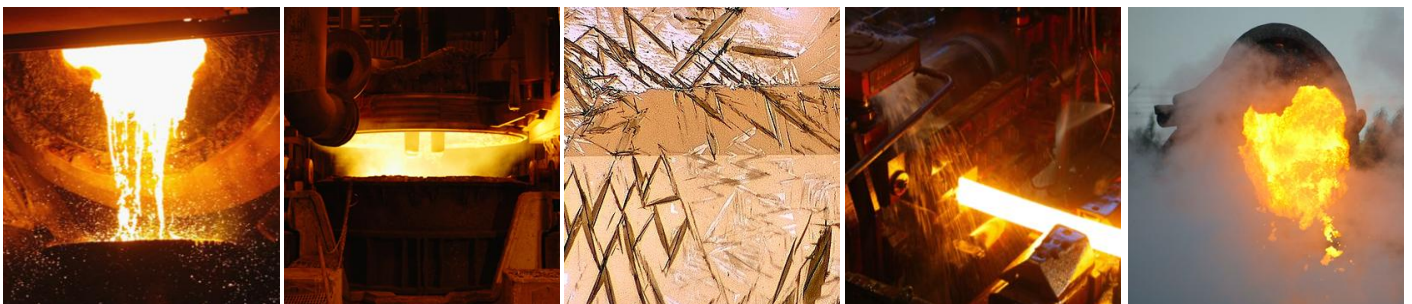


Konstruktionsprodukter baserade på slagg – Construction materials based on slag

TEKNISK SLUTRAPPORT

Rapport av Lale Andreas, Bo Björkman, Fredrik Engström,
Silvia Diener, Qixing Yang Luleå tekniska universitet, LTU
samt kommittémedlemmarna

Kommitté 55012 publicerad 2012-04-25



Sammanfattning

Slagg genereras vid stålproduktion för att ge stålet den kvaliteten man vill ha. Slaggens sammansättning, funktion och mängd beror på vilka råvaror som används, i vilken process slaggen produceras, och vilken typ av järn eller stål som tillverkas (Jernkontoret, 2009). Även kylning, lagring och annan hantering påverkar slaggens egenskaper. Detta leder till att slagger är mycket komplexa material med egenskaper som till stor del beror på mineralsammansättningen.

Slagger är ofta mycket beständiga och vissa av dem har cementliknande egenskaper. Detta gör att de kan användas i olika konstruktioner, t ex i vägar eller bundna ytor, dräneringslager, som stabilisering av mark, fyllnadsmaterial i betong eller i barriärer av olika slag. Emellertid så finns för en del av slaggerna en risk för utlakning av metaller och de tekniska möjligheterna att utnyttja slaggernas unika egenskaper har inte utretts fullständigt.

Det övergripande målet för detta projekt var att ta fram den kunskap som gör det möjligt att baserat på slagg från ståltillverkning utveckla nya produkter som säkerställer avsättningsmöjligheter och ger ett mervärde till de produkter som marknadsförs.

Det tvååriga projektet är en fortsättning på det arbete som pågått under många år i MiMeR och den förra etappen av Stålforskningsprogrammet, projekt 55011. Arbetet har bedrivits genom ett tätt samarbete mellan Luleå tekniska universitet (Processmetallurgi och Avfallsteknik) och följande företag:

- Uddeholms AB
- Outokumpu Stainless AB
- Höganäs Sweden AB
- Ovako Hofors AB
- SSAB Merox AB
- SSAB EMEA AB
- AB Sandvik Materials Technology
- Ovako Bar AB
- Ragn-Sells AB
- Harsco Metals Sweden AB
- Erasteel Kloster AB

Forskningen har genomförts genom en kombination av teoretiska beräkningar och modelleringar, laboratorieförsök, samt verifiering av resultat och slutsatser i pilot- och fullskala.

I projektet Konstruktionsprodukter baserade på slagg har de svenska stålproducenterna samarbetat med målet att öka användningen av industrins slagger, internt och externt. Två av projektets huvudleverabler är de rapporter som dels avser rekommendationer för hur stålindustrins slagger kan användas för sluttäckning av deponier samt den rapport som ger rekommendationer för hantering och modifiering av slagger.

”Rekommendationer för användning av slagg i deponikonstruktioner - Krav, lämplighet, materialhantering och utläggning” (Andreas et al., 2012) är ett resultat av forskningsresultat i labbskala, företagets erfarenheter och inte minst ett fyraårigt fullskaleförsök med deponitäckning med slagger från Uddeholms på den kommunala avfallsdeponin Holkemossen i Hagfors. ”Rekommendationer för hantering och modifiering av slagg” (Engström et al, 2012) sammanfattar den samlade erfarenheten och kunskapen beträffande hur hantering och modifiering av slagg påverkar egenskaperna.

Resultaten från forskningen visar bl.a.:

- Sambandet mellan en slaggs kemiska och fysikaliska egenskaper och dess mineralsammansättning,
- Hur vissa egenskaper, som t.ex. utlakningen av krom från ljusbågsugnsagg och skänkslaggens härdningsegenskaper (både hastighet och slutliga hållfasthet), kan påverkas genom modifieringar av slaggen och dess mineralogiska sammansättning.
- Möjligheten att använda slagger med cementbindande egenskaper i tillämpningar som exempelvis bindemedel i agglomerat där slagg kan ersätta cement eller för konstruktion av tätskikt i en deponitäckning.

Följande slutsatser kan dras från projektarbetet:

- Projektet har gett ökade och fördjupade kunskaper, som både direkt och på längre sikt kommer att ligga till grund för större och nya möjligheter till avsättning för slagger från ståltillverkningen i Sverige.
- De positiva resultaten i det här projektet har åstadkommit genom undersökningar på slaggerna i den form de produceras utan eller med bara mindre anpassning av sammansättning eller bildningsförhållanden. Därför torde det finnas en stor potential att öka användbarheten genom att anpassa sammansättning och bildningsförhållanden i viss utsträckning, utan att äventyra kvaliteten på det stål som framställs.
- Kombinationen av teoretiska beräkningar, labbförsök och verifiering av resultat och slutsatser i pilot- och fullskala har visat sig vara ett framgångsrikt arbetssätt för att uppnå en större förståelse för de enskilda mineralernas bidrag till slaggernas egenskaper och beteende under verkliga förhållanden.

Forskningsresultaten kommer att leda till att slagg och kombinationer av olika slaggtyp, samt av slagg med andra material, i betydligt ökad utsträckning finner tillämpning inom olika områden, t ex som ballast i asfalt, tätskikt vid sluttäckning av deponier och bindemedel vid agglomerering. Den ökande användningen av slagger från ståltillverkningen kommer att resultera i både minskad deponering och minskad användning av jungfruliga material. Detta bidrar till utvecklingen av hållbar tillväxt och till uppfyllelsen av Sveriges nationella miljömål, ”God bebyggd miljö”.

Summary

Slag is used in steelmaking as an aid to produce steel with predetermined properties. The purpose of the slag and thereby its composition and amount differs depending on the raw materials used, the process used and the steel quality produced (Jernkontoret, 2009), but also the cooling of the slag, storing and the slag handling in general influences its properties. Therefore slags are very complex materials, which possess different properties which to a large extent depend on the mineralogical composition.

Slags are usually very durable and some of the slags also have hydraulic properties. This makes it advantageous to use slags in a number of applications as for road construction, for soil stabilization, as filler or binder in concrete, in construction of different type of barriers and in the construction of the drainage and liner layers in a landfill cover. However, there is sometimes a risk for leaching of metals from the slag in contact with water and the full technical possibilities for using slags in some of the applications given above has not been fully explored.

The overall aim of this project was to increase and find new opportunities for use of slag in different types of applications. This was to be achieved through increased basic knowledge about the mineralogical composition of the slags and how the specific minerals contribute to the properties.

The two year long project is a continuation of the research that has been conducted for many years within earlier projects like MiMeR and the previous stage of the “Steel research programme” (project 55011). The work was performed through close co-operation between the Luleå university of technology and the following steel producing companies:

- Uddeholms AB
- Outokumpu Stainless AB
- Höganäs Sweden AB
- Ovako Hofors AB
- SSAB Merox AB
- SSAB EMEA AB
- AB Sandvik Materials Technology
- Ovako Bar AB
- Ragn-Sells AB
- Harsco Metals Sweden AB
- Erasteel Kloster AB

The research comprised a combination of theoretical calculations and modelling, tests and investigations in the laboratory, and verification of results and conclusions through pilot and full scale trials.

The Swedish steel producers have cooperated within this project in order to increase the utilization of the slags from steel production both internally and externally. Two of the main deliverables of the project is the reports on recommendations for how steel slags can be used for covering landfills and the report on handling and modification of slag.

The report ”Recommendations for the use of steel slag in landfill constructions - Demands, suitability, material handling and construction” (Andreas et al., 2012) is a result of lab scale research, experiences from the involved companies and a six-year full-scale field trial of

covering the municipal landfill in Hagfors using steel slag. "Recommendations for handling and modification of slag" (Engström et al, 2012) is a summary of the experience and knowledge regarding the influence of handling and modification on slag properties.

The results from the work can be summarized as follows:

- The mineralogical composition influences the properties of the slag to a large extent.
- Properties as the leaching of chromium from a slag as well as the hydraulic properties of e.g. a ladle slag can be influenced by modification of the mineralogical composition.
- It is possible to use the slag as a binder material in cement applications, both as a raw material in the production of SAB-cement, as has been shown in an earlier project, and directly as a replacement material for cement e.g. as binder in agglomerates or in the construction of a liner layer used in the cover of a landfill.

The following conclusions can be drawn from the project:

- The project has resulted in larger and deeper knowledge, which both now and later will give increased and new possibilities to find use of slags from Swedish steel industry.
- The very promising results obtained in this study by using the slags just as they are, indicates that there exist a large potential for improving the properties of slag as products in different applications if some adjustments of the composition and production conditions can be made, without jeopardizing the steel quality.
- The used combination of theoretical calculations, experiments in lab scale and verification in larger scale has proven to be an efficient way forward to gain a deeper understanding of how the individual minerals contribute to the slag properties and there behavior in a final product.

The obtained results will increase the possibility to use individual slags, combinations of different slags or combinations of slags with other materials in applications as road construction, liner layers in landfill cover and as replacement for cement in e.g. agglomerates. This will result in a decreased need for landfilling of slag as well as a decreased use of virgin materials. The project will thus contribute to a more sustainable steel production as well as to the fulfillment of the national environmental goal "God bebyggd miljö".

Keywords:

Ferrous slag, steel, construction material, mineral composition, leaching, characterization

Nyckelord:

Metallurgisk slagg, stål, konstruktionsmaterial, mineralsammansättning, karakterisering, utlakning.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
1.1	Industriell och vetenskaplig problemställning	1
1.2	State of the art	2
2	MÅL	4
3	MATERIAL OCH METOD	6
4	RESULTAT: EXPERIMENT OCH FÖRSÖK I LABORATORIESKALA	10
4.1	Framställning och undersökning av syntetiska mineraler	10
4.2	Framställning av fasta lösningar av wustit-typ	11
4.3	Inverkan av järnoxid på ljusbågsugns- och skänkslaggens kromlakningsegenskaper	11
4.4	Kromfördelning i slaggmineral	12
4.5	Förekomstformer, löslighet och utlakning av molybden hos molybdenrik slagg	13
4.6	Mekaniska egenskaper av olika slaggar och slaggblandningar	15
4.7	Mineralogins påverkan på slaggers mekaniska egenskaper	16
4.8	Långtidsegenskaper hos ljusbågsugns- och skänkslaggar vid användning i en deponisluttäckning – Åldringsförsök i labbskala	17
4.9	Test av bindningsegenskaper hos skänkslagg från Höganäs Halmstad inför användning som komponent i en tätskiktblandning	19
4.10	Lakningsegenskaper hos AOD- och LB-slagg vid Outokumpu Stainless i Avesta	20
4.11	Inledande tester av bindande egenskaper hos AOD-slagg med hög halt Al_2O_3 , Outokumpu Stainless Avesta	21
4.12	Undersökning av skänkslaggers cementbindande egenskaper	22
5	RESULTAT: FÖRSÖK I PILOT- OCH FULLSKALA	25
5.1	Användning av slagg från Uddeholms AB i en deponisluttäckning – Fältförsök Hagfors	25
5.2	Undersökning av slaggytor med LB- och skänkslagg från Höganäs Halmstad	27
5.3	Byggnation av försöksytor med slagg, Sandvik	27
5.4	Provväg med olika fraktioner hyttsten	28
5.5	Observationer angående hantering av ovattnad skänkslagg vid Ovako Hofors	29
6	SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER	31
7	FÖRSLAG PÅ FORTSATT FORSKNING OCH IMPLEMENTERINGSINSATSER	34
8	REFERENSER	36
9	BILAGOR	37

1 INLEDNING

Stål låter sig inte tillverkas utan slagg med idag kända metoder och mängden slagg följer i princip mängden producerat stål. Slagg är den aktiva komponenten i de metallurgiska processerna som ger stålet önskade egenskaper. Sammansättning, funktion och mängd beror på vilka råvaror som används, i vilken process slaggen används, och vilken typ av järn eller stål som tillverkas. Noggranna beräkningsmodeller styr vilka slaggbildare som ska tillsättas när och i vilka mängder. Gemensamt för samtliga slaggtypen är att dessa, genom kemiska jämvikter, används för att skapa den önskade stålqualiteten. Inom den skrotbaserade stålindustrin fungerar slaggen också som ett isolerande skikt på stålsmältan i smältugnen, vilket skyddar smältan från kontakt med luft och minskar energiförluster.

Slagger från järn- och ståltillverkning är komplexa material med flera goda, specifika kemiska och tekniska egenskaper. Dessa egenskaper kan utnyttjas i många olika typer av applikationer, som t.ex. ballastmaterial i väg- och anläggningsbyggande och som cementliknande bindemedel. Totalt produceras idag knappt 1.4 miljoner ton slagg under 2010 i Sverige. Ungefär 80 % används idag i olika applikationer både internt inom stålverken och externt inom flera olika områden.

Den externa användningen av slagg i Sverige är fortfarande lägre än i andra länder både inom EU och internationellt, där man fokuserar mer på produkttegenskaper och minskad användning av jungfruliga material. Detta kan hänföras både till att det i Sverige råder god tillgång på bra bergmaterial, till att kostnader för deponering är låga och till de svenska myndigheternas krav för slagganvändning, som har fokuserat mera på innehåll av bl.a. metaller än på vad som faktiskt når recipienten och påverkar miljön.

Myndigheternas fokusering på och oro för metallinnehållet i slaggen har under projektiden bemötts genom att samtliga företag har sorterat sina restprodukter i biprodukter och avfall. De biprodukter som identifierats har registrerats i REACH, medan de som inte klarar biprodukttestet finns kvar som avfall och inom ramen för avfallslagstiftningen. Arbetet har resulterat i att cirka 75% av de i Sverige under 2010 producerade slaggen har registrerats i REACH. För att göra en registrering krävs ett mycket omfattande arbete för att säkerställa miljö- och hälsoaspekterna för respektive material och för de applikationer man avser att använda det inom. Ingen slaggtyp har klassificerats som miljö- eller hälsofarlig. Den ökade kunskapen som under senare år byggts upp beträffande slaggenas tekniska och miljömässiga egenskaper samt den produktregistrering som genomförts har redan nu medfört att slagg används i betydande större utsträckning än för ett antal år sedan. Fortfarande används dock slagg, framförallt från stålframställning, långt mindre än dess potential.

