

Konstruktionsprodukter baserade på slagg

Lale Andreas, Fredrik Engström, Silvia Diener, Bo Björkman, Lotta Lind

Nyckelord:

Konstruktionsmaterial, restprodukt, slagg, mineralogisk, ballast

Luleå tekniska universitet

**Konstruktionsprodukter
baserade på slagg**

**Construction materials based on
slag from steel production**

JK55011

Till rapporten hör ett antal bilagor, se sid. 25. Dessa finns inte med i denna rapport men kan beställas via Jernkontoret av kajsa.callh@jernkontoret.se.

Slutrapport

Juni 2009

Lale Andreas, Fredrik Engström, Silvia Diener,
Bo Björkman, Lotta Lind

Kontakt

Lale Andreas
0920-49 2262; 070-266 96 11
Lale.Andreas@ltu.se

Bo Björkman
0920-49 1292; 070-664 16 56
Bo.Bjorkman@ltu.se

Sammanfattning

Slagger är mycket komplexa material. Från varje stålverk och från varje separat processsteg i ståltillverkningen uppkommer olika typer av slagg. Dessa har alla unika egenskaper, som bl.a. beror på deras mineralogiska sammansättning.

Det övergripande målet för detta projekt var att öka de grundläggande kunskaperna om slaggernas mineralogiska sammansättning och de enskilda mineralernas bidrag till slaggernas egenskaper i syfte att skapa större och nya möjligheter till avsättning för dessa.

Projektet har pågått under två år och har bedrivits genom ett tätt samarbete mellan Luleå tekniska universitet (avdelningar för Processmetallurgi och för Avfallsteknik) och följande företag:

- Uddeholm Tooling AB
- SSAB Merox AB
- SSAB Strip Products AB
- Outokumpu Stainless AB
- Ovako Hofors AB
- Ovako Bar AB
- Ragn-Sells AB
- Höganäs AB
- Sandvik Materials Technology AB

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

Resultaten från forskningen visar bl.a. att:

- En slaggs mineralsammansättning i stor utsträckning påverkar dess egenskaper, någonting som tidigare inte visats.
- Vissa egenskaper, som t.ex. utlakningen av molybden från molybdenrik ljusbågsugns slag och expansion hos instabil LD-slag, kan minskas genom modifieringar av slaggen och dess mineralogiska sammansättning.
- Hårdheten hos slagg kan påverkas av kylningsförloppet.
- Många slagger har cementbindande egenskaper, som med framgång utnyttjas t.ex. då slagg används som bindemedel i restproduktbriketter eller som en bindande komponent i hårdgjorda ytor för materialhantering och i tätskiktet i avslutningskonstruktionen på deponier.

Följande slutsatser kan dras från projektarbetet:

- 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 slaggar från ståltillverkningen i Sverige.
- Den ökande användningen av slaggar från ståltillverkningen resulterar i både minskad deponering och minskad användningen av jungfruliga material. Detta bidrar till utvecklingen av hållbar tillväxt och till uppfyllelsen av Sveriges nationella miljömål, ”God bebyggd miljö”.

Summary

Slags are very complex materials. From each steel plant and from each separate step in the steel production process, different slag types are produced. These all possess unique properties, which to a large extent depend on the mineralogical composition.

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 was performed through close co-operation between the Technical University of Luleå and the following steel producing companies:

- Uddeholm Tooling AB
- SSAB Merox AB
- SSAB Strip Products AB
- Outokumpu Stainless AB
- Ovako Hofors AB
- Ovako Bar AB
- Ragn-Sells AB
- Höganäs AB
- Sandvik Materials Technology 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 results from the work can be summarized as follows:

- The mineralogical composition influences the properties of the slag to a large extent.
- Properties, as e.g. leaching of molybdenum from molybdenum rich EAF slag and swelling of instable LD slag, can be decreased by modifications of the slag and its mineralogical composition.
- The hardness of slags can be influenced by for example the mode of cooling the slag from liquid state.
- Many slags show cementitious properties, which can be taken advantage of by using the slag as for example binder in briquettes or as a binding agent in constructions as liners in landfills top covers or surfaces for material storage and handling.

The following conclusions can be drawn from the project:

- The combination of theoretical calculations and modeling, test and investigations in lab and verification of results and conclusions through pilot and full scale trials has been very fruitful in achieving a larger understanding of how the mineralogical composition of a slag influences its properties and the behaviour.
- 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 increased use of slags will result in decreased landfilling and decreased use of virgin materials. This will in the long run contribute in the development of sustainable growth and in fulfilling the national environmental goal, "God bebyggd miljö".

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
2	MÅL	3
3	MATERIAL OCH METOD	4
4	TEORETISKA BERÄKNINGAR OCH FÖRSÖK I LAB-SKALA	8
4.1	Termodynamiska beräkningar av mineralsammansättningen	8
4.2	Framställning och undersökning av syntetiska mineraler	8
4.3	Förekomstformer, löslighet och utlakning av molybden hos molybdenrik slagg från Uddeholm Tooling AB	10
4.4	Undersökning av ljusbågsugns- och skänkslaggers långtidsbeteende vid användning i en deponisluttäckning – Åldringsförsök i labskala	11
4.5	Kylningsförloppets inverkan på krossnings- och lakningsegenskaper hos ljusbågsugnsagg från Uddeholm Tooling	12
4.6	Malbarhetsundersökning av skänkslagg från SSAB Strip Products	13
4.7	Förstudie av cementbindande egenskaper hos skänkslagg från SSAB	13
4.8	Skänkslaggbriketter – SSAB Strip Products	14
4.9	Stabilisering av LD-slagg från SSAB Plate	14
4.10	Karakterisering av tunnelugnsslagg från Höganäs AB	15
4.11	Karakterisering av slam från slaggården i Avesta (Outokumpu Stainless)	15
5	FÖRSÖK I PILOT- OCH FULLSKALA	17
5.1	Provytor med slaggasfalt inom Ovakos industriområde i Hofors	17
5.2	Deponitäckning och yta för materiallagring och hantering (Ragn-Sells AB och Ovako Hofors AB)	18
5.3	Användning av slagg från Uddeholm Tooling AB i en deponisluttäckning – Fältförsök Hagfors 18	
5.4	Skänkslaggbriketter – SSAB Strip Products	19
6	SLUTSATSER	20
7	FÖRSLAG PÅ FORTSATT FORSKNING OCH IMPLEMENTERINGSINSATSER	21

8	REFERENSER, PUBLIKATIONER	23
9	BILAGOR	25

1 INLEDNING

Slagger från stålindustrin är material med flera goda, specifika kemiska och tekniska egenskaper. Dessa egenskaper utnyttjas i många olika typer av applikationer, som t.ex. ballastmaterial i väg- och anläggningsbyggande och som cementliknande bindemedel.

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 slaggtypen som produceras.

I Tabell 1 sammanfattas i stort sett alla de slaggtypen som produceras inom svensk stålindustri och från vilken typ av processteg de härstammar. Det framgår även vilka slagger som undersökts inom projektet och med vilken typ av undersökning.

