



MINDRE DEPONERING AV FARLIG AVFALL

Potensialet for økt materialgjenvinning og
minimering av tungmetallholdig farlig avfall





Mindre deponering av farlig avfall – Potensialet for økt materialgjenvinning og minimering av tungmetallholdig farlig avfall.

Dette prosjektet er utført av Bergfald Miljørådgivere på oppdrag for Miljødirektoratet, 2019.

Utgitt av: BERGFALD MILJØRÅDGIVERE, OSLO/FEBRUAR 2019. www.bergfald.no

Forfattere: BÅRD BERGFALD (BERGFALD MILJØRÅDGIVERE) bard@bergfald.no / KARL KRISTENSEN (BERGFALD MILJØRÅDGIVERE) karl@bergfald.no

Kontroller: SARA ALAINEZHAD KJÆRVIK (BERGFALD MILJØRÅDGIVERE) sara@bergfald.no

Utforming: GAUTE HAUGLID-FORMO (BERGFALD MILJØRÅDGIVERE) gaute@bergfald.no

MINDRE DEPONERING AV FARLIG AVFALL

Potensialet for økt materialgjenvinning
og minimering av tungmetallholdig farlig avfall

Februar, 2019



ORDFORKLARINGER OG FORKORTELSER

7096: Den store sekkeposten for uorganisk farlig avfall hvor store mengder av avfallet plasseres.

Avfallsregnskap: Systematisk og helhetlig kvantifisering av delstrømmer av avfall innen et avgrenset område.

Avfallsstrøm: Avfallsmengde av en viss materialtype eller annen felles karakterisering som er i bevegelse mellom opprinnelsessted og sluttbehandlingspunkt.

BM: Bergfald Miljørådgivere

CAPEX: «Capital Expenditures». Investeringskostnad.

Delstrøm: Understrøm i en avfallsstrøm.

Downcycling: Materialgjenvinning av et produkt eller kjemisk stoff til en annen og mindre avansert anvendelse enn første gangs bruk.

Dross: Slagg/avfallslaget på toppen av aluminium elektrolyseceller. Blir tidvis raket av og kalles da ofte avrakingsslagg.

EAL-kapittel: Hovedkategori for EAL-listen. Angir i mange tilfeller avfallets bransjemessige opprinnelse.

EAL: Den europeiske avfallslisten.

Elektrolyse/elektrolytisk: Teknologi som bruker elektrisitet til å redusere metalloksider/metallsalter til metaller.

FGD: «Flue Gas Desulphurization», en prosess for rensing av svovelutslipp fra kullkraftverk som skaper store mengder gips.

Flusspat: Det mest brukte råstoffet til produksjon av fluorkjemikalier. Formel CaF_2 . Har tidvis forurensninger av bly og sølv.

Filtrat: Væsken som kommer ut av en filtrering.

Hydrolytiske prosesser: Teknologier som benytter løselighet i vann til å endre eller separere.

Ilmenitt: Det mest brukte råstoffet til produksjon av titandioksid. Formel FeTiO_3 . For hvert TiO_2 er det altså en FeO .

Kalsinering: Oppvarming av en masse for å drive av eksempelvis vann eller CO_2 .

Kryolitt: Strengt tatt kun forbindelsen Na_3AlF_6 , men brukes i noen referanser som samlebetegnelse på en rekke fluorforbindelser som brukes og/eller oppstår i aluminiumsverk.

Ligand: Aktiv del av et molekyl som brukes til å fange løste ioner eller molekyler fra en løsning.

OPEX: «Operational Expenditures». Driftskostnader.

Organisk avfall: Avfall som har en stoffsammensetning som domineres av komplekse karbonforbindelser hvor flere karbonatomer er bundet sammen i kjeder eller ringstrukturer. I tillegg kommer enatomige karbonforbindelser som metan, metanol, formaldehyd og metanol. Organisk materiale vil i stor grad stamme fra biologiske organismer i en eller annen form.

Presipitat: Et materiale som feller ut/har falt ut fra en væske og danner en fast masse.

Pyrolytiske prosesser: Teknologier som benytter høy varme til å destruere, endre eller separere.

Sintring: Teknologi for å endre egenskaper til et materiale ved bruk av høy varme oppunder smeltepunktet.

SPL: «Spent Pot Liner». Samlebetegnelse på brukt karbonkatode og murverk fra aluminiumsovner.

SSB: Statistisk sentralbyrå.

SX, L/L: «Solvent Extraction, Liquid/Liquid separation». Mye brukt teknologi for anriking og separasjon av en del metaller.

Uorganisk avfall: Inkluderer rene grunnstoffer og alle kjemiske forbindelser av andre grunnstoffer enn karbon. I tillegg kommer uorganiske forbindelser av karbon som karbondioksid, karbonmonoksid og deres kjemiske derivater som eksempelvis metallkarbonater.

Upcycling: Materialgjenvinning av et produkt eller kjemisk stoff til en annen og mer avansert anvendelse enn første gangs bruk.

INNHold



ORDFORKLARINGER OG FORKORTELSER.....	4
SUMMARY	6
1. INNLEDNING	8
2. BESKRIVELSE AV TUNGMETALLHOLDIGE AVFALLSSTRØMMER	10
2.1 Avfallsregnskap for tungmetallholdig farlig avfall i Norge.....	11
3. MARKEDSMESSIGE HOVEDTRENDER FOR RELEVANTE METALLER OG MINERALSKE RÅSTOFFER	15
4. MULIGHETSROM FOR UTVINNING AV SEKUNDÆRE RÅSTOFFER FRA TUNGMETALLHOLDIGE AVFALLSSTRØMMER.....	20
4.1 Gips; billig, nyttig og med store endringer foran seg	20
4.2 Jernsulfat.....	31
4.3 Avfall fra aluminiumindustrien	33
4.4 Katodeavfall	35
4.5 Sinkholdig filterstøv	46
4.6 Gjenvinning av mangan (og andre metaller)	47
4.7 Antimon og barium	50
4.8 Gallium fra støv fra aluminiumsmelteverk	50
4.9 Salt; billig og nødvendig	53
4.10 Elbilmetaller	55
4.11 Bioaske.....	56
5. KOMMENTARER TIL UTVALGTE AVFALLSSTRØMMER.....	57
5.1 Kvikksølvholdig aktivt karbon	57
5.2 Blåsesand	57
5.3 Potensielle nye avfallsfraksjoner som man bør ta høyde for	60
6. BARRIERER OG VIRKEMIDLER FOR ØKT MATERIALGJENVINNING	62
6.1 Aktuelle økonomiske virkemidler.....	63
6.2 Aktuelle juridiske virkemidler.....	63
6.3 Aktuelle kommunikasjonsvirkemidler.....	64
7. KONKLUSJON, ANBEFALINGER OG FORSLAG TIL VIDERE ARBEID	66
7.1 Økonomiske virkemidler	67
7.2 Juridiske virkemidler	67
7.3 Kommunikasjonsmessige virkemidler.....	68
BIBLIOGRAFI.....	69
NOTER	72

SUMMARY



Bergfald Environmental Consultants have been engaged by the Environmental Agency to investigate the potential to reduce the volume of inorganic hazardous wastes that require treatment before placement in the national dedicated landfill. Norway has several large metallurgical and chemical industries generating substantial volumes of such wastes. The task has been to find technologies and markets for recovery and recycling operations, and technologies for volume reductions.

The work has been carried out in only four weeks, so certain priorities have been made. The focus has been on waste types that are generated with more than 10.000 tons per year, with rather stable volumes and chemistry. Technologies with at least pilot plant operation experience have been prioritized before conceptual ideas and patented technology without practical tests. Products with significant volume of markets and possibility of market access have been considered most important. In the cases of large volumes, but no probable markets for products, options for volume reductions have been investigated. Fly ash is specifically not given any attention, as the recycling potential of this waste type already has been described in many other reports.

There are obviously several technologies, waste fractions and markets that have not been investigated, so there is ample possibility to extend and expand on this work. Heavy metal-containing waste makes up a large part of inorganic hazardous waste that require designated landfilling. Norway have limited remaining capacity to landfill such waste. EUs circular economy initiative, that Norway is committed to support, empathizes increased attention to the recycling of waste recourses, also in hazardous waste. EUs initiative on securing supplies of critical raw material is also relevant, as some of the waste fractions contain these critical materials.

Put together these concerns create an increased urgency when it comes to identifying potential hazardous waste streams that can be safely and cost efficiently recycled to new valuable resources, and thus minimizes the need for landfilling.

Potential for recycling and minimization of heavy metal-containing waste in Norway

Total inorganic hazardous waste that arose or was treated in Norway in 2017 is estimated by Statistics Norway to 670.000 tons. This report estimates that 230.000 tons of this waste can be recycled or treated in a way that minimizes the need for landfilling of hazardous waste. Included in this figure is also some imported waste. Dust and slag containing zinc and manganese and spent pot liner constitute the most important waste fractions with a potential significant value. In addition, recycling or detoxification of gypsum and ferrous sulphate together with other types of salts may also limit the amount of hazardous waste landfilling that today takes place in Norway.

General observations

Recommendations of possible recycling projects are based on current markets for recycled materials and available technology that makes responsible recycling possible. This is given a broad description in chapter 3 and 4 in this report.

Although the market for gypsum is very large, recycling of gypsum is limited by very low prices. Reduced availability of gypsum from coal fired energy production, which contributes with a large part of today's supply of raw material, will make recycling of gypsum more attractive.

Large amounts of ferrous sulphate may also be recovered from hazardous waste that today is landfilled.

The market for this material is smaller and not so easily accessed as for gypsum.

The aluminum industry generates several types of inorganic hazardous waste, including slag, dross and spent pot liner. Parts of these waste streams are already recycled, but there seems to still be a potential for increased recycling of these waste streams. The importance of further improvement of recycling technology of spent pot liner is urgent, especially recovery of graphite and fluoride. Gallium is an example of an element of critical importance that may be recycled to a larger degree than what has happened so far.

Dust, containing zinc- and manganese, is generated from many different foundries and smelters. The levels of these economically interesting metals are often high and should attract higher interest from the recycling industry.

Industrial slag and dust often contain high levels of useful salts in addition to lower levels of metals of higher economic value. Recovery of salt from these waste streams may not be as economic favorable, compared to metal extraction, but will minimize remaining waste volumes to a larger degree. Recovery of potassium is of especially interest in this context.

Perceived barriers against increased recycling

Several factors are considered as barriers to increased recycling of heavy metal containing hazardous waste. These factors include, but are not necessarily limited to:

1. Too small waste streams with too low or unpredictable content of recyclable material.
2. Too immature technology available for recycling.
3. Risk of accidents or environmental damaged caused by recycling operations.
4. Long distances and/or high cost of logistics for getting raw material to recycling facility or product to market.
5. Protests and damaged public relations caused by establishing recycling plants for hazardous waste.
6. The effectiveness of these barriers will to a certain degree be limited for recycling processes of good profitability, as these will permit larger efforts dedicated to mitigating these barriers.

Potential political measures to compensate for barriers to recycling

Legal, economic and communicative instruments should all be considered as potential political measures, when forming policy that aims to increase the level of recycling of hazardous waste and limit the remaining waste amounts in need of landfilling as hazardous waste.

Recommendations in this report include:

1. Arrangements for recycling of gypsum, and to a lesser degree ferrous sulphate, should be encouraged, possibly through public procurement schemes. A tax on virgin gypsum and fertilizers could potentially help in this regard.
2. Norway should recycle spent pot liner generated by the aluminum industry. A tax on virgin aluminium fluoride, combined with some subsidization of recycled aluminum fluoride, should be considered as an incentive for this process.
3. A general ban on landfilling of hazardous waste containing high levels of zinc, manganese, gallium or other important metals that may be recycled, should be considered.
4. Research and development of new recycling technology, and economic support of industrial initiatives in implementing this technology, should be supported to a much larger degree than what Norway does today.
5. For waste streams containing high levels of valuable metals or other minerals, where necessary recycling technology does currently not exist, or prices are considered to be too low, a system of temporarily storage in compartmentalized landfills allowing easy and precise extraction in the future when recycling is a more realistic and attractive option, should be considered.
6. Export licenses should be made more easily accessible for waste streams that can only be recycled abroad.
7. Systems for better and more cost-efficient classification, pretreatment and identification of best practice end treatment, including available recycling options. This is especially relevant for small waste streams of hazardous waste.

The opinions and recommendations in this report is given by Bergfald Environmental Consultants AS and is not necessarily an expression of the official view of the Norwegian government.

1. INNLEDNING



Farlig avfall er avfall som inneholder stoffer som kan skade menneskelig helse, ytre miljø eller materielle verdier. Det gjelder derfor særskilte krav for hvordan slikt avfall skal håndteres. For organisk farlig avfall er sluttbehandlingen typisk forbrenning ved høy temperatur hvor skadelige forbindelser destrueres. For uorganisk farlig avfall vil sluttbehandling typisk være deponering under ekstra tette og sikre betingelser som begrenser fare for utlekking eller annen spredning av farlige stoffer.

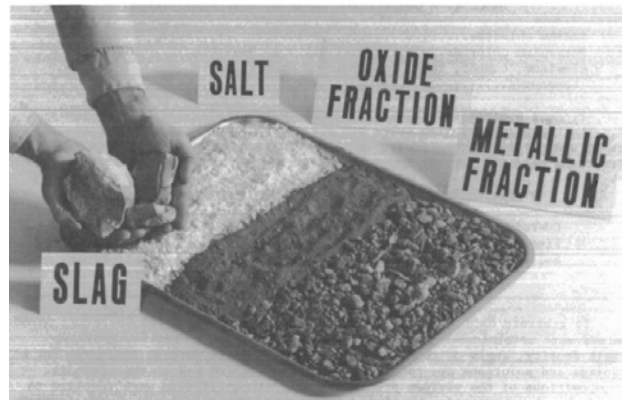
Visse typer uorganisk farlig avfall inneholder også verdifulle stoffer og materialer som kan være interessante å gjenvinne. I tilfeller hvor det er et motsetningsforhold mellom sikker håndtering av skadelige stoffer i det farlige avfallet og ressursutnyttelse bør hensynet til ressursutnyttelse alltid vike. Men i tilfeller hvor materialgjenvinning av farlig avfall kan skje uten større risiko sammenlignet med annen avfallsgjenvinning vil dette kunne være ønskelig. Ved materialgjenvinning av uorganisk farlig avfall oppnås miljøgevinster gjennom redusert miljøfotavtrykk fra produksjon av stoffer og materialer som gjenvinningen erstatter og ved at deponeringsbehovet blir mindre. Samtidig forebygges også mulige knapphetstilstander på stoffene som gjenvinnes. For at materialgjenvinningen samlet sett skal være miljøfordelaktig må summen av disse miljøgevinstene være større enn det negative miljøfotavtrykket som materialgjenvinningen medfører.

Deponeringsbehovet for uorganisk farlig avfall kan i noen tilfeller også minimeres gjennom avgifting av uorganisk farlig avfall. Dette forutsetter renseprosesser som skiller ut stoffene som gjør avfallet farlig eller i noen tilfeller stabilisering som begrenser avfallets utlekkingspotensial.

Norge står per februar 2019 overfor en situasjon hvor nasjonalt tilgjengelig deponeringskapasitet for uorganisk farlig avfall er i ferd med fylles opp uten at det foreløpig er klart hvordan denne kapasiteten skal utvides. Samtidig stiller EUs initiativ til sirkulær økonomi krav om økt innsats for utnyttelse av ressurser i avfall også fra farlig avfall. Av denne grunn er det økt interesse for å vurdere mulighetene som finnes for materialgjenvinning og ytterligere avfallsminimering av uorganisk farlig avfall.

Denne rapporten vurderer potensialet for økt materialgjenvinning av uorganisk farlig avfall i Norge med størst fokus på tungmetallholdig avfall. Avfall fra prosessindustrien vies mest oppmerksomhet, mens eksempelvis askerester, restavfall fra metallfragmentering, cyanidholdig avfall, EE-avfall og avfall fra petroleumssektoren og bygg- og anleggsbransjen vies mindre oppmerksomhet.

Den nasjonale hovedløsningen for deponering av uorganisk avfall er NOAHs anlegg på Langøya utenfor Holmestrand. I tillegg deponeres mindre mengder hos Miljøteknikk Terrateam i Mo i Rana. En god del uorganisk farlig avfall som oppstår i prosessindustrien deponeres dessuten på bedriftsinterne deponier med særskilt tillatelse til dette. Visse typer uorganisk farlig avfall tillates også lagt i egne deponiceller på deponier for ordinært avfall. Denne rapporten har lagt ekstra vekt på å beskrive gjenvinning- og minimeringsmuligheter for avfall som deponeres på deponier for farlig avfall og i mindre grad industrideponier og deponier for ordinært avfall.



Ingeniører har historisk vært opptatt av innovasjon, ressurseffektivitet og gjenvinning, når ikke økonomi og billige deponiløsninger har gjort dette uaktuelt. ➡ viser stein fra Keopspyramiden som kan være støpt med forbrenningsaske¹ – et avfall fra nærliggende byer, ➡ Bildet til høyre er hentet fra et av de de første anleggene for prosessering av dross i Amerika.² I dag blir mange av disse biproduktene deponert som avfall istedenfor å benyttes til samfunnsnyttige formål.

Det er i denne rapporten ikke vurdert verken deponeringsteknologi – eller sted for de fraksjonene vi ikke har funnet aktuell gjenvinningsteknologi for. Etter spesifisering fra oppdragsgiver er flyveaske eller importerte volumer ikke hensyntatt, ut over at de kan utgjøre et mengdegrunnlag for evt. gjenvinningsanlegg. Alle øvrige prioriteringer, samt alle vurderinger og oppfatninger som gjengis i denne rapporten står kun for Bergfalds regning.

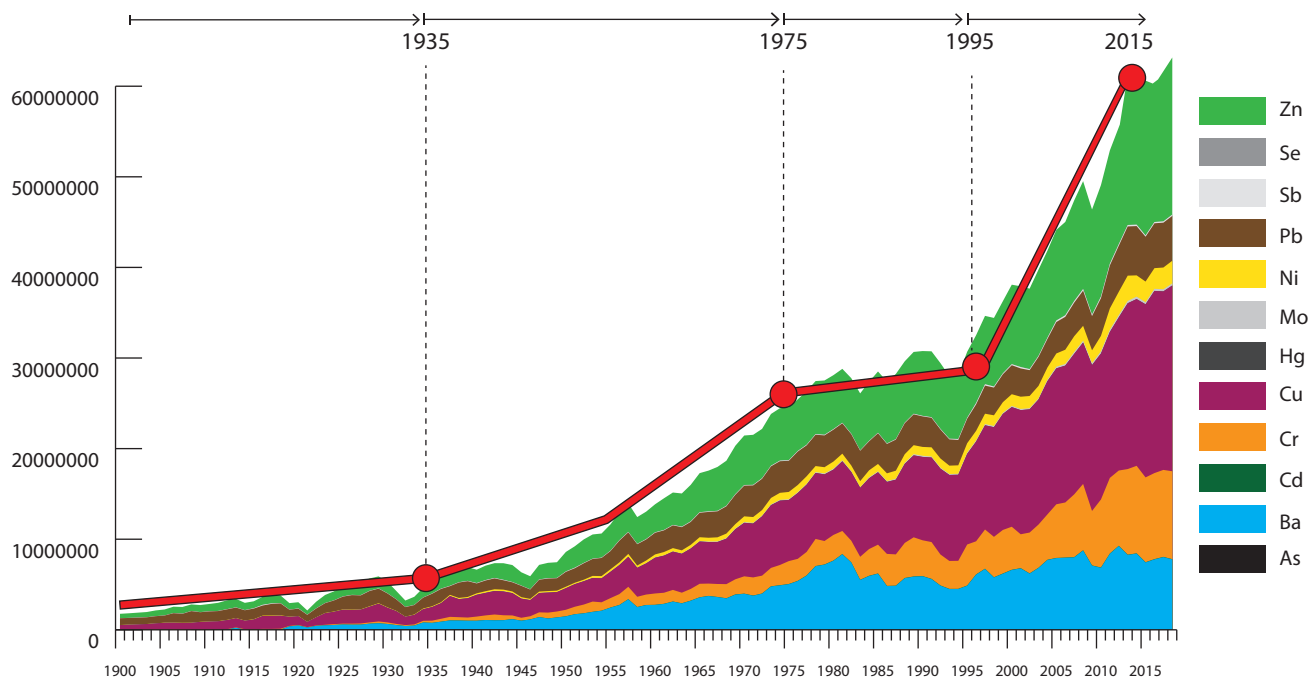
Hovedløsningen for deponering av uorganisk farlig avfall på Langøya er ved stabilisering i gips. Gipsen dannes i all hovedsak ved å blande metallholdig tynnsyre fra Kronos med flygeaske fra avfallsforbrenning som reagerer til kalsiumsulfat som er den kjemiske betegnelsen på gips. Gipsmengdene som deponeres på Langøya er i en del tilfeller større enn hva som er nødvendig for stabilisering av annet avfall. Minimering av deponibehovet kan med andre ord også skje gjennom reduksjon av gipsmengdene som per i dag krever deponering. Av denne grunn inneholder denne rapporten et eget kapittel som beskriver markeder og gjenvinningsteknologier for gips.

2. BESKRIVELSE AV TUNGMETALLHOLDIGE AVFALLSSTRØMMER



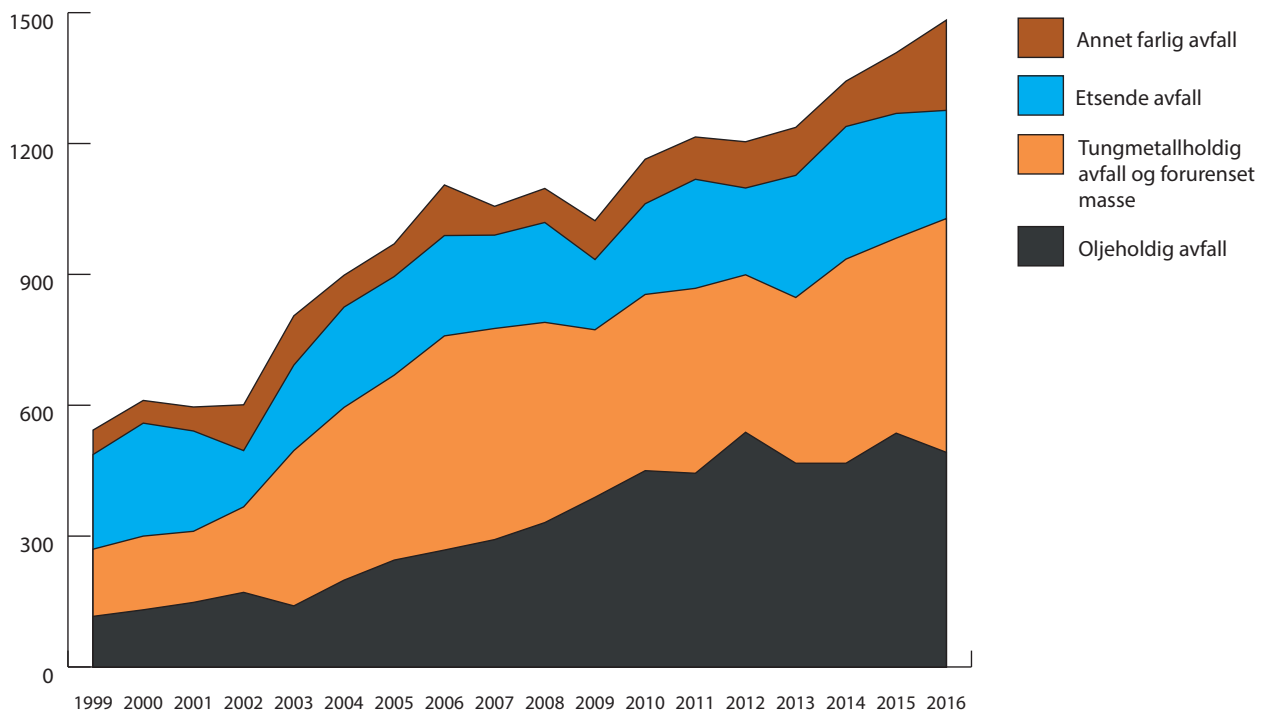
Tungmetaller er grunnstoffer med tetthet større enn 5 g/cm³. Tungmetallholdig avfall er avfall som inneholder forhøyede konsentrasjoner av slike grunnstoffer i forhold til omgivelsene. Tungmetallholdig avfall blir farlig avfall når konsentrasjonen av ett eller flere tungmetaller eller forbindelser som tungmetallet inngår i overskrider gjeldende grenseverdier gitt i Avfallsforskriften kap. 11 om farlig avfall. Når man snakker om tungmetallholdig avfall inkluderes gjerne avfall som inneholder eksempelvis skadelige grunnstoffer som arsen og selen, selv om de ikke oppfyller definisjonen på å være tungmetaller. I praksis har 12 grunnstoffer hvor de fleste er tungmetaller vært regulert siden 1970-tallet ettersom de både er skadelige og

forekommer i betydelige mengder i omgivelsene. Disse reguleringene bremsset i mange år forbruket av disse grunnstoffene, men som det fremgår av figur 2.1 har forbruket av de samme stoffene de siste 20 årene forbruket doblet seg. Dette vil uunngåelig gi mer tungmetallholdig farlig avfall i fremtiden. Det er viktig å være klar over at det også finnes tungmetaller som ikke er spesielt farlige som for eksempel jern, zirkonium og wolfram. Avfall med høyt innhold av slike metaller er normalt ikke farlig avfall.



Figur 2.1 Forbruket av de regulerte skadelige metallene øker på verdensbasis. Det kan gi mer farlig avfall i fremtiden.

Farlig avfall i Norge (1000 tonn)



Figur 2.2 Farlig avfall i Norge levert til godkjent behandling etter materiale, 1999–2016. 1000 tonn. Kilde: Statistisk sentralbyrå.

Sammen med etsende avfall utgjør tungmetallholdig avfall de to viktigste underkategoriene av uorganisk farlig avfall. Noe avfall vil i praksis kunne være både tungmetallholdig og etsende. Samlede mengder av uorganisk avfall i 2017 var i følge SSB på 670 000 tonn. Av dette utgjorde tungmetallholdig avfall 380 000 tonn (tallet inkluderer også forurensete masser). Hovedmengden av dette avfallet ble deponert enten på deponier for farlig avfall enten på Langøya i Vestfold eller i Mo i Rana i Nordland eller på industrideponier med tillatelse til slik deponering. Noe avfall eksporteres også. Deler av avfallet hvor det er dokumentert lav utlekkingssevne er deponert på deponier for ordinært avfall med særskilt tillatelse til mottak av slikt avfall.

EE-avfall (inkludert batterier), bygg- og rivningsavfall og shredderavfall er avfallsfraksjoner som ikke er vurdert i denne rapporten. Figur 2.2 viser andelen tungmetallholdig avfall av samlet farlig avfall i Norge de siste årene.

2.1 AVFALLSREGNSKAP FOR TUNGMETALL-HOLDIG FARLIG AVFALL I NORGE

Nesten alt farlig avfall som oppstår i Norge klassifiseres etter både en nasjonal stoffkode og en europeisk avfallskode (EAL-listen). Den nasjonale stoffkoden er utformet primært med tanke på riktig destruksjon eller deponering av farlig avfall og inneholder for få kategorier til at avfallsstrømmene i praksis kan splittes på måter som er nødvendig for å vurdere potensialet for ressursutnyttelse på en ønsket måte. EAL-listen er mer utfyllende, og strømmene med tungmetallholdig farlig avfall beskrives derfor med utgangspunkt i EAL-koder og ikke stoffkoder i denne rapporten. EAL-listen inneholder til sammen 20 hovedkapitler som de litt over 400 avfallskategoriene for farlig avfall plasserer seg innenfor. I påfølgende tabeller presenteres en oversikt over mengdene av ulike typer tungmetallholdig avfall som oppstod i Norge i 2017. Tallene baserer seg på et avfallsregnskap som er utarbeidet av Mepex, InErgeo og Miljødirektoratet. Det knytter seg betydelig usikkerhet til tallene som her presenteres ettersom det er kjent at farlig avfall i mange tilfeller deklarerer med både feil EAL-koder og uriktige mengdeangivelser. Feil i sammenstilling av statistikken kan også forekomme.

06 AVFALL FRA UORGANISKE KJEMISKE PROSESSER	2017	GJENNOMSNITT 3 SISTE ÅR
060101 Svovelsyre og svovelholdige syrer	261 988	231 031
060102 Saltsyre	383	268
060313 Faste salter og saltløsninger som inneholder tungmetaller	294	341
060403 Arsenholdig avfall	1 027	1 129
060405 Avfall som inneholder andre tungmetaller	25 940	29 605
Totalt	289 632	262 374

Tabell 2.1

2.1.1 Avfall fra uorganiske kjemiske prosesser

Kapittel 6 i EAL-listen angir avfall fra uorganiske kjemiske prosesser. Tabell 2.1 viser en oversikt over tungmetallholdig farlig avfall som er registrert under dette kapittelet.

060101 er nesten utelukkende tynnnsyre fra Kronos i Fredrikstad. Syren er anrikt med metaller, spesielt jern, og leveres i stor grad til Langøya for reaksjon med flygeaske til gips som deponeres. Største kilde til 060102 ser ut til å være metallurgiske prosesser ved Ferrozink i Trondheim og K.A. Rasmussen på Hamar. 060311 ser ut til å stamme fra Dynea Lillestrø fabrikker og Kronos. Største kilde til 060313 ser ut til å være Nammo Raufoss og Kronos. 060403 og 060405 ser i stor grad ut til å stamme fra Glencore nikkerverk i Kristiansand.

2.1.2 Avfall fra varmebehandlingsprosesser

Kapittel 10 i EAL-listen angir avfall fra varmebehandlingsprosesser. Tabell 2.2 viser en oversikt over tungmetallholdig farlig avfall som er registrert under dette kapittelet.

100207 og 100213 ser i stor grad ut til å stamme fra Eramet sin produksjon av manganlegeringer og fra Celsa Armeringsstål. 100304 er slagg og dross fra aluminiumsindustrien som enten leveres til Real Alloy for gjenvinning eller deponeres. 100308 ser ut til å være sort saltslagg fra Real Alloy sin gjenvinningsoperasjon på Rød og som i stor grad leveres til videre Real Alloy sitt anlegg på Raudsand for ytterligere prosessering. 100315 er også avfall fra aluminiumsproduksjon som leveres til Real Alloy for gjenvinning. 100319 og 100321 stammer også fra aluminiumsindustrien men ser i motsetning til mange andre fraksjoner mer eller mindre og utelukkende gå til deponering.

100401 er avfall fra blyproduksjon som importeres av Boliden i Odda og deponeres i fjellhaldeponiet. 100911 er avfall fra ferrometallstøping. Det har ikke latt seg gjøre å spore hvor dette avfallet stammer fra.

10 AVFALL FRA VARMEBEHANDLINGSPROSESSER	2017	GJENNOMSNITT 3 SISTE ÅR
100207 Fast avfall fra behandling av avgasser som inneholder farlige stoffer	13 474	15 600
100213 Slam og filterkaker fra behandling av avgasser som inneholder farlige stoffer	44 679	42 862
100304 Slagg fra primærproduksjon	23 898	17 011
100308 Saltslagg fra sekundærproduksjon	6 518	14 360
100315 Avrakingsslagg som er brannfarlig eller avgir farlige mengder brannfarlig gass ved kontakt med vann	7 095	3 112
100319 Støv fra filtrering av røykgass som inneholder farlige stoffer	5 977	3 656
100321 Andre partikler og annet støv (herunder kulemøllstøv) som inneholder farlige stoffer	24 956	22 899
100401 Slagg fra primær- og sekundærproduksjon	17 085	15 872
100911 Andre partikler som inneholder farlige stoffer	9 520	6 067
Totalt	153 202	141 440

Tabell 2.2

11 AVFALL FRA KJEMISK OVERFLATEBEHANDLING OG BELEGGING AV METALLER OG ANDRE MATERIALER, OG FRA HYDROMETALLURGI MED IKKE-JERNHOLDIGE METALLER	2017	GJENNOMSNITT 3 SISTE ÅR
110109 Slam og filterkaker som inneholder farlige stoffer	405	356
110202 Slam fra sinkhydrometallurgi (herunder jarositt og goethitt)	139 720	134 199
Totalt	140 125	134 555

Tabell 2.3

12 AVFALL FRA FORMING OG FYSISK OG MEKANISK OVERFLATEBEHANDLING AV METALLER OG PLASTSTOFFER	2017	GJENNOMSNITT 3 SISTE ÅR
120116 Avfall fra sandblåsing som inneholder farlige stoffer	2 810	3 494
120120 Brukte slipejernstander og slipematerialer som inneholder farlige stoffer	20	47
Totalt	2 832	3 541

Tabell 2.4

2.1.3 Avfall fra kjemisk overflatebehandling og belegging av metaller og andre materialer, og fra hydrometallurgi med ikke-jernholdige metaller

Kapittel 11 i EAL-listen angir avfall fra kjemisk overflatebehandling og belegging av metaller og andre materialer, og fra hydrometallurgi med ikke-jernholdige metaller. Tabell 2.3 viser en oversikt over tungmetallholdig farlig avfall som er registrert under dette kapittelet.

110202 stammer fra Boliden og deponeres i fjellhall-deponiet i Odda. 110109 stammer muligens fra Vik Ørsta.

2.1.4 Avfall fra forming og fysisk og mekanisk overflatebehandling av metaller og plaststoffer

Kapittel 12 i EAL-listen angir avfall fra forming og fysisk og mekanisk overflatebehandling av metaller og plaststoffer. Tabell 2.4 viser en oversikt over tungmetallholdig farlig avfall som er registrert under dette kapittelet.

120116 og 120120 stammer i praksis fra mange ulike kilder og det er sålede ikke mulig å spore avfallsmengden tilbake til et fåtalls enkeltbedrifter.

2.1.5 Avfall som ikke er spesifisert andre steder i listen

Kapittel 16 i EAL-listen angir avfall som ikke er spesifisert andre steder i EAL-listen. Tabell 2.5 viser en oversikt over tungmetallholdig farlig avfall som er registrert under dette kapittelet.

16802, 160805 og 160807 stammer fra petroleumsraffinering på Mongstad, Kårstø, Tjeldbergodden og Slagentangen. 161101 og 161103 er i stor grad katodeavfall fra aluminiumsindustrien.

16 AVFALL SOM IKKE ER SPESIFISERT ANDRE STEDER I LISTEN	2017	GJENNOMSNITT 3 SISTE ÅR
160802 Brukte katalysatorer som inneholder farlige overgangsmetaller eller overgangsmetallforbindelser	483	400
160805 Brukte katalysatorer som inneholder fosforsyre	364	293
160807 Brukte katalysatorer som er forurensset av farlige stoffer	34	448
161101 Karbonbaserte føringar og ildfaste materialer fra metallurgiske prosesser som inneholder farlige stoffer	15 351	21 069
161103 Andre føringar og ildfaste materialer fra metallurgiske prosesser som inneholder farlige stoffer	865	810
Totalt	17 096	23 020

Tabell 2.5

AVFALLSTYPE (EAL)	MENGDE (tonn)
060101 Svovelsyre og svovelholdige syrer	261 988
110202 Slam fra sinkhydrometallurgi (herunder jarositt og goethitt)	139 720
100213 Slam og filterkaker fra behandling av avgasser som inneholder farlige stoffer	44 679
060405 Avfall som inneholder andre tungmetaller	25 940
100321 Andre partikler og annet støv (herunder kulemøllestøv) som inneholder farlige stoffer	24 956
100304 Slagg fra primærproduksjon	23 898
100401 Slagg fra primær- og sekundærproduksjon	17 085
161101 Karbonbaserte fôringer og ildfaste materialer fra metallurgiske prosesser som inneholder farlige stoffer	15 351
100207 Fast avfall fra behandling av avgasser som inneholder farlige stoffer	13 474
100911 Andre partikler som inneholder farlige stoffer	9 520
100315 Avrakingsslagg som er brannfarlig eller avgir farlige mengder brannfarlig gass ved kontakt med vann	7 095
100308 Saltslagg fra sekundærproduksjon	6 518
100319 Støv fra filtrering av røykgass som inneholder farlige stoffer	5 977
120116 Avfall fra sandblåsing som inneholder farlige stoffer	2 810
060403 Arsenholdig avfall	1 027
161103 Andre fôringer og ildfaste materialer fra metallurgiske prosesser som inneholder farlige stoffer	865
160802 Brukte katalysatorer som inneholder farlige overgangsmetaller eller overgangsmetallforbindelser	483
110109 Slam og filterkaker som inneholder farlige stoffer	405
060102 Saltsyre	383
160805 Brukte katalysatorer som inneholder fosforsyre	364
060313 Faste salter og saltløsninger som inneholder tungmetaller	294
160807 Brukte katalysatorer som er forurensset av farlige stoffer	34
120120 Brukte slipejenstander og slipematerialer som inneholder farlige stoffer	20
Totalt	602 886

Tabell 2.6

2.1.6 Tungmetallholdig avfall sortert etter størrelse

Tabell 2.6 presenterer en oversikt over tungmetallholdig avfall sortert etter størrelse. Som det fremgår av tabellen utgjør de samlede mengdene tungmetallholdig farlig avfall som ligger til grunn for vurderingene i denne rapporten i overkant av 600 000 tonn. I denne avfallsmengden inngår som tidligere redegjort for 262 000 tonn tynnsyre fra Kronos som er grunnlag for gipsdannelse og 140 000 tonn slam fra Boliden i Odda som det finnes separat og velfungerende deponeringsordning for.

