

25.7.2018

SELVITYS LIUOTUSPROSESSIN HALLINNAN JA TOIMINNAN PARANTAMISESTA

Kevät 2018

Salassapito

21.5.1999/621 Laki viranomaisten toiminnan julkisuudesta

24 §:

--

20) asiakirjat, jotka sisältävät tietoja yksityisestä liike- tai ammattisalaisuudesta, samoin kuin sellaiset asiakirjat, jotka sisältävät tietoja muusta vastaavasta yksityisen elinkeinotoimintaa koskevasta seikasta, jos tiedon antaminen niistä aiheuttaisi elinkeinonharjoittajalle taloudellista vahinkoa, ja kysymys ei ole kuluttajien terveyden tai ympäristön terveellisyys- ja suojaamiseksi tai toiminnasta haittaa kärsivien oikeuksien valvomiseksi merkityksellisistä tiedoista tai elinkeinonharjoittajan velvollisuuksia ja niiden hoitamista koskevista tiedoista;

--

TerraFame Oy pyytää Pohjois-Suomen aluehallintovirastoa huomioimaan, että selvitys sisältää tietoja, jotka ovat viranomaisen asiakirjassa salassa pidettäviä viranomaisen toiminnan julkisuudesta annetun lain (621/1999) 24 § 1 momentin 20) kohdan nojalla TerraFame Oy:n liikesalaisuuksina.

Tähän viitaten TerraFame Oy vaatii salassapidettäväksi tämän dokumentin seuraavaa sisältöä.

Taulukko 5 (kasatut metallimäärät) sekä

osin taulukko 6 (tuotannon osuus syötettyyn malmiin nähden)

Taulukot 7- 17, joissa on esitetty yksityiskohtaiset metallien taseet.

Taulukot 18- 20, joissa on esitetty yksityiskohtaisesti yhtiön tuotteiden koostumus

Taulukot 22-23, joissa on esitetty yhtiön arvio tuotantomääristä

Salassa pidettävät taulukot on koottu liitteeseen 1, jonka yhtiö vaatii salassapidettäväksi kokonaisuudessaan.

SISÄLLYSLUETTELO

SELVITYS LIUOTUSPROSESSIN HALLINNAN JA TOIMINNAN PARANTAMISESTA.....	1
Kevät 2018.....	1
Salassapito.....	1
1 JOHDANTO.....	3
2 BIOLIUTUKSEN PERUSTEET.....	4
3 BIOLIUTUKSEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	5
3.1 Malmin mineralogia.....	5
3.2 Grade Control – Pitoisuuden kontrollointi.....	8
3.3 Partikkelikoko.....	8
3.4 Agglomeraatin laatu.....	8
3.5 Salaojitus.....	9
3.6 Ilmastusjärjestelmä.....	9
3.7 Kastelujärjestelmä.....	10
3.8 Mikrobit.....	10
3.9 Happotasapaino.....	12
3.10 Prosessiliuoksen hallinta.....	13
3.11 Sekundäärisaostumat.....	18
3.12 Huolenpito.....	21
4 TOIMINTAHISTORIA.....	21
5 METALLITASEET.....	23
5.1 Yleistä.....	23
5.2 Nikkeli.....	25
5.3 Koboltti.....	25
5.4 Sinkki.....	26
5.5 Kupari.....	26
5.6 Uraani.....	27
5.7 Rauta.....	27
5.8 Alumiini.....	28
5.9 Mangaani.....	28
5.10 Rikki.....	28
5.11 Natrium.....	29
5.12 Magnesium.....	29
5.13 Harvinaiset metallit.....	30
6 TUOTELAADUT	30
7 NYKYTILANNE.....	31
8 TOIMINNAN PARANTAMINEN.....	32
9 TUOTANTOTAVOITTEET.....	33
10 TULOKSIA LIUTUKSEN LOPUN SAAVUTTANEESTA MATERIAALISTA.....	34
11 ESNE-SAKAN HYÖDYNTÄMINEN SEKUNDÄÄRILIUTUKSESSA.....	34

1 JOHDANTO

Tämän dokumentin ensimmäinen versio on laadittu vastaamaan ympäristölupapäätöksen nro 43/2015/1 ("purkuputken ympäristölupa") lupamääräykseen 12:

YMPÄRISTÖLUPAPÄÄTÖS Nro 43/2015/1 24.4.2015 (Dnro PSAVI/2960/2014), Purkuputken rakentaminen ja puhdistettujen jätevesien johtaminen Talvivaaran kaivosalueelta Nuasjärveen sekä nykyisien purkupisteiden kautta Kalliojokeen johdettavan puhdistetun veden määrän tilapäinen lisääminen vuoden 2015 aikana, Sotkamo

Lupamääräys 12. Luvan saajan on laadittava liuotusprosessin toimivuuden ja hallinnan parantamista koskeva selvitys. Sen tulee sisältää muun muassa perusteellinen analyysi liuotusprosessissa todettujen ongelmien syistä ja niiden ratkaisumahdollisuuksista sekä toimenpide-esitys liuotusprosessin tehostamiseksi ja ylläpitämiseksi eri tilanteissa. Selvitykseen on liitettävä yksityiskohtainen esitys ympäristön kannalta keskeisten haitallisten aineiden (mm. nikkeli, koboltti, sinkki, kupari, uraani, rauta, alumiini, metallit, rikki, natrium, mangaani) taseesta ja kulkeutumisesta prosessissa. Selvityksessä on tarkasteltava kasoihin saostuvien sakkujen (jarosiitti, yms.) pysyvyyttä ja merkitystä liuotusprosessin toimivuudelle ja mahdollisuutta saostaa sakat laitosmaisesti ennen kasoille kulkeutumista.

Selvitys on toimitettava hakemusasiana aluehallintoviraston ratkaistavaksi viimeistään 29.4.2016. Selvityksen perusteella aluehallintovirasto voi täsmentää lupamääräyksiä tai täydentää lupaa uusilla määräyksillä.

Vastaava selvitys on edellytetty toimitettavaksi lupamääräyksessä 18 ympäristölupapäätöksessä nro 36/2014/1 (30.4.2014, PSAVI/58/04.08/2011), joka on saanut lainvoiman KHO:n ratkaisulla 9.5.2017.

Selvitys on toimitettu Pohjois-Suomen aluehallintovirastolle määräaikaan mennessä ja se on vireillä diaarinumerolla PSAVI/1266/2016.

Vaasan hallinto-oikeus ("VHO") antoi huhtikuussa 2016 päätöksen keskeisimpiin Terrafamen ympäristö- ja vesitalouslupapäätöksiin. Samassa yhteydessä VHO määräsi Terrafamen hakemaan Pohjois-Suomen aluehallintovirastolta uutta ympäristö- ja vesitalouslupaa 31.8.2017 mennessä. Terrafame on jättänyt hakemuksen määrätyssä aikataulussa 30.8.2017. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto on pyytänyt Terrafamea täydentämään hakemustaan (täydennyskehoitus 14.5.2018, kohta 11) mm. tämän selvityksen osalta siten, että se kattaa myös vuoden 2017 tuotannonseurannan tiedot. Terrafame toimittaa ohessa päivitetyn selvityksen. Päivitetyssä selvityksessä on esitetty myös muita ko. täydennyspyynnössä edellytettyjä tuotantotietoja.

2 BIOLIUOTUKSEN PERUSTEET

Bioliuotuksessa malmissa luonnostaan kasvavat mikrobit katalysoivat malmin sisältämän raudan ja rikin hapettumista saadakseen energiaa kasvuunsa. Kiinteät metallisulfidit muuntuvat vesiliukoisiksi metallisulfaateiksi ja liukenevat kiertävään prosessiliuokseen. Terrafamen malmin bioliuotus on voimakkaasti lämpöä tuottava prosessi ja siksi soveltuu käytettäväksi myös kylmissä olosuhteissa.

Avolouhoksesta saatava malmi murskataan neljässä vaiheessa 8 mm partikkelikokoon (p80). Murskauksen jälkeen malmi johdetaan agglomerointiin, jossa pyörivässä rummussa malmin joukkoon lisätään prosessiliuosta tavoitteena malmin sisältämän hienon aineksen sitominen suurempiin partikkeleihin.

Agglomeroinnin jälkeen malmi kasataan primääriliuotukseen hieman alle 10 metrin korkuisille liuotuskasoille, joita on nykyisessä tuotannossa 4 kappaletta. Primääriliuotuksessa kasoja kastellaan pH-säädetyllä prosessiliuoksella painovoimaisesti ns. kastelualtaista (IP-altaat). Sulfidimineraalien liukeneminen tarvitsee happea, jota puhalletaan ilman muodossa kasojen ala- sekä keskiosaan käyttäen matalapainepuhaltamia.

Liuotuskasoista salaojarakenteen kautta ulostuleva prosessiliuos johdetaan keruualtasiin (PLS-altaat), joista osa liuoksesta syötetään metallien talteenottolaitokselle ja pääosa palautetaan hapotuksen jälkeen takaisin kastelualtasiin.

Primääriliuotuksen kasoja puretaan ja siirretään kasattavaksi uudestaan sekundääriliuotukseen saman aikaisesti kasauksen kanssa. Sekundääriliuotuksessa purkumalmia kastellaan ja hapetetaan vastaavalla tavalla kuin primääriliuotuksessa. Sekundääriliuotuskasat ovat malmin loppusijoituspaikkoja.

Sekundääriliuotuksen kerrosten korkeudet tulevat vaihtelevaan arviolta 5 ja 30 m välillä. Rakennettavaan yksittäisen kerroksen korkeuteen vaikuttavat kasan pohjan muoto, liuotussaanti primäärivaiheen jälkeen, kuljettimen mahdollisuudet sekä teknis-taloudelliset seikat. Korko on edullista pitää mahdollisimman suurena, mikäli metallien saanti on korkea jo primääriliuotusvaiheen jälkeen. Toisaalta jokainen rajapinta kerroksista sisältää riskin tiivistymiselle. Edelleen, mitä korkeampana kasaus tehdään, sitä enemmän materiaalilla on taipumus lajittua ja perkolaation heikentyä. Terrafame kehittää kokonaisuuden kannalta parasta kerrokokoa normaalina toiminnan parantamistoimena toiminnan edetessä.

3 BIOLIUOTUKSEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tässä kappaleessa käsitellään liuotuksen toiminnan kannalta tärkeimpiä tekijöitä.

3.1 Malmin mineralogia

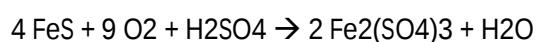
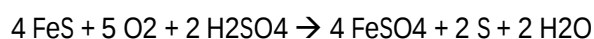
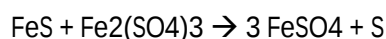
Liuotuksen kannalta tärkeitä malmin sisältämiä sulfidimineraaleja pääasiallisessa liukenemisjärjestyksessä ovat:

Alabandiitti/mangaanisulfidi	MnS	Liukenee ensimmäisenä jopa pelkistävässä olosuhteissa
Pyrrotiitti/magneetikiisu	Fe _{0,83-1} S	Liukeneminen muodostaa merkittävästi lämpöä, toimii liuotuksen alkuvaiheessa "polttoaineena". Nikkelistä noin 25% on sitoutunut pyrrotiittiin.
Sfaleriitti/sinkkivälke	Zn(Fe)S	Sinkin ja kadmiumin pääkantaja
Pentlandiitti	(Fe,Ni) ₉ S ₈	Pääasiallinen nikkelin kantaja. Malmassa on myös nikkelimineraalia violariitti (FeNi ₂ S ₄), joka on osittain hapettunutta pentlandiittia
Pyriitti/rikkikiisu	FeS ₂	Liukeneminen tuottaa happoa, mikä nähdään käytännössä liuotussyklin loppuvaiheessa.
Kalkopyriitti/kuparikiisu	CuFeS ₂	Pääasiallinen kuparin kantaja. Liukenee metalleista viimeisenä.

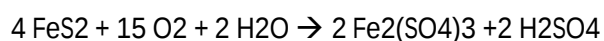
Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto Terrafamen malmin mineralogiasta.

Pääasialliset liukenemisreaktiot voidaan esittää seuraavasti:

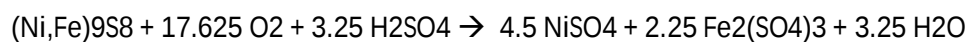
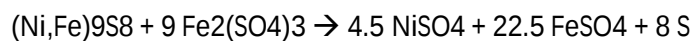
Pyrrotiitti



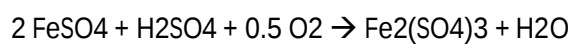
Pyriitti



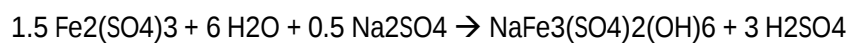
Pentlandiitti



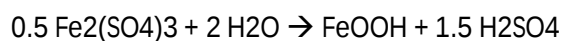
Raudan reaktiot



// raudan hapettuminen



// natriumjarosiitin saostuminen



// götiitin saostuminen

Taulukko 1. Yhteenveto Terrafamen malmin mineraaleista.

Pyrrhotite Po	FeS	
Pyrite Py	FeS₂	
Sphalerite Sp	(Zn,Fe)S	
Alabandite Alab	MnS	
Pentlandite (Violarite Fe⁺⁺Ni⁺⁺⁺₂S₄)	((Fe,Ni)₉S₈)	
Chalcopyrite Cp	CuFeS₂	
Total sulphides		
Trace galena	PbS	
Trace ullamannite	NiSbS	
Trace stannite	Cu₂FeSnS₄	
Talvivaara ore: silicate mineralogy		
Quartz	SiO₂	
Biotite – phlogopite	K(Fe,Mg)₃(AlSi₃O₁₀)(OH)₂	
Microcline	KAlSi₃O₈	
Anorthite	CaAl₂Si₂O₈	
Muscovite	KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂	
Titanite	CaTiSiO₅	
Rutile	TiO₂	
Apatite	Ca₅(PO₄)₃F	
Garnet (Spessartine)	Mn₃Al₂(SiO₄)₃	
Chlorite	(Mg,Fe)₆(Si,Al)₄O₁₀(OH)₈	
Albite	NaAlSi₃O₈	
Zircon	ZrSiO₄	

Terrafamen liuotusprosessissa ensi vaiheessa liukenee hienoimman malmiaineksen mangaanisulfidi sekä pyrroitiitti muodostaen runsaasti lämpöä, joka on tärkeä liuotusprosessin käynnistymisen kannalta. Liuotuksen edetessä hapetuspotentiaali nousee eri mineraalien sähkökemiallisen sarjan mukaisesti ja viimeisenä arvometalleista liukenee kalkopyriitti.

Mineralogisen tietämyksen lisäämiseksi selvitetään mineraalien vaihtelua louhittavassa malmissa osana normaalia tuotannonseurantaa. Erityisesti pyrroitiitin ja pyriitin määrien vaihtelulla voi olla vaikutusta liuotustulokseen.

