaineen ollessa 70 % puristuslujuus oli noin 0,2 MPa korkeampi. Näiden tulosten perusteella voidaan sanoa, että rikastushiekan kiintoainepitoisuudella on vaikutusta puristuslujuuksiin.

Hienojen partikkeleiden pitoisuuksien kasvulla on huomattu olevan huonontava vaikutus puristuslujuustuloksiin. Vertailemalla jauhatusnäytteiden louhoksien 3 ja 5 näytteitä 5 ja 7 %:n sementtipitoisuuksissa huomattiin niiden puristuslujuuksien olevan lähellä toisiaan, vaikka näytteiden hienojen partikkeleiden pitoisuudet erosivat suuresti. 5 %:n sementtipitoisuuksissa louhoksen 3 näytteen hienojen partikkeleiden pitoisuus oli 37 % ja näytteissä päästiin 0,54 MPa:n puristuslujuuksiin. Sen sijaan louhoksen 5 näytteet pääsivät 67 %:n hienojen partikkelien pitoisuudella 0,56 MPa:n puristuslujuuksiin. Puristuslujuuksien pienet erot selittyvät näytteiden rikastushiekan kiintoainepitoisuuksilla. Louhoksen 3 näytteen kiintoainepitoisuus oli 68 % ja louhoksen 5 näytteen 75 %. Hienojen partikkeleiden pitoisuuden ollessa suurempi voidaan kuitenkin saavuttaa samalla sementtipitoisuudella yhtä hyvä puristuslujuus korkeammalla rikastushiekan kiintoainepitoisuudella.

Jauhatusnäytteiden louhoksen 4 näytteestä myös huomattiin, että kovettumisajalla oli merkitys puristuslujuuteen. Ylimääräisen viikon kovettumisaikana näytteen puristuslujuus kasvoi 0,8 MPa:sta yli 1 MPa:iin. Jauhatusnäytteiden tulosten perusteella partikkelikoon vaikutusta puristuslujuuteen pystytään minimoimaan nostamalla rikastushiekan kiintoainepitoisuutta ja pidentämällä kovettumisaikaa. Louhosnäytteiden sementtipitoisuuksia vertailemalla huomattiin että 3 %:n sementtipitoisuudella yksikään louhos ei päässyt tavoiteltuun puristuslujuuteen. 10 %:n sementtipitoisuuksilla

kaikki louhokset saavuttivat tavoitellun puristuslujuuden. Tulosten perusteella sementtiä lisäämällä voidaan parantaa pastan puristuslujuutta, erityisesti silloin kun sementtipitoisuuden noston yhteyteen lisätään myös kovettumisaikaa.

Työn aikana hienojen partikkeleiden pitoisuudella rikastushiekassa havaittiin olevan vaikutusta myös käytettävän rikastushiekan kiintoainepitoisuuteen. Näin ollen eri kokeiden välillä havaittiin eroavaisuuksia painumissa ja pastan kiintoainepitoisuudessa, joiden alun perin oli tarkoitus olla vakioita. Nämä seikat hankaloittivat tulosten tulkintaa merkittävästi ja johtivat ristiriitaisuuksiin tulosten välillä. Myös kovettumisaika vaihteli eri sementtipitoisuuksien välillä, joka pakotti miettimään, olisiko partikkelikoolla ja kovettumisajalla vaikutusta keskenään. Tältä olisi voitu välttyä pitämällä kovettumisaika vakiona kaikilla sementtipitoisuuksilla, silloin tulokset eivät olisi suoraan vertautuneet kaivoksella käytettäviin kovettumisaikoihin.

Tällä hetkellä kaivoksella on ollut haasteita pastan puristuslujuuden kanssa. Puristuslujuuteen liittyvien haasteiden havaittiin alkaneen prosessista, josta rikastushiekka tulee. Alustavien kokeiden mukaan pastan havaittiin sisältävän paljon hienoja partikkeleita, joiden tiedetään vaikuttavan pastan puristuslujuuteen. Lisäksi opinnäytetyössä havaittiin kiintoainepitoisuudella olevan mahdollisesti jopa suurempi merkitys kuin hienojen partikkeleiden pitoisuudella rikastushiekassa. Rikastushiekan kiintoainepitoisuuden nostaminen voi kuitenkin olla haastavaa etenkin rikastushiekan sisältäessä paljon hienoja partikkeleita, koska ne sitovat itseensä enemmän kosteutta. Näin ollen myös kiekkosuodattimen toimivuus on tärkeää. Opinnäytetyö kannustaa kasaamaan datapankkia rikastushiekan kiintoainepitoisuudesta, hienojen partikkeleiden pitoisuudesta rikastushiekassa, pastan sementtipitoisuudesta ja puristuslujuudesta työssä esitettävien havaintojen perusteella. Opinnäytetyön aikana otettiin myös onnistuneesti käyttöön uusi partikkelikokoanalyysointilaite. Partikkelikokoanalyysointilaitteen käyttöönotto ja mittausmenetelmän kehittäminen mahdollistavat datan keräämiseen datapankkiin ja parantavan ymmärrystä partikkelikoon vaikutuksesta pastan puristuslujuudessa.

