

SLUTRAPPORT

Hållbar användning av insatsmaterial och rest- produkter vid användning av direktreducerad järn- råvara i ljusbågsugn

Fredrik Engström och Bo Björkman, Luleå tekniska universitet; Matias Eriksson och Markus Broström, Umeå universitet; Erik Vigg och Bodil Wilhelmsson, Heidelberg Materials Cement Sverige AB.

**RE:
SOURCE**

Slutrapport för projekt:

Hållbar användning av insatsmaterial och restprodukter vid användning av direktreducerad järnråvara i ljusbågsugn

Engelsk titel: Sustainable use of input material and by-products when using direct-reduced iron in the electric arc furnace.

Projektperiod: 2022-09-01 -> 2023-02-28

Datum: 2023-05-31

Projektnummer: P2022-00236

Diarienummer: 2022-200385

Projektledare: Fredrik Engström

Organisation: Luleå tekniska universitet

Adress: Laboratorievägen 14, 971 87 LULEÅ

Ev. övriga projektdeltagare: Bo Björkman, Luleå tekniska universitet; Matias Eriksson, Markus Broström och Rainer Backman, Umeå universitet; Bodil Wilhelmsson, Erik Viggh och Arvid Stjernberg Heidelberg Materials Cement Sverige AB, Mikael Wendel, Erik Degerstedt, Matias Snåre, Thomas Kurten och Annica Lindfors, Nordkalk AB; Anna-Maria beregi Amneus; SMA Mineral AB; Lars Vikström, David Lindblad och Pär Jonsén, LKAB; Björn Haase, Höganäs AB; Robert Eriksson, Martin Kjellberg och Marko Mäkikyrö, SSAB; Helena Malmqvist, Robert Eriksson och Christer Ryman, Jernkontoret; Matias Eriksson och Jan Bida, Föreningen mineralteknisk forskning (MinFo).

Nyckelord: 5–7 st: Slagg, Cement, Kalk, Resurseffektivitet, Koldioxid, Materialförsörjning

RE:Source är ett strategiskt innovationsprogram och finansieras av

VINNOVA

 Energimyndigheten

FORMAS

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten, Vinnova och Formas genom det strategiska innovationsprogrammet RE:Source och genom medverkan av parter från industrin: Heidelberg Materials Cement Sverige AB, Nordkalk AB, SMA Mineral AB, LKAB, Höganäs AB, SSAB EMEA AB, Jernkontoret teknikområde restprodukter TO55 samt Föreningen Mineralteknisk Forskning MinFo.

Innehåll

1. Sammanfattning.....	4
2. Summary.....	5
3. Inledning och Bakgrund.....	6
4. Genomförande	8
5. Resultat och diskussion	9
5.1. WP1: Aktörskonstellation.....	9
5.2. WP2: Sammanställning och utmaningar.....	9
5.2.1. Slagg från ljusbågsugn.....	9
5.2.2. Cement.....	10
5.2.3. Kalk och dolomit.....	10
5.3. WP3: Lämplighet och fördelning av spårelement.....	11
5.3.1. Tänkbara analyser samt teoretisk fördelning av spårelement (slagg).....	11
6. Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg	13
7. Projektkommunikation.....	14
8. Referenser.....	14

1. Sammanfattning

Forskningsprojekt syftar till att skapa en vetenskaplig grund för fortsatt forskning kring kalkbaserade restprodukter (slaggar) från den svenska stålindustrin. Målet är att säkerställa framtida marknader och generera mervärde för svensk basindustri. Projektet har samarbetat nära industriella partners och finansierats av Energimyndigheten, Vinnova och Formas genom det strategiska innovationsprogrammet RE:Source.

För att motverka klimatförändringarna och uppfylla Parisavtalets mål krävs minskade utsläpp av växthusgaser. Gruv-, kalk-, stål- och cementindustrin är viktiga basindustrier i Sverige, men de genererar samtidigt stora utsläpp och förbrukar naturresurser. I arbetet med att minska utsläppen utvecklas en ny metod för primärstålproduktion baserad på direktreduktion med vätgas. Denna teknik möjliggör stålproduktion utan traditionell kokskoli i masugnen och leder till utsläpp av vatten istället för CO₂. Initiativen HYBRIT och H2 Green Steel driver dessa fossilfria stålproduktionsprojekt i Sverige.