3.2 Grade Control – Pitoisuuden kontrollointi

Malmin nikkelpitoisuuden raja-arvoa käytetään erottamaan sivukivi malmista. Tämä raja-arvo (cut-off) varmistaa kaivossuunnittelun työkaluna liuotukseen menevän malmin tasalaatuisuuden arvometallipitoisuuksien suhteen. Nykyisin raja-arvona käytetään nikkelpitoisuutta 0,12%, jolloin keskimääräinen nikkelpitoisuus vaihtelee välillä 0,21-0,27 % riippuen louhintatilanteesta.

Sivukiven ja malmin rajapinnoissa pitoisuusvaihtelua seurataan hyödyntämällä käsikäyttöistä XRF-analysointia mittaamalla panostuksen ns. porasoihasta nikkelpitoisuutta. Näitä käsikäyttöisen mittalaitteen analyysituloksia verrataan tuotantolaboratorion analyysituloksiin mittausten menetelmän luotettavuuden varmistamiseksi. Toimintahistorian aikana on lisätty tehtävien analyysien määrä ja näin on pystytty varmistamaan liuotukseen menevän malmin tavoitelaatu sekä rajaamaan malmiesiintymän sisällä olevaa sivukivimassaa pois laimentamasta itse malmia.

3.3 Partikkelikoko

Liuotukseen syötettävän malmin ominaispinta-ala suurenee partikkelikoon pienentyessä. Kasaliuotuksessa malmin liuoksen ja ilman läpäisevyysominaisuuksilla on suuri merkitys liuotuksen onnistumisen kannalta ja partikkelikoon pienetessä liikaa läpäisyominaisuudet heikkenevät. Kaivoksen edellisen toimijan toimintahistorian aikana agglomerointiin syötettävää partikkelikokoa on kasvatettu alkuperäisestä (p80 8 mm) hieman suurempaan (p80 9,5 mm). Terrafamen aloittaessa kaivostoiminnan ja louhinnan uudelleenkäynnistyksen yhteydessä syyskuussa 2015 palattiin alkuperäiseen partikkelikokoon uskoen tästä olevan etua liuotuksen kannalta. Tätä ratkaisua tukivat myös Terrafamen malmille teetätetyt hydrodynaamiset kokeet.

3.4 Agglomeraatin laatu

Agglomeraatin laatutekijät ovat osoittautuneet ehkä tärkeimmäksi tekijäksi liuotusprosessin onnistumisen kannalta. Liuotuskasojä kastellaan painovoimaisesti 60 cm * 60 cm kasteluletkuverkostolla kasojen päältä ja kasteluliuoksen on läpäistävä noin 8 metrin korkuinen liuotuskasa aktiivisen liuotuksen toiminnan aikana.

Murskauksen jälkeen tuore malmi agglomeroidaan eli kostutetaan agglomeroitumussu malmin sisältämän hienon aineksen sitomiseksi suurempien malmipartikkeleiden pinnalle. Näin malmin nesteen ja ilman läpäisevyysominaisuudet paranevat.

Liian kuiva agglomeraatti läpäisee liuoksen liian nopeasti, jolloin diffuusion kautta tapahtuva aineen siirto heikkenee.

Liian kostea agglomeraatti vettyy siten, että liuos ja malmin sisältämä hieno aines tukkii huokostilavuutta ja niin liuoksen kuin ilman läpäisevyys heikkenee.

Toimintahistorian aikana on havaittu, että agglomeraatin laadussa on ollut sellaista vaihtelua, joka on vaikuttanut myös liukenemistulokseen. Laadunseurantaan on erityisesti panostettu,

jotta varmistetaan, että liukenemisolosuhteet ovat mahdollisimman tasaiset koko malmimäärässä.

3.5 Salaojitus

Liutuskasojen alaosaan rakennettavan salaojakerroksen tehtävänä on poistaa prosessiliuos kasan sisältä. Salaojakerroksen rakenteen täytyy olla mitoitettu poistamaan liuosta suunnittelun mukainen maksimimäärä lisättynä sateen kautta tulevalla maksimisademäärällä.

Toimintahistorian aikana on ollut käytössä erityyppisiä salaojaratkaisuja ja kehitystyön tuloksena on tehty salaojituksen parannuksia. Primääriliuotuksessa oli selkeästi ongelmia toisella kasauskierroksella salaojituksen toiminnassa aiheuttaen sen, että nestepinta nousi kasan sisällä tukkien malmipartikkeleiden välistä huokostilavuutta ja näin aiheuttaen myös ongelmia kasojen ilmastukselle.

Nykyisessä salaojarakenteessa käytetään louhetta sekä salaojaputkia, jolloin esimerkiksi putkien tukkeentumisen jälkeen varmistetaan vielä liuoksen poisto louhekerroksen kautta.

Liuosaltaiden ja kalvotettujen prosessi/sivukivikenttien pohjan tarkkailu toteutetaan kalvotettujen alueiden läheisyyteen porattujen salaojakaivojen avulla.

Liuoskiertoaltaiden tarkkailuputkista (salaojaputket) otetaan nykyisellään näytteet kerran viikossa, joista analysoidaan pH sekä liukoiset metallit. Tarkkailutulokset vuosilta 2014 – 2018 on esitetty liitteessä 2.

Tarkkailun perusteella suoritetaan suojapumppauksia prosessiin tarvittaessa. Nykyisillä liuotusalueilla uusia suojapumppauspisteitä ei katsota olevan tarpeellista rakentaa.

3.6 Ilmastusjärjestelmä

Sulfidien hapettuminen sekä ferroraudan hapettuminen ferriraudaksi vaatii happea, jota kasoihin syötetään ilman muodossa käyttämällä matalapainepuhaltimia. Ilmastusjärjestelmä koostuu liutuskasoihin asennetuista ilmastuputkista, joita asennetaan liutuskasojen ala- sekä keskiosiin.

Ilmastusjärjestelmään on tehty lukuisia parannuksia toimintavuosien aikana viimeisimpänä liutuskasojen alaosan ilmastuputkien nostaminen selkeästi salaojakerroksen yläpuolelle. Aikaisemmin ilmastuputket asennettiin suoraan salaojakerrokseen, jolloin havaittiin, että ilmastuputket tukkeutuvat herkästi prosessiliuoksesta. Tämä ilmiö johtuu luonnollisesti siitä, että liutuskasan alaosan malmi on kylläinen veden suhteen salaojakerroksen ja malmin rajapinnassa.

Kasoihin puhallettavaa ilmamäärää seurataan ja tehostamalla puhaltimien ennakkohuoltoa on päästy tilanteeseen, että ilmastusjärjestelmä toimii tavoitteiden mukaisesti. Kasojen ilmastusta kehitettiin vuodesta 2017 alkaen asentamalla puhaltimia kasojen molemmiin puoliin, parantaen ilman kontaktia malmin kanssa. Alustavat tulokset ovat lupaavia parantamaan primäärivaiheen liuotusta.

Puhaltimien sijainnit Terrafamen liuotusalueilla on esitetty liitteessä 3.

3.7 Kastelujärjestelmä

Prosessiliuos viedään liuotuskasoihin painovoimaisesti kasteluletkuja pitkin. Kastelun tasaisuus on ensiarvoisen tärkeää, jotta varmistetaan tasaiset liuotusolosuhteet koko liuotuspinta-alalla. Kastelujärjestelmän parannuksina voidaan mainita esimerkiksi seuraavat toimenpiteet:

- kasteluputkiston modularointi siten, että saavutetaan tasainen kastelu
- kasteluletkujen kiinnitysratkaisun kehittäminen siten, että kasteluletkujen vuodot on minimoitu
- lämpökameran hyödyntäminen teknisten ratkaisujen toimivuuden todentamiseksi
- liuotuskasojen pintojen käsittely kasauksen jälkeen siten, että pintavalumat ovat minimoitu
- panostaminen kasojen huolenpitoon ("housekeeping")
- tuotannon seurantatyökalujen kehittäminen

3.8 Mikrobit

Mikrobien rooli bioliuotuksessa on tehostaa ja nopeuttaa malmin sisältämien sulfidien hapettumista. Bioliuotus on yleisesti käytössä oleva menetelmä sulfidisille malmiesiintymille kullan ja kuparin tuottamiseksi. Teknisesti eri metallien bioliuotus ei poikkea toisistaan vaan peruseriaatteena kaikissa, on mikrobiavusteinen sulfidimineraalien hapettuminen ja näin arvometallien liukeneminen. Bioliuotuksessa hyödynnetään rautaa ja rikkiä hapettavia mikrobeja, jotka käyttävät biomassan kasvattamiseen tarvittavana hiilen lähteenä ilman hiilidioksidia.

Mikrobi on yleisnimitys mikroskooppisen pienille eliöille, joita ovat muun muassa bakteerit, sienet, hiivat, arkit, levät ja alkueläimet.

Happamissa (pH 1-3) toimivia mikrobeja kutsutaan asidofiileiksi ja optimitoimintalämpötilan mukaan asidofiilit mikrobit jaetaan edelleen termofiileihin, korkeassa lämpötilassa (40-90 °C) toimivat, ja mesofiileihin, matalamassa lämpötilassa toimivat (10-40 °C).

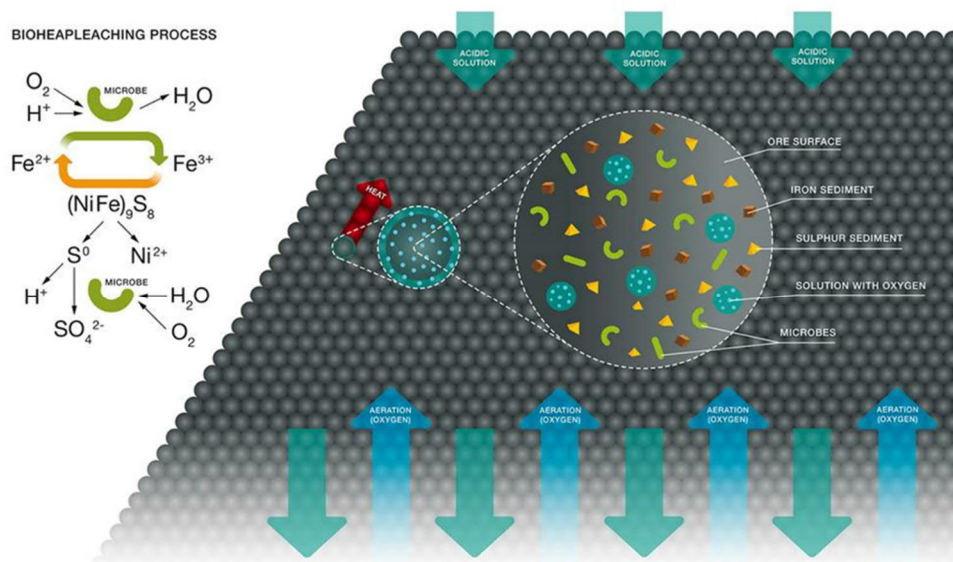
Taulukossa 2 on esitetty tärkeimmät rautaa ja rikkiä hapettavat mikrobit.

Taulukko 2. Tärkeimmät rautaa ja rikkiä hapettavat mikrobit (Anna-Kaisa Halinen, Heap Bioleaching of Low Grade Multimetal Sulphidic Ore in Boreal Conditions, Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology, Tampere University of Technology. Publ

Genus	Species	Oxidation Fe/S	Temperature	pH	Hetero-/autotroph	Reference
Bacteria						
Mesophiles						
<i>Acidithiobacillus</i>	<i>ferrooxidans</i>	Fe, S	10-37, 30-35*	1.3-4.5, 2.5*	A	Kelly and Wood 2000, Valdes et al. 2008
<i>Acidithiobacillus</i>	<i>thiooxidans</i>	S	10-37, 28-30*	0.5-5.5, 2.0-3.0*	A	Kelly and Wood 2000
<i>Acidithiobacillus</i>	<i>ferrivorans</i> **	Fe, S	4-37, 27-32*	1.9-3.4, 2.5*	A	Hallberg et al. 2010
<i>Leptospirillum</i>	<i>ferrooxidans</i>	Fe, S	<10-45, 30-37*	>1.1, 1.3-2.0*	A	Johnson 2001a
Thermophiles						
<i>Acidithiobacillus</i>	<i>caldis</i>	S	32-52, 45*	1.0-3.5, 2.0-2.5*	A	Hallberg et al. 1996, Kelly and Wood 2000
<i>Leptospirillum</i>	<i>ferriphilum</i>	Fe	30-45, 30-37*	1.4-1.8	A	Coram and Rawlings 2002
<i>Leptospirillum</i>	<i>thermoferrooxidans</i>	Fe	30-55, 45-50*	>1.3, 1.65-1.90*	A	Golovacheva et al. 1992, Johnson 2001
<i>Sulfobacillus</i>	<i>acidophilus</i>	Fe, S	45-50*	2.0*	A and H	Norris et al. 1996
<i>Sulfobacillus</i>	<i>thermosulfidooxidans</i>	Fe, S	28-60, 50*	1.9-3.0, 1.9-2.4*	A and H	Brandl 2001, Robbins 2000
Archaea						
<i>Acidianus</i>	<i>brierleyi</i>	Fe, S	45-75, 70*	1-6, 1.5-2*	A and H	Huber and Stetter 2001
<i>Ferropasma</i>	<i>acidiphilum</i>	Fe	15-45, 35*	1.3-2.2	A/ mixotroph	Golyshina et al. 2000
<i>Sulfolobus</i>	<i>acidocaldarius</i>	S	55-85, 70-75*	2-3*, 1-6	A and H	Brock et al. 1972, Chen et al. 2005
<i>Sulfolobus</i>	<i>metallicus</i>	Fe, S	50-75, 65*	1-4.5, 1.3-1.7*	A	Huber and Stetter 2001

*optimum, **psychrotolerant

Kuvassa 1 on esitetty havainnekuva mikrobien roolista liuotukseen.



Kuva 1. Havainnekuva raudan ja rikin mikrobiavusteisesta hapettamisesta.

Yleensä mikrobit sopeutuvat korkeisiin metallipitoisuuksiin, mutta tietyt alkuaineet ovat toksisia (myrkyllisiä) mikrobeille pitoisuuden ylittäessä olosuhteista riippuvan ylärajan. Mikrobitoimintaa inhiboivia tekijöitä on tutkittu laajasti ja Terrafamen prosessiliuoksia on

käytetty myös toksisuusarviointiin, mutta mitään selkeää häiritsevää tasoa metallipitoisuuksien suhteen ei ole löytynyt. Kasaliuotuksessa metallien konsentraatiot ovat tyypillisestä huomattavasti pienempiä kuin biologisissa sekoitusreaktoreissa käytetyt pitoisuudet.