3. MARKEDSMESSIGE HOVEDTRENDER FOR RELEVANTE METALLER OG MINERALSKE RÅSTOFFER



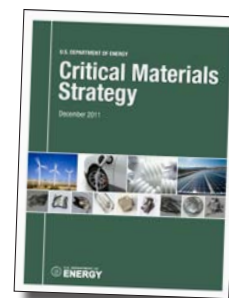
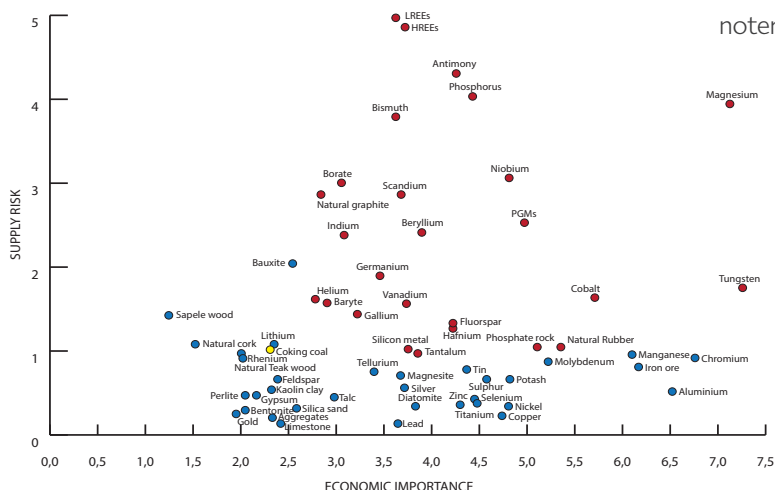
Mineraler og metaller er blant de viktigste innsatsfaktorene i det moderne samfunn, men skaper også betydelige miljøutfordringer i form av gruver, smelteverk og uorganisk farlig avfall. Som en del av arbeidet med å etablere gode sirkulærøkonomiske strukturer for metaller og mineraler er det viktig å analysere fundamentale markedsforhold, enten det er etterspørselsvolum, etterspørselsdrivere, teknologiutvikling og lovmessige reguleringer etc. I tillegg vil produksjonen av mange materialer tvangsmessig lage salgbare biprodukter. Eksempelvis vil produksjon av kobber gi svovelsyre, mens produksjon av natronlut gir klor. Produksjonsvolumet av kobber og natronlut styrer derfor en gitt tonnasje svovelsyre og klor. Innenfor rammene av eksisterende avtale kan ikke alle disse forholdene tas i detalj, men mange viktige aspekter vil bli belyst.

Vi har i arbeidet med rapporten hatt hovedfokus på sirkulær økonomi og avfallsminimering. Vi har også hatt et lite sideblikk på spørsmålet om kritiske ressurser. Dette er metaller og mineraler som er helt nødvendige for økonomien, men som enten finnes i for små volum, er for vanskelig tilgjengelig eller med politisk krevende verdikjeder. Alle store økonomiske makter har hatt fokus på dette lenge. Eksempelvis har EU sin «Critical

Raw Materials Strategy», mens USA har sin «Critical Materials Strategy». EU, USA og Japan har alle satt av betydelige investerings- og utviklingsmidler for å stimulere utvinning og gjenvinning av slike metaller og mineraler (Hiroki Hatayama, 2015). Mange fraksjoner innen FA 7096 inneholder slike kritiske ressurser, men utvinning av dem vil bidra lite til avfallsminimering. Selv om de kritiske ressursene gjenvinnes så utgjør de så lav konsentrasjon av avfallet at totalmengden som er igjen er omtrent like stor. Derfor er disse mulighetene ikke viet stor oppmerksomhet. Et unntak gjelder for aluminiumfluorid.

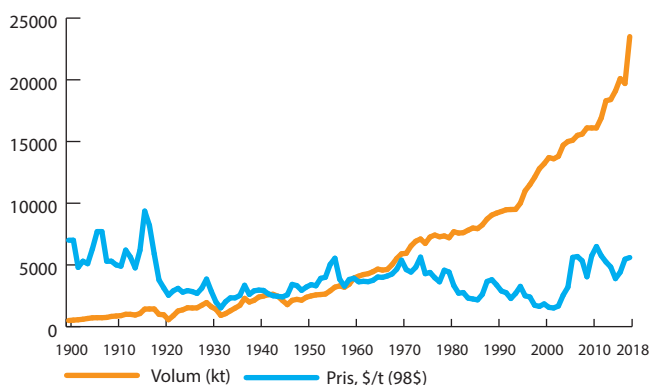
I denne rapporten vil en rekke forskjellige metaller og mineraler bli drøftet. Der hvor det har vært teknisk mulig er det satt opp utviklingslinjer for priser og volumer. Det er prioritert å få frem lange linjer. Mange av metallene har store kortsiktige svingninger i priser som kan gi et fordreid bilde av den egentlige markedsutviklingen, derfor er det brukt serier på +100 år der det har vært mulig.

Med mindre annet er eksplisitt skrevet er dataseriene basert på US\$, og det er brukt faste valutakurser (1998 som basis), for å justere vekk inflasjonseffekter. Valutaen er valgt fordi nesten alle metaller og mineraler primært noteres i US\$.

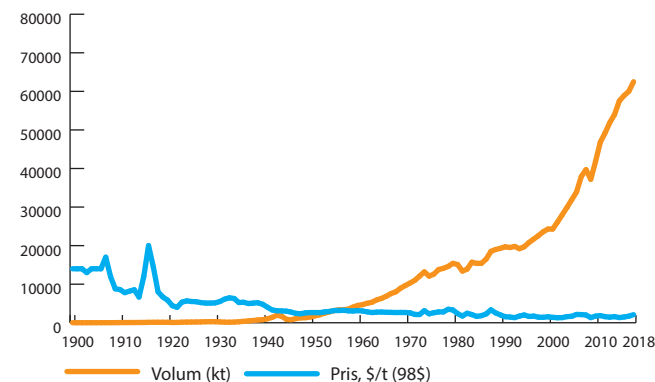


◀ Venstre: Rangering av EUs «Critical Raw Materials»⁴
 ➔ Midten: USAs strategidokument fra 2010.⁵ ➔ Høyre: Japan har skrevet færre rapporter, men investert mer i gjenvinningsanlegg.⁶

MARKEDSUTVIKLING, KOBBER



MARKEDSUTVIKLING, ALUMINIUM



◀ Venstre: Markedsutviklingen for kobber siden 1900.⁷ ▶ Høyre: Markedsutviklingen for aluminium siden 1900.⁸

Med mindre annet er oppgitt er det kun data for jomfruelig produksjon som er tatt med i tonnasjene. Gjenvinning er viktig for mange av metallene og mineralene, og påvirker priser sterkt. Men, gjenvinning er vanskeligere å finne gode tall på, og vanskeligere å definere. Det er (relativt) lett å kvantifisere produksjon fra gruver og primærsmelteverk, men vanskeligere å definere forskjellen på omsmelte, legeringsproduksjon, gjenvinning, gjenbruk etc. Denne systematiske feilkilden gjør at for svært mange av volumgrafene burde totaltallet vært langt høyere.

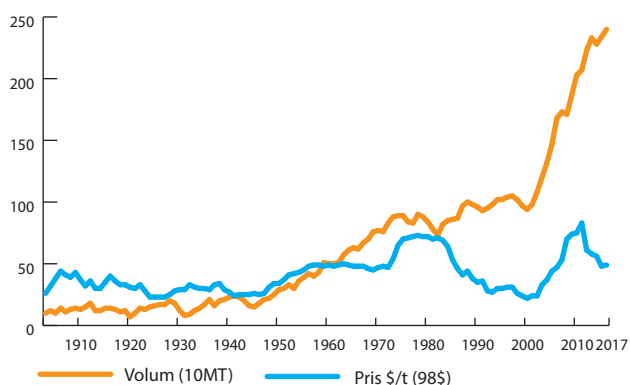
Dette kan eksemplifiseres med kobber og aluminium. Begge er viktige metaller for både bygg, bil og teknologi, og har hatt sterk vekst i etterspørsel siden år 1900. Kobber koster typisk 8 \$/kg, mens aluminium er verdt 2 \$/kg. Begge er populære til gjenvinning og smeltes om i en rekke anlegg rundt om i verden. Kobber er mer verdt, og interessen for å gjenvinne blir derfor høyere. Gjennomgående regner man med høyere gjenvinningsgrad for kobber enn for aluminium, og illustrasjonene under burde derfor hatt en noe brattere kurve for kobber enn for aluminium. I og med at begge metaller har hatt sterk økning i totalmarkedet og til dels brukes i

langlivsprodukter har imidlertid den relative gjenvinningsgraden gått ned. Det innebærer ikke at gjenvinningen av metallene har falt, men at totalmarkedet vokser så mye i volum at mye ny tonnasje kommer inn.

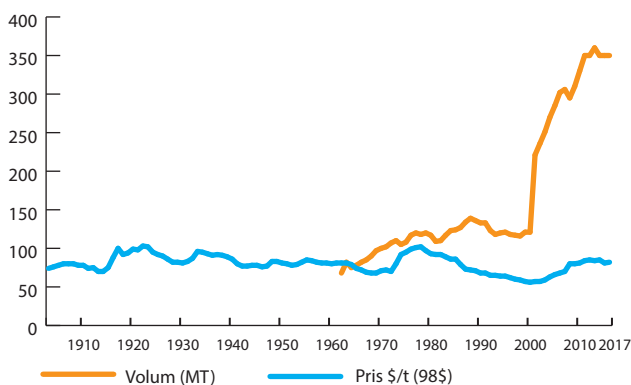
Samtidig er det åpenbart at for nesten alle som gjenvinner metaller og mineraler, så er det en parameter som er viktig; prisen. Som man ser av illustrasjonene over, så har reell kobberpris holdt seg noenlunde stabil over tid. Kobber koster omtrent det samme nå som før første verdenskrig, målt i inflasjonsjustert valuta. For aluminium er det annerledes. Reell verdi på aluminium har falt, og holdt seg lav lenge. Det er gunstig for de som ønsker å ta i bruk lette metallprodukter, men krevende for å fremme innsamling og gjenvinning.

For de store materialråstoffene som jernmalm og kalkstein, som brukes i milliarder av tonn til å bygge infrastruktur, bygg etc er det også mulig å lese ut politisk-økonomisk historie. Resesjonen og industridød i Vesten på 70-tallet, og Kinas fremvekst fra 2000-tallet er mulig å se ut av tonnasjene.

MARKEDSUTVIKLING, JERNMALM

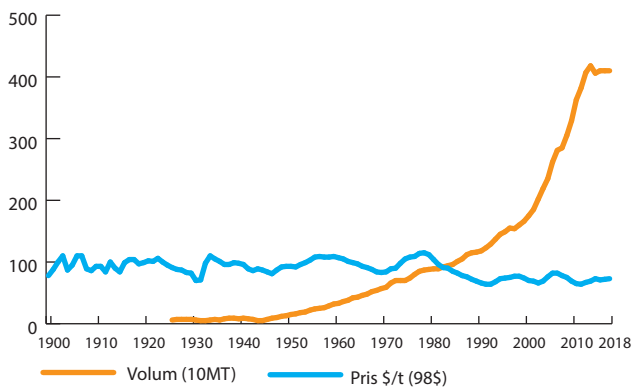


MARKEDSUTVIKLING, BRENT KALK

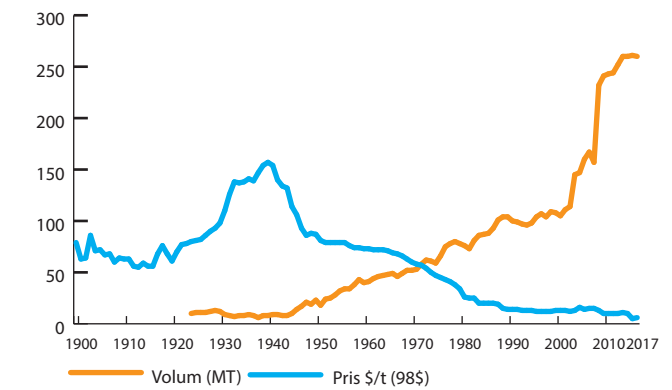


◀ Venstre: Markedsutviklingen for jernmalm siden 1900.⁹ ▶ Høyre: Markedsutviklingen for kalk siden 1904.¹⁰

MARKEDSUTVIKLING, SEMENT



MARKEDSUTVIKLING, GIPS



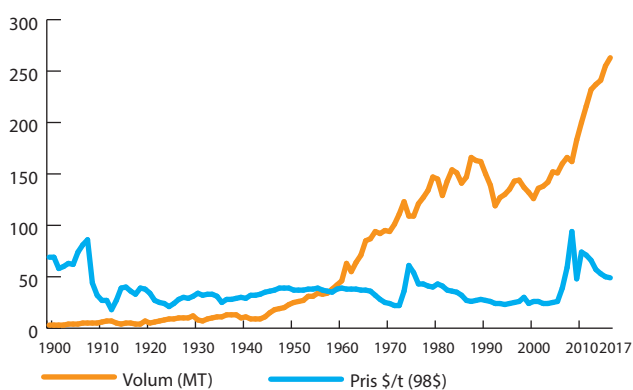
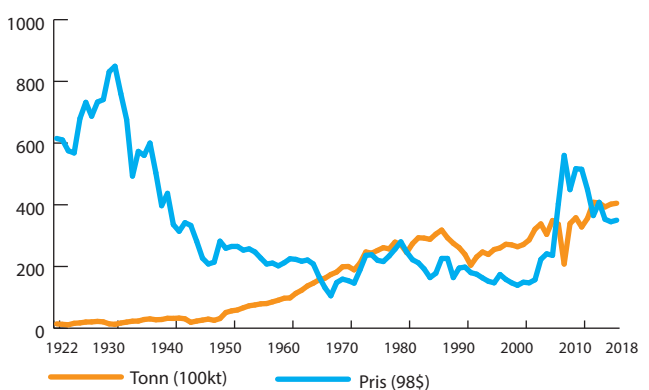
◀ Venstre: Markedsutviklingen for sement siden 1900.¹¹ ▶ Høyre: Markedsutviklingen for gips siden 1900.¹²

Markedsutviklingen for gips har likeledes vært voldsom. Medregnet gjenvinning er markedet på om lag 300 millioner tonn, og økende. Prisene er derimot katastrofalt dårlige. For rågips ligger prisen på ca 8 \$/tonn. Prisene i Asia er høyere, men ikke nok til å dekke fraktkostnadene. I sentrale deler av Europa er prisene nede i 5 \$/t, som følge av transportkostnader. Markedet er godt i den forstand at det er stor etterspørsel, så det vil være mulig å plassere all gips man kan produsere i markedet, men man vil ikke få noe særlig inntekt av det.

En annen stor sektor er kunstgjødsel. Verdensmarkedet for mineralsk kunstgjødsel nærmer seg 200 millioner tonn. Kunstgjødsel domineres av NPK-produkter, hvorav N er et derivat av olje, mens P og K er mineraler som tas ut i gruver, og i svært liten grad gjenvinnes per i dag. Noen små initiativer til gjenvinning er under etablering.³ Historisk har mye av både fosfat og kalium kommet fra det tidligere Sovjetunionen, og det er mulig å lese ut av disse produksjonskurvene de utfordringene som kom ifm kollapsen av Sovjet.

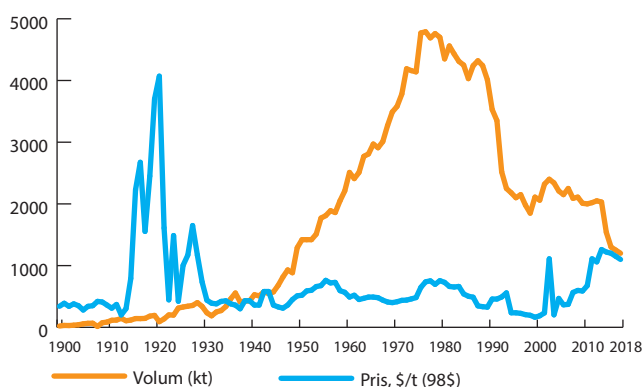
Både fosfat og kalium indikerer en trend i retning av høyere priser.

MARKEDSUTVIKLING, FOSFAT

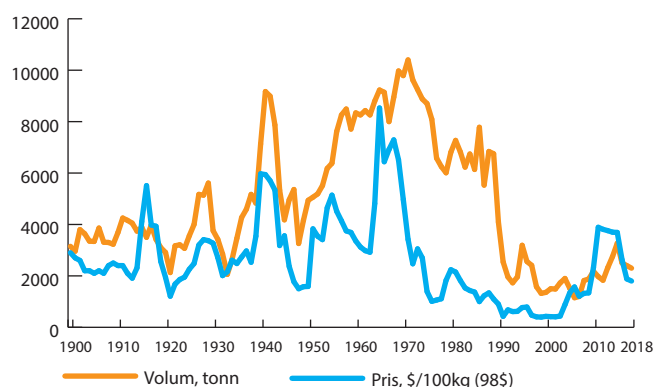
MARKEDSUTVIKLING, KALIUM (SOM KO₂)

◀ Venstre: Markedsutviklingen for råfosfat siden 1900.¹³ ▶ Høyre: Markedsutviklingen for kalium siden 1922.¹⁴

MARKEDSUTVIKLING, ASBEST



MARKEDSUTVIKLING, KVIKKSØLV



← Venstre: Markedsutviklingen for asbest siden 1900.¹⁶ → Høyre: Markedsutviklingen for kvikksølv siden 1900.¹⁷

Overraskende nok er produkter som asbest og kvikksølv fortsatt i allmenn bruk, på tross av omfattende restriksjoner i mange tiår. Fortsatt brukes det 1 million tonn asbest i året i verden, og prisen har steget over flere år. Prisstigningen skyldes kanskje at flere gruver er stengt ned, så asbest er rett og slett vanskeligere å få tak i. For kvikksølv er det en liknende trend.

Etterspørselen etter kvikksølv har falt ned til et årlig konsum på 2000 tonn, men prisen har økt. I tilfellet kvikksølv er det gledelig at prisene har steget. Det gir økt incentiv til gjenvinning, og gjør at metallet tas ut fra biproduktstrømmer av sink og sølv, i stedet for å slippes til avgangsdeponier. Økte priser gjør også metallet mindre attraktivt å bruke.

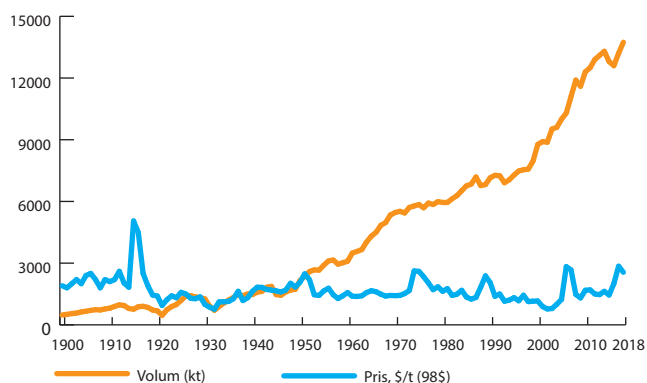
To metaller som ofte påtreffes i uorganisk, farlig avfall er sink og bly. For mange av avfallsfraksjonene i FA-undergruppen 7096 er det et av disse metallene som gjør at en masse som ellers ville vært regnet som inert blir regnet som farlig.

Mens kvikksølv og kadmium utelukkende produseres som biprodukter fra andre metaller, altså tvangsmessig produksjon, så er det omfattende egen gruvedrift på sink og bly. Verdens gruve-produksjon av sink nærmer seg 15 millioner tonn per år, mens bly ligger på om lag 5 millioner tonn. Dette kan sammenliknes med kadmium på drøyt 20.000 tonn og kvikksølv på 2.000 tonn.

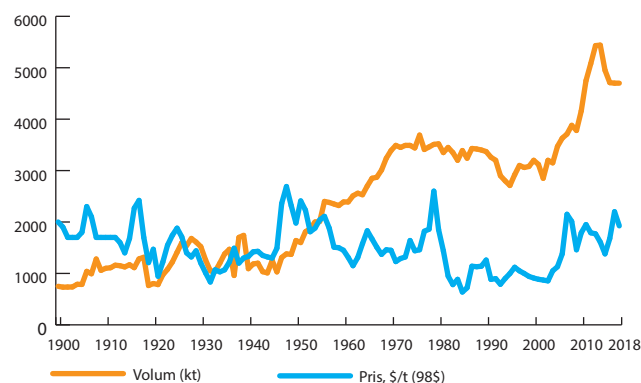
Sannsynligheten for å påtreffe sink og bly, og konsentrasjonene som dukker opp, er normalt alltid langt høyere enn kvikksølv og kadmium.

Legalt sett er det relativt få begrensninger i bruken av sink og bly, eksempelvis vedtok Stortinget i 2015 et frislipp på bruk av bly i ammunisjon, et underlig vedtak som trolig vil endres tilbake av EU om kort tid.¹⁵

MARKEDSUTVIKLING, SINK

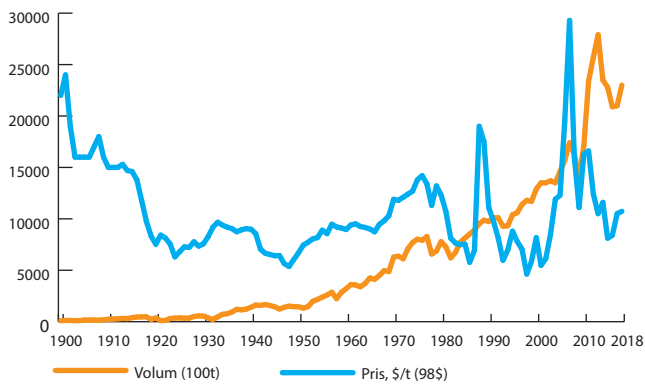


MARKEDSUTVIKLING, BLY

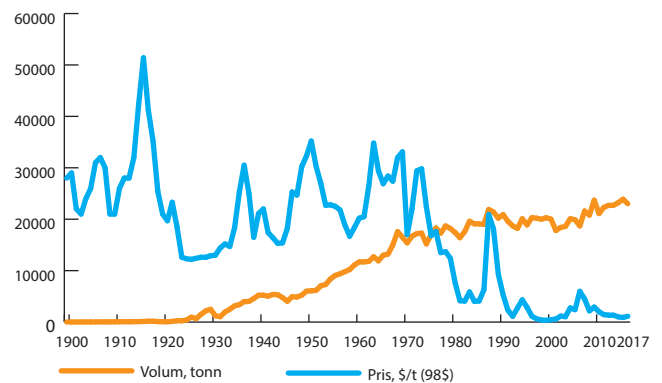


← Venstre: Markedsutviklingen for sink siden 1900.¹⁸ → Høyre: Markedsutviklingen for bly siden 1900.¹⁹

MARKEDSUTVIKLING, NIKKEL

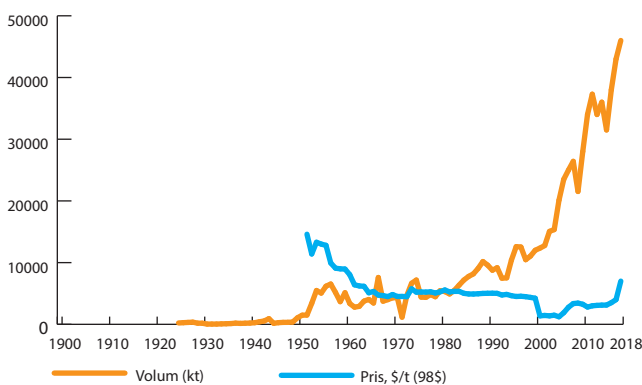


MARKEDSUTVIKLING, KADMIUM

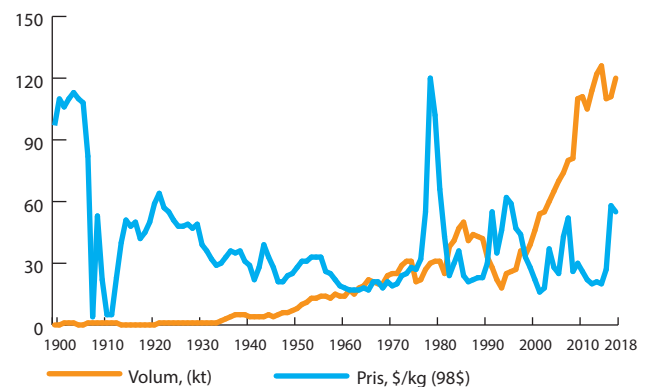


← Venstre: Markedsutviklingen for nikkell siden 1900.²⁰ → Høyre: Markedsutviklingen for kadmium siden 1900.²¹

MARKEDSUTVIKLING, LITUM



MARKEDSUTVIKLING, KOBOLT



← Venstre: Markedsutviklingen for litium siden 1900.²² → Høyre: Markedsutviklingen for kobolt siden 1901.²³

Som en kuriositet kan man også se på batterimetaller, som utgjør en vesentlig del av FA-grunnlaget. Denne kategorien er det så langt ganske god gjenvinningsgrad på – på grunn av blybatteriene. Det er å håpe at tilsvarende gjenvinningsgrad oppnås også for nikkell-kadmium og nikkell-metallhydrid. Senere vil det også være behov for gjenvinning av litumbatterier, primært på grunn av koboltinnholdet.

Felles for nesten alle metaller og mineraler som omtales i denne rapporten er at markedene har steget mye i tonn i senere år, men prisene har ikke fulgt etter. Underlig nok virker det ofte som at når markedene vokser mye i tonn, så faller prisene. Mens når markedene faller i tonn, så øker prisene. Bildet er ikke entydig. Vi begir oss ikke ut på spekulasjoner på hvorfor det er slik, men konstaterer kun tallenes tale. Utviklingen i metall- og mineralprisene gjør at det er grunn til å utvise varsomhet vedr. antakelser om fremtidige markeder. Hovedbildet vil med stor sannsynlighet være at for de fleste metaller og mineraler, så vil man få liten hjelp av stigende priser i årene fremover. Man bør altså legge til grunn at gjenvinning som ikke er lønnsom i dag, heller ikke vil være det i fremtiden, så hvis man ønsker mer gjenvinning – så må markedet stimuleres gjennom lovkrav eller subsidier.

4. MULIGHETSROM FOR UTVINNING AV SEKUNDÆRE RÅSTOFFER FRA TUNGMETALLHOLDIGE AVFALLSSTRØMMER



Etter ønske fra Miljødirektoratet har Bergfald gått nøye gjennom listene over levert uorganisk farlig avfall i Norge i 2016 og 2017, og forsøkt å identifisere store fraksjoner som enten kan materialgjenvinnes eller avgiftes. Hensikten har vært å se om sluttdisponering i form av deponering kan begrenses. Det er åpenbart at et moderne samfunn har behov for en deponiløsning, men samfunnsdebatten har vist at dette er et begrenset gode som det må husholdes med. I arbeidet med å identifisere fraksjoner er det lagt til grunn noen få basiskriterier; det skal sannsynliggjøres at det finnes eller kan industrialiseres teknologi for gjenvinning, det skal finnes et marked for gjenvunnet materiale og gjenvinningen skal omfatte en vesentlig tonnasje. Økonomi og lønnsomhet har ikke hatt ekskluderende prioritet. Det legges til grunn at avfall deponeres i hovedsak fordi det er billigere enn å gjenvinne det, så det forventes at alle løsninger som identifiseres trenger økonomisk eller lovmessig stimuli. For Bergfalds del har vi valgt å prioritere avfallsstrømmer der vi kan se et reelt potensiale på mer enn 10.000 tonn. Vi har også inkludert enkelte andre fraksjoner fordi de kan ha tilleggspunkter, slik som tilgang til kritiske mineraler.

Etter ønske fra Miljødirektoratet har vi ikke brukt tid på flyveaske-teknologier, da flere andre har gjort det tidligere.



4.1 GIPS; BILLIG, NYTTIG OG MED STORE ENDRINGER FORAN SEG

4.1.1 Gips: Et gigantisk marked

Gipsindustrien er en av verdens største materialindustrier. Bare fra gruvedrift tas det ut om lag 260 millioner tonn (USGS, 2018). I tillegg kommer det 60 til 90 millioner tonn fra gjenvinning, i hovedsak fra rensing av kullkraftverk. Om lag 60 % brukes som tilsats til sement, mens 33 % brukes til gipsplater, resten til en rekke spesialformål og som gjødselmiddel i landbruket (SmithersApex, 2016). Markedet for gips har vokst kraftig i senere år som følge av høy byggeaktivitet, og forventes å vokse også fremover, selv om markedet har stabilisert seg noe.

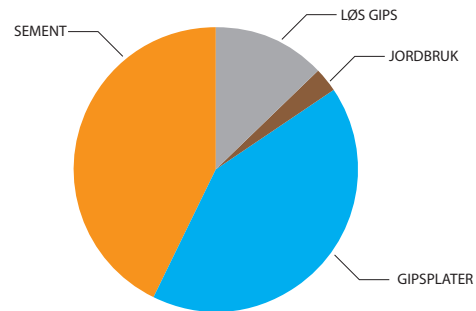
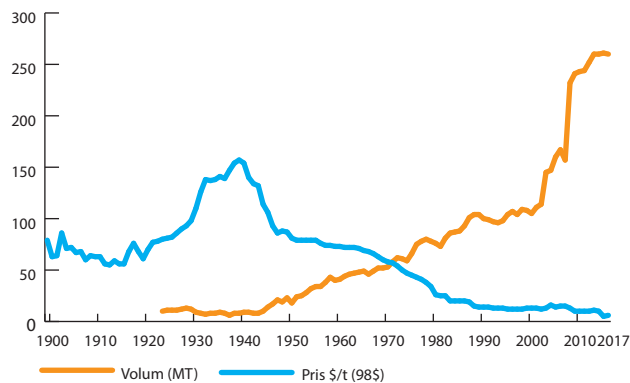
På tross av den sterke veksten i etterspørsel, så har prisen på gips falt kraftig over lengre tid. I dagens marked selges rågips for om lag 8 \$/tonn, og lavere i noen regioner. Det er så lav pris at transport over lengre avstander blir vanskelig, og verdien av gjenvinning blir presset.

På tross av den lave prisen er mer enn halvparten av forsyningen fra gruver og brudd. Bare i Europa er det mer enn 150 brudd og gruver som er aktive (Eurogypsum, 2019). I følge USGS er det gruveproduksjon av 26,3 millioner tonn gips i Europa (inkludert Russland).



← Venstre: Dagbrudd for gips i USA. → Høyre: Underjordisk gruve for gips.

MARKEDSUTVIKLING, GIPS. UTEN FGD/GJENVINNING



◀ Venstre: Markedsutviklingen for gips siste 100 år, i tonn.²⁴ → Høyre: Markedet i 2018, i verdi.²⁵

Den gipsforsyningen som ikke kommer fra gruver kommer i all hovedsak fra rensing av svovelutslipp fra kullkraftverk. Gjenvinning av gipsplater etc er marginal. I EU leverer rensing av kullkraft om lag 18 millioner tonn gips til markedet (Marlet, 2018) og i USA 32 millioner tonn (USGS, 2018). Hvis Russland inkluderes i statistikken blir trolig gruvebasert og kull-basert gipsforsyning omtrent like store, og dekker et totalmarked i Europa på litt i overkant av 50 millioner tonn. Det er viktig å notere seg at i figuren over er verken gjenvinning av gipsplater, kullkraftsgips eller annen syntetisk gips inkludert.

Mange steder i verden rapporteres det om bruk av gips som innsatsfaktor i landbruket, i millioner av tonn (Dick, 2011). I hovedsak brukes gruvebasert gips. US Bureau of Mines rapporterte på tidlig 80-tall om omfattende bruk av gips fra en titandioksid-fabrikk i Savannah til gjødsel. Titanogips viste seg da særlig gunstig for dyrking av peanøtter og belgfrukter (US Bureau of Mines, 1984). Det ble rapportert parallelt bruk av millioner tonn avfallsbasert gips fra fosforsyre og kullkraft i både gipsplater og landbruk.

Bruken av gips som gjødsel har en interessant, men bare delvis forstått, effekt som CO₂-binder (S M Perez-Moreno, 2015). Mye tyder på at gips i noen typer jord vil binde CO₂ ved rekarbonatisering. En forutsetning for å få til karbonatisering er tilgjengelighet av CO₂. Hvis gips ligger lagret under et vannspeil vil det i praksis ikke være mulig å binde CO₂, mens ved innblanding i jordsmonn så vil det over tid skje. CO₂-binding kan også skje industrielt, i tilknytning til et fangstanlegg for CO₂ (Azdarpour, 2016).

I Finland er det utviklet sement helt uten bruk av klinker, ved å blande nedmalt slagge fra stålproduksjon med avfallsgips. Denne sementen er anvendelig til

nesten alle formål, og har et svært godt miljø-, klima- og ressursfotavtrykk (Hoang Nguyen, 2019).

Den lave prisen på gips har gitt en meget god konkurranseposisjon for produsentene av gipsplater. Tilsynelatende er gipsplater mer lønnsomme både for plateprodusentene og byggevare-industrien enn det treplater er. Forbausende nok er markedet preget av lokale/regionale forskjeller som samlet gjør langtransport vanskelig. Markedet er derfor preget av mange lokale produsenter, hele 160 anlegg bare i EU. Med lave og fallende priser på råstoffet gips, samtidig som kostnadene til hovedkonkurrenten treplater stiger, så ser markedet bra ut fremover for Europas gipsplateprodusenter.

Også i Norge har vi gipsplateprodusenter; Norgips i Svelvik og Gyproc i Fredrikstad. Begge disse er integrerte anlegg i store globale konsern, hhv Knauf og Saint Gobain. Det er ikke enkelt å dokumentere reell lønnsomhet i konsernintegrerte anlegg, men personlige meddelelser fra begge anlegg til Bergfald Miljørådgivere indikerer gode marginer og egenkapitalavkastning.

4.1.2 Gjenvinning av gips er stor industri

The Gypsum Association, som organiserer de store gipsplateprodusentene i USA, promoterer aktivt bruken av gjenvunnet gips fra industrielle kilder. Dette gjelder eksempelvis gips fra rensing av kullkraftverk, produksjon av flussyre, titandioksidpigment og sitronsyre. Den amerikanske bransjeforeningen forteller på sine hjemmesider at deres medlemmer årlig bruker over 7 millioner tonn slik gips til produksjon av sine plater (Gypsum-Association, 2019). Et spesifikt unntak er gips fra produksjon av fosforsyre til kunstgjødsel. Råstoff til kunstgjødsel inneholder så høye verdier av radioaktive stoffer og miljøgifter at de ansees uegnet til produksjon av gipsplater.



Med to lønnsomme og effektive gipsplatefabrikker i Norge burde det være mulig å øke gjenvinningen. Bilder av hhv ◀ Gyproc²⁶ i Fredrikstad og ▶ Norgips²⁷ i Svelvik.

Selv om bransjeorganisasjonene promoterer at mange slags gjenvunnet gips kan brukes til produksjon av plater, så er det i praksis nesten bare kullkraftsgips som brukes. Uten å spekulere for langt skyllers nok det at syntetisk gips fra titandioksid, fosforsyre og sitronsyre trenger et ekstra rensetrinn, som ikke kan forsvares økonomisk med en gipspris på 8 \$/tonn og billig deponering. Kullkraftsgips kan brukes direkte, uten et ekstra rensetrinn. Tross dette deponeres også en del kullkraftsgips – hvis det er langt til nærmeste sement- eller gipsplatefabrikk.

I Europa gjenvinnes om lag 300.000 tonn brukte gipsplater fra riving av bygg, i USA noe mindre. I tillegg brukes det noe gips fra produksjon av titandioksidpigment, men foreløpig små volumer sammenliknet med markedet på titalls millioner tonn. Her finnes det markedsmessig handlingsrom.

4.1.3 Kullkraften blir borte

Markedet ser ut til å være i rask endring. Både i USA og Europa stenges nå kullkraftanlegg. Effekten sees tydeligst i USA, som ikke subsidierer kullkraften i samme grad som Europa. Effekten er like fullt at Europa har 3-4 millioner tonn gips mindre tilgjengelig fra kullkraftverkene nå, sammenliknet med for noen få år tilbake. Dette gir har gitt økt interesse for gjenvinning, både i form av bruk av industriell avfallsgips og gjenvinning av gipsplater. Økende kostnader



til deponering av gips bidrar også positivt til gjenvinning. Også i Norge har dette gitt effekt, ved at det internasjonale konsernet New West Gypsum Recycling har etablert et gjenvinningsanlegg sammen med Norsk Gjenvinning i Holmestrand – og gjort leveranseavtaler med både Norgips og Gyproc. Bransjen er selv svært aktiv i å promotere gjenvinning av gipsplater (Eurogypsum, 2015).