Det finns en potential för utveckling av nya användningsområden och produkter från slagg, som ger ett mervärde för industrin och samhället. Projektet syftade till att ge ökade grundläggande kunskaper om slaggen och deras mineralsammansättning för att skapa större möjligheter till avsättning inom olika användningsområden och minska slaggmängden som deponeras.

1.1 Industriell och vetenskaplig problemställning

Slagg används idag inte i den omfattning som det skulle kunna vara möjligt vilket leder till negativa effekter både kostnadsmässigt och för miljön. En ökad användning begränsas idag framför allt av bla följande problem:

- Utlakning av potentiellt miljöstörande eller hälsovådliga ämnen som t ex krom, molybden och fluor från vissa slaggtyper.
- Slaggens värdefulla egenskaper, t ex dess cementbindande förmåga, förstörs i slagghantering (t ex vattning) och kan därmed inte utnyttjas.
- Vissa slagger har egenskaper, som gör att de inte lämpar sig för användning, t.ex. är instabila och sönderfaller till pulver under avkyllning eller sväller efter kontakt med vatten.

Den vetenskapliga utmaningen ligger främst inom förståelsen av de bakomliggande processerna som bestämmer slaggernas egenskaper som t ex slaggmineralogin och dess förändringar i samband med processmodifieringar och slaggåldring. Slaggmineralogin påverkar metallers bindingsformer och därmed utlakningsbeteende, vilket betyder att man måste förstå sammanhangen och mekanismer om man vill påverka egenskaperna. Det har därför ansetts viktigt att öka kunskapen om hur slagg kan modifieras för att bättre motsvara de krav som en viss användning ställer.

1.2 State of the art

Slagg från järn- och stålframställning har i många avseenden produktenskaper som gör dem väl lämpade att använda i ett flertal applikationer, bla för konstruktionsändamål. Masugnsslagg används till nära 100% bla för vägbyggnation, som råvara för cementframställning eller som ett cementliknande bindemedel. Begränsande för användning av slagg kan dels vara svällande och sönderfallande egenskaper eller utlakning av metaller. Metoder för att undvika eller åtgärda svällande och sönderfallande egenskaper hos slagger är väl beprövade industriellt. Slagg som klarar utlakningskrav och som ej är sönderfallande eller svällande används redan idag till stor del för konstruktionsändamål.

I Sverige har fokus i större utsträckning än för andra länder legat på innehållet av metaller och eventuell utlakning av dessa. Detta är en av anledningarna till att slagg från stålframställning använts i mindre utsträckning än i andra länder. För slagger som innehåller krom är eventuell utlakning av krom en fråga som alltid måste belysas. Möjligheterna att stabilisera krom i faser eller strukturer med låg utlakning eller låg tillgänglighet är därför alltid intressant. Det är väl känt att spineller har låg löslighet och samtidigt förmåga att i strukturen binda krom. Detta ledde i Tyskland till att den sk spinellfaktorn utvecklades, med syfte att erhålla ett mått för hur en maximering av mängden spinellfaser kan fås.

Stabilisering av slagg med syfte att undvika sönderfall och utlakning har bl a testats genom tillsatser och snabbkyllning, med varierande resultat främst avseende utlakning. Tidigare resultat från framförallt forskning utförd i samarbete mellan svensk stålindustri och Luleå tekniska universitet har exempelvis visat att spinellfaktorn inte är tillämpbar på alla slagger. Under stelning av en slagg kan ett flertal faser bildas med möjlighet att lösa in krom. Dessa minerals egenskaper har stor inverkan på utlakningen av metaller från slaggen. Utlakning av metaller från de enskilda mineralen har inte tidigare studerats annat än i mycket begränsad utsträckning.

Granulerad masugnsslagg har sedan lång tid använts som ett cementliknande bindemedel. Det finns framförallt i andra länder en betydande kunskap beträffande möjligheter och begränsningar för användning av masugnsslagg i cementtillämpningar. Slagg från stålframställning innehåller som regel till del mineral med potential att ge cementbindande egenskaper. Slagg med tillräckligt lågt föroreningsinnehåll från LD-processer används på

många ställen i världen som en råvara för framställning av cement. För andra slaggar från stålframställning är kunskapen och erfarenheterna begränsade beträffande möjligheter att använda slaggerna i cementtillämpningar.

Projektet plats inom Stålforskningsprogrammet:

Ett av ämnesområdena inom Stålforskningsprogrammet är ”Utveckling för hållbar tillväxt”. Projektet ”Konstruktionsprodukter baserade på slagg” bidrar till målet ” Hållbar tillväxt” genom att ge förutsättningar för ökat nyttiggörande av slagg och därmed minska förbrukningen av ändliga resurser.

2 MÅL

Det övergripande målet för projektet var att ta fram kunskap som skulle göra det möjligt att baserat på slagg från ståltillverkning utveckla nya produkter för att säkerställa avsättningsmöjligheterna och ge ett mervärde till de produkter som marknadsförs. Det ursprungliga, kvantitativa målet var att långsiktigt minska mängden årligen deponerad slagg med 200 kton. Under projektiden har, förutom inom detta projekt, forsknings- och utvecklingsarbetet fortgått på många fronter, både inom respektive företag och inom t ex det Mistrafinansierade ”Stålkretsloppet”. Dessutom har cirka 75 % av den producerade slaggmängden registrerats i REACH (se ovan). Detta sammantaget har resulterat i att användningen av slaggerna successivt har ökat och den deponerade mängden minskat. Intresset att utveckla användningen i anläggningsapplikationer har dock inte avtagit, eftersom många produkter från samma ursprungsmaterial skapar säkrad efterfrågan och avsättning.

Huvudfokus i projektet var slaggernas mineralogiska sammansättning och förändringar av denna i samband med antingen justeringar i tillverkningsprocessen eller åldring. Mineralogins inverkan på slaggernas utlakningsbeteende studerades liksom effekter på slaggernas bindande egenskaper och mekaniska stabilitet.

Projektmålet delades upp i följande delmål:

1. Undersöka hur mineralogin i slagg, beroende av sammansättning såväl som hantering, modifiering, m m av slagg påverkar och styr utlakningen av krom i slagg från ståltillverkning med syfte att genom mineralogisk modifiering förhindra kromlakning.
2. Erhålla en förståelse för hur molybden (Mo) föreligger i slagg samt huruvida en avsiktlig utlakning av Mo från ytorna ger en tillräckligt låg Mo utlakning efter behandling.
3. Kartlägga kunskapsläget beträffande hur mineralogin i slagg påverkar slaggers mekaniska egenskaper, samt om behov finns, verifierande försök i mindre omfattning.
4. Bestämma i vilken utsträckning olika sammansättning och därmed mineralogin, påverkar möjligheterna att använda slagger som material vid täckning av deponier samt bestämma långtidsegenskaperna under förhållanden som motsvarar användning i deponitäckning.
5. Visa på exempel hur minerals hydrauliska egenskaper kan användas genom kombination av olika slagger där de enskilda slaggerna var för sig inte har tillräckligt goda egenskaper.
6. Verifiera resultaten i storskaliga försök.

Forskningsresultaten förväntades leda till att slagg och kombinationer av olika slaggtyper, samt av slagg med andra material, i ökad utsträckning finner tillämpning som t ex ballast i asfalt, i tätskikt vid sluttäckning av deponier eller som bindemedel vid agglomering. Utökad kunskap beträffande hur enskilda mineral bidrar till slaggens egenskaper förväntades ge stålverken förbättrade möjligheter att:

- genomföra lämplig modifiering av slaggens sammansättning, i eller utanför ugn
- anpassa slagghanteringen, så att önskad mineralogisk sammansättning och därmed önskade egenskaper erhålls
- hitta de kombinationer av olika material som gör att produkten erhåller önskvärda egenskaper och

- förstå hur slagg respektive slaggprodukter beter sig/reagerar i olika användningsmiljöer

Det av VINNOVA finansierade stålforskningsprogrammet är inriktat på fyra ämnesområden varav två berör föreliggande projekt, Utveckling för hållbar processteknik och Förbättrad processteknik, genom att bidra till minskade utsläpp och materialåtgång samt renare bearbetning.

Projektets planerade och genererade resultatmål är listade i Tabell 1 nedan. Se vidare Bilagorna 2 och 3

Tabell 1 Projektets planerade och uppnådda resultatmål

Planering	Resultat
Dokument: Rekommendationer för hantering och modifiering av slagg	Engström, F., Yang, Q., Björkman, B., (2012) Rekommendationer för hantering och modifiering av slagg. Intern rapport.
Dokument: Rekommendationer för användning av slagg i deponitäckningskonstruktioner	Andreas, L., Diener, S., Lagerkvist, A. (2012) Rekommendationer för användning av slagg i deponikonstruktioner - Krav, lämplighet, materialhantering och utläggning - Exemplet Hagfors kommunala deponi.
Rapporter enl. projektdirektivet	Lägesrapporter (2010-08, 2011-08), Årsrapport (2011-01), Slutrapport (2012-03)
Examina/avhandlingar	
1 examensarbete	2 examensarbeten: Ida Strandkvist (2010), Daniel Eriksson (2010)
2 doktorsavhandlingar	3 doktorsavhandlingar: Fredrik Engström (2011), Daniel Adolfsson (2011), Silvia Diener (planerat till senare delen av 2012)
Publikationer	
> 4 konferensbidrag	7 konferensbidrag
> 4 artiklar i vetenskapliga tidskrifter	6 accepterade artiklar, alla redan publicerade, ytterligare 7 artiklar inskickade eller i manuskriptform

Resultaten som beskrivs i föreliggande rapport baseras på ett antal rapporter och artiklar som till stor del dels är företagsinterna och dels inte ännu har publicerats, se bilaga 5.

Finansieringen av projektet minskades med 10 % jämfört med ansökan, vilket innebar att målen i projektansökan modifierades, främst genom neddragningar inom delmål 2, 3 och 6.

Några av de planerade delaktiviteterna kunde av olika skäl inte genomföras under projektiden. Anledningarna har varit flera, någon uppgift bedömdes inte tillföra projektet det som avsetts, en omprioritering var nödvändig då projektet inte erhöll de medel som söktes och någon deluppgift kunde inte genomföras beroende på tekniska och personella begränsningar. Det är vår uppfattning att dessa förändringar i projektplanen endast påverkat slutresultatet marginellt.

3 MATERIAL OCH METOD

Projektet har bedrivits genom tätt samarbete mellan Luleå tekniska universitet (Processmetallurgi och Avfallsteknik) och deltagande företag.

Forskningen genomfördes genom en kombination av laboratorieförsök, teoretiska beräkningar och modelleringar samt verifiering av slutsatser och resultat i pilot- och fullskala. Tidigare påbörjade studier avseende mekanismer för utlakning av krom och molybden har fortsatt, liksom försök avseende åldring av slagg samt fullskaleförsöket med användning av slagg i deponitäckning. Fullskaleförsöken fokuserades på ett begränsat antal applikationsområden, nämligen användningar där vissa slaggers cementbindande egenskaper utnyttjas, t ex i hårdgjorda ytor, vid deponitäckning och som bindemedel i agglomerat.

Från varje stålverk och från varje separat processteg i ståltillverkningen uppkommer olika typer av slagg, som har unika egenskaper vilka kan utnyttjas på olika sätt. Dessutom innehåller de flesta slagger ungefär samma typer av mineraler, men i olika blandningar och i olika relativa mängder. Det finns alltså både stora likheter och stora skillnader mellan de slaggtyper som produceras.

I Tabell 2 ges en översikt över vilka slaggtyper som produceras inom svensk stålindustri och vilka slagger som undersökts inom projektet och med vilken typ av undersökning

Tabell 2 Slaggtyper inom svensk stålindustri, processtyp där de uppstår och undersökningar i projektet

Slaggtyp	Uppkomst/ Process	Plats/företag	Labförsök	Fältförsök
Masugnsslagg				
- Luftkyld		SSAB EMEA SSAB Merox	x	x [#]
- Vattengranulerad		SSAB Merox		
LD-slagg	LD-konverter	SSAB Merox SSAB EMEA	x	
Ljusbågsugnsslagg	Ljusbågsugn			
Från framställning av rostfritt stål		Sandvik Outokumpu	x [*] x	
Från framställning av kolstål/låglegerat stål		Ovako Bar Ovako Hofors Uddeholm Höganäs Scana Steel	x x x	x
AOD-slagg	AOD-konverter	Sandvik Outokumpu	x [*] x	x
Skänkslagg	Raffinering av stål/Skänkugn	Uddeholms Höganäs SSAB Merox SSAB EMEA Outokumpu Scandust Sandvik Ovako Bar Ovako Hofors	x x x x x x [*] x	x
Tunnelugnsslagg		Höganäs		

... uppföljning av tidigare fältförsök; * ... slaggen består av en blandning av slagg från LB och AOD

Slagger är mycket komplexa material och många av deras egenskaper beror på den mineralogiska sammansättningen. För att kunna förstå de olika slaggernas egenskaper och hur de uppkommer, behöver man först lära känna de enskilda mineral som bygger upp slaggerna. Som komplettering till de slaggmineral som framställdes under föregående projekt 55011 syntetiserades fler mineral, som tidigare erfarenhet och termodynamiska beräkningar visat tillhör de vanligast förekommande i slagg. Mineralens egenskaper studerades och de enskilda mineralens specifika egenskaper ställdes i relation till slaggernas egenskaper som helhet. Denna kunskap är basen till de föreslagna modifieringarna av slaggernas mineral-sammansättning för att uppnå önskade egenskaper.

Kunskap om mineralens löslighet är en förutsättning för att kunna uppskatta utlakningen av bl. a. metaller från slaggen (t.ex. krom, molybden, m.fl.). Genom att systematiskt bestämma de enskilda mineralens upplösningshastighet vid olika pH, har lakbarheten av metaller ur vart och ett av de enskilda mineralen bestämts.

Lakbarheten av en specifik metall från en slagg beror även på till vilket mineral och på vilket sätt den är bunden. Ett antal fasta lösningar med wustitstruktur och med olika halter av MgO respektive FeO har framställts för att undersöka hur variationer i sammansättningen av metalloxiden påverkar kromlakningen. Dessutom har förekomsten av dessa faser studerats med hjälp av svepelektronmikroskopi (SEM) i ett antal slaggprover från olika charger och provtagningsställen på ett stålverk. Vidare har sex slaggprover relevanta för svensk stålindustri analyserats med SEM för att förstå i vilka mineralfaser krom kristalliserar.

För att kunna förutse och eventuellt minska molybdenutlakningen från molybdenrika slaggar, har detaljstudier med röntgendiffraktion (XRD) och SEM av molybdens förekomstform i slagg genomförts. Dessutom har utlakningen av molybden från molybdenrika slaggar studerats under naturliga förhållanden (testkolonner som placerades utomhus) för att bestämma om diffusionsstyrd utlakning kan minska den långsiktiga molybdenlakningen på ett kontrollerbart sätt. Även vissa slaggmodifieringar genomfördes för att se vilken effekt värmebehandling, ändrad slaggbasisitet eller reducerande förhållanden har på molybdenlakningen.