Tabell 1 Slaggtypen inom svensk stålindustri, processtyp där de uppstår och undersökningar i projektet

Slaggtyp	Uppkomst/Process	Plats/företag	Labförsök	Fältförsök
Masugnsslagg				
- Luftkyld		SSAB (Strip Products) SSAB (Plate)		
- Vattengranulerad		SSAB (Plate)		
LD-slagg	LD-konverter	SSAB (Plate) SSAB (Strip Products)	x x	
Ljusbågsugnsslagg	Ljusbågsugn			
- Rostfritt		Sandvik Outokumpu		
- Kolstål/låglegerat		Ovako Bar Ovako Hofors Uddeholm Tooling Höganäs Scana Steel	x	x x
AOD-slagg (rostfritt)	AOD-konverter	SMT Outokumpu	x (slam)	
Skänkslagg	Raffinering av stål/ Skänkugn	Uddeholm Tooling SSAB (Plate) SSAB (Strip Products) Outokumpu Scandust Sandvik Ovako Bar Ovako Hofors	x	x
Tunnelugnsslagg		Höganäs	x	

Totalt produceras drygt 1.3 miljoner ton slagg per år i Sverige. Ungefär hälften används idag i olika applikationer både internt inom stålverken och externt inom flera olika områden.

Det finns flera anledningar till att inte större andel av de producerade slaggerna används, varav följande kan nämnas:

- Vissa slaggar har egenskaper, som gör att de inte lämpar sig för användning (t.ex. är instabila och sönderfaller till pulver i luft eller lakar vissa metaller).
- De grundläggande kunskaperna om slaggernas sammansättning och om möjligheterna att modifiera instabila slaggar till stabila material är för små.
- De svenska myndigheternas nuvarande och kommande krav på t.ex. slaggar för anläggningsbyggande fokuserar mer på innehåll av bl.a. metaller än på vad som faktiskt når recipienten och påverkar miljön.

Slaggar från ståltillverkning används i större utsträckning i andra länder både inom EU och internationellt, där man fokuserar mer på produkttegenskaper och minskad användning av jungfruliga material.

Föreliggande projekt syftar till att ge ökade grundläggande kunskaper om slaggerna och deras mineralsammansättning för att skapa större möjligheter till avsättning inom olika användningsområden.

Genom ökad användning av slaggar minskas både de mängder material från ståltillverkningen som deponeras och användningen av jungfruliga material. Detta bidrar dels till utvecklingen av hållbar tillväxt, ett av målen för Stålforskningsprogrammet (se Bilaga 2) och dels till uppfyllelsen av Sveriges nationella miljömål, ”God bebyggd miljö”.

I Tabell 1, ovan, ses även vilka av de svenska slaggerna som har undersökts inom projektet. Tack vare att det finns stora likheter mellan slaggtyperna är många av resultaten från projektets forskning snabbt och efter bara enkla verifieringsförsök applicerbara på även andra slaggar än de här undersökta.

Eftersom skillnaderna mellan de olika slaggerna dock i vissa fall är stora, finns mycket ytterligare forskning som behöver 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.

2 MÅL

Det övergripande målet för projektet var att genom ökade kunskaper skapa större möjligheter till avsättning för slaggar från stålframställning.

Detta uppnåddes genom följande delmål:

1. Att utgående från den kemiska sammansättningen hos slaggerna, kombinerat med temperatur och andra processparametrar i respektive stålverk, teoretiskt beräkna vilka mineraler som kan bildas i respektive slaggtyp.
2. Att på lab tillverka de enligt beräkningarna vanligast förekommande mineralerna.
3. Att genom att undersöka egenskaper, såsom vattenlöslighet, metallakning, stabilitet, cementbindande egenskaper m.m. hos respektive mineral, förutsäga olika egenskaper hos slaggerna som mineralerna bildar.
4. Att utifrån resultaten ge stålverken förbättrade kunskaper om hur respektive slagg kan modifieras (genom t.ex. olika kylningshastighet, tillsättning av andra material till den flytande slaggen och/eller blandning av olika typer av slaggar eller av slagg med andra material) för att skapa material med förutbestämd mineralogisk sammansättning för att uppnå specifika egenskaper lämpade för specifika applikationer.
5. Att genom försök i pilot- och/eller fullskala testa och verifiera de erhållna resultaten.

Eftersom den ursprungliga ansökan om medel till projektet avsåg fyra års forskning och medel för endast två år beviljades, är dessa mål modifierade jämfört med dem i ansökan för att anpassas till den kortare projekttiden.

Metoderna använda i projektet är i nedanstående avsnitt (Tabell 2) beskrivna utifrån målen uppsatta i den ursprungliga ansökan.

3 MATERIAL OCH METOD

Projektet har bedrivits genom tätt samarbete mellan Luleå tekniska universitet (avdelningar för Processmetallurgi och för Avfallsteknik) och följande företag:

- Uddeholm Tooling AB
- SSAB Merox AB
- SSAB Strip Products AB
- Outokumpu Stainless AB
- Ovako Hofors AB
- Ovako Bar AB
- Ragn-Sells AB
- Höganäs AB
- Sandvik Materials Technology AB

Forskningen genomfördes genom en kombination av teoretiska beräkningar och modelleringar, laboratorieförsök, samt verifiering av slutsatser och resultat i pilot- och fullskala. Detta gjordes för att uppnå en större förståelse för de enskilda mineralernas bidrag till slaggernas egenskaper och beteende under verkliga förhållanden.

Slagger är mycket komplexa material och många av deras egenskaper, som t.ex. hårdhet, stabilitet (både kemiskt och fysiskt/mechaniskt) och cementbindande egenskaper, beror på dess mineralogiska sammansättning. För att lättare förstå de olika slaggernas egenskaper och hur de uppkommer, behöver man först lära känna de enskilda mineraler som bygger upp slaggerna. Initialt framställdes därför de mineraler, som man genom teoretiska, termodynamiska beräkningar kommit fram till är vanligast förekommande i slagger. Mineralernas egenskaper studerades och baserat på den kunskap som därigenom framkom, ställdes de enskilda mineralernas specifika egenskaper i relation till slaggernas egenskaper som helhet. Detta medförde att modifieringar av slaggernas mineralsammansättning för att uppnå önskade egenskaper kunde föreslås.

Kunskap om mineralernas löslighet är en förutsättning för att kunna uppskatta utlakningen av metaller från slaggen (t.ex. krom, molybden, m.fl.). Genom att systematiskt bestämma de enskilda mineralernas upplösningshastighet vid olika pH, har lakbarheten av metaller ur vart och ett av de enskilda mineralerna bestämts. Lakbarheten av en specifik metall från en slagg beror även på till vilket mineral och på vilket sätt metallen är bunden. För att på sikt kunna förutse och eventuellt minska molybdenutlakningen från molybdenrika slagger, har detaljstudier med röntgendiffraktion och svepelektronmikroskopi av molybdens förekomstform i slagg påbörjats.

Stabiliteten hos en slagg och lakningen av metaller ur den kan påverkas genom förändringar av mineralsammansättningen, t.ex. genom att kyla slaggen olika snabbt, genom att blanda in andra material i den heta flytande slaggen och/eller genom att blanda en slagg med andra slagger eller andra material. Dessa modifieringssätt har testats i lab- pilot och fullskala för flera olika slagger.

Många av de mineraler som slaggerna är uppbyggda av reagerar med vatten, vilket bl.a. ger slaggerna cementliknande egenskaper. Även dessa egenskaper undersöktes för de enskilda mineralerna med hjälp av kalorimetriska mätningar (dvs. mätningar av värmeutveckling i materialen p.g.a. kemiska reaktioner).

De cementbindande egenskaperna hos flera olika slaggar utnyttjades då de i pilot- och fullskaleförsök används som t.ex. bindemedel i briketter, som tätskikt i avslutningen av deponier.