Anioneista esimerkiksi nitraatin (NO_3^-), kloridin (Cl^-), fluoridin (F^-) on raportoitu suurissa pitoisuuksissa olevan haitallisia mikrobitoiminnalle. Terrafamen prosessiliuoksissa näitä anioneja on ainoastaan pienissä pitoisuuksissa. Myös sulfaatin (SO_4^{2-}) on raportoitu olevan haitallista, mutta näidenkin osalta Terrafamen bioliuotus toimii haitalliseksi tunnettuja pitoisuuksia alemmalla tasolla.

Mikrobien toiminnan kannalta tärkeitä ravinteita ovat mm. fosfori, typpi, hiili, kalium ja magnesium. Hiililähteenä toimii puhallusilman sisältämä hiilidioksidi ja fosforia, kaliumia ja magnesiumia on itse malmissa. Typpilähteenä toimii louhinnassa käytettävät räjähteet. Typen lisäystä on testattu myös koetoiminnan kautta lisäämällä kiertoliuokseen ammoniumsulfaattia, mutta oleellista muutosta ei liuotustuloksissa havaittu. Mikrobien ymppäämistä (inoculation) on myös toiminnan aikana kokeiltu, mutta ilmeisesti itse malmin ja prosessiliuosten kautta mikrobien siirtyminen on riittävän tehokasta.

Mikrobien lukumäärää ja lajistoa seurataan analysoinnin kautta ja toimintahistorian aikana on ollut useita kehitysprojekteja niin kansallisten kuin kansainvälisten toimijoiden kanssa. Kehitystyötä jatketaan myös Terrafamen toimesta.

3.9 Happotasapaino

Rikkihapolla säädetään kasteluliuoksen pH sopivaksi mikrobitoiminnalle siten, että kasoista ulostulevan prosessiliuoksen ominaisuudet ovat suotuisat liuotukselle. Samalla estetään kasteluliuoksen hapettumisesta aiheutuva raudan saostumisriski, joka heikentäisi kasteluletkujen toimintaa. Ulostulevan liuoksen pH, hapetuspotentialiaali ja lämpötila kuvaavat hyvin liuotuksen edistymistä.

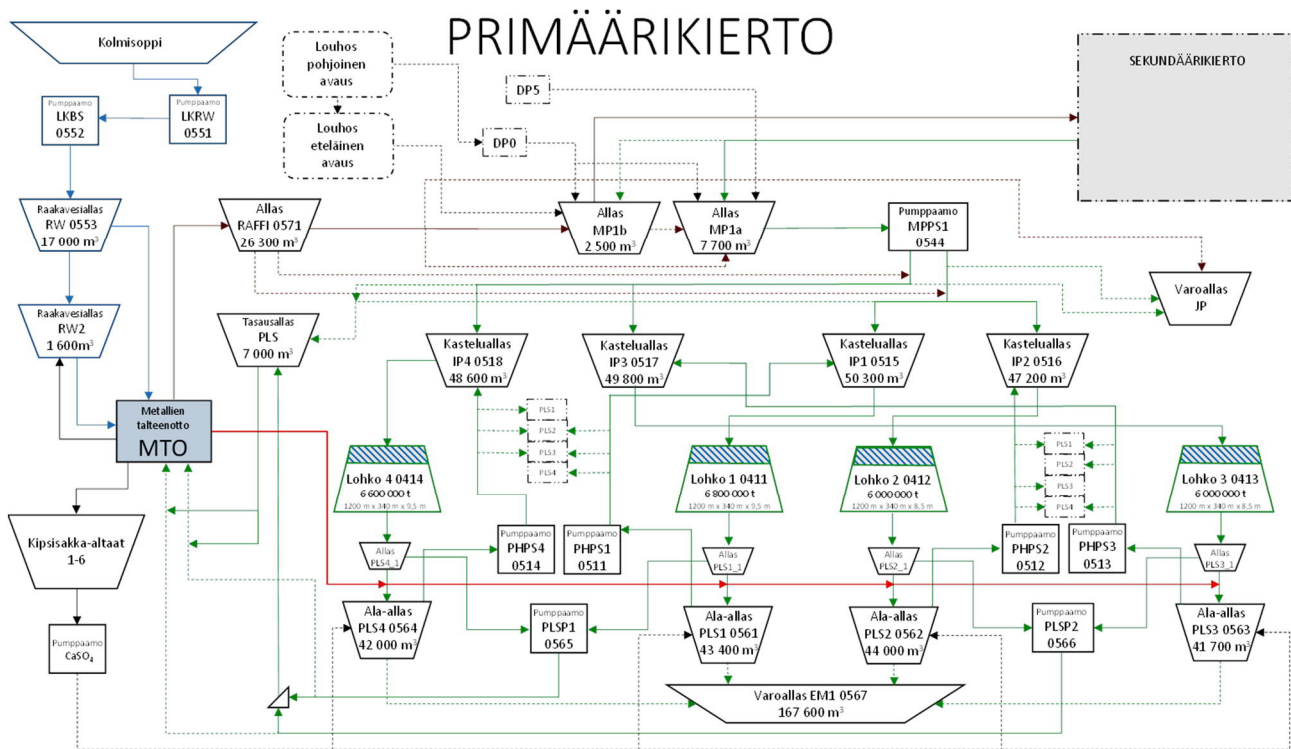
Liuotuksen alkuvaiheessa liukenee ensimmäisenä malmin sisältämä hienoaines sekä arvomineraaleja epäjalommat, happoa kuluttavat epäpuhtausmetallit. Hapon syöttöä on onnistuttu vuosien kuluessa pienentämään suhteellisesti ja Terrafamen aikana valtaosa mineraalien liukenemiseen tarvittavasta haposta syntyy kasassa rikin hapetuksesta ja raudan saostumisesta.

Prosessiliuoksen happamuustasolla on suuri merkitys mikrobitoiminnan tehokkuudelle, sillä esimerkiksi kolmiarvoisen raudan (Fe^{3+}) osuus kokonaisraudapitoisuudesta on edullisimmillaan, kun liuoksen pH taso on 2,0-3,0. Liian matala happopitoisuus hidastaa raudan hapettumista ja näin hidastaa myös sulfidien hapettumista.

Kasan alkuvaiheen happoa kuluttavaan ominaisuuteen on pyritty kehittämään ratkaisua koetoiminnalla syöttämällä happoa agglomeroituneen malmin joukkoon. Kyseinen toimintamalli ei kuitenkaan sovellu käytettävälle malmille, joten nykytiedon valossa kyseistä tekniikkaa ei ole tarkoitus käyttää tuotantoprosessissa.

3.10 Prosessiliuoksen hallinta

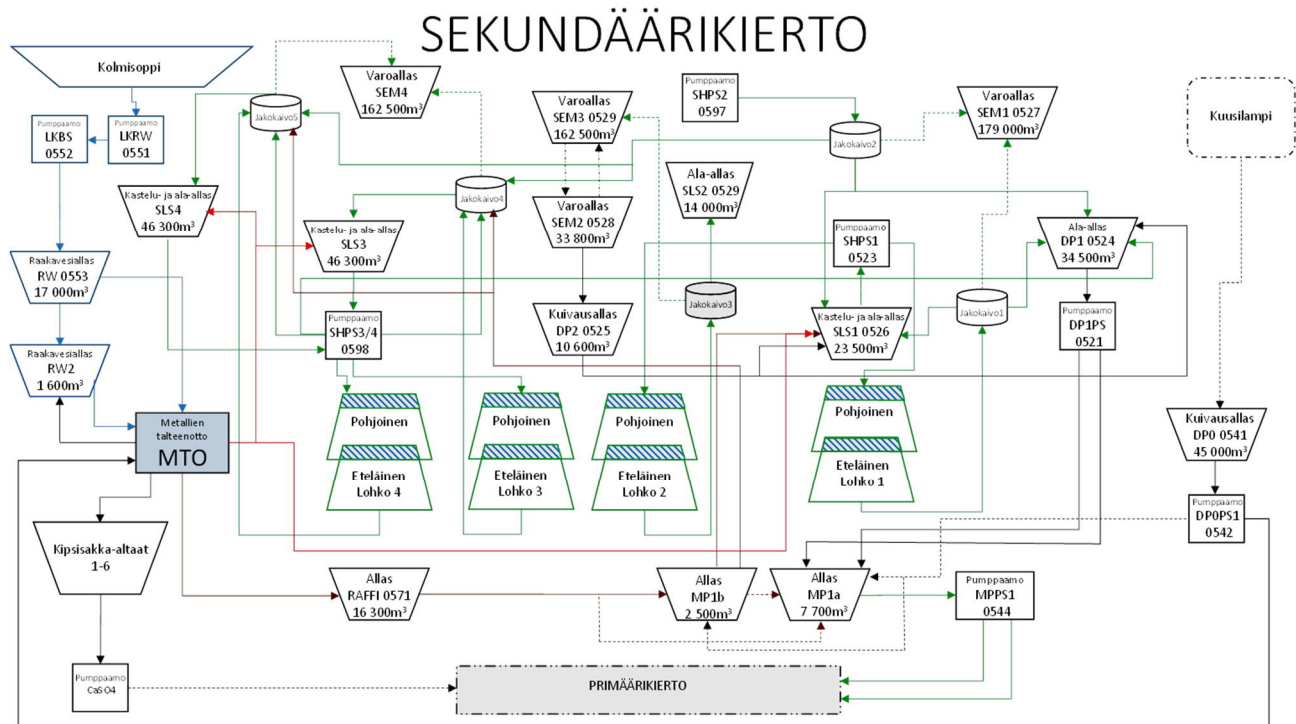
Primääriliuotuskierron prosessikaavio putkilinjoihin ja altaineen on esitetty kuvassa 2. Primäärikierto koostuu neljästä kastelualtaasta IP1 – IP4 (joista liuos virtaa painovoimaisesti lohkoille), neljästä ala-altaasta PLS1 – PLS4 (joihin kasoilta ulostuleva liuos valuu ylivuotona altaista PLS1_1 – PLS4_1) sekä varoaltaasta EM. Liuosta johdetaan metallien talteenottolaitokselle altaista PLS1_1 – PLS4_1 ennen ylivuotoa varsinaiselle ala-altaalle ja pH:n säätää rikkihapolla. PLS-altailla liuos kierrätetään pumpaamalla takaisin IP-altaille. Lisäkorvausliuosta IP-altaille pumpataan MP1a-altaasta, johon liuos tulee pääasiassa sekundäärikierrasta. Keskeisten putkilinjojen lisäksi kuvassa 2 on esitetty katkoviivoin muut olemassa olevat putkilinjat, joita voidaan hyödyntää tarvittaessa.



Kuva 2. Primääriliuotuskierron prosessikaavio putkilinjoihin ja altaineen.

Sekundääriliuotuskierron prosessikaavio putkilinjoihin ja altaineen on esitetty kuvassa 3. Metallien talteenottolaitokselta palautettava raffinaattiliuos johdetaan tällä hetkellä raffinaatin tasausaltaan sekä MP1b-altaan kautta SLS1-altaalle, joka toimii sekundääri 1- ja 2-lohkojen kastelualtaana sekä sekundääri 1 –lohkon ulostulevan liuoksen keruualtaana. Sekundääri 1 –lohkon varoaltaana toimii SEM1-allas. Sekundääri 2 –lohkolta ulostuleva liuos kerätään SLS2-altaaseen, josta se voidaan palauttaa joko SLS1-altaaseen tai johtaa sekundäärilohkojen 3 ja 4 kastelualtaisiin korvausliuokseksi. Sekundäärilohkon 2 varoaltaana toimii SEM3-allas. Sekundäärilohkon 3 kastelu- ja keruualtaana toimii SLS3-allas ja lohkon 4 kastelu- ja keruualtaana SLS4-allas. SLS1-altaan lisäksi raffinaattia on mahdollista johtaa myös SLS3- ja SLS4-altaille. SEM4-allas on sekundäärilohkojen 3 ja 4 varoallas. Kaikkien lohkojen ulostulevaa liuosta voidaan johtaa DP1-altaalle ja sitä kautta primäärikiertoon päin. Sekundäärin liuoskiertoa pyritään kuitenkin ajamaan siten, että raffinaatti johdetaan

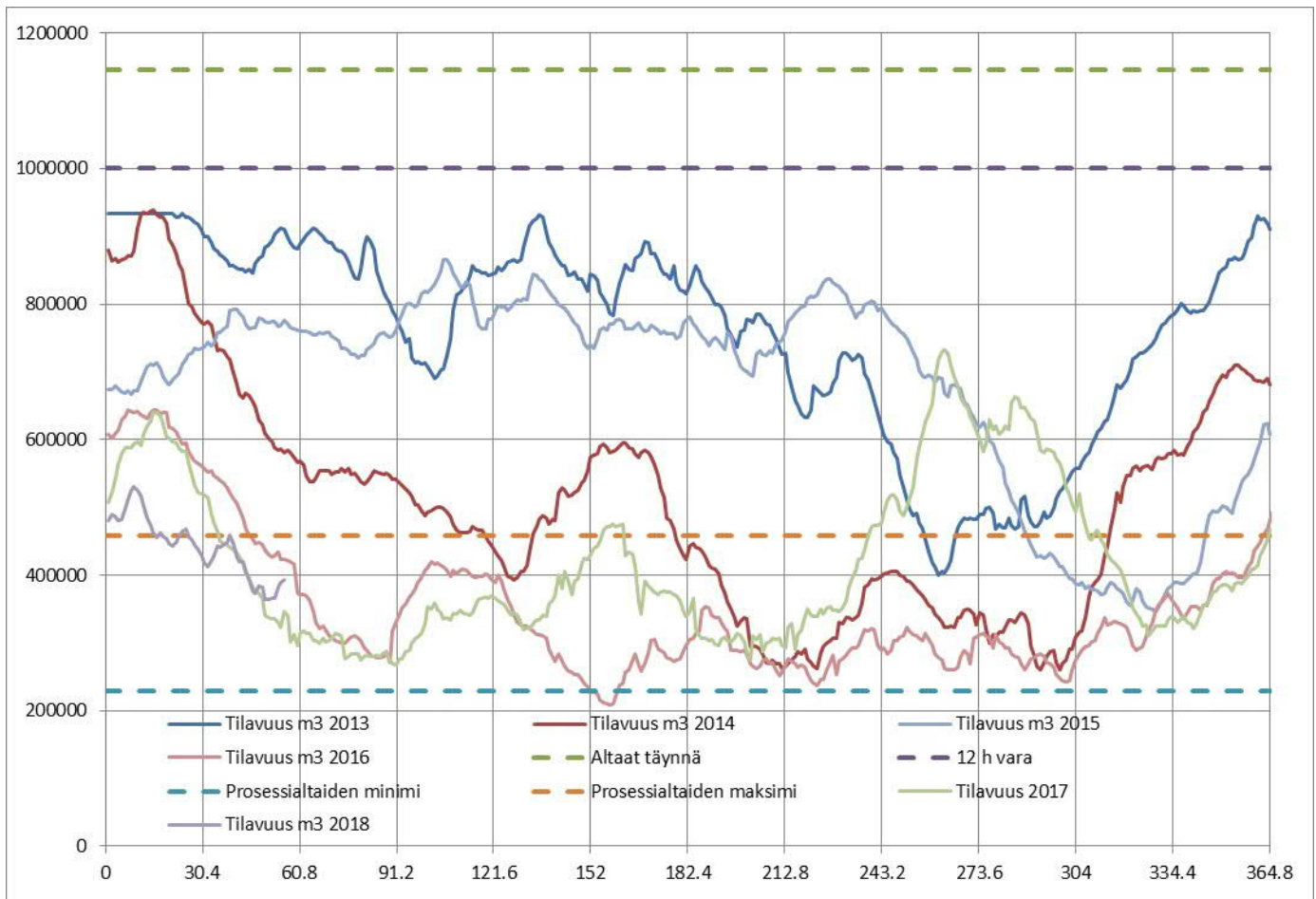
vanhimmalle lohkolle (tällä hetkellä sekundääri 1), liuos kierrätetään "sarjassa" sekundäärilohkojen läpi ja primäärikiertoon johdetaan pääasiassa uusimmalta sekundäärilohkolta (tällä hetkellä sekundääri 4) ulostulevaa liuosta.