LÄHTEET

1. Agnico Eagle Mines Limited 2023. 60th Anniversary. Hakupäivä 16.1.2023. <https://www.agnicoeagle.com/English/60th-anniversary/default.aspx>.
2. Agnico Eagle Finland 2022 AEF. Agnico Eagle ja Kittilän kaivos. Esittelymateriaali. Sisäinen intranet.
3. Agnico Eagle Finland 2019. Tietoa meistä: Hakupäivä 17.1.2023. <https://agnicoeagle.fi/fi/tieto-meista/toiminta/>.
4. Daniel Doucet, Dominique Girard, Louise Grondin & Pierre Matte 2010. Technical Report on the December 31, 2009, Mineral Resource and Mineral Reserve Estimate and the Suuri Extension Project, Kittila Mine, Finland. Hakupäivä 17.1.2023. https://s21.q4cdn.com/374334112/files/doc_downloads/operations/kittila/March4-KittilaMine-Technical-Report-2010_v001_d1j74l.pdf.
5. Paalumäki Tauno, Lappalainen Pekka & Hakapää Antero 2015. Kaivos- ja louhintateknikka. Kaivosteollisuus ry ja Opetushallitus. 4. painos. Helsinki.
6. Veki, Sofia 2023. Mining Engineer, Agnico Eagle Finland Oy. Haastattelu 10.4.2023.
7. Pyhäjärvi, Teemu 2020. Peränajon optimointi Kittilän kaivoksella. Lapin ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 17.1.2023. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/338971/Per%c3%a4najok%20optimointi%20Kittil%c3%a4n%20kaivoksella.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
8. Korkalainen, Janina 2017. Pastatäytön optimointi Kittilän kaivoksella. Aalto-yliopisto. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Hakupäivä 17.1.2023. <https://aalto-doc.aalto.fi/handle/123456789/26202>.
9. Agnico Eagle Finland 2021. Mineraalien prosessointi Kittilän rikastamolla. Esittelymateriaali. Sisäinen intranet.
10. Ahtiainen, Riina 2023. Metallurgist. Agnico Eagle Finland Oy. Haastattelu 10.4.2023.
11. Agnico Eagle 2023. Operations/Kittilä. Hakupäivä 17.1.2023. <https://www.agnicoeagle.com/English/operations/operations/kittila/default.aspx>.
12. Shespari Morteza 2015. A Review of Underground Mine Backfilling Methods with Emphasis On Cemented Paste Backfill. University of Ottawa. Department of Civil Engineering. Hakupäivä

- 20.1.2023. <https://www.researchgate.net/publication/282307412> A review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill.
13. Yao Yuan, Cui Zengdi & Wu Ruzhou 2012. Development and challenges on mining backfill technology. Journal of Materials Science Research. Hakupäivä 20.1.2023. <https://www.ccse-net.org/journal/index.php/jmsr/article/view/18559>.
 14. Agnico Eagle Finland 2021. Rimpipastalaitoksen ylösajo ja käyttö. Sisäinen intranet.
 15. Agnico Eagle Finland 2020. Kittilä virtauskaavio. Sisäinen intranet
 16. Yilmaz Erol & Fall Mamadou 2017. Paste Tailings Management. Springer International Publishing Switzerland. Hakupäivä 27.1.2023. <https://books.google.fi/books?id=3sNCDgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi#v=one-page&q&f=false>.
 17. Finnsementti 2022. Oiva-sementti. Tuote-esite. Hakupäivä 27.1.2023. https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/FS_Oiva_FI_2022.pdf.
 18. Hassani Ferri, Palarski Jan, Sokola-Szewiola Violetta & Stozik Grzegorz 2021. Minefill 2020-2021. CRC Press/Balkema. Hakupäivä 27.1.2023. <https://library.oapen.org/bitstream/id/706f10e2-cab5-48e1-a656-7236acc6c373/9781000454215.pdf>.
 19. Goldcorp 2014. Paste Backfill System QA/QC Procedures. Sisäinen intranet.
 20. Envitop Oy 2023. Prosessin esittely. Saatu Envitopilta 13.1.2023.
 21. Hosmed Oy 2023. Partikkelikoon peruskäsitteet. Saatu Hosmedilta 23.1.2023.