

**KALIUMIN JA KLOORIN POISTOPROSESSIT PYRIT-
TÄESSÄ KORKEISIIN TULISTINLÄMPÖTILOIHIN**

SOTU-projekti

Kurt Sirén
Senior Scientist

Oy Keskuslaboratorio - Centrallaboratorium Ab
KCL Science and Consulting

Tiivistelmä

Eri kaliumin ja kloorin poistoprosesseja vertailtiin ja arvioitiin, kun niitä sovelletaan näiden aineiden poistoon sellutehtaan lipeäkierrosta päämääränä saavuttaa nykyistä olennaisesti pienemmät pitoisuudet lipeäkierrossa. Pienet pitoisuudet ovat edellytyksinä sille, että voitaisiin nostaa soodakattilan tulistinlämpötiloja lähemmäksi tavallisten voimakattiloiden tasoa. Korkeat tulistinlämpötilat mahdollistavat suuremman sähköntuotannon, mikä on kiinnostavaa, kun sähkön hinta on korkea.

Pohjoismaisissa tehtaissa klooritaso on ennestään alhainen, ja sen edelleen alentamista rajoittaa lentotuhkassa oleva määrä. Hyvän sulkemisasteen vuoksi kaliumtaso on verraten korkea, ja sen merkittävä alentaminen on mahdollista jo käsittelemällä osa tuhka.

1. JOHDANTO

Soodakattilan tulistinlämpötilan kohottaminen on noussut kiinnostuksen kohteeksi kohonneen sähkön hinnan vuoksi. Tulistinlämpötilaa rajoittaa toisin kuin tavallisissa voimakattiloissa soodakattilassa poltettavat kemikaalit, jotka aiheuttavat korroosiota putkistojen pinnoille, jos lämpötilaa on liian korkea.

Pyrittäessä nykyistä korkeampiin tulistinlämpötiloihin soodakattiloissa edellytyksenä on mm. se, että kalium- ja klooripitoisuudet voidaan alentaa olennaisesti nykyisestä tasosta. On olemassa useita teollisessa käytössä olevia poistoprosesseja, jotka perustuvat lentotuhkan liuotukseen ja kiteytykseen, joko haihduttamalla tai jäähdyttämällä, tai tuhkan uuttoon. Prosessien kustannukset nousevat kuitenkin voimakkaasti sitä mukaa kuin kyseisten aineiden pitoisuudet lipeäkierrossa alennetaan, sillä pitoisuuksien laskiessa lentotuhkassa yhä suurempi määrä tuhkaa on prosessoitava tietyn ainemäärän poistamiseksi.

2. TAUSTA JA TAVOITTEET

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli vertailla ja arvioida eri kaliumin- ja kloorinpoistomenetelmiä, kun pyritään olennaisesti nykyistä pienempiin näiden aineiden pitoisuuksiin lipeäkierrossa. Tavoitteena oli myös arvioida niistä syntyviä kustannustekijöitä, kuten keittokemikaalien häviöitä ja korvauskemikaalien tarve, höyryn- ja sähkönkäyttöä sekä investointikustannuksia.

Eri puolilla maailmaa on käytössä useita laitoksia, ja menetelmistä on olemassa teollista kokemusta. Näiden kokemusten soveltaminen suoraan tähän tapaukseen ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä laitokset toimivat yleensä huomattavan paljon suuremmassa klooripitoisuudessa kuin mikä tässä yhteydessä on kyseessä. Motiivina on usein soodakattilan tukkeutuminen, kun tässä tapauksessa motiivina on tulistinlämpötilan kohottaminen suuremman sähköntuotannon saavuttamiseksi lähtötilanteen ollessa jo sinänsä melko ongelmaton. Klooripitoisuudet ovat pohjoismaisissa oloissa jo alhaisia, kaliumpitoisuuksien kuitenkin ollessa melko suuria ja vieläpä nousussa sulkemisasteen noustessa.

Vertailuun otettiin vain uutto ja haihdutuskiteytys, jäähdytyskiteytyksen jäädessä pois. Jäähdytyskiteytys on käytössä Japanissa, toimittajana Mitsubishi. Tekniikka on josain määrin vieras suomalaisessa teollisuudessa, mutta Japaniin verrattuna pohjoismaissa on se etu, että suuren osan vuotta on käytettävissä alhaisia ilmalämpötiloja jäähdytykseen. Eräs haitta jäähdytyskiteytyksessä on se, että tuote on kidevedellistä natriumsulfaattia, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, mistä aiheutuu ylimääräinen haihdutustarve, kun aine palautetaan haihduttamolle. Prosessi on myös huomattavan paljon kalliimpi investointina kuin muut prosessit. Sekä uutto että haihdutuskiteytys on kaupallistettu usean toimittajan taholta.

Vertailussa huomioitiin myös, että kun tehtaaseen liitetään poistoprosessi, lentotuhkan liuotus jäteveteen samalla loppuu.

3. SUORITUSTAPA

Vertailu suoritettiin siten, että ensin laadittiin tyypillinen sellutehtaan natrium-, rikki-, kalium- ja klooritase kirjallisuustietojen ja aikaisempien KCL:n tutkimuksien perusteella. Tämän jälkeen korvattiin lentotuhkan liutus poistoprosessin jätevirralla, ja iteroimalla Excel-taulukossa haettiin uuden taseen muodostumista.

Käytännössä ainoa muuttuja olettaen, että poistoprosessia ajetaan normaalilla laite-toimittajan esittämällä tavalla ilman muunnelmia, on kuinka suuri osuus koko tuhka-määrästä otetaan käsiteltäväksi. Poistoprosessin vaikutusta taseeseen laskettiin siksi käsiteltävän tuhkaosuuden funktiona. Koska jätevirran koostumuksesta ei ollut saata-vissa riittävää tietoa kirjallisuudesta tai laitetoimittajilta (huomioiden, että poistopro-sessi sovellettiin tässä huomattavan paljon alhaisempiin kalium- ja klooritasoihin kuin olemassa olevissa tehdassovelluksissa) suoritettiin laboratoriotestejä, joissa määritet-tiin aineiden liukoisuudet tutkittavilla lentotuhkakoostumuksilla.

Poistotehokkuuden osalta käytettiin laskelmissa laitetoimittajien ilmoittamia arvoja (1,2). Poistotehokkuus on pääasiassa suodatustehokkuuden funktio, ellei liuos ole ta-sapainossa jonkun kiinteän faasin kanssa, joka sisältää poistettavaa ainetta. Viimeksi mainitussa tapauksessa poistettavaa ainetta kulkeutuu kiinteänä kidemassan mukana takaisin lipeäkiertoon, mikä verottaa prosessin tehokkuutta. Usein kuitenkin tämä ti-lanne vallitsee vain silloin, kun prosessi otetaan käyttöön, ja myöhemmin, kun taso lipeäkierron on laskenut riittävästi, tilanne korjaantuu. Esimerkkinä kiinteästä faa-sista voidaan mainita glaseriitti ($K_3Na(SO_4)_2$), jota saostuu kun kaliumia on paljon. Käytännössä pohjoismaisilla tuhka-koostumuksilla klooripitoisuus on niin pieni, ettei kiinteitä klooria sisältäviä faaseja, kuten NaCl, synny.

Nestettä jää aina kidemassaan. Nesteen määrä ja poistettavan aineen pitoisuus ratkai-sevat miten paljon tätä ainetta kulkeutuu takaisin lipeäkiertoon. Erotustehokkuutta lisätään useimmiten suihkuttamalla puhdasta vettä suodatuskakuun, jolloin vesi syr-jäyttää nesteen. Tällä tavalla saavutetaan 80 - 90 % poistotehokkuus.

Kun kalium ja klooritaseet olivat muodostuneet, tasapainotettiin myös rikki ja natri-um. Tästä saatiin samalla tarvittavien korvauskemikaalien määrät. Huomioitiin myös eri kemikaalivaihtoehtoja. Poistoprosessin koosta voitiin laitetoimittajien tietojen pe-rusteella laskea sen vaatimat sähkö- ja höyrymäärät.

On huomioitava, että vaikka keskiarvotehdas kuvaa melko hyvin tehtaiden tasetta keskimäärin, yksittäiset tehtaat saattavat poiketa siitä huomattavasti.

4. PERUSTASE

Taulukossa 1 on esitetty eri lähteiden perusteella laadittu perustase, joka otettiin laskelmien lähtökohdaksi. Tase perustuu noin kymmeneen lähteeseen, jotka ovat julkaisuja artikkeleita, aikaisempia KCL:n tutkimustuloksia ja muutamia julkaisemattomia töitä. Arvot ovat pääsuuntaisesti näiden lähteiden keskiarvoja, mutta joissakin tapauksissa tehtiin korjauksia. Otettiin huomioon SOTU-projektin aikaisempia tuloksia (3), joiden mukaan mm. lentotuhkan klooripitoisuus suomalaisissa tehtaissa on pienempi kuin lähteiden keskiarvo. Polttoliipeä- ja suodintuhka-analyysit otettiin suoraan tästä työstä, ja tase säädettiin sen mukaan. Joissakin tapauksissa, kuten hakkeen mukana tuleva kalium ja kloori, turvauduttiin muihin analyysituloksiin, mm. Metsäntutkimuslaitoksen tuloksiin, ja laskettiin tulomäärät niiden mukaan. Lisäksi otettiin lähtökohdaksi, että klooridioksidiprosessi on R8, ja että bioliete poltetaan soodakattilassa.

Taulukko 1. Laskelmien lähtökohdaksi otettu perustase.

	Na	S	K	Cl
Sisään:	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt
Vesi	0,016	0,013	0,005	0,025
Hake ja puru	0,038	0,194	1,054	0,184
NaOH	6,836	0	0	0,010
H ₂ SO ₄	0	2,466	0	0
MgSO ₄	0	0,467	0	0
Hapan suola	1,840	1,563	0	0,075
Polttoöljy	0	0,324	0	0
Muut	0,158	0,088	0,005	0,022
Bioliete	0,038	0,023	0,013	0,033
Yhteensä sisään	8,926	5,138	1,077	0,349
Ulos:				
Pesuhäviö	3,500	1,106	0,394	0,173
Soodasakka + kalkkisora	0,371	0,203	0,019	0,006
Kaasu- ja hiukkaspäästöt	0,401	1,092	0,021	0,033
Meesan ulosotto	0,300	0,080	0,023	0
Mäntyöljy	0,030	0,083	0,002	0
Tärpähti	0	0,210	0	0
Jätevedet ja muut	3,495	1,802	0,486	0,119
Lentotuhkan liuotus	0,829	0,562	0,132	0,018
Yhteensä ulos	8,926	5,138	1,077	0,349

Taseesta voidaan todeta, että ylivoimaisesti suurin kaliumin tulotie on puu. Puu on myös kloorin kohdalla merkittävin tulotie. Lähteissä klooripitoisuus oli hyvin vaihteleva ja näyttääkin siltä, että tämä tulotie riippuu hyvin voimakkaasti paikallisista oloista. Esim. meren läheisyys tuo merkittävän suolalasjeuman, mikä myös näkyy puiden klooripitoisuudessa, kun taas sisämaassa kasvaneissa puissa on pienempiä pitoisuuksia.

5. LIUKOISUUSKOKEET

Tuhkankäsittelyprosessin jätevirran eli poistovirran koostumus vaikuttaa hyvin ratkaisevasti prosessin talouteen. Siitä riippuvat tarvittava laitteiston koko, sen energiankulutus ja keittokemikaalien häviöt, joiden korvaamisesta syntyy kustannuksia. Kirjallisuudesta ei ole löydettävissä kaikkia tilanteita vastaavaa liukoisuusdataa, ja siksi suoritettiin kokeita, joissa täydennettiin olemassa oleva tieto.

Lentotuhka on monikomponenttiseos, joka vesiliuoksena muodostaa moniulotteisen systeemin, ja muuttujana on vielä lämpötila. Systeemin täydellinen kattaminen liukoisuusmäärittämisellä on melko resursseja vaativaa, ja liukoisuuskokeita voitiin tämän työn puitteissa suorittaa vain muutamille valituille tapauksille. Niistä saatiin kuitenkin kiintopisteitä, joiden avulla on mahdollista tehdä kohtalaisen hyviä arvioita lähellä oleville koostumuksille.

SOTU-projektin aikaisemmissa osissa todettiin, että kalium- ja klooripitoisuudet lentotuhkassa korreloivat melko tarkasti polttoliipeän vastaavien pitoisuuksien kanssa suomalaisissa tehtaissa (3). Suomalaisissa tehtaissa riippuvuus oli lineaarinen, eli rikastumiskerroin oli likimain vakio. Voidaan siis laskea melko tarkasti mikä pitoisuus polttoliipeässä vastaa minkäläistä pitoisuutta lentotuhkassa. Samalla on huomioitava, ettei asiaa voi yleistää, sillä maailmanlaajuisesti rikastumiskertoimet vaihtelevat enemmän.

Kokeiden suoritus

Liukoisuuskokeissa pyrittiin tarkentamaan poistovirran koostumusta tilanteessa, jossa kalium ja klooripitoisuudet ovat olennaisesti nykyistä pienempiä lipeäkierrossa ja siten myös suodintuhkassa. Tutkittaviksi tapauksiksi valittiin taulukossa 2 esitetyt lentotuhkan koostumukset. Tuhkia edustavat seokset valmistettiin p.a. kemikaaleilla.

Taulukko 2. Valitut lentotuhkan koostumukset, g/kg.

	A	B	C	D
Na	289	306	319	298
K	46	23	23	23
SO ₄	589	598	518	649
CO ₃	41	41	110	0
Cl	6	3	1	1

Tapaus A vastaa nykyistä lentotuhkan koostumusta keskimäärin suomalaisissa tehtaissa. Pitoisuudet vastaavat polttoliipeässä kuiva-ainetta kohti Na 202 g/kg, K 21,4 g/kg ja Cl 1,8 g/kg. Tapauksessa B kalium- ja klooripitoisuudet on puolitettu. Tapauksessa C ja D kaliumpitoisuus on myös puolitettu, mutta klooripitoisuus on alennettu tasolle 1 g/kg. On odotettavissa, että karbonaattipitoisuus vaikuttaa erotustehokkuuteen, sillä jos sitä on paljon, muodostuu burkeiittia ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$), ja jos sitä on vähän, muodostuu glaseriittia $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$. Siksi tapauksessa C karbonaattipitoisuus on suuri ja tapauksessa D nolla. Na ja SO₄-pitoisuudet muuttuvat vastaavasti kun muita komponentteja korvataan natriumsulfaattilla.

Lämpötilaksi valittiin 70 °C, joka oli kompromissi eri prosessien välille. Kirjallisuudessa ilmoitetaan (4) kiteytysprosesseille seuraavat lämpötilat: Andritz ARC 60 - 80 °C, HPD CRP 75 °C ja Eka PDR 75 °C. Uuttoprosesseille ilmoitetaan seuraavat lämpötilat: Kvaerner AshLeach 90 °C and Andritz leaching 60 °C.

Koska liukoisuuskokeilla haluttiin selvittää poistoprosessin poistoliuoksen koostumusta, vesi-/tuhkasuhde valittiin ulosmenevän konsentraation mukaan. Ulosmenevän virran vesimäärä on ARC:ssa 50 % ja CRP:ssä 54 % alkuperäisen tuhkan määrästä (4). Uuttoprosesseissa vastaavat luvut ovat Ashleach 80 % ja Andritz leaching 67 %. Kokeissa valittiin suhteet 50 ja 80 %. Uutossa toimitaan teknisistä syistä laimeammalla liuoksella kuin kiteytyksessä.