Övergången till fossilfri stålproduktion kommer också påverka de restprodukter som genereras från processerna, särskilt den slagg som uppstår vid smältning och raffinering av ingångsmaterialen. Slagg är den största restprodukten vid stålproduktionen och har hittills främst använts i enkla tillämpningar, såsom vägbyggnad. Projektet syftar till att undersöka möjligheterna att använda slaggen i nya tillämpningar, inklusive inom cementindustrin.

Genomförandet av projektet har innefattat tre arbetspaket. Det första arbetspaketet har fokuserat på att analysera och utveckla en fungerande aktörskonstellation med samarbete mellan olika intressenter längs värdekedjan. Det andra arbetspaketet har sammanställt befintlig information och identifierat utmaningar för framtida systemlösningar. Det tredje arbetspaketet har undersökt lämpligheten hos slaggen för specifika tillämpningar och studerat fördelningen av spårelement i slaggen.

Projektet har involverat flera partners från industrin och branschorganisationer, inklusive stål- och mineraltekniska forskningsföreningar. Resultaten har spridits genom deltagande i konferenser och samarbete med nationella/internationella initiativ inom området.

Sammanfattningsvis har projektet arbetat för att skapa en vetenskaplig grund för att optimera användningen av kalkbaserade restprodukter från den svenska stålindustrin och säkerställa en hållbar framtid för svensk basindustri.

2. Summary

This research project aims to establish a scientific foundation for continued research on calcium-based secondary products (slag) from the Swedish steel industry. The goal is to secure future markets and generate added value for the Swedish basic industry. The project has closely collaborated with industrial partners and has been funded by the Swedish Energy Agency, Vinnova, and Formas through the strategic innovation program RE:Source.

In order to counteract climate change and achieve the goals of the Paris Agreement, reduced emissions of greenhouse gases are required. The mining, lime, steel, and cement industries are important basic industries in Sweden, but they also generate significant emissions and consume natural resources. In the efforts to reduce emissions, a new method for primary steel production based on direct reduction with hydrogen is being developed. This technology enables steel production without traditional coke in the blast furnace, resulting in emissions of water instead of CO₂. The initiatives HYBRIT and H2 Green Steel are driving these fossil-free steel production projects in Sweden.

The transition to fossil-free steel production will also affect the secondary products generated from the processes, particularly the slag that arises during the melting and refining of the raw materials. Slag is the largest secondary product in steel production and has mainly been used in simple applications such as road construction. The project aims to explore the possibilities of using slag in new applications, including within the cement industry.

The implementation of the project has involved three work packages. The first work package has focused on analyzing and developing a functioning constellation of actors with collaboration between various stakeholders along the value chain. The second work package has compiled existing information and identified challenges for future system solutions. The third work package has examined the suitability of slag for specific applications and studied the distribution of trace elements in the slag.

The project has involved several partners from the industry and trade organizations, including steel and mineral research associations. The results have been disseminated through participation in conferences and collaboration with national/international initiatives in the field.

In summary, the project has worked to establish a scientific foundation for optimizing the use of calcium-based secondary products from the Swedish steel industry and ensuring a sustainable future for the Swedish basic industry.

3. Inledning och Bakgrund

Det övergripande syftet/målet med detta forskningsprojekt har varit att skapa en vetenskaplig grund för fortsatt forskning kring morgondagens kalkbaserade restprodukter (slaggar) från den svenska stålindustrin, vilket i förlängningen skall säkerställa framtida marknader och generera ett mervärde för svensk basindustri. Arbetet som genomförts har inkluderat teoretiska studier i nära samarbete med industriella partners.

För att motverka klimatförändringarna och uppfylla målen i Parisavtalet om att begränsa den globala uppvärmningen till väl under 2 grader Celsius krävs minskade utsläpp av växthusgaser. Gruv-, kalk-, stål- och cementindustrin är samtliga viktiga basindustrier för Sverige. I samband med produktion av cement, kalk och metall förbrukas årligen stora mängder naturresurser samtidigt som växthusgaser genereras. Cement som produceras i Sverige förbrukar årligen cirka 3,7 Mton kalksten samtidigt som 2,0 Mton CO₂ släpps ut. Kalkproduktionens motsvarande siffra är cirka 1,3 Mton respektive 0,7 Mton. Den malmbaserade stålindustrin i Sverige (primär) förbrukar årligen 0,45 Mton kalksten, släpper ut 2,7 Mton koldioxid och producerar mer än 0,8 Mton slagg, som delvis används eller återvinns. Slaggen härrör från masugn (0,4 Mton), LD-konverter (0,3 Mton) och skänkung.