Olika slaggers mekaniska egenskaper har studerats både genom litteraturstudier och med experimentellt arbete i laboratoriet. Slaggblandningarna testades med blandnings-, hårdnings- och packningsegenskaper, kornstorleksfördelning, hydraulisk konduktivitet (permeabilitet) och tryckhållfasthet. För att få en bättre förståelse av sambanden mellan slaggers mekaniska egenskaper och slaggmineralogin har en litteraturstudie genomförts.

Vissa av de mineral som slaggerna är uppbyggda av reagerar med vatten, och ger upphov till cementbindning i materialet. De cementbindande egenskaperna hos flera olika slaggar har testats inom projektet med syftet att kunna använda slaggerna som råvara för framställning av SAB-cement eller direkt som ersättning för cement som bindemedel i agglomerat eller för konstruktion av tätskikt i en deponitäckning.

Mineralsammansättningen och därmed egenskaperna hos ett slaggmateriäl, som används i en konstruktion, påverkas och förändras med tiden av miljön (temperatur, fukthalt, gas-sammansättning m.m.) i den specifika konstruktionen. För att undersöka de egenskaper som gynnar användningen av slagg i tätskiktet i sluttäckningen av en deponi och ge ökade kunskaper om vilka faktorer som påverkar mineralomvandlingsprocesserna på längre sikt, har en kombination av laktester, termiska analyser, röntgendiffraktion och svepelektronmikroskopi använts. Undersökningarna gjordes på en slaggblandning efter lagring vid förhållanden som efterliknar de i en deponi under olika tidsintervall.

Förändringar av slaggernas egenskaper på längre sikt har även studerats i de provtytor för deponitäckning som byggts på en kommunal deponi i Hagfors. Detta har gjorts genom att provtagning och samma typer av undersökningar har genomförts på slaggar som använts i konstruktionen som i labbförsöken ovan, samt analyser av mängder och sammansättning av det vatten som passerar konstruktionen på deponin.

I Tabell 3 nedan är metoderna som användes i de enstaka delstudierna sammanställda. Resultaten finns sammanfattade i kapitel 4 och 5. Detaljerade rapporter till de enskilda försöken finns i bilaga 5.

Tabell 3 Sammanställning av projektets delmål och metoderna som användes i projektets delstudier

Delmål	Delstudie, metod (hänvisning till kapitel)
Undersöka hur mineralogin i slagg, beroende av sammansättning såväl som hantering- och kylning, påverkar utlakningen av krom i slagg med syfte att genom mineralogisk modifiering förhindra kromlakning.	<ul style="list-style-type: none"> • Framställning och undersökning av syntetiska mineraler och bestämning av mineralernas upplösningsförmåga vid olika pH, 4.1 • Framställning av fasta lösningar av wustit-typ, 4.2 och undersökning av kromlakningen • Inverkan av järnoxid på ljusbågsugns slaggens kromlakningsegenskaper, laktester och SEM, 4.3 • Kromfördelning i slaggmineral, 4.4 • Lakningsegenskaper hos AOD- och LB-slagg vid Outokumpu Stainless i Avesta, 4.10
Erhålla en förståelse för hur molybden (Mo) föreligger i slagg samt huruvida en avsiktlig utlakning av Mo från ytorna ger en tillräckligt låg Mo utlakning efter behandling.	<ul style="list-style-type: none"> • Framställning och undersökning av syntetiska mineraler och bestämning av mineralernas upplösningsförmåga vid olika pH, 4.1 • Fördelning av molybden som funktion av basisitet B2 (CaO/SiO₂) Fel! Hittar inte referenskälla., 4.5
Kartlägga kunskapsläget beträffande hur mineralogin i slagg påverkar slaggers mekaniska egenskaper, samt om behov finns verifierande försök i mindre omfattning.	<p>Mineralogins påverkan på slaggers mekaniska egenskaper, 4.7</p> <ul style="list-style-type: none"> • Undersökning av Mekaniska egenskaper av olika slaggar och slaggblandningar, 4.6 • Undersökning av skänkslaggers cementbindande egenskaper, 4.12
Bestämma i vilken utsträckning mineralogin påverkar möjligheterna att använda slaggar som material vid täckning av deponier samt bestämma långtidsegenskaperna under förhållanden som motsvarar användning i deponitäckning.	<ul style="list-style-type: none"> • Långtidsegenskaper hos ljusbågsugns- och skänkslagger vid användning i en deponisluttäckning – Åldringsförsök i labbskala, 4.8 • Användning av slagg från Uddeholms AB i en deponisluttäckning – Fältförsök Hagfors, 5.1

Delmål	Delstudie, metod (hänvisning till kapitel)
<p>Visa på exempel hur cementliknande egenskaper av enskilda mineral kan användas genom kombination av olika slaggar där de enskilda slaggerna var för sig inte har tillräckligt goda egenskaper.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Undersökning av skänkslaggers cementbindande egenskaper, 4.12 • Test av bindningsegenskaper hos skänkslagg från Höganäs Halmstad inför användning som komponent i en tätskiktsblandning, 4.9 • Inledande tester av bindande egenskaper hos AOD-slagg med hög halt Al_2O_3, Outokumpu Stainless Avesta, 4.11
<p>Att i storskaliga försök verifiera resultaten.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Användning av slagg från Uddeholms AB i en deponisluttäckning – Fältförsök Hagfors, 5.1 • Undersökning av slaggytor med LB- och skänkslagg från Höganäs Halmstad, 5.2 • Byggnation av försöksytor med slagg, Sandvik, 5.3 • Provväg med olika fraktioner hyttsten, 5.4 • Observationer angående hantering av ovattnad skänkungsslagg vid Ovako Hofors, 5.5

Studierna är gjorda för att inledningsvis ge grundläggande kunskaper om egenskaperna hos några av alla slaggar. Kunskaperna kommer sedan att kunna föras över till andra slaggar och olika typer av möjliga konstruktionsprodukter från dessa.

En del av resultaten från projektets forskning kan efter enklare verifieringsförsök appliceras på även andra slaggar än de här undersökta. Men eftersom skillnaderna mellan de olika slaggerna i vissa fall är stora, behöver mycket ytterligare forskning genomföras för att skapa avsättning för hela den producerade mängden. Samma typ av slagg, t.ex. LD-slagg från två olika stålverk, kan vara så olika att de behöver modifieras på olika sätt för att bli användbara.

4 RESULTAT: EXPERIMENT OCH FÖRSÖK I LABORATORIESKALA

Resultaten från experiment och försök i labbskala redovisas nedan i sammanfattad form. Forskningen är utförd dels på Ltu och dels som industriaktiviteter (se avsnitt 5). För mer detaljerade rapporter från respektive delprojekt hänvisas till bilagorna

4.1 Framställning och undersökning av syntetiska mineraler

(se bilaga 5.1)

Syfte

Under etapp 1, konstruktionsprodukter baserade på slagg (55011) framställdes sju syntetiska slaggmineral. Målet med denna studie var att bestämma hur de enskilda mineralen påverkas då pH i lakvätskan varierar och därigenom bestämma upplösningen för vart och ett av de enskilda slaggmineralen.

Genomförande

Under konstruktionsprodukter baserade på slagg 2, 55012 har denna studie kompletteras med ytterligare tre mineral för att täcka det ”surare” slaggområdet. Följande tre slaggmineral har efter utvecklad tillverkningsmetod framställts:

- | | |
|---------------------|---------------------------------|
| 1. Dikalciumsilikat | $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ |
| 2. Monticellit | CaMgSiO_4 |
| 3. Wollastonit | CaSiO_3 |

Mineralernas upplösningshastighet som funktion av pH undersöktes för samtliga tre mineral vid pH 4, pH 7 och pH 10.

Resultat

Resultaten visar för samtliga tre mineraler, att upplösningshastigheten avtar med stigande pH. Förutom en variation i upplösningshastighet som funktion av pH för de enskilda mineralerna, uppvisar de även stora skillnader då de jämförs sinsemellan vid konstant pH. Som exempel kan dikalciumsilikat och wollastonit nämnas: Vid pH 10 är upplösningen av dikalciumsilikat fullständig redan efter drygt tre timmar. Vid samma pH pågick fortfarande upplösningen av wollastonit då försöket avslutades efter 40 timmar.

Slutsatser

Undersökningarna påvisar vikten av att känna till en slaggs mineralsammansättning och de enskilda mineralernas egenskaper. De stora olikheterna mellan mineralerna, då det gäller upplösningbenägenhet, visar att en slaggs mineralsammansättning i stor utsträckning påverkar dess egenskaper, någonting som tidigare inte visats.

4.2 Framställning av fasta lösningar av wustit-typ

(se bilaga 5.2)

Syfte

Under etapp 1, konstruktionsprodukter baserade på slagg (55011) inleddes en studie vars syfte var att utreda hur variationer i sammansättningen av den fasta lösningen mellan metalloxiderna MgO och FeO påverkar dess löslighet med avseende på krom. Under konstruktionsprodukter baserat på slagg 2, 55012 har denna studie fortsatt.

Genomförande

I ett första skede syntetiserades fem olika fasta lösningar med ett konstant krominnehåll på 4 vikt%. Karakterisering med XRD samt lakningsstudier genomfördes på följande mineral-sammansättningar:

MgO:FeO

80:20 +4 vikt% Cr₂O₃

60:40 +4 vikt% Cr₂O₃

50:50 +4 vikt% Cr₂O₃

40:60 +4 vikt% Cr₂O₃

20:80 +4 vikt% Cr₂O₃

För att verifiera resultaten från den första studien genomfördes ytterligare försök där fyra nya sammansättningar av den fasta lösningen syntetiserades, denna gång utan innehåll av krom.

Resultat

Resultaten från studien visar att då halten MgO i den fasta lösningen stiger ökar även kromlakningen. Precis som i den första studien konstateras det att upplösningsförmågan minskar med ökad mängd FeO.

Slutsatser

Två separata studier på fast lösning mellan FeO och MgO har genomförts med det gemensamma målet att bestämma hur sammansättningen påverkar dess reaktivitet. Resultaten från studierna är samstämmiga. Då halten MgO i fasen är hög kommer reaktiviteten vara som högst. I praktiken innebär detta att då denna fas existerar i ett slaggsystem måste halten MgO i denna fas hållas så låg som möjligt för att på så sätt erhålla en stabil slagg map krom.

4.3 Inverkan av järnoxid på ljusbågsugns slaggens kromlakningsegenskaper

(se Strandkvist, 2010 och Bilaga 5.3)

Syfte

Under 2010 gjordes ett examensarbete vid Ovako Hofors. Syftet med arbetet var att undersöka hur järnoxid påverkade de fasta lösningarna av wustitstruktur och därigenom påverkar lakningen av krom. Målet var att molförhållandet FeO/MgO i den fasta lösningen ska vara minst 50/50

Genomförande

Alla försök skedde i ljusbågsugnen vid Ovako Hofors. Tre olika metoder testades för att öka halten järnoxid: syrgastillförsel via brännare, tillsats av järnoxidbärande material och extra syrgasblåsning genom syrgaslansen. Elva charger provtogs, samtliga då stålsort 803 tillverkades. Från varje charge togs tre olika slaggprov, ett från ugnen i samband med det första stålprovet, ett från slaggrytan och ett från slaggen som runnit över ifrån grytan och hamnat på golvet och därmed stelnat snabbare. Som referensprov valdes fyra äldre slaggprov. Referensproverna bestod av en blandning mellan olika charger samt golv- och gryt-slagg.

Proverna analyserades genom lakttest, kemanalyser, XRD och SEM. Totalt analyserades 25 slaggprov.

Resultat

Den enda av metoderna som gav synligt resultat på järnoxidhalten var den nya syrgasbrännaren. För att järnoxiden ska kunna gå in i de fasta lösningarna ska järnet vara i form av FeO, detta var svårt att kontrollera. De olika slaggproverna visade att järnet förekom med olika oxidationsgrad. Grytprovet visade högst andel FeO och borde teoretiskt ha mindre kromlakning än golvprovet. Det var dock för få slaggprov som lakade över detektionsgräns för att kunna dra säkra slutsatser.

Resultaten från karaktärisering av prover med SEM och XRD kan sammanfattas i:

- De vanligaste faserna som hittats är: fast lösning med wustitstruktur, kalciumsilikat, spinell och aluminiumferrit (troligen brownmillerit).
- Andra faser finns i mindre mängd, t.ex. järndroppar.
- Järn-magnesiumförhållandet i de fasta lösningarna varierade mellan de olika slaggproven.

Slutsatser

Att endast ett fåtal slaggprov visade någon utlakning tyder på att en ökad järnoxidhalt minskar kromlakningen. Det var tydligt att det inte finns något samband mellan krominnehållet i slaggen och kromlakningen.

I SEM-analysen syntes en krominnehållande fas (brownmillerit) som tidigare förbisetts. Sammansättningen i de fasta lösningarna skiljer sig mellan de olika slaggproven. Sambandet mellan FeO/MgO i slaggen och i den fasta lösningen kan fortfarande ses men är inte lika tydligt som i examensarbetet. Resultaten indikerar att slaggsammansättningen inte är det enda som påverkar sammansättningen i den fasta lösningen.

4.4 Kromfördelning i slaggmineral

(se bilaga 5.4)

Syfte och genomförande

För att undersöka i vilka mineral som krom kristalliserar och på så sätt få en djupare förståelse för hur lagningsmekanismen för krom i slagg ser ut har karakterisering med analytiskt SEM (Zeiss, Merlin, EDS) utförts på sex slaggprover, relevanta för svensk stålindustri. Slaggproven som analyserats är ljusbågsugnsslagg (LB) från Ovako Smedjebacken,

Ovako Hofors, Uddeholm AB, Outokumpu Avesta, Outokumpu Torneå samt ferro-kromslag från Vargön.

Resultat

Förutom de sedan tidigare kända krominnehållande mineralen (spinell AB_2O_4 , wustit MeO) har ytterligare ett antal krominnehållande mineral identifierats. Exempel på dessa är brownmillerit $Ca_2(Al,Fe)_2O_5$, merwinit $Ca_3MgSi_2O_8$ samt forsterit Mg_2SiO_4 . Halten inlöst krom i dessa mineral varierar mellan 0.1-4 atom%.

Förutom de mineral som innehåller krom har även ett antal mineral som inte innehåller krom identifierats. Två exempel på sådana är dikalciumsilikat $\beta-Ca_2SiO_4$ samt gehlenit fast lösning $Ca_2(Al,Mg,Mn)(Si,Al)O_7$. Dessa två mineral är extremt viktiga för att erhålla en stabil slagg med avseende på krom eftersom de har låg eller ingen löslighet för krom.

Slutsatser

Sex slaggprover relevanta för svensk stålindustri har karakteriserat map krom. 11 krominnehållande mineral har identifierats. Under arbetets gång har ett antal frågetecken uppkommit med avseende på hur krom kristalliserar, som i dagsläget motsäger den allmänna kunskapen map hur krom kan kristallisera. Enligt den litteratur som finns tillgänglig så existerar krom som Cr^{2+}/Cr^{3+} i den fasta slaggen. Enligt grundfysikens lagar innebär detta att krom enbart kan sitta oktaedriskt bundet i slaggstrukturen. Forsterit såväl som aluminoåkermanit, två mineral som identifierats som krominnehållande saknar oktaedriska hål i strukturen. Däremot finns ett större antal tetraedriska hål. Enligt de grundfysiska lagarna tillåts enbart Cr^{4+}/Cr^{6+} att kristallisera tetraedriskt. Detta innebär att den krom som sitter i forsterit såväl som aluminoåkermanit är av typen Cr^{4+}/Cr^{6+} , någonting som motsäger vad som tidigare varit känt. Detta ger anledning att mer ingående undersöka hur denna typ av föreningar uppför sig i vattenlösning.