Hårdheten hos slaggar har undersökt bl.a. genom tester av krossnings- och malningsbarheten. Hårdhet, stabilitet och goda slitegenskaper är förutsättningar för att kunna använda slagg som ballast i asfalt, vilket är testat i full skala.

Mineralsammansättningen och därmed egenskaperna hos ett slaggmaterial, som används i en konstruktion, påverkas och förändras med tiden av miljön (temperatur, fukthalt, gasammansättning 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, röntgendiffraktion och svepelektronmikroskopi använts. Undersökningarna gjordes på slaggar före och efter blandning med vatten, samt 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 försöksavslutningsytor som byggts på en kommunal deponi i Hagfors. Detta har gjorts genom att provtagning och samma typer av undersökningar har genomförts på dem slaggar som använts i konstruktionen som i labförsöken ovan, samt analyser av både gas och vatten från deponin.

Av Tabell 1 ovan framgår det vilka av de svenska slaggar som ingått i projektets forskning.

I Tabell 2 nedan är metoderna som användes i de enskilda delstudierna sammanställda, utgående från målen i den ursprungliga ansökan (fyraårigt projekt). Resultaten finns sammanfattade i kapitel 4 och 5, och mer i detalj i bilaga 3.

Tabell 2 Sammanställning av de metoder som användes i projektets delstudier, i förhållande till de i den ursprungliga ansökan uppsatta delmålen.

Delmål i ursprunglig ansökan	Metod/delstudie (hänvisning till kapitel)
<ul style="list-style-type: none"> • Bestämma möjligheten att erhålla hårda och stabila slaggar som lämpar sig t.ex. som ballast i asfaltläggningar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Termodynamiska beräkningar av mineral-sammansättningar (4.1) • Framställning och undersökning av syntetiska mineral (4.2) • Kylningsförloppets inverkan på krossningsegenskaperna hos ljusbågsugnsagg från Uddeholm Tooling (4.5) • Malningsundersökning av skänkslagg (SSAB) (4.7) • Stabilisering av LD-slagg SSAB (4.8) • Konstruktion och uppföljning av provtyor med slaggasfalt och en referensyta med standardasfalt, Ovako (5.1)
<ul style="list-style-type: none"> • Klargöra de mekanismer som styr krom- och molybdenutlakningen från slagg. • Klargöra huruvida olika typer av slagg genom modifiering kan stabiliseras med avseende på utlakning av metaller som krom och molybden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Termodynamiska beräkningar av mineral-sammansättningar (4.1) • Framställning och undersökning av syntetiska mineraler och titrering vid olika pH (4.2) • Förekomstformer och löslighet av molybden i ljusbågsugnsagg från Uddeholm Tooling AB (4.3.1) • Utlakningsegenskaper efter karbonatisering av molybdenrik slagg från Uddeholm Tooling AB (4.3.2) • Kylningsförloppets inverkan på lagnings-egenskaper hos ljusbågsugnsagg från Uddeholm Tooling AB (4.5)
<ul style="list-style-type: none"> • Bestämna vilka mineralogiska faser i slagg som påverkar slaggens cementegenskaper. 	<ul style="list-style-type: none"> • Framställning och undersökning av syntetiska mineraler (4.2) • Förstudie av cementbindande egenskaper hos skänkslagg SSAB (4.6) • Karakterisering av tunnelugnsslagg från Höganäs AB (4.10)

Delmål i ursprunglig ansökan	Metod/delstudie (hänvisning till kapitel)
<ul style="list-style-type: none"> Föreslå möjliga vägar för att anpassa slaggens sammansättning så att den ger önskade hydratiserings-egenskaper alternativt kunna föreslå hur slagg kan kombineras med andra material för att nå önskade egenskaper. 	<ul style="list-style-type: none"> Användning av slagg från Uddeholm Tooling AB i en deponisluttäckning (Optimering av blandningen av ljusbågsugns- och skänkslagg) (5.3)
<ul style="list-style-type: none"> Verifiera resultaten i storskaliga försök, exempelvis bindemedel i restproduktbriketter, tätskikt vid deponitäckning, olika typer av markbyggnader, markstabilisering 	<ul style="list-style-type: none"> Provytor med slaggasfalt, Ovako (5.1) Användning av ljusbågsugns- och skänkslagg i en deponisluttäckning – Fältförsök Hagfors (5.2) Användning av slagg från Uddeholm Tooling AB i en deponisluttäckning (5.3) Skänkslaggbriketter – SSAB Strip Products (5.4)
<ul style="list-style-type: none"> Övrigt Grundläggande karakterisering 	<ul style="list-style-type: none"> Karakterisering av tunnelugnsslagg från Höganäs AB (4.10) Karakterisering av slam från slaggården i Avesta (Outokumpu Stainless) (4.11)

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

Flera av studierna är inte avslutade, utan ska drivas vidare, fördjupas, samt breddas och verifieras om projektgruppen beviljas de ansökta medlen från Stålforskningsprogrammet.

4 TEORETISKA BERÄKNINGAR OCH FÖRSÖK I LAB-SKALA

Resultaten från teoretiska beräkningar och försök i lab skala 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 Bilaga 3.

4.1 Termodynamiska beräkningar av mineralsammansättningen

(se bilaga 3.1)

För att öka kunskapen om slaggernas mineralogiska sammansättning och öka förståelsen för hur slaggerna kristalliserar vid svalning, har termodynamiska beräkningar genomförts på samtliga deltagande företags slaggar (totalt 17 slaggar). Beräkningarna utgick från den kemiska sammansättningen hos respektive slagg.

Studien genomfördes för att belysa likheter och olikheter mellan de olika slaggerna. En vanlig slutsats som ofta dras, är att den kemiska sammansättningen hos en slagg och variationer i denna ger slaggen dess egenskaper. Denna slutsats dras då ofta utan att ta hänsyn till eller ha kunskap om den mineralogiska sammansättningen. Samma kemiska sammansättning hos två olika slaggar kan resultera i olika mineralogiska sammansättningar (bl.a. beroende på under vilka förhållanden slaggerna har bildats) och detta kan innebära stora skillnader i egenskaperna.

Beräkningarna visade på stora likheter mellan de olika slaggerna; mineraler som merwinit ($\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$), dikalciumsilikat ($\gamma/\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) och spinell (AB_2O_4) återfanns i så gott som alla slaggar. Ett par ljusbågsugns slaggar från tillverkning av låglegerat stål, uppvisade t.ex. stora likheter med LD-slagg. Samtliga skänkslaggar som ingått i studien var enligt beräkningarna rika på kalciumsilikat och kalciumaluminater, båda mineraler som i tidigare studier kunnat kopplas till cementbindande egenskaper.

4.2 Framställning och undersökning av syntetiska mineraler

(se bilaga 3.2)

4.2.1 Framställning på lab. av enskilda mineraler som förekommer i slaggar

Utifrån de teoretiska, termodynamiska beräkningarna, som beskrivits ovan, valdes de sju i slaggerna mest vanligt förekommande mineralerna ut för syntetisk tillverkning och div. undersökningar. Följande mineraler tillverkades efter utveckling av tillverkningsmetod:

1. Dikalciumferrit	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$
2. Mayenit	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
3. Merwinit	$\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$
4. Dikalciumsilikat	$\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$
5. Åkermanit	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$
6. Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
7. Trikalcialuminat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$

4.2.2 Bestämning av mineralens cementbindande egenskaper

För att undersöka de cementbindande egenskaperna, genomfördes kalorimetriska studier på fem av de tillverkade mineralen (mayenit, merwinit, dikalciumferrit, åkermanit och gehlenit). Kalorimetrisk mätning är en metod som används för att mäta den värme som frigörs då ett material reagerar kemiskt, i det här fallet då mineralerna reagerade med vatten.