Fallet i leveransene fra kullkraften vil fortsette. I følge Eurogypsum forventer de ytterligere 7 millioner tonn mindre gips fra kullkraft i Europa i 2030 (Marlet, 2018). Enda mer hvis de europeiske landene skulle finne på å følge Paris-avtalen. I markedet er det derfor høy aktivitet på å se på både økt gjenvinning og nye forsyningsmuligheter.

Livssyklusanalyser av gipsplater laget med hhv gruvebasert gips og gips fra industriavfall viser store miljøfordeler med gjenvinning (Athena, 2011) (L.Dvorkin, 2016). Fallet i forsyninger av kullkraftgips gjør derfor at miljøfotavtrykket fra europeisk gipsindustri nå øker, ved at stadig mer av gipsen som brukes kommer fra gruver.

Vi har erfaringer i Norge med å skape nyttige produkter fra gipsavfall. I mange tiår pumpet Noralf i Odda sin avfallsgips fra produksjon av aluminiumfluorid ut i Sørkjøfjorden. Nå blir det meste av produksjonen solgt, i hovedsak til bruk i flytende gulv.



◀ Til venstre, sortering av gipsplater til gjenvinning i USA,²⁸ ▶ til høyre bilde av gipsgjenvinningen til Norsk Gjenvinning i Holmestrand.²⁹



◀ Venstre: Norge eksporterer allerede 90.000 tonn/år avfallsgips fra Odde til byggeindustrien i Europa. Markedet er økende og kan ta mye mer. Faksimile fra Haugesunds Avis.³⁰ ➔ Høyre: flytende gips gir jevne gulv.³¹

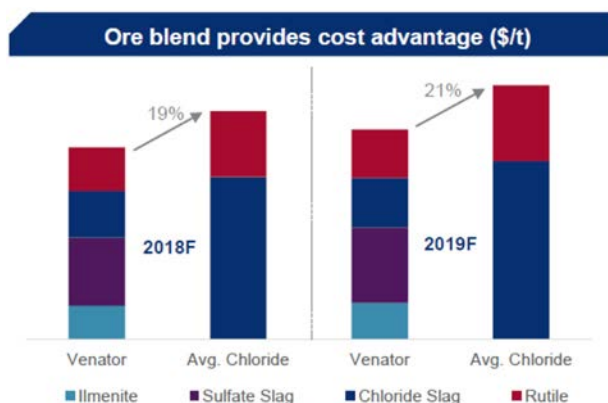
4.1.4 Gips i Norge - vil det vare?

Årsaken til at vi har mye gips tilgjengelig i Norge er produksjonen av titandioksid basert på svovelsyre-behandling av ilmenitt. Titandioksid er en stor industri globalt. Produksjonen er basert på to konkurrerende teknologier, enten klorering eller svovelsyreoppløsning. Disse to teknologiene er i praksis også avhengige av to forskjellige råstoffer. Svovelsyrebasert produksjon bruker ilmenitt, i hovedsak fra gruver som Titania i Norge, mens klorbasert produksjon bruker rutil, som i hovedsak vaskes ut fra sandstrender i tropiske land. I fremtiden kan det komme rutil også fra gruve i Norge, hvis Nordic Mining starter sitt prosjekt i Engebø.

Det har lenge blitt stilt spørsmål ved fremtiden for sulfatbasert produksjon av titandioksid – om ikke denne ville bli konkurrert ut av klorbasert (og dermed rutilbasert) produksjon. Det er av mange fremsatt påstander om at sulfatbasert produksjon er mye dyrere enn klorbasert. Realiteten er at det er vanskelig å sammenlikne forskjellene. Rutilbasert produksjon priser

i utilstrekkelig grad inn tap av biologiske verdier og politisk risiko i uttak av sandstrender, mens sulfatbasert produksjon i utilstrekkelig grad priser inn ressurstap og risiko knyttet til deponering av gips. Det ligger også i kortene at klorbasert produksjon har høyere investeringskostnad per tonn kapasitet, mens sulfatbasert produksjon har høyere driftskostnad.

Foreløpig ser det imidlertid ut til at sulfatbasert produksjon klarer seg riktig godt, og det planlegges igjen nye sulfatbaserte anlegg flere steder i verden. Verden har nemlig et stort og økende strukturelt overskudd av svovelsyre, og ilmenittmalm er langt billigere enn rutilmalm. Produksjonskostnaden til sulfat-anleggene ligger derfor godt an sammenliknet med kloranleggene. Forutsetningen er selvsagt at man har mulighet for å disponere den brukte svovelsyren på en kostnadseffektiv måte. Så langt har det vært tilfelle i Norge. Disponering av svovelsyre betyr i praksis at det lages gips, som enten kan selges eller deponeres.

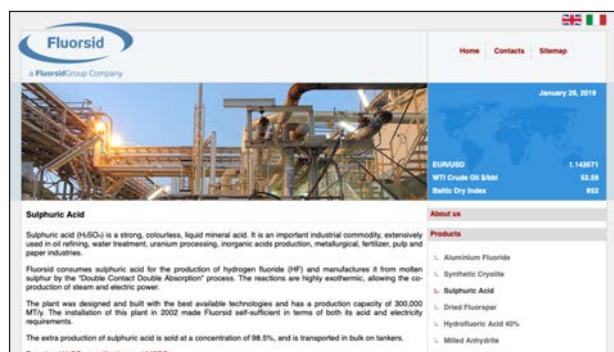


Ilmenittbasert produksjon av titandioksid konkurrerer med rutil fra sandstrender. ◀ Til venstre er produksjonskostnad hentet fra Venators investorpresentasjon i november 2018.³² Venator driver både klorbasert og sulfatbasert produksjon – og sulfatbasert er billigst. ➔ Til høyre et illustrasjonsbilde fra Eramets anlegg i Senegal, som henter sand til smelteverket i Tyssedal.³³

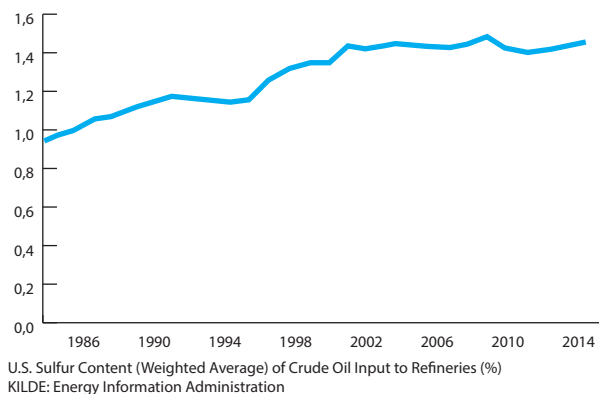
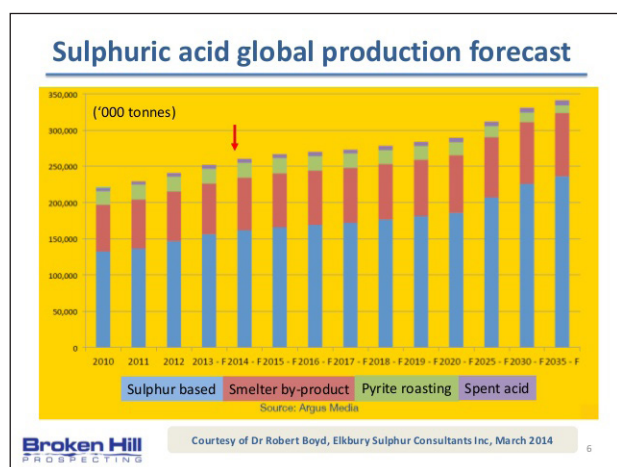
Den konkurrerende teknologien, basert på rutil i stedet for ilmenitt, får i økende grad sitt råstoff fra utgraving av strender i Afrika – en praksis det er vanskelig å se for seg vil unngå økte miljømessige krav i fremtiden. Vi legger derfor til grunn at ilmenitt og sulfatbasert produksjon av titandioksid vil fortsette i lang tid – og dermed gi opphav til store volum med brukt svovelsyre som trenger en sluttbehandling.

Det er ikke mulig å vurdere markedet for gips uten også å omtale markedet for svovelsyre. Dette er et av verdens aller største materialmarkeder, med nesten 300 millioner tonn i volum – og er nesten utelukkende tvangsmessig produsert i form av biproduksjon fra annen industri. Svovelsyre forsynes i dag nesten utelukkende fra to strømmer; avsvovling av sure olje-produkter, og røsting av sulfidiske malmer.

Etterspørselen etter olje kommer trolig til å vedvare i noen år til, og trenden går kraftig i retning av dårligere og surere oljeforekomster, samtidig som kravene til lavsvovlige oljeprodukter strammes til. Netto uttak av svovel per oljeenhet kan derfor forventes å fortsette å gå opp fremover.



← Venstre: Satsingen på oljesand har gitt enorme overskudd av svovel. Her fra et av de norskfinansierte anleggene, hvor overskuddet av svovel støpes ut i blokker og stables i høyden.³⁴ (Foto: Alex MacLean) → Høyre: Selskaper som Fluorsid brenner svovel for å lage damp – og bruker svovelsyren som oppstår i sin produksjon av aluminiumfluorid.³⁵ (www.fluorsid.com)



← Svovel og svovelsyre kommer som biprodukter fra annen industri og vil øke ytterligere fremover.³⁶ → Olje som utvinnes blir stadig surere, så det kommer mer svovel fra oljesektoren fremover.³⁷

Tilsvarende er etterspørselen etter overgangsmetaller som sink, kobber, nikkel etc stigende. Dette er metaller som ofte foreligger som sulfider. I gammeldagse anlegg, slik som Norge drev i Sulitjelma eller Russland driver i Nikel, blir malmen brent og svovelet sluppet som SO_2 til atmosfæren. Økende utslippskrav tilsier at fler bygger om anleggene til å fange svovelen som syre. Dette vil bidra ytterligere til å øke det strukturelle overskuddet av svovelsyre.

Økende, og tvangsmessige, tilførsler av svovelsyre vil gjøre at store industrier som har svovelsyre som innsatsfaktor får gunstigere vilkår fremover. Industrier som kunstgjødsel eller titandioksid, som kan velge mellom å etablere nye fabrikker basert på enten (gammel) svovelsyreteknologi eller ny teknologi på andre plattformer, markedsmessig skyves i retning svovelsyre. Samtidig er dette et dilemma – hva skal gjøres med svoveloverskuddet. Ikke alle kan gjøre som kanadiere og stable svovelet i pyramider.

Tidvis vil denne utviklingen gå i samme retning som deler av fornybar energi, ved at det blir negativ prising (CruGroup, 2016), altså at man får betalt for å ta imot svovelsyre. Dette har allerede blitt observert, bl.a. i Norge.

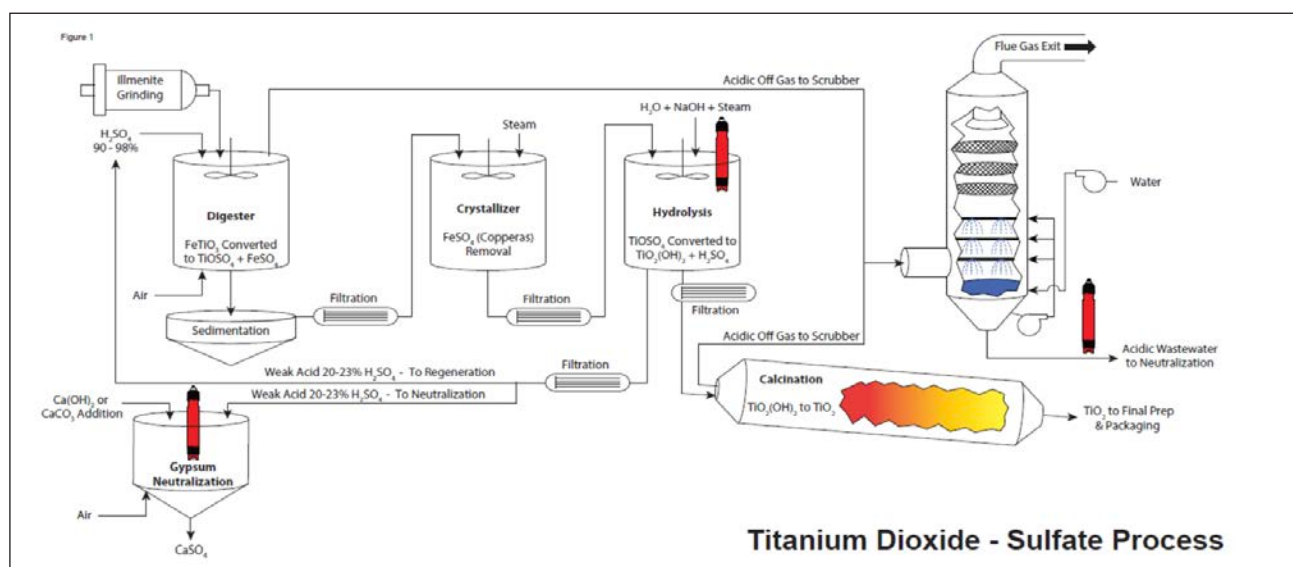
Den største tonnasjen tilgjengelig globalt er gips fra fosforsyreproduksjon. Det er anslått at det ligger 4 milliarder tonn gips fra slik produksjon på lager. Dette er trolig et forsiktig anslag. Andre kilder anslår en årlig produksjon på 200 millioner tonn (Fuleihan, 2011).

Det ligger store fjell tilgjengelig også i våre naboland, men ikke i Norge. I Norge har produksjon av kunstgjødsel alltid vært basert på nitrofosfatprosessen, som gir det salgbare biproduktet kalsiumnitrat i stedet for det biproduktet kalsiumsulfat (gips). Den tekniske hovedutfordringen med gips fra fosforsyreproduksjon er at mange råfosfatkilder har høye nivåer av uran og tungmetaller – som blir ligger i gipsen. Det er vanskelig å se for seg at det vil være lov å bruke urensset gips direkte – og kostnadene med å rense ut tungmetaller og radioaktive stoffer vil være merkbare (Haijun Liang, 2017).

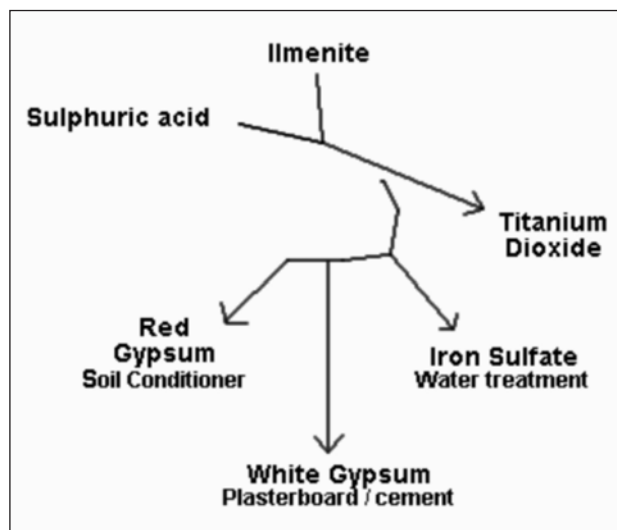
4.1.5 Kan gipsen gjenvinnes?

Når man produserer titandioksid med svovelsyre blir mye av syren igjen som en ureagert, uttynnet og forurenset rest. Frem til slutten av 80-tallet ble brukt svovelsyre fra slik produksjon sluppet ut i Glomma. Siden da har dette blitt håndtert gjennom nøytralisering til gips i regi av det som i dag er kjent som NOAH. Andre steder i verden praktiserer også nøytralisering, men praksisen for øvrig er svært varierende. Vi har derfor samlet en del eksempler på teknologier som har vært i bruk, samt hvilke markeder som har blitt utviklet.

Gips fra produksjon av titandioksid har ikke det samme problemet med giftige forurensninger. Det er mye metaller i uraffinert titanogips også, men i hovedsak mer ufarlige metaller som jern og sink. Nivåene av de farligste tungmetallene er begrenset, og nivåene av radioaktive stoffer er normalt ganske lave. Dette gjelder i særlig grad de fabrikkene som får råstoffene fra Norge, som er naturlig lave på radioaktive stoffer.



Prosessbeskrivelse for titandioksidproduksjon fra teknologileverandøren AMetek. Legg merke til at her blir deler av tynnnsyren gjenvunnet, mens jernsulfat og gips kommer ut som biprodukter.³⁹ (Faksimile AMetek brosjyre.)



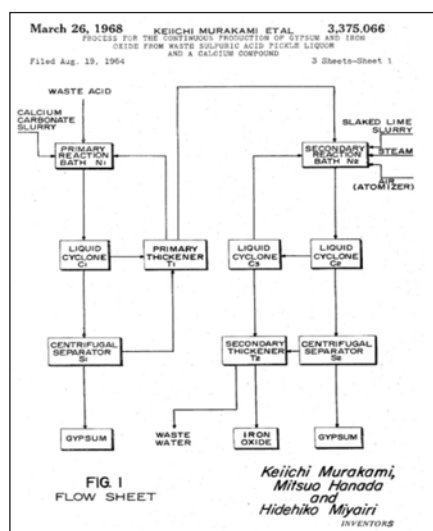
◀ Venstre: Sustained forteller i en av sine brosjyrer at Huntsman (nå Venator) selger 1 million tonn gips fra sine titandioksid-fabrikker på verdensbasis.⁴⁰
 ➔ Høyre: Ishikara i Japan promoterer gips til landbruket.

Cristals sulfatbaserte fabrikk i Thann, Frankrike, er tro- lig blant de fremste i å bruke biproduktene fra titandioksidproduksjonen. Svovelsyren blir etter TiO_2 -ekstraksjonen nøytralisert med kalk til gips. Gipsen selges til sementindustri og platefabrikker og som gjødsel til landbruket i regionen. I samarbeid med Veolia har de installert et nanofiltreringsanlegg som gjenvinner en del svovelsyre fra prosessen. I tillegg planlegges det nå et anlegg for å fange CO_2 fra nøytraliseringen som bikarbonat (Veolia, 2018). Deponeringsvolumet blir dermed svært lavt.

Gips fra titandioksidproduksjon bør renses før noen bruksområder, slik som plater. For sement-tilsetning er ikke det like viktig. Teknologi for å rense gips har vært kjent lenge. De første patentene som ble tatt ut på slik teknologi har allerede gått ut (USA Patentnr. US3375066A, 1963).

Fra Kina rapporteres det at små og gamle titandioksid-anlegg som ikke er i stand til å finne løsninger på sitt gipsavfall må stenges ned. Dette kan gi nye muligheter for europeisk industri, som har vært preget av stort eksportpress fra nettopp Kina.³⁸

En hovedutfordring med titan-gips er det høye innholdet av jernsulfat. Jernet gir farge og lavere styrke til gipsplater, og bør filtreres ut. For noen verdikjeder innen sement og betong kan gipsen imidlertid brukes uraffinert. Venator, et av de største selskapene innen titandioksid i verden, publiserte i f m sin utskillelse fra Huntsman i 2016 at over 60 % av biproduktene fra deres sulfatfabrikker nå ble solgt. Se for øvrig kapittel om jernsulfat.



◀ Venstre: Prosess-tegning for et gammelt patent for gipsgjenvinning.⁴¹ ➔ Høyre: Kronos Varennes, som gjenvinner 62.000 tonn gips per år.⁴²



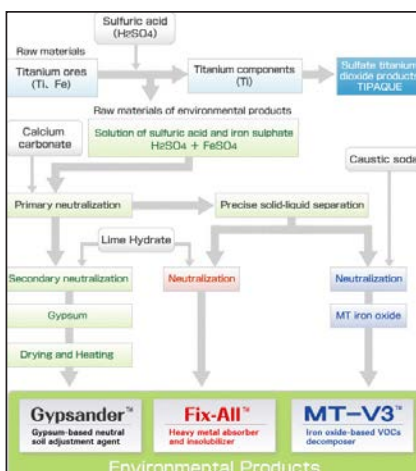
← Til venstre; gipsfjell fra fosforsyreproduksjon.⁴³ (Creative Commons license Attribution-ShareAlike (CC-BY-SA)) → Til høyre; gips fra titandioksidproduksjon.⁴⁴

Det er kun et sulfatbasert titandioksidanlegg i Sør-Amerika, til gjengjeld er Cristals anlegg i Bahia stort, visstnok verdens nest største. Hvis vi forstår prosessen rett bruker de en uforedlet ilmenitt, og gjenvinner i tillegg svovelsyre ved å ta ut avfallsstoffer i et ro-tasjonsfilter. Anlegget tar i tillegg til titandioksid ut store mengder jernsulfat, som bl.a. brukes i dyrefor og som gjødsel. Det er gjort interessante tester på å bruke restproduktet i teglprodukter, både murstein og takstein. Store tester viser at det er mulig å blande avfallet med lokal kaolin, og lage brukbare stein (Daniel Vêras Ribeiro, 2015). Dessverre har ikke Norge lenger teglindustri hvor dette kan brukes, men europeisk teglindustri er stor.

I Japan har man valgt en annen strategi vedr. både gips og jernsulfatinnholdet, kanskje på grunn av vanskeligere tilgang på areal til deponering. Japans ledende titandioksidproduksent, Ishihara Sangyo Kaisha, har en kompleks etterbehandling av den brukte svovelsyren, der de får tre store og salgbare produkter; en nøytral og ren gips som kan anvendes i landbruket, et salgbart jernoksid og et filtermateriale med høy overflate til binding av tungmetaller.

Det er også gjort forsøk på å bruke inert rest fra syreløsning av ilmenitt som råstoff til produksjon av keramiske fliser (Gázquez M., 2015). Flisene vil da naturlig ha en rødfarge fra jerninnholdet. Dette er så vidt oss bekjent ikke kommersialisert.

Direkte bruk av «rød gips» fra titandioksidproduksjon, altså en uraffinert blanding av gips, jernsulfat og jernhydroksid er vanlig flere steder i verden (Gázquez M. J., 2012).



Ishihara foredler sitt svovelsyreavfall til salgbare og nyttige produkter ved anlegget i Yokkaichi.⁴⁵

Avertana⁴⁶ er et selskap på New Zealand som har utviklet en ny teknologi for å prosessere titandioksid og biprodukter. Basisen er den New Zealandske stålindustrien, som bruker råstoff med høy forurensning av ilmenitt, noe som gir et titanrikt slagget. Dette slagget klarer Avertana å splitte opp i fire salgbare fraksjoner; titandioksid, gips, magnesiumsulfat og aluminiumsulfat. Dette er et tidlig-fase selskap, og teknologien er foreløpig ikke kommersialisert, men definitivt noe å følge med på.

Det er relevant å nevne at et betydelig prosjekt er under planlegging i Sør-Afrika. Der ligger det en slagghaug på 45 millioner tonn fra stålproduksjon, med et innhold av titandioksid på 32 %. En konstellasjon av Sør-Afrikanske og utenlandske selskaper arbeider nå med å etablere en innovativ titandioksidfabrikk basert på sulfatprosessen, med koproduksjon av både aluminiumsulfat og gips.⁴⁷ Investeringsanslaget er på 350 M\$, men den gode miljøprofilen burde gjøre det mulig å realisere dette prosjektet.

Et alternativ til å nøytralisere brukt svovelsyre med kalsiumrikt materiale for å lage gips er å reagere syren med ammoniakk for å lage ammoniumsulfat. Ammoniumsulfat er et av verdens større kjemikalier, med årlig produksjon på i overkant av 17 millioner tonn (Messo, 2017). Nesten all ammoniumsulfat kommer som biprodukt/avfall fra annen industri, og spiller således en viktig rolle. Siden det per i dag er store overskudd av kalsiumrikt avfall i Norge, mens den norske ammoniakkproduksjonen er basert på fossil amerikansk frackinggass, så har vi valgt å ikke prioritere

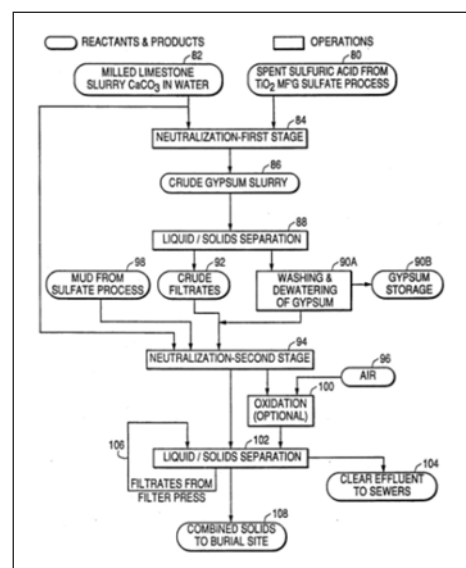
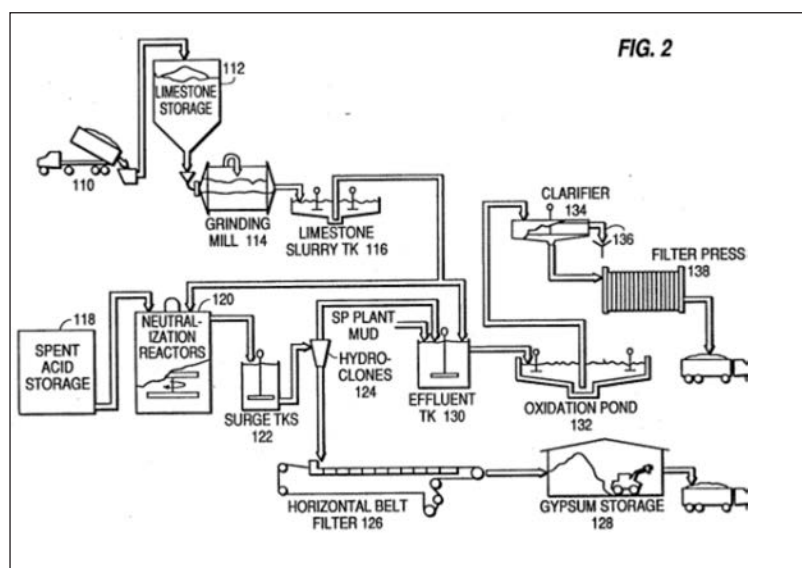
denne muligheten. Det er imidlertid mulig å gjøre en egen vurdering på dette senere. Eksempelvis har Yara og NEL i 2018 inngått et samarbeid om å utvikle konsept for fossilfri ammoniakkproduksjon,⁴⁸ hvor en kombinasjon med avfallsbaserte materialstrømmer trolig kan være interessant.

4.1.6 Deponeres det for mye i Norge?

I Norge nøytraliseres overskuddssyre fra titandioksidproduksjon av NOAH med flyveaske fra forbrenning av avfall. Dette har vært en solid og praktisk måte å håndtere to problemer på. Men, det er også en løsning som gir store volumer av avfall til sluttdeponering, og et tap av potensielt interessante ressurser. Det er ikke utenkelig at denne teknologien kan modifiseres og foredles noe – slik at en betydelig andel av gipsen kan filtreres ut i et tidlig prosessstrinn,⁴⁹ uten at det endrer stabiliteten til sluttproduktet i vesentlig grad.

Kronos patenterte i 1992 (USA Patentnr. US5298169A, 1992) en teknologi for produksjon av salgbar (hvit) gips fra sitt anlegg i Varennes i Canada. Denne teknologien starter med velkjent nøytralisering av svovelsyren med kalsiumkarbonatslurry. I kontrast til tidligere teknologier har den så flere filtreringstrinn, og en sekundærnøytralisering av gipskaken. Se for øvrig prosesstegning under.

Et interessant aspekt ved denne teknologien er at den tar ut relativt mye gips – men ikke alt. I den brukte syren er det en rekke avfallsstoffer som trenger deponering, og gipsen er viktig for å stabilisere dette avfallet. Avfallet er i prosesstegningen over beskrevet som «crude filtrate» og «mud from sulfate process».



Kronos sin patenterte prosess for produksjon av salgbar gips fra avfallssyre.⁵⁰

Basert på beskrivelsene og løselighetsforholdene som er angitt i patentet anslås det at ca tre fjerdedeler av gipsen tas ut som en hvit, salgbar gips, mens resten blir med filtratet til sluttdeponering.

Siden brukt svovelsyre fra Kronos Titan utgjør en vesentlig del av mengden uorganisk farlig avfall i Norge, har vi sett spesifikt på potensialet for å hente ut gjen-vinnbare volumer fra dette avfallet.

Det er i arbeidet med denne rapporten valgt å kun bruke åpne kilder. Vedr. sammensetningen til tynn-syren har vi valgt å bruke en eldre referanse fra en av Kronos sine søsteranlegg (Knutzen, 1971). Dette anlegget har både råstoff og teknologi som ligger svært nær det Fredrikstad-anlegget benytter.

De fleste anlegg og teknologier som nøytraliserer brukt avfallssyre bruker vanlig, nedmalt kalkstein. Dette gir imidlertid et betydelig CO₂-utslipp. Ved bruk av flyve- aske fra avfallsforbrenning, slik det gjøres av NOAH, oppnås nøytralisering og gipsdannelse uten ekstra CO₂- utslipp. Ureagert kalk i flyveasken vil etter oppslem- ming foreligge som kalsiumhydroksid.

Ideell reaksjonslikning er i så fall:

$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Gips som ikke er kalsinert har 2 krystallvann.

Støkiometrisk får man følgende mengder:

Svovelsyre (98,1) + kalsiumhydroksid (74,1) reagerer til gips m/krystallvann (172,2)

Gitt at tilgjengelig mengde svovelsyre er 37.716 tonn (se tabell), så gir det 66.205 tonn gips. Det er imidler- tid ikke realistisk å få alt dette ut som salgbar gips uten svært stor ressurs- og energiinnsats. Basert på anslått samlet effektivitet på 2-trinns hydrosykloner i den patenterte separasjonsteknologien til Kronos på 75-80 %, så vil dette gi en realistisk salgbar gipsmengde på 50.000 tonn. Resterende mengde gips vil binde opp de øvrige avfallsstoffene som ligger i tynnsyren, så det som er igjen etter at salgbar gips er tatt ut er fortsatt farlig avfall. Mengden er imidlertid vesentlig redusert, så behovet for deponivolum er langt mindre. I disse anslagene legges det kjente/patenterte teknologier til grunn, og disse gir tilnærmet hvit gips – altså gips egnet til byggeplater. Hvis man senker kvalitetskravene, og lager enten byggeplater iht. Syd-Europeiske kvalitetskrav, eller bruker gipsen til sementproduksjon, så kan man tillate et høyere jern/fargeinnhold.

KOMPONENT	ANDEL	NETTO MENGDE
Svovelsyre H_2SO_4	14,4	37 716
Jernsulfat FeSO_4	7,1	18 596
Titanylsulfat TiOSO_4	1,6	4 191
Magnesiumsulfat MgSO_4	1,6	4 165
Mangansulfat MnSO_4	0,1	210
Kromsulfat $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$	0,0	52
Vanadylsulfat VOSO_4	0,1	183
Aluminiumsulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	0,3	786
Annet	0,1	367
Vann H_2O	74,7	195 654
	100,0	261 920

Eksempel fra Tyskland på typisk sammensetning av tynnsyre fra TiO₂-produksjon til deponering. Legg merke til at det meste av jernsulfat er tatt ut som biprodukt.

Reststoffene etter uttak av salt, gips og jernsulfat må deponeres, og derfor er det en fordel at hydro- syklonene ikke er for effektive – noe gips bør være med for å stabilisere restavfallet.

Hvis flyveasken i fremtiden blir prosessert vil asken endre egenskaper fullstendig, og ikke lenger være relevant for gipsproduksjon. I så fall må svovelsyren nøytraliseres med kalkstein, som gir CO₂-utslipp. Gipsproduksjon fra titandioksidproduksjon er kjent og moden teknologi som kan besøkes. Bruk av flyveaske i stedet for kalkstein gir økt kompleksitet, men også lavere kostnader og lavere utslipp av klimagasser.

Hvis man i stedet for flyveaske bruker nedmalt kalk- stein, slik patentet tilsier, får man følgende reaksjon:

$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Gips som ikke er kalsinert har 2 krystallvann.

Svovelsyre (98,1) + kalk (100,1) reagerer til gips m/ krystallvann (172,2) og CO₂ (44)

Gitt samme mengde svovelsyre og at det benyttes en ren kalkstein av typen Verdalskalk, så vil det være et behov for 38.800 tonn kalkstein til en pris av 5,8 MNOK, samt at det oppstår et utslipp av CO₂ på 16.916 tonn. Hvis dette CO₂-utslippet må kjøpe kvoter i det europeiske kvotemarkedet, så vil det med dagens kvotepris (30.januar 2018), gi en kostnad på 3,7 MNOK.

Til sammenlikning er salgsverdien av 50.000 tonn rågips ca. 3,7 MNOK.

Inntektene som kommer fra salget av gips etter nøytralisering med kalkstein vil altså være nok til å dekke CO₂-kvoter, men ikke innkjøp av kalkstein, bygging eller drift av et gipsseparasjonsanlegg.

4.1.7 Oppsummering

Det er et stort og økende marked for gips, både i verden og Europa. Det blir langt mindre gips tilgjengelig i årene fremover, så det vil oppstå et underskudd i markedet som vil kunne dekkes av økt gjenvinning. Gjenvinning av gips fra brukt svovelsyre fra titandioksidproduksjon er kjent teknologi som finnes, men som ikke er konkurransedyktig med dagens gipspriser. Slik gjenvinning kan utvikles til også å omfatte gips fra nøytralisering av farlig avfall.

4.1.8 Forslag til tiltak

- Initier et samarbeid mellom norske gipsaktører om produksjon av gips fra farlig avfall. Ambisjonsnivået bør være å ta ut 50.000 tonn til nyttegjøring.
- Statens innkjøpsregelverk bør stille krav om at kjøp av gipsplater kun kan være basert på gips som er gjenvunnet eller fra biprodukter, ikke gruvebasert.

4.2 JERNSULFAT

I gipsen som oppstår ved produksjon av titandioksid er det også et høyt innhold av jernsulfat. Dette er et produkt med lang historikk, bl.a. under navnet vitriol. Jernsulfat brukes som jernkilde i dyrefor, i sement, som sneglegift, som gjødsel for frukttrær, avløpsrensing, treimpregnering og en rekke andre formål.

Kronos leverer jernsulfat fra sitt anlegg i Leverkusen, for å avgifte seksverdig krom i sementindustrien (Kronos, 2011). Fra anlegget i Fredrikstad leveres det jernsulfat til bruk i rensing av drikke- og avløpsvann.⁵¹ Titandioksidprodusenten Venator markedsfører jernsulfat som et selvstendig produkt under eget varemerke; Ferriclar. Venator har en egen fabrikk for jernsulfatprodukter ved sitt anlegg i Huelva, Spania. (Gázquez, 2014). En hovedårsak til at Venator etablerte produksjon av både gips og jernsulfat her var press fra spanske miljøgrupper mot deponeringen av restprodukter (Eder, 2001).

Selv om det er mulig å utvinne jernsulfat fra verdikjeden til titandioksidproduksjon, så fremstår ikke jernsulfat som et raskt voksende marked. For alle praktiske formål innebærer det at en ny produksjon av jernsulfat fra titandioksidstrømmer i Norge vil føre til nedstenging av tilsvarende kapasitet og deponering et annet sted.

Dette kan endre seg hvis økologisk landbruk blir mer populært. Jernsulfat er et av få midler som er godkjent til bruk i økologisk produksjon, og det er også et populært middel til bruk i hager. Nyttverdien sies å være særlig god hvis jernsulfatet blandes med kompost eller kloakkslam før gjødsling av jorda. Det er ikke utenkelig at dette markedet kan vokse noe i fremtiden.