4.5 Förekomstformer, löslighet och utlakning av molybden hos molybdenrik slagg

(se bilaga 5.5)

4.5.1 Fördelning av molybden som funktion av basisitet B_2 (CaO/SiO_2)

Syfte

Ingen vet fortfarande med säkerhet hur molybden förekommer i slaggerna. Anledningen till att den är så svår att identifiera i slaggsystem är att halten i slaggen ofta är låg. Med anledning av detta har därför en studie genomförts med avsikt att verifiera hur molybden föreligger i ett specifikt slaggsystem. Studien omfattar modifieringsförsök samt karakterisering med SEM samt XRD.

Genomförande

Med utgångspunkt från Uddeholm AB's LB- slagg har fyra olika sammansättningar med varierande B_2 undersökts. Dessa var:

1. Uddeholm LB ($B_2= 1.0$) + 10% MoO_3
2. Uddeholm LB ($B_2= 1.5$) + 10% MoO_3

3. Uddeholm LB ($B_2 = 2.0$) + 10% MoO_3
4. Uddeholm LB ($B_2 = 2.5$) + 10% MoO_3

Resultat

Resultaten som framkom kan sammanfattas i:

1. Oberoende av basisitet B_2 identifierades endast ett molybdenmineral, $CaMoO_3$, powellit.
2. Powellit är ett lösligt mineral.
3. Resultaten från XRD och SEM är samstämmiga.

Slutsatser

Följande slutsatser kan dras från det arbete som genomförts på molybden:

1. Oberoende av basisitet så kommer Mo att föreligga som powellit.
2. Beroende på hur material åldras kan lakningen både vara upplösningstyrd och/eller diffusionstyrd.
3. Diffusionstyrd om karbonatskikt bildas kring slaggkornet.
4. Upplösningstyrd om upplösningen blir beroende av de andra slaggmineralen.
5. Troligen är en basisk slagg att föredra då andra mineral kan bidra till att lösningen blir mättad med Ca-joner och därmed upplösningen av powellit begränsas.

Om molybden i huvudsak föreligger som powellit, vilket denna undersökning visat, kommer molybden att kunna laka ut. Lösningen på molybdenlakningen ligger då inte i att stabilisera molybden i ett stabilt mineral utan snarare att stabilisera mineralen som finns närvarande runt omkring powellit för att minimera utlakningen av molybden!

4.5.2 Lakningsbenägenhet för molybden i LB - slagg

(se bilaga 5.6)

Syfte

Molybden har av erfarenhet visat sig vara mycket lätt att laka ut från slagg. Ett av de stora problemen med att kartlägga molybdenlakning är att det finns ganska begränsad information om hur molybden föreligger i de slaggen den lakar från. Detta beror i första hand på de låga halterna av molybden i slaggen. I etapp 1 fanns det en inledande studie med avsikt att verifiera i vilka mineral molybden föreligger. Kylningsförloppets inverkan på krossnings- och lakningsegenskaper hos LB-slagg från Uddeholm AB har också studerats inom en industriaktivitet. Tre LB slaggen, LB1, LB2, LB3, ingick i studien. Ett antal omsmältning-försök gjordes. Utvärdering av lakningsegenskaper visade att som mest 50% (ca 2000mg/kg) Mo kan lakas ut från slagg LB3 efter omsmältning under svagt reducerande förhållanden och långsam avkylning av slaggen.

För att komplettera dessa resultat bedömdes det viktigt att fortsätta undersökningen med dels andra än Uddeholms Mo-rika slaggen, med basisitet kring 1.4, och att bestämma huruvida den diffusionstyrd utlakningen av Mo kan ge tillräckligt låg lakning, dvs. efter en kontrollerad utlakning av Mo från ytorna.

Genomförande

En karakterisering av slagg gjordes, inklusive kemiska analyser, lakning med EN 12457-2 och lakning i kolonner som skall efterlikna en diffusionsstyrd utlakning under naturliga förhållanden (dvs regnvatten fick perkolera fritt genom slaggen). Viss behandling av slaggen genomfördes med ändring av parametrar för avkylning, syrepotential, basisitet, m.m., för att undersöka möjligheter att bilda lätt löslig Mo fas. Inverkan av olika syrepotential undersöktes genom värmebehandling av slagg i olika atmosfär, luft respektive reducerande förhållanden i grafitdegel.

Prover placerades på tak där de utsattes för nederbörd. Uppsamlat vatten togs in och analyserades med regelbundna intervall. Prover av återstående slagg lakttestades enligt EN 12457-2 och karakteriserades med SEM och XRD.

Resultat

Resultat visade att genom åldring och utlakning under naturliga förhållanden kan Mo lakning minskas med 50%. Cr-lakningen ökade från 0,5 till 191 mg/kg och Mo-lakningen ökade från 10,2 till 133 mg/kg efter värmebehandling i oxiderande atmosfär vid 600-1100°C i muffel ugn. Värmebehandling i grafitdegel i 2 tim vid 1000°C av prover som oxiderats i muffel ugn vid 600-1100°C gav en minskning av Cr -lakningen till ca 0,1 mg/kg och Mo-lakningen till 9-24 mg/kg.

Slutsatser

Resultaten visar att det är möjligt att minska utlakningen av Mo från slaggen om den behandlas genom att regnvatten får naturligt perkolera genom slaggen under en längre tid. Resultaten tyder på att värmebehandling i oxiderande förhållanden ger en ökad utlakning av Mo medan värmebehandling i inert eller svagt reducerande atmosfär och modifiering av basisiteten ger en stor ökning av Mo lakning samtidigt som Cr-utlakningen inte ökar. Den ökande Mo lakningen kan tolkas som kemisk reaktionsstyrd. De kemiska reaktioner som styr utlakning behöver identifieras. Inverkan av basisitet, syrepotentiell och behandlings temperaturer, mm, på kemisk reaktionsstyrd Mo lakning bör studeras ytterligare, samt relationer mellan kemisk reaktionsstyrd och diffusionsstyrd Mo lakning. Resultat från sådana studier kan användas för att utveckla en optimal behandling av Mo-rika slaggar så att lättlösliga Mo-faser lakas ut från slaggytorna på ett kontrollerat sätt och Mo-lakningen vid användning av slaggen minskar på längre sikt.

4.6 Mekaniska egenskaper av olika slaggar och slaggblandningar

(se Bilaga 5.7, 5.8 och 5.9)

Syfte

Olika slaggers mekaniska egenskaper har sammanställts dels genom litteraturstudier och dels baserat på labbförsök. Syftet var att kunna uppskatta slaggenas lämplighet som konstruktionsmaterial samt erhålla en ökad förståelse för faktorer som påverkar de mekaniska egenskaperna.

Genomförande

Undersökningar av olika blandningar av ljusbågsugns- och skänkslagg från Uddeholms AB har gjorts både tidigare (Andreas et al., 2005, Herrmann et al., 2006) och inom detta pro-

jekt (Andreas et al., 2012, Friedrich, 2010). Slaggblandningarna testades m a p blandnings-, härdnings- och packningsegenskaper, kornstorleksfördelning, hydraulisk konduktivitet (permeabilitet) och tryckhållfasthet. Vidare har även skänkslagg från Ovako Hofors och AOD-slagg från Outokumpu Avesta undersökts angående härdnings- och packningsegenskaper, kornstorleksfördelning, hydraulisk konduktivitet och tryckhållfasthet.

En litteraturstudie gjordes angående ljusbågsugns- och skänkslaggers mekaniska egenskaper.

Resultat och slutsatser

Eftersom skänkslagg i stort sett inte används som enskilt material i konstruktioner har i litteraturen bara få uppgifter om fysikaliska egenskaper för skänkslagg kunnat hittas.

Ljusbågsugnsslagg är ofta hårdare och mer slitstark än krossat berg. En sammanställning av relevanta egenskaper för ljusbågsugnsslagg finns i bilaga 5.7, (Diener et al., tabell 3). En jämförelse med granit visar att ljusbågsugnsslagg är ett minst lika bra material med bl a god hållfasthet, slitstyrka och volymstabilitet och det kan rekommenderas som konstruktionsmaterial för både obundna och bundna (med bitumen eller andra bindemedel) lager.

Resultaten från labbförsöken pekar på att skänk-, AOD- och ljusbågsugnsslaggerna i rätt blandning har egenskaper som gör dem väl lämpade för konstruktion av barriärer (t ex tät-skikt) eller andra bundna lager. Erfarenheterna från stålverken (i det här fallet Outokumpu Avesta) vid slagguttaget visar dock också att både sönderfall av skänk- eller AOD-slagg i stålverket och härdningsförmågan och stabiliteten beror på processerna i stålverket då små förändringar i slaggbildningsprocessen kan orsaka varierande slaggegenskaper. Det saknas rutiner som skulle möjliggöra en koppling av dessa faktorer och processer/slaggbeteenden, t ex dokumentation av tillsatser av slaggbildare, separation av slagger från olika satser, kontroll över avsvalningsprocessen osv.

4.7 Mineralogins påverkan på slaggers mekaniska egenskaper

(se bilaga 5.7 och 5.8)

Liksom den kemiska stabiliteten (t ex utlakningsbenägenhet av olika ämnen) påverkas även slaggernas mekaniska egenskaper av mineralogin. Eftersom slagger bildas vid höga temperaturer, är den mineralogiska sammansättningen inte stabil efter avkylningen. Förändringarna kan vara gynnsamma för ändamålet, t ex ökad styrka genom cementreaktioner efter blandning med vatten, eller också äventyra användningen, t ex genom svällning. Vitt-rings- respektive åldringsreaktioner som lösning, hydratisering, hydrolys och oxidations-/reduktionsprocesser sker i olika omfattning beroende på användningsområde och föreliggande miljö. Genom att känna till sammanhangen och slaggernas reaktioner, kan man undvika problem vid användning av slagg.

Syfte

Målet med studien var att kartlägga och granska befintlig kunskap om ljusbågsugns- och skänkslaggers egenskaper och hur dessa förändras när slaggernas används i konstruktions-sammanhang. Speciell fokus riktades mot mineralomvandlingar efter att slaggernas har kylts ner och som beror på vittring och åldringsprocesser.

Genomförande

En litteraturstudie gjordes angående ljusbågsugns- och skänkslaggers mineralogi och faktorer som påverkar slaggernas kemiska och mekaniska egenskaper.

Resultat och slutsatser

Från litteraturen om ljusbågsugns- och skänkslagg har följande inhämtats:

- En slaggs mineralogi påverkar dess samtliga egenskaper inkl mekaniska som kornstorlek, densitet, kompressivitet, skjuvhållfasthet, volymstabilitet och permeabilitet.
- Skänkslaggens cementerande egenskaper beror på innehållet av cementliknande mineral, främst kalciumaluminatfaser som mayenit. Deras hydratisering leder till en snabb härdning och därmed tillväxt av hållfasthet.
- Höga halter fri kalcium- och magnesiumoxid leder till svällning vid kontakt med vatten (hydratisering, hydroxidbildning), vilket orsakar volyminstabilitet och försämrad hållfasthet. Mindre partikelstorlek leder dock till mindre mekanisk påverkan av svällningen, och en fastfas-inlösning av FeO och MnO i kalkstrukturen har befunnits minska hydratiseringsbenägenheten. Medan hydratiseringen av fri kalk sker ganska omgående efter vattentillsats, tar det olika långt tid, generellt dock betydligt längre för periklas (MgO). Mg-halten i slaggen är ingen indikator för halten fri MgO och därmed risken för svällning.
- Utlakningsprocesser kan påverka slaggers mekaniska stabilitet genom att slaggmatrisen utarmas, t ex genom upplösning av silikatfaser vid lägre pH-värden. Därför är det viktigt att känna till olika slaggminerals löslighet samt bindningsformer för potentiellt lakbara element.
- Karbonatisering av t ex kalciumsilikater m h a atmosfärisk koldioxid och vatten leder till utfällning av karbonater och en minskad porositet med ökad vikt, minskad hydraulisk permeabilitet och ökad styrka till följd.
- En senare upplösning av karbonater under vittringen av silikater kan leda till ökad hydraulisk permeabilitet.
- Förutom studier kring svällning orsakad av fri CaO och MgO finns det få publicerade uppgifter om direkta sammanhang mellan slaggers mineralogiska sammansättning och mekaniska egenskaper.

4.8 Långtidsegenskaper hos ljusbågsugns- och skänkslagger vid användning i en deponisluttäckning – Åldringsförsök i labbskala

(se bilagorna 5.10 och 5.11)

Syfte

För att beskriva slaggernas mineraliska och kemiska förändringar när de används som konstruktionsmaterial i en deponisluttäckning, studerades hur deras mineralsammansättning påverkas av ett antal faktorer som simulerade olika deponiförhållanden. Målet med studien var att utvärdera slaggernas egenskaper på kort och lång sikt samt effekterna av valda faktorer på en blandning av ljusbågsugns- och skänkslagg under deponinära förhållanden. Fo-

kus har riktats främst mot de mineralogiska omvandlingarna, lakningsegenskaperna och slaggblandningens barriärfunktion.

Genomförande

Av många tänkbara faktorer antogs slaggernas ursprungliga mineralsammansättning och vattenhalt, tillsammans med faktorer i konstruktionen som temperatur, fukthalt, tryck och reaktiva ämnen i atmosfären (porgas) ha störst inverkan. Förutom hydratisering är karbonatisering en viktig process som under dessa förhållanden leder till mineralomvandlingar. Dock bidrar även andra processer som vittring, lakning och upplösning av mineraler, interna omlagringar och utfällningar, under relativt konstanta kemiska förhållanden i övrigt.

Förändringarna i en tätskiktsblandning bestående av ljusbågsugnsagg och skänkslagg studerades efter åldring under 3, 10, 22 och 31 månader. Ett reducerat faktorförsök (dvs. ett försök där det är möjligt att utvärdera alla valda faktorer utan att alla kombinationer av faktorer och nivåer behöver testas) användes för att utvärdera påverkan av fem faktorer i tre nivåer på provernas åldring. Nivåerna på faktorerna förväntas täcka variationerna av dessa under verkliga förhållanden med god marginal. Följande faktorer valdes och studerades med avseende på effekten de kan ha på tätskiktsegenskaperna över tiden.

- Koldioxidhalt i atmosfären kring tätskiktet (0-100%)
- Relativ fukthalt (30-100%)
- Temperatur (5-60°C)
- Vattnet som kommer i kontakt med tätskiktet (destillerad vatten och lakvatten från skyddsskiktet ovanför)
- Åldringstid (3, 10, 22, 31 månader)

Mineralogin och lakningsegenskaperna hos slaggblandningen efter åldringen studerades med röntgendiffraktion (XRD), en enkel lakttest (skaktest enl. SS-EN 12457-4 vid L/S10 (SIS, 2003a)), termogravimetriska analyser, och genom mätning av buffertkapaciteten (ANC – acid neutralisation capacity).