Då värmeutvecklingen från de undersökta mineralerna jämfördes, kunde stora variationer urskiljas och reaktionsvärmen från de fem mineralerna varierade enligt:

Mayenit > dikalciumferrit > gehlenit > merwinit > åkermanit

Värmeutveckling från mayenit var efter en reaktionstid på 15 timmar 46 gånger högre än den för åkermanit. Kraftig värmeutveckling vid den här typen av reaktioner kan vara en indikation på lovande cementbindande egenskaper, men säger ingenting om de långsiktiga reaktionerna. Resultatet speglar alltså endast materialens inledande reaktionsbenägenhet med vatten vid 20°C i förhållande till varandra.

4.2.3 Bestämning av mineralernas upplösningsförmåga vid olika pH

Mineralernas upplösningshastighet som funktion av pH undersöktes för samtliga sju mineral vid pH 3, pH 7 och pH 10.

Resultaten visar att för samtliga mineraler, förutom dikalciumferrit, avtar upplösningshastigheten med stigande pH. Vid pH 3 uppnåddes fullständig upplösning för merwinit redan efter drygt 20 minuter, medan upplösningen vid pH 7 fortfarande pågick efter 24 timmar.

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 nämnas dikalciumsilikat och gehlenit: Vid pH 3 är upplösningen av dikalciumsilikat fullständig redan efter 30 minuter. Vid samma pH pågick fortfarande upplösningen av gehlenit då försöket avslutades efter 72 timmar.

4.2.4 Slutsatser

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

4.3 Förekomstformer, löslighet och utlakning av molybden hos molybdenrik slagg från Uddeholm Tooling AB

4.3.1 Förekomstformer och löslighet av molybden i ljusbågsugnsagg från Uddeholm Tooling AB

(se bilaga 3.3)

En inledande studie har genomförts med avsikt att identifiera hur molybden föreligger (hur och till vilket mineral molybden är bundet) i molybdenrik ljusbågsugnsagg från Uddeholm Tooling AB. Slagg direkt från ståltillverkningen, som innehåller ca 0.25 vikts-% Mo undersöktes med svepelektronmikroskopi och XPS (X-ray Photo Electron Spectroscopy, en känslig analysmetod för bestämning av mycket låga halter av ämnen). Mo^{6+} kunde detekteras, men molybdenhalten var dock för låg för att något mineral skulle kunna identifieras. Slaggen laktetades även med dynamisk lakning.

För att hitta något molybdeninnehållande mineral dopades därefter ljusbågsugnsaggen med 5 respektive 10 vikts-% MoO_3 och undersöktes med svepelektronmikroskopi och röntgendiffraktion. Ett molybdenmineral, Powellit, identifierades.

Studien kan så här långt sammanfattas i följande slutsatser:

1. I den slagg som undersöktes, förekommer molybden som Mo^{6+} .
2. Då slaggen modifierades genom tillsats av molybden kunde ett molybdenrikt mineral identifieras, powellit (CaMoO_4).
3. Molybden är betydligt mer lösligt jämfört med element som krom och kalk.
4. Lakbarheten av molybden i slaggen som undersökts, ökar med ökande L/S (Liquid/Solid) förhållande.

4.3.2 Utlakningsegenskaper efter karbonatisering av molybdenrik slagg från Uddeholm Tooling AB

(se bilaga 3.4)

Eftersom molybdenrik ljusbågsugnsagg från Uddeholm Tooling AB (ca 0.25 % Mo) i tidigare lakningsundersökningar (bl.a. enligt ovan) visat på hög utlakning av molybden, genomfördes laktester på modifierade slaggprover. Syftet var att studera hur karbonatisering och cementbindning påverkar lakbarheten av molybden. Testerna utfördes på: obehandlad slagg, karbonatiserad slagg (slag som lagrats i fuktig och CO_2 -rik atmosfär), samt på packad och lagrad (härdad) tätskiktblandning innehållande två sorter av ljusbågsugnsagg och skänkslagg, som har cementbindande egenskaper.

Molybdenutlakningen i slaggen halverades efter karbonatiseringen och från tätskiktblandningen lakades bara en tredjedel ut, jämfört med från originalmaterialet. Detta betyder att den molybdenrika slaggen utan problem kan användas som komponent i tätskiktet vid sluttäckningen av deponier eller i liknande konstruktioner, eftersom den klarar lakningskraven för icke farligt avfall. I det här försöket testades den molybdenrika slaggen endast i bland-

ning med två cementbindande slaggar. I praktiken (t.ex. i provyta 3 på Hagfors deponi, se nedan) blandades den dock med fler slaggar, vilket innebär att andelen molybdenrik slagg blev ungefär en tredjedel mindre än i detta försök och utlakningen av molybden följaktligen ännu lägre.

4.4 Undersökning av ljusbågsugns- och skänkslaggers långtidsbeteende vid användning i en deponisluttäckning – Åldringsförsök i labbskala

(se bilaga 3.5)

För att beskriva slaggernas förändringar och långtidsbeteende avseende mekanisk och kemisk stabilitet under deponiförhållanden, studerades hur deras mineralsammansättning påverkas av miljön i sluttäckningskonstruktionen på en deponi. Av många tänkbara faktorer, antas 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 t.ex. vittring, lakning och diagenes, d v s upplösning av mineraler, interna omlagringar och utfällningar, under relativt konstanta kemiska förhållanden i övrigt.

Förändringarna i en tätskiktetsblandning bestående av ljusbågsugnsagg och skänksagg studerades efter accelererad åldring under 3 respektive 10 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. Faktorerna som valdes var:

- Koldioxidhalt i atmosfären kring tätskiktet
- Relativ fukthalt
- Temperatur
- Vattnet som kommer i kontakt med tätskiktet
- Åldringstid

De studerades med avseende på effekten de kan ha på tätskiktsegenskaperna över tiden.

Mineralogin och lakningsegenskaperna hos slaggblandningen efter åldringen studerades med hjälp av två olika lakteter (L/S10 och sekventiellt laktet), termiska analyser, genom mätning av syraneutralisationskapaciteten (ANC – acid neutralisation capacity) och med röntgendiffraktion (XRD).

Resultaten från undersökningarna visade följande:

Utlakningen från proverna var över lag låg i förhållande till gränsvärdena för mottagning vid deponi för inert avfall; endast molybden visade på lakvärden som låg något över gränsvärdet för enstaka prover. Makroelement som kalcium, aluminium, svavel och natrium lakades mest, medan metaller som krom, nickel, bly och zink bara observerades i mycket låga halter i lakvattnet, ofta under detektionsgränsen. Dessa resultat visar att dessa slaggmaterial utan problem kan användas som konstruktionsmaterial på deponier.

Exponering för koldioxidrik atmosfär hade störst påverkan på lakningsegenskaperna. Lakningen av kalcium och aluminium minskade efter åldring vid högre halter av koldioxid.

De termiska analyserna visade på nedbrytning av karbonater, dvs. att karbonater hade bildats under lagringen.

ANC minskade inte vid upp till 10 månaders åldring; uppdelning av titreringen i två steg visade dock en förskjutning av buffringsområdena till lägre pH-områden för de längre åldrade proverna, förmodligen på grund av karbonatbildning.