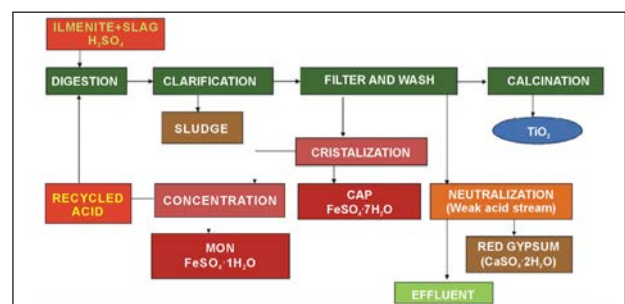
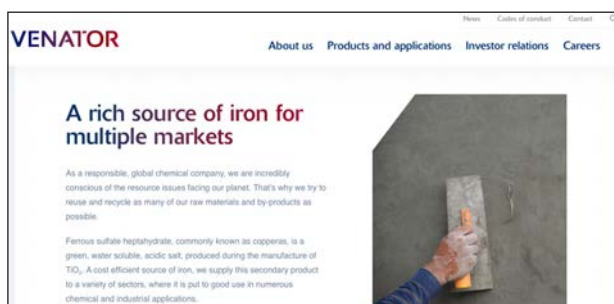
Det er også tegn til en økende interesse for mikronæringsstoffer i landbruket. Etter mange tiår med intensivt jordbruk og omfattende bruk av nitrogen-gjødsler opplever mange områder et fall i tilgjenge-



Jernsulfat er et av få produkter som er godkjent å bruke i økologisk landbruk over hele verden, også i Norge. Her er eksempler på sekker fra Paras (India),⁵⁹ Yara,⁶⁰ QC (USA),⁶¹ Crown (USA),⁶² Lancelot (UK)⁶³ og ChinaHao.⁶⁴

ligheten av flere mikronæringsstoffer. Dette kan være bor, kobber, sink etc – men også jern. Estimerer fra Nord-Amerika tilsier at det kommersielle jordbruket der bør starte å bruke jerntilskudd tilsvarende 630.000 tonn jernsulfat per år for å unngå videre fall.⁵² Hvis kunnskap om mikronæringsstoffer brer om seg i landbruket kan det godt oppstå en rask markedsutvikling. Kompost tilsatt jernsulfat har eksempelvis oppnådd popularitet i vegansk landbruk – altså landbruk som skal være helt frikoplet fra både husdyrhold og kunstgjødsel. Det virker krevende å opprettholde høy produktivitet i jordbruk med så strenge krav til innsatsfaktorer. Samtidig er etterspørselen etter organisk og vegansk dyrket mat sterkt økende. Dermed kan jernsulfat få en renessanse som gjødselsmedium, enten alene eller som tilsats til kompost.

Det globale markedet for jernsulfat i dag har vist seg vanskelig å finne gode tall for. Basert på fremskriving av litt foreldede tall⁵³ estimerer vi et totalt verdensmarked på om lag 1 million tonn (ikke medregnet krysaltvann) og priser på i området 200 \$/tonn. Prisene er imidlertid sterkt avhengig av applikasjon.

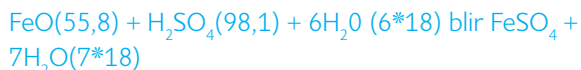


Venator produserer jernsulfat og gips som biprodukter fra sin fabrikk i Spania, for å unngå kontroversiell deponering. ← Til venstre: fra Venators markedsføring på sin webside.⁵⁷ → Til høyre: prosessdiagram.⁵⁸ (Creative Commons Attribution International License (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

I Kina har de videreutviklet teknologien for å lage rent jernsulfat (Kina Patentnr. CN1090829A, 1993). (Kina Patentnr. CN105329952A, 2015). Huntsman (nå Venator) investerte 38 M€ i 2014 ved sin titandioksid-fabrikk i Italia for å hente ut mer jernsulfat.⁵⁴

Ilmenittkonsentratet som brukes av Kronos i Norge er relativt høyt anriket, og består av 92-93 % FeTiO_3 . Resten er en del jernmineraler og rester av pyroksen, feltspatoider etc. Ilmenitten reageres med svovelsyre slik at mineralet splittes fra FeTiO_3 til FeO og TiO_2 .

For å kunne lage 35.000 tonn netto salgbar titandioksid trengs det om lag 80.000 tonn ilmenitt-konsentrat. Det er disse volumene som er i bruk i Norge. Da er det hensyntatt produksjonstap (titandioksid til tynnnsyren) og forurensninger i konsentratet. Gitt at forurensningene i ilmenittkonsentratet har om lag tilsvarende jerninnhold som i ilmenitten vil det fra konsentratet tilføres 37.800 jern, regnet som FeO . Omregnet til jernsulfat (heptahydrat) blir mengdekalkylene som følger (atomvekter i parentes):



37.800 t jernoksid + 51.646 t svovelsyre + 56.858 t vann blir 79.970 tonn jernsulfat med 66.334 tonn bundet vann. Til sammen 146.304 tonn.

I titandioksidproduksjonen brukes det i tillegg metallisk jern som reduksjonsmiddel, som gir flere titalls tusen tonn mer jernsulfat. Samtidig tas det også ut over 100.000 tonn jernsulfat som produkt allerede, til vannrensemarkedet.⁵⁵

I tillegg oppstår det ytterligere fraksjoner i Norge, men disse har det ikke vært mulig å kvantifisere innenfor rammene av dette prosjektet. Konservativt anslått, og med referanse til forslaget om ekstraksjon av salgbar gips og salt, så estimeres det et potensiale for å øke uttaket av salgbar jernsulfathydrat med inntil 40.000 tonn per år.

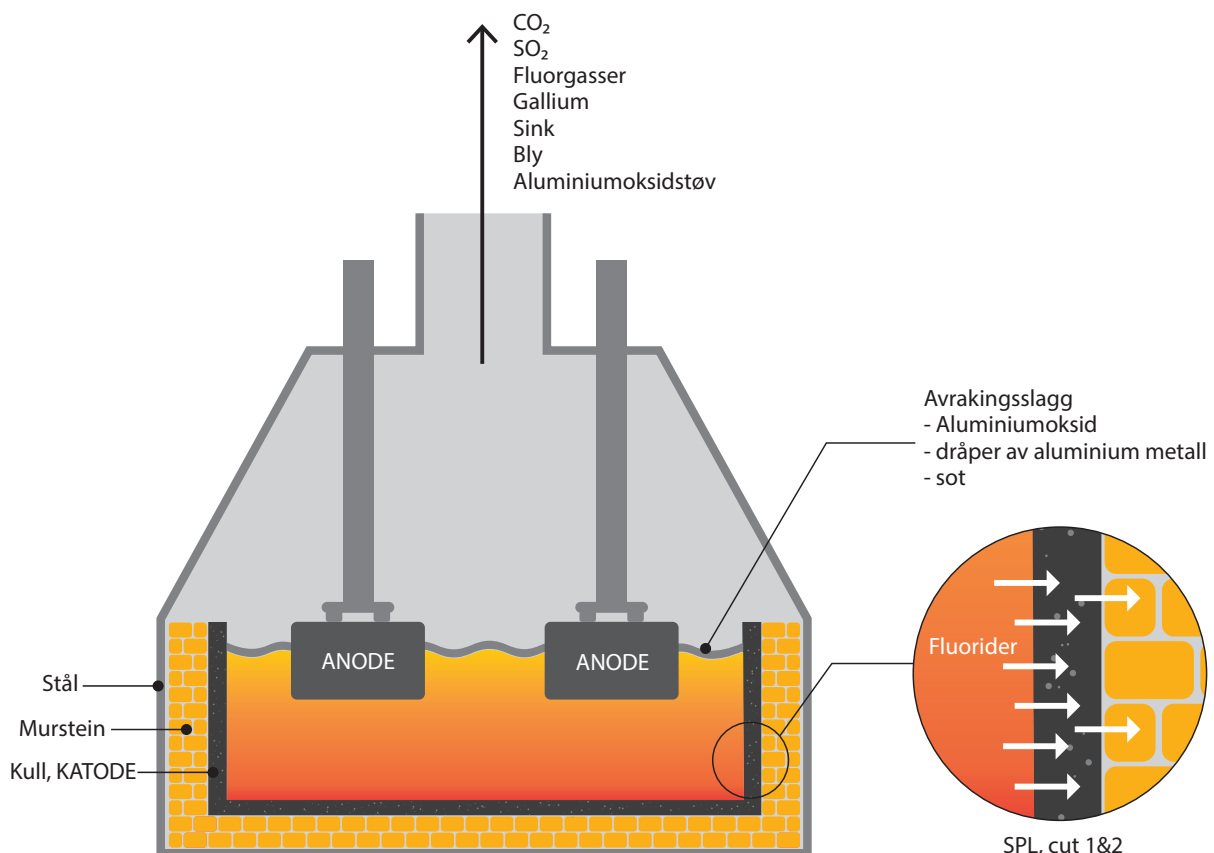
4.3 AVFALL FRA ALUMINIUMINDUSTRIEN

Norges store aluminiumsindustri skaper også betydelig mengder fast avfall. Noe av dette gjenvinnes i dag, eksempelvis hos Real Alloy, mens det meste går til deponering. Dels på bedriftsegne deponier, og dels til eksempelvis NOAHs anlegg på Langøya.

Aluminium produseres som oksidelektrolyse i en salt-smelte av fluoridsalter. Fluoridene muliggjør elektrolysen, men skaper også vesentlige avfalls- og utslippsutfordringer.

Dross og avrakingsslagg utgjør det største volumet av slikt avfall. Avrakingsslagget kommer ut fra elektrolyseovnene, mens drosset stammer fra utstøpingen – ofte etter legering. Avfallet oppstår fordi verken aluminiumoksiden og karbonråstoffet som tilføres elektrolysecellene er helt rene. Noen promille forurensning i form av jern, kalsium, silika etc er det alltid. Over tid hopes disse forurensningene opp i et slag på toppen av cellen, iblandet både aluminiumoksid, kryolitt og dråper av metall.

Produksjonen vil variere fra anlegg til anlegg og litt over tid, og forskjellige kilder spriker i anslagene på mengde. Noen kilder refererer anslag over produksjonen av dross som tilsvarer omlag 2,2 % av produksjonen av primæraluminium (Roth, 2011), mens andre anslår en mengde på nærmere 6,2 % (Petavratzi, 2007). Gjenvinning av klumper og biter av aluminium fra dross har vært kjent lenge og også utført i mange år i Norge, i de siste årene representert ved Real Alloy. Det finnes en lang rekke slike anlegg rundt om i verden, også i Norge, så gjenvinning vil alltid være mulig. Hydro har tidligere annonsert at de skal bygge et eget anlegg, men som med så mange andre av Hydros annonserte miljøsatser ble det med pressemeldingen.⁵⁶ I noen markeder er drossgjenvinning svært effektiv, hvor også lite verdifulle fraksjoner får en anvendelse, eksempelvis som slaggdanner i stålindustrien (Sedo, 2014). Stålverksslagg er for øvrig populært som innsatsfaktor i sementindustri, så gjennom slike grep oppnås en god total ressursutnyttelse.



Prinsippskisse av en elektrolysecelle for aluminium med de tre avfallsfraksjonene som drøftes nærmere; katodeavfall (SPL), dross og støv.



Qatalum er et av selskapene som velger å separere den karbonbaserte katoden fra murverket ved ovnsrevisjon. De to avfallsfraksjonene skal videre til hver sin bruk.⁶⁵

Drosset inneholder mye aluminiumoksid, som ofte kan tas ut som en salgbar fraksjon. Stort sett inneholder denne oksidfraksjonen for høyt innhold av forurensninger til at det er meningsfullt å ta det tilbake til aluminiumindustrien, og det selges derfor vanligvis til sement eller teglindustri.

Drosset inneholder også mye salter, som det er ressursmessig viktig å få tak i. Det er varierende praksis på behandlingsanleggene vedr. hvordan saltet håndteres. Se for øvrig kapittel om gjenvinning av salter.

Gasser, lettflyktige metaller og noe medrevet støv fra ovnen fanges opp i ventilasjonssystemene og tas ut i forskjellige rensetrinn. Mange aluminiumsverk har et første rensetrinn hvor det injiseres aluminiumoksid for å fange fluorider, som i noen tilfeller returføres, før restgassen renses via elektrofilter, posefilter eller våtvasker. I denne fraksjonen anrikes bl.a. gallium og sink. Se kapittel om gallium.

Ovnsløst, katodeavfall eller «Spent Pot Liner/SPL» som det i økende grad kalles på norsk er en vesentlig del av avfallskategori 7096. Historisk har SPL blitt deponert på lokale deponier ved de norske aluminiumsverkene, ofte sammen med posefilter- og elektrofilterstøv. I økende grad har avfallet måttet sendes til ekstern behandling og i økende grad er det interesse for gjenvinning og annen bearbeiding av dette avfallet (Rostock, 2016) (Yu D. &, 2015). SPL inneholder mye fluorider, men også cyanider. En referanse peker på opptil 40 % fluorider (V. V. Kondrat'ev, 2016), snittet ligger nok lavere, ned mot 15-20 %. Både fluorider og cyanider vaskes relativt lett ut – og skaper vannforurensningsutfordringer – særlig for ferskvannskilder. Det er derfor en betydelig miljømessig fordel om SPL kan behandles eller gjenvinnes. I Kina, som er den suverent største produsenten av aluminium og dermed har stor produksjon av SPL, regnes dette som en

betydelig, komplisert og prioritert avfallsfraksjon (Xia, 2018).

Siden mengdene av SPL har vært så store, og kravene til deponering strenge, har mange arbeidet med å finne gjenvinningsløsninger. Dette har vært vanskelig, og til dels dyrt. En referanse fra 2009 peker på gjenvinningskostnader i området 400-1200 \$/tonn (Yu, 2017). Fra Australia rapporteres det om priser som har ligget over 1000 \$/tonn i lange perioder, men at det nå er lavere (Paul Randell, 2016). Med slike kostnader er det åpenbart mer fordelaktig å deponere, selv om det også er kostbart når man skal unngå utlekking. På den annen side vil trolig industrialisering av gjenvinnings-teknologi føre til lavere kostnader i fremtiden.

I det videre kapitlet vil vi konsentrere oss om SPL, og identifisere mulige gjenvinningsspor.

4.4 KATODEAVFALL

4.4.1 Markedet for fluor, hhv syntetisk kryolitt og aluminiumfluorid

Historisk har fluor vært en viktig kostnad for aluminiumprodusenter, så det har vært en interesse for å redusere tap – og å gjenvinne mest mulig av det som tapes. Allerede på 40-tallet startet Alcoa å teste ut praktiske metoder for å fange og returføre fluor som forsvant ut av ovnene. De etablerte sinnrike innretninger som blåste aluminiumoksid inn over ovnene, bandt fluoridene og tok dette tilbake til ovnene. Erfaringen de gjorde seg, med datidens elektrolyse-celler, var at de hadde minst like god metallkvalitet med returføring av oppfanget fluorholdig støv – som uten (Cook, 1971).

I aluminiumsindustriens tidlige fase ble det kun brukt kryolitt som smeltesalt (NaAlF_6). Opprinnelig var dette basert på gruver, bl.a. en dedikert gruve på Grønland. Senere ble det etablert produksjon av syntetisk kryolitt.

Verdens aluminiumindustri bruker i økende grad aluminiumfluorid (AlF_3). Det globale markedet for aluminiumfluorid er nå oppunder 400.000 tonn, ifølge analyseselskapet Businesswire.⁶⁶ Deler av aluminiumfluoridmarkedet dekkes i dag av avfall og biprodukter fra bl.a. kunstgjødsel-industri (DECHEMA, 2015). Det er synd om slike anlegg blir utkonkurrert.⁶⁷

Både for kryolitt og aluminiumfluorid er aluminiumindustrien viktige avtakere, men det er også betydelige andre bruksområder.

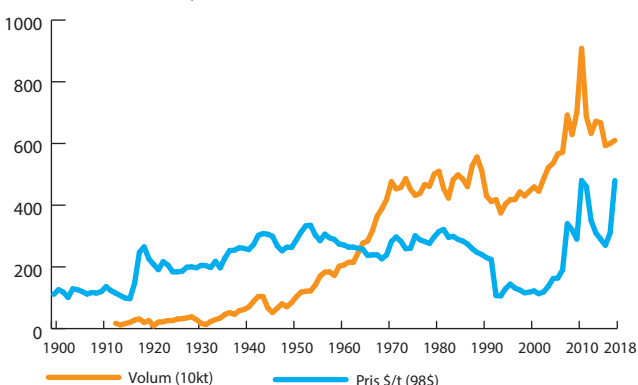
Syntetisk kryolitt produseres ved å reagere flusspat (CaF) med svovelsyre og aluminiumoksid, for deretter å nøytralisere med natronlut. I prosessen dannes det mye avfallsgips.

Aluminiumfluorid produseres på tilsvarende vis, ved å reagere flusspat med svovelsyre, med gips som biprodukt,⁶⁸ men uten natronlut.

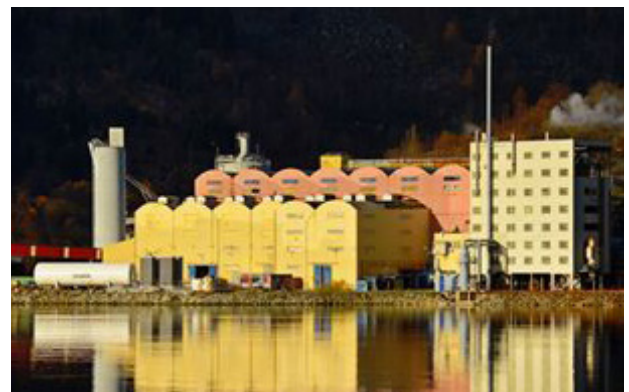
Det kan nevnes at fluor er regnet som et kritisk mineral.⁶⁹ Aluminiumindustrien har historisk vært opptatt av forsyningssikkerhet, og selv drevet gruver på flusspat, både i Norge og resten av verden. Hydro drev lenge en flusspatgruve ved Kongsberg, som nå er nedstengt. Denne gruen har fortsatt store ressurser, og det britiske gruveselskapet Tertiary Minerals vurderer å etablere ny drift. Ifølge selskapets nettsider er det identifisert 4 millioner tonn flusspat i området, med en konsentrasjon på 24,6 %. Selskapet estimerer å måtte investere 77,8 M\$, og får fra det en avkastning på 20,2 %. I Tyskland drives to gruver, ellers er det Kina som dominerer også dette markedet, med 80 % av verdens flusspat-produksjon.

Katodeavfallet fra aluminiumsverkene inneholder 10 – 30 % fluor, altså sammenliknbare mengder som både den norske og tyske forekomsten. Det virker å være en uheldig ressursforvaltning om denne gruen åpnes, samtidig som SPL med tilsvarende fluorkonsentrasjoner deponeres.

MARKEDSUTVIKLING, FLUOR (SOM FLUSSPAT)



← Venstre: Markedsutvikling for flusspat siden 1900.⁷⁰ → Høyre: Noralfs anlegg i Odda.⁷¹





◀ Venstre: Lassedalen Flusspatgruve ved Kongsberg.⁸⁸ ▶ Høyre: Fluorchemie GmbHs gruve i Sør-Tyskland.⁸⁹

Verdenskonsumet av flusspat er på om lag 5 millioner tonn, og det er kun en liten andel som går til aluminiumindustrien. Stålintustrien tar unna mye, men kjemikalieindustrien i form av teflon, kevlar etc tar også unna mye. Dette er positivt for gjenvinningspotensialet til SPL. Det er altså mulig å ha relativt simpel gjenvinning av fluor, eksempelvis i form av CaF, som leveres stålverk og dermed erstatter ny flusspat, hvis mer høyverdig gjenvinning viser seg vanskelig.

Det bør nevnes at forbruket i stålsektoren har gått noe ned senere år. Dels på grunn av økte priser på flusspat. Stålintustrien arbeider også for å øke gjenvinningen av flusspat.⁷²

Markedet for syntetisk kryolitt er av analytikere forventet å øke med nesten 300.000 tonn de neste fem årene (BusinessWire, 2018). Hvis dette volumet ikke dekkes opp av gjenvinning, så må det etableres økt kapasitet av syntetisk produksjon.

Om lag en tredjedel av produksjonen av kryolitt globalt går til aluminiumsmarkedet, det øvrige til en lang rekke markeder med både høyere og lavere kvalitetskrav. (Research, 2019). Selv om aluminiumsindustrien dermed har en viktig rolle for kryolittmarkedet – er det ikke helt og fullt avgjørende. Disse andre markedene gjør det også mulig å ta ut sekunda kryolitt fra aluminiumsmarkedet, og erstatte kryolitt av lavere kvalitet i andre markeder.

Verdensmarkedspriser for syntetisk kryolitt er vanskelig å fastslå eksakt, men innledende nettsøk tilsier i størrelsesorden 5-600 \$/tonn. Ifølge hjemmesidene til China Petroleum and Chemical Industry Federation har prisene på høygradig kryolitt variert mellom 860-1090 \$/tonn siste fem år. Vi velger å tolke disse tallene med litt fleksibilitet, da vår erfaring er at slike anslag er

basert på kinesiske telefonforespørsler til produsenter om hva de ønsker å ha betalt, i større grad enn hva som faktisk blir betalt. Vi legger derfor til grunn en verdi av metallurgisk grad kryolitt på 600 \$/tonn.

4.4.2 Mengden fluorholdig avfall

Ifølge noen kilder brukes det om lag 2 kg hver seg av hhv kryolitt og aluminiumfluorid per tonn aluminium.⁷³ Disse tallene balanserer ganske godt en dannelse av 18 kg SPL pr tonn aluminium, med et innhold av fluorider på 15 %, samt noe tap til avrakingsslag og støv. Etter å ha gått gjennom en lang rekke referanser anslås det at elektrolyseceller av de typene som opereres i Norge har en gjennomsnittlig dannelse av 18-23 kg SPL per årstonn aluminium. Norsk aluminiumindustri forteller selv at de har fått en bra driftskultur hvor de kan operere cellene lenge før de må skifte foring, og derfor er i nedre del av dette vinduet. Med en primærproduksjon på 1,2 millioner tonn blir det da 22.000-27.000 tonn per år. Dette vil svinge fra år til år. Med god drift kan cellene vare i minst 5-6 år før foringen skiftes. Fluor forbrukes egentlig ikke i prosessen, så eneste grunn til at industrien må kjøpe nytt er at det tapes fluor til utslipp og avfall. Hvis man kan stoppe utslippene og gjenvinne tapene er det i prinsippet ingen netto behov.

Siden produktet aluminium har et neglisjerbart innhold av fluor, og utslippene til luft og vann er svært små, må det legges til grunn at forbrukt mengde fluor i form av kryolitt og aluminiumfluorid nesten utelukkende finnes i de tre avfallsfraksjonene, og da i hovedsak i SPL.

SPL er farlig avfall på flere vis. I håndteringen må man være bevisst avgassing av metan, ammoniakk, fosfin og hydrogen (Broek, 2018). Det er både brann- og eksplosjonsrisiko knyttet til slikt avfall.⁷⁴ Potensialet for avrenning av cyanider og fluorider til vann er en historisk hovedårsak til at SPL ikke kan disponeres fritt.

I elektrolyseprosessen vil ratioen mellom kryolitt og aluminiumfluorid forskyve seg noe, ved at kryolitt-andelen øker. Dette reflekterer dels et visst tap av fluor til miljøet og dels et visst innhold av natrium som forurensning i aluminiumoksidet. Dette fenomenet vises også i innholdet i SPL. Eldre gjenvinningsteknologier for kryolitt hensyntar ikke det, og vil derfor kun ha en viss relevans for dagens marked.

I perioder har holdningen til kryolittholdig avfall vært varierende. I UK skrev den britiske biologen Robert Johnston at dumping av slam fra gjenvinning av kryolitt i havet er helt ufarlig (Johnston, 1978).

Det er i 2017 registrert levert 15.351 tonn karbon-baserte foringer, som trolig er den primære kategorien for SPL. Dette er med stor sannsynlighet ikke det faktiske tallet for generert avfall, men avspeiler igjen at deklareringsen av avfall i Norge er, i beste fall, upresis. Det legges til grunn at mengden i et normalår vil være omlag 22.000 tonn. Ovnforinger brukes av mange som råstoff til sementproduksjon, og det er god grunn til å forvente at det vil være mulig i fremtiden også, gitt fornuftige økonomiske rammevilkår. Norcem i Brevik brukte ca 5000 tonn i 2018 av avfall fra aluminiumindustrien, i hovedsak anoderester som i praksis er rent karbon.

Katodeavfallet består av 25-50 % uorganiske komponenter. I hovedsak kryolitt (Na_3AlF_6), men også AlF_3 , NaF , CaF , Al_2O_3 , $\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$ etc. Den organiske delen er grafittisert karbon (Shi, 2012).

Mens Norge deponerer alt av SPL, velger andre land å forsøke å unngå i størst mulig grad deponier. I Australia og deler av USA er det i praksis et forbud mot deponering. Norges store aluminiumaktør, Hydro, skriver på sine nettsider at de har som ambisjon om å slutte helt med deponering av SPL innen 2020.⁷⁵ Vi har imidlertid ikke funnet tegn til at Hydro faktisk arbeider med aktuelle alternativer som kan realiseres de neste månedene. Utsagnet om stans i deponering fremstår derfor noe underlig, og det er grunn til å utbe Hydro om en redegjørelse for hva de planlegger å gjøre.

I Australia har man gått et skritt lenger enn mange andre steder. I 2016 ble et konsortium av konsulenter bedt om å lage forslag til både en plan og et avtaleverk mellom myndigheter og industri om gjenvinning eller destruksjon av alt av SPL som historisk er deponert (Paul Randell, 2016). Altså grave opp deponiene for å behandle avfallet.

Australia har en aluminiumindustri på snaue 2 millioner tonn primærmess, mot Norges ca 1,2 millioner tonn. Mange tiår med produksjon innebærer at det har vært deponert mye SPL. Dette har bekymret australske myndigheter, og de tok derfor i 2016 dette initiativet for å få ryddet opp i disse deponiene.

Også i andre land er det press fra myndighetene på å fjerne gamle SPL-deponier. I USA har det vært flere eksempler, slik som Alcos bruk av 50 M\$ på å grave ut og destruere 26.000 tonn SPL i Oregon.⁷⁶

Interessant nok begrunnes vedtaket i Australia om sanering av deponiene delvis med at Hydro Aluminium stengte sitt verk,⁷⁷ og senere solgte hele området. Myndighetene var derfor opptatt av å få deponiene sanert før industrien forsvant helt. Estimert var at det lå 700.000 tonn SPL på deponier rundt disse verkene. Det er ikke kjent om det er foretatt tilsvarende kartlegging i Norge. Hydro Aluminium har i brev til australske myndigheter forpliktet seg til å fjerne og gjenvinne alt av SPL på sine anlegg innen 2020. Estimert mengde SPL hos Hydro i Australia er 170.000 tonn.

Det er også interessant å notere seg at Australia har en rekke anlegg for å delvis prosessere SPL. I hovedsak dreier dette seg om å gjøre SPL tilgjengelig for brenning i sementovner. Underlig nok er den australske behandlingsskapasiteten på 100.000 tonn – mens årlig produksjon er bare 36.000 tonn. Det kan nok være at utnyttet kapasitet på behandlingssiden har gitt et selvstendig press på myndighetene for å fremme et krav om sanering av deponiene.

På tross av den store overkapasiteten på de australske anleggene har aluminiumsverkene der eksportert store volumer SPL til Befesa i Spania, og Rockwool i Tyskland. Dette er særlig underlig siden transporten alene må ha kostet 50 \$/tonn. Eneste grunn til at noe slik har vært rasjonelt er at de australske anleggene i perioder har hatt priser på >1000\$/tonn.

Hvis disse tallene stemmer, så utgjør altså prosesseringsen av SPL alene en kostnad tilsvarende 1 % av bruttoinntekten til aluminiumsverkene (1000 \$/tonn SPL * 18 kg SPL/tonn aluminium/1800 \$/tonn aluminium). I en lavmarginindustri som aluminium er det åpenbart at dette er alt for kostbart.

4.4.3 Behandlingsteknologier og konsepter

SPL er egentlig et vidunderlig avfall. Over halvparten av massen er et grafittisert kull av høy verdi og

med mange anvendelser, og det meste av resten er strategisk viktige fluorforbindelser som gjenvunnet er verdt flere hundre dollar per tonn. Tross dette er deponering mest vanlig, selv om deponeringen ofte fremstilles som «lagring inntil relevant behandlings-teknologi foreligger».

Heterogent avfall, suboptimale mengder for prosessering, gassdannelse og eksplosjonsfare (Cooper, 2015) ved lagring og transport, vannløselige komponenter og aggressiv korrosivitet har imidlertid gjort gjenvinning praktisk utfordrende. En lang rekke anlegg er bygget, og enda flere patenter er tatt ut. Vi vil i det følgende forsøke å beskrive de fleste, med et praktisk blikk på gjennomførbarhet og oppnåelse av målsetningen om ressurseffektivitet og reduksjon i deponeringsvolumer.

De forskjellige teknologiene for SPL-prosessering er utviklet ut fra svært forskjellig motivasjon og begrunnelse. I noen tilfeller er det avgifting; altså å sikre at SPL-avfallet ikke forgifter grunnvann eller andre vannforekomster. Tetronics sin plasmapyrolyse og Alcoa (Reynolds) sin kalkstabilisering er eksempler på dette (J.R. Donald). Noah sin behandling i Norge faller også i denne kategorien. Alle disse teknologiene er seriøse og egnet i å hindre forurensning av miljøet, men ingen av disse ivaretar ressursperspektivet.

Andre har ønsket å både redusere avfallsvolumer og kunne nyttegjøre seg innholdet av karbon og fluor. Sement og stål er industrier som kan nyttegjøre seg begge deler. Eksempler på slike spor er Pechiney i Frankrike og Regain i Australia. Disse teknologiene har gjennomgående støtt på utfordringer, hhv grunnnet natriumpåvirkning på sementkvalitet eller fluor-korrosjon i stål-verkene. I miljøsammenheng beskrives slike teknologier som «downcycling». Til «downcyclingens» forsvar er det bedre å sirkulere ned, enn å deponere.

Andre har prioritert å få tilbake fluormaterialet, enten i form av CaF_2 , HF, AlF_3 eller kryolitt. Eksempler på

dette er Ausmelt i Australia, Rio Tinto Alcan i Canada og nå nylig et Hydro-finansiert arbeid i Tyskland. Disse teknologiene har kostnadsmessig vært lite konkurransedyktig med billige deponiløsninger. Noen av disse er også sensitive i forhold til heterogent avfall. Like fullt er det kun disse teknologiene som reelt håndterer både hensynet til avgifting, deponireduksjon og ressursbevaring.

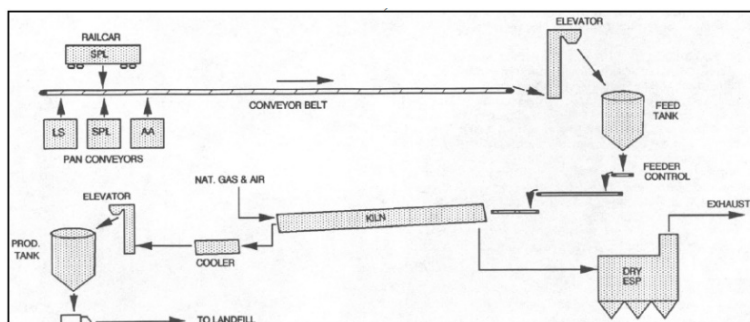
I det følgende går vi nærmere gjennom eksempler på alle tre teknologistategier:

4.4.4 Avgiftingsstrategi

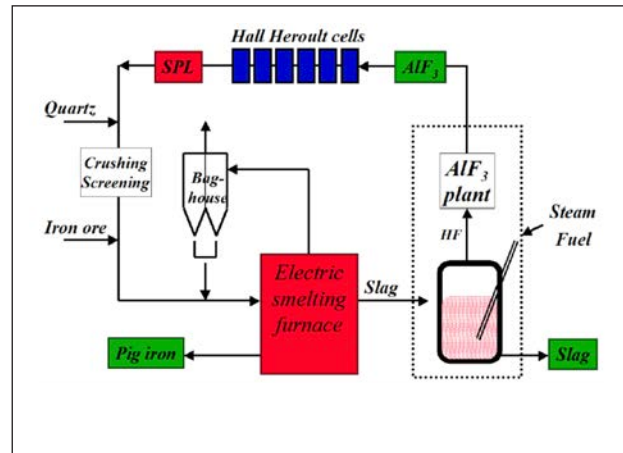
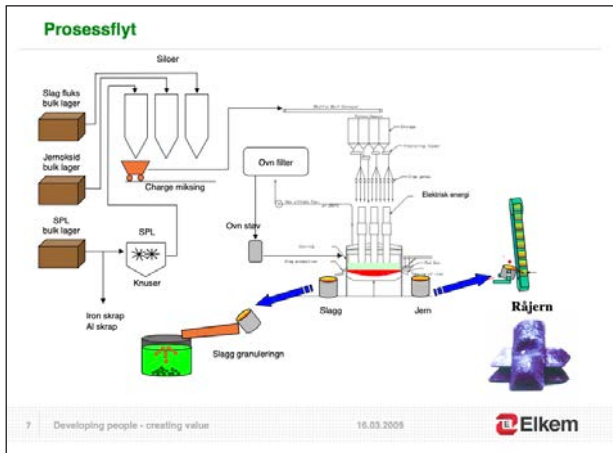
I Donald Bankers patent fra 1991 behandles SPL i en roterovn med kalk – for å destruere cyanidene og lage en kalkslurry som binder fluoridene slik at avfallet kan deponeres (USA Patentnr. US5164174A, 1991). Litt betegnende er det kanskje at dette anlegget er et av få som er bygget og fortsatt i drift. Bygget av Reynolds, som nå er eiet av Alcoa. Denne teknologien er senere regnet som lite vellykket, bl.a. på grunn av fortsatt en viss utlekking av fluorider. (Øye, 2017)

Pechiney (nå Alcan) i Frankrike utviklet sin SPLIT⁷⁸-prosess, hvor SPL ble blandet og kalsinert på høy temperatur sammen med gips, for å destruere cyanidene og binde fluoridene. I prinsippet avgiftes da massen, og kan deponeres.⁷⁹ Det er noen steder rapportert at de har forsøkt å brenne dette i sementovner, men med vekslende suksess.

Det britiske selskapet Tetronics har utviklet en plasma-basert prosess som evner å fullstendig glassifisere SPL-avfall. Selskapet har hatt mange fremstøt overfor norske aktører. De har levert et anlegg i Slovenia,⁸⁰ men snakker av ukjente årsaker lite om dette anlegget. Opprinnelig ble anlegget tiltenkt å skulle lage et fluoridrikt produkt som kunne returføres, men erfaringen har vist at det bygger seg opp for høye natriumverdier (M. Bogataj), så anlegget driftes i dag som et destruksjonsanlegg. Vi har derfor valgt å plassere teknologien



← Venstre: Tegning av Reynolds anlegg for avgifting av SPL. (Øye, 2017). → Høyre: Bilde av samme anlegg.⁹⁰



Elkems ovner har blitt foreslått brukt til å destruere og/eller gjenvinne SPL. ← Venstre; destruksjonskonsept på Bjølvfossen («SPL behandling på Elkem Bjølvfossen». 10. des 2008. Elkem). → Høyre: Dedikert gjenvinningsovn i regi av Eydenettverket. ("Eide 0-waste". Gro Eide, Elkem)

som en avgiftsteknologi, inntil videre. Fordelen med teknologien er at volumet av avfall blir noe redusert, dog ikke mye. Videre blir alt av tungmetaller låst i en matrix som er svært lite løselig. Det er slik sett et alternativ til gipsinnbinding (NOAH) eller kalknøytralisering (Reynolds). Ulempene er høye kostnader, ingen materialgjenvinning og relativ beskjeden volumreduksjon. Tetronics har siden 2011 hatt et omfattende samarbeid med Mitsubishi innen SPL, uten at det har medført nye anlegg, så vidt vi er kjent med. Vi har derfor ikke viet denne teknologien ytterligere fokus.

4.4.5 «Downcycling»-strategi

Qatalum, et 50/50 samarbeid mellom Norsk Hydro og Qatar Petroleum driver ved sitt aluminiumsverk i Qatar full materialutnyttelse av sin SPL. Ved revisjon av cellene er de nøye på å splitte den karbonbaserte katoden fra murverket innenfor. Katoden, med sitt høye innhold av grafitt og fluor, går til Qatar Steel, et moderne stålverk som bruker materialet til erstatning for metallurgisk koks og flusspat som slaggdanner. Murverket, ofte beskrevet i litteraturen som «Cut 2», går til sementfabrikken i Umm Bab, som eies av Qatar National Cement Company. Leveransene av murverk er så langt kun på pilotnivå, men testene er lovende, ifølge Qatalum (Qatalum, 2019). Med disse løsningene blir aluminiumverket nesten uten avfall.

I en periode har SPL fra Hydro Aluminium blitt brukt av Rockwool i deres produksjon av mineralull.⁸¹ I utgangspunktet er dette en god match, ved at Rockwool trenger både de aktuelle stoffene og energien fra grafitten. Men, det har vist seg at dette har vært vanskelig å bruke for Rockwool, og leveransene er stoppet. Teknologien har noen begrensninger, ved at Rockwool har strenge krav til andelen støv og murverk

i avfallet. På sikt vil denne muligheten trolig forsvinne, siden gamle koksbaserte mineralullovner gradvis erstattes av elektriske ovner.⁸² Australia har også eksportert SPL til Rockwool i Tyskland.

Norske Elkem promoterte for 15 år siden en mulighet ved sitt verk i Bjølvfossen. De hadde utfordringer ved verket, etter at produksjonen av La-legert FeSiMg hadde blitt flyttet til søsterverket på Island, og lette etter nye muligheter. De så derfor for seg å konvertere ovnen til en råjernovn, og bruke SPL som ordinært reduksjonsmiddel.⁸³ Prosjektet gikk så langt som til å signere kontrakter med norske aluminiumverk om leveranser som avfall, og kjøre fullskala tester, men ble aldri kommersialisert. I denne teknologien ville ovnen også tilføres subbus og finstoff fra FeSi-produksjonen, som ville gjøre at fluoridene ville bindes i en uløselig matrix, uten gjenvinning av de viktige stoffene.