Resultat

Det nästan treåriga försöket har visat att den testade slaggblandningen var stabil under de flesta förhållanden som simulerades i experimentet, dvs. enbart små förändringar kunde observeras. Störst inverkan hade CO₂-halten i atmosfären i kombination med hög temperatur och fukt. För att kunna upptäcka åldringsrelaterade förändringar var det nödvändigt att använda en kombination av olika detektions- och analysmetoder.

Mineralogin hos de undersökta slaggerna var komplex med en stor blandning av olika mineraler. Främst detekterades dikalciumsilikat, periklas, mayenit och merwinit. Utöver dessa hittades det också en spinellfas, gehlenit, monticellit, åkermanit, ringwoodit och järn samt kalk i några prover. De studerade karbonatiseringstiderna visade sig inte ha någon signifikant påverkan på den mineralogiska sammansättningen, förutom en viss kalcitbildning och upplösning av mayenit i skänkslaggen. Tre av 54 prover (åldrade i luft, hög fukthalt och 60°C) hade sönderfallit vid provtagningen efter 22 månader medan merparten av proverna (94 %) visade en mycket god mekanisk stabilitet efter åldring.

De termiska analyserna visade på nedbrytning av karbonater som hade bildats under åldringen. I de prover som hade sönderfallit indikerades m h a parallella gasanalyser att stabila hydratfaser hade bildats under åldringen, troligtvis efter hydratisering av MgO. För de flesta prover kunde den huvudsakliga viktförlusten mellan 100 och 900°C relateras till

nedbrytningen av karbonater som äger rum mellan ca 550 och 800°C. Detta innebär att mätningar av glödförlusten vid 1000°C kan ge en bra indikation för mängden hydrat- och karbonatfaser som bildats under åldringen.

Utlakningen styrdes till största delen av skänkslaggen i blandningen och var generellt sett låg. Förändringar över tiden var marginella och skillnader beroende på olika åldringsförhållanden blev främst tydliga efter kortare perioder (3 och 10 månader). Efter längre åldringsperioder försvann skillnaderna och utlakningen varierade slumpartat och även mellan replikat. Faktorn som påverkade utlakningsbeteendet mest var koldioxid, medan själva karbonatbildningen berodde mest på tid och relativ fukt. Makrokomponenter som kalcium, aluminium, svavel och natrium lakades mest, medan krom, nickel, bly och zink bara observerades i mycket låga halter i lakvattnet, ofta under detektionsgränsen.

Hållfastheten ökade något under åldringstiden och betecknas som god. Problem med volyminstabilitet som detekterades för 6 % av proverna förväntas inte påverka användningen av slaggen i en sluttäckningsbarriär pga. att sannolikheten för att just de förhållanden vid det observerade sönderfallet (luft, hög fukthalt och 60°C) inträffar rakt genom ett tätskikt bedöms som låg. Koldioxidhalten är sannolikt högre (enstaka upp till ca 40 vol-%) och temperaturen lägre (0-30°C). Dessutom kompenserar själva konstruktionen för effekterna av en eventuell volymökning: skittjockleken på ca 0,7 m och överlasten på flera ton per kvadratmeter leder till att svällningen av procentuellt små mängder kan tas upp i befintligt porutrymme.

Slutsatser

- Den testade slaggblandningen visade sig lämplig som tätskiktsmaterial i en deponisluttäckning.
- Effekten av åldring under deponiförhållanden var främst karbonatisering med utfällning av karbonater som följd vilket ledde till minskad porvolym och minskad hydraulisk konduktivitet. Mer kunskap om kinetiken av t ex karbonatiseringsfronten behövs dock.
- Vid användning i tätskiktet inom en deponitäckning uppskattas risken för märkbara effekter av eventuella svällningsreaktioner som mycket låg.
- Utlakningen var generellt låg och påverkas bara marginellt genom åldringen. Makroelement som Ca, Al, S, Na, Mg och Si lakade mest, medan metaller som krom, nickel, bly och zink bara observerades i mycket låga halter i lakvattnet, ofta under detektionsgränsen.

4.9 Test av bindningsegenskaper hos skänkslagg från Höganäs Halmstad inför användning som komponent i en tätskiktsblandning

(se bilaga 5.12)

Syfte

Målet med försöken var att utreda om skänkslagg från Höganäs har potential att fungera som bindemedel i tätskikt i en deponi. Närmare bestämt skulle bestämmas om slaggen efter inblandning av vatten och ballast och efter en viss härdningstid bildar fasta strukturer.

Genomförande

Skänkslagg från 6 olika uttag testades i 7 olika försök blandad med antingen enbart vatten eller ytterligare komponenter som LB-slagg (färsk, ovattnad och 2 år gammalt, lagrad utomhus), sand och bottenaska. Små provkoppar tillverkades genom instampning i plastbägare som lagrades i plastpåsar i rumstemperatur. Provning gjordes efter en och fyra veckor genom att ta proverna ur bägarna och bedöma strukturen manuellt följande en skala från 1 ("sönderfaller direkt utanför bägaren") till 5 ("kan inte påverkas eller söndertryckas manuellt").

Resultat och slutsatser

I de flesta fallen blev strukturen löst sammansatt och möjlig att bryta sönder med handkraft. Därmed är det i dagsläget osannolikt att Halmstad skänkslagg kan användas som bindande komponent i ett tätskikt. Med det aktuella slaggreceptet kommer inga fler försök att genomföras, däremot kan det bli aktuellt att göra nya tester när slaggsammansättningen förändras.

4.10 Lakningsegenskaper hos AOD- och LB-slagg vid Outokumpu Stainless i Avesta

(se bilagorna 5.13, 5.14 och 5.15)

Outokumpu Stainless i Avesta inledde 2008 ett arbete med att kartlägga stålverksslaggens egenskaper. AOD- och LB-slagg från tillverkning av rostfritt stål karakteriserades med avseende på lakning. I samband med detta etablerades en lakttestmetod i Avesta som är kvalitativ och robust nog att använda i det interna arbetet med att kartlägga slaggens lakningsegenskaper. Metoden är skakttest med L/S kvot 10.

Karakteriseringen av AOD-slagg beskrivs i Daniel Erikssons examensarbete (Eriksson, 2010) och karakteriseringen av LB-slagg i bilaga 5.14. Metodtableringen är dokumenterad i rapporten "Metodutveckling Slagglakningstester (SLAKT)".

Syfte

Syftet med lakningsförsöken på slagg från tillverkning av rostfritt stål var att bättre förstå faktorerna som påverkar lakningsegenskaperna genom att utvärdera skillnader i lakning mellan slagg från olika stållegeringar, luft- eller vattenkylning och i relation till reduktionsmedlet som använts (Al eller Si) samt att snabbt lokalt kunna utvärdera försök att styra slaggens lakningsegenskaper.

Genomförande

Efter identifiering av lämpliga slaggar kylades dessa på slaggården antingen med vatten eller bara i luft. Efter provtagning krossades slaggen och ca 2 kg prov har siktats fram för slagganalys på stålverkslabb och för lakningstest.

Slaggproverna lakades i enstegs-skakttest enl. SS EN 12457/2, för LB-slagg i bilaga 5.14 med en modifikation avseende partikelstorleken på provet (8-11 mm istället för 4 mm). Lakvätskorna analyserades främst m a p krom, molybden, fluor (och bor för AOD-slaggen). Gränsvärdena för lakning enligt NFS 2004:10 för inert avfall användes som referensvärden.

Resultat

Resultaten visade att det finns skillnader i lakningsegenskaperna mellan kisel- och aluminiumreducerad AOD-slagg och deras lakningsegenskaper. För de fyra metaller som undersökts noggrannare kunde konstateras:

- Lakningsresultaten varierade i flera fall mycket mellan proven vilket kunde kopplas till skillnader i främst LB-slaggerna.
- Krom lakade i genomsnitt under dagens gränsvärden (inert avfall) för både Al- och Si-reducerad slagg.
- Molybden lakade i den Al-reducerade slaggen klart under dagens gränsvärden, medan i den Si-reducerade slaggen lakade Mo klart över gränsvärdet (inert avfall).
- Fluor lakade över gränsvärdet (inert avfall) för både Al- och Si-reducerad slagg.
- Bor lakade i den Si-reducerade slaggen strax över gränsvärdet, men den Al-reducerade slaggen lakade nästan fyra gånger över gränsvärdet (dricksvatten, Livsmedelsverket SLVFS 2001:30).

Slutsatser

Homogeniteten i olika slaggsorter kan variera: medan kraftig omröring i konvertern ger homogen AOD-slagg är LB-slagg mera inhomogen.

Sammansättningen påverkades inte i någon märkbar omfattning av vilken stålsort som tillverkades. En uppföljning av ett helt års processanalyser för LB-slagg visade att skillnader i slagganalyser inte kan härledas till stålsort.

Däremot framstår kylningsmetoden som en mycket viktig faktor när det gäller lakningsegenskaperna vid rutinmässig slagghantering. Vattenkylning, som ger en snabbare kylningshastighet, ger klart lägre lakning av krom och molybden. Även fluor har visat lägre genomsnittlig lakning på de vattenkylda proverna.

Kylningens inverkan på slaggegenskaperna behöver dock studeras ytterligare, t ex genom att följa upp kylningen mer detaljerat än bara kylmetod.

Sammanfattningsvis är det nödvändigt att fortsätta arbetet med:

- Fler lakningstester och utvärdering med multivariat analys för större förståelse av lakningsvariationer
- Utvärdering av de fysikaliska egenskaperna, testmetodutveckling, slagg behandling och fullskaleförsök

4.11 Inledande tester av bindande egenskaper hos AOD-slagg med hög halt Al_2O_3 , Outokumpu Stainless Avesta

(se bilaga 5.16)

Outokumpu Stainless Avesta har ökat insatserna för att hitta användningsområden för slagg från ståltillverkningen. Ett antal varierade försök har genomförts med slagg eftersom de olika slaggtyperna har olika egenskaper som passar i olika sammanhang. Fokus i den

här studien har lagts på de cementliknande egenskaperna som i varierande grad finns i olika slaggtyper.

Outokumpu Stainless i Avesta har utfört några pilotförsök för att försöka hitta material till slaggbetongprodukter och som tätskikt i sluttäckningar av deponier.

Syfte

Syftet med försöken har varit att i labbskala testa slaggblandningar med höga halter kalciumaluminat för att hitta lämpliga recept till pilotförsök. Även inverkan av packning/pressning har undersökts. Bindande egenskaper skapar möjligheter att använda slagg i olika produkter, t.ex. i tätskikt på deponitäckningar eller som konstruktionsmaterial för betongsuggor eller båsavskiljare på verksamrådet.

Genomförande

Försöken utfördes med AOD-slagg där aluminium varit reduktionsmedel. Variabler var vattenmängd, pressning och partikelstorlek i bindande fraktion. Försök utfördes med och utan filler (grövre fraktion slagg) och i några fall cement. Små provkroppar framställdes genom att antingen blanda provinnehåll direkt i en form eller att packa materialet med en press. Efter olika härdningstider trycktestades de framställda provkropparna i en press. Sex försöksserier med efterhand anpassade recept genomfördes. Slaggtyperna som ingick i försöken var:

Bindande slagg:	Al-reducerad AOD, krossad och siktad samt självfallen
Fyllnadsmaterial:	LB- och borstabiliserad AOD-slagg, 1-8 mm
Övriga tillsatser:	Vatten och i vissa prov cement

Resultat och slutsatser

Bäst resultat erhöles med en blandning av 50 vikts% bindande självfallen slagg, 34 vikts% fyllnadsmaterial och 16 vikts% vatten.

Variationen av mängden inblandat vatten har visat att:

- Bindande *krossad och siktad* slagg blir starkare ju *mindre* vatten per kg bindande slagg som tillsätts inom intervallet 13-25 % vatten.
- Bindande *sönderfallen* slagg blir starkare ju *mer* vatten per kg bindande slagg som tillsätts inom intervallet 13-25 %

Inblandningen av cement gav ingen hållfasthet utan ledde trots pressning av materialet under provberedningen till en lös konsistens. När materialet efter blandning och vattentillsats pressades in i provbehållaren blev stabiliteten i de flesta fallen bättre. En instampning och därmed kompaktering av proverna i flera lager och med en energi motsvarande packning med tung utrustning i fält ökar stabiliteten och hållfastheten efter härdning.

4.12 Undersökning av skänkslaggers cementbindande egenskaper

(se bilaga 5.17)

Skänkslagg innehåller som regel en hög halt av Al_2O_3 och CaO men även SiO_2 , dvs. det finns goda förutsättningar för att hitta både Ca-aluminater och di-kalciumsilikat i den

stelnade slaggen. Ca-aluminater och di-kalciumsilikat har starka cementbindande egenskaper och ingår i kommersiella aluminat- och portlandcement. Därmed finns goda förutsättningar för bra hydrauliska egenskaper redan i slaggen som den är och därmed möjlighet att använda denna typ av slagg direkt i sådana tillämpningar, exempelvis som bindemedel i agglomerat.

Syfte

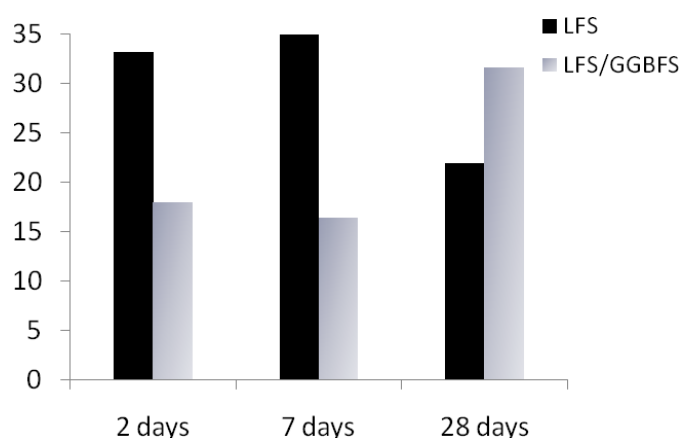
Avsikten var att dels karaktärisera skänkslaggens cemenbildande egenskaper och dels att karaktärisera cementbindande reaktioner med ett av de huvudmineral som ingår, nämligen mayenit.

Genomförande

Skänkslaggens cementbindande egenskaper karaktäriserades mha kalorimetri och ingående mineral före och efter reaktioner bestämdes med hjälp av pulverröntgen, XRD. Ett av huvudmineralen i den skänkslagg som användes var mayenit, $C_{12}A_7$. Detta mineral syntetiserades och de cementbindande egenskaperna karaktäriserades med samma metoder som användes för karaktärisering av skänkslaggen. Även kinetiken för de cementbindande reaktionerna bestämdes. En separat studie genomfördes där prismor tillverkades av dels skänkslagg och dels skänkslagg blandat med mald granulerad masugnsslagg, GGBFS, i proportionerna 50/50. Prismornas tryckhållfasthet testades efter 2, 7 respektive 28 dygns härdning. Arbetet genomfördes av SSAB Merox.