Mineralogin hos de undersökta slaggerna var komplex med en stor blandning av olika mineraler. Främst detekterades kalciumsilikater, monticellite, periklas, mayenit och en spinellfas. Andra, möjligen närvarande mineraler var gehlenite, merwinit, åkermanit och järn. De studerade, korta karbonatiseringstiderna visade sig inte ha någon signifikant påverkan på den mineralogiska sammansättningen, förutom en viss kalcitbildning.

Följande slutsatser kan dras från åldringsförsöken:

- Utlakning av vissa element minskar under lagringen. Dock var utlakningen redan före åldringen så låg – lägre än gränsvärdena för mottagning vid deponi för inert avfall – att det inte innebär några problem att använda dessa material i en konstruktion på en deponi.
- Utfällningen av karbonater minskar porvolymen och därmed förväntas tätskiktets vattengenomsläpplighet minska.
- Karbonatiseringen förväntas också öka tätskiktets mekaniska stabilitet genom en ökning av densiteten.

För en mer fullständig prognos av det långsiktiga beteendet hos slagg, bör även resultaten från resterande prover från åldringsförsöken (22 och 30 månaders åldringstid), mekaniska tester och ytterligare resultat från fältförsöket på deponin i Hagfors tas med i utvärderingen.

4.5 Kylningsförloppets inverkan på krossnings- och lakningsegenskaper hos ljusbågsugnsslagg från Uddeholm Tooling

(se bilaga 3.6)

På uppdrag av Uddeholm Tooling AB genomfördes vid LTU en studie med målet att kartlägga hur mineralogin, lakningsbenägenheten och krossningsegenskaperna hos tre olika ljusbågsugnsslagger från ståltillverkningen hos Uddeholm påverkades av hur snabbt slaggerna kylde.

Slaggerna smältes om och kylde på två olika sätt:

- snabbt genom att de hällde på en stålplåt och
- långsamt, genom att de fick svalna i den degel de smälts i.

De resulterande produkterna undersöktes med röntgendiffraktion, lakteter och krossningsförsök i en käftkross.

Resultaten från undersökningarna kan sammanfattas som följer:

Mineralogi:

- Ortosilikat med varierande andel magnesium är det mest förekommande mineralet i slaggerna.
- Krom finns i spinellfaser tillsammans med vanadin, mangan och aluminium.

- Glas (dvs. amorft/ickekristallint material) bildas vid snabbkylning av en av de undersökta slaggerna.

Lakningsegenskaper:

- Utlakningen av molybden påverkas av hastigheten på kylningen. Snabb kylning minskar utlakning och långsam kylning ökar utlakning.
- Lakningen av krom påverkas inte i någon större omfattning av hastigheten på kylningen.

Krossning:

- Krossegenskaper hos två av de undersökta slaggerna påverkas inte av hur snabbt de kylades.
- Den tredje slaggtypen blev lättkrossad och skör vid snabbkylning.

Studien vid LTU genomfördes parallellt med att man på Uddeholm Tooling påbörjade att undersöka möjligheten att genomföra förändringar i sin slagghantering för att optimera den färdiga slaggens egenskaper.

4.6 Malbarhetsundersökning av skänkslagg från SSAB Strip Products

(se bilaga 3.7)

LTU, Avd för Mineralteknik, har på uppdrag av SSAB Merox AB utfört en malningsundersökning av skänkslagg från SSAB Strip Products AB.

Syftet med undersökningen var att genom malning i lab-skala, uppskatta energiförbrukningen för tillverkning av en produkt med en partikelstorleksfördelning motsvarande 5000 cm²/g (mätt utifrån Blaine-yta) vid torr malning med stångkvarn i fullskala. Därtill avsåg försöket att producera en provpost färdigmalt material för de fortsatta studierna avseende skänkslaggs vattenbindande egenskaper (4.7).

Resultaten visade att skänkslagg kan malas i stångkvarn med acceptabelt resultat, under förutsättning att metalldroppar avlägsnas före malningen. För att uppnå en finhet på 95 % < 63 µm blev energiinsatsen hög, i storleksordning 65 kWh/ton.

4.7 Förstudie av cementbindande egenskaper hos skänkslagg från SSAB

(se bilaga 3.8)

Två förstudier på skänkslagg från SSAB Plate, respektive från SSAB Strip Products AB har utförts av SSAB Merox AB. Arbetet syftade till att karakterisera de båda slaggerna genom bestämning av den kemiska och mineralogiska sammansättningen och koppla dessa till deras cementbindande egenskaper och därmed potential som ersättningsmaterial till cement. Den kemiska sammansättningen bestämdes med röntgenfluorescens (XRF) och den mineralogiska sammansättningen med röntgendiffraktion (XRD) för båda slaggerna. De cementbindande egenskaperna bestämdes för slaggen från SSAB Strip Products med kalorimetriska mätningar. Resultaten från mätningarna på slaggen från SSAB Strip Pro-

ducts jämfördes dessutom med resultat från motsvarande mätningar på två syntetiskt framställda material: mayenit och skänkslagg.

Resultaten från undersökningarna visar att skänkslagg från såväl SSAB Plate som SSAB Strip Products har potential att användas som bindemedel, exempelvis internt i restproduktbriketter som ersättning till cement. Detta skulle medföra besparingar i form av både minskade inköp av cement och minskade deponikostnader.

För att få så användbar slagg som möjligt behöver hanteringen av dem, både i stålverken och ute på slaggårdarna, ses över. Eftersom förhållandena under vilka de båda verkens skänkslagger produceras och de båda slaggerna till viss del skiljer sig åt fysikaliskt, så kan nödvändiga åtgärder för att optimera förutsättningarna för recirkulering vara olika på SSAB Strip Product och SSAB Plate.

4.8 Skänkslaggbriketter – SSAB Strip Products

(se bilaga 3.9 och 3.10)

Med utgångspunkt från resultaten från ovan beskrivna förstudie av skänkslaggens malbarhet och cementbindande egenskaper (4.6 och 4.7 ovan), genomförde SSAB Merox AB ett laborieförsök på uppdrag av SSAB Strip Products.

2,5 % respektive 5 % skänkslagg i fraktionen 0-5 mm tillsattes till ordinarie recept för restproduktbriketterna (råvara i masugnen) och mängden cement (ordinarie bindemedel) minskades med motsvarande mängd. Briketter tillverkades i en brikettpress i labbskala. De tillverkade briketternas hållfasthet testades med standardiserat tumlingstest och resultaten jämfördes med hållfastheten hos briketter med enbart cement och ingen skänkslagg som bindemedel.

Resultaten från hållfasthetstesterna visade på lägre hållfasthet för briketterna med inblandning av skänkslagg och sänkt cementmängd. Orsaken till detta antas bero på att skänkslaggen hade utsatts för alltför mycket väder och vind före användandet i briketterna, vilket bidragit till en upplösning av cementfaserna, se bilaga 3.10.

Fortsatta försök i fullskala genomfördes (se avsnitt 5.4 nedan).

4.9 Stabilisering av LD-slagg från SSAB Plate

(se bilaga 3.11)

LTU utförde, på uppdrag av SSAB Merox, försök att stabilisera LD-slagg från SSAB Plate genom tillsatser av sand.

LD-slagg karakteriserades utifrån bestämning av kemisk och mineralogisk sammansättning, termisk stabilitet. Expansionstest genomfördes i tempererat vattenbad.

