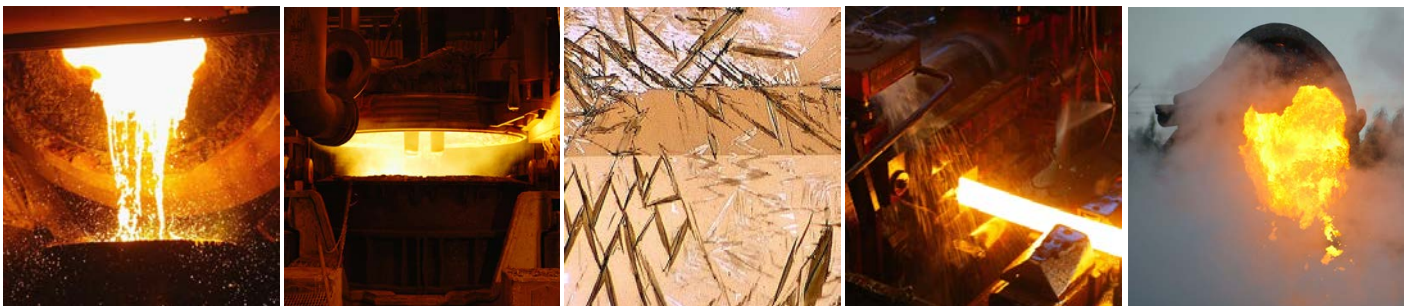


# Förbättrad processteknik vid stränggjutning av stål speciellt känsliga för igensättningar

Jonas Alexis och Thomas Jonsson, Swerea MEFOS  
Voicu Brabie, Jennie Svensson och Arashk Memarpour,  
Högskolan Dalarna.

Erik Roos och Anders Tilliander, Kungl Tekniska högskolan,  
Tillämpad processmetallurgi,  
Olle Sundqvist, Sandvik Materials Technology



**Foto:** Stig-Göran Nilsson och Mats Hillert

## Sammanfattning

Projektet JK 23052 "Förbättrad processteknik vid stränggjutning speciellt känsliga för igensättningar" ingår i Strategiskt Stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012, finansierat av VINNOVA och Jernkontoret. Projektet har bedrivits som ett samverkansprojekt mellan Swerea MEFOS, avdelningen för Tillämpad processmetallurgi på KTH och Högskolan Dalarna (HDa). Denna rapport ger en översikt av utfört arbete. De tekniska delrapporter som ligger till grund för de olika avsnitten i rapporten finns angivna i fotnoter fogade till texten.

Med en lösning av igensättningsproblematiken vid stränggjutning är den ekonomiska potentialen för svensk stålindustri mycket stor. Den totala potentialen i Sverige har inte kunnat bestämmas, men torde överstiga 100 miljoner kronor per år. Varje förbättring oavsett slag och storlek ger en direkt effekt på stålindustrins konkurrenskraft.

Det primära målet med projektet har varit att stödja de deltagande stålföretagen i deras strävan att:

- Öka sekvenslängderna inom stränggjutning
- Öka utbytet av stål

Detta har skett genom att ett helhetsgrepp på igensättningsproblematiken har tagits. Projektet har studerat effekterna av desoxidation i skänken via strömning och infodringspåverkan i gjutlåda och gjutrör vid stränggjutningen, vilket har möjliggjorts av att projektet är ett samarbete mellan Jernkontorets forskningsblock 23040 Skänkmetsallurgi, och Teknikområde 24 Gjutning och stelning. Resultat från projektet har gjort att förståelsen för hur desoxideringsförfarandet och dess koppling till inneslutningskaraktäristiken, tillsammans med strömning och keramik påverkar igensättnings-hastigheten. Konkreta förslag har framtagits inom projektet på hur:

- Desoxidationen ska utföras
- Strömningförhållandena kan förändras
- Befintlig keramik ska behandlas
- Nya keramiska material kan användas

Dessa mål har uppnåtts genom noggranna studier, laboratorieförsök, pilotförsök och omfattande driftförsök hos de målverkena

- Sandvik Materials Technology
- Outokumpu Stainless Avesta Works
- SSAB EMEA Luleå och Oxelösund

### Nyckelord:

Igensättning, inneslutningar, stränggjutning, desoxidation, cerium, argoninjektion, stoppare, keramik, beläggning, pilotförsök

## SUMMARY

The project JK 23052 "Clogging" belongs to the Strategic Steel Research Programme for Sweden 2007-2012 jointly funded by VINNOVA and Jernkontoret. The project has been carried out as a close collaboration between Swerea MEFOS, Applied process metallurgy at KTH Royal Institute of Technology and Dalarna University (HDa). This report is an overview of performed work. The technical reports that each section is based on are given in the included footnotes.

With a solution to the clogging problem during continuous casting, the economical potential for the Swedish steel industries is very high. The total potential in Sweden has not been clarified but is probably more than 100 MSEK a year. Every improvement regardless of type and size affects the competitiveness of the steel industry directly.

The primary target for this project has been to support the involved companies in their strive to:

- Improve sequence length in continuous casting
- Improve yield

This has been achieved by applying a comprehensive view on the clogging problem. The project has studied the effects of deoxidation in the ladle through the steel flow and refractory effect in tundish and submerged entry nozzle. This has been made possible through a cooperation between research block 23040 Ladle metallurgy and Technical area 24 Casting and solidification. Results from the project show that deoxidation practice and its link to inclusion characteristics together with steel flow and refractory affects the clogging velocity. Concrete advices regarding how to:

- Perform deoxidation
- Change steel flow
- Treat existing refractory
- Use new refractory materials

have been developed in the project.

These goals have been achieved through careful investigations, laboratory trials, pilot trials and extensive plant trials at the participating steel plants:

- Sandvik Materials Technology
- Outokumpu Stainless Avesta works
- SSAB EMEA Luleå and Oxelösund

### Keywords:

Clogging, inclusion, continuous casting, deoxidation, cerium, argon injection, stopper, ceramics, coating, pilot test.

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b>	<b>5</b>
1.1	Inneslutningars sammansättning och igensättningsbenägenhet	5
1.2	Igensättningsens morfologi och flerfas-strömning	5
1.3	State-of-the-art	7
1.4	Nuläge 2009	8
<b>2</b>	<b>MÅL</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>METOD</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>FORSKNINGSRESULTAT</b>	<b>9</b>
4.1	<b>Inneslutningarnas sammansättning</b>	<b>9</b>
4.1.1	Kartläggning utförd hos SSAB EMEA Oxelösund	9
4.1.2	Kartläggning utförd hos Outokumpu Stainless Avesta	10
4.1.3	Kartläggning utförd hos Sandvik Materials Technology	11
4.1.4	Inneslutningskluster i rostfritt stål efter REM-tillsats	12
4.2	<b>Skänken</b>	<b>13</b>
4.2.1	Pilotförsök Comdicast AB avseende cerium-legerat stål	13
4.3	<b>Gjutlådan</b>	<b>15</b>
4.3.1	Försök med diffusor hos SSAB EMEA Luleå	16
4.3.2	Resultat	16
4.3.3	Slutsatser	16
4.3.4	Fortsatt arbete	17
4.4	<b>Stopparstaken</b>	<b>17</b>
4.4.1	Argoninjektion i stopparstaken hos Outokumpu Stainless Avesta	17
4.4.2	Kalibrerad argoninjektion hos SSAB EMEA Luleå	21
4.4.3	Roterande stoppare hos Sandvik Materials Technology	22
4.4.4	Slutsatser	25
4.4.5	Fortsatt arbete	25
4.4.6	Gjutröret	25
4.4.7	Förvärmning av gjutröret hos SMT, Outokumpu Stainless och SSAB EMEA Luleå	26
4.4.8	Porositetsmätning av gjutrör, SSAB EMEA Luleå	30
4.4.9	Temperaturmätning i gjutröret under gjutning, SSAB EMEA Luleå	30
4.4.10	Beläggning av gjutrör hos Outokumpu Stainless Avesta	31
<b>5</b>	<b>UTLEVERANSER</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>MÅLUPPFYLLELSE</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>SLUTSATSER</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>FÖRSLAG PÅ FORTSATT FÖRSKNINGS- OCH IMPLEMENTERINGS-INSATSER</b>	<b>42</b>
<b>9</b>	<b>REFERENSER</b>	<b>43</b>



# 1 INLEDNING

Med begreppet igensättning (eng. clogging) menar man att flödet av flytande stål störs eller helt upphör på grund av att icke-metalliska inneslutningar ackumuleras och fastnar i en dysa eller ett annat flödesreglerat matningssystem, se referenser 1-24. Igensättning av dysor och matningssystem är ett av de största operativa problemen vid stränggjutning av stål, vilket leder till produktionsbortfall, kostnadsökningar samt en försämrad kvalitet.

## 1.1 Inneslutningars sammansättning och igensättningsbenägenhet

Ickemetalliska inneslutningar i stål förekommer framförallt i form av desoxidationsprodukter, men kan även vara emulsifierad toppslag eller modifierade desoxidationsprodukter. Inneslutningarnas sammansättning bestäms vid en viss temperatur i första hand av stålsammansättningen, men också av sammansättningen hos slag och infodringsmaterial. Omrörning bringar systemet närmare kemisk jämvikt och minskar mängden inneslutningar genom avskiljning till slag och vägg. Vanliga inneslutningstyper är, beroende på desoxidationselement, aluminium- och kiseloxider. Dessutom förekommer kalciumsulfider och titannitrid i stål med höga svavel- respektive kvävehalter.