Kokeiden tulokset

Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Liukoisuuskokeiden tulokset, kiteytys, g/kg liuosta (70 C°)

	A	B	C	D
Na	96,3	97,6	98,8	104
K	30,9	28,8	29,9	32,9
SO ₄	183	185	189,4	255
CO ₃	28,8	30,7	32,6	0
Cl	7,12	3,62	1,22	1,40

Taulukko 4. Liukoisuuskokeiden tulokset, uutto, g/kg liuosta (70 C°)

	A	B	C	D
Na	106	129	94,3	137
K	29,3	24,0	17,6	28,2
SO ₄	197	233	174	319
CO ₃	33,6	38,8	27,2	0
Cl	4,72	2,86	0,79	1,10

Poistoprosessin tarkoituksena on konsentroida kalium ja kloori suhteessa natriumiin, jotta keittokemikaalin menetys jätevirran mukana olisi mahdollisimman pieni. Tehokkuutta voidaan ilmaista ns. natriumhäviösuhteella, eli kuinka monta kiloa natriumia menetetään poistettua kalium- tai kloorikiloa kohti. Taulukoista 3 ja 4 lasketut natriumhäviösuhteet on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Natriumhäviösuhteet, kg/kg

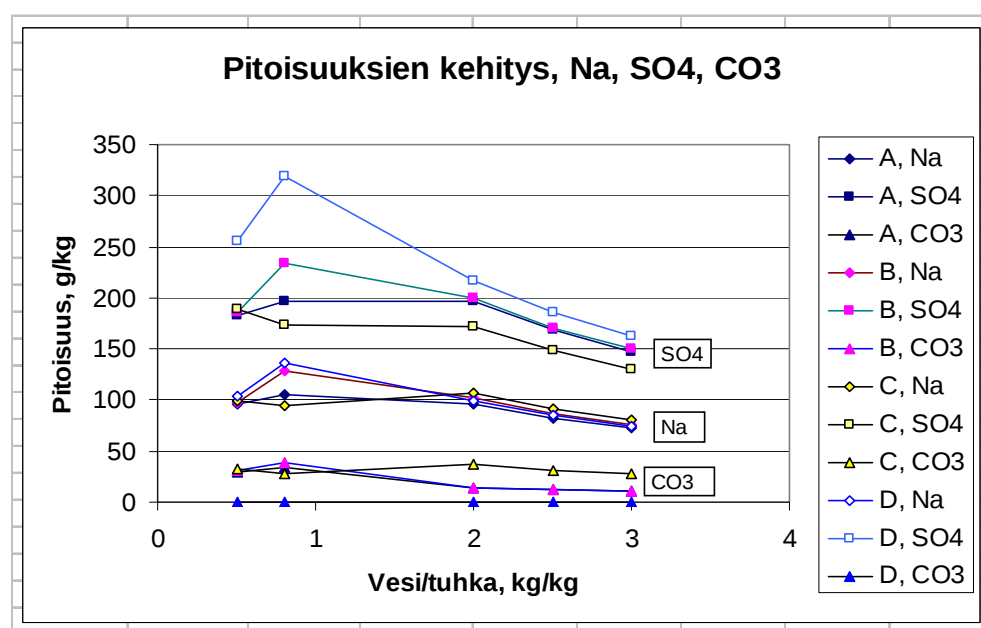
	Kiteytys		Uutto	
Tapaus	Na/K	Na/Cl	Na/K	Na/Cl
A	3,12	13,5	3,62	22,4
B	3,39	26,9	5,38	45,1
C	3,30	80,9	5,35	120
D	3,15	74,1	4,84	124

Voidaan todeta, että kiteytyksessä menetetään jokaista poistettua kaliumkiloa kohti runsaat 3 kiloa natriumia. Luku säilyy melko vakiona tutkitulla kaliumpitoisuusalueella johtuen ilmeisesti siitä, että liuos on kylläinen tai lähellä kylläisyyttä glaseriittiin nähden. Poistettua kloorikiloa kohti sen sijaan natriumia menetetään huomattavasti enemmän, kun klooripitoisuus lentotuhkassa vähenee. Tämä johtuu siitä, että kloori ei ole kyllästynyt minkään faasin suhteen, eli natriumkloridia ei esiinny kiinteässä muodossa. Kun klooria on esim. lentotuhkassa B puolet normaalituhkan A pitoisuudesta, pitoisuus on myös loppuliouksessa noin puolet.

Uuttoa varten tehdyissä liukoisuuskokeissa kaliumin natriumhäviösuhde oli jonkun verran suurempi kuin kiteytystä varten tehdyissä kokeissa. Tämä viittaa siihen, että liuos, ollessaan hieman laimeampi, ei ole ollut kylläinen tai lähellä kylläisyyttä glaseriittiin nähden, tapausta A lukuun ottamatta. Kloorin kohdalla natriumhäviösuhde kasvaa varsin suureksi, kun liuos oli laimea ja tuhkan klooripitoisuus oli vain 1/6 normaalista. Periaatteessa lienee mahdollista uuttoprosessissa lisätä uuttoliuoksen kierrätystä, jolloin olisi saavutettavissa kaliumiin ja klooriin nähden kylläisempi liuos, jolloin natriumhäviösuhde pienenesi. On huomioitava, että tässä työssä tutkittava tilanne poikkeaa normaaleista kaupallisista sovelluksista siinä, että tässä pyritään normaalia pienempiin klooripitoisuuksiin.

Tuloksien tarkastelu poistoprosessin kannalta

Liukoisuustuloksia on edullista tarkastella myös kuvaajina, joista on helpompi hahmotella eri oloissa syntyviä tilanteita. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty eri ionien pitoisuuksien kehitys, kun vesimäärää on vähennetty. X-akselilla on piirretty poistovirran vesimäärä/alkuperäinen käsittelyyn otettu tuhkamäärä. Tämä muuttuja on edullinen siksi, että voidaan käyttää samaa kuvaajaa riippumatta siitä, onko kyseessä kiteytys vai uutto, tai mikä vesi/tuhkasuhde on käytetty kun lentotuhka on liuotettu kiteytystä varten. Interpoloinnilla on myös mahdollista arvioida muita poistovirran vesi/suolasuhteita kuin mitä tämän työn laskelmissa on käytetty.



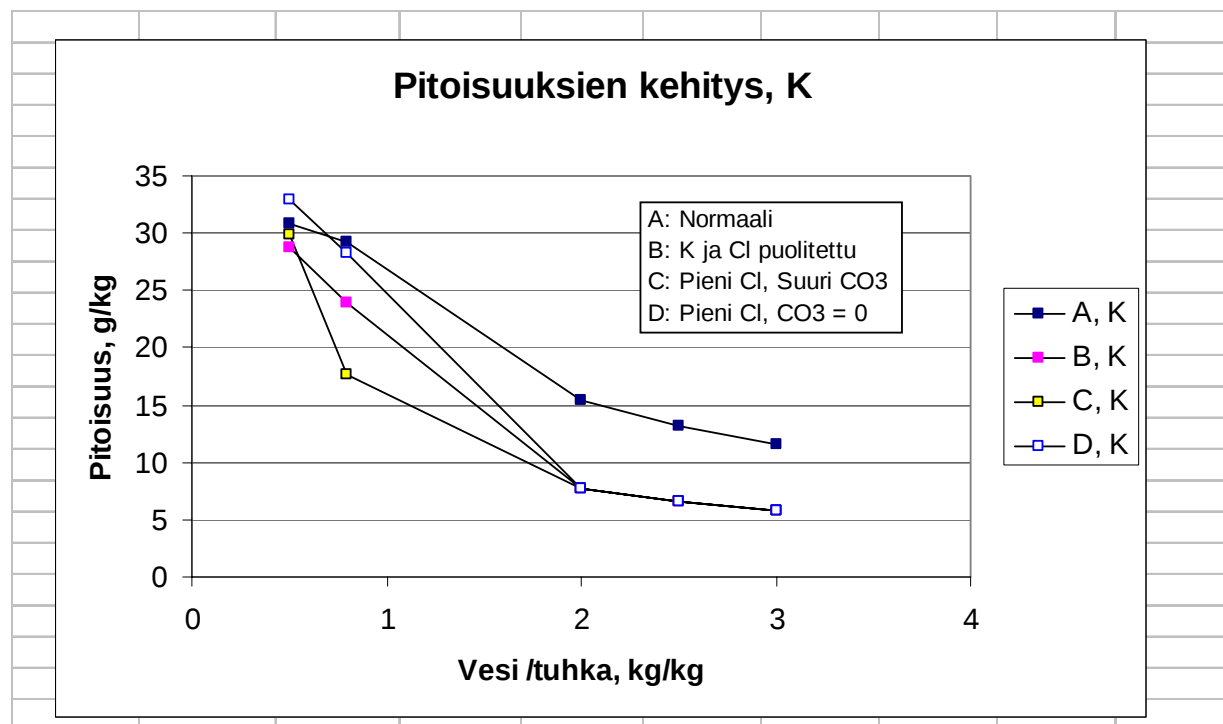
Kuva 1. Natriumin, sulfaatin ja karbonaatin pitoisuudet vesimäärän funktiona.

Pisteet kohdissa 2, 2,5 ja 3 ovat laskennallisia. Niin kauan, kun ei ole merkittäviä määriä kiinteitä faaseja, homogeenisen liuoksen koostumus voidaan laskea lähtökoostumuksen ja vesisuhteen perusteella.

Kuvista nähdään, että pitoisuudet nousevat vesisuhteen vähetessä kunnes jokin kiinteä faasi saostuu, jolloin nousu pysähtyy, eli liuos on kylläinen. Tämä taso kuitenkin vaihtelee suolaseoksen koostumuksen mukaan. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota seokseen D, jossa ei ole karbonaattia, ja siksi liuoksen sulfaattipitoisuus nousee muita suuremmaksi. Asia voidaan nähdä siten, että tässä tapauksessa sulfaatti ei joudu kilpailemaan karbonaatin kanssa veden liuotuskapasiteetista, kuten muissa tapauksissa. Tapauksessa C, jossa on suuri karbonaattipitoisuus, sulfaattipitoisuus on vastaavasti pienin.

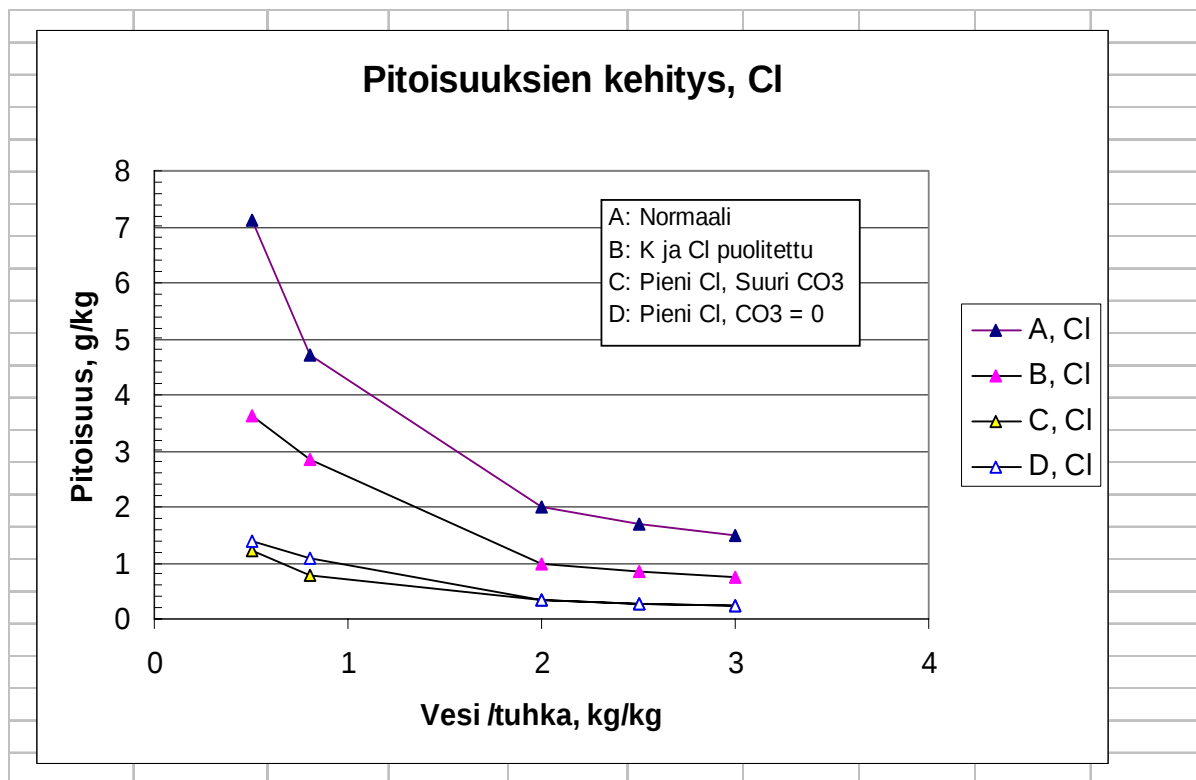
Kuvassa voidaan myös kiinnittää huomiota siihen, että pitoisuuksien vaihtelu on suurempi kohdassa 0,8 kuin kohdassa 0,5 x-akselilla. Tämä on tulkittavissa siten, että mitä pienempi vesimäärä on, sitä lähempänä ollaan eutektistä pistettä. Eutektisessä pisteessä liuoksen koostumus on aina sama, riippumatta siitä, mistä suunnasta sitä lähestytään.

Kuvassa 2, tapaus A, nähdään erityisen selvästi miten kaliumpitoisuus nousee, kunnes se saavuttaa kylläisyytason n. 30 g/kg läheisyydessä. Saostuva kiinteä faasi on normaalisti glaseriittia, $K_3Na(SO_4)_2$. Tapauksessa B, jossa suolaseoksen kaliumpitoisuus on puolitettu, liuoksen kaliumpitoisuus on lähes yhtä suuri. Tämä on erityisen tärkeä seikka poistoprosessia silmälläpitäen, sillä tämä tarkoittaa sitä, että vaikka lentotuhkan kaliumpitoisuus laskee puoleen, poistovirran kaliumpitoisuus on edelleen lähes sama.



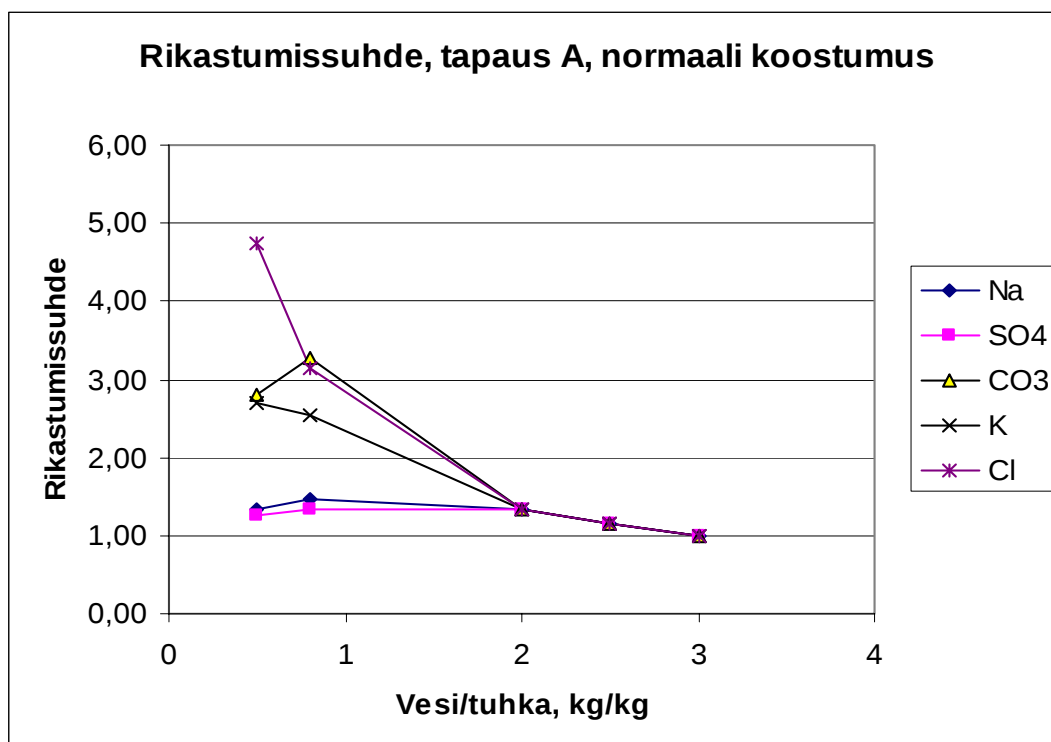
Kuva 2. Kaliumpitoisuus vesimäärän funktiona..

Kuvassa 3 esitetty kloori käyttäytyy eri tavalla. Kuva ei paljasta saostumista kiinteään faasiin, vaan kloori konsentroituu emäliuokseen ilman poikkeavuuksia.