En ny metod för primärstålproduktion som har potentialen att minska utsläppen till nästan noll utvecklas just nu i Sverige. Tekniken bygger på direktreduktion med vätgas vilket i förlängningen gör att stålproduktionen kan ske utan traditionell kokskol i masugnen, vilket i huvudsak kommer att leda till utsläpp av vatten i stället för CO₂. Tanken är att den elektricitet som behövs för att generera den gröna vätgas såväl som smälta den direktreducerade järnråvaran i ljusbågsugnen (EAF) skall komma från energikällor såsom vattenkraft och vindkraft. HYBRIT-samarbetet (LKAB, Vattenfall och SSAB) befinner sig för närvarande i sin pilotfas och världens första fossilfria stålplåt producerades under sommaren 2021. Förutom HYBRIT-initiativet har H2 Green Steel (H2GS) påbörjat byggnationen av sitt vätgasbaserade stålverk i Boden. H2GS som är ett samarbete bestående av flera företag och investerare, inklusive Scania, SMS Group, Vargas Holding och Ikea-kopplade Imas Foundation, har som mål att producera 5 miljoner ton högkvalitativt stål till marknaden 2030 och därmed öka den svenska stålproduktionen från dagens 4,7 till 9,7 miljoner ton.

Utöver råvarumixen och energikällorna kommer övergången till fossilfri stålproduktion påverka de restprodukter som genereras från processerna. Den mängdmässigt största restprodukten som genereras vid stålproduktionen är den slagg som uppstår vid smältning/raffinering av ingångsmaterialen. Slaggen produceras genom att slaggbildarna (kalk och dolomitkalt) reagerar med gångarterna i råmaterialen. Oönskade element som exempelvis kisel, fosfor och vanadium oxideras antingen till gasfasen eller binds kemiskt till slaggen. Det är rimligt att anta att den slagg som produceras med en högre andel direktreducerad järnråvara (DRI/HBI) kommer skilja sig från den som produceras konventionell (100 % skrot) då halten gångarter (4–7%) som kan tänkas följa med den direktreducerade järnråvaran är betydligt högre. Om stora mängder DRI/HBI,

kontinuerligt tillsätts EAF, kommer slaggbildartillsatserna behövas justeras, för att klara av att hålla slaggbasiciteten (X_{CaO}/X_{SiO_2}) inom intervallet 1.8–2.1 (minimerat infodrings slitage samt optimerad raffinering). Mängden producerad slagg kommer även att öka.

Under 2018 producerades lite drygt 1,4 miljoner ton slagg från de svenska stålverken, varav över hälften från järnmalmsbaserad produktion (primär), d.v.s. slagg som inom 10–15 år kommer att fasas ut till förmån för andra slaggtyper. Av dessa 1,4 miljoner ton deponerades cirka 20%. Även om vissa företag idag har kommit långt i att hitta användningsområden, deponeras fortfarande stora mängder slagg, samtidigt som den framtida användningen varken är säkrad eller optimerad. Slagg har hittills främst använts i relativt enkla tillämpningar (t.ex. för vägbyggnadsändamål) där egenskaper som styrka och eventuell lakning av metaller är avgörande. Beroende på produktions- och vidareförädlingsförhållanden har stålverksslagg tillräckliga och i vissa fall överlägsna egenskaper i tillämpningar. Viss slagg har eller kan ges goda hydrauliska egenskaper och skulle således kunna användas i flera nya tillämpningar (cement), enskilt eller i kombination med andra restprodukter eller material.

Projektet finansieras av Energimyndigheten, Vinnova och Formas genom det strategiska innovationsprogrammet RE:Source och genom medverkan av parter från industrin (Heidelberg Materials Cement Sverige AB, Nordkalk AB, SMA Mineral AB, LKAB, Höganäs AB, SSAB, Jernkontoret och Föreningen Mineralteknisk Forskning MinFo). Projektet har pågått mellan 1 september 2022 och 28 februari 2023.