Generellt har det visat sig att fasta inneslutningar kan skapa igensättningar genom att ackumuleras på keramiska ytor när stålet flödar från gjutlåda till kokill. Transporten och vidhäftningen på ytorna bestäms av inneslutningarnas form, storlek och densitet. Dessa parametrar beror i sin tur av desoxidationspraxis och efterföljande frivillig eller ofrivillig modifiering genom exempelvis legeringstillsats eller reoxidation. Fenomenet igensättning och dess lösning är fortfarande ett relevant område trots att problematiken är lika gammal som stränggjutningen. Orsaken till detta är de mycket komplexa sambanden mellan:

- Stålets desoxidation och skapande av primära inneslutningar
- Förändring av inneslutningarnas mängd och sammansättning under processen
- Stålets reoxidation och interaktion med keramiska material
- Geometrisk utformning av matningssystem mellan gjutlåda och stränggjutningskokill
- Stränggjutningens processparametrar

Ett vanligt sätt att minska igensättningsproblemen är att kemiskt modifiera inneslutningarna med tillsatsmaterial, så att en flytande fas blir stabil. Man kan bilda flytande kalciumaluminater genom kalciumbehandling av aluminiumdesoxiderade stål samt flytande mangansilikater genom kombinerad desoxidation med kisel och mangan.

En generaliserande sammanfattning är att det är omöjligt att undvika inneslutningar i det flytande stålet, men igensättningen kan mildras genom bra materialval för de keramiska komponenter som kommer i kontakt med stålet, anpassad kemisk sammansättning hos stålet och en sund utformning av matningssystemet.

## 1.2 Igensättningens morfologi och flerfas-strömning

En igensättning består ofta av två lager. Det första lagret är i kontakt med keramiken och består av ett nätverk av partiklar, ofta aluminiumoxid. Förutom aluminiumoxid återfinns även andra element som Ca och Si. Detta lager är troligen ett resultat av en kemisk interaktion mellan stålet och keramiken. En initial igensättning kan skapas av att CO- och SiO-gas, vilka bildas vid kemiska reaktioner i keramiken, frigör syre till stålet. Det frigjorda syret reagerar med desoxidationsmedel som finns löst i smältan, vanligen Al, i gränssytan mellan stål och keramik varpå de utskilda inneslutningarna fastnar på keramiken. Det andra lagret hos igensättningen ligger mellan det första lagret och det flytande

stålet. Detta byggs upp av en mer eller mindre kontinuerlig tillväxt av partiklar från det flytande stålet. För en uppbyggnad krävs att två villkor är uppfyllda, ett termodynamiskt och ett kinetiskt.

För det första måste de termodynamiska förhållandena för agglomerering vara gynnsamma, dvs stålets inneslutningar måste ha en benägenhet att fastna på en keramisk yta, eller sig själva, istället för att fördelas jämnt i stålet. Detta styrs av de ytspänningsförhållanden som råder mellan stål och inneslutningarna ifråga, vilket till stor del styrs av den sammansättning som inneslutningarna har.

För det andra måste de kinetiska förutsättningarna för tillväxt, det att partiklarna kolliderar med det första lagret av inneslutningar som bildats enligt beskrivningen ovan, vara uppfyllda. Huruvida denna kollision sker är i hög grad beroende på de lokala strömningsförhållandena.

Om man antar att flödet i gjutröret har separerat till två distinkta faser blir sannolikheten för kollisioner och tillväxt givetvis lägre, eftersom stål eller inneslutningar i stålet inte är i kontakt med väggen. Stålets flöde, turbulens och fluktuationer är därför mycket viktiga parametrar att studera för att bättre förstå hur igensättningar uppkommer. En hypotes är att argoninjektion och strömningsförhållanden spelar en mycket stor roll för igensättningstillväxt eftersom argonspolningen påverkar undertrycket i stopparen och bidrar till att en större stopparöppning erhålls.

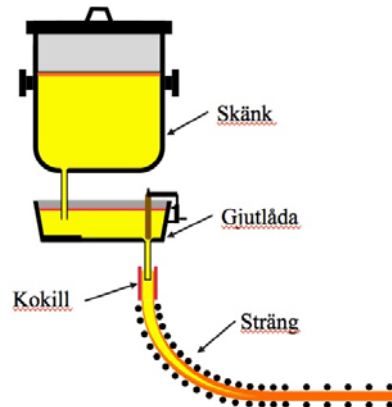
Förhållandet mellan den kemiska interaktionen och den kontinuerliga tillväxten beror på de geometriska förhållandena. Den kemiska interaktionen har större betydelse för små gjutrör där den relativa kontaktarean är stor. I detta sammanhang är också spalten mellan gjutrörssäte och stoppare viktig. Det är tryckförhållandena och processparametrarna som avgör storleken på denna spalt och därmed också i viss mån känsligheten för igensättning. Generellt sett behövs en större spalt för högre massflöden och gjuthastigheter, vilket leder till att billetsjutning som kräver en mindre spalt är känsligare för igensättning än slabsjutning med större spalter.

Den svenska stålindustrins konkurrenskraft bygger på produktion av höghållfasta stål, specialstål och nischprodukter. Detta gäller för produktion av såväl kolstål som rostfritt stål. Detta projekt har fokuserat på att förbättra processtekniken genom att medverka till att lösa stålindustrins största enskilda operativa problem vid sekundärmetallurgi och stränggjutning, nämligen inneslutningar och dess benägenhet att orsaka igensättningar. Konsekvenserna av igensättning är:

- Kortare sekvenslängder med sämre utbyte och högre produktionskostnader som följd.
- Att vissa stål inte alls kan tillverkas eller endast kan götjutas, vilket leder till väsentligt högre energi- och produktionskostnader.
- Utbytesförluster på grund av avbrutna gjutningar och andra störningar. Detta resulterar i en minskad produktivitet med stora intäktsbortfall.
- Att kvaliteten på producerade produkter från stränggjutningen ger utbytesförluster i efterföljande produktionsled.

I detta projekt har Swerea MEFOS, Högskolan Dalarna (HDa) och KTH samarbete med fyra deltagande stålverk och keramikleverantörer. Styrkan i projektet ligger i samarbetet mellan Jernkontorets teknikområde 23 forskningsblocket Skänkmetallurgi och teknikområde 24 Gjutning och stelning. Detta har lett till en helhetssyn i projektet så att aktiviteter från både skänkmetallurgi och stränggjutning har ingått, se Figur 1 som visar en komplett stränggjutningsuppsättning där också skänk och gjutlåda ingår.





**Figur 1:** Schematisk bild över skänk, gjutlåda kokill och sträng

En specifik förbättringspotential för två stålsorter har uppskattats under förstudiearbetet som genomförts inom Jernkontorsprojektet JK 23051 Cloggingkontroll. Potentialen omfattar stålsorterna 253MA och 153MA och uppgår till 11 MSEK för tids- och produktivitetsvinster i de berörda stålverken. Med en lösning av igensättningsproblematiken är den ekonomiska potentialen för svensk stålindustri mycket stor. Den totala potentialen i Sverige har inte kunnat bestämmas, men torde uppgå till minst 100 miljoner kronor per år. Varje förbättring oavsett slag och storlek ger en direkt effekt på stålindustrins konkurrenskraft.

### 1.3 State of the art

Innan projektets start har ett flertal förstudier genomförts. RFCS-projektet “New strategies for clogging prevention for improved productivity and steel quality” (RFSR-CT-2005-00010) var ett samarbetsprojekt mellan Betriebsforschungsinstitut, Comdicast AB, voestalpine Stahl, RIVA Accacio, Scuola Superiore di Studi Universitari e di Perfezionamento Sant’Anna, RWTH Aachen, Arcelor España och Kungliga Tekniska Högskolan. Projektets fokus var att utveckla innovativa förbättringsåtgärder för att förhindra eller minimera igensättning. Utvecklingsarbetet baserades på resultat från analyser av praxis och nya grundläggande kunskaper kring igensättningsmekanismer. Olika databaser skapades och statistisk analys av inverkan av drift- och metallurgiska parametrar utfördes. Igensättningsmekanismerna undersöktes teoretiskt såväl som med experimentella studier med hjälp av konfokal scanning och lasermikroskopi. Igensättningshastigheten mättes i en simulator (pilotskala). Grundläggande information om inverkan av möjliga fysikaliska processer på igensättning studerades med fysikalisk modellering och numerisk simulering. Nya matningssystem och strategier för gasinjektion undersöktes. Metoder för att prediktera igensättning med lämpliga cloggingindex baserade på driftparametrar utvecklades liksom en metod för att prediktera gjutbarhet med neurala nätverk. Driftförsök utfördes för validering av optimeringsåtgärder.

Förprojektet JK23051 Cloggingkontroll finansierades av Jernkontorets teknikområde 23 och deltagande företag. Projektets mål var att göra förförsök för att utvärdera och förbättra Comdicast ABs försöksanläggning inför detta projekt JK23052. Försöken ägde rum i anläggningen i Fagersta och utvärderingsarbetet har gjorts vid KTH och kemiska analyser gjordes av SSAB EMEA Oxelösund och Luleå samt Outokumpu Stainless i Avesta. Den viktigaste slutsatsen inom projektet var att försöksmetodiken fungerar som planerat. Systemet kan mäta igensättningar med god kontroll av viktiga parametrar, framförallt syre där totalsyrehalt kan följas upp under processens gång genom provtagning. God noggrannhet för temperaturmätning i smälta och dysa samt utgjuten stålsvikt som funktion av tid. Andra resultat från förförsöken har visat på effekten av kall/varm dysa, betydelse av mängden inneslutningar på igensättningshastighet, effekt av inneslutningarnas storlek och frekvens av svärmar, effekten av reoxidation samt kontrollerad minskning av igensättningstendens.