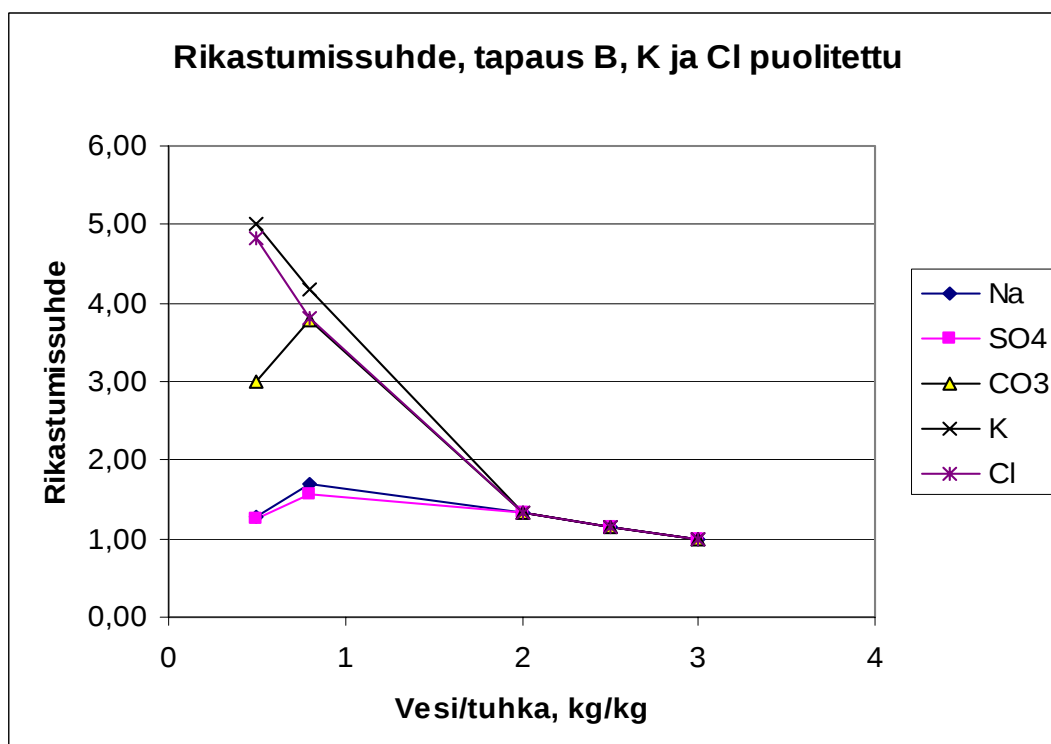


Kuva 3. Klooripitoisuus vesimäärän funktiona.

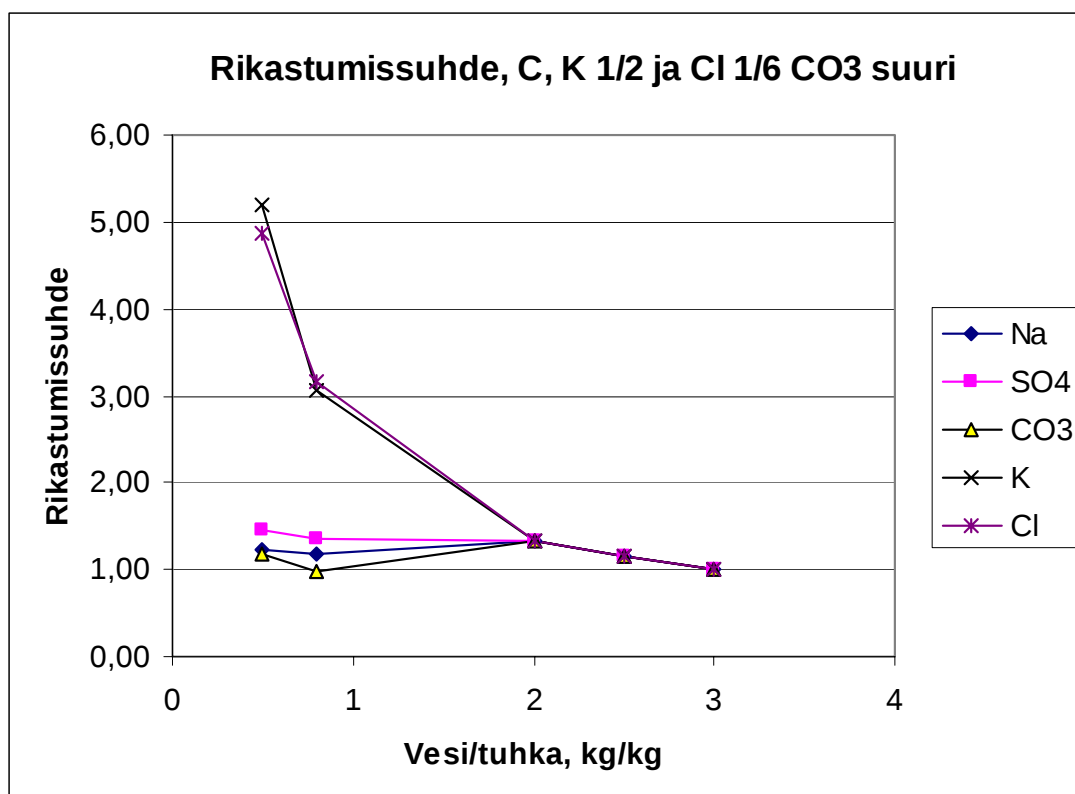
Pitoisuuksia voidaan myös tarkastella rikastumissuhdekuvaajilla, jotka selvemmin paljastavat kiinteiden faasien muodostumista. Eri seokset on esitetty kuvissa 4 - 7. Tällaisessa diagrammissa piirretään aineen pitoisuus suhteessa sen pitoisuuteen alkuperäisessä liuoksessa. Jos esim. kiteytystä varten liuotetaan lentotuhka vesi/tuhkasuhteella 3, ja vettä haihdutetaan, eli liikutaan diagrammissa vasemmalle, ionit konsentroituvat vastaavasti, kunnes jokin faasi alkaa saostua. Silloin faasiin osallistuvat ionit poikkeavat siitä käyrästä, joka edustaa vapaata konsentroitumista. Kuvassa 4 kloori rikastuu ilman esteitä, vesi/tuhkasuhteeseen 0,5 saakka, kun taas karbonaatti poikkeaa suhteen 0,8 jälkeen. Saostuva faasi on todennäköisesti burkeiitti, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$. Diagrammi paljastaa myös että kalium saostuu jo vesi/tuhkasuhteessa 0,8, toisin sanoen myös uutossa esiintyy kaliumia sisältävä kiinteä faasi, ilmeisesti glaseriittia. Esitetty kuvaajatyyppeä pätee tietenkin vain kullekin tuhkekokoostumukselle erikseen.



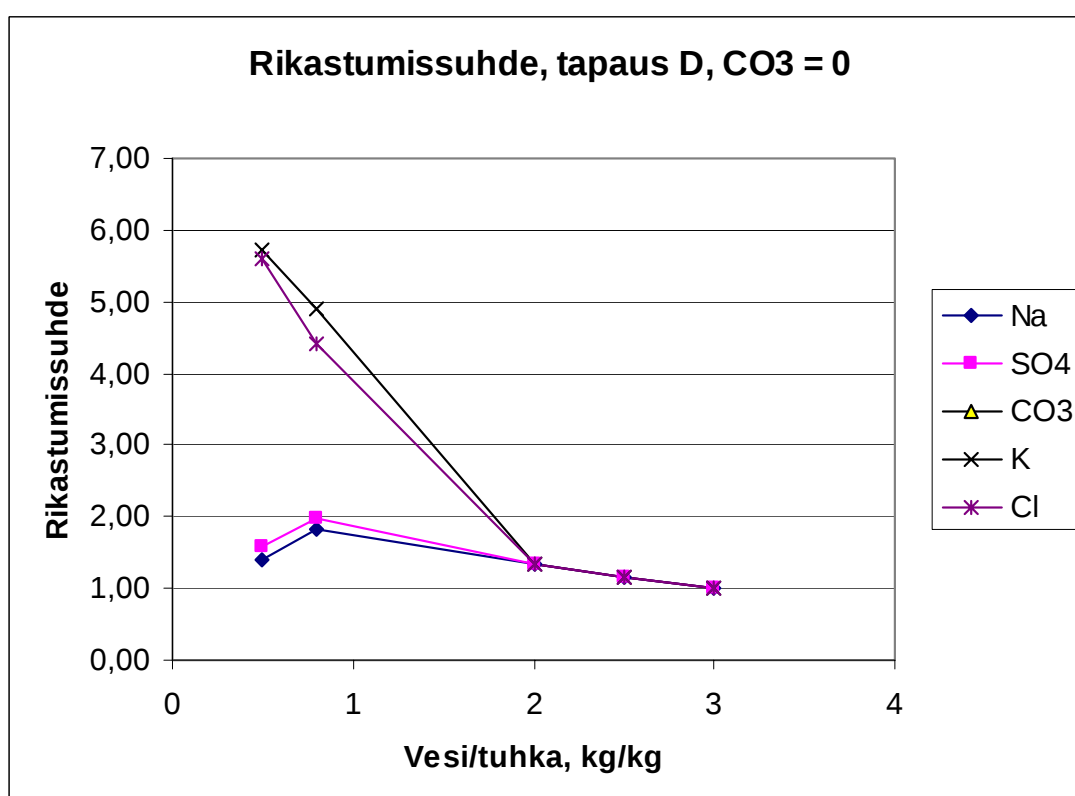
Kuva 4. Rikastuminen liuokseen, keskiarvokoostumus.



Kuva 5. Rikastuminen liuokseen kun kalium ja klooripitoisuudet ovat puolet suomalaisesta keskiarvosta.



Kuva 6. Rikastuminen liuokseen, klooripitoisuus 1/6 ja karbonaattipitoisuus suuri.



Kuva 7. Rikastuminen liuokseen, klooripitoisuus 1/6 ja karbonaattipitoisuus 0.

Tapauksessa B, jossa sekä kalium että klooripitoisuus on puolitettu, kaliumpitoisuus on riittävän alhainen jotta aine pysyy liuoksessa. Muut aineet käyttäytyvät kuin tapauksessa A. Tapauksessa C, jossa karbonaattipitoisuus on suuri, tämä ioni saostuu jo aikaisemmin. Kalium ja kloori seuraavat toisiaan hyvin. Tapauksessa D, jossa ei ole karbonaattia, natrium ja sulfaatti liukenevat jossain määrin enemmän. Kaliumkäyrä viittaa siihen, että jonkun verran glaseriittia saostuu vesi/tuhkasuhteessa 0,5.

6. TASELASKELMAT

Taseen käsittely

Taselaskelmissa taulukossa 1 esitetty keskiarvotehtaan tase käytettiin lähtökohtana. Sitä yksinkertaistettiin siten, että tulopuolella laskettiin yhteen kaikki ryhmät paitsi ne, joihin tasapainottamistoimenpiteillä mahdollisesti vaikutetaan, eli lipeä, rikkihappo ja hapan suola. Lisättiin myös rivi "glaubersuola", sillä tämä aine tai kidevedetön natriumsulfaatti on usein luonnollisin korvauskemikaali. Menopuolella rivit laskettiin yhteen sen mukaan, ovatko ne luonteeltaan muuttuvia vai pysyviä. Muuttuvat ovat sen luonteisia, että ne muuttuvat kun pitoisuus lipeäkierrossa muuttuu. Tällaisia ovat esim. pesuhäviö, viherlipeäsakka tai satunnaislipeäpäästöt. Pysyvät ovat pääasiallisesti lipeäkierron pitoisuuksista riippumattomia. Tällaisia ovat esim. rikkidioksidina tapahtuvat kaasupäästöt, kloori savukaasuissa ja mäntyöljyn mukana kulkeva rikki. On joissain tapauksissa tulkinvarasta kumpaan ryhmään jokin menotie kuuluu, mutta kaliumin ja kloorin kohdalla asia ei ole kovin merkityksellinen, sillä valtaosa ulosmenoteistä ovat muuttuvia. Pysyvät tiedot ovat ennen kaikkea merkittäviä rikin kohdalla, mutta lähtökohtaisesti tehtaan sulfiditeetti pysyy vakiona, joten tälläkään asialla ei ole merkitystä.

Menopuolella lisättiin kaliumin- ja kloorinpoistoprosessin poistovirta, jolla siis käytännössä korvataan normaalia lentotuhkan liuotusta.

Taselaskentamenetelmä

Taselaskelmat suoritettiin siten, että ensin asetettiin normaalitilanteen sähkösuodintuhkan liuotuksen nollaksi. Tämä käy ilmi taulukosta 6. Tällöin syntyy epätasapaino, joka samalla on poistotarve, jos halutaan pitää pitoisuudet lipeäkierrossa entisellä tasolla. Tässä tilanteessa, kun korvataan lentotuhkan liuotus kiteytysprosessilla, saadaan poistovirta, jonka koostumus vastaa liukoisuusdataa tapausta A.

Taulukko 6. Tuhkan liuotus lopetettu.

Sisään:	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt
Puu ja vesi	0,054	0,207	1,059	0,209
NaOH	6,836	0,000	0,000	0,010
H ₂ SO ₄	0,000	2,466	0,000	0,000
Hapan suola R8	1,840	1,563	0	0,075
Muut	0,196	0,902	0,018	0,055
Glaubersuola	0	0	0	0,000
Yhteensä sisään	8,926	5,138	1,077	0,349
Ulos:	Na	S	K	Cl
Muuttuvat ulosmenot	7,67	3,191	0,922	0,298
Kiinteät ulosmenot	0,431	1,385	0,023	0,033
ESP -liuotus	0,000	0,000	0,000	0,000
K, Cl poistoprosessi	0,00	0,000	0,000	0,000
Yhteensä	8,097	4,576	0,945	0,331
Epätasapaino	0,829	0,562	0,132	0,018
Pitoisuudet (SOTU):	Na	S	K	Cl
	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka
Polttolipeässä	202	64	21,4	1,8
Suodintuhkassa	289	196	46	6,4
Määrä tuhkassa, kg	34,68	23,52	5,52	0,768
90 % poisto				0,691
K, Cl poistoliuos	Na	S	K	Cl
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
	96,3	61,2	30,9	7,12
Liukoisuuskokeet	Data A	96,3	61,2	30,9
				7,12

Syntyvän lentotuhkan määrä on normaalisti noin 120 kg/ADt. Tämä määrä sisältää nyt 0,768 kg klooria. Kiteytysprosessi poistaa laitetoimittajan mukaan noin 90 % tuhkan sisältämästä kloorista. Tämä luku riippuu pääasiassa suodatus- ja kakun pesutehokkuudesta. Poistoprosessi pystyy siten alussa poistamaan klooria 0,691 kg/ADt.

Taulukossa 7 on alkutilanne kun poistoprosessi on otettu käyttöön. Koko tuhkamäärä on käsittelyssä. Poistoliuoksen koostumus määrää myös kaliumin poiston ja natriumin ja rikin samanaikaiset häviöt. Tehdas on vahvasti epätasapainossa, kaliumia ja klooria poistuu enemmän kuin niitä kertyy, ja keittokemikaalihäviöt ovat suuret.

Taulukko 7. Poistoprosessi käytössä, alkutilanne.

	Na	S	K	Cl
	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt
Sisään:				
Puu ja vesi	0,054	0,207	1,059	0,209
NaOH	6,836	0,000	0,000	0,010
H ₂ SO ₄	0,000	2,466	0,000	0,000
Hapan suola R8	1,840	1,563	0	0,075
Muut	0,196	0,902	0,018	0,055
Glaubersuola	0	0	0	0,000
Yhteensä sisään	8,926	5,138	1,077	0,349
Ulos:				
Muuttuvat ulosmenot	7,67	3,191	0,922	0,298
Kiinteät ulosmenot	0,431	1,385	0,023	0,033
ESP -liuotus	0,000	0,000	0,000	0,000
K, Cl poistoprosessi	9,35	5,941	3,000	0,691
Yhteensä	17,446	10,517	3,945	1,022
Epätasapaino	-8,520	-5,379	-2,868	-0,673
Pitoisuudet (SOTU):				
	Na	S	K	Cl
	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka
Polttolipeässä	202	64	21,4	1,8
Suodintuhkassa	289	196	46	6,4
Määrä tuhkassa, kg	34,68	23,52	5,52	0,768
				0,691
				90 % poistotehokkuus
				Käsitelty tuhka, %
				100
K, Cl poistoliuos	Na	S	K	Cl
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
	96,3	61,2	30,9	7,12
Liukoisuuskokeet	Data A	96,3	61,2	30,9

Iterointi
1

Poistoprosessin seurauksena kalium- ja klooripitoisuudet lipeäkierrossa alkavat laskea, niin myös lentotuhkassa. Tästä seuraa että kaikki muuttuvat ulosmenotiet vähenevät vastaavasti. Kun lentotuhkan klooripitoisuus on vähentynyt, on myös pitoisuus poistovirrassa vähentynyt. Tämä tila on laskelmissa haettu iteroimalla apulukua käyttäen. Taulukossa 8 kloori ja myös kalium ovat hakeutuneet tasapainotilaan.