4. Genomförande

För att nå de uppsatta målen har projektet varit uppdelat i tre huvudsakliga arbetspaket (WP). WP1 har fokuserat på att analysera och utveckla en fungerande aktörskonstellation. Arbetat har bedrivits inom projektgruppen men dialog har även förts med externa parter. Inom WP2 har befintlig information sammanställts samtidigt som utmaningar kring de framtida systemlösningarna identifierats. Inom WP3 har inledande studier för att bedöma lämpligheten hos materialen (slaggen) för specifika tillämpningar undersökts. Särskilt fokus har lagts på att identifiera fördelning av för processen nya spårelement (vanadin, titan och fosfor) i subsystem såsom kalciumsilikater, kalciumferrit och monoxider, där termodynamiska beräkningar i Factsage genomförts.

Projektet har letts av Luleå tekniska universitet och utförts i samarbete med Umeå universitet, Heidelberg Materials Cement Sverige AB, Nordkalk AB, SMA Mineral AB, LKAB, Höganäs AB, SSAB, Jernkontoret och Föreningen Mineralteknisk Forskning MinFo.

5. Resultat och diskussion

5.1. WP1: Aktörskonstellation

En viktig del av projektet har varit att samla intressenter/aktörer längs hela värdekedjan, från malmråvara till färdig slagg/stålprodukt som är redo och intresserade att jobba vidare kring de utmaningarna som finns kopplade till de nya slaggsystemen och hur resursanvändningen skall optimeras. Projektet har letts av Luleå tekniska universitet och utförs i samarbete med Umeå universitet, Heidelberg Materials Cement Sverige AB, Nordkalk AB, SMA Mineral AB, LKAB, Höganäs AB, SSAB samt branschorganisationerna Jernkontoret (stål) och Föreningen Mineralteknisk Forskning MinFo (mineral). Via branschorganisationerna har resultaten spridits vidare till Uddeholms AB, Outokumpu Stainless AB, Vargön Alloys AB, Boliden Mineral AB, Alleima AB, Ovako Bar AB, Harsco Metals Sweden AB, Kungliga Tekniska Högskolan, Swerim AB samt Björka mineral AB.

Representanter från projektet har deltagit vid konferenserna 11th EUROPEAN SLAG CONFERENCE samt 8th International Slag Valorisation Symposium och har på så sätt kunnat diskutera och knyta kontakter med liknande internationella initiativ bland annat FFS (Towards Fossil-free Steel (Finland)), DRI-EOS (New electric furnace slag for CO₂-reduced cement (Tyskland)) och SAVE CO₂ (Tyskland).

5.2. WP2: Sammanställning och utmaningar

5.2.1. Slagg från ljusbågsugn

Stålindustrin i Sverige har påbörjat arbetet med att ställa om mot en fossilfri stålframställning och teknikvalen är gjorda. I Sverige kommer masugnar och konvertrar ersättas med DRI produktion baserad på vätgas och ljusbågsugnar. Samtidigt som omställningen sker kommer den totala stålproduktionen dubblas från 4.7 till drygt 9.5 miljoner ton stål i samband med att H2GS etablerar verksamhet i Boden. Kvaliteten på primära och sekundära råvaror kommer vara helt avgörande för att bibehålla produktkvalitet inom specialstålsområdet där Sverige är unikt i världen. Skrot/DRI mixen kommer variera mellan produktionsorter.

Då slaggens primära uppgift i processen (ljusbågsugnen) är att se till att ett stål med hög kvalitet kan tillverkas samtidigt som det sker energieffektivt måste slaggen uppfylla ett antal egenskaper sammansättningsmässigt. Föroreningskapacitet och infodringsslitage i ljusbågsugnen är två nyckelparametrar. Sammansättningsmässigt innebär detta att slaggen kommer vara mättad med monoxid (MgO, FeO, MnO mfl) samtidigt som ett kalk/kiselförhållande på 1.8 och uppåt måste eftersträvas. Den ”nya” typen av låglegerad ljusbågsugnsslagg som erhållas från processerna kommer framför allt ha högre halter av monoxid (upp emot 50%) men även mer vanadin, titan och fosfor om jämförelse görs mot traditionella låglegerade ljusbågsugnsslagger.