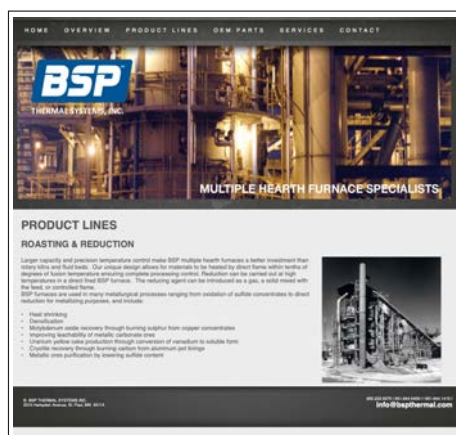
Etter at Elkem stoppet sitt SPL-prosjekt har ideen blitt bearbeidet videre av Eydenettverket, som også har sett på gjenvinning av aluminiumfluorid. NTNU arbeidet også langs dette sporet, bl.a. med å se på etableringen av et nytt pyrohydrolytisk trinn for å gjenvinne fluoridene fra slagget fra Elkems prosess (Vladimir Blinov, 2009). Det synes ikke å være høy aktivitet på dette prosjektet for tiden.

Ultromex⁸⁴ er et britisk saltgjenvinningsanlegg som på sine nettsider forteller om en ny og genial løsning på SPL som gjør at man slipper å deponere reststoffer. De forteller imidlertid ikke hvordan eller hva slags kostnader som er forbundet med teknologien. Det virker ikke som at noen industrielle kunder har valgt å teste teknologien. Vi har derfor valgt å ikke prioritere denne teknologien.

Westonal⁸⁵ er et australsk selskap som primært håndterer dross og SPL 2, altså murverk, for den australske industrien. De har tidligere også prosessert SPL 1, altså katoden, men det ser ut til å være stoppet av australske myndigheter. Vi har derfor ikke viet dem særlig oppmerksomhet.

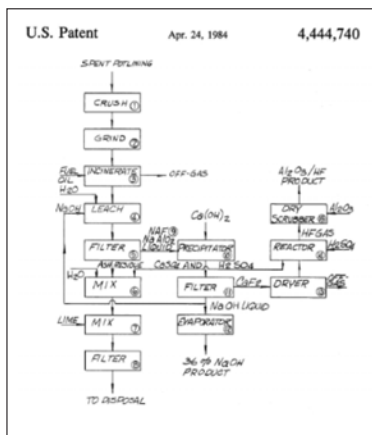
I stålindustrien har man lang erfaring i bruk av flusspat (CaF) som fluxmiddel og som additiv ifm svovelfjerning. Populariteten til flusspat er litt varierende, og det hersker en del negative historier om materialet. I Brasil er det i 2017 gjort storskala tester med bruk av SPL i stålproduksjon som erstatning. Dette har gitt interessante resultater (Flores, 2018). Det ser ut til at en hybridløsning hvor SPL vaskes i enkle forhold med NaOH for å ta ut mesteparten av fluorinnholdet først vil etterlate et grafittmateriale som vil være mer egnet for bruk i stålindustrien enn uforedlet SPL.

Regain Materials⁸⁶ er et australsk selskap som prosesserer SPL på to lokasjoner ved siden av australske aluminiumsmelteverk. Prosessen er relativt enkel, og fokuserer på å destruere cyanider og klargjøre et råstøff som kan brukes i en sementovn. Utfordringen er like enkel. SPL inneholder masse natrium fra kryolitten, og de fleste australske sementovner produserer med et kvalitetskrav på maks 0,6 % alkali – en grense som er enda strengere enn den norske lav-alkaligrensen på 0,7 %. Dette gjør at SPL mates inn med kun noen få kg per tonn. Selv om Regain og aluminiumverkene forsøker å fremstille dette som gjenvinning og industriell økologi, så fremstår det som betalt destruksjon. Dette bekreftes delvis ved at sementfabrikkene har tilbudt å hente inn dyr lavalkali kalkstein for å kunne brenne mer SPL. Tilsvarende vil sikkert være mulig å gjøre også med norske sementfabrikker, men det vil trolig medføre tilsvarende høye destruksjonsavgifter.



← Venstre: Eksempel på forbrenning, med opsjon til å foredle asken.⁹¹ (www.bspthermal.com)

→ Høyre: Eksempel på forbrenning, konvertering til HF-gass og ny syntetisk kryolitt.



Befesa er en stor aktør innen gjenvinning av forskjellig avfall fra bl.a. aluminiumindustrien, med flere anlegg, bl.a. i Spania og England. Befesa behandler saltslagg fra Norge, og har også gode erfaringer med å blande noe SPL inn i saltslagget. Det gjør at noe mer kan gå til sementfabrikkene. I følge Befesas egen beskrivelse av denne teknologien er det imidlertid kapasitetsbegrensninger. Befesa har også hatt en rekke utfordringer med kvalitet, miljø og sikkerhet ved sine anlegg, så vi har valgt å ikke prioritere denne aktøren videre.

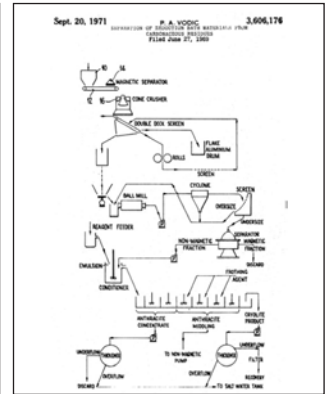
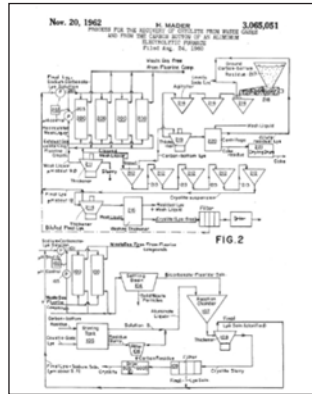
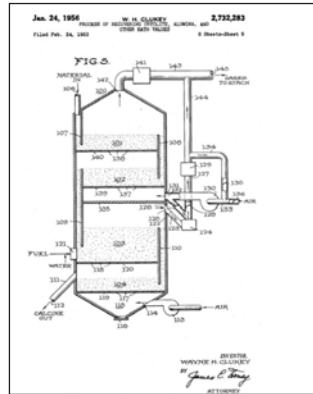
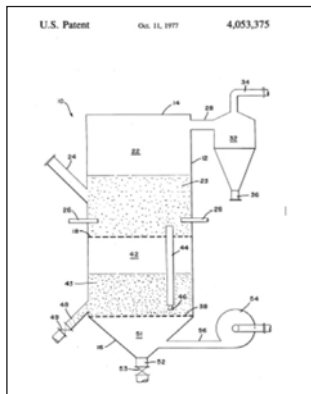
4.4.6 Materialgjenvinningsstrategi

I inndelingen av forskjellige strategier har vi vektlagt reell gjenvinning og gjenbruk av fluorider for å kunne definere et anlegg som materialgjenvinning. Det gjør at anlegg som bruker fluoridene i stålrensing eller sementproduksjon er definert (litt strengt) som down-cycling, mens anlegg som delvis gjenvinner CaF, kryolitt eller AlF₃ til bruk i aluminiumindustrien defineres som materialgjenvinning. Karbonet får man alltså omsatt, så lenge det uorganiske innholdet holdes langt nok nede.

Noen av teknologiene som omtales tar SPL tilbake til de direkte brukbare materialene kryolitt og aluminiumfluorid. Andre tar de tilbake til kalsiumfluorid – flusspat. Det siste defineres også som gjenvinning, selv om det må via et nytt prosessstrinn for å kunne brukes. Hvis gjenvunnet kalsiumfluorid fra de norske aluminiumverkene kan brukes til å lage ny aluminiumfluorid ved det norske anlegget i Odda, får man en tilleggsmiljøeffekt. Noralf i Odda har et betydelig utslipp av tungmetaller, eksempelvis om lag 400 kg Pb per år,⁸⁷ til Sørfor- den. Ved å ta inn gjenvunnet kalsiumfluorid i stedet for ny flusspat reduseres utslipp tilsvarende. Noen ganger er gjenvunnet materiale renere enn flusspat fra gruver.

Gjenvinning av kryolitt har vært aktuelt i mange år. Det første patentet vi har funnet er fra 1929 (USA Patentnr. US1871723A, 1929), og ble utviklet ved et av Alcoas anlegg. Patentet begrunnes med store avfallsproblemer fra aluminiumsindustrien. Teknologien er basert på direkte laking med natriumhydroksid.

Norsk Hydro står som innehaver av et patent fra 1952, opprinnelig utviklet i Østerrike, basert på natriumhydroksid, CO₂ og natriumkarbonat (USA Patentnr. US2714053A, 1952).



Fire eldre, patenterte gjenvinningsteknologier, fra da gjenvinning var viktig.

Whicker et al tok patent i 1963 i USA på en teknologi for gjenvinning fra både SPL og posestøvet. Teknologien er også basert på bruk av natriumkarbonat og natriumhydroksid, samt gjenvinning av CO_2 fra prosessen (USA Patentnr. US3106448A, 1963).

Elliott Roberts peker i sitt patent fra 1976 på muligheten av å brenne av karbonet i en FBR, og agglomerere asken for direkte retur til elektrolysecellene (USA Patentnr. US4053375A, 1976).

Vodic satser i sitt patent på å separere karbon og kryolitt med flotasjon (USA Patentnr. US3606176A, 1968). Dette er senere gjort kommersielt ved Yichun aluminiumverk i Jiangxi, Kina.

Clukey peker på muligheten for å gjenvinne både kryolitt og alumina gjennom å bruke en kombinasjon av natriumhydroksid og natriumkarbonat (USA Patentnr. US2732283A, 1951).

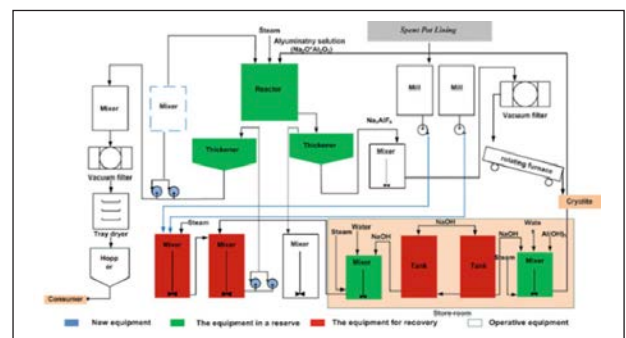
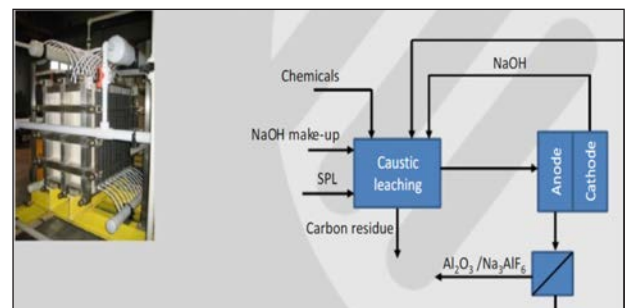
Mader peker i sitt patent på muligheten av å både gjenvinne fluor fra avgassene og gjenvinne kryolitt fra SPL med natriumbikarbonat (USA Patentnr. US3065051A, 1960).

Snodgrass satser i sitt patent på å forbrenne SPL, og bearbeide asken med bla. svovelsyre for å danne ny HF-gass, som så kan brukes til å lage ny, ren kryolitt (USA Patentnr. US4444740A, 1983).

Som en kuriositet kan det nevnes at Donald O. Vancil skriver i sitt patent fra 1966 at det er vanlig praksis i aluminiumindustrien å gjenvinne kryolitt både fra avgass-støv og fra SPL (USA Patentnr. Inventor Donald Otis Vancil, 1966). Vancils agenda er at forskjellene mellom naturlig kryolitt, syntetisk kryolitt og gjenvunnet kryolitt når det gjelder fordelingen mellom NaF og

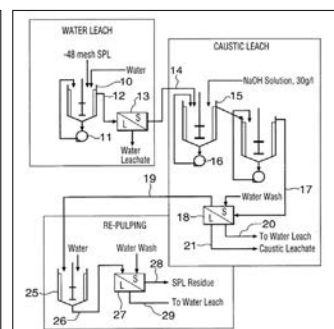
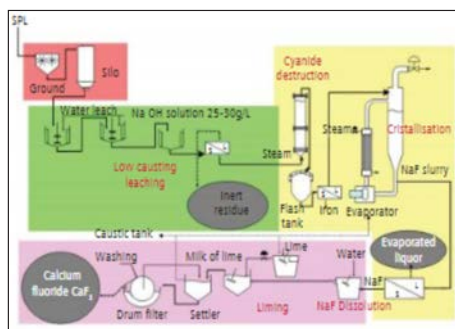
AlF har effekt på effektiviteten av elektrolysecellene, og må kontrolleres. Hvis dette stemmer var det altså mer vanlig å gjenvinne før.

Det er mulig å vaske ut 65 % av kryolitten fra SPL med NaOH i relativt enkle anlegg og betingelser (Shi, 2012). Kryolitten som vaskes ut kan presipiteres med en renhet på 96 %, som burde være tilstrekkelig for gjenbruk i aluminiumindustrien. Den gjenværende massen fra SPL vil dermed ha et økt karboninnhold og et lavere fluoridinnhold. En relativt sett høyere andel av fluoriden vil foreligge som CaF, siden CaF i liten grad løses av NaOH. Flere aktører jobber parallelt med dette (Mann, 2017). Verdens største aluminiumselskap, Rusal, har etablert et pilotanlegg ved sitt store verk i Krasnoyarsk.



Øverst: Italienske Engitec Technologies pilotanlegg.

Nederst: Rusals tegning av sitt planlagte anlegg.⁹²



◀ Venstre: Rio Tinto har etter mange års utviklingsarbeid fått stabil drift på et SPL gjenvinningsanlegg i Quebec som håndterer 80.000 tonn per år.⁹⁴ ➔ Høyre: 2 flytskjemaer for SPL-gjenvinningen. Noter dannelsen av CaF_2 .⁹⁵ %

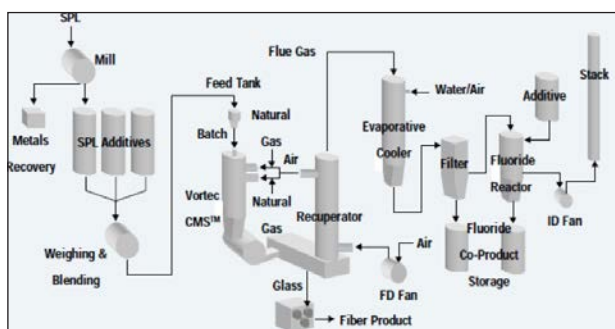
Rio Tinto har ved sitt store anlegg i Quebec, Canada etablert det mange har snakket om – et fullskala SPL gjenvinningsanlegg (Grolman, 1994). Etter mange års forskning og pilotering, ble det bygget et anlegg i 2008 (Pawlek, 2018). Rio Tinto brukte mange år på å finjustere anlegget før kapasitet kom på plass, men de har nå prosessert over 500.000 tonn. (Birry, 2016). Anlegget tar fluoridene tilbake til CaF_2 , hvorfra de kan inngå som normalt råstoff i produksjonen av aluminiumfluorid.

Hindalco i India gjenvinner kryolitt fra om lag 6 000 tonn SPL per år ved å brenne SPL i en dedikert roter-ovn sammen med noe kalk, for så å returnere den uorganiske restmassen som råstoff til elektrolyse-cellene (Indurkar, 2014). Man skulle tro at dette over tid vil medføre økt dannelse av dross, men det er trolig et mindre problem.

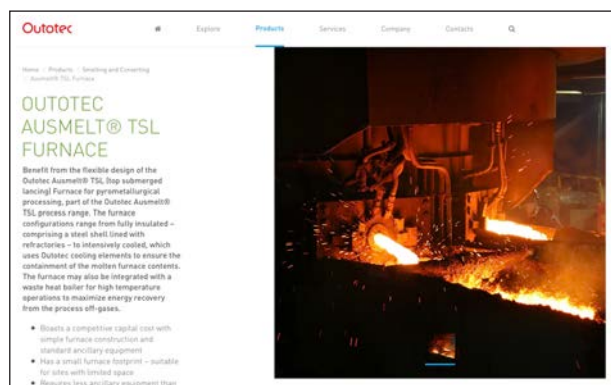
I USA har selskapet Vortec sammen med Alcoa og flere andre utviklet et konsept for bruk av SPL til produksjon av glassull og delvis gjenvinning av fluoridene. Teknologien ble så vidt vi har funnet ut testet i pilotskala med tilfredstillende resultat (Vortec, 2002), men er ikke kommersialisert.

Et ferskt patent fra Kina peker på en liknende teknologi med gjenvinning av kryolitt fra flyveaske, basert på ammoniumaluminiumsulfat med mer. Språklige utfordringer har gjort det vanskelig å vurdere detaljene i teknologien (Kina Patentnr. CN104692436B, 2017).

I 2002 meldte Alcoa og Portland Aluminium i Australia at de hadde løst SPL-problemet for aluminium-industrien. Over mange år var det blitt utviklet et gjenvinningsanlegg for aluminiumfluorid. Teknologien består av en roterovn med en lanse som blåser avfallet inn og brenner med en høy temperatur for å lage HF-gass. Natriumet blir bundet i et inert slagg sammen med andre reststoffer. Teknologien har imidlertid vist seg vanskelig å kontrollere (Mansfield, 2002) og er avhengig av homogent råstoff – noe som i praksis er umulig å få til. Etter det vi kjenner til er dette sporet lagt dødt, og teknologieieren Outotec har skiftet fokus fra SPL-behandling og HF-gjenvinning til andre pyrometallurgiske segmenter. Vi har derfor ikke viet dette alternativet ytterligere oppmerksomhet.



Vortecs pilotanlegg for produksjon av glassull og fluoridkonsentr.⁹⁷



Ausmelt er en meget avansert teknologi som ivaretar både miljø- og ressursperspektiv – men som har vist seg vanskelig å operere. Parallellene til Tetronics er slående.⁹⁸ Faksimile www.outotec.com

Det australske selskapet Comalco utviklet ComTor-teknologien for å gjenvinne fluor fra SPL som CaF (Hopkins, 1995). Hensikten var i tillegg å lage et rest-avfall som lettere kunne brukes av sementindustrien, bl.a. gjennom redusert innhold av natrium. Senere har deres sementkunde endret sin prosess, slik at ComTor-anlegget er delvis nedstengt, og alt går nå i praksis i sementovnen – begrenset av natriuminnholdet. Vi har valgt å ikke forfølge denne teknologien nærmere. Lisbona beskriver en teknologi hvor det brukes en tre-verdig aluminium til å produsere et aluminiumhydrofluorid-presipitat, som så kan kalsineres direkte tilbake til aluminiumfluorid (Diego Fernandez Lisbona, 2007).

En australsk teknologi som bør sjekkes nærmere er AL-CORE. Denne bruker et avfall fra gjødsel-industri, fluor silisiumsyre (FSA), som reageres med aluminiumoksid til aluminiumfluorid og et inert silikat.⁹³ Teknologien har klare paralleller til en tysk SPL-gjenvinningsteknologi, og også klare paralleller til det indiske Alufluorid-anlegget.

Et nytt tysk arbeid poengterer at aluminiums-industrien i stor grad har gått over fra å bruke kryolitt (NaAlF_6) til aluminiumfluorid (AlF_3) som smelte-salt. De har derfor utviklet en teknologi som får fluoren ut som aluminiumfluorid (Tyskland Patentnr. DE102015003405A1, 2015).

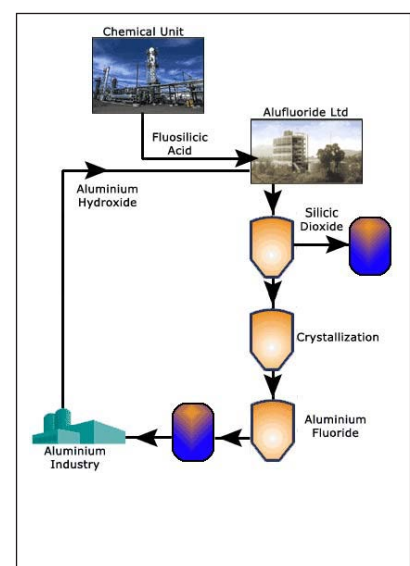
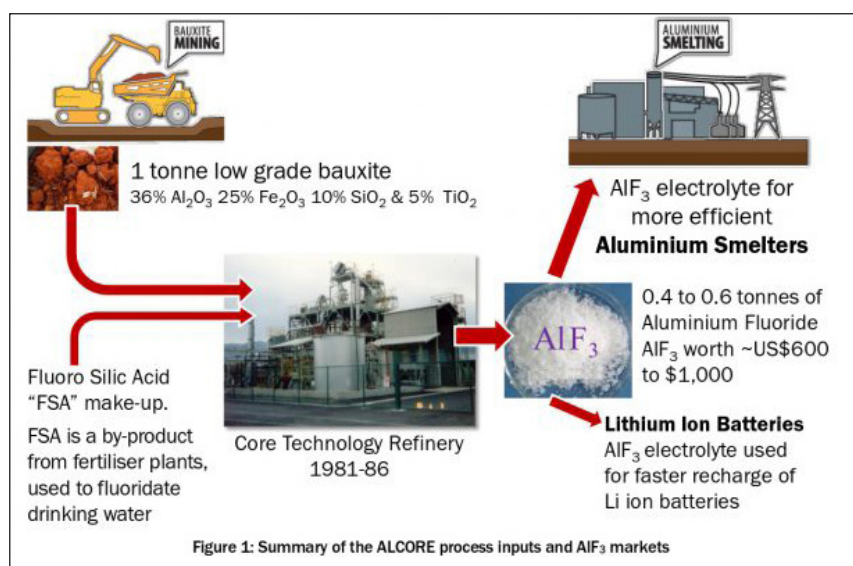
Den tyske teknologien er utviklet innen rammene av et samarbeid mellom Tyskland og Brasil, finansiert i stor grad av det tyske forskningsdepartementet (BMBD). Utgangspunktet har vært at landene har en betydelig primæraluminiumkapasitet med om lag 2 millioner

tonn per år – og en tilsvarende stor produksjon av problematisk SPL. Utviklingsteamet bak teknologien har lagt til grunn en SPL-dannelse på 20-30 kg pr tonn aluminiumkapasitet som basis for dimensjoneringen av teknologien (Eberhard Gock, 2015). Utviklingen av teknologien har involvert flere forsknings-institutter, universiteter og industriselskaper. Av spesiell interesse for norsk industri kan det nevnes at både Hydro Aluminiums avdelinger i Tyskland og Brasil har vært deltakere i utviklingen. Vi regner dermed med at Miljø-direktoratet har blitt informert av Hydro Aluminium i Norge om denne teknologien, men velger likevel å beskrive den skikkelig, siden den kan være interessant for et nytt gjenvinningsanlegg. Det kan også nevnes at Hydro langt tidligere, i 1990, tok ut et patent på en første variant av denne teknologien (Tyskland Patent-nr. EP0470573A2, 1990).

Mest spesielt ved denne teknologien er at de bruker blandet SPL, altså en blanding av karbonkatoden og murverket. I første trinn blir blandingen grovmalt. Deretter blir klumper av metallisk aluminium sikket ut, før restmassen blir finmalt.

Derneft tilsettes 50-%ig svovelsyre. Svovelsyren oksiderer cyanidene, som gjør at man som neste trinn kan flotere av karbonet til et cyanidfritt og lavfluor grafittslam som kan brukes som karbonkilde i mange industrielle prosesser.

Overstøkiometrisk dosering av svovelsyre sammen med tilstedeværelsen av silika og silikater gir dannelse av bl.a. natriumsulfat, silisiumfluorid og hydrogenfluorid.

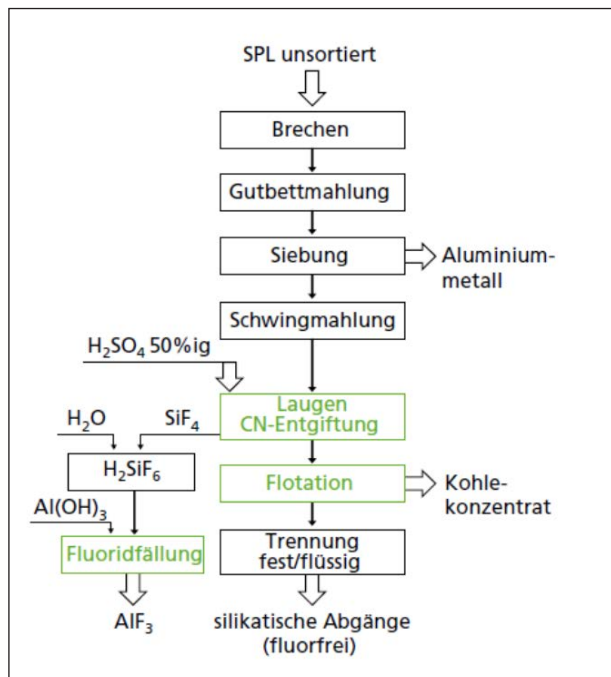


← Venstre: Alucore's gjenvinningskonsept i Australia. → Høyre: Alufluorids anlegg i India.⁹⁹

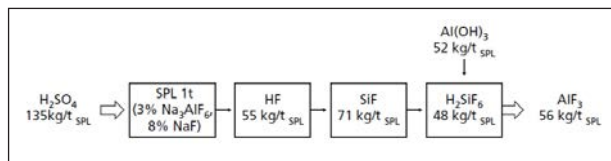
Gjennom tilsats av aluminiumhydroksid dannes det aluminiumfluorid, med renhetsgrader som burde være kommersielt attraktivt. Siden det meste av natriuminnholdet foreligger som vannløst sulfat, så vil det presipiterte silikatslammet tilsynelatende ha egenskaper som gjør det egnet til sementproduksjon. Denne teknologien burde dermed, når den er fullt ut finjustert og industrialisert, gi tilnærmet full materialgjenvinning og svært lite deponibehov.

En annen interessant side ved teknologien er at mens innsatsfaktorer som svovelsyre og aluminiumhydroksid er relativt billige råstoffer, så er aluminium metall og aluminiumfluorid relativt verdifulle. Dette gjør at gjenvinningen gir en god kontantstrøm. Det tyske teamet bak utviklingen har indikert en netto positiv kontantstrøm fra gjenvinningen på 100-200 € per tonn SPL. Dette er dog ikke medregnet kostnader til energi, bemanning, transport eller kapitalkostnader. Like fullt burde dette være et svært interessant spor å forfølge videre.

En styrke med den tyske teknologien er at den prosess-teknisk ligger svært nær rådende teknologileder for syntetisk kryolitt.



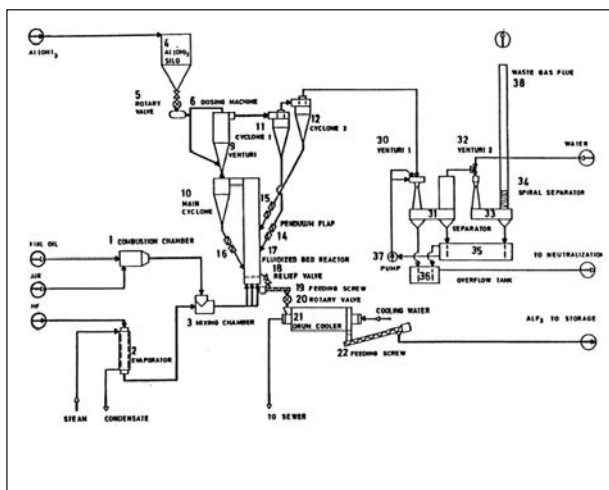
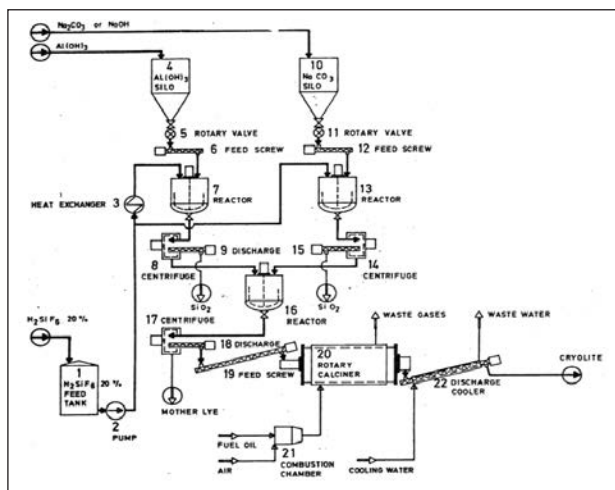
Den delvis Hydro-finansierte tyske gjenvinningsteknologien kan gi nesten full gjenvinning av SPL.



Inntektene fra salgbart aluminiummetall og aluminiumfluorid er høyere enn kostnadene til svovelsyre og aluminiumhydroksid. Gjenvinningen kan derfor bli lønnsom.

De mest moderne og interessante teknologiene for gjenvinning av fluorider ligger prosessmessig svært nær dagens mest brukte teknologier for produksjon av aluminiumfluorid og syntetisk kryolitt fra flusspat. Det gir industriell logikk.

☞ Venstre: flytskjema for kryolittproduksjon.¹⁰⁰ ☞ Høyre: flytskjema for aluminiumfluoridproduksjon.¹⁰¹



4.4.7 Oppsummering

Det dannes om lag 22.000 tonn fluorholdig katodeavfall fra aluminiumindustrien i et gjennomsnittså. Fluor er regnet som et strategisk og kritisk viktig råstoff, men også en farlig forurensning. Over hele verden er det tatt initiativer for å begrense deponering og øke gjenvinningen av fluor. Mange teknologiske løsninger er utviklet, med fordeler og ulemper ved alle.

Det er mulig å materialgjenvinne brukt katodeavfall med høy gjenvinningsfaktor. Basert på de beste teknologiene anslås det mulig å gjenvinne 20.000 tonn av de 22.000 tonnene som oppstår. Resterende mengde må sluttdeponeres som farlig avfall.

4.4.8 Anbefaling:

- Det bør stimuleres til å få bygget et gjenvinningsanlegg for SPL som minst kan ta unna alt som dannes i Norge. Trolig er det mest rasjonelt å bygge det større.
- Kjøp av virgint fluorråstoff til norsk smelteverksindustri avgiftsbelegges med 1000 NOK/tonn. Gjenvinning av brukt fluor til nytt aluminiumfluorid subsidieres med 1000 NOK/tonn.
- Det tas initiativ til en bransjeavtale mellom norsk aluminiumindustri og myndighetene om en gjenvinningsstrategi, hvor industrien forplikter seg til å finansiere en løsning, mot å slippe fiskale avgifter i fremtiden.
- Norge kartlegger status for bedriftenes egne SPL-deponier og vurderer oppgravings- og gjenvinningskrav, i tråd med erfaringene fra Australia.
- Det utredes restriksjoner på/forbud mot deponering av avfall med høyt innhold av kritiske ressurser.

4.5 SINKHOLDIG FILTERSTØV

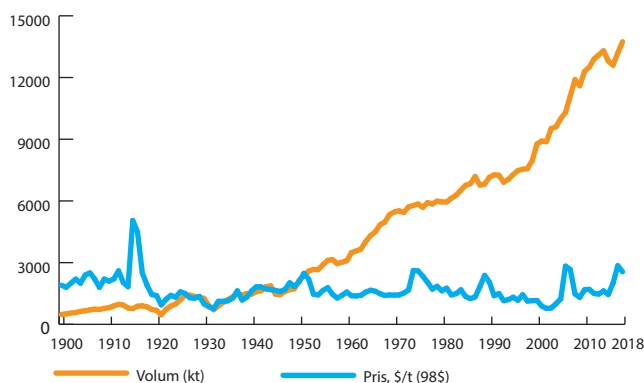
Norge har en rekke virksomheter basert på skrapjern. Med skrapjernet følger det mange slags forurensninger; det kan være legeringsmetaller som krom, overflatebehandlingsmetaller som sink eller rester av organiske forbindelser i form av maling og lakk. Metallene med høyt kokepunkt blir værende i jernet, mens metaller med lavt kokepunkter damper av og kondenserer i form av støv i avgassrensesystemet. Slikt støv kalles EAF-støv, fra det engelske "Electric Arc Furnace".

Størst i tonnasje er selvsagt Celsa i Mo i Rana, med 8–10.000 tonn støv per år. Det er imidlertid en lang rekke andre virksomheter, eksempelvis større støperier som Ulefos, Furnes og Jøtul, som har noen titalls tonn hver seg. Norge har også en lang rekke små støperier som lager nisjeprodukter, som også har litt støv. Noen av støperiene bruker jomfruelig råjern, ofte fra Tyssedal, for å «tynne ut» forurensninger som ligger i skrapjernet. Disse utfordringene er en barriere for sirkulær økonomi, men er generelt lite adressert når politiske strategier for sirkulær økonomi utformes.

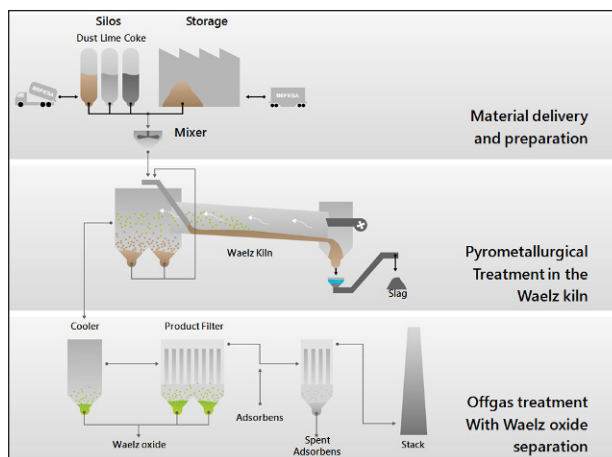
Posefilterstøv fra Celsa og de mange mindre støperiene i Norge er klassifisert som uorganisk farlig avfall, i sekkeposten 7096. I lange perioder har dette støvet blitt levert til deponering, med til dels høy deponeringskost, hos hhv Terrateam i Mo i Rana eller på Langøya.

I Europa er det mest vanlige at slik støv gjenvinnes, og det finnes en betydelig gjenvinningskapasitet tilgjengelig. Det har generelt ikke blitt økt kapasitet i nyere tid, tvert imot har mange anlegg blitt stengt ned grunnet kostnader med miljøutslipp og lave priser på sinkkonsentratet. Mange av gjenvinningsanleggene som fortsatt er i drift bærer preg av vedlikeholdsetterlep og utfordringer.

MARKEDSUTVIKLING, SINK

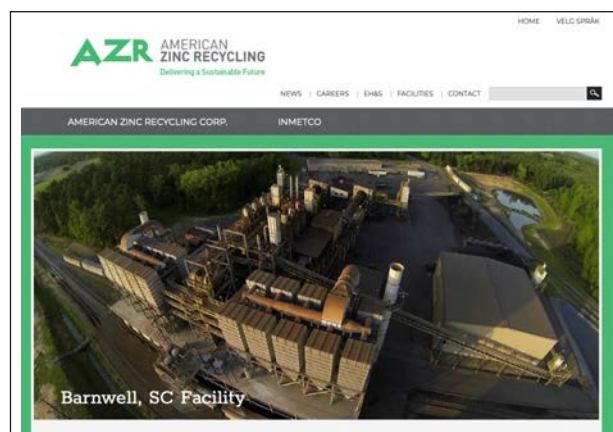


← Venstre: Utviklingen av pris og tonnasje for sink, siste 100 år. → Høyre: American Zinc Recycling, gjenvinning av EAF-støv.¹⁰³ (www.azr.com)
Et anlegg som kan gjenvinne EAF-støv fra Norge.



Illustrasjon og bilde av Befesas gjenvinningsanlegg for EAF-støv.¹⁰⁴
Et av anleggene som kan gjenvinne EAF-støv fra Norge.

Fra 2003 til 2013 hadde vi et gjenvinningsanlegg for sinkrikt støv i Norge; Eras Metall i Høyanger. Dette anlegget hadde en teoretisk kapasitet på 50.000 tonn EAF-støv per år, men slet med å holde full kapasitet over tid. Anlegget tok også imot sink-baserte batterier for gjenvinning. Eras slet med mange utfordringer, både teknisk, utslippsmessig og økonomisk.¹⁰² Anlegget ble i 2013 kjøpt av nederlandske Nyrstar, og ombygget til å håndtere utelukkende bly-avfall fra Nyrstars anlegg i Budel, Nederland.



Som følge av dette må de norske skrapjernbaserte anleggene enten deponere eller eksportere sitt sinkholdige støv.