Lipeäkierron kloori- ja kaliumpitoisuuden vähetessä on myös poistovirran koostumus muuttunut. Tilanne on nyt lähempänä liukoisuusdataa B, joka nyt on parempi vertailukohta. On huomioitava, että kun kaliumpitoisuus vähenee lipeäkierrossa, lentotuhkassa ja poistovirrassa, se korvautuu natriumilla. Natriumpitoisuus niissä siis kasvaa. Varsinkin poistovirrassa muutos on merkittävä.

Taulukko 8. Kalium ja kloori ovat hakeutuneet tasapainotilaan.

	Na	S	K	Cl
Sisään:	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt
Puu ja vesi	0,054	0,207	1,059	0,209
NaOH	6,836	0,000	0,000	0,010
H ₂ SO ₄	0,000	2,466	0,000	0,000
Hapan suola R8	1,840	1,563	0	0,075
Muut	0,196	0,902	0,018	0,055
Glaubersuola	0	0	0	0
Yhteensä sisään	8,926	5,138	1,077	0,349
Ulos:	Na	S	K	Cl
Muuttuvat ulosmenot	8,11	3,191	0,165	0,095
Kiinteät ulosmenot	0,431	1,385	0,023	0,033
ESP -liuotus	0,000	0,000	0,000	0,000
K, Cl poistoprosessi	10,36	5,910	0,889	0,220
Yhteensä	18,898	10,485	1,077	0,349
Epätasapaino	-9,973	-5,347	0,000	0,000
Pitoisuudet (SOTU):	Na	S	K	Cl
Polttolipeässä	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka
Suodintuhkassa	212	64	3,83	0,57
Määrä tuhkassa, kg	311	196	8,23	2,04
	37,35	23,52	0,988	0,245
			0,889	0,220
K, Cl poistoliuos	Na	S	K	Cl
Liukoisuuskokeet	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
	108,5	61,9	10,31	2,31
	Data B	97,6	61,9	28,8
	Data A	96,3	61,2	30,9

Iterointi Cl
0,319

 Iterointi K
0,179

 90 % poistotehokkuus
Käsitelty tuhka, %
100

Vaikka kloorin kohdalla voidaan käyttää poistotehokkuudelle 90 %, sama ei aina päde kaliumille, johtuen kiinteän kaliumpitoisen faasin muodostumisesta. Toisin sanoen, jos kaliumpitoisuus on suuri, kiteytyy glaseriittia, joka kulkeutuu takaisin lipeäkiertoon natriumsulfaatin kanssa. Kun kaliumpitoisuus laskee riittävästi, päästään kuitenkin pois tästä tilanteesta, ja kalium rikastuu liuokseen samassa suhteessa kuin kloori. Silloin on myös kaliumin kohdalla oikeutettua käyttää poistotehokkuutena 90 %.

Kun kalium ja kloori ovat löytäneet tasapainotilansa, on saatava myös rikki ja natrium tasapainoon. Kuten taulukosta 8 käy ilmi, häviöt ovat melko suuret kun koko tuhka-virtaa käsitellään. Koska sekä natriumia että rikkiä tarvitaan yhtäaikaan, luonnollinen korvauskemikaali on natriumsulfaatti, Na₂SO₄, tai glaubersuola, Na₂SO₄·10H₂O. Rikki tasapainotetaan ensin, ja kun sen jälkeen vielä tarvitaan natriumia, tämä tasapainotetaan natriumhydroksidilla. Tilanne tasapainotuksen jälkeen on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Myös natrium ja rikki tasapainotettu.

	Na	S	K	Cl
Sisään:	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt
Puu ja vesi	0,054	0,207	1,059	0,209
NaOH	9,141	0,000	0,000	0,010
H ₂ SO ₄	0,000	2,466	0,000	0,000
Hapan suola R8	1,840	1,563	0	0,075
Muut	0,196	0,902	0,018	0,055
Glaubersuola	7,668	5,347	0	0
Yhteensä sisään	18,898	10,485	1,077	0,349
Ulos:	Na	S	K	Cl
Muuttuvat ulosmenot	8,11	3,191	0,165	0,095
Kiinteät ulosmenot	0,431	1,385	0,023	0,033
ESP -liuotus	0,000	0,000	0,000	0,000
K, Cl poistoprosessi	10,36	5,910	0,889	0,220
Yhteensä	18,898	10,485	1,077	0,349
Epätasapaino	0,000	0,000	0,000	0,000
Pitoisuudet (SOTU):	Na	S	K	Cl
	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka
Polttolipeässä	212	64	3,83	0,57
Suodintuhkassa	311	196	8,23	2,04
Määrä tuhkassa, kg	37,35	23,52	0,988	0,245
			0,889	0,220
K, Cl poistolios	Na	S	K	Cl
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
Liukoisuuskokeet	108,5	61,9	10,31	2,31
	Data B	97,6	61,9	28,8
	Data A	96,3	61,2	30,9

Lisäykset: Glauber- NaOH
suolaa
kg/ADt kg/ADt
23,69 4,01

Taseesta voidaan laskea tarvittavat natriumsulfaatti- ja lipeämäärät. Tässä tapauksessa tarvittiin natriumsulfaattia 23,7 kg/ADt ja lipeää 4,01 kg/ADt.

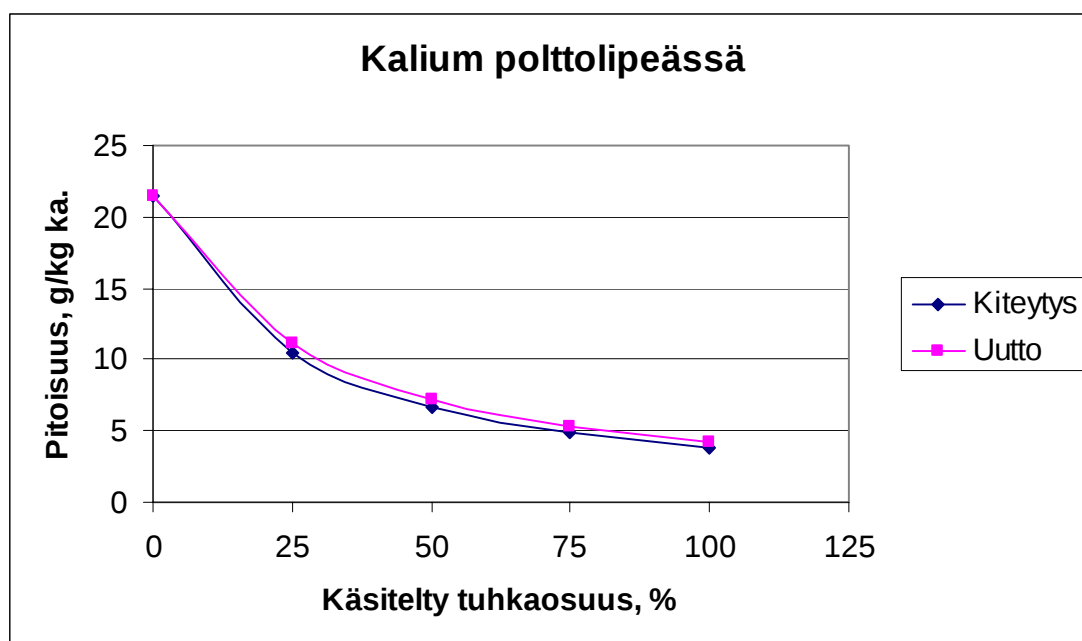
Yllä kuvatulla tavalla lasketut taseet kun erisuuruinen osuus lentotuhkasta on käsitelty kiteytyksellä ja uutolla on koottu liitteeseen 1.

Yhteenveto taselaskelmista

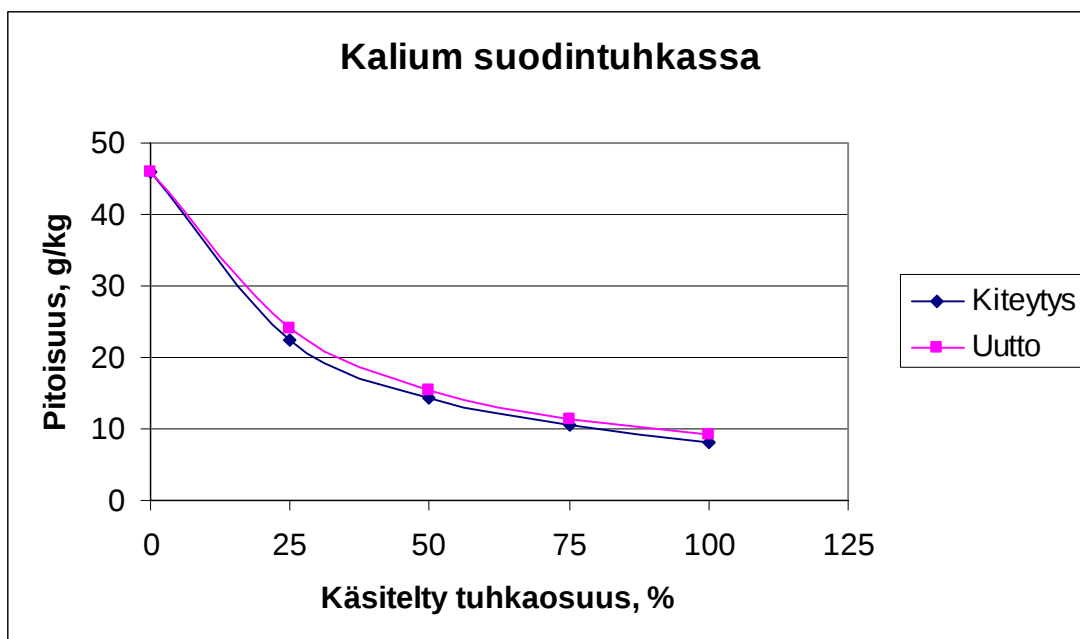
Kuvissa 8 - 11 on esitetty kalium- ja klooripitoisuudet polttolipeässä ja suodintuhkassa kiteytyksellä ja uutolla, kun vaihteleva osuus tuhkasta on käsitelty poistoprosessilla.

Kuten kuvista käy ilmi, poistoprosessin tehokkuus on suhteellisesti suurin kun käsitellään vain pieni osa tuhkasta, erityisesti kaliumilla. Käsittelemällä vain neljäsosa tuhkakavirrasta saavutetaan jo puolet siitä poistosta, joka saavutetaan koko tuhkavirtaa käsittelemällä. Kuten saattaa odottaa, poistotehokkuus vähenee kun pitoisuus lipeäkierrossa, ja siten myös lentotuhkassa, vähenee. Kloorin kohdalla kuvio on samansuuntainen, joskin vähemmän selvä.

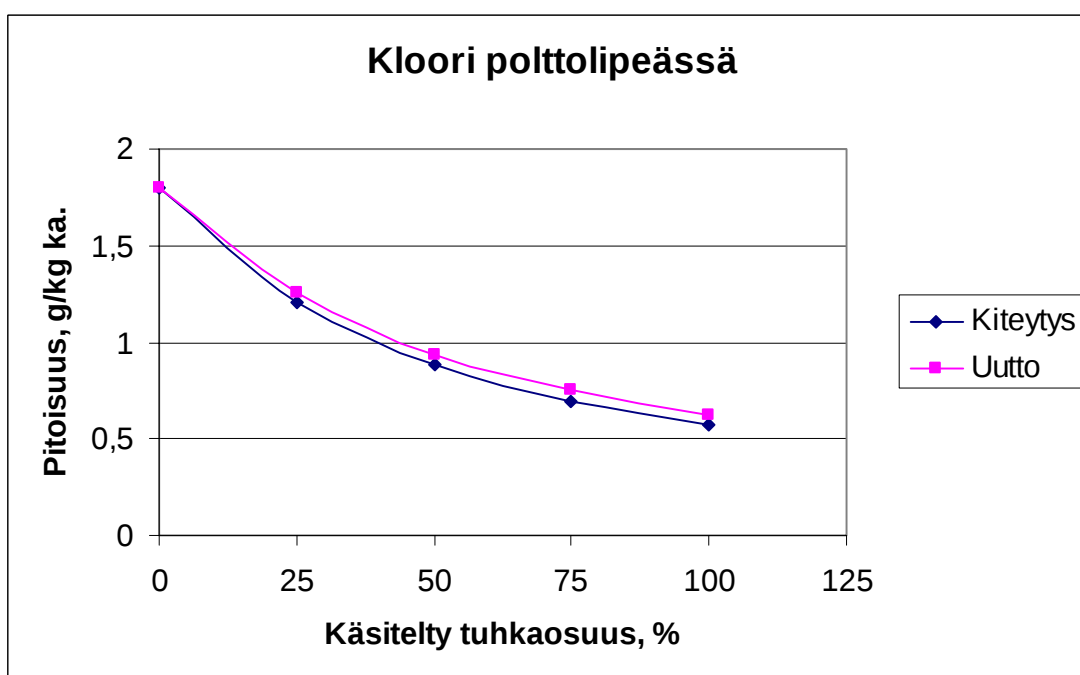
Kaliumin ja kloorin poistoa rajoittaa se seikka, että lentotuhka sisältää vain rajoitetun määrän näitä aineita. Näin ollen, vaikka prosessoidaan koko lentotuhkamäärä, lipeäkiertoon jää tietty taso, joka asettuu tulolähteiden kanssa tasapainoon. Toisaalta, vaikka lentotuhkaa olisikin käytettävissä enemmän, poistoprosessit eivät olisi enää kovin tehokkaita, ja korvauskemikaalien määrä kasvaisi kohtuuttomasti.



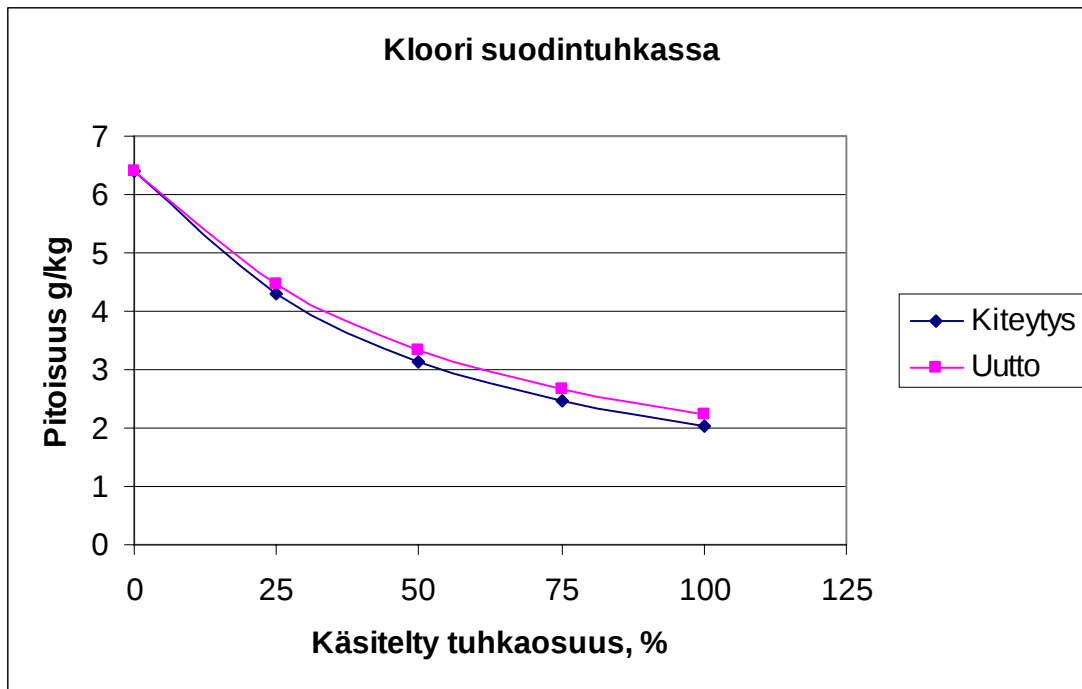
Kuva 8. Kaliumpitoisuuden kehitys polttoliipeässä käsitellyn tuhkan osuuden funktiona.



Kuva 9. Kaliumpitoisuuden kehitys suodintuhkassa käsitellyn tuhkan osuuden funktiona.



Kuva 10. Klooripitoisuuden kehitys polttolipeässä käsitellyn tuhkan osuuden funktiona.



Kuva 11. Klooripitoisuuden kehitys suodintuhkassa käsitellyn tuhkan osuuden funktiona.