Hur dessa oxider påverkar slaggens egenskaper och möjligheten att hitta lämplig avsättning är idag inte känt.

2018 producerades i Sverige ca 1.4 miljoner ton slagg (4.7 miljoner ton råstål) där nästan 60% kom från masugn och konvertrar vilket motsvarar drygt 800 000 ton. Motsvarande siffror för den låglegerade ljusbågsugnsslaggen var 100 000 ton. I framtiden, efter genomförd omställning, förväntas produktionen ligga på 1.7 miljoner ton slagg (9.5 miljoner ton råstål) baserat på 130 kg slagg/ton råstål från de nya ljusbågsugnarna. Den låglegerade ljusbågsugnsslaggen kommer då stå för ~70% av den slagg som produceras i Sverige (1.15 miljoner ton).

Den nya låglegerade ljusbågsugnsslaggen kommer mest troligen ha stora likheter med den traditionella låglegerade ljusbågsugnsslaggen som idag är helt baserad på skrot, med undantagen som redan nämnts ovan (monoxidfas, vanadin, titan och fosfor). Slaggen kommer bestå av kalciumsilikater (Ca_2SiO_4), kalciumferrit ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) och monoxid ($(\text{Fe},\text{Mg},\text{Mn})\text{O}(\text{ss})$). Hur vanadin, titan och fosfor kommer fördelas i slaggen är idag inte känt. Slaggen kommer vara svart till färgen med en kristallin karaktär och en densitet som motsvarar 3.4-3.6 g/cm³. Kända utmaningar omfattar sönderfall, volymexpansion genom hydratisering och lakning av för materialet kritiska metaller (krom, vanadin).

5.2.2. Cement

Användningen av cement förutspås att öka. Under tidsperioden 2013 till 2020 användes ungefär 70 % av all cement till husbyggnation och ungefär 30 % till olika former av infrastrukturprojekt. Förenklat kan det antas att Portlandcement typ CEM I användes för infrastrukturprojekt och sammansatta Portlandcement typ CEM II för husbyggnation.

För cement av typen CEM II kan huvudbeståndsdelarna förutom klinker vara kombinationer av masugnsslagg, silikastoft, pozzolaner och flygaska. Masugnsslagg som används i CEM II är granulerad och mald masugnsslagg (GBFS). Tillverkare har inlett omställning av stålprocessen för att minska CO₂ avtrycket genom att använda DRI som råvara. Med DRI som råvara i en ljusbågsugn bildas EAF slagg men den granulerade slaggen (EAFS) är inte användbar i cement och betong.

Ett snabbt kylningsförlopp och modifiering är grundläggande för att framställa reaktiv GBFS-liknande material. GBFS-liknande material lämpligt för cement och betong kan framställas genom modifiering av den kemiska sammansättningen. Nya GBFS-liknande material för cement och betong kräver ny kunskap om kylningens inverkan på hållfasthet och reaktivitet. Fortsatt arbete bör förslagsvis undersöka effekten av fler material som kan användas till modifiering av EAF slaggar.

5.2.3. Kalk och dolomit

År 2021 producerades från 15 licensierade dagbrott 6.4 Mt kalksten och 0.4 Mt dolomit. Fem företag innehar licenserna; Heidelberg Materials Cement Sweden AB, SMA Mineral AB, Nordkalk AB, LKAB och Björka Mineral AB. Geografiskt är produktionen spridd över hela landet. Genom

termisk bearbetning i 11 industriugnar används kalkstenen för att producera bränd kalk (~0.5 Mt/a) och dolomit för att producera bränd dolomit (0.02 Mt/a). Kvaliteten på de brända produkterna beror på processförhållandena och kalkstenskvaliteten. De svenska brända kalkprodukterna har en kalciumhalt motsvarande CaO i intervallet 91.0–96.0 vikt-%. De huvudsakliga föroreningarna är kisel (SiO₂ 1.0–2.8 vikt-%), magnesium (MgO 0.8–1.8 vikt-%) och aluminium (Al₂O₃ 0.4–1.1 vikt-%). Svavel i produkterna varierar mellan 0.01 och 0.19 vikt-%. En del av produkterna är hårt brända, med ett rest kol som motsvarar 0.5 vikt-% CO₂, och en del är mjukt brända med 2.5 vikt-% CO₂. Reaktiviteten varierar från låg till hög. I Sverige används bränd kalk och bränd dolomit främst inom produktion av järn, stål och andra metaller (52 %) samt massa- och papperstillverkning (40 %).