Deponering av et støv som holder 20-30 % sink er nesten umoralsk, i og med at det i Europa drives sinkgruver på basis av malmer med kun 4 % sink. Men, gjenvinningsanlegg må også tjene penger, og de utfordringene de har med inhomogenitet, innhold av Hg, Pb etc i støvet, og lave priser på sinkkonsentratet, må kompenseres for at denne industrien skal stimuleres igjen.

Så vidt vi forstår eksporteres Celsa sitt støv nå til gjenvinning i utlandet, så utfordringen er begrenset til de mindre støperiene. Men, historisk har Celsa levert mye til lokal deponering i Mo i Rana, noe som ikke er god ressursutnyttelse. Avfallspolitikken i Norge bør organiseres slik at Celsa har fordeler av å gjenvinne fremfor å deponere.

En utfordring er at små støperivirksomheter som har noen hundre kg sinkrikt støv per år har samme krav til dokumentasjon, søknad, deklarerings og tillatelse for eksport av sinkrikt støv som for et stort smelteverk med 10.000 tonn støv per år. Dette blir en terskel som kan virke hindrende for miljøeffektive løsninger. En forenklet prosedyre med forhåndsgodkjenninger av noen avfallstyper, der det foreligger langsiktige leveringskontrakter mellom avsender og behandlingsanlegg bør vurderes.

Siden norsk industri produserer omlag 10.000 tonn sinkholdig EAF-støv per år, og det tidligere gjenvinningsanlegget i Høyanger ikke lenger kan ta imot har vi valgt å inkludere denne tonnasje i tabell 7.1. Celsa står for nesten hele tonnasje. De små støperiene, slik som Ulefos, Furnes og Jøtul, representerer kun noen titalls tonn hver. I 2017 ble tonnasje fra Celsa eksportert, mens i tidligere år har tonnasje oftest blitt deponert.

4.5.1 Anbefalinger

- Det vurderes forbud mot deponering av gjenvinnbart støv med > 5 % sink.
- Det vurderes å få til «fast track» eller rammegodkjenninger for homogene farlig-avfall fraksjoner som skal gjenvinnes, slik at det blir lettere for støperiene å sende til gjenvinning enn deponering.
- Det utredes om avfallsforbrenningsanlegg kan utvikle sin avgassrensing slik at mesteparten metaller som sink anrikes i en mindre mengde flygeaske – slik at denne fraksjonen kan gjenvinnes på samme viset som EAF-støv.

4.6 GJENVINNING AV MANGAN (OG ANDRE METALLER) FRA SLAGG

Norge har en sterk og lønnsom manganindustri, representert ved de fire smelteverkene i Porsgrunn, Kvinesdal, Sauda og Mo i Rana. Avfall fra disse verkene utgjør mer enn 50.000 tonn. Nesten alt deponeres i egne deponier, og så lenge denne praksisen får lov til å fortsette vil ikke disse tonnasje utgjøre noe press på det norske systemet for farlig avfall. I tillegg til avfallet dannes det store mengder inert slagg. Eramet har fra sine 3 verk over 200.000 tonn. Slagget er kjemisk inert, og regnes i dag som biprodukt. Men, det har et høyt innhold av mangan som begrenser bruken. Fra et ressursperspektiv er det imidlertid et press for å øke gjenvinningen.¹⁰⁵ Både i Europa og Asia pågår arbeid for å øke gjenvinningen av mangan fra slagg (Byung-Su Kim & Mi-Hee, 2011).

Slagg og slam fra manganindustrien er mangeartet, men har det til felles at det er gjennomgående høye restverdier av mangan, i tillegg til at noen av avfallsfraksjonene inneholder andre metaller av interesse. Allerede i dag pågår det en betydelig gjenvinning, bl.a. ved at finstoff og støv blandes med sement, briketteres og tilbakeføres ovnene. Dette er en vanlig teknologi også ved mange andre verk rundt om i verden. Ulempen er selvsagt at det er mye materiale som går i loop i ovnene. Sør-Afrika har derfor sett på muligheten av å lage salgbar legering direkte fra støvet gjennom egne dedikerte DC-ovner. (K. Bisaka).

Globalt er det normalt at slagg fra ferromanganproduksjon blir sendt brukt som råstoff ved produksjon av silikomangan. I Norge blir eksempelvis slagg fra to av verkene (Porsgrunn og Sauda) sendt til et tredje verk (Øye) for videre bruk der. Alt dette for å oppnå en bra ressursutnyttelse.

Tross denne omfattende innsatsen oppstår det altså store tonnasje av støv, slam og slagg med høyt gjenværende manganinnhold, og ytterligere innsats kan være relevant for å gjenvinne enda mer.

Mange teknologier vurderes. I Sør-Afrika ser man på utlaking med svovelsyre, en teknologi som krever et høyt konsum av syre (Groot, 2013), men som har god gjenvinning av manganet (Baumgartner, 2014). Et aspekt med en slik teknologi er dannelsen av om lag to tonn gips per tonn mangan gjenvunnet. I India har tester vist at røsting av slagget med CaO og CaCO₃ ved svært høye temperaturer og lang oppholdstid også kan gi god gjenvinning, om lag 87 % (Naganoor, 2000). I Korea er det testet ut en enkel og ganske interessant

teknologi, hvis den virker, hvor slagget fra silikomangan knuses til finstoff, før magnetisk og tørr gravimetrisk separasjon (Kim, 2011). Den manganrike fraksjonen returneres til ovnen, mens den silika/kalsiumrike fraksjonen sendes vekk, trolig til sementproduksjon.

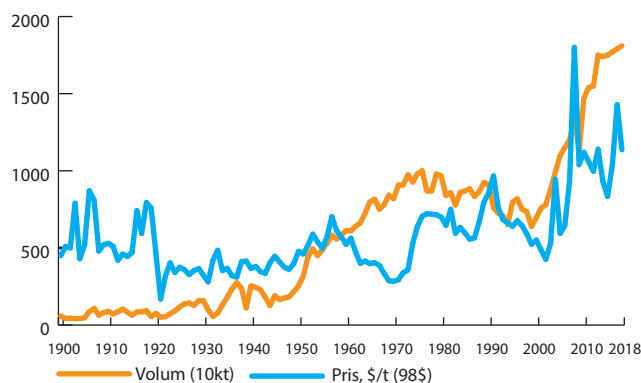
I Russland er det testet slagget fra silikomanganproduksjon som fluxmiddel ved sveising. Resultatene av testene har vært såpass gode at forskerne har tatt ut patent (Kozyrev, 2016).

I Kina har slagget fra ferromangan blitt brukt som råstoff for produksjon av mangansulfat. Det er oppnådd tilstrekkelige renheter til at dette kan brukes i Litium-batterier til elektriske biler (Yan, 2014).

Slagget har et høyt innhold av både silika og kalsium. Dette gjør slagget interessant som råstoff i sementproduksjon. Norcem forsøker nå å teste ut dette råstoffet i stor skala (Thyholdt, 2018). Erfaringene har imidlertid vist at manganinnholdet er såpass høyt at det gir prosessutfordringer (personlig meddelelse). Dette arbeides det med, både hos Eramet og Norcem, og det bør være god sannsynlighet for at dette lykkes. I så fall vil det bli redusert deponeringspress, samtidig som Norcem reduserer sitt behov for uttak av kalkstein og kvarts tilsvarende – og energiforbruk og klimagassutslipp går ned. Det ser ut til at andre får dette til, så det burde gå i Norge også. I Sør-Afrika har de testet et eget mellomtrinn som pyrolytisk raffinerer ferromanganslagget til to salgbare produkter; silikomanganlegering og sementtilskudd. Med dette prosesstrinnet får de et godt egnet sementtilskudd samtidig som det meste av manganet ivaretas, og de får null avfall (Banda, 2017).

I tillegg til slagget oppstår det altså i størrelsesorden 50.000 tonn slam, støv og annet uorganisk farlig avfall fra de fire manganverkene. Disse fraksjonene er langt

MARKEDSUTVIKLING, MANGAN



◀ Venstre: Markedet for mangan har utviklet seg godt.¹¹⁷ ➔ Høyre: Det meste av mangan som smeltes i Norge kommer fra regnskogsrike Gabon.

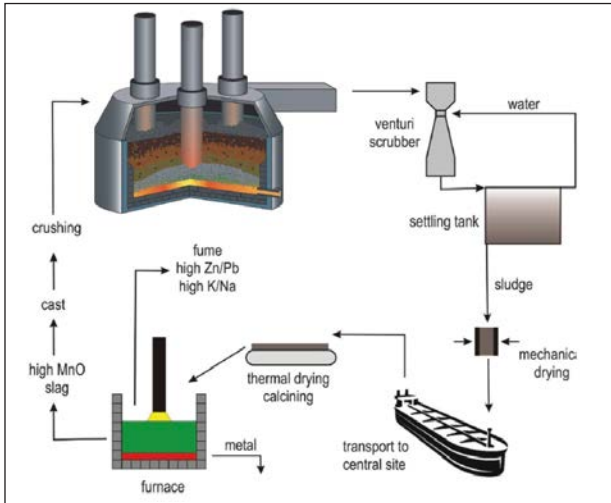


◀ Til venstre: Brikett av manganstøv agglomerert med sement for returføring til ovn. ➔ Øverst høyre: Slagg fra produksjon av silikomangan.¹¹⁶ ➔ Nederst høyre: Slagg fra gjenvinning av mangan fra våtvaskerslam (Ruihua, 2007).

mer krevende å finne løsninger for, men arbeid er i gang, blant annet internt hos Eramet.¹⁰⁶ Innholdet i støv og slam vil avhenge sterkt av hvilke malmer og andre råstoffer det enkelte smelteverk bruker. Felles for mange aktører ser ut til å være at støv og slam anrikes på sink (Shen, 2005). Flere referanser bekrefter at støv/slam inneholder i størrelsesorden 25–35 % MnO, 20–25 % karbon i form av sot og tjære og 2–3 % sink/bly. Det er litt betenkelig av avfall med slike egenskaper legges på en rekke bedriftsinterne deponier i stedet for å enten gjenvinnes eller behandles sentralt.

Ferrolegeringsindustriens Forskningsforening har gjort et stykke arbeid spesifikt på våtvaskerslammet (S.Gaal, 2010). De konkluderer, i likhet med et tilsvarende forskningsprogram på Tasmania (Ruihua, 2007), med at slikt slam bør samles inn og behandles i en sinterovn. Da kan sink/bly konsentreres i en fraksjon som kan gjenvinnes. Manganet gjenvinnes også, mens den lille resten som er igjen kan gå til deponi, eventuelt til sement. Andre kilder påpeker at for å lykkes med dette så må praktiske utfordringer med å holde oppholdstiden i ovnen løses, eksempelvis ved at støv/slam briketteres (Rama Murthy Y, 2018).





◀ Venstre: Norsk gjenvinningsteknologi (S.Gaal, 2010). ➔ Høyre: Tysk gjenvinningsteknologi (Schéele, 2004).

Bergfald vil konservativt anslå at sintringsløsning i tråd med forslagene fra norsk og tasmansk manganindustri vil gi 20 % volumreduksjon i form av forbrenning av karbonet, mens ca 30 % av volumet blir materialgjenvunnet som mangan og sink/bly. Inntil videre antas det at restvolumene trenger deponering som farlig avfall, bl.a. på grunn av innholdet av andre tungmetaller. Totalmengden slam som kan sintres er omlag 50.000 tonn. Det er imidlertid noe uklart hvor høyt vanninnhold dette slammet har. Det antas at det kan være omlag 50 %, slik at netto tørrstoffmengde som trenger deponering er i området 20-30.000 tonn. Dermed blir avfallsvolumet etter gjenvinning totalt sett redusert med om lag 10.000 tonn.

Samtidig bør det påpekes at mangan er et av de få metallene som har hatt en betydelig og konsistent prisstigning. Det vil på den ene siden føre til at gruvene vil ha insitament til å utnytte også dårligere malmer – noe som gir mer avfall og biprodukter hos smelteverkene. På den annen side vil det gi økt insitament til å drive ovnene slik at minst mulig mangan tapes til slagg og slam – og mest mulig gjenvinnes. Begge deler vil i praksis innebære en bedre ressursutnyttelse.

Det tyske selskapet Linde har laget pyrolytisk teknologi for å gjenvinne ressurser fra våtvaskerslam, med god suksess (Schéele, 2004). Det er også beskrevet hydro-metallurgiske metoder for å gjenvinne både sink og mangan (M.O.Simonnot, 2017). Både i tilfelle av pyro- og hydrometallurgiske teknologier kan en etablering av et gjenvinningsanlegg suppleres med andre avfallsfraksjoner. Et åpenbart eksempel er manganbaserte batterier (Ferella, 2006), men også noen biproduktfraksjoner fra mineralsk industri som i dag ikke regnes som farlig avfall kan være relevant som råstoff for et gjenvinningsanlegg.



Pilotanlegg for produksjon av elektrolytisk mangan fra våtvaskerslam.¹¹⁸

I Spania er det tidligere utviklet en teknologi for produksjon av elektrolytisk mangan med basis i våtvaskerslam fra anlegg tilsvarende de fire mangan-smelteverkene vi har i Norge (J. Sancho, 2009). Dette er en form for «upcycling» som både tar ivaretar begrensede ressurser og reduserer avfallsvolumer. Teknologien er patentert av et av de selskapene som eier og driver manganverk i Norge.¹⁰⁷

4.7 ANTIMON OG BARIUM

To elementer som har et stort antall bruksområder i moderne kjemisk industri, og derfor forefinnes både bredt i industrielle aske, støv og slaggraksjoner – og også i forbrenningsasker, er antimon og barium. Dette er også metaller som hyppig gjør at avfallsfraksjoner må karakteriseres som farlig avfall.

I Sveits er det gjort et arbeid på å videreutvikle FLUWA-teknologien, for å selektivt ekstrahere og precipitere antimon fra flygeaske fra avfallsforbrenningsanlegg (Fabienne, 2015) med HCl og H₃PO₄. I et doktorgradsarbeid i Sverige nylig er det testet flere teknologier for å hente ut antimon fra både industriavfall og flygeaske fra avfallsforbrenning. Resultatene spriker veldig. Fra industriavfallet er det kompleks, men ganske god gjenvinning. For flyveasken er det derimot vist svært dårlig gjenvinning – til tross for at man har testet syrer ned mot pH 1 (Karlsson, 2017). I England er det arbeidet med konsepter for å finne riktig lake-metode for kullaske (Maria Izquierdo).

Barium vil normalt foreligge som et salt, eksempelvis sulfat eller klorid. I noen tilfeller også som oksid. Dette påvirker sterkt gjenvinnbarhet, og det er trolig vanskelig å oppnå høy gjenvinning, hvis bariumet foreligger på forskjellig form. I India har de forsøkt å omgå dette ved å teste ultralyd som teknologibase (Renny Mariam Mathew, 2013). Dette bør trolig studeres nærmere med aktuelle avfallsfraksjoner for å

forstå mekanismene bedre. Utvinning av barium fra avfallsfraksjoner har vært aktuelt lenge. Allerede i 1938 ble det tatt ut patent på utvinning av barium fra visse bariumrike asker (USA Patentnr. US2111236A, 1938). Hvis det etableres konsepter for saltgjenvinning (se eget kapittel), så kan det legges til enheter for presipitering av bariumsulfat (Shukla, 2015).

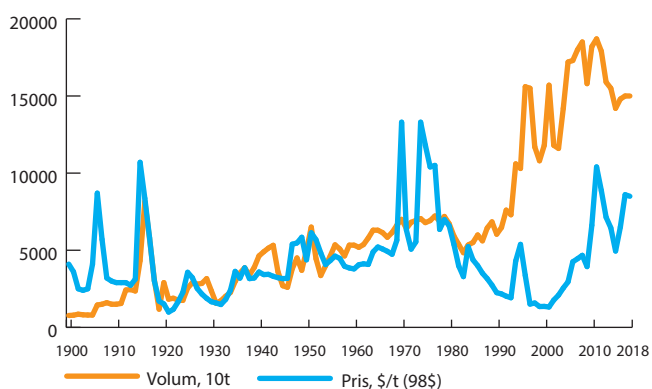
Innenfor rammene av dette prosjektet er det ikke funnet markeder, avfallsstrømmer eller teknologier for gjenvinning av antimon eller barium som det bør investeres mye videre arbeid i. Dette kan man eventuelt ta opp til fornyet vurdering senere.

4.8 GALLIUM FRA STØV FRA ALUMINIUMSMELTEVERK

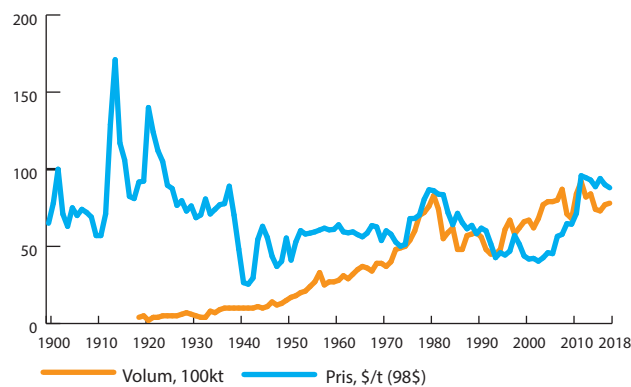
Gallium er et strategisk viktig metall, som danner basis for all LED i verden, og mye av verdens elektronikk. All gallium kommer i dag fra biproduktstrømmer fra sink, eller aluminium.¹⁰⁸ Gallium er tilstede som forurensning i alle slags bauxittforekomster, men i varierende grad. Siden kjemiske egenskaper er ganske like aluminium vil det meste av galliumet følge aluminaen frem til smelting – hvor forskjellene i kokepunkt gjør at galliumet evaporerer – for så å kondensere i støvet som fanges opp fra aluminiumsverk.

Det er svært sjelden at gallium analyseres, så vi vet relativt lite om variasjoner i konsentrasjon. I følge et gjeldende patent som innehas av Mitsui, er typisk konsentrasjon av gallium i bauxitt 20–100 ppm, som oppkonsentreres til 800–3000 ppm i posefilterstøvet. (USA Patentnr. US07062349, 1987). Flere nyere kilder peker imidlertid på langt høyere innhold, muligens på grunn av bedre driftsforhold på ovnene som gir mindre soting og medrivning av alumina/kryolittpulver. Flere kilder peker på en variasjonsbredde på 1000 – 10000 ppm, med mest typiske verdier rundt 2500 ppm (CARVALHO, 2000).

MARKEDSUTVIKLING, ANTIMON



MARKEDSUTVIKLING, BARIUM



Antimon og barium brukes bredt i kjemiindustrien og finnes i mange avfallsfraksjoner.¹¹⁹

Støv fra de 7 primæraluminiumprodusentene i Norge deklarerer dessverre litt ulike, så det er uvisst nøyaktig hvilke fraksjoner som kan ha de høyeste galliumkonsentrasjonene. støvet kan finnes med eksempelvis disse kodene; 100319, 100321, 100323, 100325 og 120114.. Det meste av denne tonnasjen deponeres, dels på egne deponier og dels ved leveranser til NOAH.

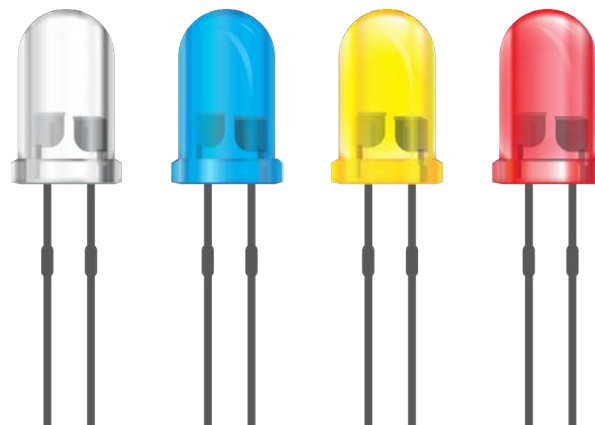
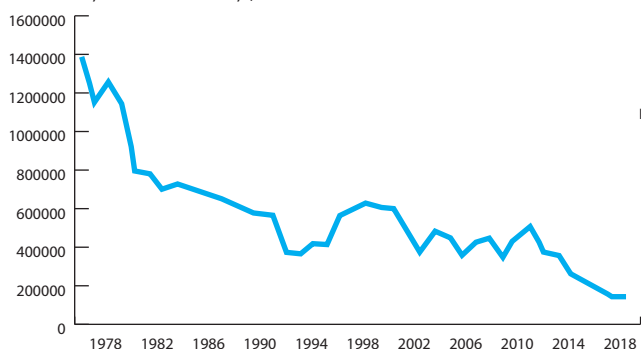
Kina dominerer fullstendig galliummarkedet, og gjør det vanskelig å ha oversikt over produksjonsvolumer. For Gallium kan vi derfor ikke gi statistikk for produksjonsvolum. Mange av de andre landene som er nevnt har kun gjenvinning av prosesskrap.

Et nytt marked for gallium som har kommet opp siste par årene, og som potensielt kan påvirke den skjøre markedsbalansen er skismøring. I takt med at fluorbaserte skismøringer i økende grad blir forbudt, så fases galliumbaserte skismøringer inn. Helse- og miljø-effekten av disse produktene er oss bekjent lite kartlagt.

En kinesisk kilde anslår rå-galliumproduksjonen til å være 375 tonn i 2016, men anslår en 20-dobling frem mot 2030, på grunn av utbredelsen av LED (Fang hai Lu, 2017).

De generelle prinsippene for ekstraksjon, separasjon og raffinering av gallium har vært kjent lenge. Allerede i 1919 ble det beskrevet SX-teknologi basert på salt-syreløsning (H. C. Fogg, 1919). I 1923 ble hovedteknologien bedre beskrevet (Nies, 1923). Siden gallium alltid påtreffes i ganske lave konsentrasjoner, må enhver prosessering være tilnærmet skreddersøm. Britene forsøkte ekstraksjon av gallium fra flyveaske på 50-tallet, med en svært tungvint teknologi (Walpole, 1951).

GALLIUM, PRISUTVIKLING, \$/t Ga metall



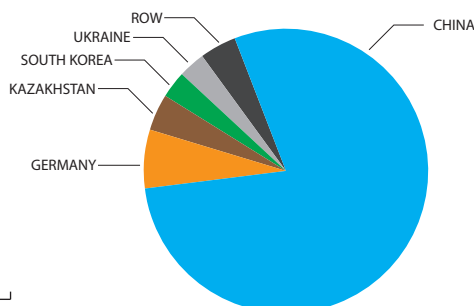
Gallium er basis for nesten all LED, og spiller derfor en nøkkelrolle i redusert miljøbelastning fra belysning.



Kinesisk ekstraksjonsanlegg for gallium. I dette tilfellet har de ekstrahert alumina fra kullaske, og ekstraherer galliumet deretter fra aluminaen. Tilsynelatende tradisjonell SX-L/L-teknologi.¹²¹

Brasil er det beskrevet selektiv ekstraksjon av gallium fra bauxittprosessering med mikroemulsjoner etter en løsning i svovelsyre (Castro, 2002). Dette har amerikanerne jobbet mye med før (J. C. Judd, 1990), men stritt – trolig på grunn av valg av uspesifikk ligand. Også andre strir med at ligandene er uspesifikke. Det er særlig krevende når man jobber i verdikjeden for aluminium, at enkelte av ligandene fanger aluminium lett og det må etableres egne strippelinjer for å fjerne aluminiumet (Abdollahy & Naderi, 2007). Rhone Poulenc (nå Solvay), patenterte løsning for slik stripping på

ESTIMATED GLOBAL GALLIUM CAPACITY BY COUNTRY



◀ Venstre: Prisen på gallium faller tross kraftig etterspørselsvekst. ➔ Høyre: Kina dominerer dette strategiske metallet.¹²⁰

70-tallet (US Patentnr. 3971843, 1976), men det spørs om ikke innsats på bedre utvikling av ligand kan være like matnyttig. Andre har forsøkt å forenkle teknologien med bl.a. å benytte seg av endret løselighet ved forskjellige temperaturer, ved å varme opp og kjøle ned ekstraksjonsvæsken (US Patentnr. US3988150A, 1975). Også gallium har blitt ekstrahert og selektivt precipitert med ioniske væsker. Dette er jo sølete og kostbare prosesser som det er vanskelig å anbefale, men i et tilfelle er det funnet en ligand som også ser ut til å ha en hvis attraksjon for indium (Katsuta S, 2012), hvilket kan være svært nyttig.

Vi har ikke viet videreføring av gallium til metall og andre produkter noe oppmerksomhet, men det er verdt å nevne at allerede i 1919 er det beskrevet funksjonelle galvaniske metoder for å anrike og redusere gallium (Theodore W. Richards, 1919).

Både gallium og søsterelementet germanium blir i dag utelukkende produsert som biprodukter fra andre metaller. I en kort periode var det annerledes, i USA ble det drevet en gallium/germanium-gruve (Torma, 1991), bl.a. finansiert av norske investorer. Man skal ikke utelukke at slike investorer kan fristes til å være med i et norsk gjenvinningsanlegg heller.

Tross at Gallium er svært viktig, er produksjonen liten, og uoversiktlig. Prisnivået gjør at gjenvinningen er høy. Hovedproduksjonen er i Kina, og tallmaterialet fra Kina er lite etterrettelig.

Hvis man legger til grunn at halvparten av tonnasje i de nevnte EAL-kodene har et høyt nivå av gallium, og at gjennomsnittskonsentrasjonen er 2500 ppm, så representerer dette altså en potensiell galliumforsyning på ca 25 tonn/år. Med forventet gjenvinningsgrad på 90 % og priser på noe under 2 MNOK/tonn representerer galliuminnholdet en potensiell salgsverdi på om lag 40 MNOK.

Det har ikke vært mulig innenfor rammene av dette prosjektet å kartlegge i detalj hva slikt støv for øvrig inneholder, eller om det er praktisk mulig å hente ut tungmetaller med mer i en grad som gjør at støvet enten kan returføres til ovnene, eller brukes til andre formål. I og med at gallium potensielt kan gi en inntektsstrøm av betydning, så kan det være verdtfullt å undersøke fraksjonen nærmere, selv om denne fraksjonen isolert sett utgjør en beskjeden tonnasje deponimessig.

4.8.1 Anbefaling:

- Norge har som stor aluminiumprodusent et ansvar for at det strategiske metallet gallium ikke deponeres. Det bør derfor vurderes et forbud mot deponering av gallium, begrunnet med ressurstap.
- Siden Norge har store overskudd av både brukt og ubrukt svovelsyre, så bør svovelsyrebasert løsning og ekstraksjon av gallium utredes nærmere.

4.9 SALT; BILLIG OG NØDVENDIG

Mange av avfallsfraksjonene i 7096 inneholder salter. Mengdemessig dominerer NaCl, MgCl₂ og KCl, men også mindre mengder av andre salter som LiCl, NaF, MgB, MgSO₄ etc kan finnes.

Ved gjenvinning av aluminium brukes betydelig mengder salt til raffineringen.¹⁰⁹ Hvor mye, og hvilken saltblanding avhenger av hvilket skrap som skal raffineres. Mengden kan variere fra nesten ingenting opp til 280 kg salt/tonn aluminium (Bertram, 2005). Saltet fanger opp forurensninger i metallet og bringer det til overflaten. Det er allerede ganske store tonnasjeer slikt salt som produseres i Norge, siden også Norge gradvis har bygget opp en stor omsmelte og gjenvinningsindustri. Det er all grunn til å forvente at ettersom sirkulærøkonomien brer ut seg, så vil også dannelsen av gjenvinnings salt øke. Dess flinkere vi alle blir til å kildesortere, dess mere offspec og forurenset aluminium kommer inn, og dess mer salt behøves.

Saltet som tilsettes er hovedsaklig NaCl, med om lag 25 % KCl – og potensielt andre salter ved spesielle behov. Noen bruker også salt med tilsats av fluorider.¹¹⁰ Den ledende kaliumprodusenten i Europa, K+S, promoterer aluminiumindustri som et av sine viktigste markeder. De leverer kaliumanriket salt for gjenvinning av aluminium, de tar tilbake saltet for prosessering, og tilbyr deponering av uorganisk farlig avfall i sine utdrevne gruver.¹¹¹

Som avfall inneholder saltet reaktanter, forurensninger, oksider og dråper/klumper med aluminiummetall. Anlegg som Real Alloy kan ta imot saltet for å hente ut aluminiummetallet i konkurranse med K+S, og produsere et aluminiumoksid som kan brukes i sementproduksjon. I Europa brukes betydelige tonnasjeer aluminiumoksid fra slik saltslagg-gjenvinning (Feige, 2001). Norcem i Norge bruker 15.000 tonn, importert fra Tyskland. (Thyholdt, 2018).



Saltet må imidlertid som oftest raffineres videre, eller deponeres. I Norge sendes mye salt til Noah for deponering.

Ut fra deklarasjonene estimerer vi at det leveres i overkant av 30.000 tonn blandet saltholdig avfall med opphav i aluminiumindustrien. Innholdet av kalium er relativt høyt, i størrelsesorden 20-25 %. Restfraksjonen, etter at saltet er tatt ut, kan normalt gå til sementproduksjon som alumina-tilsats.

Ved forbrenning av husholdningsavfall oppstår det også mye salt. Dels kommer dette som salt fra matavfall som ikke er utsortert, og dels kommer det fra forbrenning av PVC og andre halogenerte plaster. Saltet vil gjenfinnes hovedsakelig i flyveasken, men også noe i bunnasken, og vil ha relativt mye CaCl₂.

Flyveaske fra forbrenning av husholdningsavfall i skandinaviske land inneholder normalt ca 7-8 % Cl – som korresponderer til ca 15 % salter. Dette kan variere noe fra anlegg til anlegg. I anlegg som er flinke med å dosere kalkmel kan det være noe mer, i anlegg som er dårligere drevet er restmengdene kalkmel høyere, og saltkonsentrasjonene ditto lavere. Vi har ikke klart å identifisere noen større variasjoner med årstid eller regioner – selv om det ikke er utenkelig er tilfelle. Fra de norske forbrenningsanleggene oppstår det drøyt 60.000 tonn flyveaske per år. Dette innebærer da en saltmengde på ca. 10.000 tonn.

Det kan også komme mindre saltmengder fra andre industrier, men disse to kildene; gjenvinning av aluminium og forbrenning av avfall, dominerer mengdemessig. Hvis norsk praksis med å importere 300.000 tonn flyveaske fra andre land til behandling videreføres, så vil det komme ytterligere 50.000 tonn salt fra dette avfallet, og gi en større og mer økonomisk robust produksjon – hvis det er ønskelig å starte utseparering av salt.



← Venstre: Prosessering av saltslagg.
→ Høyre: Deponering av slagg og slam fra aluminiumgjenvinning i kaligruve.¹²²

Dagens praksis, med deponering av saltavfallet på Langøya, er langt på vei et utslipp til Oslofjorden. Saltet løses i de åpne bruddene på Langøya, og føres med overskuddsvannet til sjø. Det gir i seg selv ingen negativ miljøeffekt lokalt. Men, det er et tap av ressurser.

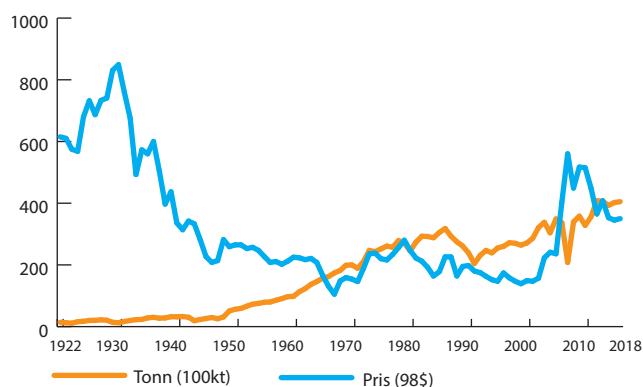
Utskillelse av salt fra NOAH-teknologien er tidligere beskrevet, bl.a. av et team fra Chalmers (Stenberg, 2016). Det fremstår som ganske kurant å skille dette ut (Margarida J.Quina, 2018). Hvor mye det reelt reduserer deponeringsvolum er litt usikkert, siden salt i stor grad allerede går med vann ut fra prosessen. Like fullt setter vi i denne sammenheng det opp som gjenvinning hvis saltet blir ivaretatt i stedet for sluppet ut. Separasjon av de forskjellige saltene som KCl, NaCl etc er godt kjent og energieffektiv teknologi. I Stenbergs rapport er det anslått en mengde på 70.000 tonn – kun fra flyveaske. Utifra de tonnasje som er deklartert i 2017 virker denne tonnasje noe høy, og vi har derfor lagt kun 60.000 tonn til grunn.

Økonomisk, og ressursmessig, er dette et spørsmål om Kalium. Kalium er et av de tre hovednæringselementene i kunstgjødsel, NPK, og er en ettertraktet ressurs. Av EU er kalium regnet som en strategisk ressurs, viktigere for økonomien enn både nikkel og kobber.¹¹²

Kalium, regnet som K_2O , har i dag en verdensmarkedspris på ca 340 \$/t, og et globalt marked på ca 40 millioner tonn. Regnet som KCl er markedet ca 60 millioner tonn, men prisen er da 215 \$/t. Til sammenlikning er markedet for NaCl ca 270 millioner tonn – men prisen er bare 30 \$/tonn.

Kalium er også et av svært få råstoffer hvor det har vært en økende pristrend siste 30 år. Selv om prisene svinger mye fra år til år med svingninger i landbrukets økonomi og produksjonsstatus for enkeltgruver, så er hovedtrenden økte priser.

MARKEDSUTVIKLING, KALIUM (SOM K_2O)

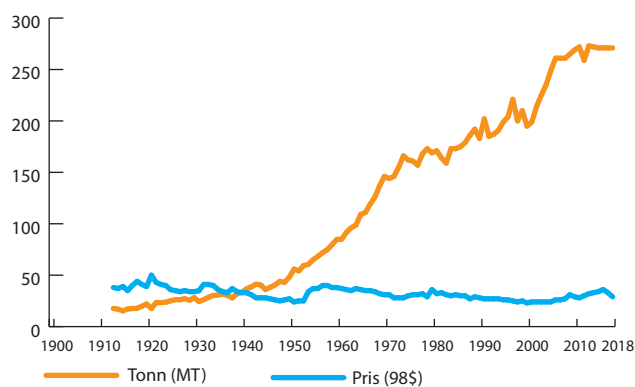


Det er tidligere påvist praktisk og teknisk mulighet for å ta ut 70.000 t salt fra NOAHs materialstrømmer.

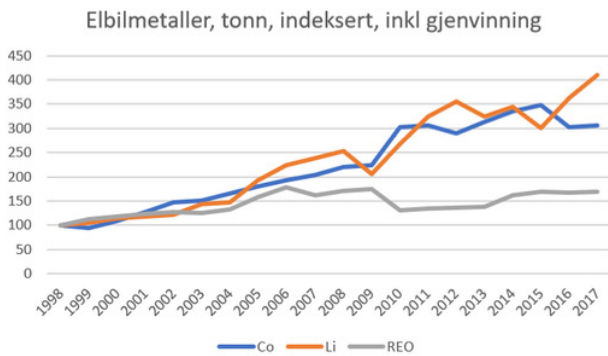
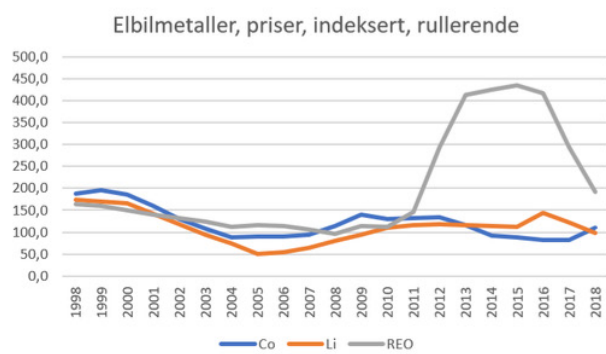
Dette kan delvis forklares ved at verdens kaliumgruver blir stadig dyrere i drift. De store gruvene i Saskatchewan er eksempelvis nå på dypere enn 1000 meter i mange tilfelle – og da stiger produksjonskostnadene. Gjenvinning av salt, med kalium som fokus og verdikomponent, kan derfor gi mening. Har man først etablert et slik anlegg, så vil det å ta ut også NaCl av industriktalitet og andre saltprodukter være relativt kurant.

Basert på tallene over, og med en viss konservatisme, anslås det dermed et potensiale for å hente ut inntil 90.000 tonn salt, hvorav ca 15.000 tonn estimeres å være KCl.

MARKEDSUTVIKLING, SALT (NaCl)



Markedene for salter er store, både målt i tonn og penger. Det gir noen gjenvinningsmuligheter.¹²³

Markedsutvikling av elbilmetaller, tonn og priser.¹²⁴

4.10 ELBILMETALLER

Markedet evne til å tilpasse både tilbud og etterspørsel etter metaller er enorm. Hvis man leser populærmedia kan man få inntrykk av at det knapt finnes metaller i verden, og at vi er i ferd med å gå tom for nødvendige metaller – og at krig og konflikt vil komme som følge av økt forbruk av noen metaller.