Kuva 3. Sekundääriliuotuskierron prosessikaavio putkilinjoihin ja altaineen.

Metallien talteenottolaitokselta bioliuotukseen palautettava raffinaattiliuos voidaan johtaa sekä 1. vaiheen liuotukseen että 2. vaiheen liuotukseen. Bioliuotuksen ohjauksen kannalta molempien vaihtoehtojen mahdollisuus on tärkeää sekä prosessin toiminnan että mahdollisen häiriötilanteen vuoksi.

Toimintahistorian aikana on esiintynyt ongelmia bioliuotuksen inventaarion hallinnan suhteen poikkeuksellisissa olosuhteissa ja liuoskierrosta on jouduttu poistamaan ylimääräistä liuosta louhokseen. Kuvassa 4 on esitetty bioliuotuksen prosessiliuostilavuus altaissa vuosina 2013-2018. Poikkeustilanteita on aiheutunut tuotantokatkoksista esim. velkasaneerauksen ja konkurssin yhteydessä yhdistettynä poikkeuksellisiin vesisateisiin esimerkiksi joulukuussa 2013 sekä toukokuussa 2014.

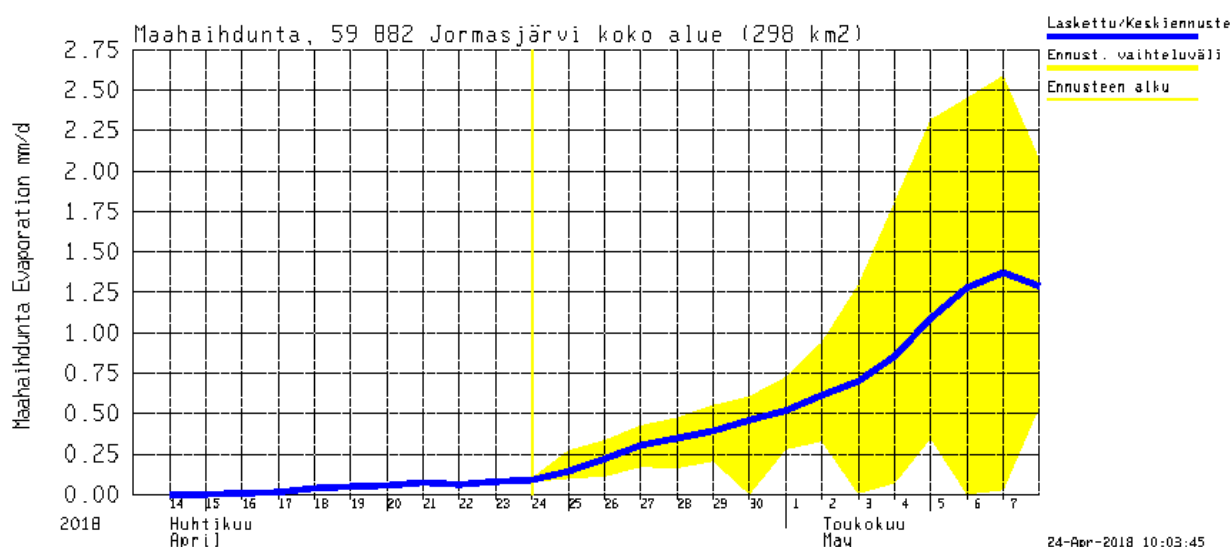


Kuva 4. Bioliuotuksen altaiden prosessiliuostilavuus 2013-2018.

Liuostilavuuden kehittymistä seurataan ja ennustetaan perustuen sääennustuksiin sekä mahdollisiin muutoksiin tuotannossa (kuva 4, kuva 6). Louhinnan aloittamisen jälkeen (9/2015) liuosinventarion tilanne on kehittynyt suotuisaan suuntaan ja bioliuotukseen on otettu maaliskuun aikana korvausvettä niin RO-laitoksen rejektistä kuin myös pumpaamalla lisävettä avolouhoksesta sekä kaivosalueen muista vesialtaista. Vuosina 2016-2017 otettiin näin liuoskiertoon noin neljä miljoonaa kuutiota vettä, lopulta saaden avolouhos käytännössä tyhjäksi vedestä vuoden 2017 loppuun mennessä. Avolouhoksessa oli vuoden 2015 lopussa noin 4,5 miljoonaa kuutiota vettä ja valtaosa tästä vesimäärästä palautettiin liuoskiertoon. Vuonna 2017 louhoksen tyhjennyksen nopeuttamiseksi johdettiin osa liuoksesta myös keskusvedenpuhdistamolle. Määrä oli noin 1,4 miljoonaa kuutiota vettä ja se painottui alkuvuoteen 2017 sekä loppuvuoteen 2017. Vuoden 2016 määrää ei voida ilmoittaa yhtä tarkasti, sillä tällöin käytössä olleilla kenttäpuhdistamoilla ei ollut syöttövirtausmittaria yksittäiselle ko. jakeelle. Vuosien 2016 ja 2017 sademäärien perusteella määrän voidaan olettaa olleen samaa luokkaa kuin vuonna 2017.

Liuostilavuuden kehittymiseen vaikuttaa voimakkaasti alueella luontaisesti tapahtuva haihdunta (maahaihdunta) sekä liuotuskasojen lämmönmuodostuksesta johtuva ns. lisähaihdunta. Tarkastelussa pyritään huomioimaan haihdunnan määrä mahdollisimman realistisella tasolla.

Terrafame ei mittaa itse maahaihdunnan määrää vaan seuraa Suomen Ympäristökeskuksen dataa (www.ymparisto.fi) erityisesti Jormasjärven alueelta (kuva 5). Bioliuotusalueella tapahtuvan haihdunnan laskennassa otetaan huomioon vedet, jotka ovat tulleet bioliuotusalueelle ja vedet, jotka ovat lähteneet bioliuotusalueelta. Näiden kautta saadaan laskettua kokonaishaihdunta bioliuotusalueella. Jos bioliuotusalueen haihdunta on isompi kuin Jormasjärven alueella mitattu haihdunta, katsotaan sen olevan ylimääräistä kasoilla tapahtuvaa haihduntaa.



Kuva 5. Maahaihdunta Jormasjärven pisteessä

Isoimpina virhetekijöinä voidaan pitää liuskiertoon pumpattavia nesteitä, joiden vaihtelu on erittäin suurta ja näiden tarkka arviointi on hankalaa.

Kasojen lisähaihdunnasta on vielä vähän dataa Terrafamen ajalta, jolloin kasojen lämpötilat ovat olleet huomattavasti korkeammat kuin edellisen toimijan aikana. Tämän vuoksi lisähaihdunnan luotettava arviointi runsassateisen ja vähäsateisen vuosien välillä on mahdotonta. On kuitenkin huomattava, että lisähaihdunnan määrä on kasvanut huomattavasti vuodesta 2016 vuoteen 2017. Vuonna 2016 lisähaihduntaa oli 830 000 m³ kun vastaavasti 2017 lisähaihdunnan määrä oli n. 3 000 000 m³.

Taulukko 3. Lisähaihdunta 2014-2017

Vuosi	Sadanta [mm]	Lisähaihdunta [m ³]
2014	799	832 442
2015	1 042	282 994
2016	695	830 355
2017	743	3 191 467

Jos lisähaihduntaa tarkastellaan vuosien 2015 ja 2016 perusteella voidaan havaita, että sadannan kasvu 50%:lla aiheutti lisähaihdunnan pienenemisen 65%:lla. On kuitenkin huomioitava, että kyseisenä ajankohtana kasat eivät olleet yhtä lämpimiä kuin ne ovat tällä hetkellä. Vuonna 2015 primäärillä kasasta ulos tulleen liuoksen ka. lämpötila oli 14°C, kun vastaavasti vuonna 2017 primäärillä kasasta ulos tulleen liuoksen ka. lämpötila oli n. 48°C. Näin ollen sateen vaikutus haihduntaan jää todennäköisesti pienemmäksi.

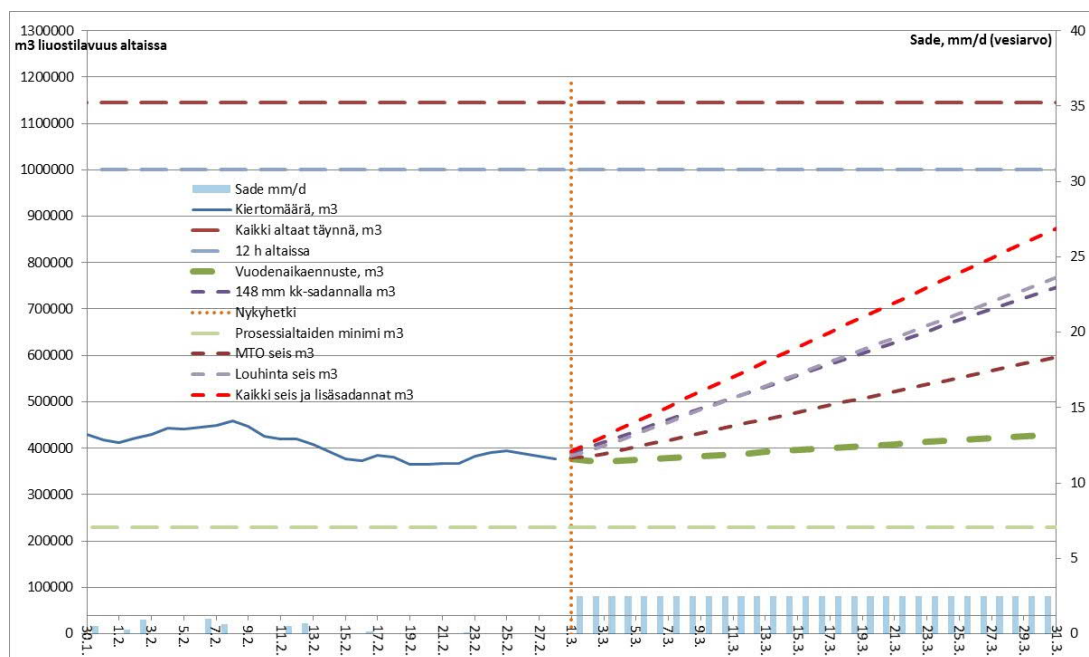
Bioliuotuksen kaikkien prosessialtaiden maksimi liuostilavuus on n. 505 000 m³. Prosessialtaiden täyttöaste normaalitilanteessa on n. 60% – 70%. Tällöin liuostilavuuden vaihteluväli prosessi altaissa on 303 000 m³ – 354 000 m³. Tällöin prosessialtaissa vapaana oleva tilavuus on 151 000 m³ – 202 000 m³. Tämän lisäksi käytössä ovat lisäksi varoaltaat, joiden yhteenlaskettu tilavuus on n. 640 000 m³. Käytännössä varotilavuutta on käytössä normaalitilanteessa 791 000 m³ – 842 000 m³.

Kun tarkastellaan vuotta 2017, tammikuuta lukuun ottamatta joka kuukausi bioliuotusalueella haihtui enemmän kuin satoi. Kuukauden haihdunta - sadanta vaihteluväli vuoden 2017 aikana oli -176 000 – 676 000 m³/kk. Tällöin normaalia suurempi vuosisadanta ei tule aiheuttamaan ongelmia liuosten hallinnan kannalta. Myös kuukausittainen vaihtelu pystytään hallitsemaan prosessi- ja varoaltaiden avulla.

Hetkellisen suuren sadannan osalta tilannetta voidaan tarkastella historiasta löytyvän suurimman yksittäisen sateen avulla: Vuoden 2014 alusta aloitetulla seurantajaksolla suurin yksittäisen päivän sadanta oli 42,5mm (13.5.2014). Nykyisellä bioliuotuksen valuma-alueella tuo tarkoittaa n. 247 000 m³ sadantaa. Kyseinen sadanta pystytään hallitsemaan prosessi- sekä varoaltaiden tilavuuden avulla. Sadannan koko vaikutus näkyy bioliuotusalueella 4 päivän viiveellä, joten suurikaan hetkellinen sade ei kohdistu allaskapasiteettiin suoraan sadannan aikana. Tällöin liuoksia voidaan ohjata oikeisiin kohteisiin tarpeen mukaan.

RO-laitoksen rejekti on täysimääräisesti johdettu raffinaatin joukossa liuoskiertoon maaliskuusta 2016 alkaen ilman poikkeuksia. Liuostase on kääntynyt lämpötilojen noususta johtuneen haihtuman kasvun sekä kaivostoiminnan aiheuttaman uuden malmin veden sitomisilmiön kautta siten hyväksi, ettei raudan saostuksen ylitettä ole jouduttu johtamaan keskusvedenpuhdistamolle. Myös sademäärät pysyivät normaalitasolla vuosina 2016 ja 2017. Keskusvedenpuhdistamoa suunniteltaessa otettiin huomioon mahdollisuus erittäin rankkasateiselle vuodelle, jolloin olisi riskienhallinnan kannalta järkevää johtaa raudan saostuksen ylitettä alitteen lisäksi sinne, jotta liuoskierron tilavuus saisi lisäedellytyksiä pysyä hallinnassa. Tätä vaihtoehtoa ei ole ollut tarkoituskaan ottaa käyttöön ennen kuin liuostilanne pakotetusti sitä vaatisi.