Resultat och sammanfattning

Resultaten visar att skänkslagg, liksom mayenit, kan karaktäriseras som ett snabbt hydratiserande material, där dock hållfastheten på sikt kan avta. Tillämpningar där snabb härdning är önskvärd eller i kombination med ett material som utvecklar styrka på sikt, är därför områden där skänkslagg med fördel skulle kunna användas. Resultat från tester av tryckhållfasthet för både ren skänkslagg (LFS) och blandningar med mald granulerad masugnsslagg visas i Figur 1.



Figur 1 Tryckhållfasthet i MPa efter olika härdningstider för dels ren skänkslagg (LFS) och dels för en blandning 50/50 av skänkslagg och granulerad masugnsslagg, GGBFS.

Tryckhållfastheten för ren skänkslagg var redan efter 2 dygn 33,1 MPa men hade efter 28 dygn minskat till 21,9 MPa. Den minskning i hållfasthet som erhålls med tiden för den

rena skänkslaggen kan motverkas om den blandas med ett material som utvecklar god hållfasthet på sikt. OPC, Ordinary Portland Cement, är ett sådant material. Mald granulerad masugnsslagg utvecklar också cemenbinding på sikt och genom en kombination av skänkslagg och granulerad masugnsslagg var det möjligt att både erhålla god hållfasthet efter 2 dygn och efter 28 dygn, jfr Figur 1.

Arbetet är dels publicerat i vetenskapliga artiklar av Adolfsson et al. och även i den doktorsavhandling som Adolfsson publicerat. I Adolfssons doktorsavhandling diskuteras även möjligheter att optimera skänkslaggens hydrauliska egenskaper. För en utförlig redogörelse för hur olika mineral påverkar hydrauliska egenskaper och möjligheter att använda slagger i cementtillämpningar, se även den rapport ”Rekommendationer för hantering och modifiering av slagg” (Engström et al., 2012) som utgetts från detta projekt.

5 RESULTAT: FÖRSÖK I PILOT- OCH FULLSKALA

Resultaten från försök i pilot- och fullskala, genomförda som industriaktiviteter, redovisas nedan i sammanfattad form. För mer detaljerad beskrivning av respektive delprojekt hänvisas till Bilaga 5. Syftet med dessa aktiviteter var att testa och följa upp resultat som kommit fram genom laboratoriestudier och/eller beräkningar i både det aktuella och tidigare projekt (55011, Mimer). Slagguttaget på Ovako Hofors gjordes i förberedande syfte för att testa slaggens lagring och transport.

Storskaliga tester av ytterligare slagger med lovande egenskaper som tätskiktsmaterial kunde inte genomföras pga. i dagsläget oöverkomliga problem med slagghantering (skänkslaggen i fråga saknar friktionsegenskaper samt genererar damm) och slaggtillverkning (AOD-slagg föll inte sönder i tillräcklig utsträckning).

5.1 Användning av slagg från Uddeholms AB i en deponisluttäckning – Fältförsök Hagfors

(se bilaga Bilaga 5.18 och rapport ”Rekommendationer för användning i slagg i deponikonstruktioner” av Andreas et al. 2012)

Slagger från ståltillverkning på Uddeholms AB har använts i olika delar av sluttäckningskonstruktionen för hushållsavfallsdeponin i Hagfors. Deponeringsförordningen (SFS, 2001) ställer flera krav på sluttäckningar. Mängden lakvatten som perkolerar genom täckningen får inte överskrida $50 \text{ l/m}^2 \cdot \text{år}$ för deponier för icke-farligt avfall. Vid användning av avfall eller biprodukter från industriprocesser för byggnation av sluttäckningskonstruktioner, bör materialen via provningar och dokumenterade resultat i fullskaleförsök visas ha egenskaper som uppfyller krav på genomströmning och beständighet över lång tid. Materialet bör även vara väl undersökt avseende föroreningsinnehåll och lakbarhet.

Syfte

Syftet med fältförsöket var att visa hur slagger kan användas som konstruktionsmaterial i full skala samt att studera och följa upp hur konstruktionen fungerar m a p de tekniska och miljömässiga krav som finns.

Genomförande

Två nya provytor (fullständiga avslutningskonstruktioner) har byggts under det här projektet på hushållsavfallsdeponin Holkesmossen i Hagfors kommun, provyta 4 (2010) och 5 (2011). Provytorna 1-3 byggdes tidigare (2005-2008). Utvärderingen har fokuserats på främst de äldre ytorna för att kunna basera resonemangen på en tillräcklig mängd data.

Ljusbågsugnsslagg användes i dräneringsskiktet och en blandning av ljusbågsugnsslagg och skänkslagg i tätskiktet. En av Uddeholms ljusbågsugnsslagger har egenskaper som liknar skänkslagg och den ingår i tätskiktsblandningen. Detaljer om slaggerna, sluttäckningsdesignen och utförande finns i rapporten ”Rekommendationer för användning av slagg i deponikonstruktioner - Krav, lämplighet, materialhantering och utläggning” (Andreas et al., 2012).

Ytorna instrumenterades med utrustning för mätningar av vattenmängder och -kvalitén under tätskiktet för att följa upp om konstruktionen klarar funktionskravet för en sluttäckning enligt deponeringsförordningen. För att förstå förändringar av vattenbalansen över tiden

övervakas även konstruktionen (mätning av sättningar) och miljöfaktorer som temperatur och gasförhållanden mäts i och under tätskiktet.

Resultat

Mängderna lakvatten, d v s vattnet som gick igenom tätskiktet, motsvarade 41, 77, 75 och 10 l/m²*år för yta 1, 2, 3 och 4 under hösten 2011 (6, 4, 3 och 1 år efter byggnationen av ytorna). Jämfört med infiltrationskravet enligt deponeringsförordning (för deponier för icke-farligt avfall) på 50 l/m²*år är det enbart provyta 1 och 4 som uppfyller kravet.

Orsaken till det är dels att man i provyta 2 frångick originalreceptet och testade en minskning av andelen skänkslagg+LB4 i tätskiktet från 50 % i provyta 1 (som hade byggts tidigare) till 35 % i yta 2 för att kunna bygga större ytor med den mängden av dessa slaggar som faller årligen. Dels valde man större partikelstorlekar för att minska krossningsarbetet. Receptet hade testats i labb och permeabiliteten hade varit i samma storleksordning som för originalreceptet. Dessa förändringar medförde dock i praktiken att infiltreringen i provyta 2 blev mycket högre än i yta 1. Även i provyta 3 använde man detta förändrade recept. År 2010 byggdes ytterligare en provyta (nr 4) men denna blev bl a till följd av krisen i stålbranschen mycket liten varför en större provyta 5 byggdes hösten 2011.

Analyser av lakvattnet visar för samtliga provytor på en generellt låg utlakning och låga metallkoncentrationer i förhållande till deponeringsförordningens utlakningskriterier för inert avfall.

Mätningarna av temperatur och gassammansättning under och över tätskiktet har inte gett några oväntade resultat och ger ingen anledning till förändringar i konstruktionen. Temperaturen i nedersta delen av skyddsskiktet underskrider aldrig 0 grader och är minst 3-5 grader högre än närmast ytan.

Slutsatser

- Sluttäckningen uppfyller funktionskravet m.a.p. vattengenomsläpplighet om andelen bindande slagg i tätskiktet inte underskrider 50 % och slaggerna finkrossas (mindre än 20 mm) inför byggnationen.
- Lakvattnet som perkolerar genom konstruktionen innehåller endast låga halter metaller.
- Temperaturmätningarna visar att skyddsskiktet fyller sin isolerande funktion mot tjäle och att metanoxidation kan förekomma.
- Resultaten visar också att det praktiska genomförandet av konstruktionsarbetet är oerhört viktigt och måste planeras i detalj samt kvalitetssäkras.
- Den 2010 byggda provytan 4 visar hittills mycket lovande resultat och kommer tillsammans med övriga ytor följas upp under några år till.

5.2 Undersökning av slaggytor med LB- och skänkslagg från Höganäs Halmstad

(se bilaga 5.19)

Syfte

Övergripande mål för arbetet med slaggerna var att hitta alternativa användningsområden för dessa så att deponering kan undvikas.

Specifikt för denna undersökning var syftet att få fram kvalitativa data och underlag för hur slaggen fungerar som konstruktionsmaterial. Med dessa data som bas kommer det att definieras för vilka användningsområden som slaggen är lämplig samt ske planering av försök tillsammans med potentiella användare.

Genomförande

Dynamisk fallviktsmätning har genomförts på några ytor som byggts med slagg som huvudsakligt konstruktionsmaterial. Ytorna ligger inom och i anslutning till det område där slaggen från Höganäs Halmstadverken hanteras. I två av fallen var det gamla ytor med i huvudsak en blandning av ljusbågsugns- och skänkslagg. I de två andra fallen var det en helt nygjord yta där enbart ugnsslagg använts.

Resultat och slutsatser

Resultaten är ännu inte helt utvärderade, men så här långt kan sägas att bärighetsmodulen för slagg (i dessa mätningar) är klart högre än för mer traditionella grusmaterial. Detta trots att ytorna inte var komprimerade på ett optimalt sätt.

Prover på slagg har också skickats för undersökning på labb avseende ett antal egenskaper som är viktiga för ett utnyttjande av materialet vid markkonstruktioner.

5.3 Byggnation av försöksytor med slagg, Sandvik

(se bilaga 5.20)

Syfte

Det övergripande målet med detta projekt var att öka möjligheterna för användning av SMTs slagg efter metallutvinningen för att öka livslängden på den interna deponin genom minskad deponering. Genom att bygga två något olika försöksytor med slagg och följa upp dem under två somrar samt parallellt även undersöka slaggens egenskaper på labb, ökas kunskaperna om slaggens egenskaper och användbarhet.

Projektet syftar till att öka kunskaperna om slaggen egenskaper och användbarhet och att svara på frågorna:

- Hur mycket bidrar slaggen till tätheten (dvs till minskad vattengenomträngning) i en konstruktion?
- Vilken kvalitet har det eventuella lakvatten, som tränger genom slaggen?

Genomförande

Två något olika försöksytor à 10x20 meter byggdes med slagg under v 34-38 2011 på SMT:s område. Ytorna simulerar en sluttäckningskonstruktion där slagg har använts som konstruktionsmaterial ovanpå en deponi, i det ena fallet under ett tätskikt och i det andra utan tätskikt. Under båda ytorna lades 5 lysimetrar för vattenuppsamling. Uppföljning kommer att ske under två somrar genom provtagning och analys av lakvattnet. Parallellt kommer även slaggens egenskaper att undersökas på lab.

Resultat och slutsatser

Försöket är pågående och inga prover har tagits än. Angående det arbetet som har gjorts kan följande slutsatser dras:

- Slagg som grävs ur deponin för att användas som konstruktionsmaterial bör siktas före användning.
- En trumsikt, avsedd för sållning av jord, visade sig fungera bra för siktning av slagg vid torr väderlek.
- Siktad, kompakterad (med vibrerande vält) slagg får en tät och slät yta och slaggen inger förhoppningar om att, utifrån hur den ser ut, bidra till tätheten hos konstruktionen.
- Moränmaterialet som användes som skydds-/vegetationsskikt behövde harpas på 100 mm för användning.

5.4 Provväg med olika fraktioner hyttsten

(se bilaga 5.21, Ullberg, J. (2009) Provsträcka med hyttsten på väg BD563 vid Fällträsk. Rapport 2009:141. Vägverket Väg, sektion Vägteknik)

Bakgrund och syfte

Hyttsten (masugnsslagg) är ett material som under 35 års tid använts som vägbyggnadsmaterial i vägar runt Luleå. Under denna tid har en praxis utvecklats för användningen. Nya tekniska och miljömässiga krav som framkommit på senare år ställer dock större krav på kunskaper om materialet, i olika fraktioner och miljöer. För att öka kunskapen om materialet har därför i ett samarbete mellan Vägverket, SSAB tunnplåt och BDX en provväg med hyttsten byggts utanför Luleå.

Syftet med försöket var att utreda om det genom att använda rätt metoder vid utläggning gick att få ett bra resultat med olika fraktioner. I upplägget ingick dessutom att kontrollera styvhetsmoduler på hyttsten jämfört med standardmaterial. Tanken var att projektet skulle ge underlag för en uppdatering av Vägverkets publikation 2005:39 om hantering av masugnsslagg. Slutligen skulle det också undersökas om någon skillnad i den resulterande vägens hållfasthet kunde ses beroende på om en ringvält eller en slätvält användes vid utläggningen.

Genomförande

Provsträckan byggdes 2006, med två sorterade (0/63 och 0/125 mm) och en osorterad hyttstensfraktion, samt som referens med bergkross. Uppföljning utfördes med fallvikt, provtagning, spårdjupsmätning samt visuella observationer under åren 2006-2008.

Resultat och slutsatser

Det visade sig att osorterad hyttsten hade en lägre bärighet än både referens och sorterat material. Sorterat material var väl jämförbart med referensen, och man kunde se en styvhetsökning i hyttstenen med tiden, beroende på att cementbindningar bildas mellan kornen i materialet. I denna korta mätserie gick det inte att bestämma hur mycket hyttstens styvhet kommer att öka, för det krävs en längre serie.

Det visade sig också att vid rätt utläggning gick det inte att se skillnad mellan välttypernas resultat. Därför kan man sannolikt anta att typ av vält har mindre betydelse vid ett riktigt utfört vältarbete.

Okulär besiktning bör löpande utföras. Detta är en enkel åtgärd, och kräver ingen större insats. Lämpligt är att notera när skador uppstår, och dokumentera dessa med svårighetsgrad och utbredning, gärna med foto.

5.5 Observationer angående hantering av ovattnad skänkungsslagg vid Ovako Hofors

(se bilaga 5.22)

Syfte

Ett av projektets mål var att anlägga och undersöka hårdgjorda ytor respektive deponitäckningsprovtytor av slagg på Ragn-Sells anläggning i Högbytorp.

Skänkungsslagg från Ovako Hofors AB var en av de slaggtypen som var tänkt att fungera som bindemedel i de hårdgjorda ytorna. Denna slagg har cementliknande egenskaper efter process men vattnas normalt i hanteringen varvid dessa egenskaper mer eller mindre förstörs. Tidigare försök inom Konstslag 1 (55011) har visat att vattnad skänkungsslagg duger bra till hårdgjorda ytor men lämpar sig inte för tätskikt eftersom de bindande egenskaperna har förstörts.

För att försöksytorna skulle kunna byggas krävdes därför en hantering där skänkungsslaggen inte vattnades över huvud taget. Att testa en sådan hantering var syftet innan själva byggnationen kunde börja.

Genomförande

Cirka 30 ton skänkungsslagg togs ur slaggrampen och lades upp under tak för avkylning utan att vattnas. Efter sex dagar studerades materialet okulärt och en del material grävdes undan med en lastmaskin för att det inre av högen skulle kunna studeras. Vidare lyftes materialet mycket försiktigt och hölls sedan ur skopan från låg höjd.

Resultat och slutsatser

Okulärbedömningen visade att slaggen bestod av pulver men också till en betydande del av större bitar och en liten del stålrest. Ingen förändring som t ex ett förväntat sönderfall observerades efter sex dagar.

Den beskrivna, mycket försiktiga hanteringen av materialet ledde till stor dammbildning.