Jos koko lentotuhkavirta käsitellään, ja lähtökohta vastaa pohjoismaista keskiarvotehdasta, kaliumpitoisuus polttoliipeässä jää tasolle noin 4 g/kg kuiva-ainetta ja klooripitoisuus tasolle 0,6 g/kg k.a. Suodintuhkassa vastaavat luvut ovat noin 9 ja 2 g/kg. Tähän ei vaikuttaisi kovinkaan paljon käytetäänkö uuttoa vai kiteytystä.

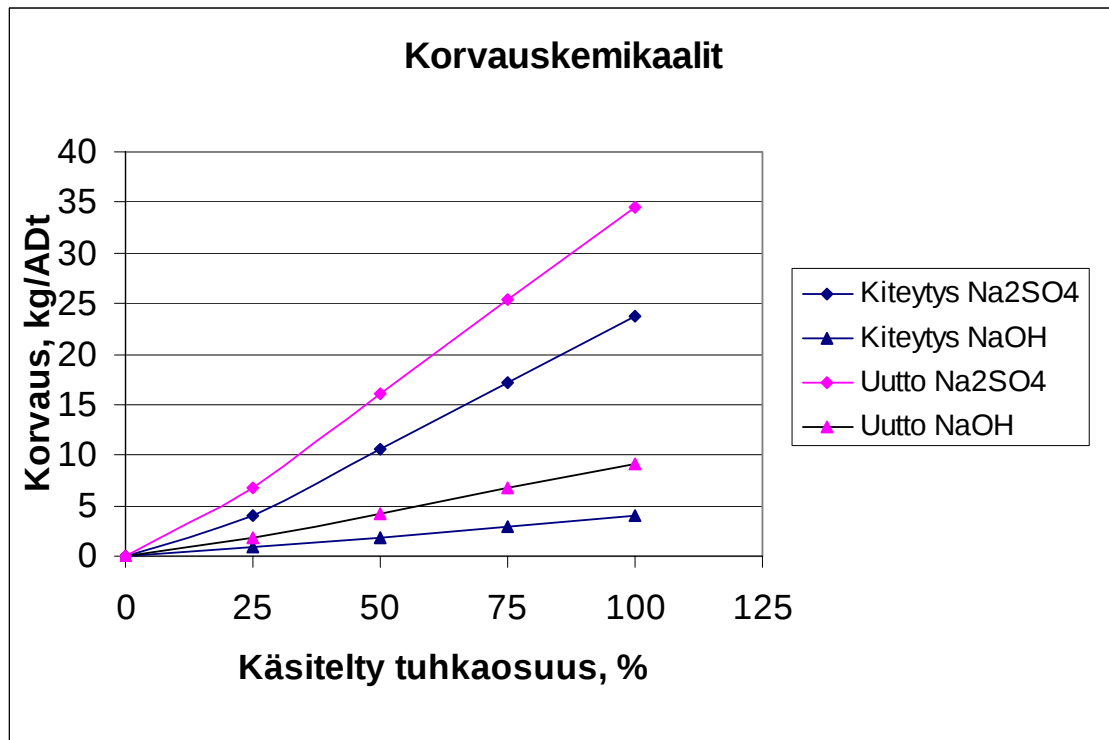
Korvauskemikaalit

Vaikka menetelmän valinta ei vaikuttaisi kovin paljon lopputulokseen kaliumin ja kloorin osalta, se vaikuttaisi melko merkittävästi korvauskemikaalien tarpeeseen. Kiteytyksellä saavutetaan, mikäli prosessi ajetaan perinteisellä tavalla, pienempi korvauskemikaalien tarve. Tämä johtuu siitä, että poistovirta sisältää vähemmän vettä käsiteltyä tuhkamäärää kohti. Liuos on siksi kylläisempi poistettavien aineiden suhteen. Lienee kuitenkin mahdollista muuttaa sekä kiteytys että uutto siten, että poistoliuos on kylläisempi erityisesti klooriin nähden. Tässä työssä on kuitenkin tehty laskelmia vain perinteistä ajomallia käyttäen. Ajomallien muutokset voivat aiheuttaa muutoksia esim. pesutehokkuudessa, ja siten poistotehokkuudessa, joihin ei voida ottaa kantaa tässä yhteydessä.

Korvauskemikaalina voidaan käyttää ulkopuolelta hankittua natriumsulfaattia, tai vaihtoehtoisesti hapanta suolaa R8-prosessista, eli seskvisuolaa. Jälkimmäisessä tapauksessa voidaan säästää suuren osan korvauskemikaalikustannuksista, mutta samalla tuodaan suolan sisältämä jäännöskloori kemikaalikiertoon, mikä verottaa poistoprosessin aikaansaamaa hyötyä. Huomioitavaa on myös, että voidaan säästää neutralointikustannuksissa. Hapan suola voidaan syöttää haihduttamon keulaan, jolloin se ei rasita muuta tehdasta neutraloinnilla. Happaman suolan natrium/rikkisuhde on taseen kannalta epäedullisempi kuin natriumsulfaatin, minkä vuoksi on käytettävä enemmän

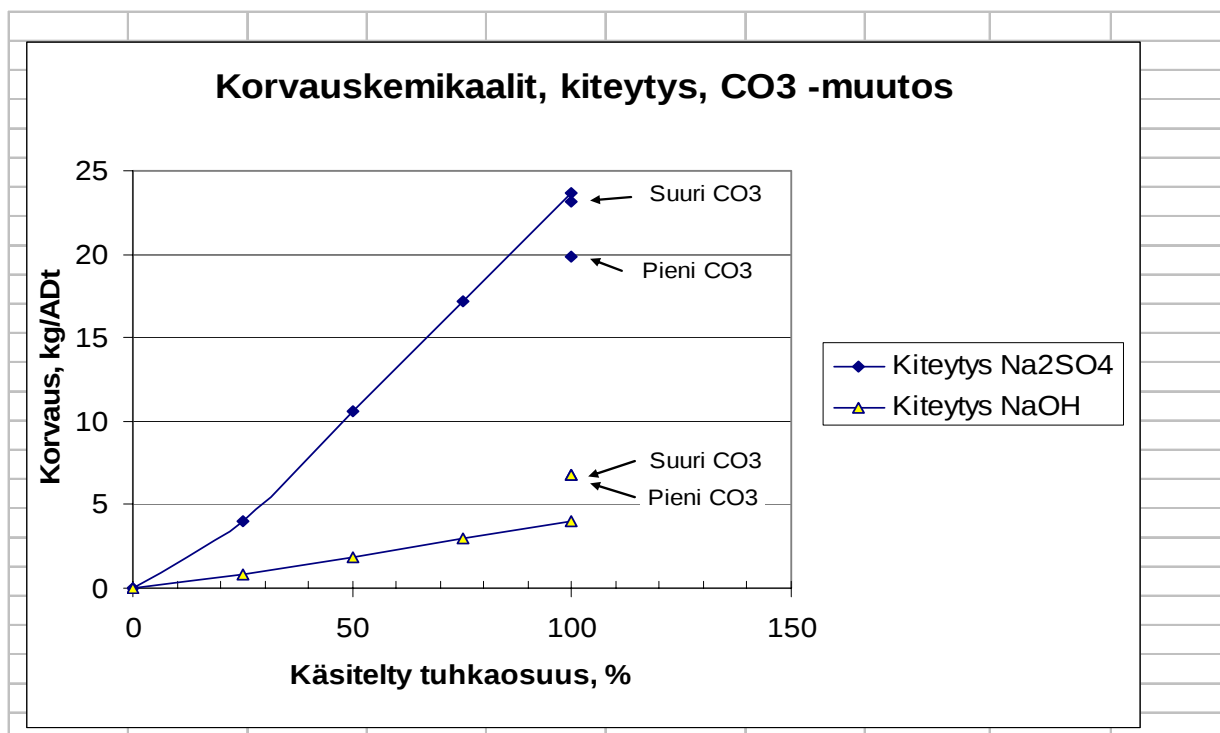
natriumhydroksidia. Kumpikin tapaus vaatii kuitenkin myös natriumhydroksidilisäystä.

Kuvassa 12 on esitetty korvauskemikaalien määrä käsitellyn tuhkaosuuden vaihdellessa. Voidaan todeta, että jos kaikki suodintuhka käsitellään, korvauskemikaalien määrä on huomattava.

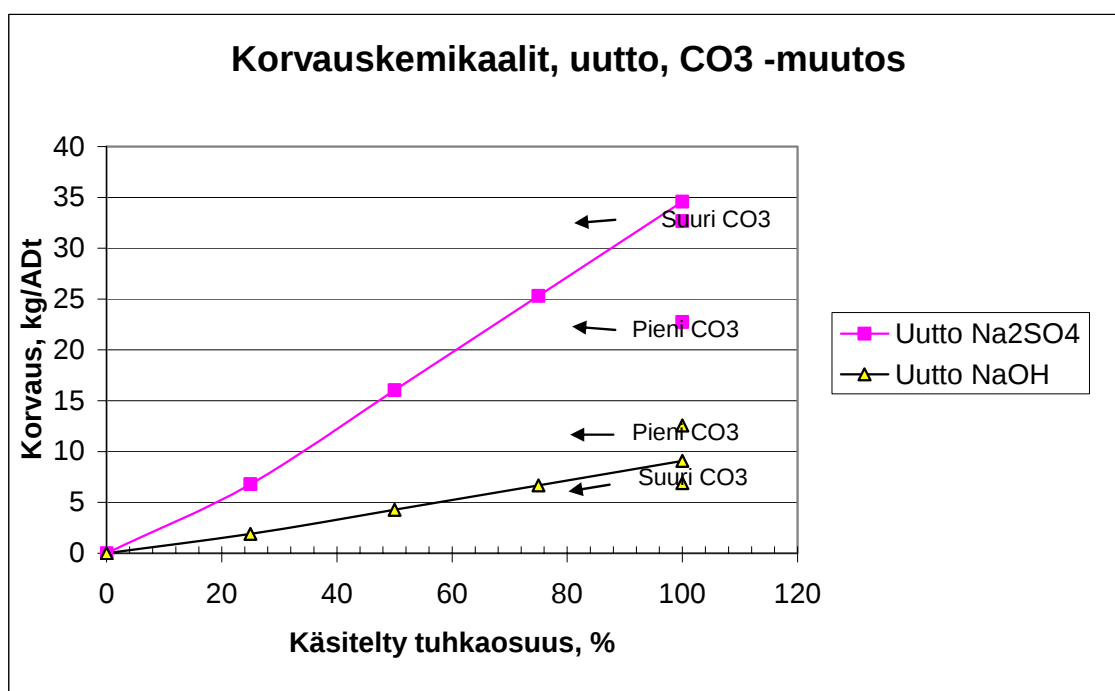


Kuva 12. Korvauskemikaalien tarve käsitellyn tuhkan osuuden funktiona.

Kuten liukoisuuskokeissa kävi ilmi, lentotuhkan karbonaattipitoisuus vaikuttaa poistovirran koostumukseen. Tämä ei sinänsä vaikuta kalium- ja klooritaseisiin, sillä nämä aineet hakeutuvat tasapainoon joka tapauksessa, mutta natrium- ja rikkihäviöt riippuvat tästä koostumuksesta. Karbonaatin vaikutuksen selvittämiseksi laskettiin tapaukset, joissa koko tuhkamäärä käsitellään uutolla tai kiteytyksellä. Tulokset on esitetty kuvissa 13 ja 14.



Kuva 13. Karbonaatin vaikutus korvauskemikaalitarpeeseen kiteytyksellä.



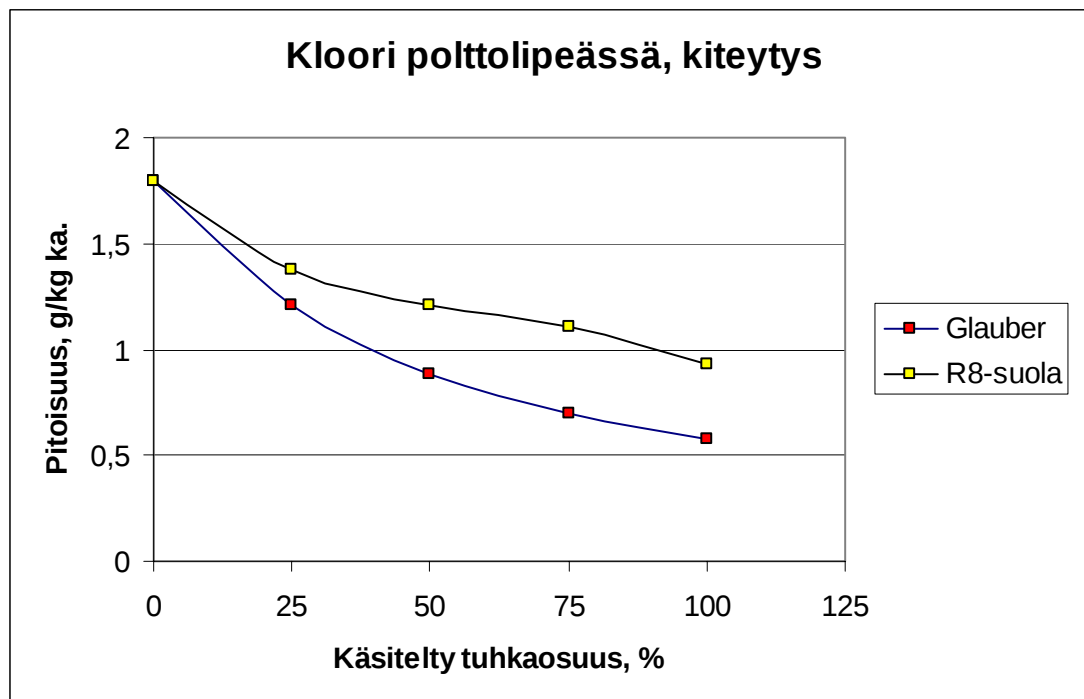
Kuva 14. Karbonaatin vaikutus korvauskemikaalitarpeeseen kiteytyksellä

Kuvista voidaan todeta, että jos karbonaattipitoisuus on suodintuhkassa pieni, tämä vähentää korvausta natriumsulfaatin muodossa, mutta lisää jonkun verran korvaustarvetta natriumhydroksidina.

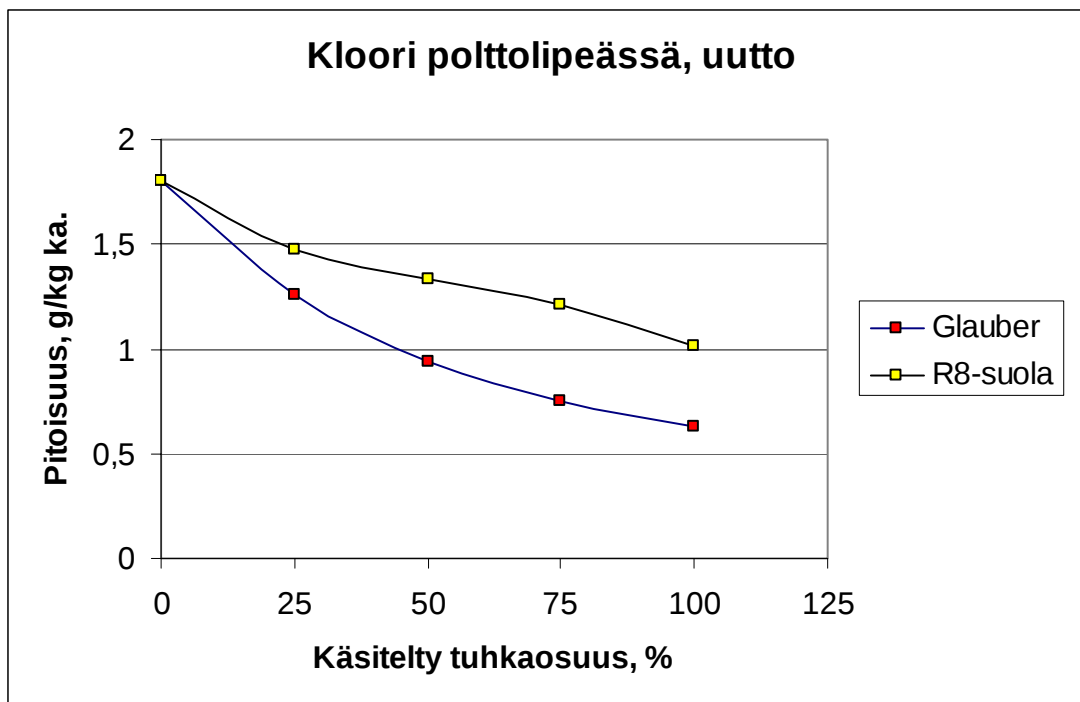
Korvaus R8-suolalla

Jos korvaus tehdään seskvisuolalla, kloori lipeäkierrossa jää korkeammalle tasolle. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty klooripitoisuus polttolipeässä kun käytetään R8-suolaa verrattuna edelliseen tapaukseen, jossa käytetään natriumsulfaattia. Vertailussa oletetaan että ostonatriumsulfaatti on puhdas, eikä sisällä huomioitavia määriä klooria. Tämä ei tietenkään ole itsestäänselvyys, vaan asiaan on kiinnitettävä huomiota suolaa hankittaessa. Kaliumin kohdalla tilanne ei muutu.