Altaat SEM1 ja SEM3 eli sekundäärilohkojen 1 ja 2 varoaltaat kunnostetaan kesällä 2018, kuten on edellytetty ympäristölupapäätöksessä 36/2014/1 lupamääräyksessä 102. Kainuun ELY-keskus on hyväksynyt kunnostussuunnitelmat ja riippumaton laadunvalvoja valvoo kunnostustyötä.



Kuva 6. Liuosinventaarion kehityksen ennustaminen alkukeväästä 2018.

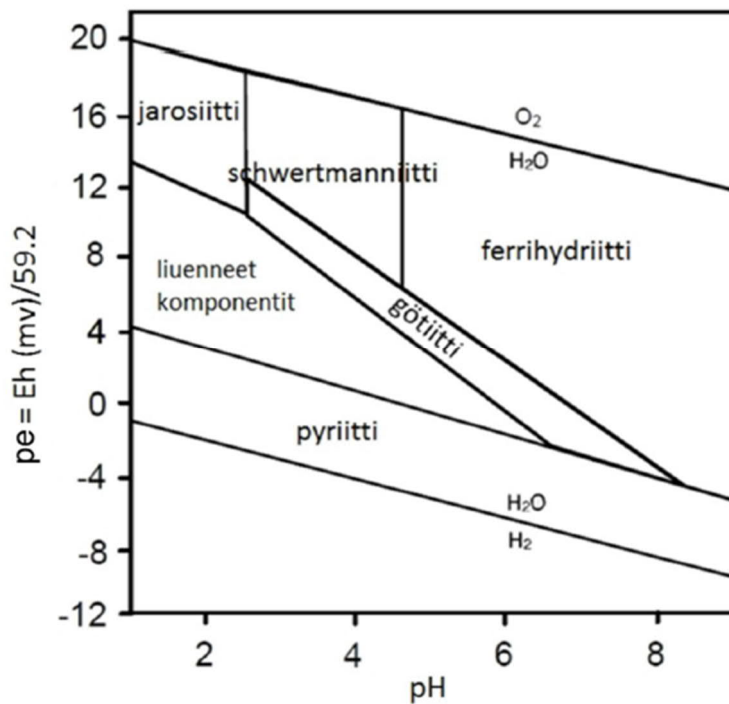
3.11 Sekundäärisaostumat

Liuotuksen edetessä rautasulfidimineraalit liukenevat ja mikrobin avustuksella liuoksen ferrorauta hapettuu ferri-muotoon. Rautasulfidin, lähinnä pyrroitiitin eli magneettikiisun, liukeneminen on edellytys arvometallien liukenemiselle, koska liukeneminen etenee sähkökemiallisen sarjan mukaisesti.

Liuotuskasojen sisällä on edulliset olosuhteet (lämpötila, hapetusaste ja pH kts. kuva 7) rautasuolojen saostumiselle. Liuotuksen edetessä mineraalipartikkelit rikkoontuvat ja haurastuvat rautasuolojen saman aikaisesti saostuessa.

Kokemuksen perusteella hyvin liuennut malmi sisältää paljon sekundäärisiä rautasaostumia, jotka aiheuttavat myös malmin olomuodon muuttumisen kovemmaksi sekä visuaalisesti havaitaan myös hapettumista tapahtuneen. Pääasialliset sekundäärisaostumat ovat:

Jarosiitti	$(K, Na, NH_4, H_3O) Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
Schwertmanniitti	$Fe_8O_8(OH)_6SO_4$
Götiitti	$FeOOH$
Kipsi	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$



Kuva 7. Rautasuolojen saostusalueet vakio­lämpötilassa.

Jarosiitti on sekundäärisaostumista pysyvin ja schwertmanniitti hajoaa ajan kuluessa götiitiksi.

Kuvassa 8 on esitetty poikkileikkaus liuotuskasalta, jossa nikkelin liukeneminen on edennyt suunnitellulle tasolle ja rautasuoloja on saostunut kasan sisälle. Liuotuskasojen kovettuminen saostumisten seurauksena on ollut yksi teknisistä haasteista kasojen purkamiselle lähinnä materiaalin irrottamisen vaikeutuesssa. Nykyisin käytössä oleva jysintätekniikka on helpottanut primäärikasojen purkuun liittyviä kapasiteettihaasteita.



Kuva 8. Hyvin liuennutta eli hapettunutta malmia sekundäärisaostumien värjätessä materiaalin keltaruskeaksi.

Taulukossa 4 on esitetty mineraloginen analyysi materiaalille ennen ja jälkeen liuotuksen. Tuloksista havaitaan, että pyrrotiitti sekä arvometalleja sisältävät sulfidit ovat liuenneet täysin ja vastaavasti sekundäärisiä rautasuoloja on saostunut.

Taulukko 4. Pilotin syötteen sekä loppuun liuotetun materiaalin mineralogiset analyysit.

Mineral	% before	% after
Pentlandite	0.57	0.07
Pyrrhotite	10.0	0.27
Pyrite	11.85	3.26
Chalcopyrite	0.45	0.14
Sphalerite	1.05	0.13
Goethite	-	3.34
Fe-sulfate	-	6.90
Jarosite	-	9.57
Gypsum	-	4.07
Sulfur	-	0.98
Graphite	9.8	7.72

Loppuunliuotetun malmin tutkimukseksi on tehty kairausnäytteenottoa sekundääriliuotusalueen vanhimmilta osilta. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että malmista on liuennut tavoitteena olevat arvometallit suunnitellun mukaisesti (kts. kappale 10).

Rautasuolojen saostumisen yhteydessä muodostuu rikkihappoa ja näin kasojen sisällä tapahtuvat saostumiset ovat osa liuotuksen happotasapainon hallintaa.

3.12 Huolenpito

On ensiarvoisen tärkeätä, että bioliuotusprosessin hallintaan kiinnitetään erityistä huomioita siten, että mahdollisimman suuri osuus liuotuksessa olevasta malmista toimii prosessin optimiolosuhteista. Tähän voidaan vaikuttaa huolenpidolla (housekeeping) eli laitteistojen ja prosessin kokonaisvaltaisella tarkkailulla ja korjaamisella. Koska bioliuotuksen toimintaan vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, korjaavat toimenpiteet on tehtävä siten, että toimintaan mahdollisesti negatiivisesti vaikuttavia muuttujia on samanaikaisesti korjattavana minimimäärä. Tämä tehdään muun muassa:

- Varmistamalla, että kasojen salaojarakenteet on rakennettu laatuvaatimusten mukaisesti
- Varmistamalla, että ilmastuputket on asennettu laatuvaatimusten mukaisesti
- Varmistamalla, että kasattavan malmin laatu on oikea
- Varmistamalla, että kastelujärjestelmä on rakennettu laatuvaatimusten mukaisesti
- Varmistamalla, että ilmastujärjestelmä toimii vaatimusten mukaisesti
- Varmistamalla, että kastelujärjestelmä toimii vaatimusten mukaisesti
- Varmistamalla, että prosessialueen ennakkohuolto toimet tehdään suunnitelmien mukaisesti
- Varmistamalla, että prosessialueella raportoidaan havainnoista ja poikkeamista
- Varmistamalla, että prosessialueen siisteys vastaa tavoitetilaa

4 TOIMINTAHISTORIA

Tämän selvityksen liitteessä 1 on taulukko 4, jossa on esitetty toimintahistorian aikana liuotukseen syötetyt malmimäärät sekä vastaavat metallisisällöt. Aluenumerointi liuotusalueilla muodostuu seuraavasti:

41 = Primääriliuotus

411 = Primääriliuotuksen 1. lohko

411_1 = Primääriliuotuksen 1. lohkon 1. kierros

42 = Sekundääriliuotus

421 = Sekundääriliuotuksen 1. lohko

423_2 = Sekundääriliuotuksen 3. lohkon 2. kerros

Taulukossa 6 on esitety tuotetut metallimäärät toimintahistorian aikana.

Taulukko 5. Tuotetut metallimäärät

Tuotetut metallimäärät				
	ton Ni	ton Cu	ton Co	ton Zn
2 009	735	0	8	3 133
2 010	10 381	0	113	25 461
2 011	16 087	0	428	32 418
2 012	12 686	39	427	25 805
2 013	8 662	57	292	17 418
2 014	9 602	0	235	19 387
2 015	2 877	0	106	4 835
2016	9 144	0	181	21 265
2017	20 865	72	438	47 205
SUM	91 039	168	2 228	196 927

Tuotantotaso nousi edellisen toimijan toiminta-aikaan vuoteen 2011 asti, jonka jälkeen toiminnassa oli erinäisiä ongelmia. Vuonna 2012 malmin louhinta jouduttiin keskeyttämään syksyllä ja lisäksi vuonna 2012 kasattujen uusien liuotuskasojen toiminta ei vastannut odotuksia. Kaivoksen vesitilanne huononi vuoden 2012 aikana ja liuotuskasoille jouduttiin pumppaamaan suunniteltua enemmän kasteluliuosta liuosinventaarion hallitsemiseksi.

Terrafamen aloituksesta lähtien syksyllä 2015 tuotanto on ollut nousujohteista. Vuonna 2017 tehtiin kaivosalueen tuotantoennätykset kaikissa tuotemetalleissa. Terrafamen tuotannon ylösajon oletetaan olevan lopussaan noin 2020, jolloin saavutettaneen yli 30 000 tonnin vuosittainen nikkeli tuotanto. Liuotusprosessia kehittämällä tuotantoa oletetaan voivan kasvattaa tästä vielä 37 000 tonniin nikkeliä vuodessa asti.

Normaali kasojen kastelumäärä on noin 5 l/m²/h vastaten näin 5 mm tunnissa ja 120 mm vuorokaudessa. Tämä kastelumäärä ylittää selkeästi normaalin ja runsaankin sateen mukana tulevan vesimäärän eikä sade sinällään juurikaan vaikuta kasojen toimintaan. Ylisuuri kastelumäärä sen sijaan lisää riskiä malmin vettymisestä vapaan huokostilavuuden täyttyessä ja tällöin myös ilman puhaltaminen kasoihin vaikeutuu. Vuoden 2012 aikana oli ongelmia ilmastupuhaltimien toiminnan kanssa ja oletettavasti liian suuret kastelumäärät yhdessä ilmenneiden puhallinongelmien vuoksi aiheuttivat etenkin primääriliuotuksen 1,2 ja 3 lohkojen toiminnan hiipumisen. Liuotusreaktioiden etenemiseksi tarvitaan hyvä kontakti prosessiliuoksen ja ilman välillä. Lisäksi etenkin pyrrotiitin liukeneminen tuottaa tehokkaan toiminnan tarvitsemää lämpöä.

Liutuskasojen toiminnan aktivoimiseksi tehtiin runsaasti eri toimenpiteitä ilman merkittäviä tuloksia. Vuoden 2013 aikana louhintaa voitiin jatkaa 6 kuukauden ajan, jolloin primääriliutukseen kasattiin lohko 4 ja puolet lohkoista 1. Jälkikäteen havaittiin, että vuoden 2013 aikana kasatun malmin agglomeraatin laadussa oli puutteita eli osassa kasattua malmia agglomeraatti oli liian kosteaa ja tuotannon seurannan kautta on pystytty analysoimaan, että tällä on ollut paikallisesti jopa 15-25 % vaikutus kokonaissaantiin. Koekaivauksin on myös todennettu, että kokonaisliutussaannissa voidaan päästä jopa 80-90% tasolle. Merkittävien oppi vuoden 2013 aikana kasatun malmin käyttäytymisestä on luonnollisesti ollut, että liutuosolosuhteet täytyy olla koko malmimäärälle mahdollisimman tasaiset ja tavoitteiden mukaisesti.

Terrafamen aikana rakennetuissa malmikasoissa on kiinnitetty laatukriteereihin erityistä huomiota ja edellä mainituilta tuotannon hiipumisilta on välttytty. Liutuksen rakennuslaatua seurataan jatkuvasti ja parhaita mahdollisia asennustapoja etsitään jatkuvan kehityksen menetelmin tuotannossa. Lisäksi tehdään mittavia koekairauksia, joilla selvitetään prosessin homogeneisuutta ja koetetaan parantaa kokonaissaantia primääriliutuksessa.

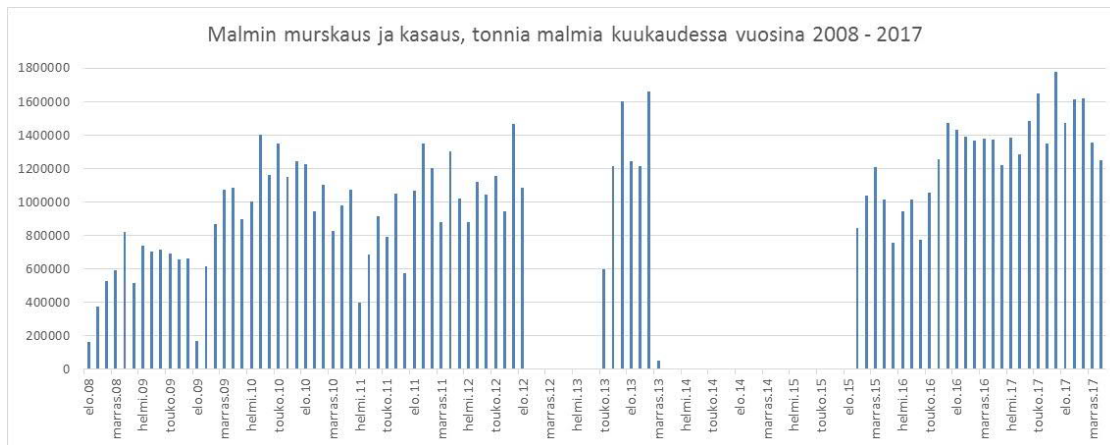
5 METALLITASEET

5.1 Yleistä

Kaivoksen edellisen toimijan toimintahistorian aikana louhittu malmimäärä vaihteli huomattavasti vuosittain. Kuvassa 9 on esitetty kuukausittaiset kasaussmäärät vuosina 2008-2017. Louhinta keskeytyi marraskuussa 2013 edellisen toiminnanharjoittajan velkasaneeraukseen hakeutumisen vuoksi. Terrafame käynnisti louhinnan uudelleen syyskuussa 2015. Vuonna 2017 Terrafame saavutti noin 17.5 miljoonan malmitonnin kasauksen, joka on hyvin lähellä pitkän aikavälin tuotannollista tavoitetta louhia 18 miljoonaa tonnia malmia vuodessa.