LD-slagg (0-7 mm) smältes med respektive utan inblandning av olika mängd sand, samt med respektive utan extra inblåsning av luft. De så framställda materialen karakteriserades både på samma sätt som ursprungsslaggen (enl. ovan) och genom bestämning av vertikal volymexpansion.

Följande slutsatser kan dras från försöken:

- LD-slagg är instabil och visar stor viktsökning vid expansionstest i vattenbad. Ju mer finkornigt material, desto större viktsförändring.
- Inblandning av sand ger ett jämförelsevis hårt och stabilt material.
- Inblandning av 15 % sand och luftinblåsning i ugnen under smälttiden resulterade i kraftigt minskad viktsökning vid expansionstest i vattenbad. Det gav dessutom 4,2 % vertikal expansion, jämfört med 10,9 % för ett prov utan sandinblandning, men med samma kornstorlek. En stabilisering uppnåddes i detta experiment, troligen tack vare bildning av mineralet merwinit, som reagerar mycket lite med vatten.

4.10 Karakterisering av tunnelugnsslagg från Höganäs AB

(se bilaga 3.12)

LTU har på uppdrag av Höganäs AB genomfört en karakteriseringsstudie på den tunnelugnsslagg som uppkommer vid tillverkning av järnsvamp. Det primära målet med studien, var att fastslå tunnelugnsslaggens kemiska egenskaper (mineralogi, reaktivitet, m.fl.), samt att därefter utreda och föreslå en möjlig avsättning för materialet i externa/interna applikationer. Karakteriseringen gjordes genom kemisk analys, röntgendiffraktionsstudier och kalorimetriska mätningar.

Tunnelugnsslaggen består enligt den kemiska analysen till största delen av kalk, kol och kiseloxid, men innehåller även en mindre mängd järn- och aluminiumoxid. Det är ett mycket finkornigt material, som i dagsläget mellanlagras i en silo och som måste fuktas vid hantering på grund av damning.

Resultaten från studien kan sammanfattas i följande punkter:

- Fyra kristallina faser identifierades i tunnelugnsslaggen: kalk, gehlenit, kol och metalliskt järn.
- Tunnelugnsslaggen uppvisar inga cementbildande egenskaper.
- Tunnelugnsslagg skulle förmodligen klara kraven för KRAV-märkta jordbruksskalkar.

4.11 Karakterisering av slam från slaggården i Avesta (Outokumpu Stainless)

(se bilaga 3.13)

I ett samarbete mellan Outokumpu Stainless AB i Avesta och LTU har karakterisering av slam från slaggården i Avesta genomförts m h a kemisk analys och röntgendiffraktion. Slammet bildas när sönderfallande slagg (framförallt AOD- och skänkslaggerna), som transporterats ut från stålverket, bevattnas som en åtgärd mot damning.

Det primära målet med studien var att fastställa den mineralogiska sammansättningen hos slammet, samt att i ett andra steg undersöka möjligheten att använda slammet i interna och/eller externa produkter.

De resultat som framkommit var väntade och kan sammanfattas i följande punkter:

- Slammet består enl. den kemiska analysen till största delen av kalcium-, kisel-, aluminium- och magnesiumoxider, samt fluor.
- Fem mineraler identifierades i slammet: MgO, CaF₂, β- och γ-Ca₂SiO₄, samt Ca₄Si₂O₇F₂. Samtliga fem är vanligt förekommande i AOD-slagg från rostfri ståltillverkning.

Eftersom slammet uppstår vid bevattning av sönderfallande slagg, bedöms slammets användning som bindemedel som otänkbar trots att flera av de identifierade mineralerna normalt uppvisar cementbindande egenskaper. Dessa har sannolikt helt förstörts av vattnet och slaggen måste, om den ska kunna användas som bindemedel, tas om hand utan bevattning, vilket idag inte är möjligt.

Ytterligare utredningar av slammets användbarhet kvarstår.

5 FÖRSÖK I PILOT- OCH FULLSKALA

Resultaten från försök i pilot- och fullskala, genomförda som industriaktiviteter, redovisas nedan i sammanfattad form. För mer detaljerade rapporter från respektive delprojekt hänvisas till Bilaga 3. Syftet med dessa aktiviteter var att testa och följa upp resultaten som kommit fram genom laboriestudier och/eller beräkningar i både det aktuella och tidigare projekt (se avsnitt 4).

5.1 Provytor med slaggasfalt inom Ovakos industriområde i Hofors

(se bilaga 3.14)

Ovako Hofors AB i Hofors producerar ungefär 40 000 ton ljusbågsugnsagg varje år. Sedan 2004 processtys slaggen hela vägen från ljusbågsugnen till slaggården för att materialet ska få bra tekniska och miljömässiga egenskaper.

I andra europeiska länder, t.ex. England, Danmark och Tyskland har ljusbågsugnsagg använts som ballast i asfalt under många år med gott resultat. Eftersom ljusbågsugnsaggen innehåller en del kalk och är basisk blir vidhäftningen mellan slaggen och det sura bindemedlet bitumen mycket bra. Detta gör att slaggasfalten blir mycket stabil. Risken för frostsprängning blir också liten eftersom vatten har svårt att komma in mellan slagg och bitumen. Slaggasfalten har även bra nötningsbeständighet vilket beror på att slaggen är hård, men även denna egenskap påverkas positivt av den goda vidhäftningen. Slaggasfalt har också bra friktion eftersom slaggen inte poleras av trafiken utan de partiklar som slits bort lämnar en ojämn yta. Detta är främst en fördel i de länder i Europa där asfalten inte ruggas upp av dubbdäck vintertid.

Slaggasfalt har inte bara tekniska fördelar utan även nedanstående miljömässiga fördelar:

- Slaggen ersätter jungfruligt stenmaterial => naturresurser sparas
- Bra slitageegenskaper ger längre livslängd => färre omläggningar
- Slagg är mer porös än vanlig ballast => tystare asfalt
- Slagg dammar mindre vid krossning, ger det mindre damm vid vägslitage
- Slagg innehåller mycket lite kristallin kvarts.
- Deponering undviks
- Transporter av specialsten för mer krävande tillämpningar kan undvikas

Ovako i Hofors startade arbetet med att använda slagg som ballast i asfalt 2002. Under 2003 genomfördes laborieförsök med slaggasfalt hos Skanska i Farsta. Resultaten var lovande och arbetet med att få lägga riktiga provtytor påbörjades. Arbetet med detta drog ut på tiden eftersom Ovako och tillsynsmyndigheten (Länsstyrelsen i Gävleborg) hade olika syn på hur provytan skulle uppföras. I december 2006 beslutades dock att två provtytor med slaggasfalt skulle läggas, en provyta för att testa de tekniska egenskaperna och en miljöprovyta där ytvatten skulle samlas upp och provtas.

Provytorna lades i maj 2007. Bredvid miljöprovytan med slaggasfalt lades en referensyta med ”vanlig” asfalt. Vattenuppsamling och provtagning har även skett från denna yta.

Resultat:

De tekniska undersökningar som utfördes på borrprover från den tekniska provytan visade att slaggasfalt har bra stabilitet. Däremot blev slitageegenskaperna inte lika bra som förväntat. Detta beror troligtvis på:

- Den krossade slaggens partikelform. Partiklarna var relativt kubiska, men detta kan förbättras ytterligare genom att t.ex. kubisera slaggen efter den första krossningen.
- Slaggen krossades lite för hårt. I fraktionen som skulle vara 8-11 mm fanns väldigt lite slagg som var 10-11 mm, merparten var istället 8-9 mm.
- Asfaltsreceptet blev inte riktigt så bra som önskat. Hållrumshalten blev för hög.