Man kan også få inntrykk av at utvikling av eksempelvis fornybar energi og elektrifisert av transport vil være vanskelig eller umulig som følge av mangel på metaller. Hvorfor populærmedia lager slike historier kan det spekuleres i, men de har få (om noen) forankring i virkeligheten.

Det er også en velkjent effekt innen mineralindustrien at man er overoptimistisk om fremtiden. Hvis optimistiske analytikere spår en vekst i etterspørselen etter et metall med 20 %, så investerer mange gruver og smelteverk i 40 % økt kapasitet.

Dette kan godt beskrives med de mye omtalte metallene som brukes i elektriske biler; litium, kobolt og sjeldne jordarter (REO). Innfasingen av elektriske biler har tatt av de siste ti årene, med massiv omlegging av bilproduksjonen, mye oppmerksomhet og stor penetrasjon i tre markeder (Kina, California og Norge). Attraktiviteten til elektriske biler har blitt ytterligere hjulpet på ved at produsentene av fossile biler har blitt avslørt for systematisk utslippsjuks.

Etablering av nye gruver og smelteverk tar globalt sett nesten 10 år, og ekspansjon i prosesskapasitet i eksisterende gruver og smelteverk tar fort 2–3 år. Man skulle derfor forvente at innfasingen av elektriske biler førte til store forstyrrelser i markedet for såpass små metaller som kobolt, litium og sjeldne jordarter. Slik er det imidlertid ikke.

Elektriske biler har vært godt omtalt, med betydelig oppmerksomhet i alle markeder, og forhåpningene har vært store i industrien. Milliarder av dollar har vært investert, primært i ekspansjon i eksisterende gruver og smelteverk. Samtidig har bilindustrien og batteriindustrien gjort en betydelig innsats for å lage bedre batterier med mindre bruk av slike kritiske metaller. Effekten har vært at til tross for en tre-/fire-dobling i behovet for kobolt og litium i løpet av de siste 20 årene, så har prisene falt.

Ennå er det ikke etablert en effektiv gjenvinningsindustri for elektriske biler, siden volumene av utslitte og ødelagte elbiler er små. Men, det vil komme i løpet av de neste ti årene, og legge ytterligere press på prisene.

Dessverre er det lite elbilmetaller i det uorganiske farlige avfallet som vi kjenner til. Men, hvis det etableres egne gjenvinningsordninger for elbilmetaller, så kan det ikke utelukkes at det er andre fraksjoner som også kan inkluderes, og dermed gi synergieffekter.

4.11 BIOASKE

Norge har relativt få biobrenselanlegg sammenliknet med våre nordiske naboer, men med stort og smått er det om lag 200 anlegg også her. Fra disse anleggene kommer det årlig noen få tusen tonn med flyveaske og bunnaske. Noe av asken har blitt forsøkt brukt som gjødselsmedium, men i hovedsak sendes den til deponi. Det meste går til lokale deponier for ordinært avfall, mens noe sendes til NOAH for stabilisering og deponering.

Det har ikke vært anledning til å gå i detalj på antall tonn, eller kvalitetsforskjellene i slik aske i dette prosjektet. Men, med basis i etablert informasjon kan man gjøre enkelte betraktninger. Aske fra større norske bioanlegg har blitt analysert, både på basis av innhold av essensielle næringstoffer og tungmetaller (Dibdiakova, 2013). På basis av tungmetallverdiene har det meste av aske blitt sendt til deponering. Tilsvarende situasjon og dilemma er mange andre land også i (Stetter, 2008).

Når man sammenlikner tungmetallverdiene med kunstgjødsel,¹¹³ så ligger bioaskene i samme område. Innholdet av essensielle metaller som sink og kobber er høye, mens skadelige metaller som kvikksølv og nikkel er fraværende eller lavt. Et metall som ligger overraskende høyt er bly. Dette kan kanskje sees i sammenheng med fraværet av regelverk for spredning av metallisk bly i naturen, og kan være en indikasjon på at dette regelverket bør strammes inn.

De relativt høye nivåene av fosfat og kalium tilsier at slik aske bør tilbakeføres naturen. Innholdet av kalsium vil også være positivt i et pH-perspektiv.

Strengt tatt må disponering av bioaske følge det nye avfallregelverket i EU, det såkalte HP14-regimet.¹¹⁴ Hvis økotoksisiteten er tilstrekkelig høy, må asken leveres som farlig avfall. Det er neppe miljømessig optimalt. I Sverige, hvor bioenergi er langt mer utbredt enn Norge, blir årlig 270.000 tonn aske forsøkt returført til skogen.¹¹⁵ I USA er asken definert som avfall, og det anbefales å bruke asken i sement, siden det er fare for høyt tungmetallnivå (Bob Barrows, State of Oregon).

		KUNSTGJØDSEL, SNITT	KUNSTGJØDSEL, MAX	BIOASKER, EKSEMPLER
SiO ₂	%	var.	var.	18
CaO	%	var.	var.	27
P ₂ O ₅	%	var.	var.	3
MgO	%	var.	var.	3
K ₂ O	%	var.	var.	7
Kadmium	ppm	7,1	19,1	13,0
Krom	ppm	94,6	274,7	51,0
Kobber	ppm	10,6	21,6	289,0
Bly	ppm	2,2	6,5	44,0
Kvikksølv	ppm	0,1	0,3	0,0
Molybden	ppm	i.a.	i.a.	4,0
Nikkel	ppm	90,0	396,0	26,0
Sink	ppm	113,0	306,0	2361,0

Tungmetall- og næringssaltverdier for et snitt av norske bioasker, sammenliknet med typiske verdier for kunstgjødsel.

4.11.1 Anbefaling:

- Det bør utredes om dagens regelverk med eksempelvis gjødselvarerforskriften og avfallsforskriften står i motstrid, og evt. om regelverket er til hinder for ressurseffektiv bruk av bioasker.
- Innenfor gjeldende regelverk bør bioenergiaktører oppfordres og hjelpes til å bruke bioaskene til gjødselformål.

5. KOMMENTARER TIL UTVALGTE AVFALLSSTRØMMER



5.1 KVIKKSØLVHOLDIG AKTIVT KARBON

Mange aktører i Norge bruker aktiv kull-filtre for å fange opp kvikksølv. Det er i 2017 deklart 368 tonn aktiv kull (EAL 061302 og 190110), og det antas at i praksis alt av dette har kvikksølvinnhold. Det er teknisk mulig å hente ut dette kvikksølvet gjennom termisk destillasjon, og derigjennom redusere volumet av kvikksølvavfall som må deponeres. Omsetning av kvikksølv er forbudt iht Minamatakonvensjonen, som Norge var initiativtaker til, så ethvert tiltak mot kvikksølvavfall må være begrunnet med verdien av stabilisering og volumbegrensning.

Men, slik teknologi er relativt kostbar, og introduserer et prosessstrinn som gir fare for egne utslipp av kvikksølv. Kvikksølvet som renses ut kan dels tappes på stålflasker, og dels stabiliseres som sulfid eller selenid. Volumreduksjonen som oppnås er tonnasjemessig ikke stor i norsk sammenheng, og vi har derfor valgt å ikke prioritere denne fraksjonen nærmere.

5.2 BLÅSESAND

Blåsesand brukes av mekaniske verksteder, entrepenører etc for å fjerne maling, oksidskitt etc. Avhengig av formål brukes en rekke forskjellige sandtyper, med forskjellige mineraler, partikkelstørrelse etc. Industri-anlegg som sandblåser komponenter før maling/lakking har oftest egne blåsebuer, hvor sanden gjenbrukes mange ganger. Litt etter litt slås den i stykker, så noe må tas ut for å opprettholde kvaliteten.

Det har vært vanskelig å få full oversikt over årlig forbruk, men en kilde anslår markedet til 60-70.000 tonn per år. (MoIndustripark, 2012). En av de store leverandørene på det norske markedet, Einar Øgrey Industrisand, skriver på sine nettsider at de produserer 15-20.000 tonn per år.¹²⁵ Både denne sanden, som markedsføres under varemerket Star-Grit,¹²⁶ og den norske olivinbaserte Blast-It (Håvard Gautneb, 2001), har høye tungmetallnivåer – før de tas i bruk. Hva nivåene er etter bruk er det lite oversikt over, og bør kartlegges. Det kan også være at blåsesand inneholder annet enn tungmetaller, siden det tilsynelatende er lite

	SAND	COAL SLAG	STEEL GRIT	GARNET	CRUSHED GLASS	OLIVINE	COPPER SLAG	NICKEL SLAG	TYSK IMPORT STAR GRIT	OLIVIN BLAST IT
As			30				23		270	
Ba	11	13		1			0,9			0,6
Cd					0,02				15	
Cr	4		1200	630		51	810	550	64	3,3
Cu	4		870	1	1	1	1500	6	3400	1
Hg									0,02	
Pb			7		0,7	0,3	1,5	0,7	590	0,2
Ni			700			1700	22		100	2934
Se						530	1500			
Zn	8		12	3	70	17	91	70	3500	29

Av ukjente grunner inneholder blåsesand i Norge mer tungmetaller enn i USA. Ubrukt blåsesand har et høyt innhold av tungmetaller, og er uorganisk farlig avfall etter bruk. Likevel finner vi nesten ikke blåsesand igjen i statistikken.

kontroll med disse varestrømmene.¹²⁷ I vårt arbeid har vi ikke klart å finne flere analyser for andre produkter enn disse to, så det kan være betydelige mørketall. Det mest interessante er at i begge tilfeller er blåsesanden farlig avfall – når den blir avfall. For å bedre kunne sammenlikne disse to dominerende markedsaktørene, har vi funnet frem til en omfattende studie fra USA, utført av NIOSH på en rekke blåsesandtyper (NIOSH, 2001). I tabellen står de amerikanske blåsesandene i hvitt, mens de to norske står til høyre i farge. Alle data i mg/kg.

I deklarasjonssystemet er det i 2017 rapportert inn 2810 tonn avfall fra sandblåsing, som en underkategori av 7096. Dette er åpenbart ikke korrekte tall. Dels må en del av de andre tonnasjene som er innlevert være deklart med en mindre tydelig kode. Men, vi antar at hoveddelen av sandblåsingssanden som brukes i Norge ikke leveres til FA-systemet.

Disponeringen av avfall som brukt blåsesand fra skipsverft og mekaniske verksteder skal kontrolleres av Fylkesmennenes Miljøavdelinger,¹²⁸ i samarbeid med Miljødirektoratet (Miljødirektoratet, 2016). I hvert veilederen skal minimum 80 % av sanden samles opp, kontrolleres og leveres til godkjent mottak. Fylkesmennenes ansvar er å påse at dette skjer, og i skikkelige former. I hvilken grad dette skjer, utover enkelte kampanjer, er ikke kjent for oss. Vi er heller ikke kjent med at det er laget noe statistisk godt materiale vedr. disponeringen av brukt blåsesand. Naturvernforbundet har tatt opp uheldig disponering av blåsesand ved flere lokaliteter rundt om i Norge.

Rensing av blåsesand som er ren som ubrukt, men blir forurenset i bruk er mulig. Rensing av sand hvor tungmetallene sitter i en gitterstruktur er langt vanskeligere. For å klare det må man trolig se på prosesseringsteknologier brukt innen gruveindustrien.



” **Blåsesand kan ikke gjenvinnes. Massene må håndteres og transporteres i tråd med gjeldende regelverk og bringes til forsvarlig sluttbehandling ved godkjent deponi.**

—www.ragnsells.no



” **Forbehandles og destrueres ved høy temperaturforbrenning**

—www.nggroup.no

Billige deponiløsninger gjør at gjenvinning ikke verdsettes. Ragn Sells mener blåsesand må deponeres.¹³¹ Norsk Gjenvinning mener blåsesand må behandles med høytemperatur forbrenning.¹³²

Terrafame driver en nikkel/polymetallforekomst utenfor Sotkamo i Nord-Finland. Dette er en stor, men fattig ressurs på bare 0,22 % Nikkel. Det ville vært umulig å utvikle denne ressursen basert på normale opparbeidingsteknologier. Terrafame har derfor i stedet satset på en avansert og storskala bioleach-teknologi, hvor bakterier løser ut tungmetallene fra malmen over en periode på flere år, og avanserte kjemiske anlegg feller metallene ut av løsningen. Eneste grunn til at dette har vist seg mulig er stor skala. Hver dag flyttes det 100.000 tonn på anlegget. Det virker utenkelig å prosessere brukt blåsesand, eller andre mindre fraksjoner, med tilsvarende teknologi. Det som imidlertid på sikt burde vurderes er et samarbeid hvor norske avfallsfraksjoner med høyt innhold av nikkel, kobber, kobolt kan sendes til anlegg som Terrafame for bruk der. Dette er ikke aktuell politikk for Terrafame i dag, men ikke utenkelig som en tjeneste i fremtiden.¹²⁹



← Til høyre er et amerikansk gjenvinningsanlegg.¹³³ ↑ I midten: enkel og praktisk suging av brukt blåsesand.¹³⁴ → Til høyre: Hauger med forurenset blåsesand på Fosen.¹³⁵

Brukt blåsesand vil i hovedsak bestå av sand som er helt lik ubrukt blåsesand. Noe av sanden vil være slått ned til finstoff, i tillegg vil det være litt malingsflak, metalloksider e.l. Hvis sanden har vært brukt utenfor et lukket anlegg, eksempelvis på en industrihall, rørgater,¹³⁰ et skipsskrog e.l., så vil det også komme med jord, grus e.l.

Det er relativt kurant å foreta en enkel oppgradering av brukt blåsesand gjennom virvelsikting eller tilvar-ende. Det aller meste av finstoff og avfallsstoffer vil da kunne tas ut for deponering, mens selve sanden vil kunne gjenbrukes. Avhengig av bruksområde og de mineralogiske egenskapene bør sanden kunne brukes en rekke ganger.

Dette har også industrien fått med seg, ved at det har vokst frem markeder hvor produsenter av blåsesand tar tilbake brukt sand for rekondisjonering. Noen avfallsaktører tilbyr tilsvarende tjenester, hvor sanden med enkle midler splittes i en hoveddel til gjenbruk og en finstoffdel til deponi. Dette står i kontrast til norske avfallsselskaper, som alle promoterer deponering.

Vi har vært i tvil om hvilken tonnasje som bør legges til grunn for denne sektoren, siden det er uvisst hvor mye blåsesand som brukes, hvor mye som går tapt og hvor mye som er farlig avfall. Utifra estimerte mengder på totalforbruket på +60.000 tonn, et antatt tap til miljøet på minst 20 % og erfaringene med gjenvinning i bl.a. USA estimeres det at minst 10.000 tonn kan gjenvinnes til ny bruk.

Washington Mills Recycling Program for Spent Abrasives



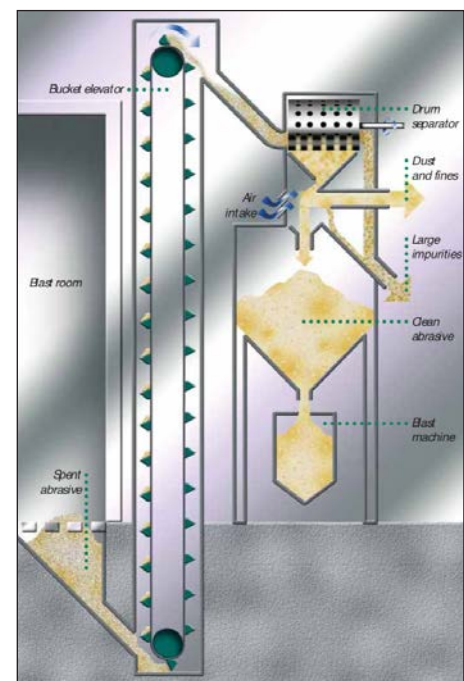
Save Money by Recycling with Washington Mills

Eliminate Landfill Costs
Sending spent abrasive material to a landfill is costly, time consuming and a liability to your company. Landfill regulations will continue to increase in both cost and complexity in the future. Recycling with Washington Mills saves you money otherwise wasted on landfilling material.

Free Yourself from Disposal Responsibilities
Every landfill shipment is a potential future claim against your company - your company's name is on that disposal forever. Recycling with Washington Mills frees your company from damaging landfill liabilities.

Save Time
Recycling with Washington Mills saves you time. Spent material can be picked up without the hassle of additional paperwork. Transport time required for landfill disposal is virtually eliminated.

Green Your Supply Chain
More companies require their suppliers to show they are making environmental improvements. Recycling with Washington Mills greens your supply chain, reduces waste in your manufacturing process, and moves you one step ahead of your competition by keeping costs down.



Gjenvinning av blåsesand er regulær industri i mange land. ➡ Til venstre tilbyr amerikanske Washington Mills å ta tilbake all brukt blåsesand.¹³⁶ ➡ Til høyre tilbyr svenske Munkebo utstyr for sikting av sanden.¹³⁷ I Norge er dette lite vanlig.

5.3 POTENSIELLE NYE AVFALLSFRAKSJONER SOM MAN BØR TA HØYDE FOR

Det har ikke vært innenfor vårt mandat å påpeke avfallsfraksjoner som i dag ikke, eller i liten grad, leveres som uorganisk avfall til systemet. Vi velger likevel å nevne kort noen få fraksjoner. I en rapport om mulig minimering av avfallsmengde kan det være nyttig å være bevisst på at det kanskje kan komme andre, økte eller tildels nye, tonnaser fremover. Oversikten i dette kapitlet er på ingen måte utfyllende eller komplett, men kun en kort samling eksempler.

5.3.1 Nyrstars slag

Nyrstar driver et unikt blygjenvinningsanlegg basert på plasmapyrolyse i Høyanger. Dette anlegget ble opprinnelig bygget for å gjenvinne sink fra EAF-støv.

Fra dagens blygjenvinning oppstår det om lag 12.000 tonn slag som inntil nå har blitt levert til SIMAS. Slagget inneholder ca 1000 ppm bly. Fylkesmannen i Sogn og Fjordane har varslet at dagens praksis med deponering må endres, og det er en mulighet for at denne tonnassen på sikt må leveres til et nasjonalt sluttdeponi for uorganisk farlig avfall. Så vidt Bergfald kjenner til pågår det tiltak ved SIMAS sitt anlegg som kan gjøre at mottaket kan fortsette.

5.3.2 Olivinbasert støperisand

Olivin er et magnesiumsilikat med svært høyt smeltepunkt. Norge utvinner og eksporterer olivin fra gruver på Sunnmøre. Olivin har unike egenskaper når det gjelder å binde enkelte overgangsmetaller, eksempelvis nikkel. Denne egenskapen brukes aktivt i stålindustrien for å rense råjern, og av forsvaret til å rense bly fra skytefelt. Men, det har også ført til at olivin naturlig er anriket på bl.a. nikkel. Olivin brukes i stort monn som støpesand og som blåsesand. Olivin fra Norge vil typisk inneholde ca 2000 ppm nikkel, i tillegg til de forurensninger som er tilført gjennom bruken, og burde derfor være klassifisert som farlig avfall. Det er så vidt vi er kjent ikke kartlagt hvor mange tonn brukt olivin støpesand eller blåsesand som blir avfall i Norge per år – eller hvordan denne sanden disponeres. Vi er ikke i stand til å dekode ut fra EAL-koder hvor mange tonn brukt olivinsand som potensielt er levert som farlig avfall – om noe.

En av de større brukerne av slik støpesand, NOMAC på Jørpeland, har konsesjon fra Miljødirektoratet for å legge brukt støpesand sammen med annet produksjonsavfall i strandkanten. Dette har gitt sedimentverdier på

utsiden som holder tilstandsklasse 5 (Kluge, 2016). Det er grunn til å anta at slik disponering av brukt støpesand på sikt vil bli strammet inn.

Det har i lengre tid vært gjort forsøk på å etablere en foredlingsteknologi for olivin, hvor denne oppløses i saltsyre for å danne presipitert silika og magnesiumklorid, med et nikkelkonsentrat som salgbart biprodukt. En slik løsning ville vært en fin løsning på denne fraksjonen, men dette er foreløpig ikke industrialisert. Et pilotanlegg er bygget og har vært i drift på Herøya i Porsgrunn, men anlegget er så vidt vi er kjent med ikke i drift for tiden. Herøya Industripark har søkt om statlige midler til å ta anlegget i bruk.

5.3.3 Annen støpesand

De norske støperiene bruker i hovedsak ikke olivinsand, men billigere silikasand. Slik sand blir blandet med bentonitt og kullstøv og vil ved utsortering som oftest inneholde BTX over grenseverdiene. Historisk har slik sand i hovedsak blitt lagt på bedriftsinterne deponier, men denne praksisen har i økende grad blitt strammet inn. I dag går sanden i stor grad til særskilte deponier for inert avfall. Denne praksisen kan man ikke være garantert vil vedvare, og ved en innstramming i regelverket vil man måtte enten levere sanden til et nasjonalt sluttdeponi for farlig avfall, evt. vaske eller behandle sanden gjennom termisk prosessering e.l.

Mengden har aldri blitt kartlagt, men på basisen av Bergfalds tidligere arbeid for støperiindustriforeningen estimeres mengden til å utgjøre i overkant av 20.000 tonn.

5.3.4 Skytevoller og skytefeltmasser

Årlig brukes 20-25 millioner rifleskudd i Norge, i all hovedsak på skytebaner. I tillegg kommer hagleskudd, pistolskudd, salongrifler mm.

Et typisk rifleskudd er ca 10 gram, og består vektmessig av 90 % bly legert med antimon og 10 % messing. Sammensetningen vil variere.

Mengdemessig tilføres altså ca 250 tonn av disse regulerte metallene per år, i hovedsak til sandfylte skytevoller.

I en viss grad blir skytevoller silt for å fange opp og gjenvinne metallet, men det tilhører unntaket mer enn regelen. Hovedbildet er en gradvis akkumulering av metall i vollene.

Utifra mengdene tungmetaller er det grunn til å forvente at regelverket for sanering av skytevoller vil strammes inn på sikt, og at dette vil gi opphav til nye fraksjoner med masser som trenger behandling eller deponering.

5.3.5 Asbest

Asbest blir i dag deponert på en lang rekke ordinære deponier i Norge, innpakket i plast og merket på kart. Asbest er en samlebetegnelse på en silikatmineraler som bl.a. har det til felles at de kan fullt ut oppløses i sterke syrer som saltsyre. Produktet blir ufarlige, og ganske verdiløse, salter som eksempelvis magnesiumklorid. Saltene kan slippes ut uten miljøskade, magnesiumklorid er i praksis havsalt. Det er utenfor scope i denne rapporten, men det ville vært et godt bidrag til å avgifte Norge om det ble etablert et anlegg som kunne ta imot og destruere asbest – i stedet for å pakke det i plast for spredt deponering.

5.3.6 Noralfs gips

Noralf produserer Aluminiumfluorid ved sitt anlegg i Odda, gjennom en reaksjon mellom flusspat (CaF) og biproduktet svovelsyre fra Bolidens anlegg. Som et biprodukt dannes gips, som Noralf kalsinerer til det foredlende produktet anhydritt (vannfri gips). Produksjonen har siste ti årene ligget på 80-90.000 tonn – som anhydritt.

Tidligere ble all denne gipsen sluppet i fjorden, til tross for et høyt innhold av bly og andre tungmetaller. Noralf har fortsatt tillatelse til å slippe ut gips i Sørfjorden, til tross for det høye blyinnholdet. Såvidt vi er kjent med sliter Noralf i perioder med å få solgt alt, og slipper da ut til fjorden. Det er vanskelig å se for seg at Miljødirektoratet vil kunne akseptere at dette utslippet videreføres i lengre tid. Når tillatelsen til utslipp trekkes tilbake vil overskuddsgips måtte deponeres som farlig avfall.

6. BARRIERER OG VIRKEMIDLER FOR ØKT MATERIALGJENVINNING



En rekke forhold begrenser industriens evne og vilje til å utnytte avfallsressurser til fremstilling av sekundære råvarer. For små og uforutsigbare avfallsstrømmer, umoden gjenvinningsteknologi, risiko for ulykker og miljøskader, lang vei og/eller store transportkostnader ved frakt av avfallsråstoff til gjenvinningsanlegg eller gjenvunnet produkt til markedet er alle eksempler på barrierer som kan være til hinder for dette. I tillegg er gjenvinningsanlegg for farlig avfall sjeldent populære i lokalmiljøet og frykt for lokale protester og omdømmeskade kan også holde tilbake slik industrietablering. I tillegg finnes eksempler på offentlig forvaltningspraksis som oppleves som inkompetent eller industrifiendtlig, og som fører til at industrien i praksis søker mot andre regioner når den skal etablere ny virksomhet.

I praksis vil imidlertid økonomien i gjenvinning være mest avgjørende, og av denne grunn kan så godt som alle barrierene som er nevnt ovenfor betraktes som en undergruppe av økonomiske barrierer. Med tilstrekkelig god lønnsomhet øker handlingsrommet for å håndtere begrensninger og utfordringer som ligger i avfallsstrømmenes størrelse og logistikk. Det kan investeres større ressurser i risikohåndtering og teknologiutvikling, samt legges større innsats ned i kommunikasjon med naboer og myndigheter.

I rapporten «Potensialet for økt materialgjenvinning av farlig avfall som oppstår i Norge» som Bergfald Miljørådgivere utarbeidet på oppdrag for Avfall Norge i 2017 ble det presentert en samlet oversikt over barrierer som da ble vurdert å være til hinder for økt materialgjenvinning av farlig avfall og forslag til aktuelle virkemidler som vurderes å kunne bygge ned disse barrierene. Rapporten til Avfall Norge tok for seg alt farlig avfall. Etter ønske fra oppdragsgiver bygger denne rapporten videre på barrierebeskrivelsene i Avfall Norge-rapporten og presenterer en liste over aktuelle

virkemidler som er oppdatert basert på nye erfaringer siden Avfall Norge-rapporten ble skrevet og som er spesifikke for det tungmetallholdige avfallet som omtales i denne rapporten.

Det er vanlig å dele opp politisk virkemiddelbruk i økonomiske, juridiske og kommunikative virkemidler. Dette vurderes også som en hensiktsmessig gruppering av aktuelle virkemidler for økt materialgjenvinning av tungmetallholdig farlig avfall.

Med økonomiske virkemidler menes typisk avgifter på jomfruelige råvarer som de sekundære råvarene konkurrerer med eller avgifter på deponering eller andre alternative behandlingsmåter avfallet kan gjennomgå uten at ressursene i avfallet kommer til ny nytte. Alternativt kan sekundære råvarer subsidieres slik at de blir relativt sett billigere enn jomfruelige produkter. Avgifter og subsidier kan også kombineres. Hvis deler av de statlige inntektene fra avgiftene som legges på jomfruelige råvarer samtidig flyttes over som subsidier til de sekundære råvarene som de konkurrerer med blir effekten naturlig nok enda større enn om virkemidlene skulle vært benyttet isolert.

Med juridiske virkemidler menes lovreguleringer som enten forbyr eller påbyr en gitt opptreden. Eksempelvis vil et forbud mot deponering gi økt insentiv for materialgjenvinning. På samme måte vil et krav til innblanding av en minimumsandel av sekundære råstoffer i visse typer produkter hjelpe sekundære råvarer inn i markedet.

Kommunikative virkemidler innebærer blant annet tiltak som medføre at kompetanse og erfaringer som er avgjørende for etablering av lønnsomme og velfungerende anlegg for materialgjenvinning av farlig avfall blir delt på måter som bidrar til dette.

Det finnes eksempler på virkemidler som kombinerer flere av disse virkemiddeltypene. Produsentansvarsordninger er et eksempel på dette hvor en bransje forplikter seg til å løse en avfallsutfordring som innebærer både økonomiske forpliktelser og regelbundet opptreden i tillegg til omfattende kommunikasjonsarbeid.

Virkemiddelbruken må være hensiktsmessig og virkningsfull. Virkemidler som er for svake vil naturlig nok ikke føre til vesentlige endringer i gjenvinningsgrad for avfallet, mens virkemidler som skyter over mål vil kunne virke konkurransevridende på uakseptable måter og føre til konkurser, illegal eller suboptimal disponering av avfall eller at samme produksjon flyttes til land med svakere miljøkrav. Det er derfor avgjørende å identifisere riktig dimensjonering av et virkemiddel for å sikre best mulig resultat. I følgende avsnitt presenteres en analyse av aktuelle virkemidler for å øke gjenvinningsgraden for tungmetallholdig farlig avfall i Norge.

6.1 AKTUELLE ØKONOMISKE VIRKEMIDLER

Inntektene som følger med materialgjenvinning av farlig avfall vil normalt være todelt. For det første vil bedriften normalt motta en behandlingsavgift for å ta i mot avfallet. Behandlingsavgiften vil ofte være på nivå med hva eieren av avfallet vil måtte betale for å levere avfallet til annen behandling. Sammenlignet med annen sluttbehandling som eksempelvis deponering vil materialgjenvinning nesten alltid være dyrere. Av denne grunn er gjenvinning avhengig av at det oppnås en pris ved salg av de gjenvunnede råvarene som kompenserer for dette. Som vist ved flere eksempler i denne rapporten kan det ikke forventes at markedet i alle tilfeller vil tilby dette. De fleste råvarer er priset lavt, og det er like sannsynlig at prisene vil gå ytterligere ned, som at de vil stige. Man kan derfor ikke basere en avfallspolitikk på at råvarepriser vil stige i fremtiden.

I noen tilfeller er det behov økonomiske virkemidler som kompenserer for den økte kostnaden ved gjenvinning. Det er imidlertid avgjørende at de økonomiske virkemidlene ikke forstyrrer konkurranseforholdene i bransjen på en utilsiktet eller uakseptabel måte eller fører til industriflukt. Opprinnelig var et det mål for arbeidet med denne rapporten å vurdere hvor smertegrensen går for dette. Disse vurderingene har imidlertid vist seg å være mer kompliserte enn opprinnelig antatt, og det anbefales derfor at dette spørsmålet gjøres til gjenstand for en særskilt utredning. I tillegg er det også viktig å være klar over at muligheten for nasjonale myndigheter til å legge særavgifter eller gi subsidier av

typen som her er beskrevet kan være begrenset av EU-bestemmelser eller annet internasjonalt avtaleverk. Et annet svært viktig område for bruk av økonomiske virkemidler er forskning og innovasjon. Bergfald Miljørådgivere mener at Norge både kunne og burde bidratt mer til utvikling av ny og bedre gjenvinningsteknologi for farlig avfall. Norsk prosessindustri inneholder mange bedrifter og fagmiljøer innen metall-ekstraksjon og -foredling som er et ideelt utgangspunkt for en slik satsning. Ideelt sett burde det eksistere et eget forskningsprogram for utvikling av mer miljø- og ressurseffektive materialgjenvinningsprosesser. Litium, gallium, indium, wolfram og sjeldne jordartsmetaller er eksempler på grunnstoffer som det haster med å utvikle bedre gjenvinningsteknologier for.

En annen interessant mulighet er etablering av et statlig investeringsselskap som går inn i etableringen av selskaper som satser på lovende nye gjenvinningsløsninger tilsvarende hva som er etablert for klimateknologi ved opprettelse av Nysnø.

Vi har observert at Innovasjon Norge har hatt tilgjengelig betydelige og gode støtteprogrammer inn mot sirkulær økonomi, men vi har også observert at søknadsbunkene ser ut til å være noe magre.

Et viktig virkemiddel Staten kan ta i bruk er sin innkjøpsmakt. Offentlig sektor er en enorm innkjøper av bl.a. byggevarer. Denne makten kan brukes, eksempelvis innen gipsplater. Staten kan spesifisere i sitt innkjøpsregelverk, og i DIFIs veiledere til kommuner med mer, at alle gipsplater som kjøpes skal være basert på resirkulert eller gjenvunnet råstoff.

En annen avgift som kan vurderes er på kunstgjødsel som er basert på fossilt brensel eller gruver. I dag er det få incentiver for å bruke asker fra biobrenselsanlegg, eller biprodukter som jernsulfat i verken konvensjonelt eller økologisk jordbruk, og disse verdifulle næringsstoffene blir derfor deponert. Hvis en generell avgift på kunstgjødsel kombineres med informasjon om nytteverdi i disse biproduktene, så kan mange tusen tonn styres i riktigere retning.

6.2 AKTUELLE JURIDISKE VIRKEMIDLER

Forbud eller restriksjoner på deponering eller annen sluttbehandling som konkurrerer med materialgjenvinning vurderes å være et av de mest virkningsfulle juridiske virkemidlene som finnes tilgjengelig. Et deponeringsforbud for visse typer farlig avfall vil imidlertid kunne skape økt risiko for mer farlig avfall på avveie,

spesielt dersom ordninger for gjenvinning ikke er godt nok etablert eller kjent i markedet. Dette vil være svært lite ønskelig. Bergfald Miljørådgivere mener like fullt at det bør vurderes forbud mot deponering av visse typer tungmetallholdig farlig avfall hvor innholdet er kritiske metaller eller andre mineraler er særlig høyt. Eksempler på grunnstoffer som bør vurderes med tanke på forbud er gallium og fluor.

En annen mulighet er krav til innblanding av en minimumsandel av sekundære råvarer i visse typer produkter. Det er eksempelvis mulig å se for seg i bygningsbransjen som kjøper inn store mengder metalliske materialer og betongråstoff. Avfallsgips, jernsulfat, samt metall- og saltkonsentrater fra gjenvinning av slagg og industristøv er eksempler på aktuelle sekundære råvarer som det kunne vært vurdert slike ordninger for.

Juridiske virkemidler kan også benyttes til en mer samordnet styring av hvor avfallsstrømmene leveres. Eksempelvis er det mulig å forestille seg et krav om levering av visse typer farlig avfall til anlegg som har til formål å klassifisere, forbehandle og videresende delstrømmer av farlig avfall til spesialanlegg for gjenvinning, og som derfor besitter spesialkompetanse med tanke på dette. Riktig klassifisering av farlig avfall er allerede en betydelig utfordring for flere norske industribedrifter, og mange gjenvinningsprosesser for tungmetallholdig avfall er så spesialiserte at det globalt sett kun finnes et fåtall tilgjengelig. Økt eksport vil av denne grunn i mange tilfeller være nødvendig for avfallstyper som det ikke finnes nasjonale gjenvinningsløsninger for. Det er imidlertid helt avgjørende at man sikkert kan verifisere at gjenvinningen reelt sett finner sted på en måte som ivaretar nødvendige miljøkrav.

Det er også mulig å se for seg juridiske virkemidler som stiller krav om mellomlagring av tungmetallholdig farlig avfall i påvente av gjenvinningsteknologi som ennå ikke finnes, og som derfor kreves mellomlagret på en måte som ikke bare sikrer avfallet mot utlekking, men også hindrer sammenblanding med andre avfallsfraksjoner, og som muliggjør enkel og kostnadseffektiv uthenting når ny teknologi gjør dette aktuelt.

Dagens regelverk som stiller krav om at avfall maksimalt kan lagres i ett år kan føre til at det er vanskelig å samle opp tilstrekkelig store volum til at gjenvinning blir lønnsomt. Et eksempel på det er fra vårt naboland Sverige, der konsentrater med 20 % sjeldne jordarter hentet fra lysstoffrør blir deponert, fordi det er utfordringer i det globale behandlingsapparatet.

Dagens regelverk for eksport gjør også at små volum avfall blir deponert i stedet for eksportert for gjenvinning, siden papirarbeidet med eksporttillatelser er såpass omfattende.

Det er kjent at Miljødirektoratet løpende vurderer etablering av nye produsentansvarordninger tilsvarende hva som per i dag finnes for eksempelvis emballasje, bildekk og EE-avfall. Bergfald Miljørådgivere mener det bør vurderes å etablere en tilsvarende produsentansvarsordning for gips, og kanskje også visse typer metallrikt industriavfall. Forurensningsloven bør også benyttes mer aktivt til å stille krav om økt ressursutnyttelse av avfallsmengder og biprodukter når det gis nye industrikonsesjoner og utslippstillatelser.

6.3 AKTUELLE KOMMUNIKASJONSVIRKEMIDLER

Kommunikasjonsvirkemidler har tradisjonelt vært politisk mindre kontroversielt å benytte enn økonomiske og juridiske virkemidler, og av denne grunn har det derfor kanskje også vært en lavere terskel for å benytte dem i miljøpolitikken. En utfordring synes imidlertid å være at denne typen innsats i mange tilfeller blir for uforpliktende, tilfeldig og med begrenset om noen synlig effekt. Ideelt sett bør kommunikasjonsvirkemidler for økt ressursutnyttelse av avfall minimum føre til minst en av følgende endringer:

1. Informasjon om tilgjengelig mulighetsrom for økt materialgjenvinning gjøres kjent for bransjer og fagmiljøer som har en rolle å spille i eventuell etablering av slik virksomhet.
2. Kunnskap om forskningsresultater, innovasjonsprosesser og operative erfaringer med beste praksis for materialgjenvinning deles i bransjer og fagmiljøer som er avgjørende for implementering eller videreutvikling av nye og bedre gjenvinningsløsninger.