Metallien liukenemisnopeus on riippuvainen tuoreen malmin kasaussvauhdista. Edellisen toiminnanharjoittajan toimintahistorian aikana ei päästy niin sanottuun steady-state tilanteeseen johtuen muun muassa seuraavasta:

- Murskausprosessin ongelmat rajoittivat toiminnan alussa (2008-2010) kasauskapasiteettia ja lisäksi kasatun malmin fyysinen laatu ei ollut tavoitteiden mukainen murskausongelmista johtuen
- Primääriliutuskasojen purkaminen ja siirto sekundääriliutukseen alkoi ensimmäisen kerran vuonna 2011, jolloin purun kapasiteettiongelmat rajoittivat myös uuden malmin kasausta
- Metallitehtaalla oli käytettävyyso ongelmia vuonna 2011 kriittisten varaosien saatavuuden vuoksi
- Elokuussa 2012 jouduttiin louhinta keskeyttämään vesitilanteen vuoksi
- Vuonna 2013 louhintaa voitiin jatkaa ainoastaan 6 kuukauden ajan



Kuva 9. Kuukausittainen kasausmäärä 2008-2017, tonnia malmia/kk.

Terrafamen aloittaessa kaivostoimintansa vuonna 2015 primäärikasan purun kapasiteettiongelmat todettiin yhdeksi merkittävimmistä haasteista. Tämän prosessin kehitykseen on satsattu merkittävästi ja vuoden 2017 loppuun mennessä voidaan todeta suurimmat pullonkaulat prosessissa ratkotuiksi. Kasan purku ei ole enää rajoittanut malmituotantoa. Terrafame on myös saanut vesitilannetta parannettua merkittävästi toiminnan alkutaipaleestaan, mistä kertoo mm. seuraava: toiminnan alussa vesiä oli varastoituna alueella noin 11 miljoonaa kuutiota (31.12.2015), kun vuoden 2017 lopulla vesiä oli enää noin 3.3 miljoonaa kuutiota. 31.12.2015 Kuusilammen avolouhoksessa oli noin 4.5 miljoonaa kuutiota vesiä, kun 31.12.2017 louhos oli tyhjennetty vesistä ja koko kaivosta voitiin hyödyntää louhintaan.

Kuvassa 10 kuvataan PLS-liuoksen eli tehtaan syötön nikkeli ja sinkkipitoisuudet viime vuosien aikana. Kuva 10 on esitetty liitteessä 1.

Seuraavissa kappaleissa on arvioitu tärkeimpien metallien taseita vuosien 2016-2017 aikana. Mukana on esitetty taustatiedoksi vuosien 2015-2017 aikana louhitun malmin metallisisältö.

Taseiden määrittämisessä mahdollisia virhelähteitä ovat:

- Pitoisuuksien ja virtaamien keskiarvoistamisesta johtuvat virheet
- Eri metallien absoluuttisessa analyysitarkkuudessa on eroja
- Prosessin seurannan kannalta tärkeiden työkalujen kehitystyö on jatkunut toimintahistorian aikana
- Bioliuotuksessa malmin kokonaiskosteus muuttuu liuotussyklin aikana mineraalipartikkeleiden rakenteen muuttuessa. Tämä vaikuttaa liuotuksessa olevan malmin sitomaan liuosmäärään, joka on verrannollinen malmin kosteuden kautta

sitomaan metallimäärään. Kaiken kasoilla malmissa olevan kosteuden määrä on aina paras mahdollinen arvio.

- Raudan saostukseen ja loppuneutralointiin päätyvän jakeen määrä: jae oli noin 20 % raffinaatista tarkasteluajankohtana 2016-2017 ja toisaalta noin 33 % vuosina 2014-2015. Ero johtuu erityisesti tarpeesta poistaa liuosta enemmän edellisvuosina. Tämä tarve jälleen muodostui louhinnan keskeytyneisyydestä, kasojen iän kasvusta, joka vähensi lämmönkehitystä ja siten haihduntaa, sekä erittäin sateisesta vuodesta 2015. Alla kuvatessa kulkeutumista em. jakeisiin viitataan tarkastelujaksoon 2016-2017.

5.2 Nikkeli

Nikkeli on malmissa sekä puhtaana pentlandiittimineraalina sekä pyrroitiittimineraalin sisällä "epäpuhtautena". Metallitehtaalle syötetystä nikkelistä saostetaan metallien talteenottolaitoksella noin 90–95 %. Rikkivety päästöjen hallitsemiseksi ja nikkeli tuotteen laadun varmistamiseksi nikkelisaostuksen ylitteeseen jää nikkeliä 10–70 mg/l. Jäännösnikkelin määrä riippuu esimerkiksi liuosten lämpötilasta ja saostuksen pH-tasosta.

Lisäksi saostuksen jälkeisen neste/kiintoaine-erotuksen sakeuttimen ylitteessä nikkeliä kulkeutuu liukoisen nikkelin lisäksi kiintoainemuodossa sekä raffinaattiin, että raudan saostukseen. Raffinaatin mukana menevä nikkeli palaa liuotukseen. Raudan saostukseen jatkava kiintoaineena oleva nikkeli kulkeutuu raudan saostuksen alitteen mukana kipsisakka-altaalle. Liukoisessa muodossa olevasta nikkelistä liuotukseen palaa noin 2/3 ja loput 1/3 kulkeutuu loppuneutraloinnin alitteen mukana kipsisakka-altaalle. Kipsisakka-altaalle sijoitettujen sakkujen metallipitoisuuksia seurataan kaivoksen toiminnan velvoitetarkkailussa.

Taulukossa 7 on esitetty nikkelin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Verrattuna edelliseen selvitykseen liuotuksen toiminnasta, tuotantomäärät ovat kasvaneet merkittävästi.
- Metallitehtaan tase-eron suurin selittävä tekijä on raffinaattialtaalle kiintoaineena päätyvä nikkelisulfidi

Taulukko 7 on esitetty liitteessä 1.

5.3 Koboltti

Koboltti on malmissa pyriitin (rikkikiisu) sisällä "epäpuhtautena". Pyriitti liukenee myöhemmässä vaiheessa liuotussykliä, jolloin koboltin liuotussaanti on nikkelin saantia matalampi. Liuotettu koboltti kulkeutuu nikkelin kanssa samoihin paikkoihin prosessissa.

Taulukossa 8 on esitetty koboltin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Verrattuna edelliseen selvitykseen liuotuksen toiminnasta, tuotantomäärät ovat kasvaneet merkittävästi

Taulukko 8 on esitetty liitteessä 1.

5.4 Sinkki

Sinkki on malmissa omana mineraalina, sfaleriittina (sinkkivälke). Pieni osa sinkistä saostuu kuparipoistovaiheessa ja sitä kautta joko esineutralointisakan mukana sivukiven ja sekundääriliuotuskasan sekaan tai myytävään kuparituotteeseen. Sinkin saostuksen jälkeen sakeuttimen ylitteessä kulkeutuu sinkkiä esineutralointisakkaan ja liukoisessa muodossa oleva jäännössinkki saostuu myös pääosin esineutraloinnissa. Liuokseen jää esineutraloinnin jälkeen vielä 10–50 mg/l sinkkiä, joka saostuu nikkelituotteeseen. Sinkkisuodattimilta kulkeutuu pesuvesien mukana sinkkiä raffinaattiin.

Taulukossa 9 on esitetty sinkin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Verrattuna edelliseen selvitykseen liuotuksen toiminnasta, tuotantomäärät ovat kasvaneet merkittävästi
- Metallitehtaan tase-eron yksi selittävä tekijä on suodattimien pesuvesien mukana raffinaattiin kulkeutuva tuote kiinteässä muodossa

Taulukko 9 on esitetty liitteessä 1.

5.5 Kupari

Kupari on malmissa kalkopyriittinä joka liukenee viimeisenä arvometalleista vaatien korkeimman hapetustehon (Redox-potentiaali). Liuenutta kuparia saostuu myös tuoreemmilla liuotuskasoilla johtuen pelkistävästä mineraaleista. Kupari saostuu täysin metallien talteenottolaitoksen ensimmäisessä prosessivaiheessa ja kulkeutuu joko esineutralointisakan mukana sivukiven tai sekundäärikasan sekaan tai myytävään kuparituotteeseen riippuen tehtaan syötön kuparimäärästä ja valmistuvan kuparijakeen laadusta.

Taulukossa 10 on esitetty kuparin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Metallitehtaan poistama määrä vastaa hyvin liuenutta määrää
- Huomattava osa kuparista kulkeutuu sinkkituotteeseen. Metallista sinkkiä tuottavilla laitoksilla on poikkeuksetta käytössä erityinen prosessi kuparin poistamiseksi ja tuottamiseksi sivutuotteena.
- Terrafame valmisteli 2017 kuparituotteen laadun kehitystä pelkistämällä ferrirautaa syöteliuoksesta rikkidioksidilla, asentaen tätä varten kiinteän rikkidioksidin syöttölaitteiston. Uusilta kasoilta tehtaalte tuleva kuparimäärä on toistaiseksi jäänyt vielä maltilliseksi
- Taseessa on kuvattu saostetun kuparisakan kierrätys sekundäärikasalle. Tällä kuparilla pitäisi olla hyvät edellytykset liueta takaisin ajan myötä

Taulukko 10 on esitetty liitteessä 1.

5.6 Uraani

Uraani on malmissa omana helppoliukoisena mineraalinaan. Kiertoliuoksen uraanipitoisuus on ollut tasolla 10–40 mg/l. Osa uraanista kulkeutuu kipsisakka-altaalle sekä huomattavasti alkuvaihetta pienempi määrä nykyisin nikkelituotteeseen. Kipsisakka-altaan metallipitoisuudet ovat velvoitetarkkailun piirissä.

Taulukossa 11 on esitetty uraanin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Yksityiskohtaisempi uraanin liukenemisen seuranta liuotusprosessissa on vielä kehitteillä. Haasteena on muihin metalleihin verrattuna pienemmät pitoisuudet sekä bioliuotuksessa tapahtuvat eri prosessialueiden väliset liuosten ristiinpumppaukset.
- Uraanin pitoisuudet ovat erittäin pieniä sekä liuoksessa että kiintoainejakeissa. Näin virhemarginaali analyyseissä on suhteellisesti suurempi kuin suuremmilla metallijakeilla
- Noin 37 % metallitehtaalle syötetystä uraanista päätyy kipsisakka-altaalle, lopun palatessa raffinaatin mukana sekundäärrikasoille
- Sekundäärin liuosmäärän koko ja kasvu hillitsee uraanin pitoisuuden nousua liuoskierrossa, vaikka inventaario kasvaa
- Taseesta sivuten lupahakemuksessa on mainittu 150 tonnin / vuosi uraanivirtaama kasoilta kohti tehdasta. Tällä on haluttu selventää steady-state tilannetta. Kun uraania ei ole otettu talteen toiminnassa aiemmin, sen varasto liuoskierrossa lähtee hieman korkeammalta tasolta kuin mihin pitoisuus päätyy 5-10 vuoden talteenoton operoinnin jälkeen. Uraani kiertää prosessissa liuospitoisuuden rikastumatta, sillä sekundäärin liuosinventaarion kasvu sitoo lisääntyvän uraanimäärän kierrossa.

Taulukko 11 on esitetty liitteessä 1.

5.7 Rauta

Rautaa on malmissa useammassa eri mineraalissa eli pääosin pyrrotiitissä ja pyriitissä, mutta myös sfaleriitissä, pentlandiitissä ja kalkopyriitissä. Koko liuotus perustuu raudan hapettumiseen liuoksessa kolmiarvoiseksi. Rautaa liukenee huomattava määrä malmista, mutta pääosa saostuu kasan sisälle jaroisittina ja muina rautasuoloina. Metallitehtaan syötössä olevasta raudasta pieni osa saostuu nikkelituotteeseen ja noin 70 % palaa raffinaatin mukana takaisin liuotukseen. Rautaa poistuu sekä raudan saostuksessa että loppuneutraloinnissa kipsisakka-altaille.

Taulukossa 12 on esitetty raudan tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Liuokseen päätyy ainoastaan osa liuotuksessa reagoineesta raudasta. Taulukossa esitetty liuennut rauta edustaa rautaa, joka on päätynyt prosessiliuokseen.

Taulukko 12 on esitetty liitteessä 1.

5.8 Alumiini

Alumiini on malmissa erilaisissa silikaattimineraaleissa. Liuoksessa olevasta alumiinista noin 70 % palaa raffinaatin mukana takaisin liuotukseen ja liuotuksessa alumiinia saostuu myös kasan sisään. Alumiinia poistuu pääasiassa raudan saostuksessa kipsisakka-altaille mutta myös pienessä määrin loppuneutraloinnissa kipsisakka-altaille.

Taulukossa 13 on esitetty alumiinin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Alumiinin määrä liuoksessa kasvoi jonkin verran vuosina 2016-2017

Taulukko 13 on esitetty liitteessä 1.

5.9 Mangaani

Mangaani esiintyy malmissa pääosin omana mineraalinaan alabandiittina (MnS), joka liukenee liuotussyklin alussa. Mangaani poistuu liuoksesta loppuneutraloinnin kautta kipsisakka-altaille.

Taulukossa 14 on esitetty mangaanin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Mangaanin määrä liuoksessa kasvoi jonkin verran vuosina 2016-2017

Taulukko 14 on esitetty liitteessä 1.

5.10 Rikki

Rikkiä on malmissa eri mineraaleissa ja rikkiä hapettuu mikrobitoiminnon avustamana. Lisäksi liuotuksessa käytetään rikkihappoa pH:n säätämiseksi sekä metallien talteenottolaitoksella alkuainerikkiä rikkivedyn valmistuksessa. Rikkiä saostuu liuotuskasoille esimerkiksi erilaisina jaroitteina (kalium, natrium, hydronium), swertsmanniittina ja alumiinihydrosulfaatteina.

Rikkiä poistuu prosessista jätejakeissa (esineneutralointisakka ja kipsisakka-altaille menevät kiintoaine) sekä tuotteissa. Kalsium- ja natriumsulfaatit ovat liukoisia suoloja, joiden mukana rikkiä on kulkeutunut ylimääräisiin varastoituneisiin vesiin metallitehtaan RO-laitoksen hylkyvesien sekä kipsisakka-altaalta puhdistukseen pumpattava veden kautta. Vuoden 2016 maaliskuusta lähtien RO-laitoksen hylkyvesi on johdettu bioliuotuksen kiertoon pienentäen vesienhallinnan puolelle siirtyvää sulfaattimäärää. Hylkyveden rikkimäärä näkyy raffinaatin rikkimäärässä, koska sekoitus tapahtuu ennen analyysipistettä.

Taulukossa 15 on esitetty rikin tase sulfaattina laskettuna vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Sulfaatin määrä liuoksessa on kasvanut tarkasteluvuosina merkittävästi
- Metallitehtaalla käytetty rikki päättyy pitkälti tuotteisiin (metallisulfidit)

- Vesienhallinnan puolelle sulfaatit päätyvät liukoisine kalsium- ja natriumsulfaatteina

Taulukko 15 on esitetty liitteessä 1.