Vertailu perustuu esille saatuihin seskvisuolan analyysituloksiin ja taseisiin, mutta on selvää että asiaan vaikuttaa seskvisuolasuotimen tehokkuus. Jos kloraattia jää enemmän suolaan, se vie osittain poistoprosessin hyödyn. Kuvissa on oletettu että seskvisuolaa syntyy 25 kg/ADt. Kaarevuus alaspäin käyrän loppupäässä aiheutuu siitä, että seskvisuolan määrä ei riitä korvaamaan häviöitä täysin, jolloin loppuosa on tehtävä natriumsulfaatilla. Taselaskelmat on koottu liitteeseen 2.

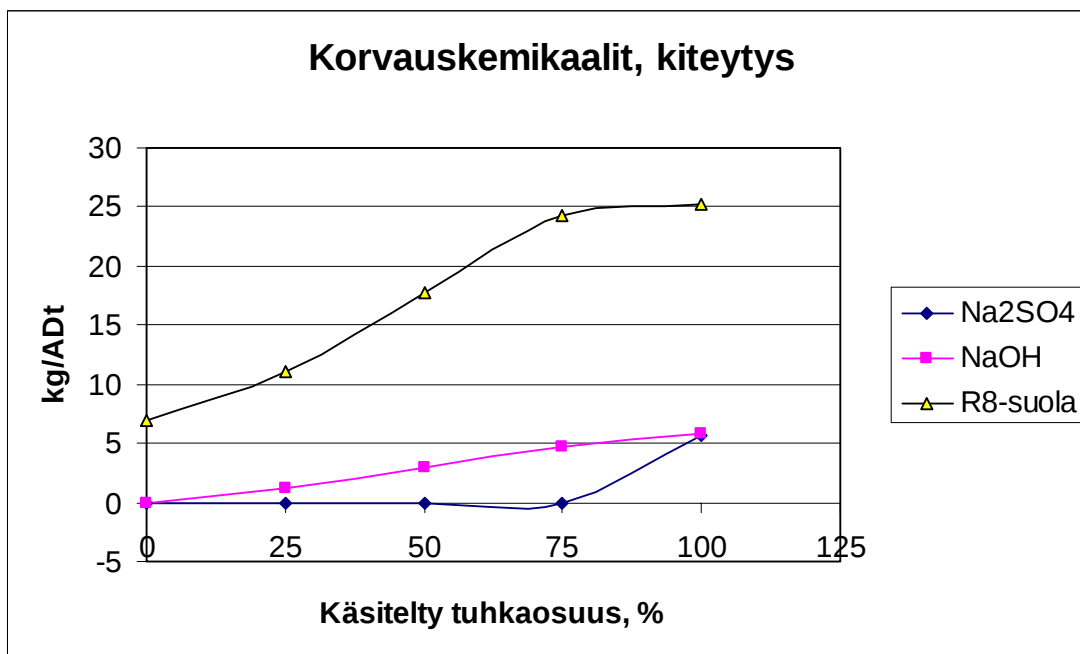


Kuva 15. Klooripitoisuus polttolipeässä kiteytyksellä kun korvauskemikaalina käytetään R8-suolaa verrattuna natriumsulfaattiin.

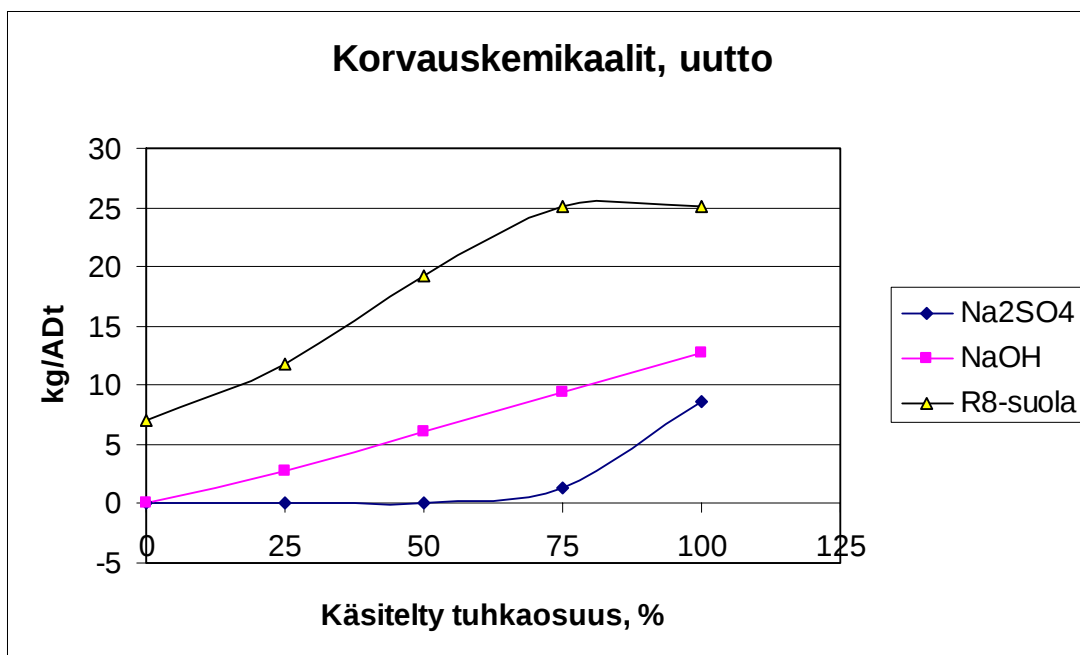


Kuva 16. Klooripitoisuus polttolipeässä uutolla kun korvauskemikaalina käytetään R8-suolaa verrattuna natriumsulfaattiin.

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty korvauskemikaalien määrä kun käytetään seskvisuolaa. Suola riittää korvaamaan häviöt kun käsitellään noin 75 % suodintuhkasta, minkä jälkeen on käytettävä ostonatriumsulfaattia. Huomattava osuus natriumsulfaatista voidaan kuitenkin korvata.



Kuva 17. Korvauskemikaalien määrä R8-suolaa käytettäessä, kiteytys.

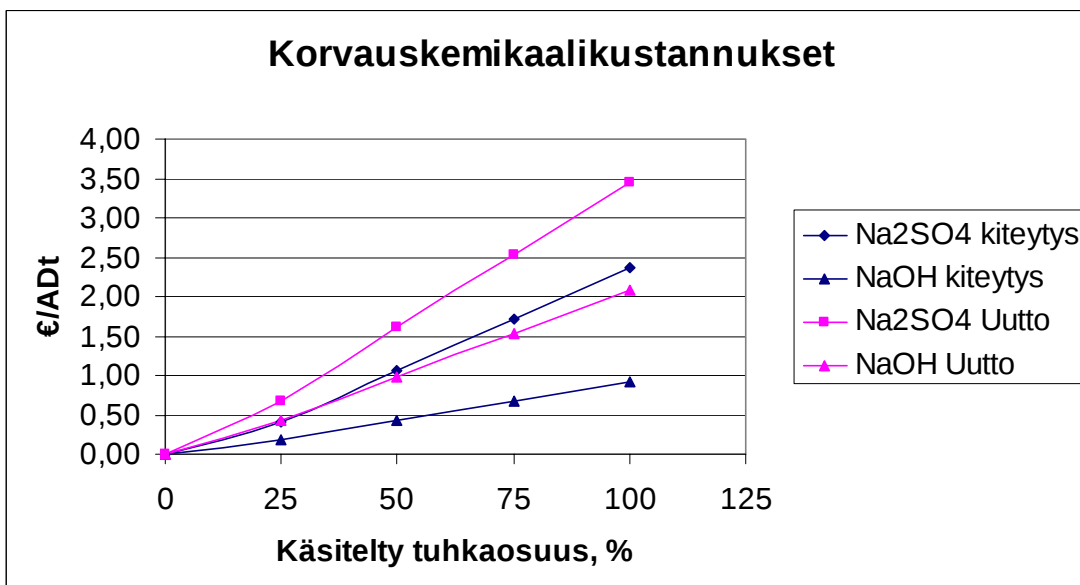


Kuva 18. Korvauskemikaalien määrä R8-suolaa käytettäessä, uutto.

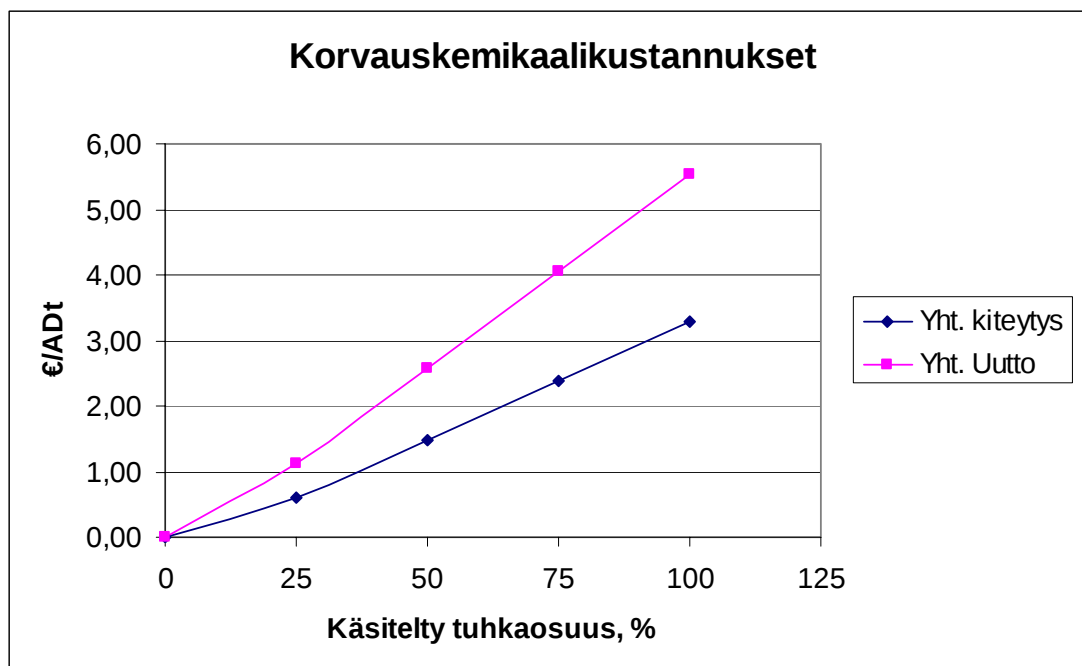
Korvauskemikaalikustannukset

Natriumsulfaatti

Korvauskemikaaleja koskevat kustannuslaskelmat ovat häilyviä hintojen vaihdellessa, mutta asian hahmottamiseksi on kuitenkin perusteltua tehdä nykyhetkeä vastaavaa arvio. Natriumsulfaatin hinnaksi on otettu 100 €/t (5) ja lipeän hinnaksi 230 €/t, mikä on 7 vuoden keskiarvo (6). Kuvassa 15 on esitetty kustannukset erikseen ja kuvassa 16 yhteenlaskettuina.



Kuva 15. Poistoprosessien korvauskemikaalikustannukset.

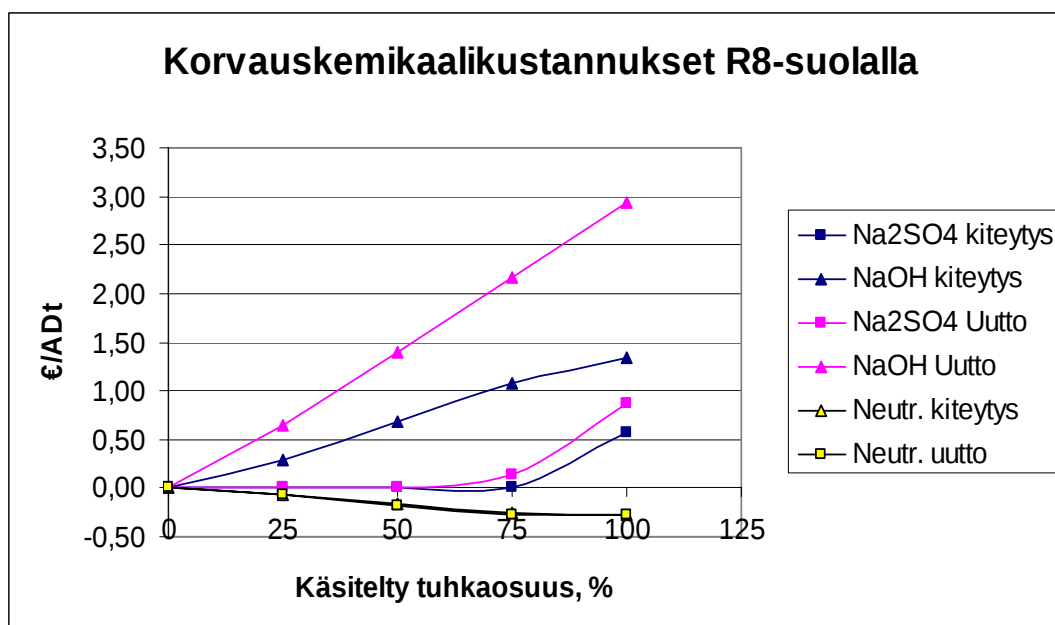


Kuva 16. Korvauskemikaalikustannukset yhteenlaskettuina.

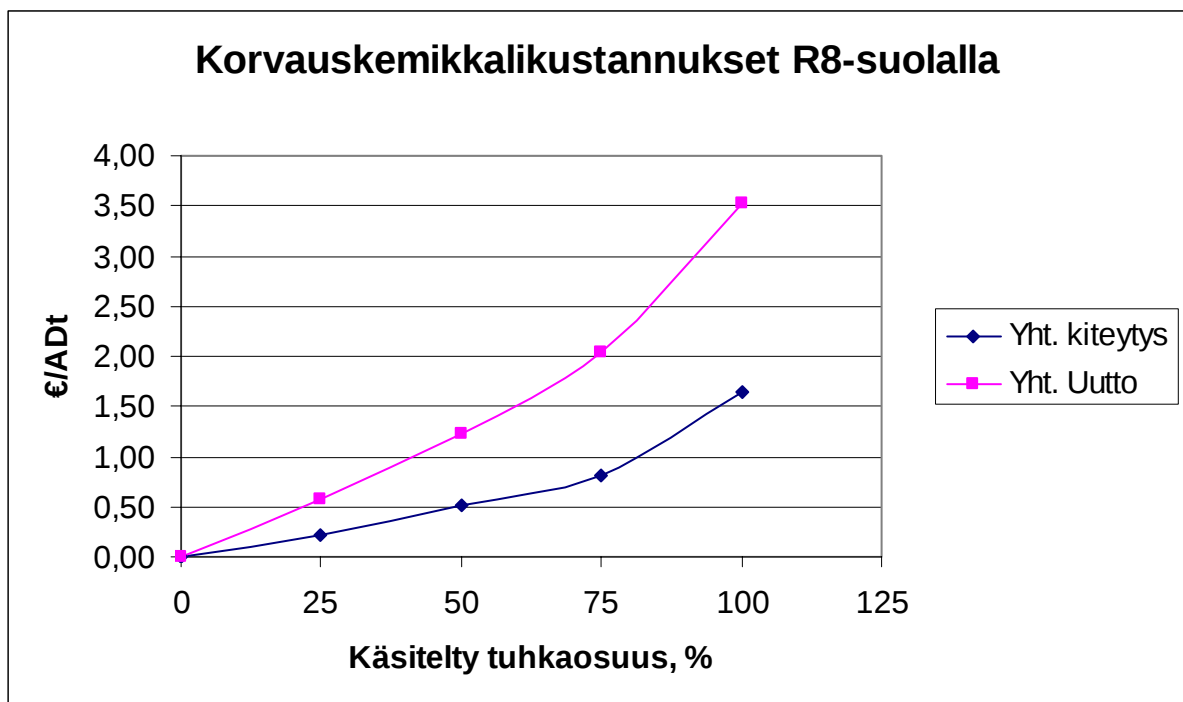
Kuten kuvista käy ilmi, kiteytysprosessi aiheuttaisi lisäkuluja korvauskemikaalien muodossa noin 4 €/ADt ja uutto noin 5,50 €/ADt, jos korvaus tehdään natriumsulfaattilla ja natriumhydroksidilla.