Med ovanstående som bakgrund drogs slutsatsen att det här materialet i dagsläget inte går att hantera på det sätt som var tänkt utan det krävs först ett större förarbete. De huvudsakliga skälen till slutsatsen är följande:

- Materialet håller för låg kvalitet då det innehåller för mycket grova partiklar. Dessa kan tänkas sönderfalla okontrollerat vid ett senare tillfälle varför man inte heller kan använda dem som ballast.
- Materialet dammar för mycket för att kunna hanteras på tänkt sätt.
- Slaggen är så het att den måste svalna cirka en vecka innan den kan hanteras utan risker (och lastas i flak m.m.). Under den perioden kan inte ny (het) slagg fyllas på i samma upplag. Eftersom slaggen måste väderskyddas och det finns begränsat med utrymme under tak innebär slagglagringen ett praktiskt problem.

6 SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

De uppsatta målen för projektet har uppfyllts. Som ett resultat av projektet har kunskapen ökat väsentligt beträffande hur hantering, sammansättning och modifiering av slagg kan ge företagen möjligheter utveckla sina material till för respektive applikation godkända produkter, både avseende miljö och funktion, och bidrar därmed till en ökad användning av slagg. En stor del av arbetet har även varit riktat på utveckling av konkreta applikationer för slagg, framförallt användning av slagg i konstruktion av tätskikt vid sluttäckning av deponier. Försöksytor vid den kommunala deponin i Hagfors har visat på mycket lovande resultat.

Alla resultatmål har uppfyllts; antal publicerade avhandlingar och artiklar överskrider t o m de uppställda målen vid projektstarten.

Tillverkning av några av de i slagg vanligast förekommande mineralen har genomförts med framgång. Undersökningar av mineralerna avseende egenskaper såsom upplösning, lakningsbeteende och cementbindningsreaktioner har gett värdefull grundkunskap om slaggernas egenskaper och beteende i olika applikationer samt mot vilka mineral man bör styra slaggsammansättningen för att uppnå vissa egenskaper.

Ett stort antal av medlemsföretagens slaggar har karakteriserats med avseende på kemisk sammansättning, utlakning, mineralogi, cementbindande och delvis även mekaniska egenskaper. Dessa undersökningar har utökat den kunskap om slaggerna som krävs för att kunna förstå hur och i vilken applikation en slagg bäst kan utnyttjas och/eller föreslå hur en slagg ska kunna modifieras för att uppnå önskvärda egenskaper.

Fördelning samt utlakningsmekanismerna för krom i enskilda mineral har studerats i detalj. 11 krominnehållande mineral har identifierats i system relevanta för svensk stålindustri. Detta är fler än vad man tidigare trott existerade. Förhållandet mellan FeO och MgO i MeO – systemet har bevisats ha stor betydelse för lakbarheten av krom, där en hög halt FeO är att föredra för att uppnå minskad Cr-lakning.

Utlakningsmekanismerna för molybden från molybdenrik slagg har studerats i detalj. Lakningen har visats kunna minskas genom åldring utomhus. Utlakningen ökar däremot då slaggen värmebehandlas i såväl inert som oxiderande atmosfär. Förutom åldring och värmebehandling ger en ökad basisitet en ökad utlakning av molybden.

Kunskapsläget beträffande hur mineralogin påverkar slaggers mekaniska egenskaper har kartlagts med en litteraturstudie och försök avseende härdningsegenskaper och förändringar i hållfastheten av skänkslagg i kombination med andra material. Det blev tydligt att en slaggs mineralogi påverkar slaggens samtliga egenskaper inkl mekaniska som kornstorlek, densitet, kompressivitet, skjuvhållfasthet, volymstabilitet och permeabilitet. Tex beror skänkslaggens cementbindande egenskaper på innehållet av cementliknande mineral, främst kalciumaluminatfaser som mayenit. Höga halter fri kalcium- och magnesiumoxid leder till svällning vid kontakt med vatten, vilket orsakar volyminstabilitet och därmed försämrad hållfasthet. Karbonatisering av tex kalciumsilikater å andra sidan leder till utfällning av karbonater och en minskad porositet med ökad vikt, minskad hydraulisk permeabilitet (vattengenomsläpplighet) och ökad styrka som följd. En senare upplösning av karbonater under vittringen av silikater kan dock leda till ökad hydraulisk permeabilitet.

Cementbindande egenskaper hos slagger har undersökts i både labb- och fullskaleförsök. Exempel på applikationer där skänkslagg eller andra slaggtypen med cemenbindande egenskaper kan användas som ersättning för cement är som bindemedel i agglomerat eller som en bindande komponent i hårdgjorda markytor och i tätskiktet i avslutningskonstruktionen på deponier.

Åldringsförsöket med en blandning av skänk- och ljusbågsugnsagg visade att effekten av åldring under deponiförhållanden består av främst karbonatisering med utfällning av karbonater som följd. Dessa processer leder till minskad porvolym och minskad hydraulisk konduktivitet. Risken för märkbara effekter av eventuella svällningsreaktioner uppskattas vara ringa vid användning av den undersökta slaggblandningen i tätskiktet inom en deponitäckning. Utlakningen är generellt låg och påverkas bara marginellt genom åldringen. Makroelement som kalcium, aluminium, svavel, natrium, magnesium och kisel lakade mest, medan metaller som krom, nickel, bly och zink bara observerades i mycket låga halter i lakvattnet, ofta under detektionsgränsen.

De två inom projektet framtagna rapporterna ”Rekommendationer för hantering och modifiering av slagg” och ”Rekommendationer för användning av slagg i deponikonstruktioner”, innehåller det samlade kunskapsläget inom respektive område och ger både stålverken och slagganvändaren konkreta möjligheter att:

- genomföra lämplig modifiering av slaggens sammansättning, i eller utanför själva ståltillverkningen,
- anpassa slaggtillverkningen och -hanteringen (t ex kylning), så att önskad mineralogisk sammansättning och därmed önskade egenskaper uppnås,
- hitta de kombinationer av olika material som gör att produkten får för en specifik applikation önskvärda egenskaper,
- anpassa byggrelaterad hantering (krossning, lagring, blandning) till avsett ändamål för att på bästa sätt kunna utnyttja slaggernas positiva egenskaper,
- förstå hur slagg beter sig i olika användningsmiljöer samt
- få råd för hur en fungerande deponitäckning behöver utformas och byggas.

Kombinationen av teoretiska beräkningar, labbförsök och verifiering av resultat och slutsatser i pilot- och fullskala har visat sig vara ett framgångsrikt arbetssätt för att uppnå en större förståelse för de enskilda mineralernas bidrag till slaggernas egenskaper och beteende under verkliga förhållanden.

Projektet har gett ökade och fördjupade kunskaper, som både direkt och på längre sikt kommer att ligga till grund för större och nya möjligheter till avsättning för slagger från ståltillverkningen i Sverige. Det ursprungliga effektmål som sattes upp för projektet var att inom en tioårsperiod kunna bidra till att årligen cirka 200 kton slagg som då projektplanen skrevs deponerades, i framtiden ska kunna användas inom olika applikationer. Resultaten från projektet har väsentligt ökat möjligheterna för svensk stålindustri att kunna förverkliga detta mål. Projektet bidrar därmed till en ökad materialeffektivitet och resurshushållning, vilket ingår i målen för Stålforskningsprogrammet som helhet under rubriken hållbar tillväxt.

Projektet har bidragit till att

- Utöka kunskapen beträffande hur enskilda mineral påverkar och styr utlakning av krom från slagg.
- Bättre förstå förekomsformer och utlakningen av Mo.
- Fullfölja de försök som inletts tidigare avseende nya applikationer för slagg från stålframställning, framförallt där slaggers cementbindande egenskaper utnyttjas.
- Kartlägga de mineralomvandlingarna som sker när slaggen används i olika miljöer.
- Flera företag har börjat karakterisera sina slaggar, dels m a p cementbindande egenskaper, dels angående utlakningsegenskaperna. Så långt som möjligt har egenskaperna även kopplats till processparametrar där slaggen bildas.
- Erfarenheterna angående slaggers mekaniska egenskaper har ökat, t ex avseende hållfasthet av blandningar med cementbindande egenskaper som funktion av packningsarbete, vattentillsats och tid.

Projektets vetenskapliga nyhetsvärde kan beskrivas som följer:

- Enskilda minerals bidrag till utlakning har bara till en liten del undersökts tidigare.
- Molybden i slagg har visats föreligga som powellit, CaMoO_3 , oberoende av basisiteten.
- Deponitäckning med slaggprodukter i tätskikt och dräneringsskikt har inte demonstrerats tidigare. Försöken i full skala innebär ny kunskap även angående andra slaggapplikationer, t ex hårdgjorda ytor eller barriärer i mark.
- Uppföljningen av slaggåldring under varierande förhållanden har gett insyn i mineralomvandlingar till följd av olika miljöfaktorer samt har ökat förståelsen för förändringar av slaggers egenskaper som kan förväntas på kort och lång sikt.
- Användningen av skänkslagg med dess innehåll av aluminater för cementapplikationer har inte demonstrerats tidigare.

7 FÖRSLAG PÅ FORTSATT FORSKNING OCH IMPLEMENTERINGS-INSATSER

Sluttäckningsförsöket i Hagfors är en första implementering i full skala för användning av slagg som konstruktionsmaterial i deponitäckning. Anpassningar och justeringar av hela hanteringskedjan från stålverket till byggnation har gett viktiga erfarenheter som finns dokumenterade i rapporten ”Rekommendationer för användning av slagg i deponikonstruktioner - Krav, lämplighet, materialhantering och utläggning - Exemplet Hagfors kommunala deponi.” (Andreas et al., 2012).

Förutom detta lyckade exempel finns ett antal frågor som behöver ytterligare utredning för att besvara och i förlängningen för att garantera en säker användning och avsättning av slagg för konstruktionsändamål:

- En vägsträcka med masugnsslagg har följts upp avseende slaggens mekaniska egenskaper (bärighet) under och efter konstruktionen. Fler mätningar över en längre tid behövs för att kunna se även förändringar av styvheten och så behöver kvaliteten av yt- och dränvattnet följas upp.
- Provytor med ljusbågsugns- och skänkslagg respektive enbart ugnsslagg har följts upp avseende bärighet med dynamisk fallviktsmätning. Resultaten måste kopplas till konstruktionsparametrar som packning, blandningsförhållanden osv. Mekaniska tester i labbskala är planerade.
- Baserat på kunskap som framkommit under en längre tids forskning inom området har fullskaleförsök genomförts för att verifiera effekten av ökad halt FeO i slagg på utlakning av krom. Resultaten visar på utlakning av krom som i vissa fall underskrider detektionsgränsen för använd analysmetod. Resultaten tyder på att en ökad FeO-halt kan vara en väg för att garantera en låg utlakning av krom från vissa typer av slaggar. Kompletterande undersökningar har emellertid inte gett entydiga resultat, vilket tyder på att det finns ytterligare parametrar som påverkar resultatet. Fortsatta undersökningar är därför nödvändiga.
- Fortsatta studier av enskilda minerals egenskaper beträffande reaktioner med vatten, både för att utöka kunskapen beträffande utlakning av metaller och för att bättre förstå hur olika mineral bidrar till cementbindande egenskaper.
- Komplettering av studier på enskilda mineral med studier av hur fasta lösningar av dessa mineral beter sig och i förlängningen påverkar egenskaperna hos slaggerna.
- Beträffande hur olika mineral bidrar till de mekaniska egenskaperna är kunskapen idag begränsad och det finns ett stort behov av fortsatt forskning.
- Utöka kunskapen avseende möjligheter att använda slagg i andra cementtillämpningar än de som beaktats i detta projekt.
- Utveckla metoder som möjliggör användning av slagg som råvara vid cementframställning, exempelvis en vidareutveckling av det arbete som tidigare genomförts vid Luleå tekniska universitet avseende användning av slagg som råvara för tillverkning av SAB-cement.
- Utöka kunskapen avseende slagganvändning inom områden som exempelvis markstabilisering.

- Testa andra slaggar i pilot- och full skala än de som ingick i projektets verifieringsinsatser.
- Testa fler slaggar med avseende på långtidsegenskaperna i olika miljöer.
- Undersöka om och i vilken utsträckning det finns självläkande förmåga i slaggar med cementlikande egenskaper som skulle kunna laga sprickor som kan uppstå vid uttorkning eller under ojämn belastning.
- Anpassning av mekaniska standardtester (gjorda för betong, jord, stål eller berg) för slagg - Är några av dessa metoder lämpade för slaggmateriell eller behöver nya testmetoder utarbetas? Vilka egenskaper behöver mätas, vilka egenskaper är kritiska beroende på tillämpning, samt hur stora variationer kan accepteras?
- Testa flera mekaniska egenskaper som skjuvhållfasthet, plasticitet och volymstabilitet med/utan last för olika slaggar och blandningar.
- Optimera slaggens sammansättning ur både perspektivet möjligheter att ha en avsättning för slaggen och ur perspektivet att slaggen skall bidra till en tillräckligt god stålkvalitet.

För att föra den i detta projekt påbörjade forskningen vidare och för att säkerställa uppfyllandet av målet att kontinuerligt öka och säkra slagganvändning, är det viktigt att fortsätta det långsiktiga arbetet att bygga kunskap och inte stanna av.

8 REFERENSER

- Andreas, L. Herrmann, I. Lidström-Larsson, M. Lagerkvist, A. (2005) Physical properties of steel slag to be reused in a landfill cover. *Sardinia 2005*. CISA, Cagliari, Italy.
- Andreas, L.; Engström, F.; Diener, S.; Björkman, B.; Lind, L. (2009) Konstruktionsprodukter baserade på slagg. Slutrapport JK 55011. *Jernkontorets Forskning D832, TO55-01*. ISSN 0280-249X.
- Herrman, I. Hamberg, R. Andreas L. Lidström-Larsson M. (2006) Användning av stålslagg i sluttäckning av Hagfors kommunal deponi – Delrapport I. *MiMeR-rapp. 2006-2-05*.
- Jernkontoret (2009) Stålindustrin gör mer än stål - Handbok för restprodukter 2009. Jernkontorets Teknikområde 55, Restprodukter. ISBN: 978-91-977783-1-2.
- SFS (2001) Förordning om deponering av avfall, SFS - Svensk författningssamling no: 2001:512, Miljödepartementet, Stockholm, Sweden.
- Adolfsson, D., Robinson, R., Engström, F., Björkman, B. (2011) Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag, *Cem.Concr. Res.*, 41, 2011, 865-871.
- Adolfsson, D., Engström, F., Robinson, R., Björkman, B. (2011) Cementitious phases in ladle slag, *Steel research international*, 82, 2011, 398-403.
- Adolfsson, D. (2011) Cementitious Properties of Steelmaking Slags, PhD Thesis, Luleå University of Technology, April 2011.

9 BILAGOR

Bilaga 1 Projektorganisation och medverkande

a) Lista på medverkande forskare och industrirepresentanter

<i>Forskare</i>	<i>Lale Andreas, Luleå Tekniska Universitet Bo Björkman, Luleå Tekniska Universitet Fredrik Engström, Luleå Tekniska Universitet Silvia Diener, Luleå Tekniska Universitet Qixing Yang, Luleå Tekniska Universitet</i>
<i>Industrirepresentanter</i>	<i>Börje Gustafsson, Uddeholms AB Lars Johansson, Outokumpu Stainless AB Ingrid Eriksson, Björn Haase, Höganäs Sweden AB Kjell Pålsson, Ovako Hofors AB Jeanette Stemne, Mats Andersson, SSAB Merox AB Hans-Olof Lampinen, SSAB EMEA AB Lotta Lind, AB Sandvik Materials Technology Torbjörn Sörhuus, Ovako Bar AB Pär Odén, Ragn-Sells AB Ingemar Goldkuhl, Harsco Metals Sweden AB Charlotta Torsner, Erasteel Kloster AB</i>

b) Kort beskrivning av projektorganisationen

Styrgruppen för projektet var TO55, projektgruppen 55012. Ordförande för projektgruppen var Lars Johansson och vice ordförande Lotta Lind.