5.11 Natrium

Natriumia on jonkin verran silikaattimineraaleissa, mutta prosessiliuoksissa liukoisessa muodossa oleva natrium on peräisin metallien talteenottolaitoksella käytettävästä lipeästä (NaOH). Lipeää käytetään pH:n säätöön ja hönkäkaasujen pesemiseen. Hönkäkaasupesureiden lauhdevedet/pesuliukset hyödynnetään talteenotto-prosessissa korvaamaan sekä rikkivedyn että tuorelipeän käyttöä. Suuri osa (noin 60 %) natriumista kulkeutuu raffinaatin mukana liuotukseen, jossa natrium saostuu jarosiittina tasapainopitoisuuteen, joka vaihtelee liuosten lämpötilan ja happamuuden mukaan. Natriumia ei kerry liuotuspiiriin vaan pitoisuudet pysyvät tasaisina jarosiitin saostuessa. Inventaarion kasvu syntyy sekundäärin tilavuuden kasvusta sekä raffinaatin natriumpitoisuuden noususta.

Natriumia kulkeutuu myös metallitehtaan RO-laitoksen hylkyvesien sekä kipsisakka-altaalta puhdistukseen pumpattava veden kautta myös varastoituneisiin vesiin. Vuoden 2016 maaliskuusta lähtien RO-laitoksen hylkyvesi on johdettu bioliuotukseen. Hylkyveden natriummäärä näkyy raffinaatin natriummäärässä, koska sekoitus tapahtuu ennen analyysipistettä.

Taulukossa 16 on esitetty natriumin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Metallitehtaalla lisätty natrium on poistunut lähes täysin bioliuotuksessa, noin 80 %:sti
- Vain raudan saostukseen ja loppuneutralointiin johdettu osuus natriumista päätyy alitteiden mukana kipsisakka-altaille. Voidaan ajatella noin 95 % raffinaattiin johdetusta natriumista saostuneen kasoilla jarosiittina $[100 - (1655 / 37572) * 100] \%$

Taulukko 16 on esitetty liitteessä 1.

5.12 Magnesium

Malmi sisältää magnesiumia eri silikaattimineraaleissa ja sitä päätyy prosessiliuokseen näiden mineraalien liuutessa.

Taulukossa 17 on esitetty magnesiumin tase vuosina 2016-2017. Tärkeimpiä huomioita ovat:

- Magnesiumin inventaario liuoskierrossa on kasvanut tarkasteluajavälinä
- Virhelähteet taseessa liittyvät virtaamien ja analyysien epätarkkuuksiin

Taulukko 17 on esitetty liitteessä 1.

5.13 Harvinaiset metallit

Liuoskierrossa harvinaisia metalleja esiintyy vaihtelevasti. Pitoisuudet vaihtelevat kasan eliniän mukaan 0 - n. 40 mg/l. Selvästi eniten esiintyy Yttriumia n. 30 mg/l, Neodyymiä ja Ceriumia n. 6 mg/l, muita vähemmän.

Kasan eliniän mukainen vaihtelu pitoisuuksissa vaikuttaa suuresti metallitehtaan sakkoihin päätyvään määrään.

6 TUOTELAADUT

Sulfidituotteiden tuotelaatujen tyypilliset vaihteluvälit on kuvattu taulukoissa 18-20, jotka on esitetty liitteessä 1. Taulukossa 21 esitetään esineutralointisakan tyypillinen koostumus.

Taulukko 6. Esineutralointisakan tyypillinen koostumus

Aine	Pitoisuus	yksikkö
Alumiini (Al)	0,1 - 0,25	%
Kalsium (Ca)	20-25	%
Kadmium (Cd)	<0,002	%
Koboltti (Co)	<0,003	%
Kupari (Cu)	<0,005	%
Rauta Fe	0,1-0,6	%
Magneesium (Mg)	0,1-0,3	%
Mangaani (Mn)	0,05-0,1	%
Natrium (Na)	0,03-0,07	%
Nikkeli (Ni)	0,01-0,05	%
Sinkki (Zn)	0,4-1,0	%

7 NYKYTILANNE

Terrafame Oy käynnisti uuden malmin louhinnan syyskuussa 2015 ja myös primäärimalmin purku jatkui syyskuussa. Kaivostoiminta on ollut käynnissä sittemmin ja vuoden 2017 loppuun mennessä oli kasattu noin 36 miljoonaa tonnia. Vuoden 2017 lopulla kasattiin primääriliuotuksen 3. lohkolle neljättä kierrosta (413_4) ja sekundääriliuotuksen 3. lohkon ensimmäistä kerrosta (423_1).

Uuden malmin liukenemisen käynnistyminen on ollut ennusteiden vaihteluvälissä. Liuoskierron lämpötila on noussut ja haihtuman kasvu sekä uuden malmin sitoma vesimäärä ovat mahdollistaneet korvausvesien johtamista liuoskiertoon merkittävästi aiempaa enemmän. Vuosi 2017 oli ensimmäinen vuosi kaivosalueella, jolloin liuoskiertoon satoi vähemmän vettä kuin sieltä haihtui. Koko kaivosalueella, sisältäen mm. louhoksen ja vesienkäsittelyaltaat, sadanta oli suurempaa kuin haihdunta luonnonmukaisesti.

Terrafamen tuotantobudjetti on perustunut 70 %:n nikkelin kokonaisliuotussaantiin sekundääriliuotusvaiheen jälkeen, jonka odotetaan kehittyvän kohti 80 %:a seuraavan viiden vuoden aikana.

70-80 % kokonaisliuotussaanti on tyypillinen sulfidisille kasaliuotuksille (Petersen 2015, Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview, Hydrometallurgy 165 (2015), 206-212). Paikallisesti saannit vaihtelevat ja kasojen aktiivisin osuus päättyy korkeampiin saanteihin. Käytännössä monikerroksisessa kasassa muodostuu vyöhykkeitä, joihin reagenssien (Terrafamen tapauksessa etenkin ilman) kulkeutuminen on vähäisempää kuin aktiiviseen osuuteen. Nämä varjovyöhykkeet tai sulkeumat pitävät kokonaisliuotussaannin matalampana kuin teoreettisesti saavutettava maksimi. Sulkeumiin väävä liukenematon nikkeli sekä muut metallit esiintyvät samoissa mineraaleissa kuin malmissa. Poikkeuksen tähän tekee kupari, joka saostuu muita metalleja herkemmin takaisin kasaan kovelliittina (CuS), jota ei itsessään esiinny malmissa. Aktiivisiin vyöhykkeisiin jäävä nikkeli esiintyy pyriitissä, jossa on malmin nikkelistä noin 5 %, sekä paikallisissa sulkeumissa, joita voi aiheutua rautasaostumien ja elementtirikin estäen reagenssien kulku malmin pinnoille.

Tärkein kehitystavoite Terrafamen matkalla kohti suurempaa kokonaisliuotussaantia on vähentää varjovyöhykkeiden (sulkeumien) osuutta liuotuskasoissa sekä primäärillä että sekundäärillä.

Terrafamen tavoitteet sekä primääriliuotuksen että sekundääriliuotuksen jälkeisille saanneille perustuvat kokomukseen kaivoksen liuotuksen toiminnasta ja konservatiivisiin odotuksiin toiminnan kehittymisestä lähitulevaisuudessa. Historiallisesti koko kaivostoiminnan aikana kaikki primääriliuotuskasat, joissa ei tapahtunut selviä yksittäisiä ongelmia, päätyivät 35 – 50 % liuotussaantiin (nikkelin osalta) siinä ajassa, minkä kasat olisivat olleet primääriliuotuksessa kaivostoiminnan edetessä täydellä kapasiteetilla. Näin tämä vaihteluväli otettiin luontaisesti Terrafamen tavoiteväliksi, jota pyritään nostamaan, kun prosessin kinetiikkaa saadaan kehitettyä. Viides primääriliuotuskasa nostaa tavoiteväliä noin 5 prosenttiyksiköllä sinkin ja nikkelin osalta. Kuparin ja koboltin osalta viides primääriliuotuskasa tulee olemaan positiivinen vaikutukseltaan, mutta saantien oletetaan pysyvän maltillisina lähitulevaisuudessa. Kaikki

Terrafamen aikana kasatut primääriliuotuskasat, jotka ovat päässeet elinkaarensa loppuun primääriliuotusvaiheessa, ovat päässeet tavoitevälille saanneissaan pois lukien primäärin 3. lohkon kolmas kierros, joka päättyi noin 60 % nikkeli-liuotussaantiin ja 64 % sinkki-liuotussaantiin eli ylitti tavoitevälin. Sinkin ja nikkelin liuotussaannit ovat samankaltaisia sinkin ollen aina hieman suurempi.

8 TOIMINNAN PARANTAMINEN

Toimintahistorian aikana on keskitytty jatkuvaan parantamiseen.

Terrafame on aloittanut uusien kasojen osalta selvitystyön tavoitteena löytää syitä vaihteleviin tuloksiin ja sitä kautta kehittämään liuotusprosessia. Työssä tärkeänä osana ovat koekairaukset ja kaivuut kasoilla sekä prosessin käynnissä ollessa että primääriliuotusvaiheen päätteeksi. Liuotusprosessin kehittämiseksi seuraavia menetelmiä nähdään lupaavimpina askeleina:

- Malmin mineralogian seuranta on parannettu ja mikäli löydetään selviä korrelaatioita, voidaan viedä louhokselle asti reseptivaatimuksia malmin pitoisuuksista
- Uusia agglomeraatin laatumittareita on jatkuvasti kehitetty ja edelleen kehitetään ymmärrystä tehdä optimaaliset olosuhteet sekä liuokselle että ilmalle kulkea kasoissa
- Primääriliuotuskasojen ilmastusputkien asemointia kasassa on tutkittu ja tutkintaa jatketaan lähitulevaisuudessa mahdollisimman tasaisen ilman tuonnin varmistamiseksi kasojen kaikkiin kolkkiin
- Osaamisen kehittämiseen on panostettu rekrytoinnein, kurssituksin sekä ulkopuolisia asiantuntijoita hyödyksi käyttäen
- Seurannassa on kahdelta puolelta primääriliuotusta syötettävän ilman vaikutus liuotusprosessiin. Alustavat tulokset ovat lupaavia ja kokeilua laajennetaan lisätyin ilmamäärin
- Menetelmiä ylläpitää tasaisempaa kastelua halliten kipsin saostumisilmiötä tutkitaan ja tullaan kokeilemaan vuonna 2018
- Sekundääriliuotuksen optimoiminen hakemalla tehokkainta mahdollista ratkaisua sekä taloudellisin että prosessiedellytyksin. Ilmastuksen määrää, kasattavan kerroksen korkoa sekä kasausjärjestystä tullaan kehittämään.
- Primäärilentä laajentamista suunnitellaan liuotusajan pidentämiseksi ja näin noin 5 % parannuksiksi primääriliuotusvaiheen tavoiteikkunan nostamiseksi nykyisestä 35-50 % välille 40 – 55 %. Primääriliuotuskentän laajennus ei tule vaikuttamaan tehtaalte otettavaan syöttövirtausmäärään mutta liuotuksen lisääntyessä pitoisuudet tulevat kasvamaan.

9 TUOTANTOTAVOITTEET

Terrafamen lupahakemuksessakin esitetyt metallituotantotasot ovat

- 35 000 ... 37 000 ton Ni
- 66 000 ... 80 000 ton Zn
- 1500 ton Co
- 500 ... 1500 ton Cu
- 150 ... 250 ton U (puolituote) vuodessa.

Kaivostoiminnan tavoite on louhia 18 miljoonaa tonnia malmia vuodessa pitoisuuksilla

- 0.25...0.27 % Ni
- 0.52...0.56 % Zn
- 0.02 % Co
- 0.13...0.15 % Cu ja
- 15...20 mg/kg U.

Taulukko 22 esittää malmin pitoisuuksien alarajoilla tuotantoarviot ja taulukko 23 malmin pitoisuuden ylärajoilla. Taulukot on esitetty liitteessä 1.

Terrafamen vuosituotantotavoitteista on tehtävä seuraavat huomiot:

- Nikkelin ja sinkin liukeneminen tunnetaan metalleista tarkimmin
- Kuparin saannot oletetaan pysyvän maltillisina lähitulevaisuudessa. On mahdollista, että pitkällä tulevaisuudessa (+5a) tuotantomäärät kasvavat saannin kasvaessa
- Uraanin tuotantomäärät on laskettu taulukoihin 22 ja 23 metallisena, ne vastaavat aiemmin mainittuja puolituotemääriä. Uraania on uraanipuolituotteessa noin 75 %, joten esimerkiksi 188 tonnia U vastaa noin 250 tonnia uraanipuolituotetta.
- Liuoskierron inventaario kasvaa sekundäärille tulevan uuden (primääriliuotusvaiheen läpikäyneen) malmin mukana. 2 % on arvio kasvavan määrän vaikutuksesta suhteessa liukenevaan määrään. Ilmiö on tyypillinen kasaliuotukselle.
- Metallitehtaan saannissa oletetaan kehitystä tulevaisuudessa verrattuna tässä dokumentissa mainittuihin taseisiin vuosilta 2016-2017. Lisäksi raffinaatissa liuoskiertoon palaava nestemäinen metalliarvo ei ole saantitappiota taulukoiden 22 ja 23 tarkastelussa
- Taulukot 22 ja 23 antavat yksinkertaisen kuvan tuotantomääristä. Malmin pitoisuudet, tonnimäärät, saannit ja muut tekijät voivat vaihdella vuosittain. Vaihteluväli

lupahakemuksessa mainittuihin tuotantoväleihin perustuu hienostuneempaan tuotantomalliin kuin nämät taulukot.

- Edelleen taulukot kuvaavat keskimääräisiä vuosittaisia pitoisuuksia arvioin virtaamista. Seisokit metallitehtaalla hetkittäisesti rikastuttavat liuoskierron pitoisuuksia, kun liuotus jatkuu poistomäärän vähentyessä.

10 TULOKSIA LIUOTUKSEN LOPUN SAAVUTTANEESTA MATERIAALISTA

Vuonna 2017 Terrafame otti näytteitä ensimmäistä kertaa noin kuusi vuotta sekundääriliuotuksessa olleesta materiaalista. Tämän materiaalia on vanhinta kaivosalueelta liuotuksessa ollutta malmia. Kairauksia tehtiin 11 kpl ja näytteitä otettiin muutaman metrin välein. Vanhimmin kasan kairareikien malmin metalleista oli liuennut nikkelistä 79 %, sinkistä 80 %, kuparista 45 %, koboltista 53 % ja uraanista 38 %. Nämä tulokset antavat lupausta siitä, että Terrafamen liuotussaannin suunnitelmat ovat nikkelin, sinkin ja uraanin osalta varsin saavutettavia ja kuparin ja koboltin suhteen on huomattavasti mahdollisuuksia kasvattaa tuotantomääriä pitkällä tulevaisuudessa.