Eksempler på kompetanse som kan være verdifullt å dele er kunnskap om markedsmuligheter, teknologier, metoder og produkter som muliggjør lønnsom, ressurs- og miljøeffektiv gjenvinning av materialressurser i farlig avfall.

Det finnes allerede mange eksempler på industrielle og forskningsmessige delingsnettverk som kan spille en rolle i forhold til å dekke disse kommunikasjonsbehovene. Noen er organisert av bransjeorganisasjoner eller bransjeraktørene selv (eksempelvis Ferrolegeringsindustriens forskningsforening), mens andre organiseres av eller i samarbeid med myndighetene (eksempelvis Miljødirektoratets Miljøforum).

Kommersielle hensyn og konkurransefølsomhet vil imidlertid ofte begrense omfanget og verdien av informasjon som deles i slike prosesser. Dette må den politiske bruken av kommunikasjonsvirkemidler ta inn over seg. Helt spesifikt bør det vurderes tiltak som gir insentiver som kompenserer for dette.

7. KONKLUSJON, ANBEFALINGER OG FORSLAG TIL VIDERE ARBEID



Norsk industri har de senere årene gjort mye for å minimere egne strømmer av tungmetallholdig farlig avfall, blant annet gjennom tilpasning av fremstillingsprosesser som i økende grad kan ta tilbake biprodukter og avfall som råstoff for ytterligere produksjon. Bergfald Miljørådgivere mener det finnes et betydelig potensial for ytterligere forbedringer i denne retning, og har i denne rapporten lagt frem en beskrivelse av markeder og et teknologisk mulighetsrom som vi mener begrunner denne holdningen. Blant annet peker vi på flere eksempler på slagg og industristøv som per i dag deponeres som både kunne og mest sannsynlig ville blitt utnyttet med litt høyere råvarepriser.

Videre pekes det i denne rapporten på en mulighet for ytterligere minimering av strømmene av uorganisk farlig avfall som per februar 2019 deponeres gjennom en selektiv behandling og separat deponering av over-skuddsgips som ikke behøves for stabilisering av annet farlig avfall.

Samlet mengde av tungmetallholdig avfall innenfor de kategoriene som er vurdert i denne rapporten anslås i kapittel 2 til ca 600 000 tonn. Anslaget baserer seg på tallgrunnlag for 2017. Av dette avfallet er nesten 200.000 tonn vann som filtreres ut ifm sluttbehandlingen, mens ca 200 000 tonn avfall går til industri-deponier som ikke vurderes å ha kapasitetsproblemer på kort sikt, men kan like fullt inneholde ressurser som er aktuelle å gjenvinne. I tillegg anses deler av avfallet å allerede inngå i materialgjenvinningsprosesser som begrenser potensialet for ytterligere ressursutnyttelse.

På den annen side importeres det store mengder uorganisk farlig avfall fra utlandet for å nøytralisere svovelsyre, og det er grunn til å tro at vesentlige volumer av brukt blåsesand og enkelte andre fraksjoner avfall ikke blir levert til riktig behandling.

Anslagene av gjenvinnings- eller avgiftingspotensialet i det resterende avfallet er sammenfattet i tabell 7.1 og er samlet anslått til 230 000. I dette anslaget er det inkludert sinkholdig EAF-støv som i 2017 i hovedsak ble gjenvunnet. Denne fraksjonen har ofte tidligere blitt deponert, og skal man unngå det i fremtiden må man ha en politikk for slikt avfall. I anslaget er det også inkludert blåsesand, siden det her er nødt til å være mørketall.

I anslaget på 90.000 tonn salt er alt salt inkludert. Om lag 10.000 tonn salt eksporteres i et normalår, men dette vil trolig ikke skje hvis det etableres et gjenvinningsanlegg.

Det er verdt å merke seg at selv med svært optimale gjenvinningsprosesser vil det oppstå restfraksjoner som i noen tilfeller fortsatt vil være farlig avfall som krever deponering.

AVFALLSTYPE	DEPONIREDUKSJON (tonn)
Gjenvinning av sinkholdig støv	10 000
Gjenvinning av SPL (1+2 cut)	20 000
Gjenvinning av mangan og sink fra slam	10.000
Gjenvinning av salt	90 000
Avgiftning av blåsesand	10 000
Gjenvinning av gips	50 000
Gjenvinning av jernsulfat	40.000
Totalt	230 000

Tabell 7.1 Anslått mengde tungmetallholdig avfall som kan gjenvinnes og/eller avgiftes. Det er viktig å notere seg at av denne tonnasjen stammer 50.000 tonn salt fra importert flygeaske, mens noe salt og sinkstøv allerede gjenvinnes i dag. Selv om det etableres gjenvinning av 230.000 tonn i Norge, så vil altså ikke deponibehovet synke tilsvarende.

For noen av fraksjonene, slik som SPL eller manganavfall og biprodukter fra manganindustrien, så bør Norge koordinere sin politikk med andre land. Det er bedre med noen få slike anlegg i verden med høy standard, enn at alle land skal ha små og suboptimale anlegg.

En forutsetning for at disse potensialene skal kunne realiseres er en offensiv avfallspolitikk hvor nødvendige virkemidler som blant annet beskrives i denne rapporten benyttes på en optimal måte.

Begfald Miljørådgivere anbefaler at følgende tiltak vurderes som virkemidler for å øke materialgjenvinning av tungmetallholdig farlig avfall:

7.1 ØKONOMISKE VIRKEMIDLER

- Det bør utredes om en avgift på sluttbehandling av visse typer uorganisk avfall kan stimulere til økt materialgjenvinning.
- Det bør vurderes å etablere et eget forskningsprogram som støtter utvikling av mer miljø- og ressurseffektive materialgjenvinningsprosesser.
- Det bør vurderes å etablere et statlig investerings-selskap som går inn i etableringen av selskaper som satser på lovende nye gjenvinningsløsninger tilsvarende hva som er etablert for klimateknologi ved opprettelse av Nysnø.
- De fleste land forsøker å gjenvinne gips og jernsulfat fra produksjon av titandioksid, og dette bør stimuleres i Norge også. Norge bør vurdere å støtte etableringen av gjenvinningsanlegg for gips og jernsulfat, eksempelvis via Enova, eller via Innovasjon Norges miljøteknologiprogram.
- En avgift på bruk av kunstgjødsel kan gjøre gjødselmidler som jernsulfat og bioaske mer attraktivt.
- Det bør utredes et økonomisk støttereime til kritiske teknologimetaller som litium, tantal, indium, gallium, wolfram og sjeldne jordarter som kan fremme FoU og etablering av nye gjenvinnings-teknologier.
- Norge har en betydelig prosessindustri og prosess-kjemikkompetanse, og det er potensielt en del kapasitet i industrien til å ta imot og foredle avfallsfraksjoner. I noen tilfeller må kanskje dette subsidieres, eller det må støttes etableringen av forbehandlingsanlegg eller liknende for at industrien

kan ta dette i bruk. Miljødirektoratet bør vurdere å få kartlagt uutnyttede muligheter for materialgjenvinning i norsk industri – og finne hvilke barrierer som må fjernes for å lette gjenvinningen.

- Kvikksølv skaper dyrt avfall, og det er lite kvikksølv-forurensning som skal til for at en ellers inert masse må klassifiseres som farlig avfall. Det står tonnevis av kvikksølv rundt på tannlegekontorer som uforvarende kan havne i restavfall ifm flytting eller rydding. Det ligger tonnevis med kvikksølv i private hjem og skoler i form av termometre etc. Innsamling av kvikksølv bør oppmuntres, slik at man får kostnadsoptimal disponering. En panteordning på eksempelvis 1000 NOK/kg kan bidra til en samfunnsdugnad – en avgifting.

7.2 JURIDISKE VIRKEMIDLER

- Det bør utredes om avfall med høyt innhold av kritiske eller strategisk viktige metaller og mineraler får deponiforbud. Eksempler kan være gallium og fluor.
- Det bør utredes om norsk industri har deponeringsbetingelser som gir urimelige konkurransemessig fortrinn eller ulemper sammenliknet med industri i sammenliknbare land.
- Staten bør vedta en retningslinje for offentlige innkjøp som stiller krav om at alle gipsplater skal være produsert av gips fra gjenvinning eller bi-produkter. DIFI bør utarbeide en veileder.
- Avfallsfraksjoner som er innholdsmessig forutsigbare, og hvor det finnes avklarte produsenter og gjenvinnere i utlandet, bør få forenklede eksport-regler. Eksempelvis for EAF-støv.
- Det bør utredes hvordan det kan opprettes ordninger som sikrer bedre klassifisering, forbehandling og valg av sluttbehandler for gjenvinnbart farlig avfall.
- Kartlegge omfanget av bedriftsegne deponier, i tråd med tidligere initiativer i USA og Australia. Noen eldre deponier, eksempelvis for katodeavfall, bør vurderes sanert.
- Muligheten for mer liberale løsninger for separat mellomlagring av tungmetallholdig avfall med spesiell gjenvinningsverdi som det i øyeblikket ikke finnes teknologi eller priser som tillater utnyttelse bør utredes.

- Det bør utredes hvorvidt det i bør være enklere muligheter for dispensasjon fra krav i Avfallsforskriften om levering av farlig avfall etter ett år og over ett kilogram for farlig avfall med spesiell gjenvinningsverdi.
- Et generelt forbud mot ammunisjon basert på bly/antimon bør vurderes. Det bør utredes om skytevoller og skytefelt bør renses med systematisk intervall, eksempelvis hvert 10. år eller per 1 million skudd.

7.3 KOMMUNIKASJONSMESSIGE VIRKEMIDLER

- Norsk industri må bli flinkere på å lære av hverandre. Noralf gikk fra å pumpe 90.000 tonn gips i fjorden til å selge det som byggråstoff i Nederland og UK. Det samme kan man få til med annen gips også.
- Etablering eller økt støtte til eksisterende møteplasser for løpende drøfting av potensialet for økt materialgjenvinning av farlig avfall fra prosessindustrien med spesiell fokus på aluminiumsprodusenter og ferrolegeringsindustrien.
- Komparativ livsløpsanalyse som sammenligner miljøfotavtrykket ved materialgjenvinning av metaller fra slagg og industristøv med utvinning av tilsvarende produkter fra jomfruelig malm.
- Utdanningsinstitusjoner bør inkludere egne fag i sirkulærøkonomi.

BIBLIOGRAFI

- Abdollahy, M., & Naderi, H. (2007). Liquid-Liquid Extraction of Gallium from Jajarm Bayer Process Liquor Using Kelex 100. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering.
- Akio Era, S. M. (1987). USA Patentnr. US07062349. Hentet fra <https://patents.google.com/patent/US4728505>
- al, E. S. (1975). US Patentnr. US3988150A.
- Athena. (2011). A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of ½"Regular and 5/8" Type X Gypsum Wallboard. Athena Institute.
- Azadpour, A. (2016). Carbon dioxide mineral sequestration using red gypsum.
- Ball, R. W. (1938). USA Patentnr. US2111236A.
- Banda, W. (2017). METALLOTHERMIC PRODUCTION OF CEMENT EXTENDER FROM MANGANESE WASTE SLAGS. Proceedings of the 5th Slag Valorisation Symposium - Mintek.
- Banker, D. (1991). USA Patentnr. US5164174A.
- Baumgartner, S. J. (2014). The recovery of manganese products from ferromanganese slag using a hydrometallurgical route. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Bertram, U. B. (2005). Melting Standardized Aluminum Scrap: A Mass Balance Model for Europe. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society .
- Birry, L. (2016). The LLC&L Process. Aluminium Today.
- Broek, S. (2018). Fundamentals of Managing Spent Potlining (SPL). Proceedings of the 36th International ICSOBA Conference, Belem, Brazil,.
- BusinessWire. (2018). <https://www.businesswire.com/news/home/20181206005689/en/Global-Cryolite-Market-2018-2022-Increasing-Demand-Aluminum>. Hentet fra <https://www.businesswire.com/news/home/20181206005689/en/Global-Cryolite-Market-2018-2022-Increasing-Demand-Aluminum>
- Byung-Su Kim, S.-B. J., & M.-H. J.-W. (2011). Upgrading of Manganese from Waste Silicomanganese Slag by a Mechanical Separation Process. Materials Transactions.
- CARVALHO, M. S. (2000). Recovery of Gallium from Aluminium Industry Residues. Rio de Janeiro: INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR.
- Castro, T. &. (2002). Gallium extraction by microemulsions. Talanta.
- Clukey, H. (1951). USA Patentnr. US2732283A.
- Cook, C. C. (1971). OPERATING EXPERIENCE WITH THE ALCOA 398 PROCESS FOR FLUORIDE RECOVERY. Journal of the Air Pollution Control Association.
- Cooper, B. J. (2015). Considerations for Dealing with Spent Potlining. 11th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference.
- CruGroup. (2016). <https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/insights/how-do-acid-prices-affect-smelter-revenues-in-different-regions-of-the-world/>.
- Daniel Vêras Ribeiro, S. C. (2015). Evaluation of the Incorporation of Waste Generated from Titanium Dioxide Manufacturing in Red Ceramics. Materials Research.
- DECHEMA. (2015). Anorganische Rohstoffe –Sicherung der Rohstoffbasis von morgen. DECHEMA e.V.
- Dibdiakova, J. (2013). Egenskaper ved Treaske fra Industrien. Skog og Landskap.
- Dick, L. C. (2011). Gypsum for Agricultural Amendment. Ohio State University.
- Diego Fernandez Lisbona, K. M. (2007). Recovery of fluoride values from spent pot-lining: Precipitation of an hydroxyfluoride hydrate product. Separation Purification Technology.
- Eberhard Gock, E. T. (2015). Recycling von Elektrolyseausbruch (SPL) aus der Primäraluminiumgewinnung.
- Eder, K. (2001). Environmental politics of Southern Europe. Springer.
- Eurogypsum. (2019). www.eurogypsum.org.
- Fabienne, V. (2015). Antimony in secondary sources - Sb recovery from fly ash. University of Applied Sciences and Art of Northwestern Switzerland.
- Fang hai Lu, T. J. (2017). Resources and extraction of gallium: A review. Hydrometallurgy.
- Feige, R. (2001). SEROX - ein Tonerderohstoff aus der Aufarbeitung von Aluminium-Salzsäure. "Einsatz von Abfallstoffen im Bereich Keramik, Glas, Baustoffe" .
- Ferella, F. &. (2006). Recovery of zinc and manganese from spent batteries by different leaching systems. Acta Metallurgica Slovaca.
- Flores, I. V. (2018). Evaluation of spent pot lining (SPL) as an alternative carbonaceous material in ironmaking processes. Journal of Materials Research and Technology.
- Fuleihan, N. F. (2011). Phosphogypsum Disposal - The Pros & Cons of Wet Versus Dry Stacking. 1st International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry. Elsevier.
- Gaustad, F. I. (2018). Framtidig Farlig Avfall.
- Gázquez, M. (2015). Recycling wastes coming from the pigment TiO2 industry. International Conference "Industrial waste and wastewater treatment and valorization".
- Gázquez, M. J. (2012). Use of the "red gypsum" industrial waste as substitute of natural gypsum for commercial cements manufacturing. Materiales de Construcción.
- Gázquez, M. J. (2014). A Review of the Production Cycle of Titanium Dioxide Pigment. Materials Sciences and Applications.
- Gock, E. (2015). Tyskland Patentnr. DE102015003405A1.
- Grini, G. (2016). Veikart for gjenvinning. Norsk Industri.
- Grolman, R. J. (1994). Environmentally sound hydrometallurgical recovery of chemicals from aluminium industry spent potlining. R. J. Grolman.
- Groot, D. R. (2013). THE RECOVERY OF MANGANESE AND GENERATION OF A VALUABLE RESIDUE FROM FERROMANGANESE SLAGS BY A HYDROMETALLURGICAL ROUTE. The thirteenth International Ferroalloys Congress efficient technologies in ferroalloy industries.
- Gypsum-Association. (2019). The Gypsum Association,. Hentet fra <https://www.gypsum.org/about/gypsum-101/what-is-gypsum/>
- H. C. Fogg, a. C. (1919). THE EXTRACTION OF GALLIUM AND GERMANIUM FROM ZINC OXIDE. J. Am. Chem. Soc.
- Haijun Liang, P. Z. (2017). Rare Earths Recovery and Gypsum Upgrade from Florida Phosphogypsum. Minerals and Metallurgical Processing.
- Hiroki Hatayama, K. T. (2015). Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. Materials Transactions, Vol. 56, No. 2, s. pp. 229 to 235.
- Hoang Nguyen, E. K. (2019). Byproduct-based ettringite binder – A synergy between ladle slag and gypsum. Construction and Building Materials.
- Hopkins, T. &. (1995). COMTOR process for treatment of spent potlining. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review .
- Håvard Gautneb, B. F. (2001). Karakterisering av olivin, med vekt på gitterbundne elementer. NGU.
- Indurkar, P. D. (2014). Optimization in the treatment of Spent pot Lining - A Hazardous Waste Made Safe. NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, INDIA.
- J. C. Judd, D. D. (1990). Gallium solvent extraction from sulfuric acid solutions using OPAP. US Bureau of Mines.
- J. Sancho, B. F. (2009). METHOD OF OBTAINING ELECTROLYTIC MANGANESE FROM FERROALLOY PRODUCTION WASTE. 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco – Energy.
- J.R. Donald, M. W. (u.d.). Dealing with Spent Refractory Materials . Hatch Associates.
- J.Sancho, J. R. (2015). ELECTROLYTIC MANGANESE FROM FERROALLOY PRODUCTION FURNACE FLYING DUST. The Fourteenth International Ferroalloys Congress.
- Johnston, R. (1978). Ocean Dumping of Industrial Wastes. Marine Science.
- K. Bisaka, G. D. (u.d.). The processing of jigged ferromanganese fines in a DC arc furnace. Pyrometallurgi.
- Karlsson, T. (2017). Studies on the Recovery of Secondary Antimony Compounds from Waste. University of Gothenburg, Chalmers.

- Katsuta, S. O. M. (2012). Extraction of gallium(III) from hydrochloric acid solutions by trioctylammonium-based mixed ionic liquids. *Anal Sci.*
- Kim, B.-S. (2011). Upgrading of Manganese from Waste Silicomanganese Slag by a Mechanical Separation Process. *Materials Transactions.*
- Kluge, R. (2016). Overvåkingsrapport NOMAC. COWI.
- Kozyrev, N. A. (2016). On the use of slag from silicomanganese production for welding flux manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.*
- Kristensen, K. (2017). Materialgjenvinningspotensialet i farlig avfall. *Avfall Norge.*
- Kronos. (2011). Chromate reduction in cement using ferrous sulfates. *Kronos Ecochem.*
- L.Dvorkin, N. (2016). Sustainability of gypsum products as a construction material. *Sustainability of Construction Materials.*
- M. Bogataj, Z. K. (u.d.). Circular Economy Model of Cathode Waste Processing. 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGIES & BUSINESS MODELS FOR CIRCULAR ECONOMY: CONFERENCE PROCEEDINGS .
- M.O.Simonnot, J. G. (2017). Recovery of zinc and manganese from pyrometallurgy sludge by hydrometallurgical processing. *Journal of Cleaner Production.*
- Mader, H. (1960). USA Patentnr. US3065051A.
- Mann, V. (2017). SPL recycling and reprocessing. I *Light Metals 2017*. Springer.
- Mansfield, K. &. (2002). SPL Treatment and Fluoride Recycling Project.
- Margarida J.Quina, E. B. (2018). Technologies for the management of MSW incineration ashes from gas cleaning: New perspectives on recovery of secondary raw materials and circular economy. *Science of the Total Environment.*
- Maria Izquierdo, X. Q. (u.d.). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: an overview. *British Geological Survey.*
- Marlet, C. (2018). Availability of raw materials from secondary resources: a key aspect of circular economy. *Eurogypsum.*
- Messo, G. (2017). Ammonium Sulfate. *GEA Messo.*
- Miljødirektoratet. (2016). Regulering av forurensning fra skipsverft etter kapittel 29 i forurensningsforskriften: Miljødirektoratets veileder til fylkesmannen. Miljødirektoratet.
- MoIndustripark. (2012). <http://www.mip.no/2012/pioner-innenfor-gjenvinning/>. Hentet fra Mo Industripark: www.mip.no
- Morrow, J. E. (1929). USA Patentnr. US1871723A.
- Murakami, K. (1963). USA Patentnr. US3375066A.
- Naganoor, P. C. (2000). Extraction of Manganese from Ferro-Manganese Slag. *Processing of Fines. Processing of Fines.*
- Nies, H. T. (1923). The Extraction of Gallium from Zinc Ores.
- NIOSH. (2001). Nomination of Abrasive Blasting Agents For Chronic Inhalation Studies in Rats. *National Institute for Occupational Safety and Health.*
- NN. (2017). Kina Patentnr. CN104692436B.
- Otto, A. (1952). USA Patentnr. US2714053A.
- Paul Randell, G. L. (2016). Spent pot lining project (feasibility of an agreement based approach to clear stockpiles). *Randell Environmental Consultants.*
- Pawlek, R. P. (2018). SPL - an update. I O. Martin, *Light Metals 2018*. Springer.
- Petavratzi, D. E. (2007). Residues from aluminium dross recycling in Cement. *MinRE project.*
- Poulenc, R. (1976). US Patentnr. 3971843.
- Qatalum. (2019). www.qatalum.com. Hentet fra <https://www.qatalum.com/Media/News/Pages/Advances-at-Qatalum-for-the-recycling-of-spent-pot-lining.aspx>: www.qatalum.com
- Rama Murthy Y, K. G. (2018). Recycling of ferromanganese gas cleaning plant (GCP) sludge by novel agglomeration. *Waste Management.*
- Renny Mariam Mathew, . E. (2013). Barium Recovery From Slag Using Ultrasonication. *International Journal of Advanced Research in Mechanical and Production Engineering and Development.*
- Research, M. (2019, januar). Market Research Future. Hentet fra <https://www.marketresearchfuture.com/reports/cryolite-market-1617>
- Roberts, E. (1976). USA Patentnr. US4053375A.
- Rostock, C. (2016). Alternativ bruk av SPL. *Bergfald Miljørådgivere.*
- Roth, D. J. (2011). The approach to zero waste from smelter and secondary dross. *Materials Science Forum*, ss. ISSN: 1662-9752, Vol. 693, pp 24-32.
- Ruihua, S. (2007). A feasibility study of recycling of manganese furnace dust. *University of Wollongong.*
- S M Perez-Moreno, M. J. (2015). CO2 sequestration by indirect carbonation of artificial gypsum generated in the manufacture of titanium dioxide pigments. *Chemical Engineering Journal.*
- S.Gaal, M. T. (2010). RECYCLING OF WASTE MATERIALS FROM THE PRODUCTION OF FeMn AND SiMn. *The Twelfth International Ferroalloys Congress Sustainable Future.*
- Schéele, J. v. (2004). OXYFINESTM TECHNOLOGY FOR THE RE-MELTING OF FINES, DUST AND SLUDGE. *Tenth International Ferroalloys Congress;*
- Sedo, I. J. (2014). DROSS DUST PROCESSING. *European Scientific Journal.*
- Shen, R. (2005). Characterisation of Manganese Furnace Dust and Zinc Balance in Production of Manganese Alloys. *ISIJ International.*
- Shi, Z. (2012). Recovery of carbon and cryolite from spent pot lining of aluminum reduction cells by chemical leaching. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.*
- Shukla, P. M. (2015). Recovery of barium sulphate from brine sludge. *Indian journal of environmental protection.*
- Skogesal et al, M. (2016). Fremtidige mengder uorganisk farlig avfall. *Mepex.*
- SmithersApex. (2016). The Future of Gypsum: Market Forecasts to 2026. *SmithersApex.*
- Snodgrass, J. (1983). USA Patentnr. US4444740A.
- Soma, M. H. (2018). Behandlingsløsninger for flyveaske. *Norsk Energi.*
- Stenberg, G. (2016). Salt Recovery from Waste to Energy Incineration Fly Ash. *University of Gothenburg, Chalmers.*
- Theodore W. Richards, a. S. (1919). THE PURIFICATION OF GALLIUM BY ELECTROLYSIS, AND THE COMPRESSIBILITY AND DENSITY OF GALLIUM. *Journal of the American Chemical Society.*
- Thyholdt, P. (2018). Miljøvennlig sementproduksjon. *Heidelberg Norcem.*
- Torma, A. E. (1991). Extraction Processes for Gallium and Germanium. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.*
- USBureauofMines. (1984). The Chemistry and Technology of Gypsum: A Symposium. *American Society of Testing and Materials.*
- USGS. (2018). Gypsum. *USGS.*
- USGS, U. S. (2018). Mineral commodities: Gypsum. *USGS.*
- V. V. Kondrat'ev, E. P. (2016). Recycling of Electrolyzer Spent Carbon-Graphite Lining with Aluminum Fluoride Regeneration. *Metallurgist .*
- Vancil, D. (1966). USA Patentnr. Inventor Donald Otis Vancil.
- Veolia. (2018). www.livingcircular.veolia.com. Hentet fra <https://www.livingcircular.veolia.com/en/inspirations/plant-alsace-recycles-its-acid-effluent-how>: www.livingcircular.veolia.com
- Vladimir Blinov, T. G. (2009). PYROHYDROLYSIS OF SODIUM FLUORIDE CONTAINING SILICATE SLAG FROM SPENT POTLINING. *NTNU.*
- Vodic, P. A. (1968). USA Patentnr. US3606176A.
- Vortec. (2002). R&D for a Cyclone Melting Technology for Converting SPL to Useful Glass Fibre Products. *Vortec Corporation.*
- Walpole, A. R. (1951). THE extraction and refining of germanium and gallium.
- Whicker, C. (1963). USA Patentnr. US3106448A.
- Wilkening, S. D. (1990). Tyskland Patentnr. EP0470573A2.
- Xia, Z. (2018). Hazardous waste treatment for spent pot liner. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.*

- Yan, S. (2014). Preparation of electronic grade manganese sulfate from leaching solution of ferromanganese slag. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.
- Yu, D. &. (2015). Spent Potlining (SPL): A myriad of opportunities. Aluminium International Today.
- Yu, D. (2017). Alternative applications of SPL: Testing ideas through experiments and mathematical modelling. I Light Metals 2017. Springer.
- Øye, H. A. (2017). Discussion of Industrial Spent Pot Lining Treatment. Proceedings of 35th International ICSOBA Conference, Hamburg, Germany, 2 – 5 October, 2017. ICSOBA.
- 晏波蔡云高福君丁亮曹磊英. (2015). Kina Patentnr. CN105329952A.
- 汪守□吴元□□志□周云生. (1993). Kina Patentnr. CN1090829A.

NOTER

- 1 www.watershedmaterials.com/blog/2015/3/31/geopolymer-concrete-egyptian-pyramids-and-a-new-way-forward-for-sustainable-masonry
- 2 www.911metallurgist.com/processing-salt-slugs-aluminum-dross-furnace/
- 3 www.yara.com/corporate-releases/veolia-and-yara-partner-to-propel-european-circular-economy/
- 4 www.ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- 5 www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf
- 6 www.nytimes.com/2010/10/05/business/global/05recycle.html
- 7 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 8 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 9 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 10 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 11 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 12 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 13 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 14 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 15 www.miljodirektoratet.no/no/Nyheter/Nyheter/2018/Oktober-2018/EU-lader-om-til-blyfri-ammunisjon/
- 16 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 17 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 18 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 19 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 20 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 21 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 22 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 23 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 24 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere. Indeksert med basis i 1998-S.
- 25 www.smithersapex.com/news/2018/may/four-key-gypsum-market-trends Illustrasjon Bergfald Miljørådgivere.
- 26 www.gyproc.no
- 27 norgips.no
- 28 www.wconline.com/articles/90012-wallboard-recycling-program-helps-reduce-job-site-waste
- 29 www.nggroup.no/presserom/produksjonen-i-full-gang-for-gjenvinning-av-gips/
- 30 www.h-avis.no/naringsliv/blir-gulv-i-euroland/s/2-2.921-1.1699367
- 31 www.greenbuildermedia.com/buildingscience/hardwood-floors-over-radiant-flooring-risks-reality-and-alternatives
- 32 www.venatorcorp.com/investor-relations/events-and-presentations/financial-events
- 33 www.aramet.com/en/our-activities/extracting-generating-value/other-metals/our-activity
- 34 www.pri.org/stories/2014-07-10/environmental-impact-alberta-tar-sands-horrible-expert-says-photos
- 35 www.fluorsid.com/sulphuricacid.aspx
- 36 www.slideshare.net/SymposiumEvents/broken-hill-prospecting-asxbl-ris2014-broken-hill-investor-presentation
- 37 aai.solutions/news/crude-oil-is-getting-more-sour-are-your-h2s-analyzers-ready/
- 38 www.icis.com/explore/resources/news/2018/07/12/10240699/chemical-profile-asia-titanium-dioxide/?redirect=english
- 39 AMetek, brosjyre. Titanium Dioxide - Sulfate Process
- 40 www.sustain-ed.org/pages/materials/tiox_detail.html
- 41 (USA Patentnr. US3375066A, 1963)
- 42 www.lareleve.qc.ca/2012/05/21/projet-dune-trentaine-de-millions-de-dollars-pour-kronos-a-vareennes/
- 43 www.wikimapia.org/3823854/A-hill-of-phosphogypsum
- 44 Rosemary Greaves, Imperial College London. www.slideplayer.com/slide/9288377/
- 45 www.iskweb.co.jp/eng/products/process.html
- 46 www.avertana.com/technical-details/
- 47 www.miningreview.com/nyanza-light-metals-plant-to-provide-titanium-dioxide-pigment-to-africa/
- 48 www.e24.no/boers-og-finans/nel-asa/nel-og-yara-inngaar-samarbeid-skall-utvikle-groent-gjoedsel/24518117
- 49 Se også kapittel om jernsulfat
- 50 Kronos patent: (USA Patentnr. US5298169A, 1992)
- 51 www.naturpress.no/2017/09/06/nasjonalt-senter-for-sirkulaerokonomi-under-oppseiling-i-fredrikstad/
- 52 www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/news/business-inputs/article/2018/12/18/micronutrients-see-large-market
- 53 www.icis.com/explore/resources/news/2005/12/02/517817/chemical-profile-ferrous-sulfate/
- 54 www.process-worldwide.com/huntsman-completes-iron-sulfate-plant-in-scarlino-italy-a-456476/
- 55 <https://www.nrk.no/ostfold/oljetrobbe-for-kronos-titan-1.4191567>
- 56 www.hydro.com/no/hydro-i-norge/pressesenter/Nyheter/2010/Hydro-vil-bygge-resirkuleringsanlegg-pa-Karmoy/
- 57 www.venatorcorp.com/products-and-applications/products/ferrous-sulfate-heptahydrate
- 58 (Gázquez M. J., 2014)
- 59 www.indiamart.com/proddetail/ferrous-sulphate-2816664973.html
- 60 www.ewingirrigation.com/30-iron-sulfate-soluble-fertilizer.html
- 61 www.boutiquepro.ghlinc.com/iron-sulphate-21-fe-qc-corporation-227kg
- 62 www.crowntech.com/ferrous-sulfate-products/
- 63 www.mistralie.co.uk/products/ferrous-sulphate-of-iron
- 64 www.chinahao.com/product/42419955586/
- 65 www.qatalum.com/Media/News/Pages/Advances-at-Qatalum-for-the-recycling-of-spent-pot-lining.aspx
- 66 www.technavio.com/report/global-aluminum-fluoride-market-analysis-share-2018?utm_source=t10&utm_medium=bw_wk50&utm_campaign=businesswire
- 67 www.alufluoride.com/
- 68 Se kapittel om gips.
- 69 www.ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- 70 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere

- 71 www.noralf3.com/contact/
- 72 [www.jernkontoret.se/en/the-steel-industry/production-utilisation-recycling/steel-production-residues/](http://www.jernkontoret.se/en/the-steel-industry/production-utilisation-recycling/steel-production-residues/crm_substitution_online_report)
- 73 crm_substitution_online_report
- 74 www.issuu.com/quartzbusinessmedia/docs/the_safety_guide_2018__ait_/51
- 75 www.hydro.com/en/about-aluminium/Aluminium-life-cycle/Primary-production/
- 76 www.oregonlive.com/gresham/index.ssf/2011/04/cleaned-up_reynolds_metals_sit.html
- 77 www.tu.no/artikler/hydro-legger-ned-i-kurri-kurri/244229
- 78 Spent Pot Lining Insolubilisation Technology.
- 79 www.slideheaven.com/light-metals-1993-advances-in-aluminum-production.html
- 80 www.tetronics.com/our-solutions/hazardous-material-treatment/spent-potliner/
- 81 www.hydro.com/en/press-room/Archive/2013/From-waste-to-resource/
- 82 www.rockwool.no/verdt-a-vite/moss/enova-stoetter-rockwools-pilotprosjekt-i-moss/
- 83 www.docplayer.me/19165210-Spl-behandling-pa-elkem-bjolvefossen-presentasjon-10-desember-2008.html
- 84 www.ultromex.com/
- 85 www.weston.com.au/
- 86 www.regainmaterials.com/
- 87 www.norskeutslipp.no/no/Diverse/Virksomhet/?CompanyID=5125
- 88 Bilder: Tertiary Minerals, nettside.
- 89 www.bergbaufolgen.de/bibliographie/37-treffen/
- 90 www.slideplayer.com/slide/12229995/
- 91 bspthermal.com/productlines/roastingreduction.html
- 92 (Mann, 2017) SPL reprocessing
- 93 www.aluminiuminsider.com/abx-subsidiarys-aluminum-fluoride-technology-to-be-licensed-globally/
- 94 www.riotinto.com/aluminium-83.aspx
- 95 (Øye, 2017)
- 96 (USA Patentnr. US6596252B2, 1999)
- 97 (VortecCorporation)
- 98 www.outotec.com/products/smeltting-and-converting/ausmelt-tsl-furnace/
- 99 www.alufluoride.com/
- 100 www.chenco.de/chemical-plants/inorganic-fluorochemicals/na3alf6/
- 101 www.chenco.de/fileadmin/chenco/chem_plants/klick_fb.jpg
- 102 www.aftenposten.no/norge/i/MnxyK/Sjefer-domt-for-Eras-utslipp
- 103 www.azr.com/
- 104 www.befesa.com/web/en/
- 105 www.ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/content/iron-and-manganese-oxides-wastes-valuable-metal-alloys-using-novel-carbon-sources-materials
- 106 www.eramet.no/produkt-og-prosess/miljo-og-verdiskaping/
- 107 www.ferroglobe.com/about-ferroglobe/research-development-and-innovation/
- 108 www.strategic-metal.typepad.com/strategic-metal-report/2013/01/by-product-metals-the-aluminum-gallium-relationship-pt-i.html
- 109 www.ntnutechzone.no/en/2016/09/recycling-of-aluminium-using-salt/
- 110 (USA Patentnr. US6053959A, 1997)
- 111 www.ks-entsorgung.com/en/geschaefsfelder/rekal/
- 112 www.ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- 113 Bergfald, proprietære data aggregert over 30 års arbeid med global fosfatindustri.
- 114 www.wrcplc.co.uk/ps-biomass-assessment-classification
- 115 www.fec-energy.co.uk/news/your-biomass-boiler-ash-resource-or-waste
- 116 Bergfald Miljørådgivere. Bilder av prøver innhentet i f m tidligere oppdrag.
- 117 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 118 (J.Sancho, 2015)
- 119 Datagrunnlag: USGS. Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 120 www.mcgroup.co.uk/researches/gallium Illustrasjon: Bergfald Miljørådgivere
- 121 Sun Min, State Laboratory for high aluminium coal, China. www.slideplayer.com/slide/10884301/
- 122 Brosjyre fra K+S Entsorgung, «Complete solutions for the Secondary Aluminum Industry».
- 123 Alle data: USGS. Illustrasjon; Bergfald.
- 124 Alle data: USGS. Illustrasjon; Bergfald.
- 125 www.oegrey.no/
- 126 Basiskarakterisering, ubrukt Star Grit blåsesand, 2017.
- 127 www.biltema.no/kundeservice/produktinformasjon/tilbakekalling/tilbakekalling-blaesand-17-022-og-17-294/
- 128 www.metalsupply.no/article/view/140105/kontrollerer_skipsverft_over_hele_landet?ref=newsletter
- 129 Joni Lukkaroinen, personlig meddelse.
- 130 www.aftenposten.no/norge/i/weEbM/Dumpet-miljogift-i-naturen
- 131 www.ragnsells.no/kildesortering/farlig-avfall/blaasesand/
- 132 www.norskgjenvinning.no/tjenester/avfallstyper/farlig-avfall/blaasesand/
- 133 www.kleenindustrialservices.com/spent-abrasive-recycling.html
- 134 www.youtube.com/watch?v=03MJQfrKI8
- 135 www.fosennaturvernforening.blogspot.com/2016/09/opprydding-av-grunnforurensning-pa.html
- 136 www.washingtonmills.com/products/recycling/
- 137 www.munkebo.com/abrasivecleaning2.htm