Kartläggning av igensättningar utfördes i projektet JK24011. Med begreppet igensättning menas nedsättning eller blockering av tillförseln av stål från gjutlådan genom matningssystemet till kokillen. Vid stränggjutning består igensättningar av i huvudsak två delar, igensättningar i stopparsätet och igensättningar i gjutröret, eller kombinationer av dessa. Igensättningarna kan bestå av både exogena och endogena inneslutningar samt av frysningar av metall och eller nätverk av inneslutningar och frusen metall.

## 1.4 Nuläge 2009

- En charge av mischmetall-legerat stål med vikten 100 ton kan stränggjutas hos Outokumpu Stainless Avesta.
- Gjututbytet för igensättningsbenägna stålsorter i billetsformat hos Sandvik Materials Technology är 83%

## 2 MÅL

Det generella målet med projektet är att stödja de deltagande stålföretagen i deras strävan att:

- Öka sekvenslängderna inom stränggjutning
- Öka utbytet av stål

Mätbara mål har formulerats för två av de deltagande verken:

- En hel charge av mischlegerat stål skall kunna stränggjutas då chargevikten ökar från 100 till 122 ton, Outokumpu Stainless Avesta.
- Sekvensfaktorn ökas till 2 för mischmetall-legerade stål, Outokumpu Stainless Avesta.
- Gjututbytet för igensättningsbenägna stålsorter i billetsformat ökas till 93%, Sandvik Materials Technology.

## 3 METOD

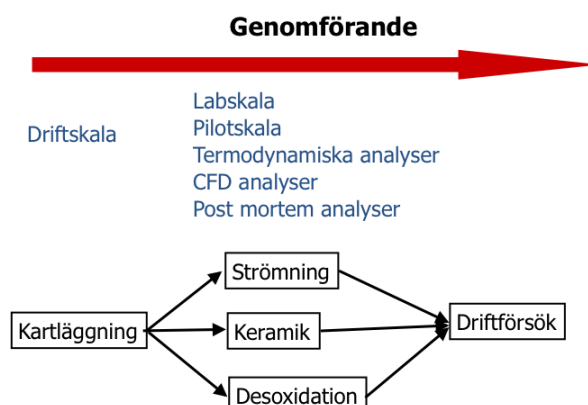
Inneslutningars benägenhet att skapa igensättningar tillsammans med stränggjutningsutrustningens förmåga att förhindra dessa har studerats. En stor del av inneslutningarna bildas vid desoxidation av stålet samt vid tillsats av legeringar i skänken. Projektet har därför fokuserat på inneslutningarna och deras sammansättning tillsammans med stålets flöde genom gjutlåda och gjutrör samt keramikens roll vid uppbyggnaden av igensättningar och hur dessa bäst undviks. Projektet startade med en kartläggning av de ingående målverken:

- Sandvik Materials Technology (SMT)
- Outokumpu Stainless Avesta
- SSAB EMEA Luleå och Oxelösund

Därefter har det i projektet utförda arbetet genomförts inom tre olika områden:

- Strömning, där olika metoder att påverka strömningen så att befintliga inneslutningar kan avskiljas eller förhindras att fastna på stoppare och gjutrör har studerats.
- Keramik, där behandlingen av den befintliga keramiken samt ny keramik för att minska inneslutningars benägenhet att fastna och orsaka problem har studerats.
- Desoxidation, där olika desoxidationsförfarandens påverkan på inneslutningskaraktistik och dess inverkan på igensättningar studerats.

Inom samtliga områden har teoretiska analyser varvats med försök i laboratorie-/pilotskala och verksförsök. Se Figur 2.



Figur 2: Arbetsgång för utfört arbete

## 4 FORSKNINGRESULTAT

Denna sammanfattande rapport beskriver metoder, resultat och slutsatser från detta projekt. För en fullständig beskrivning av utfört arbete hänvisas till Jernkontorets tekniska rapporter, se Bilaga 2. Vid varje aktivitet beskriven nedan finns en fotnot som refererar till rapportnummer för relevant teknisk rapport.

Först redovisas resultaten från kartläggningen. Därefter redovisas utfört arbete i ett processperspektiv, från kartläggning av desoxidationen i skänken till stålets flöde förbi gjutlådan och stopparstaken/gjutröret.

### 4.1 Inneslutningarnas sammansättning

Projektet startade med en kartläggning av igensättningsproblematiken hos tre deltagande målverk:

- SSAB EMEA Oxelösund
- Outokumpu Stainless Avesta
- Sandvik Materials Technology

Därutöver har också en jämförelse gjorts avseende inneslutningskluster i drift och vid pilotförsök efter REM-behandling av stål (REM = rare earth metals, sällsynta jordartsmetaller).

#### 4.1.1 Kartläggning utförd hos SSAB EMEA Oxelösund<sup>1</sup>

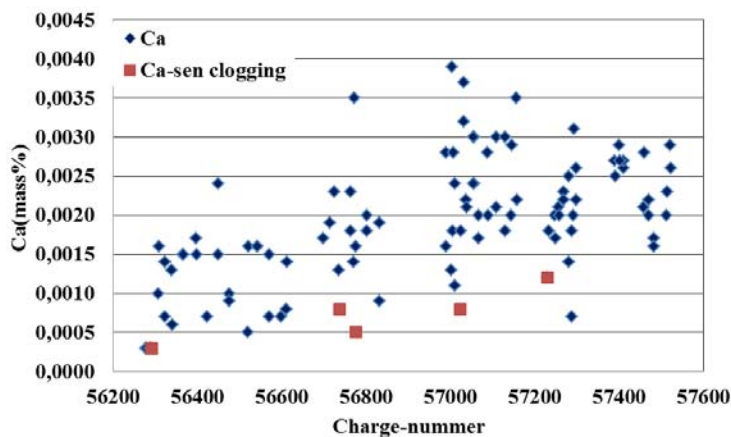
En kartläggning av effekten av kalciumbehandling på igensättningar utfördes. Kalcium tillsätts för att modifiera existerande fasta aluminiumoxider till flytande kalciumaluminater för att inneslutningarna inte lika lätt ska fastna på skyddsroret eller gjutröret, vilket minskar igensättningarna.

##### Resultat

Stålprover från 140 charger tagna i gjutlådan i slutet av gjutningen har studerats. Inneslutningsbilden i proverna analyserades med hjälp av PDA/OES-tekniken för att undersöka om det var möjligt att erhålla en korrelation mellan kalciuminnehållet i inneslutningarna och igensättningstendensen under gjutning. Nio av de analyserade chargerna hade igensättningsproblem i skyddsroret mellan skänk och

<sup>1</sup> TO23-156, *Nozzle clogging during continuous casting of Calcium-treated Aluminum killed steel*, KTH.

gjutlåda. För fem av chargerna registrerades problem med igensättningar i gjutröret mellan gjutlåda och kokill. Figur 3 visar inneslutningarnas kalciuminnehåll i de tagna proverna. Figuren visar också att de fem charger som hade igensättningsproblem i gjutröret alla hade inneslutningar med lågt kalciuminnehåll



Figur 3: Kalciuminnehåll i inneslutningarna som funktion av chargenummer.

Figuren visar också att kalciuminnehållet i inneslutningarna för de charger som fick problem med igensättningar var mindre än hälften så högt som i de övriga chargerna. Dessa resultat ska ses som trender då endast fem charger med igensättningsproblem studerades

#### Slutsatser

Resultaten är lovande då de indikerar att igensättningsproblemen minskar om en höjning av kalciuminnehållet lyckas bättre.

#### 4.1.2 Kartläggning utförd hos Outokumpu Stainless Avesta<sup>II</sup>

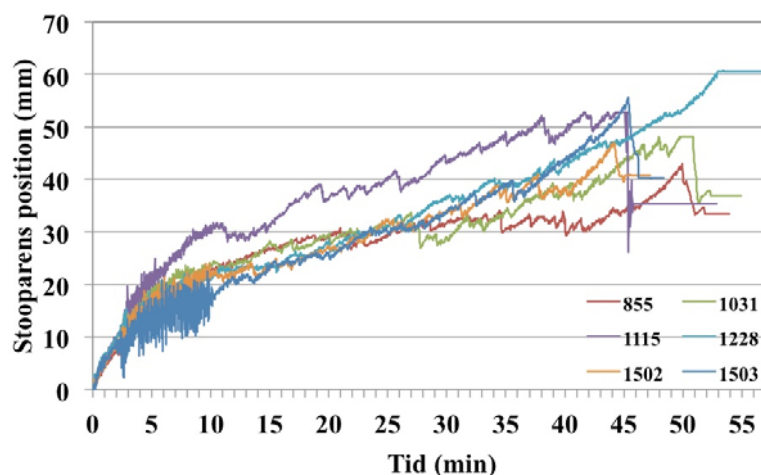
Kartläggningen hos Outokumpu Stainless Avesta fokuserade på en stålsort legerad med mischmetall som består av cerium, lantan, neodym och praseodym. Det är främst ceriuminnehållet som är önskvärt. Detta ligger på 45-55% i mischmetallen. Vid gjutning av denna stålsort uppstår alltid igensättningar. Detta kompenseras för genom en kontinuerlig höjning av stopparstaken för att bibehålla önskat flöde.