Seskvisuola

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty korvauskemikaalikustannukset kun käytetään seskvisuolaa. Laskelmissa on myös otettu huomioon neutralointikustannuksien säästö.

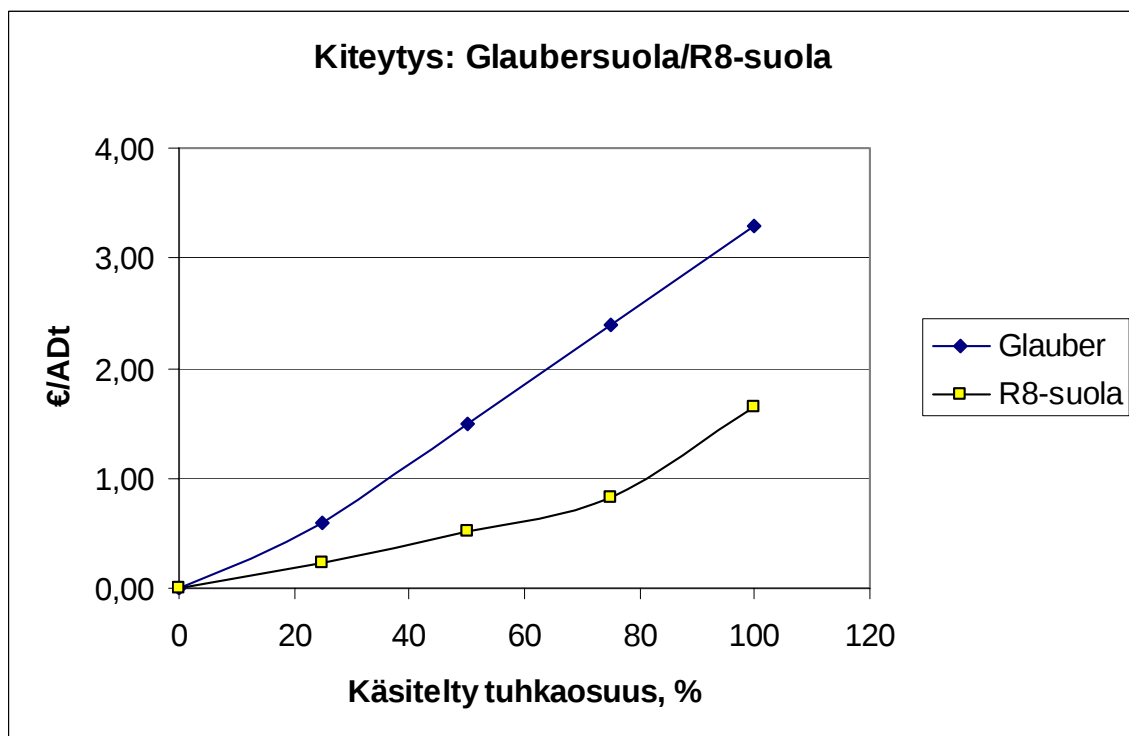


Kuva 17. Korvauskemikaalikustannukset ja neutralointikustannuksien säästö seskvisuolaa käytettäessä.

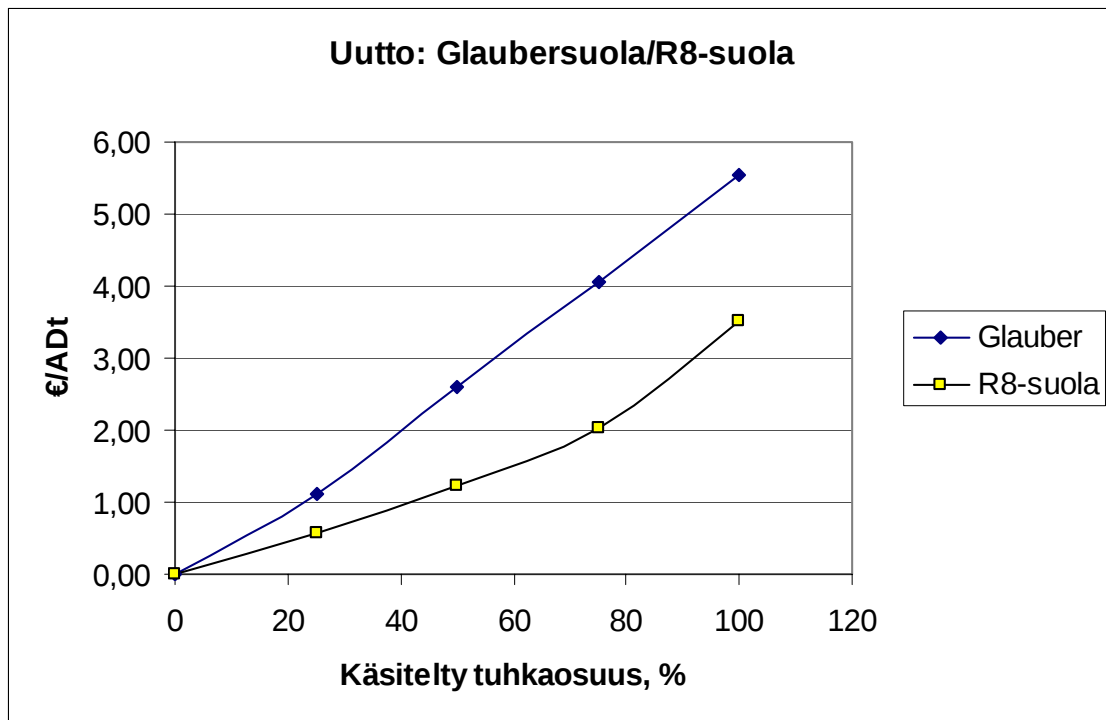


Kuva 18. Korvauskemikaalikustannukset seskvisuolaa käytettäessä yhteenlaskettuina. Neutralointikustannuksien säästö on otettu huomioon.

Kuvissa 19 ja 20 on esitetty vertailu kun natriumsulfaattia ja seskvisuolaa on käytetty korvauskemikaalina. Kuten kuvista käy ilmi, voidaan säästää noin 1/3 - 1/2 kustannuksista käyttämällä hyödyksi seskvisuolaa.



Kuva 19. Korvauskemikaalikustannukset kiteytyksellä seskvisuolaa käytettäessä.



Kuva 20. Korvauskemikaalikustannukset uutolla seskvisuolaa käytettäessä.

Kuvista voidaan todeta, että voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä seskvisuolaa käyttämällä. Jos otetaan huomioon että suurin osa poistoprosessin hyödyistä, ainakin kaliumin kohdalla, on saavutettu jo kun 50 % tuhka on käsiteltyssä, näyttäisi edullisimmalta käsitellä suunnilleen näin suurta osuutta. Korvauskemikaali-kustannukset jäisivät silloin noin kolmasosaan siitä, mitä ne olisivat kun koko virta käsitellään. Kiteytyksellä kustannukset olisivat noin 0,52 €/ADt ja uutolla noin 1,22 €/ADt. Tämä on siis kustannus, jota on punnittava lisätyn sähköntuotannon hyötyä vastaan, kun tulislämpötilaa voidaan kohottaa.

Ympäristömielessä seskvisuolan käytöllä ei olisi kovin suurta vaikutusta, sillä se sulfaattimäärä mikä nyt ajetaan talteenoton ohi kanaaliin kulkisi talteenoton kautta, ja tulisi ulos poistoprosessin jätevirtana.

Höyryn ja sähkön käyttö

Poistoprosessin höyryn ja sähkön käyttö on esitetty taulukossa 10. Sähkönkulutus on laskettu tehtaalle, joka tuottaa sellua noin 1000 ADt/d (4).

Taulukko 10. Höyryn ja sähkön käyttö.

Käsitelty tuhka	Kiteytys		Uutto	
	Höyryä (LP)	Sähköä	Höyryä (LP)	Sähköä
%	t/ADt	kW	t/ADt	kW
25	0,11	30	0	45 - 60
50	0,23	60	0	90 - 120
75	0,34	90	0	135 - 180
100	0,47	120	0	180 - 240

Taulukossa 11 on U. Johanssonin tekemä vertailu eri prosessien sähkön- ja höyrynkulutuksista sekä investointikustannuksista. (4). Arvio on tehty ruotsalaiselle tehtaalte, jossa poltetaan soodakattilassa 2000 t/d kuiva-ainetta, ja käsitellään 25 % suodintuhkasta. Kattilassa syntyy noin 145 t suodintuhkaa päivässä. Käsiteltävä virta olisi 1,5 t tunnissa. Taulukossa on myös vertailuksi vastaava kustannus Mitsubishin jäähdytyskiteytykselle MPRTM.

Taulukko 11. Prosessien vertailu.

Prosessi	Höyry	Sähkö	"Turn key"- investointikust.
	t/h	kW	M€
Kvaerner AshLeach TM	-	45	ei ilmoitettu
Andritz ARC TM	4	30	1,5
Andritz Leaching TM	-	60	0,9
Mitsubishi MPR TM	-	300	2,5

JOHTOPÄÄTÖKSET

Jos lähtökohtana on nykyaikaisen pohjoismaisen sellutehtaan tase, lentotuhkan käsittelyyn perustuvalla kaliumin- ja kloorinpoistoprosessilla voidaan saavuttaa kaliumtaso, joka on noin 1/5, ja klooritaso, joka on noin 1/3 nykyisestä. Tämä edellyttää sen, että koko lentotuhkavirta käsitellään. Rajoittavana tekijänä on se, ettei lentotuhkassa oleva näiden aineiden määrä riitä sen suurempaan poistoon. Lentotuhkaa syntyy noin 120 kg/ADt, ja kun tässä määrässä oleva vierasainemäärä poistetaan, poistoprosessin hyötysuhdetta huomioiden, tase asettuu tulomääriä vastaavaksi mainituille tasoille. Huomioitavaa on tosin, että yksittäisen tehtaan tase saattaa poiketa huomattavastikin keskiarvotaseesta.

Poistoprosessi on tehokkaimmillaan alkuvaiheessa käsiteltävän lentotuhkan osuuden kasvaessa. Kun puolet tuhkasta käsitellään, suurin osa mahdollisesta kaliumpoistosta on jo saavutettu. Jos enemmän kuin puolet käsitellään, hyödyn lisäys on pienehkö, samalla kuin korvauskemikaalikustannukset kasvavat voimakkaasti. Kloorin kohdalla nähdään vastaava tilanne, joskin vähemmän korostettuna.

Keittokemikaalihäviöt, jos kaikki suodintuhka käsitellään, ovat merkittävät, ja jos korvaus tehdään natriumsulfaatilla ja natriumhydroksidilla, niistä muodostuu noin 4 - 6 €/ADt kustannus. Toinen vaihtoehto on ottaa sisään kemikaalikiertoon enemmän hapanta suolaa R8-prosessista. Tästä aiheutuu kuitenkin jonkun verran enemmän kloorin tuloa lipeäkiertoon. Lopullinen klooritaso jää silloin jonkun verran yllämainittua suuremmaksi, mutta korvauskemikaalikustannuksista voidaan säästää huomattava osa.

Tässä työssä esitetyissä laskelmissa oletettiin, että kaliumin- ja kloorinpoistoprosessit ajetaan sillä tavalla kuin laitetoimittajat normaalisti esittävät ne. Eri puolilla maailmaa olevissa tehdassovelluksissa erityisesti klooripitoisuudet ovat kuitenkin huomattavasti suuremmat kuin pohjoismaisissa tehtaissa. Tässä työssä käytetyt pienet pitoisuudet ja alhaiset tavoitetasot aiheuttavat sen, että prosessien poistovirrassa oleva klooripitoisuus on melko kaukana kylläisyystasosta. Tästä seuraa, että natriumhäviöt jäävät melko suuriksi poistettua kloorikiloa kohti. Tätä voitaisiin välttää muuttamalla poistoprosesseja hieman, so. lisäämällä liuoksen kierrätystä ennen kuin se poistetaan systeemistä. Pienimmät natriumhäviöt yhdistettynä tehokkaimpaan poistoon saadaan kun poistettavan aineen pitoisuus on juuri kylläisyyspitoisuuden alapuolella.

Jos yllämainittua alhaisempia kalium- ja klooritasoja tavoitellaan, on käytettävä muita poistokeinoja, yksin tai yhdistelmänä suodintuhkakäsittelyn kanssa. Merkittävin kalium- ja kloorilähde on puu, ja eräs mahdollinen menetelmä olisi hakkeen uutto.

KIRJALLISUUS

1. Kvaerner, suullinen tiedonanto 2004.
2. Andritz, suullinen tiedonanto 2004.
3. K. Sirén: SOTU-hanke, osatehtävä 2: Polttoliipeän ja suodintuhkan analysointi, Soodakattilayhdistys, 2004.
4. Johansson, U. Different Methods for the Purge of Chlorides an Potassium from Electrostatic Precipitator Dust in the Kraft Mill, master thesis, Dept. of Chemical Engineering, Lund Institute of Technology, 2005, Lund, Sweden.
5. Niemelä, K. Suullinen tiedonanto 2003.
6. Kalliomäki, M. Kemira/Parviainen, K.TKK, henkilökohtainen tiedonanto 2006.

LIITE 1.**Kiteytys, 25 % tuhkasta**

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		7,313	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		1,312	0,915	0	0	
Yhteensä sisään		10,715	6,053	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		7,94	3,191	0,449	0,200	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		2,34	1,477	0,605	0,116	
Yhteensä		10,715	6,053	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
						0,671
		Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,487
Polttoliipeässä		208	64	10,42	1,21	
Suodintuhkassa		303	196	22,40	4,29	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg		36,35	23,52	2,688	0,515	25
				2,419	0,464	90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos		98,0	61,9	28,05	4,86	
Liukoisuuskokeet	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset:	Glauber-suolaa	NaOH		
			kg/ADt	kg/ADt		
			4,05	0,83		

Kiteytys, 50 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		7,917	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		3,432	2,393	0	0	
Yhteensä sisään		13,438	7,531	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,04	3,191	0,285	0,146	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		4,97	2,95	0,769	0,170	
Yhteensä		13,438	7,531	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
						0,491
		Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,3095
Polttolipeässä		211	64	6,62	0,88	
Suodintuhkassa		308	196	14,24	3,14	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg		36,92	23,52	1,708	0,377	50
				1,538	0,339	90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos		104,1	61,9	17,83	3,55	
Liukoisuuskokeet	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset:	Glauber-suolaa	NaOH		
			kg/ADt	kg/ADt		
		NaOH lisä	10,60	1,88		

Kiteytys, 75 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Sisään:						
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		8,528	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		5,550	3,87	0	0	
Yhteensä sisään		16,167	9,008	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,09	3,191	0,209	0,115	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		7,65	4,432	0,845	0,201	
Yhteensä		16,167	9,008	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
						0,387
		Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,2268
Polttolipeässä		212	64	4,85	0,70	
Suodintuhkassa		310	196	10,43	2,48	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg		37,19	23,52	1,252	0,297	75
				1,127	0,267	← 90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos		106,9	61,9	13,06	2,80	
Liukoisuuskokeet	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset:	Glauber-suolaa	NaOH		
			kg/ADt	kg/ADt		
			17,14	2,94		

Kiteytys, 100 % tuhkasta

			Na	S	K	Cl	
Sisään:			kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi			0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH			9,141	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄			0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8			1,840	1,563	0	0,075	
Muut			0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola			7,668	5,347	0	0	
Yhteensä sisään			18,898	10,485	1,077	0,349	
Ulos:			Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot			8,11	3,191	0,165	0,095	
Kiinteät ulosmenot			0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus			0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi			10,36	5,910	0,889	0,220	
Yhteensä			18,898	10,485	1,077	0,349	
Epätasapaino			0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
							0,319
			Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):			g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,179
Polttolipeässä			212	64	3,83	0,57	
Suodintuhkassa			311	196	8,23	2,04	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg			37,35	23,52	0,988	0,245	100
					0,889	0,220	← 90 % poistotehokkuus
			Na	S	K	Cl	
			g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos			108,5	61,9	10,31	2,31	
Liukoisuuskokeet	Data B	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
			Lisäykset:	Glauber-	NaOH		
				suolaa			
				kg/ADt	kg/ADt		
				23,69	4,01		