5.3. WP3: Lämplighet och fördelning av spårelement

5.3.1. Tänkbara analyser samt teoretisk fördelning av spårelement (slag)

För att skapa en helhetsbild över hur sammansättningen på den tilltänka ljusbågsugnsslaggen kommer variera med focus på spårelementen vanadin, titan och fosfor har en omfattande massbalans baserat på resultatet från WP2 (5.2.1) genomförts. Som utgångsmaterial har förutom rent metallskrot (rent skrot), KPRS från LKAB använts (primär råvara). Mängden FeO, MgO, MnO, Al₂O₃ och Cr₂O₃ har i massbalansen hållits konstanta. Slaggmängden har varierats från 50 kg/ton till 200 kg/ton råstål. Två olika kalk/kiselkvoter (B2) har använts 2.0 respektive 2.5. Två olika metalliseringsgrader på den vätgasreducerade KPRS pelletsen har undersökts (90% respektive 100%). Massbalansen omfattar slag som genererats enbart med primär råvara men även genom att blanda 50% rent skrot med 50% primär råvara.

Halten vanadin (V₂O₅), titan (TiO₂) och fosfor (P₂O₅) är som högst i den slag som kommer från 100% primär råvara, lägst slaggmängd (50kg/ton) och lägst metalliseringsgrad (90%), 6.42%, 5.89% respektive 1.8%. Då slaggmängden ökas till 200kg/ton ligger motsvarande halter på 1.61%, 1.47% respektive 0.45%. I båda fallen är halterna av vanadin, titan samt fosfor högre än från traditionella låglegerade ljusbågsugnsslagger baserade på enbart skrot.

För att öka förståelsen ytterligare genomfördes termodynamisk modellering av de tilltänkta slagssystemen i Factsage 8.2, med tillhörande databaser GTOX samt SGPS. Enligt beräkningarna kommer vanadin fördelas i tre faser, (Ca₉V₆O₁₈, C₂SA och Spinell) titan i två faser (Ca₄Ti₃O₁₀ samt Spinell) och fosfor i en (Ca₂SiO₄).

Från den studie som genomförts har följande slutsatser kunnat dras: 1) spårelementsfordelningen blir komplex då valenskemin på spårelementen påverkar i vilka mineral de kan tänkas anrikas i. 2) de termodynamiska modellerna som finns tillgängliga beskriver inte fördelningen av spårelement tillförlitligt. 3) genom att kontrollera pO₂ i slaggen

skulle spårelementsanrikningen till vissa faser mest troligen kunna styras. 4) jämviktsförsök i kontrollerad pO_2 måste genomföras för att kartlägga fördelningen fullständigt.

6. Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

Störst potential för användning av den nya ljusbågsugnsslaggen ligger framför allt inom området SCM (Supplementary Cementing Materials) eller för sitt kalkinnehåll som unika kalkprodukter. Fullt implementerat ligger den potentiella koldioxidbesparingar på motsvarande 500 000 – 1 000 000 ton årligen för ovanstående applikationer. För att nå detta mål har två huvudområden för fortsatt forskning identifierats; 1) optimerad slaggbildning (kalkupplösning i ljusbågsugnen) och 2) ljusbågsugnsslagg som SCM.

Projektet har uppnått samtliga uppställda mål och de förväntningar som fanns vid projektstart, att kartlägga utmaningar och behov av ytterligare forskning inom området samtidigt som en mycket bra grund är lagd för vidareutveckling av de vetenskapliga resultaten. I ett tidsperspektiv om 10-15 år efter projektets avslutande borde värdekedjan ha öppnats tillräckligt för att resurseffektiviteten ska märkas av.

Projektet har bidragit till uppfyllandet av visioner som finns i SIO-programmet definierat som hållbart erbjudande, hållbar användning samt hållbart cirkulationssystem. Projektet har inte minst levererat ny kunskap om material som kan bli tillgängliga för samhället och därmed minskad miljöpåverkan. Då gäller det inte bara industrins egen påverkan utan också andra sektorer som kan nyttja slagg i bindemedel och på så sätt uppnå olika miljömål.