#### Resultat

Totalt genomfördes sex driftförsök för att studera gjutningen av denna stålsort varvid stål- och slagprover togs ut. Undersökningen visade att inga kluster återfanns innan mischmetalltillsatsen, vilket var förväntat från tidigare undersökningar. Efter tillsats återfanns dock klusters i samtliga prover tagna under skänkbehandling. Försöken visar dessutom att antalet kluster ökar under de första 11 minuterna av omrörning. Därefter minskar mängden kluster en aning fram till sista mätvärdet 15 minuter efter tillsats av mischmetall. Minskningen berodde troligtvis på att klustren avskildes till toppslagen. Detta bekräftades med hjälp av SEM-undersökningar.

I Figur 4 visas stopparstakens position som funktion av gjuttiden för de sex studerade chargerna.

<sup>II</sup> TO23-153, *Mapping of the influence of deoxidation on clogging at Outokumpu Stainless Avesta Works*, KTH.



Figur 4: Stopparstakens position som funktion av gjuttid.

Det kan konstateras att stopparen måste höjas kontinuerligt under gjutningen, vilket innebär att igensättningar förekom i samtliga studerade charger.

#### 4.1.3 Kartläggning utförd hos Sandvik Materials Technology<sup>IIIIV</sup>

Igensättningsproblem uppstår ofta för rostfria stål med höga kiselhalter. En kartläggning genom provtagning från charger med och utan igensättningsproblem utfördes hos Sandvik Materials Technology. Proverna undersöktes dels genom ett traditionellt tvådimensionellt angreppssätt, dels genom elektrolytisk extraktion. Elektrolytisk extraktion innebär att stålprovet löses upp och inneslutningarna samlas på ett filter. Därefter undersöks de tredimensionella inneslutningarna med hjälp av svepelektronmikroskopi (SEM).

#### Resultat

Dessa studier visar att huvudorsaken till igensättningar är  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$ -spinellinneslutningar. Dessa tros bilda kluster som sedan fastnar på gjutrörsväggarna. I Figur 5 visas typiska inneslutningar och kluster som observerats i prover.

Heat	Shape	Spherical (SP)	Irregular and Regular (IR)	Cluster (CL)
Non-clogged heat	Typical photo			
	Size range (μm) Composition	1.0 - 10.0 $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$	2.5 - 10.5 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$	4.5 - 10.0 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$
Clogged heat	Typical photo			
	Size range (μm) Composition	0.7 - 4.5 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-CaO}$	1.5 - 5.5 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2\text{-CaO}$	3.0 - 11.5 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2\text{-CaO}$

Figur 5: Typiska inneslutningar och kluster som observerats i prover.

<sup>III</sup> TO23-157, *An experimental and thermodynamic study of high Si-containing stainless steel grades at Sandvik Materials Technology, KTH.*

<sup>IV</sup> TO23-155, *Characterization of inclusions during the production of stainless steel grade subject to clogging,*

### Slutsatser

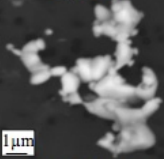

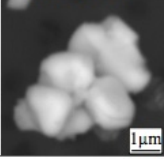
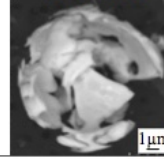
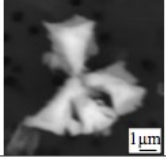
Generellt minskade både kluster och irreguljära/reguljära inneslutningar under skänkbehandlingen för charger som inte hade igensättningsproblem. Däremot så ökade andelen kluster med 15 % under skänkbehandling för charger med igensättningsproblem.

#### 4.1.4 Inneslutningskluster i rostfritt stål efter REM-tillsats<sup>V</sup>

För att ta reda på vilka mekanismer som ligger bakom bildande av och uppträdande hos olika REM-kluster, och för att undersöka om REM-tillsats i stål vid pilotförsök ger liknande inneslutningsbild som i drift, har analyser av stålprover utförts.

### Resultat

REM-kluster från pilotförsök och drift analyserades med hjälp av elektrolytisk extraktion. Karakteristiken (morfologi, sammansättning och storleksfördelning) undersöktes i tre dimensioner med hjälp av SEM. I Figur 6 visas en klassificering av kluster i stålprov från pilotförsök och driftförsök.

Heat	Type	Type A	Type B	Type C
PT	Typical photo			-
	Size range (µm)	1.50-20.00	2.00-8.00	-
IH	Typical photo			
	Size range (µm)	1.70-14.00	7.00-23.00	3.00-16.00

Figur 6: Klassificering av kluster i stålprov från pilot- (PT) och driftskala (IH).

Alla stålprover från pilotförsöken innehåller kluster av typ A och B medan proverna från driftförsöken innehåller kluster av typ A, B och C. Det kan konstateras att de sfäriska inneslutningarna i typ A-kluster är mycket större i proverna från driftförsöken än från pilotförsöken medan de oregelbundna inneslutningarna är ungefär lika stora i bägge provtyperna. Antalet små inneslutningar i typ A-kluster är mycket färre i prover från driften jämfört med prover från pilotförsöken. Det kan också konstateras att antalet inneslutningar i typ A-kluster i stålprover från pilotförsöken är nästan dubbelt så stort jämfört med proverna från driften.

### Slutsatser

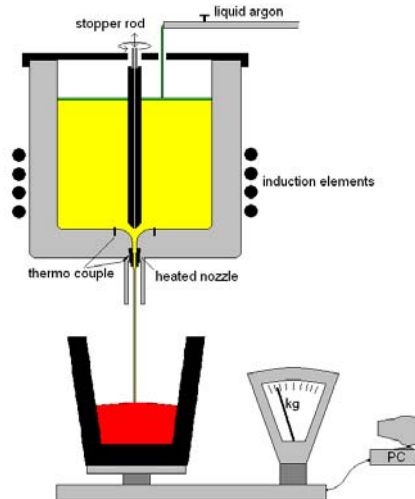
Typ A-kluster är vanligast i både pilotförsöksproverna som driftproverna (70-98 %). Alla inneslutningar i kluster hos både pilotproverna som driftproverna består av REM-oxider och oxisulfider. Sammansättningen hos de flesta inneslutningarna i driftproverna överensstämmer relativt väl med de från pilotproverna. Storleksdistributionen hos kluster är liknande hos driftprover och pilotprover.

<sup>V</sup> TO23-151, Study of clogging phenomena with Yttrium stabilized Zirconia coating, HDa.

## 4.2 Skänken

### 4.2.1 Pilotförsök Comdicast AB avseende cerium-legerat stål<sup>VI</sup>

För att klarlägga sambanden mellan desoxidation i skänken och igensättningar vid gjutningen har pilotförsök utförts hos Comdicast AB. Vid försöken användes en induktionsugn med en kapacitet på 600 kg och 800 kVA effekt. Ugnen, som har en innerdiameter på 0,48 m och en höjd på 0,78 m, har en infodring av  $\text{Al}_2\text{O}_3$  och en uppvärmd dysa av  $\text{ZrO}_2$ , se Figur 7. Flytande argon tillfördes vid toppen av ugnen för att ge en skyddande atmosfär. Två termoelement är monterade i ugnen och två i dysan för att registrera temperaturen.



Figur 7: Försökuppställning.

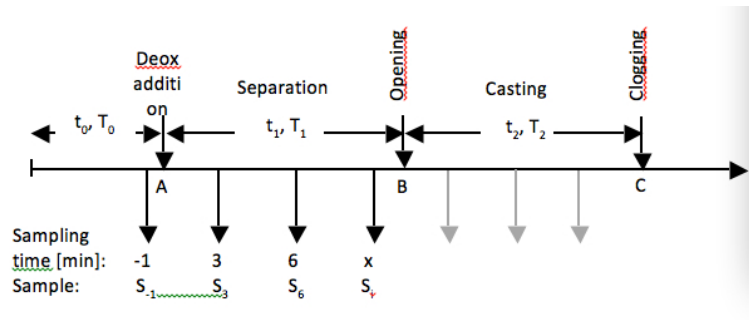
Totalt utfördes fyrtio försök av nio olika typer:

1. Referens.
2. Referens för att testa ugnens kapacitet.
3. Inverkan av stålets kiselhalt.
4. Inverkan av inläckage av syre från atmosfären, s.k. reoxidation.
5. Möjligheter att påverka igensättning genom efterföljande aluminiumtillsats, "Sloughing".
6. Legering med mischmetall, REM (Rare Earth Metals).
7. Tillsats av titan innan REM-tillsats.
8. Transient REM-tillsats, dvs tillsats av REM under gjutningens gång.

Vid alla försök jämfördes utströmningshastigheten med den som fås vid fri utströmning utan igensättningar enligt Bernoullis ekvation. Vid de olika försöken avtar utströmningshastigheten fortare än enligt denna vilket ger ett mått på igensättningstendensen hos det gjutna stålprovet.

En schematisk beskrivning av försöken finns i Figur 8.