Uutto, 25 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Sisään:						
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		7,923	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		1,799	1,530	0	0	
Yhteensä sisään		11,812	6,668	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		7,93	3,191	0,479	0,209	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		3,45	2,092	0,574	0,108	
Yhteensä		11,812	6,668	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,700
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä		208	64	11,13	1,26	0,520
Suodintuhkassa		302	196	23,92	4,48	
Määrä tuhkassa, kg		36,24	23,52	2,870	0,538	
				2,296	0,430	80 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	25
K, Cl poistoliuos		128,6	77,9	24,96	4,00	
Liukoisuuskokeet	Data BL	129,2	77,9	24	2,86	
	Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
		Lisäykset:	Glauber-suolaa	NaOH		
			kg/ADt	kg/ADt		
			6,78	1,89		

Uutto, 50 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		9,294	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		4,259	3,622	0	0	
Yhteensä sisään		15,643	8,760	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,03	3,191	0,310	0,156	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		7,19	4,184	0,743	0,160	
Yhteensä		15,643	8,760	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,522
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttoliipeässä		210	64	7,21	0,94	0,3367
Suodintuhkassa		307	196	15,49	3,34	
Määrä tuhkassa, kg		36,83	23,52	1,859	0,401	
				1,487	0,321	80 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	50
K, Cl poistoliuos		133,8	77,9	16,16	2,99	
Liukoisuuskokeet	Data BL	129,2	77,9	24	2,86	
	Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
		Lisäykset:	Glauber-suolaa	NaOH		
			kg/ADt	kg/ADt		
			16,05	4,27		

Uutto, 75 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Sisään:						
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		8,528	0,000	0,000	0,010	
H2SO4		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		5,550	3,87	0	0	
Yhteensä sisään		16,167	9,008	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,09	3,191	0,209	0,115	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		7,65	4,432	0,845	0,201	
Yhteensä		16,167	9,008	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
						0,387
		Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,2268
Polttolipeässä		212	64	4,85	0,70	
Suodintuhkassa		310	196	10,43	2,48	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg		37,19	23,52	1,252	0,297	75
				1,127	0,267	← 90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos		106,9	61,9	13,06	2,80	
Liukoisuuskokeet	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH		
			suolaa			
			kg/ADt	kg/ADt		
			17,14	2,94		

Uutto, 100 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		12,060	0,000	0,000	0,010	
H2SO4		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		9,178	7,805	0	0	
Yhteensä sisään		23,328	12,943	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,10	3,191	0,182	0,103	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		14,80	8,367	0,872	0,213	
Yhteensä		23,327	12,943	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,346
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttoliipeässä		212	64	4,23	0,62	0,1975
Suodintuhkassa		311	196	9,09	2,21	
Määrä tuhkassa, kg		37,29	23,52	1,090	0,266	
				0,872	0,213	80 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	100
K, Cl poistoliuos		137,7	77,9	9,48	1,98	
Liukoisuuskokeet	Data BL	129,2	77,9	24	2,86	
	Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH		
			suolaa			
			kg/ADt	kg/ADt		
			34,58	9,09		

Kiteytys, suuri CO₃²⁻-pitoisuus

		Suuri CO₃ suodintuhkassa				
		100 % tuhkasta käsittelyssä				
		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		10,713	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		6,135	5,217	0	0	
Yhteensä sisään		18,937	10,355	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,11	3,191	0,165	0,095	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		10,40	5,779	0,889	0,220	
Yhteensä		18,938	10,355	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,319
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä		212	64	3,83	0,57	0,179
Suodintuhkassa		311	196	8,23	2,04	
Määrä tuhkassa, kg		37,35	23,52	0,988	0,245	
				0,889	0,220	90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	100
K, Cl poistoliuos		110,1	61,2	10,70	2,34	
Liukoisuuskokeet	Data C	98,8	63,2	29,9	1,22	Huom! Cl 1/6! K1/2
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset: Glauber-		NaOH		
			suolaa			
			kg/ADt	kg/ADt		
			23,11	6,74		

Uutto, suuri CO₃²⁻-pitoisuus

		Uutto				
		Suuri CO3 suodintuhkassa				
		100 % tuhkasta käsittelyssä				
		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		10,810	0,000	0,000	0,010	
H2SO4		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		1,840	1,563	0	0,075	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		8,667	7,371	0	0	
Yhteensä sisään		21,567	12,509	1,077	0,349	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,10	3,191	0,182	0,103	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		13,04	7,933	0,872	0,213	
Yhteensä		21,568	12,509	1,077	0,349	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,346
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä		212	64	4,22	0,62	0,1974
Suodintuhkassa		311	196	9,08	2,21	
Määrä tuhkassa, kg		37,29	23,52	1,090	0,266	
				0,872	0,213	80 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	100
K, Cl poistoliuos		100,6	61,2	6,95	1,64	
Liukoisuuskokeet	Data CL	94,3	58,1	17,6	0,79	Huom! Cl 1/6! K1/2
	Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH		
			suolaa			
			kg/ADt	kg/ADt		
			32,65	6,91		

Kiteytys, CO₃²⁻-pitoisuus 0%

			Pieni CO3 suodintuhkassa (0%)				
			100 % tuhkasta käsittelyssä				
			Na	S	K	Cl	
Sisään:			kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi			0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH			10,747	0,000	0,000	0,010	
H2SO4			0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8			1,840	1,563	0	0,075	
Muut			0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola			5,261	4,474	0	0	
Yhteensä sisään			18,098	9,612	1,077	0,349	
Ulos:			Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot			8,11	3,191	0,165	0,095	
Kiinteät ulosmenot			0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus			0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi			9,56	5,036	0,889	0,220	
Yhteensä			18,098	9,612	1,077	0,349	
Epätasapaino			0,000	0,000	0,000	0,000	
							Iterointi Cl
							0,319
			Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):			g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttoliipeässä			212	64	3,83	0,57	0,179
Suodintuhkassa			311	196	8,23	2,04	
Määrä tuhkassa, kg			37,35	23,52	0,988	0,245	
					0,889	0,220	90 % poistotehokkuus
			Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
			g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	100
K, Cl poistoliuos			116,1	61,2	11,78	2,68	
Liukoisuuskokeet		Data D	103,7	85,2	32,9	1,4	Huom! Cl 1/6! K1/2
		Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
			Lisäykset:		Glauber-suolaa	NaOH	
					kg/ADt	kg/ADt	
					19,82	6,80	

Uutto, CO₃²⁻-pitoisuus 0%

			Uutto				
			Pieni CO3 suodintuhkassa (0%)				
			100 % tuhkasta käsittelyssä				
			Na	S	K	Cl	
			kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Sisään:							
Puu ja vesi			0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH			14,064	0,000	0,000	0,010	
H2SO4			0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8			1,840	1,563	0	0,075	
Muut			0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola			6,038	5,135	0	0	
Yhteensä sisään			22,192	10,273	1,077	0,349	
Ulos:			Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot			8,10	3,191	0,182	0,103	
Kiinteät ulosmenot			0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus			0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi			13,66	5,697	0,872	0,213	
Yhteensä			22,192	10,273	1,077	0,349	
Epätasapaino			0,000	0,000	0,000	0,000	
							Iterointi Cl
							0,346
			Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):			g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä			212	64	4,22	0,62	0,1974
Suodintuhkassa			311	196	9,08	2,21	
Määrä tuhkassa, kg			37,29	23,52	1,090	0,266	
					0,872	0,213	80 % poistotehokkuus
			Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
			g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	100
K, Cl poistoliuos			146,7	61,2	11,13	2,28	
Liukoisuuskokeet		Data DL	136,7	106,4	28,2	1,1	Huom! Cl 1/6! K1/2
		Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
			Lisäykset:	Glauber-suolaa	NaOH		
				kg/ADt	kg/ADt		
				22,75	12,57		

LIITE 2. Tasapainotus seskvisuolalla

Kiteytys, 25 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		7,549	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		2,917	2,478	0	0,119	
Muut		0,1955	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		0,000	0	0	0	
Yhteensä sisään		10,716	6,053	1,077	0,393	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		7,94	3,191	0,449	0,228	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		2,34	1,477	0,605	0,132	
Yhteensä		10,715	6,053	1,077	0,393	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
						0,764
		Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,487
Polttolipeässä		208	64	10,42	1,38	
Suodintuhkassa		303	196	22,40	4,89	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg		36,35	23,52	2,688	0,587	25
				2,419	0,528	90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos		98,0	61,9	28,05	5,53	
Liukoisuuskokeet	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset:	Glauber-suolaa	NaOH	Sesкви-suolaa	
			kg/ADt	kg/ADt	%	
			0,00	1,24	44	

Kiteytys, 50 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		8,532	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		4,657	3,956	0	0,190	
Muut		0,1955	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		0,000	0	0	0	
Yhteensä sisään		13,439	7,531	1,077	0,464	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,04	3,191	0,285	0,200	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		4,97	2,955	0,769	0,232	
Yhteensä		13,438	7,531	1,077	0,464	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
						0,67
		Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,3095
Polttolipeässä		211	64	6,62	1,21	
Suodintuhkassa		308	196	14,24	4,29	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg		36,92	23,52	1,708	0,515	50
				1,538	0,463	90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos		104,1	61,9	17,83	4,85	
Liukoisuuskokeet	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH	Sesкви-	
			suolaa		suolaa	
			kg/ADt	kg/ADt	%	
			0,00	2,95	70	

Kiteytys, 75 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		9,522	0,000	0,000	0,010	
H2SO4		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		6,396	5,433	0	0,261	Ei oteta kaikkea R8-suolaa
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		0,000	0	0	0	
Yhteensä sisään		16,168	9,008	1,077	0,535	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,09	3,191	0,209	0,183	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		7,65	4,432	0,845	0,318	
Yhteensä		16,168	9,008	1,077	0,534	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
						0,614
		Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,2267
Polttolipeässä		212	64	4,85	1,11	
Suodintuhkassa		310	196	10,43	3,93	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg		37,19	23,52	1,251	0,472	75
				1,126	0,424	90 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos		106,9	61,9	13,06	4,45	
Liukoisuuskokeet	Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
	Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH	Sesкви-	
			suolaa		suolaa	
			kg/ADt	kg/ADt	%	
			0,00	4,67	97	

Kiteytys, 100 % tuhkasta

			Na	S	K	Cl	
Sisään:			kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi			0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH			10,183	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄			0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8	Max		6,620	5,623	0	0,270	
Muut	mängd		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola	salt		1,846	1,287	0	0	
Yhteensä sisään			18,899	10,485	1,077	0,544	
Ulos:			Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot			8,11	3,191	0,165	0,154	
Kiinteät ulosmenot			0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus			0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi			10,36	5,910	0,889	0,357	
Yhteensä			18,898	10,485	1,077	0,543	
Epätasapaino			0,000	0,000	0,000	0,000	Iterointi Cl
							0,516
			Na	S	K	Cl	Iterointi K
Pitoisuudet (SOTU):			g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	0,179
Polttolipeässä			212	64	3,83	0,93	
Suodintuhkassa			311	196	8,23	3,30	Käsitelty tuhka, %
Määrä tuhkassa, kg			37,35	23,52	0,988	0,396	100
					0,889	0,357	90 % poistotehokkuus
			Na	S	K	Cl	
			g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
K, Cl poistoliuos			108,5	61,9	10,31	3,74	
Liukoisuuskokeet		Data B	97,6	61,9	28,8	3,62	
		Data A	96,3	61,2	30,9	7,12	
			Lisäykset:	Glauber-	NaOH	Sesкви-	
				suolaa		suolaa	
				kg/ADt	kg/ADt	%	
				5,70	5,82	100	

Uutto, 25 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		8,449	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		3,113	2,644	0	0,127	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		0,000	0	0	0	
Yhteensä sisään		11,812	6,219	1,077	0,401	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		7,93	3,191	0,479	0,243	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		3,45	1,643	0,574	0,125	
Yhteensä		11,812	6,219	1,077	0,401	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,815
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä		208	64	11,13	1,47	0,52
Suodintuhkassa		302	196	23,92	5,22	
Määrä tuhkassa, kg		36,24	23,52	2,870	0,626	
				2,296	0,501	80 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	25
K, Cl poistoliuos		128,6	61,2	24,96	4,66	
Liukoisuuskokeet	Data BL	129,2	77,9	24	2,86	Huom! K1/2 Cl 1/2
	Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH	Sesкви-	
			suolaa		suolaa	
			kg/ADt	kg/ADt	%	
			0,00	2,81	47,0	

Uutto, 50 % tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH	6,836	10,345	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8	1,84	5,048	4,288	0	0,206	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		0,000	0	0	0	
Yhteensä sisään		15,643	7,863	1,077	0,480	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,03	3,191	0,310	0,220	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		7,19	3,287	0,743	0,227	
Yhteensä		15,643	7,863	1,077	0,480	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,738
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä		210	64	7,21	1,33	0,3367
Suodintuhkassa		307	196	15,49	4,72	
Määrä tuhkassa, kg		36,83	23,52	1,859	0,567	
				1,487	0,453	80 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	50
K, Cl poistoliuos		133,8	61,2	16,16	4,22	
Liukoisuuskokeet	Data BL	129,2	77,9	24	2,86	Huom! K1/2 Cl 1/2
	Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH	Sesqui-	
			suolaa		suolaa	
			kg/ADt	kg/ADt	%	
			0,00	6,10	76,3	

Uutto, 75% tuhkasta

		Na	S	K	Cl	
Sisään:		kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi		0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH		12,251	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄		0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8		6,620	5,623	0	0,270	
Muut		0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola		0,362	0,308	0	0	
Yhteensä sisään		19,483	9,506	1,077	0,544	
Ulos:		Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot		8,07	3,191	0,230	0,201	
Kiinteät ulosmenot		0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus		0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi		10,98	4,930	0,825	0,310	
Yhteensä		19,483	9,506	1,077	0,544	
Epätasapaino		0,000	0,000	0,000	0,000	
						Iterointi Cl
						0,673
		Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):		g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä		211	64	5,33	1,21	0,249
Suodintuhkassa		309	196	11,45	4,31	
Määrä tuhkassa, kg		37,12	23,52	1,374	0,517	
				1,100	0,413	80 % poistotehokkuus
		Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	75
K, Cl poistoliuos		136,3	61,2	11,95	3,85	
Liukoisuuskokeet	Data BL	129,2	77,9	24	2,86	Huom! K1/2 Cl 1/2
	Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
		Lisäykset:	Glauber-	NaOH	Sesкви-	
			suolaa		suolaa	
			kg/ADt	kg/ADt	%	
			1,36	9,42	100,0	

Uutto, 100 % tuhkasta

			Na	S	K	Cl	
Sisään:			kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	kg/ADt	
Puu ja vesi			0,054	0,207	1,059	0,209	
NaOH			14,163	0,000	0,000	0,010	
H ₂ SO ₄			0,000	2,466	0,000	0,000	
Hapan suola R8			6,620	5,623	0	0,270	
Muut			0,196	0,902	0,018	0,055	
Glaubersuola			2,294	1,951	0	0	
Yhteensä sisään			23,327	11,149	1,077	0,544	
Ulos:			Na	S	K	Cl	
Muuttuvat ulosmenot			8,10	3,191	0,182	0,167	
Kiinteät ulosmenot			0,431	1,385	0,023	0,033	
ESP -liuotus			0,000	0,000	0,000	0,000	
K, Cl poistoprosessi			14,80	6,574	0,872	0,344	
Yhteensä			23,328	11,149	1,077	0,544	
Epätasapaino			0,000	0,000	0,000	0,000	
							Iterointi Cl
							0,56
			Na	S	K	Cl	
Pitoisuudet (SOTU):			g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	g/kg ka	Iterointi K
Polttolipeässä			212	64	4,22	1,01	0,1974
Suodintuhkassa			311	196	9,08	3,58	
Määrä tuhkassa, kg			37,29	23,52	1,090	0,430	
					0,872	0,344	80 % poistotehokkuus
			Na	S	K	Cl	Käsitelty tuhka, %
			g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	100
K, Cl poistoliuos			137,7	61,2	9,48	3,20	
Liukoisuuskokeet		Data BL	129,2	77,9	24	2,86	Huom! K1/2 Cl 1/2
		Data AL	106	65,8	29,3	4,72	
			Lisäykset:	Glauber-	NaOH	Seskvi-	
				suolaa		suolaa	
				kg/ADt	kg/ADt	%	
				8,64	12,74	100,0	