Projektet har kontinuerligt arbetat med att återföra den vetenskapliga kunskapen till företagen. Ytterligare forskningsinsatser krävs för att få full effekt på de förslag som projektet arbetat med. Det gäller viss typ av grundforskning om slaggers egenskaper, tillverkning och industriell användning innan unika produkter kan presenteras på den svenska marknaden. Baserat på vad som sagts ovan bör fortsatt forskning inom området behandla följande frågeställningar:

- Hur påverkar kalkkvaliteten slaggbilningsförloppet i ljusbågsugnen samt hur kan förloppet optimeras?
- Hur sker glasbildning i ljusbågsugnsslagg och kan den optimeras?
- Hur påverkar monoxidfasen i ljusbågsugnsslaggen möjligheten till produktifiering?
- Hur påverkar spårelementen vanadin, titan och fosfor produkttegenskaperna?
- Fortsätta utveckla den termodynamiska datan och beskrivningsmodellerna som finns tillgängliga då de idag inte beskriver system på ett korrekt sätt.

7. Projektkommunikation

Resultaten från studien har spridits via kontakter, branschorganisationer samt inom företagen. Resultaten kommer även att presenterats på en internationell konferens och i en vetenskaplig artikel.

8. Referenser

1. Cementa AB, "Konjunkturrapport September 2022," Cementa AB, Stockholm, 2022.
2. H. Stripple, C. Sternhufvud and T. Skårman, "Utredning om möjligheterna att minska utsläppen av fossil koldioxid från mineralindustrin," Göteborg, Sverige, 2005.
3. C. Wadell, "Dnr: 2021/181 Förutsättningar för en alternativ försörjning av cement i Sverige," Myndigheten för tillväxtpolitiska utvärderingar och analyser, Östersund, Sverige, 2022.
4. E. Vigg, D. Boström and B. Wilhelmsson, "Raw meal and slag reactions during cement clinker formation," in 15th International Congress on the Chemistry of Cement, Prague, Czech Republic, 2019.
5. E. Vigg, M. Eriksson, B. Wilhelmsson and R. Backman, "Early formation of belite in cement clinker raw materials with slag," *Advances in Cement Research*, pp. 1-8, 2020.
6. D. Algermissen, "DRIEOS - Utilization of DRI based EAF slag for the cement industry," in 11th European Slag Conference, Cologne, 2022.
7. J. Kakniks, V. Montouillout, A. Danezan, S. Blotevogel, L. Doussang, A. Ehrenberg, D. Hart, H. Bornhöft, M. Cyr and J. Deubener, "ACTISLAG -NEW ACTIVATION ROUTES FOR EARLY STRENGTH DEVELOPMENT OF GRANULATED BLAST FURNACE SLAG," in 10th European Slag Conference, Thessaloniki, Greece, 2019.
8. Y. Z. Yue, J. d. Christiansen and S. L. Jensen, "Determination of the fictive temperature for a hyperquenched glass," *Chemical Physics Letters*, vol. 357, no. 1, pp. 20-24, 2002.
9. F. Bullerjahn and G. Bolte, "Composition of the reactivity of engineered slags from bauxite residue and steel slag smelting and use as SCM for Portland cement," *Construction and Building Materials*, vol. 321, p. 126331, 2022.
10. H. Taylor, *Cement Chemistry*, London: Thomas Telford, 1997.

11. F. Bullerjan and M. Mehringskötter, "Synthetic granulated blast furnace-like slag from bauxite residue smelting and its use in multi-component Portland composite cement," *Journal of Cleaner Production*, vol. 329, p. 129667, 2021.
12. A. Ehrenberg, "ActiSlag - New activation routes for early strength development," in *European Steel Technology Platform*, 2021.
13. A. Ehrenberg, "Influence of the granulation conditions and performance potential of granulated blast furnace slag - Part 2: Chemistry and physical properties," *ZKG International*, vol. 66, no. 3, pp. 60-67, 2013.



RE:Source är ett strategiskt innovationsprogram som fokuserar på att utveckla cirkulära, resurseffektiva materialflöden. Vårt mål är att uppnå en hållbar materialanvändning där vi håller oss inom planetens gränser.

**RE:
SOURCE**

resource-sip.se