<sup>VI</sup> TO23-154, *Pilot scale trials to study clogging phenomena in Ce-alloyed stainless steel, Comdicast Fagersta, KTH.*

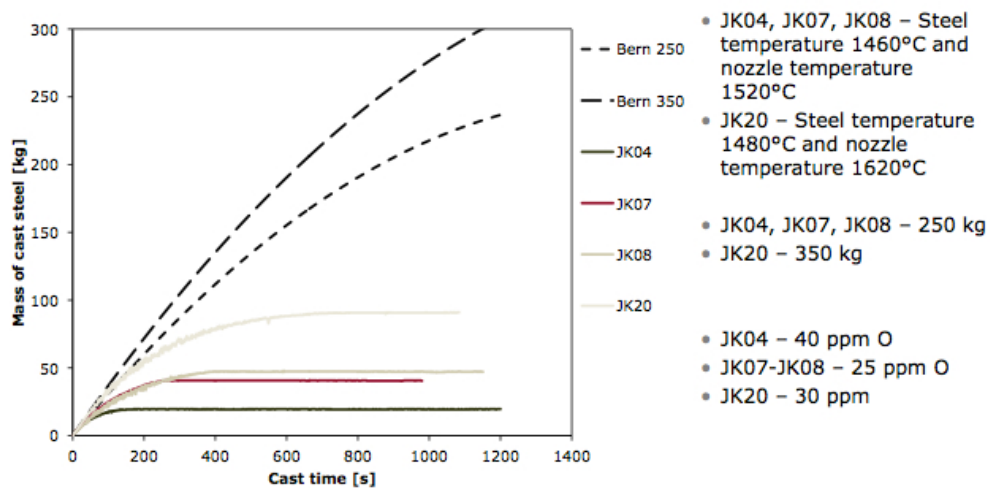


Figur 8: Schematisk tidslinje beskrivande försöken

## Resultat

### Referensförsök

I Figur 9 visas en jämförelse mellan Bernoulli och gjutningen i referensförsöken.



Figur 9: Jämförelse mellan Bernoulli och referensförsök, för olika temperaturer, syrehalter och gjutvikter.

Figuren visar Bernoullis ekvation för de två gjutvikterna 250 kg och 350 kg. Dessutom visas fyra olika referensförsök med olika gjutvikt och syrehalt för olika temperaturer. Kurvorna visar hur gjuthastigheten följer Bernoulli kortare eller längre tid för att sedan avta och stoppas helt, beroende på igensättningar i gjutdysan.

### Kiselhalt

Olika nivåer på kiselhalten testades för att utröna dess betydelse för igensättnings-benägenheten. Billets-skrot från traditionellt rostfritt stål med 18 % krom och 8 % nickel med låg kiselhalt smältes. Vid påbörjad smältning matades 253MA-plåt kontinuerligt till vikten uppnådde 350 kg. Lägre Si-halt ledde till högre syrehalter i smältan varvid det tillsatta ceriumet förbrukas genom bildandet av  $Ce_2O_3$  som flyter upp och skiljs av från smältan. Gjutningen gick bra vid lägre Si-halter men orsaken till detta är inte primärt den låga Si-halten utan att cerium förbrukas pga för hög syrehalt i smältan vid tillsatsögonblicket. Chargerna uppnådde heller inte erforderlig ceriumhalt för stålsorten i fråga.

### Reoxidation

Avsikten med försöken var att, genom att ta bort den skyddande argonatmosfären, generera en omedelbar igensättning genom reoxidation. Reoxidationen gav inte den förväntade effekten även om borttagandet av argonet ledde till en liten höjning av syrehalten. Jämfört med referensförsöken leder ändå en högre syrehalt till snabbare igensättningar. Det är sannolikt att den högre syrehalten ger upphov till fler oxider och därmed snabbare igensättning.



#### Sloughing

En annan mekanism som testades vid försöken var så kallad ”sloughing” vilket innebär att påbörjad igensättning kan sköljas bort med hjälp av tillsats av aluminium som skapar en ändring av syrejämvikten. Försöken visade dock ej på några sådana effekter utan aluminiumtillsatsen resulterade i ökad igensättning.

#### Tillsats av annan typ av REM-legering

Vid dessa försök var målet ceriumlegerat stål men den tillsatta mischmetallen innehåller de fyra lantaniderna lantan, cerium, praseodym och neodym. Skillnaden mellan dessa element är inte fullständigt klarlagd men det är rimligt att anta att de har lika egenskaper. Den tillsatta mischmetallen innehåller omkring 50 % cerium, 30 % lantan, 10 % praseodym och 5 % neodym. Denna legering användes då den är mycket billigare än ren cerium. Dessa försök ledde inte till någon förbättring av igensättningsbenägenheten.

#### För-desoxidation med titan

Det har tidigare visats att en tillsats av titan före desoxidationen ger en förändrad klusterkaraktäristik. Därför applicerades denna idé på REM-legerat stål. Ferrotitan tillsattes till en nivå på 0,1 % titan tre minuter innan mischmetalltillsats. Därefter följde tio minuters separationstid innan gjutningen startades. Resultaten är mycket intressanta. I jämförelse med övriga försök kunde en signifikant större mängd stål gjas ut. Dessutom uppvisade gjutningen inte det typiska igensättningsbeteendet. Troligen ändrar titantillsatsen inneslutningskaraktäristiken som önskat och igensättningarna förhindras/minskas. Ytterligare försök behöver dock utföras.

#### Transient tillsats av REM

Vid en transient tillsats av REM kan många olika saker studeras. Fokus låg här på att studera igensättningshastigheten efter en tillsats. Dessutom studerades inneslutningskaraktäristiken och igensättningarnas placering i dysan. I försöken tillsattes REM under två och två och en halv minut efter gjutstart. Vid båda försöken startar igensättningarna omedelbart och efter trettio sekunder är det stopp. Under denna korta tid har kompletta REM-oxidnätverk bildats och därför kan omblandningen antagas vara mycket snabb.

#### *Slutsatser*

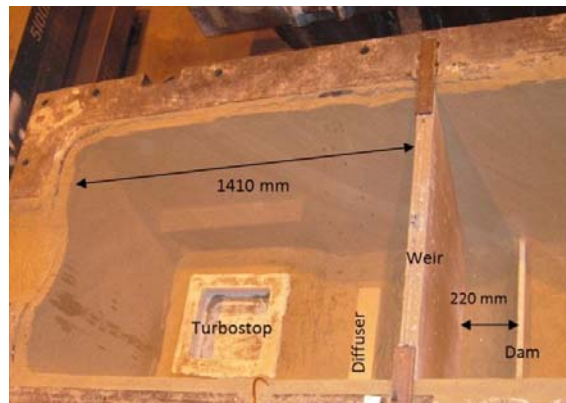
- Temperaturen hos stål och dysa påverkar igensättningarna. Det går dock ej att från försöken fastställa vilket som har störst betydelse.
- Syrehalten påverkar igensättningarna. Med för övrigt lika förutsättningar ger en högre total syrehalt snabbare igensättning.
- Kiselhalten har en kraftig påverkan på jämvikten och när kiselhalten är för låg fungerar cerium endast som desoxidationsmedel och separeras från stålet.
- ”Sloughing”-fenomenet kunde inte framkallas vid försöken vilket tros ha en koppling till kiselhalten.
- Fördesoxidation med titan ger lovande resultat men fler försök behövs.

### **4.3 Gjutlådan**

Gjutlådan utgör en buffert mellan skänk och kokill. Här finns den sista möjligheten att aktivt rena stålet från inneslutningar. I projektet har försök att ta ytterligare ett steg mot renare stål genom ökad avskiljning av små inneslutningar (<10 µm) utförts. Inneslutningar av denna storlek har så liten massa att deras flytkraft blir mycket liten jämfört med de dragkrafter som stålflödet utövar på dem. Via vertikal gasspolning kan emellertid detta utnyttjas så att denna lyftkraft samverkar med stålets dragkraft vilket ökar sannolikheten för avskiljning av dessa små inneslutningar. Samtidigt ökar också avskiljningen av större inneslutningar. Detta bör då leda till att igensättningshastigheten i gjutröret minskar.

### 4.3.1 Försök med diffusor hos SSAB EMEA Luleå<sup>VII</sup>

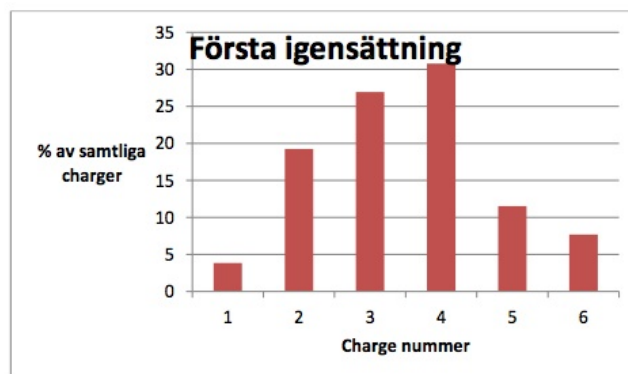
Två driftförsök med gasspolning i gjutlådan under gjutning av sekvenser med igensättningsbenägna stål har utförts hos SSAB Luleå. Deras gjutlådor är sedan tidigare utrustade med bafflar och bottentröskel för att öka uppehållstiden av stålet och därigenom öka avskiljningen av inneslutningar. Utöver dessa utrustades gjutlådan med turbostoppare och diffusor. Turbostopparen reducerar slitaget på gjutlådans botten och riktar flödet uppåt vilket leder till att flödesbilden är lugnare kring skyddsroret. Diffusorn är en keramisk kloss som har porer på ena sidan där argongas strömmar ut, ungefär som på en spolsten. I Figur 10 visas överskådligt hur turbostoppare, diffusor, baffel (weir) och bottentröskel (dam) är positionerade i gjutlådan.



Figur 10: Installation av turbostoppare och diffusor.

### 4.3.2 Resultat

Driftförsöken pågick under 6 charger. Argonflödet i diffusorn var satt till 40 nl/min. Som referens användes charge med samma stålkod under den tidsperiod då försöken utfördes. Det noterades när igensättningar uppkom i dessa charger. I Figur 11 visas när den första igensättningen inträffat för referenschargerna.



Figur 11: Charge för första igensättning.

Vid det första försöket uppstod igensättningar som ledde till att sotning var nödvändig under den tredje och den femte chargen. Under det andra försöket uppstod igensättningar som ledde till sotning under den tredje chargen.