Ytvatten har samlats upp från miljöprovytan med slaggasfalt och från referensytan med standardasfalt. Provresultaten visar att påverkan på ytvattnet från en yta med slaggasfalt är liten och jämförbar med påverkan från en yta med standardasfalt. Eftersom slaggens lakningsegenskaper understiger gränsen för avfall som får läggas på inert deponi torde en ev. utlakning av metaller därför inte vara något problem.

5.2 Deponitäckning och yta för materiallagring och hantering (Ragn-Sells AB och Ovako Hofors AB)

(se bilaga 3.15)

Ragn-Sells AB undersökte i samverkan med Ovako Hofors AB möjligheten att använda Ovakos skänkslagg som bindemedel i så kallad vältbetong, för att ersätta cement.

Initiala labbförsök, utförda på slagg tagen direkt ur produktionen, visade på goda cementbindande egenskaper. När studier senare utfördes på lagrad slagg visade det sig att de cementbindande egenskaperna förstörts på grund av bevattning av slaggen. Bevattning sker för att minska damningen från hanteringen av skänkslaggen och idag finns inget alternativ till denna hantering. Innan något alternativ till bevattning har hittats anses det inte vara meningsfullt att genomföra de tänkta fältförsöken och projektet har tills vidare lagts på is.

5.3 Användning av slagg från Uddeholm Tooling AB i en deponisluttäckning – Fältförsök Hagfors

(se bilaga 3.16)

Två provytor (fullständiga avslutningskonstruktioner) har byggts på hushållsavfallsdeponin Holkesmossen i Hagfors kommun, provyta 2 och 3. Provyta 1 byggdes tidigare, inom kompetenscentret MiMeR.

Slagger från Uddeholm Tooling AB användes i både tät- och dräneringsskiktet. Ljusbågsugnsslagg användes i dräneringsskiktet och en blandning av ljusbågsugnsslagg och skänkslagg i tätskiktet.

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.

Mängderna lakvatten, dvs vattnet som går igenom tätskiktet, har för den första provytan varierat mellan 25 och 35 liter per kvadratmeter och år sedan mätningarna påbörjades 2006. Detta motsvarar drygt hälften av infiltrationskravet enligt deponeringsförordning (för deponier för icke-farligt avfall).

I provyta 2 testades en minskning av andelen skänkslagg i tätskiktet från 50 % i provyta 1 (som hade byggts tidigare) till 35 %. Denna minskning medförde att infiltreringen ökade till drygt det dubbla av deponeringsförordningens funktionskrav (120 istället för 50 liter per kvadratmeter och år), vilket medförde att provyta 3 tillverkades enligt ursprungsreceptet med 50 % skänkslagg. För den tredje ytan finns ännu inga resultat, men infiltrationen förväntas ligga i samma storleksordning som för yta 1 dvs. 25-30 l/m²*år.

Bestämningar av lakvattenkvalitén visar på låga metallkoncentrationer i förhållande till deponeringsförordningens utlakningskriterier för inert avfall.

Mätningarna av temperatur och gassammansättning under och över tätskiktet har hittills 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.

Sammanfattningsvis kan man säga att

- Sluttäckningen uppfyller funktionskravet m.a.p. vattengenomsläpplighet om andelen skänkslagg i tätskiktet inte underskrider 50 %
- 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.

Uppföljningen av provytorna kommer att fortsättas under några år till och en mera omfattande och långsiktig utvärdering planeras ingå i det sökta fortsättningsprojektet.

5.4 Skänkslaggbriketter – SSAB Strip Products

(se bilaga 3.9 och 3.10)

Som ett komplement till laborietesterna, beskrivna i avsnitt 4.8 ovan, genomfördes ett fullskaleförsök med inblandning av skänkslagg som bindemedel i restproduktbriketter.

Till ordinarie brikettrecept sattes 5 % krossad skänkslagg 0-5mm, som komplement till cementet (dvs. med bibehållen cementmängd på 12.5 %). Briketter tillverkades i brikettmaskinen, dvs. i fullskaleproduktion, och deras hållfasthet testades med tumlingstest. Briketterna användes även på försök som råvara i masugnen.

Resultaten från hållfasthetstesterna visade på förhöjda hållfasthetsvärden efter 28 dygns härdningstid, jämfört med ordinarie briketter utan skänkslagg. Detta antyder att skänkslaggen har cementbindande egenskaper och eventuellt, med förlängd härdningstid, har potential att ersätta någon del av cementmängden i brikettreceptet. Briketterna fungerade bra som råvara i masugnen.

6 SLUTSATSER

Teoretiska beräkningar utgående från i stort sett alla slaggar från alla företag som deltagit i projektet har visat vilka mineraler som är vanligast förekommande i slaggerna.

Tillverkning av de vanligaste mineralerna 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.

Ett stort antal av de förekommande slaggerna har karakteriserats med avseende på kemisk sammansättning, mineralogi, malbarhet, cementbindande egenskaper m.m. Dessa undersökningar har utökat den baskunskap 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.

Utlakningen av molybden från molybdenrik slagg har studerats i detalj. Lakningen har visats kunna minskas genom modifieringar av slaggen och dess mineralogiska sammansättning med t.ex. blandning av slaggen med annan, cementbindande slagg, åldring och karbonatisering av slaggen, samt olika kylningshastighet för slaggen.

Instabil, expanderande LD-slagg har kunnat stabiliseras genom modifiering av mineralogin med tillsats av sand.

Hårdheten hos slagg har kunnat påverkas med kylningsförloppet. Hårdhet och slitstyrka är nödvändiga egenskaper för användning av slagg som ballast i asfalt, vilket är testat i fullskala.

Cementbindande egenskaper hos slaggar har undersökts och har använts i både labb, pilot- och fullskaleförsök. Exempel på applikationer som har visats fungera är slagg som bindemedel i restproduktbriketter och slagg som en bindande komponent i hårdgjorda ytor för materialhantering och i tätskiktet i avslutningskonstruktionen på deponier.

Sammanfattningsvis kan följande konstateras:

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 slaggar från ståltillverkningen i Sverige.

7 FÖRSLAG PÅ FORTSATT FORSKNING OCH IMPLEMENTERINGS- INSATSER

Implementeringen av den hittills gjorda forskningen är delvis i händerna på hur strikt svenska myndigheter kommer att genomföra det nya Ramdirektivet för avfall (2008/98/EG) och om detta innebär att de slaggar som uppfyller biproduktskraven blir klassade som de produkter de faktiskt är. Stålindustrin i Sverige har, liksom sina europeiska kollegor, förregistrerat flera av slaggerna i REACH av just det skälet. I det fortsatta arbetet mot fullständiga registreringar i REACH kommer en rad undersökningar på slaggar att genomföras och många rapporter att tas fram.

För att tillverka användbara slaggar med önskade egenskaper behöver ett kunskapsunderlag skapas, som ger stålverken förbättrade möjligheter att:

- genomföra lämplig modifiering av slaggens sammansättning, i eller utanför själva ståltillverkningen,
- anpassa slaggtillverkningen och -hanteringen, så att önskad mineralogisk sammansättning och därmed önskade egenskaper uppnås,
- hitta de kombinationer av olika material som gör att produkten får önskvärda egenskaper och
- förstå hur slagg beter sig i olika användningsmiljöer.