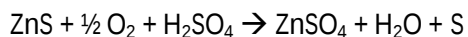
11 ESNE-SAKAN HYÖDYNTÄMINEN SEKUNDÄÄRILIUOTUKSESSA

Tehtaalle tuotettava esineutralointisakka (EsNe-sakka) on tarkoitus jatkossa syöttää sekundäärilohkojen sisälle. Tällä kierrätyksellä on tarkoituksena palauttaa EsNe-sakan mukaan päätyvät metallit takaisin liuotukseen ja sitä kautta talteenottaa metallit ja parantaa metallien, etenkin sinkin, kokonaissaantia.

Sinkkiä päätyi vuosina 2016-2017 EsNe-sakkaan noin 1 888 tonnia (taulukko 8) tai 2.4 % tehtaalle syötetyssä PLS-liuoksessa olleesta sinkistä. Sinkkiä oli keskimäärin noin 1 % EsNe-sakassa, jota tuotettiin noin 190 000 tonnia vuosina 2016-2017. EsNe-sakkaan sinkki päätyy kahdella mekanismilla: Toisaalta sinkin saostuksen ylitteeseen jää sekä rikkivetyä että sinkkiä liuokseen. Kun esineutraloinnissa nostetaan pH:ta kalkkikivellä, rikkivety alkaa reagoida metallien kanssa, saostaen mm. sinkkiä sinkkisulfidina. Tällainen ydinkiteetön sinkin saostumisilmiö tekee hienojakoista sinkkisulfidia. Toisaalta pieni osa sinkin saostuksessa saostetusta sinkkisulfidista on hienojakoista ja kulkeutuu sakeuttimen ylitteeseen valtaosan sakasta päätyessä sakeuttimen alitteen kautta suodatukseen ja sieltä tuotteeksi. Ylitteeseen kulkeutuva sinkkisulfidi on tyypillisesti hyvin hienojakoista. Hienojakoisella sakalla liukeneminen on huomattavasti herkempää kuin karkealla sakalla. EsNe-sakan sinkin on havaittu liukenevan sekoitettaessa laboratoriossa ilman pakotettua ilman lisäystä (tai hapon

lisäystä) eli hyvin pienellä kontaktilla ilmaan. Tämä antaa olettaa, että sinkki olisi suhteellisen helppoa ottaa talteen sekundääriliuotusvaiheessa.

Sinkki esiintyy sinkkisulfidina malmissa. Sen liuotusreaktio on:

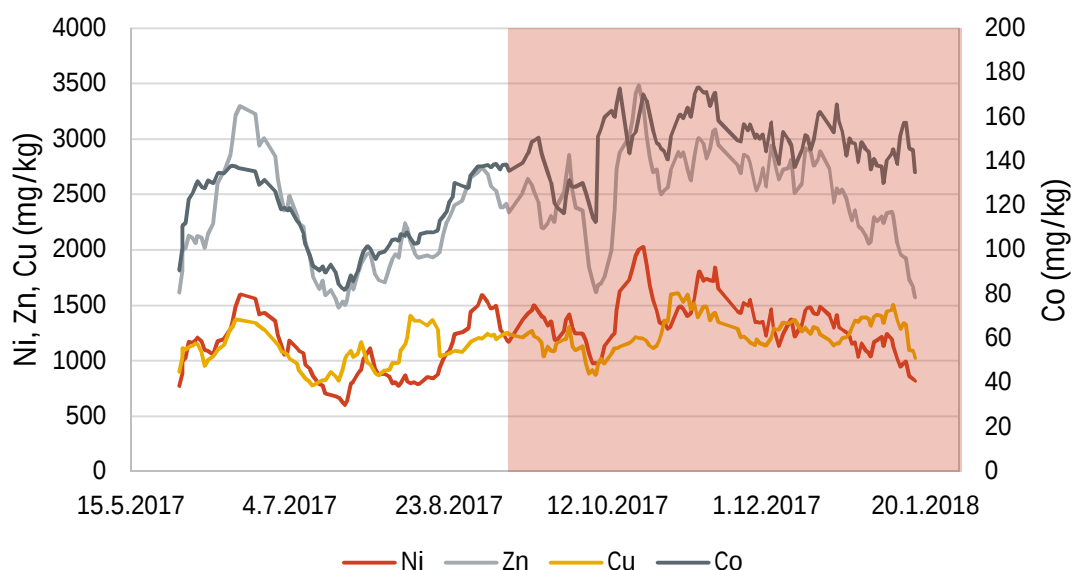


Täysin teoreettisesti sinkkisulfiditonni kuluttaa happotonnin. Näin 1 888 tonnia sinkkiä kuluttaisi teoreettisesti noin 2 830 tonnia happoa. Vuosina 2016-2017 syötettiin noin 87 000 tonnia happoa vuodessa sekundäärille. Teoreettisesti tästä määrästä EsNe-sakan sinkin tarvitsema määrä olisi noin 3 %. Syötetyn hapon määrä ei kuitenkaan ole sama kuin kasassa reagoivan hapon määrä. Esimerkiksi natriumia saostui jarosiittina kasaan noin 32 053 tonnia vuosina 2016-2017 (taulukko 15). Natriumjarosiitin reaktioyhtälön mukaisesti samalla syntyi 410 000 tonnia happoa. Toisin sanoen syötetty hapon määrä oli alle 20 % sekundäärillä reagoineesta haposta. Lisäksi osa raudasta on saostunut götiittinä, mikä sekin on tuottanut happoa. Edelleen elementtirikistä osa hapettuu hapoksi. Em kursiivilause tähän? Olettaen vain syötetty happo ja jarosiitin muodostama happo, EsNe-sakan sinkin tarvitsema määrä on luokkaa puoli prosenttia kaikesta haposta eikä sillä ole käytännön vaikutusta kasan toimintaan.

Edellä mainitun teoreettisen tarkastelun lisäksi on suoritettu koetoimintana EsNe sakan sijoittamista sekundäärikalalle. Tällä pyritään määrittämään vaikutuksia käytännön tasolla.

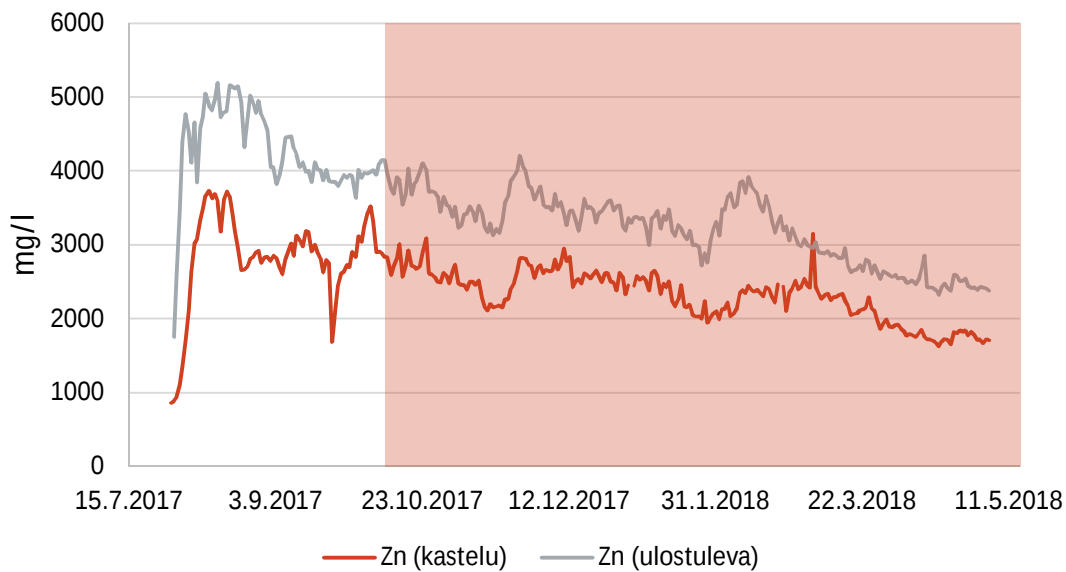
Kaivoksella tutkittiin koeluonteisesti EsNe-sakan palauttamista tuotantoprosessiin ajamalla sitä primääriliuotusalueen jyrskentälle ja siitä purkumalmin mukana liuotettavaksi sekundäärilohkolla 3. Sakan ajo aloitettiin 15.9.2017, jolloin lohkoa oli kasattu lähes puolet.

Sekundääriliuotusalueelle kasattavasta malmista otetaan päivittäin näytteitä osana yhtiön normaalia tuotannonseurantaa. Malmista tutkitaan mm. kosteus sekä metallipitoisuudet, jotta metallien liukenemista primääri- ja sittemmin sekundäärialueella voidaan seurata. Malmin metallipitoisuuksissa on vaihtelevuutta sekä luontaisten pitoisuuksien että primääriliuotuslohkojen vaihtelevan liuotustehokkuuden seurauksena (Kuva 11). EsNe-sakan liukenemisen seuraamiseksi kasalta otetaan malminäytteitä tasaisin väliajoin myös aktiivisen liuotusvaiheen aikana ja verrataan niitä EsNe-sakan mineraalikoostumukseen ennen kasaamista sekä tavanomaisen purkumalmin / sekundäärimalmin koostumukseen. EsNe-sakan mineralogisella analyysillä (röntgendiffraktio, XRD) sakasta on tunnistettu kaksi pääkomponenttia, bassaniitti ja kipsi, joita esiintyy purkumalmissa tavallisestikin. Näiden suhde sekä EsNe-sakan kideveden määrä vaihtelee kuitenkin paljon eri näytteiden välillä. EsNe-sakan määrä on < 1,5 % muusta lohkolle kasattavasta malmista, joten sen vaikutus malmin ominaisuuksiin on hyvin pieni. Koetoiminnan aikana kasatun malmin vaikutusta liuotukseen sekä mahdollista eroa malmiin, jossa ei ole mukana EsNe-sakkaa, voidaan luotettavasti tutkia vasta aktiivisen liuotusvaiheen loputtua.



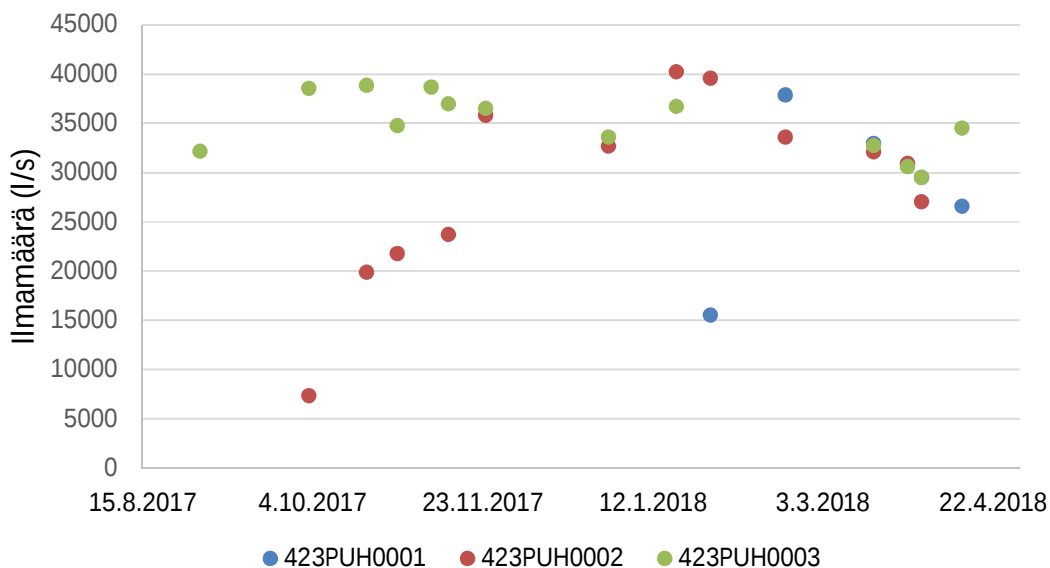
Kuva 10. Sekundäärilohkolle 3 kasatun malmin metallipitoisuudet. EsNe-sakkaa sisältävä malmi on korostettu punaisella.

Sekundäärilohkon 3 kastelu- ja ulostulevasta liuoksesta otetaan päivittäin näytteet analysoitavaksi. Näytteistä analysoidaan mm. lämpötila, pH sekä liukoiset metallit. EsNe-sakan vaikutusta lohkon rikkihapon kulutukseen on haastavaa arvioida, koska haponkulutusta ei voida erikseen verrata EsNe-sakkaa sisältävällä ja sisältämättömällä lohkon osalla vaan sitä seurataan lohkokohtaisesti. Lisäksi EsNe-sakan teoreettinen haponkulutus on todella pieni verrattuna koko lohkon haponkulutukseen. Sinkin pitoisuus lohkon kastelu- ja ulostulevassa liuoksessa on esitetty kuvassa 12. Sinkkiä on liuennut tasaisesti lohkon kastelun aloituksesta lähtien. Sekundäärilohkojen kohdalla on tavallista, että pitoisuudet ovat liuotuksen alussa korkeimmillaan primäärillä liukenematta jääneiden metallien päästessä (uudelleen kasaamisen jälkeen) paremmin kosketuksiin kasteluliuoksen kanssa. Lohkon kastelu on pyritty pitämään tasaisena jokaisen kastelukamman alueella, jotta kasan pinnan läpäisevyyttä ja mahdollista vettymistä koetoimintaa ennen ja sen aikana pystytään seuraamaan. Kuten muillakin bioliuotuskasoilla, kasteluvirtaamiin vaikuttavat heikentävästi mm. kipsin saostuminen ja siten letkujen tukkeutuminen. Sekä EsNe-sakkaa sisältävällä että sitä edeltävällä lohkon osalla kastelukammat ovat menneet tukkoon noin 2 kk välein. EsNe-sakalla ei ole myöskään havaittu olevan vaikutusta lohkon pinnan läpäisevyyteen/vettymiseen.



Kuva 11. Sinkin pitoisuus sekundäärilohkon 3 kastelu- ja ulostulevassa liuoksessa. Ensimmäinen EsNe-sakkaa sisältävä lohkon osa otettiin kasteluun 13.10.2017 (korostettu punaisella).

Sekundäärilohkolla 3 on kolme puhallinta. Ilman EsNe-sakkaa oleva lohkon osa sijoittuu ensimmäisen (423PUH0003) ja pieneltä osin toisen puhaltimen (423PUH0002) alueelle ja sakkaa sisältävä malmi sijoittuu lohkolla kokonaan kahden viimeisen puhaltimen alueelle (423PUH0002 ja 423PUH0001). Puhaltimista mitatut ilmamäärät on esitetty kuvassa 13. Sekundäärilohkon 3 ilmanläpäisevyydessä ei ole havaittu eroa koetoimintaa edeltävän ja sen aikaisen lohkon osalta.



Kuva 12. Puhallinkohtaiset ilmavirrat (l/s) sekundäärilohkon 3 puhaltimilla. Puhaltimet 423PUH0001 ja 423PUH0002 ilmastavat koetoiminta-aluetta.