Projektet utfördes av avdelningarna för Processmetallurgi (PM) och Avfallsteknik (AT) vid Luleå tekniska universitet. Projektledare var Lale Andreas (AT). Medverkande var Bo Björkman, Fredrik Engström, Qixing Yang (alla PM) och Silvia Diener (AT).

Bilaga 2 Publikationer

Granskade publiceringar (publicerat eller accepterat för publicering av tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning eller liknande)

Diener, S. Andreas, L. Herrmann, I. Ecke, H. Lagerkvist, A. (2010) Accelerated carbonation of ashes and steel slags in a landfill cover construction. *Waste Management* No 1 (30) 132-139.

Herrmann, I. Diener, S. Lind, L. Andreas, L. (2010) Steel slag used in landfill cover liners – laboratory and field tests. *Waste Management & Research*. 28(12) 1114-1121.

Andersson, C, Björkman, B, Engström, F, Mostaghel, S, Samuelsson, C, The need for fundamental measurements for a sustainable extraction of metals, *Minerals Processing and Extractive Metallurgy* 120, 2011, 199-204.

Adolfsson, D., Engström, F., Robinson, R., Björkman, B. (2011) Cementitious Phases in Ladle Slag. *Steel Research International*, 82, 2011, 398-403.

Adolfsson, D., Engström, F., Robinson, R., Björkman, B. (2011) Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag. *Cement and Concrete Research*, 41, 2011, 865-71.

Engström, F, Adolfsson, D, Yang, Q, Samuelsson, C, Björkman, B. (2010) Crystallisation Behaviour of *Steelmaking Slags*, *Steel Research*, 2010, 81, 362-71.

Manuskript skickade till granskad publicering (inskickat till tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning, ange gärna vilken)

- Adolfsson, D., Robinson, R., Engström, F., Björkman, B., Hydraulic properties of mayenite. Submitted. *Cement and Concrete Research*
- Engström, F. et al A Fundamental Study Of The Solubility Of Pure Slag Minerals. Submitted. *Minerals Engineering*.
- Diener, S. Andreas, L. Stjernberg, J. Lagerkvist, A. Ageing of steel slags in a simulated landfill environment. *Waste Management*.
- Diener, S. Andreas, L. Lagerkvist, A. Environmental properties and ageing reactions of electric arc furnace and ladle slags – a review. Submitted. *Material Cycles and Waste Management*.
- Engström, F., Lidström Larsson, M., Samuelsson, C., Sandström, Å., Robinson, R., Björkman B. Ageing investigation of steel slags from EAF processes. Submitted. *Resources, Conservation and Recycling*.

Manuskript under bearbetning (avsett för publicering i tidskrift med vetenskaplig förhandsgranskning)

- Diener, S. Andreas, L. Lagerkvist, A. Steel slags in a landfill top cover liner – experiences from a full-scale experiment. Skickas till *Waste Management* under våren 2012.
- Engström, F. et al (2011) Aqueous solubility of chromium oxide in the solid/solid system of MgO-FeO.

Avhandlingar (både publicerade och under utarbetande)

- Engström, F. (2011) Mineralogical Influence on Leaching Behaviour of Steelmaking Slags. Doctoral thesis. *Luleå tekniska universitet*.
- Adolfsson, D. (2011) Cementitious properties of steelmaking slags. Doctoral thesis. *Luleå tekniska universitet*.
- Diener, S. Ageing of steel slag under laboratory and field conditions. Doctoral thesis. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. Planerad presentation under senare delen av 2012. *Luleå tekniska universitet*.

Tekniska rapporter (även interna rapporter, förutom de som listas i Bilaga 5)

- Andreas, L., Diener, S., Lagerkvist, A. (2012) Rekommendationer för användning av slagg i deponikonstruktioner - Krav, lämplighet, materialhantering och utläggning - Exemplet Hagfors kommunala deponi. LTU, Rapport inom Jernkontorets projekt 55012 "Konstruktionsprodukter baserade på slagg II".
- Engström, F., Yang, Q., Björkman, B., Adolfsson, D. (2012) Rekommendationer för hantering och modifiering av slagg. LTU. Rapport inom Jernkontorets projekt 55012 "Konstruktionsprodukter baserade på slagg II".

Övrig dokumentation

-

Bilaga 3 Annan resultat- och kunskapsförmedling

Tekniska och populärvetenskapliga publiceringar (utan vetenskaplig förhandsgranskning)

Diener, S. (2009) Åldringsbeteendet av stålslag i en deponisluttäckning. Bidrag till Larsson, Kjell-Arne (red.) Åter. VINNARE. för industrin. 2009. Rekord Media och Produktion AB, Stockholm.

Ogranskade konferenspublikationer

Andersson, C, Björkman, B, Engström, F, Mostaghel, S, Samuelsson, C, The need for fundamental measurements for a sustainable extraction of metals, Proc. *Seetharaman Seminar*, Stockholm, 2010.

Andreas, L., Diener, S., Lagerkvist, A. (2011) A field study using steel industry slags in a landfill cover construction. Poster. *2nd International Slag Valorisation Symposium: The transition to Sustainable Materials Management*. 18-20 April 2011. Leuven, Belgien.

Diener, S.; Brännvall, E.; Andreas, L. (2010) Leaching properties of steel slags after ageing under laboratory and field conditions. *ACEME-10. 3rd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering*. Nov 29 - Dec 1, 2010, Åbo, Finland.

Diener, S.; Andreas, L. Brännvall, E.; Lagerkvist, A. (2010) Evaluation and discussion of steel slag mineralogy after ageing under laboratory and field conditions. *6th ICLRS Intercontinental Landfill Research Symposium*. Kiroro Resort, Hokkaido, Japan, June 9-11, 2010.

Engström, F, Samuelsson, C, Björkman, B, (2009) Mineralogical Influence of Different Cooling Conditions on Leaching Behaviour of Steelmaking Slags, Proc. *1st International Slag Valorisation Symposium*, Leuven.

Engström, F., Pontinikes, Y., Geysen, D., Jones, P.T., Björkman, B., Blanpain, B. (2011) Hot stage slag engineering as a method to improve slag valorisation options. *2nd International Slag Valorisation Symposium: The transition to Sustainable Materials Management*. 18-20 April 2011. Leuven, Belgien.

Mostaghel, S, Engström, F, Samuelsson, C, Björkman, B, (2010) Stability of Spinel in a High Basicity EAF Slag, Proc. *6th European Slag Conference*, October 2010, Madrid, Spain.

Seminarier etc.

Andreas, L. (2011) Stålslag i deponisluttäckning. Konferenspresentation *IBC conference "De nya avfallsreglerna"*. Stockholm Febr 16-17, 2011.

Workshop resultatpresentation "Konstruktionsprodukter baserade på slagg" LTU. 2011-12-07.

Bilaga 4 Beskrivning av Stålforskningsprogrammet

Strategiskt Stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012

Svensk stålindustris marknadsledande position inom ett antal högt specialiserade nischer har sin grund i en konsekvent och långsiktig satsning på forskning. VINNOVA och Jernkontoret utarbetade 2006 på regeringens uppdrag ett gemensamt forsknings-program, Strategiskt stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012 (Stålforsknings-programmet), som syftar till att behålla och stärka denna position och samtidigt förbättra miljöprestationen.

Programmet är ett branschforskningsprogram vars mål är att förbättra den svenska stålindustrins konkurrenskraft, vilket också är skälet till att programmet administreras av Jernkontoret.

Stålforskningsprogrammet omfattar 245 miljoner kronor varav VINNOVA finansierar hälften. Resterande medel kommer från industrin, som kontanta medel eller i form av naturinsatser, t.ex. personal, forskningsresurser och experiment i produktionsanläggningar.

Branschens inflytande över programmet utövas genom en programstyrelse bestående av representanter för stålföretagen, Jernkontoret och VINNOVA. Programstyrelsen tar beslut om vilka projekt som ska beviljas medel. Prioritering av projektförslagen och den vetenskapliga granskningen av dessa handläggs av en grupp bestående av ordförandena i Jernkontorets teknikområden och adjungerade representanter från forskningsutförarna. Dessutom görs en extern utvärdering av ansökningarna som är vägledande för beslutet. Utlysningprocessen administreras av Jernkontoret.

Sammanlagt 32 projekt har beviljats anslag inom programmet. Forskningen genomförs i nära samarbete mellan järn- och stålindustrin, stålbranschens forskningsinstitut Swerea MEFOS och Swerea KIMAB, samt universitet och högskolor med utbildning och forskning inriktad på ståltillverkning och handlar såväl om att utveckla nya produkter som att effektivisera och miljöanpassa produktionsprocesserna. I vissa projekt deltar även kunder och leverantörer till stålindustrin. Det praktiska arbetet utförs i forskningskommittéer inom Jernkontorets gemensamma forskning. I forskningskommittéerna deltar representanter för industriföretagen och forskningsutförarna. I arbetet tillämpas Jernkontorets regler för den gemensamma forskningen.

Programmets projekt täcker fyra ämnesområden:

- **Utveckling för hållbar tillväxt** från minskade utsläpp till högpresterande stål med minskad materialåtgång.
- **Morgondagens material och tillverkningsmetoder** från utveckling av lättare och starkare stål till hur materialet formas och sammansätts.
- **Avancerad modellering** från modellering på atomär nivå till studier av hur stålet beter sig i olika applikationer.
- **Förbättrad processteknik** från förbättrade mätmetoder till effektivare processteg.

Kraven på projekten inom Stålforskningsprogrammet är en tydlig förankring i industrin, och att programmet som helhet täcker hela värdekedjan, från råvaror till produkter. Huvuddelen av forskningsmedlen är avsedd för projekt med en tydlig anknytning till konkreta industriella behov, vars resultat relativt snabbt kan implementeras i produktionen. Resterande del av forskningsmedlen kan användas för så kallade innovativa forskningsprojekt med betydligt högre risk både vetenskapligt och i fråga om de kommersiella möjligheterna för stålindustrin på kort och medellång sikt.

Bilaga 5 Bifogade rapporter och artiklar

Sammanfattningarna av projektresultaten i kapitel 4 och 5 är baserade på ett antal rapporter och artiklar som är sammanställda i denna bilaga. Rapporterna är till stor del företagsinterna och inte alla artiklar har publicerats än, varför vi ber att kontakta de enskilda författarna för att få tillgång till de bilagor som inte är publicerade.

- Bilaga 5.1 Strandkvist, I., Engström, F. (2012) Syntetisering av slaggmineral II. Intern rapport. LTU 2012.
- Bilaga 5.2 Strandkvist, I., Engström, F. (2012) Syntetisering av fasta lösningar av wustit typ. Intern rapport. LTU 2012.
- Bilaga 5.3 Strandkvist, I., Engström, F. (2012) SEM- komplimentering till inverkan av järnoxid på ljusbågsugsslaggens kromlakningsegenskaper. Intern rapport. LTU 2012.
- Bilaga 5.4 Engström, F. (2012) Kromfördelning i slaggmineral. Intern rapport. LTU 2012.
- Bilaga 5.5 Engström, F., Yang, Q. (2012) Fördelning av molybden som funktion av basisitet B_2 (CaO/SiO₂). Intern rapport. LTU 2012.
- Bilaga 5.6 Yang, Q. (2012) Lakningsbenägenhet för molybden i LB (EAF) slagg. Intern rapport. LTU 2012.
- Bilaga 5.7 Diener, S. Andreas, L. Lagerkvist, A. Environmental properties and ageing reactions of electric arc furnace and ladle slags – a review.
- Bilaga 5.8 Friedrich F. (2010) Exploring test methods and mechanical properties of steel slags with regard to their use as construction materials. Projektarbete LTU, Samhällsbyggnad / Avfallsteknik.
- Bilaga 5.9 Andreas, L. (2012) Karakterisering av skänk- och AOD-slagg från Ovako Hofors och Outokumpu Avesta AB. Intern rapport. LTU 2012.
- Bilaga 5.10 Diener, S. Andreas, L. Herrmann, I. Ecke, H. Lagerkvist, A. (2010) Accelerated carbonation of steel slags in a landfill cover construction. Waste Management No 1 (30) 132-139.
- Bilaga 5.11 Diener, S. Andreas, L. Stjernberg, J. Lagerkvist, A. Ageing of steel slags in a simulated landfill environment. Waste Management.
- Bilaga 5.12 Eriksson, I., Jurén C. (2011) Test of slag as landfill liner material. Intern rapport Höganäs Sweden AB 2011
- Bilaga 5.13 Johansson, L. (2011) Slutrapport metodutveckling slagglakningstester (SLAKT). Intern rapport. Avesta Research Centre. Outokumpu Stainless Avesta.
- Bilaga 5.14 Johansson, L. (2011) Kartläggning slagglakning vid Avesta Jernverk. Intern rapport. Avesta Research Centre. Outokumpu Stainless Avesta.
- Bilaga 5.15 Eriksson, Daniel (2010) Lakningsegenskaper hos AOD- Slagg vid Avesta Jernverk. Examensarbete. KTH Kemiteknik, Stockholm
- Bilaga 5.16 Johansson, L. (2011) Intern rapport. Avesta Research Centre. Outokumpu Stainless Avesta.
- Bilaga 5.17 Adolfsson, D, Cementitious Properties of Steelmaking Slags, PhD Thesis, Luleå University of Technology, April 2011.
- Bilaga 5.18 Diener, S. Andreas, L. Lagerkvist, A. Steel slags in a landfill top cover liner – experiences from a full-scale experiment. Under bearbetning
- Bilaga 5.19 Haase, B. (2012) Undersökning av slaggytor. Intern rapport. Höganäs Sweden AB.

- Bilaga 5.20 Lind, L. (2011) Intern rapport. Sandvik Materials Technology AB.
- Bilaga 5.21 Ullberg, J. (2009) Provsträcka med hyttsten på väg BD563 vid Fällträsk.
Rapport 2009:141. Vägverket Väg, sektion Vägteknik.
- Bilaga 5.22 Pålsson, K. (2011) Intern rapport. Ovako Hofors.

DEN SVENSKA STÅLINDUSTRINS BRANSCHORGANISATION

Jernkontoret grundades 1747 och ägs sedan dess av de svenska stålföretagen. Jernkontoret företräder stålindustrin i frågor som berör handelspolitik, forskning och utbildning, standardisering, energi och miljö samt skatter och avgifter. Jernkontoret leder den gemensamma nordiska stålforskningen. Dessutom utarbetar Jernkontoret branschstatistik och bedriver bergshistorisk forskning.

JERNKONTORET

Box 1721, SE-111 87 Stockholm, Sweden • Kungsträdgårdsgatan 10
Telephone +46 8 679 17 00 • Fax +46 8 611 20 89
E-mail office@jernkontoret.se • www.jernkontoret.se