För att fullfölja den i detta projekt påbörjade forskningen och säkerställa uppfyllandet av kvarstående delar av det ursprungligen fyraåriga projektets mål, samt att därmed fortsätta det långsiktiga arbetet att bygga upp det kunskapsunderlag som behövs, är det viktigt att forskningen kan fortsätta och att den inte stannar av i det här läget.

Skulle den ansökta finansieringen för fortsättningen av projektet godkännas, finns följande kortsiktiga mål som kan följas upp direkt efter avslut:

- Fördjupa kunskaperna beträffande hur en slaggs mineralogiska sammansättning påverkar dess mekaniska, cementbindande, lakrelaterade, m.fl. egenskaper, genom bl.a. en kombination av fler termodynamiska beräkningar och försök i labskala.
- Föreslå fler möjligheter att anpassa slaggers sammansättning för att uppnå önskade egenskaper, t.ex. genom att kombinera en slagg med andra slaggar och/eller andra material.
- Förankra resultaten från slaggåldringsförsöken i lab genom jämförelse med utvecklingen hos materialen i försöksytorna på deponin i Hagfors (förändringar av mineralsammansättning, mekaniska egenskaper som tryck- och skjuvhållfasthet och utlakningsbeteende).
- Genomföra en kunskaps- och erfarenhetssammanställning avseende testmetoder för produkter i vägbyggnad, barriärkonstruktioner som deponitäckning eller materiallagrings-/hanteringsytor och markstabilisering: Vilka egenskaper mäter dessa, vilka egenskaper är kritiska beroende på tillämpning, samt hur stora variationer kan accepteras? Är dessa metoder lämpade för slaggmateriell eller behöver nya testmetoder utarbetas?

Det fortsatta forskningsbehovet är direkt relaterat till vilka krav som svenska myndigheter har ställt, respektive kommer att ställa, på stålindustrins biprodukter och för återvinning av avfall till anläggningsändamål. Denna tolkning, som främst kommer att göras av Naturvårdsverket, kommer att bli styrande för potentiella användare. Om dessa krav blir alltför strikta finns risken att material med gynnsamma egenskaper för konstruktionsändamål m.m. aldrig kan bli använda utan måste deponeras med alla ekonomiska och ekologiska konsekvenser detta kan innebära. Forskningen kan bidra till att säkra och öka användningen av slaggar i de applikationer där deras unika egenskaper bäst tas till vara.

8 REFERENSER, PUBLIKATIONER

Avhandlingar:

- Diener, S. (2009) Ageing behaviour of steel slags in landfill liners. Licentiate thesis. Department of Civil, Mining and Environmental Engineering. *Luleå tekniska universitet*, 2009.
- Engström, Fredrik (2007) Mineralogical influence of different cooling conditions on leaching behaviour of steelmaking slags. Licentiate thesis 2007:58. Institution för Tillämpad kemi och geovetenskap. *Luleå tekniska universitet*, 2007.

Artiklar och presentationer på internationella konferenser:

- Andreas L.; Lagerkvist, A.; Tham, G. (2008) Use of Secondary Materials in Landfill Constructions. *5th ICLRS. Intercontinental Landfill Research Symposium*. Colorado, USA, September 10-12, 2008.
- Diener S.; Andreas L.; Herrmann, I.; Ecke, H.; Lagerkvist, A. (2008) Accelerated carbonation of ashes and steel slags in a landfill cover construction. *ACEME '08 International conference on accelerated carbonation*. Rome October 1-3, 2008.
- Diener S.; Andreas L.; Herrmann, I.; Lagerkvist, A. (2007) Mineral transformations in steel slag used as landfill cover liner material. *Sardinia 2007. 11th International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy.
- Diener S.; Andreas L.; Herrmann, I.; Lagerkvist, A. (2008) Results from a Field Study Using Steel Industry Slags in a Landfill Cover Construction. *5th ICLRS. Intercontinental Landfill Research Symposium*. Colorado, USA, September 10-12, 2008.
- Engström, Fredrik; Lidström-Larsson, Margareta; Samuelsson, Caisa; Björkman, Bo (2008) Ageing investigation of steel slags from EAF (Electric Arc Furnace) processes. *REWAS 2008: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*. Minerals, Metals & Materials Society, 2008. s. 353-358
- Yang, Q.; Engström, F.; Björkman, B.; Adolfsson, D (2009) Modification study of a steel slag to prevent the slag disintegration after metal recovery and to enhance slag utilization. Proceedings of the *VIII international conference on molten slags, fluxes and salts*. Gecamin, 2009. s. 33-41
- Yang, Qixing; Engström, Fredrik; Haase, B.; Wedholm, Anita (2008) Stabilization of EAF slag for use as construction material. *REWAS 2008: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment*. Minerals, Metals & Materials Society, 2008. s. 49-54

Artiklar i vetenskapligt granskade tidskrifter:

- Diener S.; Andreas L.; Herrmann, I.; Ecke, H.; Lagerkvist, A. (2009) Accelerated carbonation of ashes and steel slags in a landfill cover construction. *Journal of Waste Management*. Accepted.
- Durinck, D.; Engström, Fredrik; Arnout, S.; Heulens, J.; Jones, P.T.; Björkman, Bo; Blanpain, B.; Wollants, P. (2008) Hot stage processing of metallurgical slags. *Resources, conservation, and recycling*. 2008; vol. 52, nr. 10, August. s. 1121-1131
- Herrmann, I.; Diener, S.; Andreas, L. Lind, L. (2009) Steel slag used in landfill cover liners –laboratory and field tests. *Journal of Waste Management*. Accepted.
- Tossavainen, Mia; Engström, Fredrik; Yang, Qixing; Menad, Nourreddine; Lidström-Larsson, Margareta; Björkman, Bo (2007) Characteristics of steel slag under different cooling conditions. I. *Waste management*. 2007; vol. 27, nr. 10, s. 1335-1344.

9 BILAGOR

Bilaga 1 Ekonomi

Redovisas separat.

Bilaga 2 Stålforskningsprogrammet

Skrivs av Jernkontoret.

Bilaga 3 Publikationer

- 3.1 Termodynamiska beräkningar av mineralsammansättningen i olika slaggsystem
- 3.2 Framställning och undersökning av syntetiska mineraler
- 3.3 Förekomstformer och löslighet av molybden i ljusbågsugns slag
- 3.4 Utlakningsegenskaper hos molybden i ljusbågsugns slag efter karbonatisering
- 3.5 Undersökning av stålslaggers långtidsbeteende vid användning i en deponitäckning - Åldringsförsök
- 3.6 Lak- och krossegenskaper beroende på kylning
- 3.7 Malningsundersökning av skänkslag
- 3.8 Förstudie skänkslaggers cementegenskaper
- 3.9 Skänkslaggbriketter
- 3.10 Assessment of ladle slag as binder in cold bonded briquettes
- 3.11 Stabilisering av LD-slag
- 3.12 Karakterisering av tunnelugns slag
- 3.13 Karakterisering av slam från slaggård
- 3.14 Provytor slaggasfalt
- 3.15 Deponitäckning och upplagsyta
- 3.16 Fältförsök Hagfors

Bilaga 4 Andra resultat

Framgår av avsnitt 8

Bilaga 5 Projektorganisation

Framgår av avsnitt 3.

DEN SVENSKA STÅLINDUSTRINS BRANSCHORGANISATION

Organisationen 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, 111 87 Stockholm Kungsträdsgatan 10
Telefon 08 679 17 00 Fax 08 611 20 89
E-post office@jernkontoret.se www.jernkontoret.se