### 4.3.3 Slutsatser

Då igensättningar som kräver sotning uppstår i charge ett till tre under normal drift i femtio procent av fallen innebär försöken ingen signifikant förbättring jämfört med referenschargerna. Det är svårt

<sup>VII</sup> TO23-145, Ny teknik i gjutlåda samt modifierad argoninjektion, driftförsök SSAB Luleå, Swerea MEFOS.

att dra några generella slutsatser från de utförda försöken men mängden igensättningsbenägna inneslutningar tycks inte ha minskat med hjälp av argoninjektionen jämfört med referenschargerna.

#### **4.3.4 Fortsatt arbete**

Det behövs längre mätserier för att få en uppfattning om hur igensättningsfrekvensen påverkas av installerade turbostoppare och diffusor.

### **4.4 Stopparstaken**

Stopparstaken reglerar flödet ut ur gjutlådan genom gjutröret till kokillen. Beroende på önskad gjuthastighet öppnas (lyfts) eller sänks stopparen för att erhålla nödvändigt flöde. I detta projekt har två olika metoder att lyfta stopparen utan att öka metallflödet provats. Att lyfta stopparen innebär att springan mellan stopparspetsen och gjutrörets säte blir större. En hypotes är att igensättningsbenägenheten då minskar och längre gjuttider kan uppnås. De två olika metoder som undersökts är:

- Argoninjektion genom stopparen.
- Roterig av stopparstaken för att skapa ett virvelflöde.

#### **4.4.1 Argoninjektion i stopparstaken hos Outokumpu Stainless Avesta<sup>VIII</sup>**

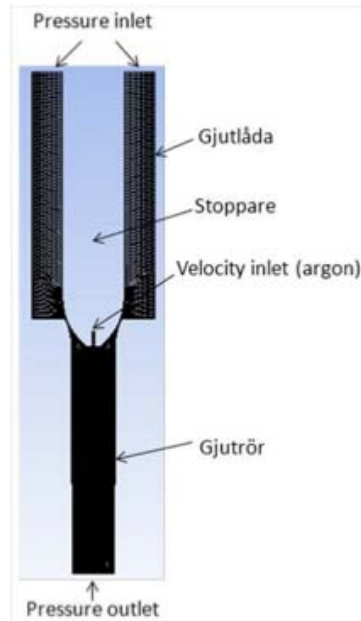
Vid gjutning av ceriumlegerade stål hos Outokumpu Stainless i Avesta är igensättningar ett problem. Minskade igensättningar skulle kunna leda till längre tider med störningsfri gjutning vilket innebär att fulla charger i det närmaste alltid kan gjudas ut och att möjligen också sekvensgjudas. Idag sker gjutningen utan argoninjektion. Målet med arbetspaketet var att genom modellering, pilotförsök och driftförsök öka förståelsen kring tryck-/strömningsförhållanden kring stopparen och i gjutröret. Utifrån dessa analyser ökas också förståelsen hur stopparläget förändras vid olika driftförhållanden och erfarenheten används sedan vid driftförsöken.

##### **CFD-analys**

För analyserna har CFD-programmet Fluent använts med geometrin för stoppare och gjutrör från Outokumpu Stainless Avesta. Geometrin för gjutlåda och kokill är ifrån Flowvis utrustningen hos Swerea MEFOS. Anledningen till detta är att analyserna kopplas mot det utförda pilotförsöket med Outokumpus konfiguration. Modellen är en flerfasmodell med materialegenskaper för argon och smält metall (tenn-vismut). 3-D modellen innehåller ca 500.000 element. Argoninloppet är av typen ”velocity inlet”, in och utlopp av stålet är av typen ”pressure inlet/outlet”, se Figur 12.

---

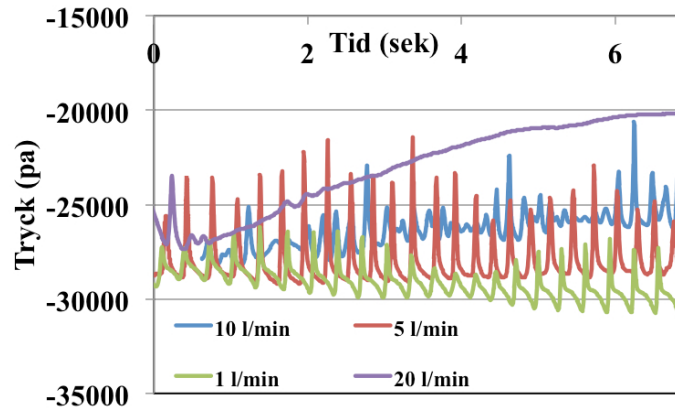
<sup>VIII</sup> TO23-144, *Argoninjektion i stoppare för att minska igensättningsgraden, Outokumpu Avesta, Swerea MEFOS.*



**Figur 12:** Beräkningsdomän för CFD-studien av argonspolning.

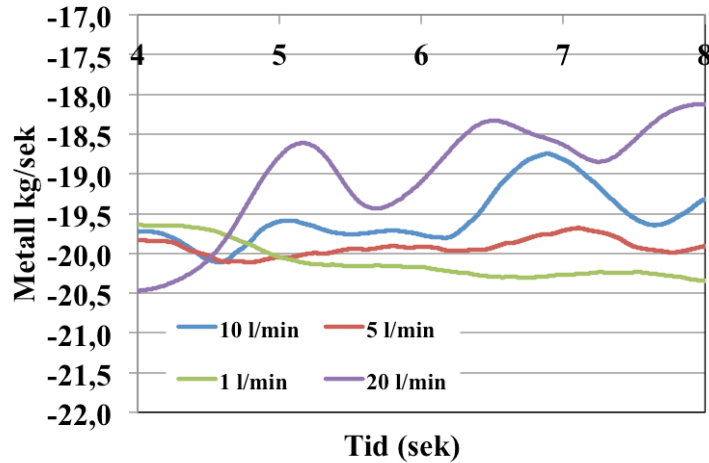
### Resultat

Figur 13 visar att ett ökat argonflöde sänker undertrycket som simulerats under stopparen. Figuren visar också att undertrycket varierar periodiskt beroende på att det predikterade gasflödet svänger fram och tillbaka vid utloppet.



**Figur 13:** Simulerat undertryck under stopparen som funktion av argonflödet.

Simuleringarna visar också att metallflödet minskar med ökad argoninjektion, se Figur 14. Observera att metallflödet är negativt då flödets riktning är nedåt. Ett större negativt värde innebär alltså ett större flöde.



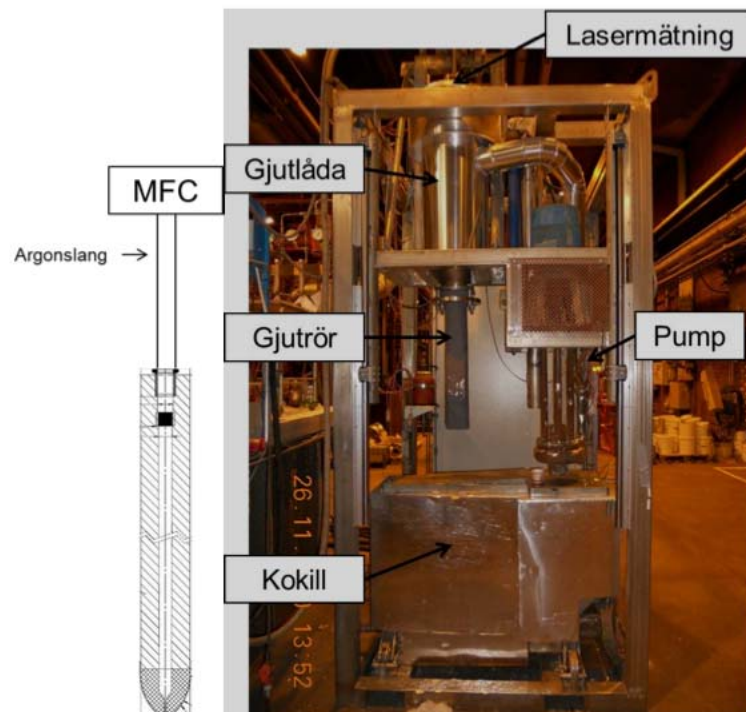
**Figur 14:** Simulerat flöde av metall som funktion av argonflödet.

#### Slutsatser

Simuleringarna har ökat förståelsen för hur tryck och flöde förändras vid argoninjektion i stopparen. Ett ökat gasflöde ger lägre undertryck under stopparen och därmed ett lägre metallflöde. För att öka flödet igen måste alltså stopparen lyftas vilket ger en större spalt mellan stopparen och gjutrörets säte, vilket i sin tur borde leda till mindre problem med igensättningar i detta område, då en större volym stål kan passera spalten utan direktkontakt med stoppare och gjutrör.

#### *Pilotförsök hos Swerea MEFOS*

För att verifiera CFD-analysen och säkerställa att argoninjektionen fungerar praktiskt har försök gjorts i Swerea MEFOS stränggjutningssimulator, Flowvis, se Figur 15.



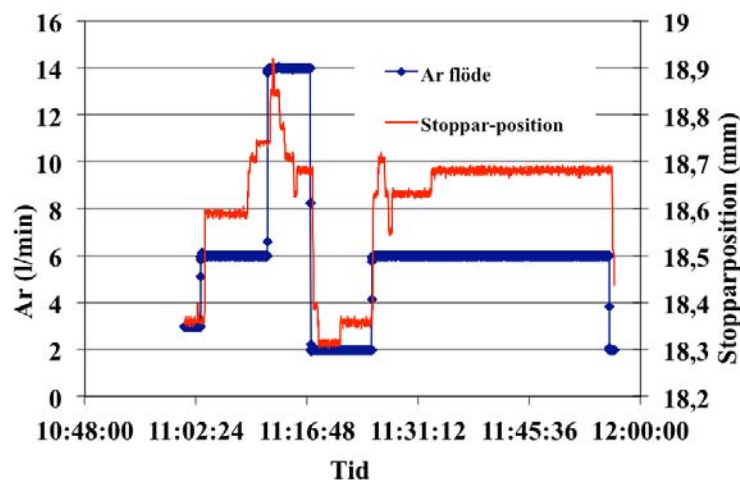
**Figur 15:** Flowvismodellen tillsammans med schematisk bild av använd stoppare.

Denna består av en modell av en stränggjutningskokill med stoppare och gjutrör i fullskala. En metallegering med låg smältpunkt (tenn-vismut, smältpunkt 137 °C) och med en densitet och viskositet liknande stål, pumpas runt i systemet efterliknande den verkliga gjuthastigheten. Modellen

har utrustades med stoppare och gjutrör från Outokumpu Stainless Avesta. Den använda stopparen var modifierad för injektion av argongas av leverantören.

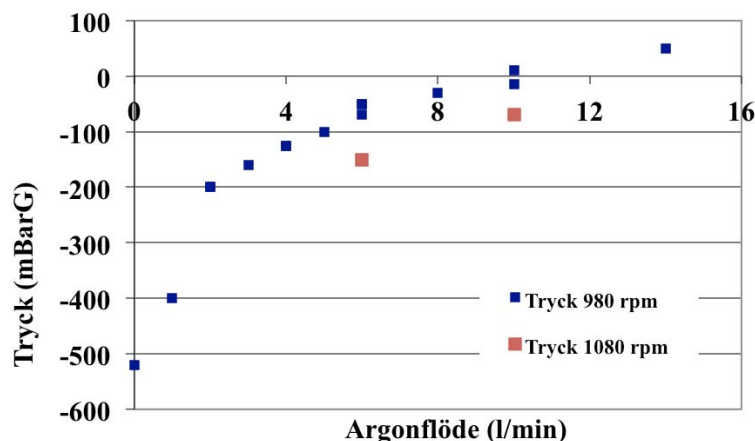
### Resultat

Resultaten ifrån Flowvis-försöken visade på ett direkt samband mellan stopparöppningen och argonflödet. Stopparen öppnas när argonflödet ökas för att behålla samma flöde av metall. CFD-försöken bedrivna ovan visade att argoninjektionen sänker undertrycket under stopparen, vilket leder en lägre tryckdifferens och därmed ett lägre flöde. Större öppningsgrad för stopparen vid ökat argonflöde är positivt då detta sannolikt leder till att spalten mellan stoppare och säte blir mindre känslig för igensättning. Tyvärr leder ökat argonflöde till oroligare kokillyta så argonflödet kan inte vara för högt för att få en stabil process. Flowvis-försöken utfördes dock utan gjutpulver vilket leder till en oroligare yta då pulvrets dämpande effekt saknas. Figur 16 visar hur stopparpositionen måste förändras vid förändrat argonflöde för att behålla konstant metallflöde.



Figur 16: Stopparspositionen som funktion av argonflödet.

Trycket under stopparen loggades också. Figur 17 visar hur undertrycket under stopparen varierar som funktion av gasflödet för två olika pumpvarvtal. Pumpens varvtal är korrelerat till gjuthastigheten.



Figur 17: Trycket under stopparen som funktion av argonflödet.

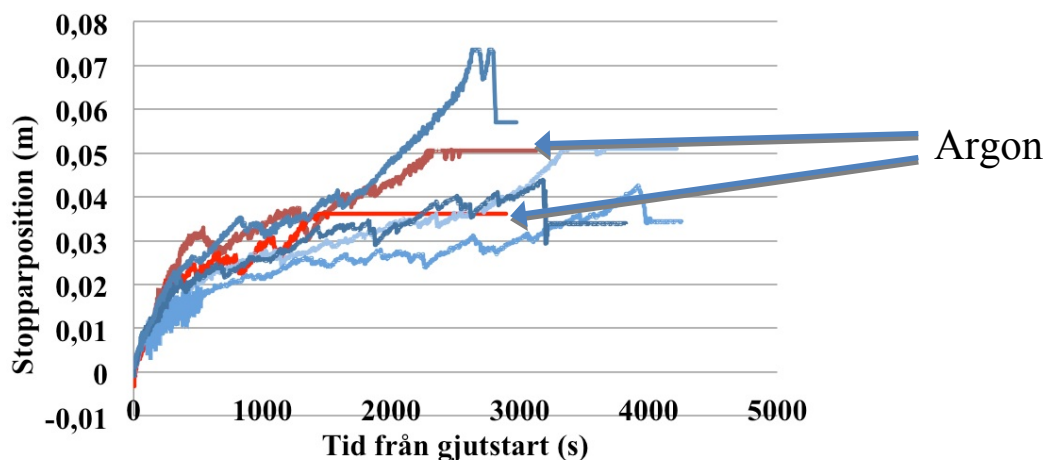
Figuren visar att undertrycket sjunker med ökande argonflöde. Detta leder till att metallflödet minskar, vilket i sin tur leder till att stopparen måste lyftas för att bibehålla önskat flöde.

### Driftförsök hos Outokumpu Stainless Avesta

Efter genomförandet av CFD-analys och pilotförsök utfördes driftförsök. Målet med driftförsöken var att kunna gjuta en sekvens av två charger av en igensättningsbenägen stålsort.

#### Resultat

Resultaten ifrån driftförsöken utvärderades genom att data jämfördes mot referenscharger. I både referensgjutningarna och gjutningarna med argoninjektion lyfts stopparen kontinuerligt. Det tyder på att igensättningar byggs upp och att stopparen lyfts för att kunna bibehålla samma flöde. Figur 18 visar stopparpositionen som funktion av gjuttid för referenschargerna och chargerna med argoninjektion genom stopparen. Kurvorna för chargerna med argonspolning genom stoppare är markerade i diagrammet. Då stopparens nolläge ej finns registrerat går det ej att utläsa hur mycket argonspolningen påverkar tvärsnittsarean mellan stoppare och gjutrörssäte.



Figur 18: Stopparsposition som funktion av gjuttid.

Kvaliteten på de gjutna ämnena utvärderades också. En kommentar rörande ytkvaliteten hos de ämnen som göts med argonspolning var: "Slabbsen från charge 414154 och 414155 är nu slipade i kallslipen. De har slipats av Per Carlsson som är van att slipa MA. Enligt honom var ytorna ovanligt fina, speciellt som första chargen var något kall. Då brukar det bli mer pulverfläckar. På slabbs 414154-4 fanns några ytliga "pulvergropar" fast utan pulver (ovanligt) som gick att handfläcka bort". Detta tyder på att argoninjektion även kan ha andra fördelar.

#### Slutsatser

Utvärderingen av stopparpositionen visar inte på någon förbättring eller försämring av igensättningsgraden. Användandet av argoninjektion genom stopparen kräver dock en viss inkörningsperiod för bästa resultat och då endast två charger kördes kan det inte uteslutas att resultaten störts av igångkörningsproblem.

#### 4.4.2 Kalibrerad argoninjektion hos SSAB EMEA Luleå<sup>IX</sup>

SSAB EMEA Luleå använder, till skillnad från Outokumpu Stainless, argonspolning genom stopparen som normal praxis. Där har försök med kalibrerad argoninjektion utförts. En stoppare för kalibrerad argoninjektion har en mindre utloppsarea för argongasen. Hypotesen är att minskad area

<sup>IX</sup> TO23-145, Ny teknik i gjutlåda samt modifierad argoninjektion, driftförsök SSAB EMEA Luleå, Swerea MEFOS.

leder till ett högre tryck i stopparen vilket motverkar läckaget av luft till systemet, som i sin tur medför minskad igensättning.

#### ***Driftförsök***

Driftförsök har utförts med en stoppare där diametern minskats från 5 mm till 1,6 mm.

#### ***Resultat***

Fyra charger kördes i det första försöket och i den tredje chargen krävdes sotning för att bränna bort igensättningar som bildats vilket är normalt för vanlig argoninjektion. Försöket visar inte på någon försämring eller förbättring när det gäller igensättningsgraden för den stålkod som göts under försöken. Dessutom utvärderades trycket för att förstå effekten av den minskade diametern på hålet. Trycket har ökat med ca 25 % (ökat från ~200 – 250 bar) med den kalibrerade argoninjektionen vilket kan förklaras med den minskade arean hos gasinjektionshålet.

#### ***Slutsatser***

De genomförda försöken visade inte på någon inverkan på igensättningsgraden. Troligen är antalet driftförsök för få för att ge någon generell information om metodens fördelar eller nackdelar.

#### ***Fortsatt arbete***

Ytterligare försök krävs för att studera effekten av kalibrerad argoninjektion på igensättningstendenserna.

### **4.4.3 Roterande stoppare hos Sandvik Materials Technology<sup>x</sup>**

I ett tidigare projekt, vilket hade som mål att minska användningen av argon vid stränggjutningen utan att öka graden av igensättning, testades olika idéer via numerisk modellering, fysisk modellering och driftförsök. En av de intressanta idéerna var att låta det flytande stålet rotera på väg ner i gjutröret. Genom rotationen tillsammans med en minimal tillsats av argon skulle inneslutningarna samlas mot mitten av röret för att sedan flyta upp i kokillen. Dessutom minskade rotationen undertrycket i gjutröret vilket ledde till att stopparen öppnade sig för att bibehålla flödet. Swerea MEFOS vidareutvecklade idén med egna medel och detta ledde så småningom till en patentansökan. Denna stoppare har testats i driftförsök hos SMT.

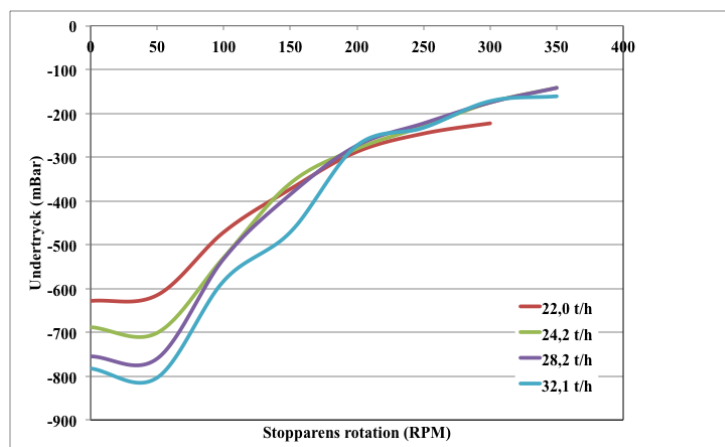
#### ***Pilotförsök***

De hydrodynamiska förhållandena omkring stopparspetsen har simulerats i Swerea MEFOS fysikaliska modell för stränggjutning. Inverkan av stopparens rotation på flöde och tryck i gjutröret har undersökts. Trycket har mätts i stopparspetsen via argonanslutningen och i gjutröret genom ett mätrör. Resultat från de första pilotförsöken visade endast på en svag inverkan av rotationen då en vanlig stoppare användes. Det var nödvändigt att göra geometriska förändringar på stopparspetsen för att erhålla påverkan på flödet. Figur 19 nedan visar resultat för försök där stopparstaken har försetts med 4 stycken vingar 45 grader mot vertikalanplanet. Massflödet har varierats mellan 22 till 32 t/h och rotationen har varierats från 0 till 350 rpm i 8 steg.

---

<sup>x</sup> TO23-147, *Roterande stoppare – ett försök att motverka igensättning vid stränggjutning*, Swerea MEFOS





**Figur 19:** Tryck i gjutröret vid olika massflöden som funktion av rotationshastighet.

Det mätta trycket minskar med ökat massflöde. Utan rotation ger högsta massflödet det lägsta trycket, cirka 0,2 atm. Då stopparen roteras ökar det absoluta trycket. Ett tryck på cirka 0,7 atm erhålls för alla de undersökta massflödena då rotationen är 200 rpm. Stoppares position ökar när varvtalet ökar och samtidigt minskar undertrycket för samtliga provade massflöden.

#### **Driftförsök**

Det första försöket gjordes vid en billets gjutning av rostfritt stål. Figur 20 visar stopparen med vingar, i gjutlådan.



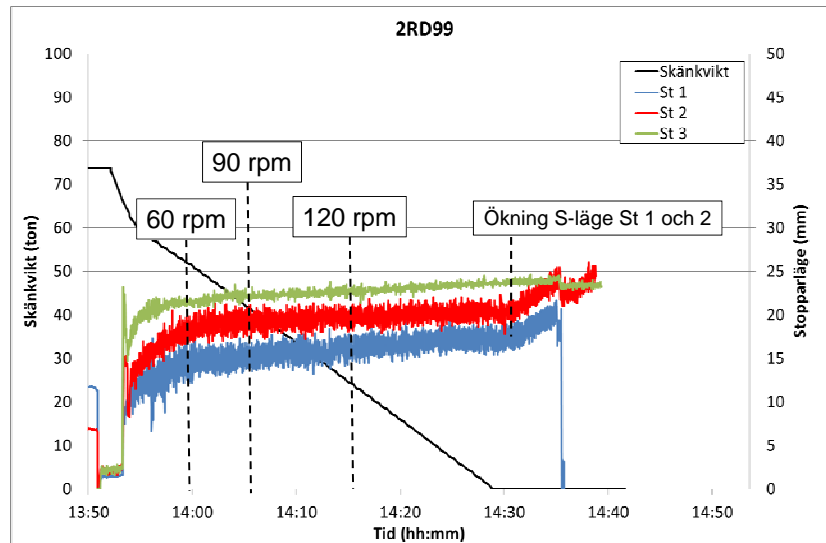
**Figur 20:** Stoppare med vingar

Då detta var det första försöket startades rotationen först i slutet av gjutningen. Den nya konstruktionen av stakspel och dess funktion utvärderades. Därefter utfördes fyra driftförsök med olika stålsorter och förutsättningar. Se Tabell 1 nedan.

**Tabell 1:** Utförda driftförsök

Datum	Chargenummer	Rotation (rpm)	Anmärkning
2011-11-21	531051	60 / 90	Solida stoppare.
2011-11-22	531064	60 / 90 / 120	Ar-stoppare.
2011-11-22	531071	60 / 90 / 120 / 150	Solida stoppare.
2012-01-05	531406	100 / 150	Solida stoppare.

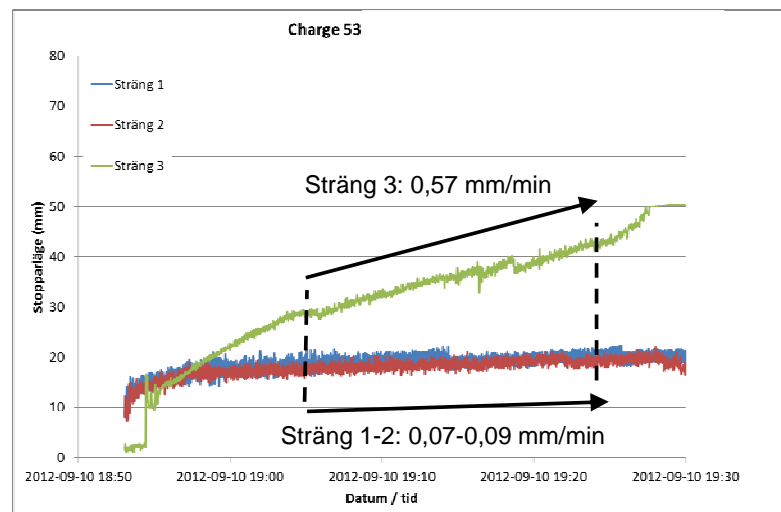
Rotationen har successivt ökat från 60 till 150 rpm. Slitaget på stopparstaken har knappt varit märkbart och inga andra negativa konsekvenser har visat sig under försöken. Några tydliga resultat när det gäller igensättning har inte erhållits. Stålsorterna har normalt inte starka tendenser till igensättning. Figur 21 nedan visar stopparlägets utveckling med tiden för ett av driftförsöken.



**Figur 21:** Stopparläge från försök 2011-11-21 utförda hos SMT.

Vid detta försök utvecklas de tre lägena på liknande sätt under den större delen av gjutningen förutom i slutet då sträng 1 och 2 lyfts snabbare beroende på att skänken då är tom och nivån i gjutlådan sjunker. Detta medför att stopparna måste lyftas för att bibehålla konstant stålflöde. Varför detta inte sker för den roterande stopparen är utrett. För denna stålsort används normalt argoninjektion, vilket användes i sträng 1 och 2 men inte för sträng 3.

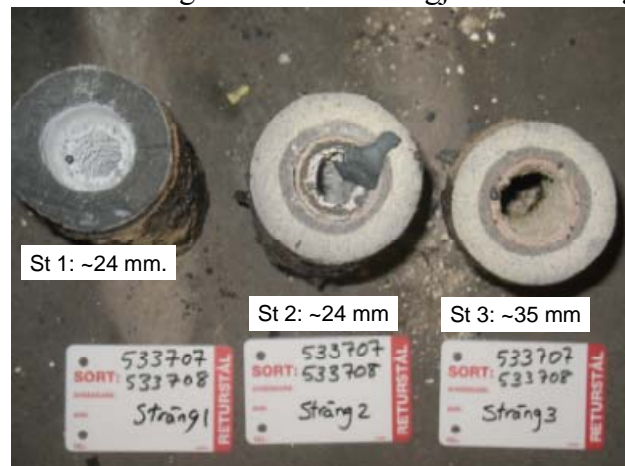
Därefter utfördes driftförsök med igensättningsbenägna stålsorter. Tre försök utfördes med ett låglegerat aluminiumtätat stål. Stopparlägen som funktion av tiden för ett av de tre försöken visas i Figur 22.



**Figur 22:** Försök aluminiumdesoxiderat stål hos SMT.

Till skillnad från de tidigare försöken erhöles denna gång ett tydligt resultat. Sträng 3 med solida stoppare och rotation (max. 200 rpm) öppnade i en betydligt snabbare takt än sträng 1 och 2 (0,35-0,57 vs. 0,07-0,25 mm/min). Förutsättningarna är dock inte likvärdiga då sträng 1 och 2 gjuts med argoninjektion och rippling som normalt används. Ett intressant resultat rör var den flödeshindrande

igensättningen är belägen. Vid försök 1 och 2 sparades gjutrören och säten efter gjutning och igensättningen analyserades kemiskt. Figur 23 nedan visar gjutrören med igensättningen.



**Figur 23:** Igensättning efter försök 1

I Sträng 3 göts endast en charge av de planerade två. Efter en charge har stopparen öppnat till sitt maximum (50 mm) men den fria diametern i gjutröret är fortfarande cirka 35 mm. Motsvarande värden för sträng 1 och 2 är en stopparöppning på cirka 20 mm (efter en charge) och en fri diameter på cirka 20 mm. Den flödesbegränsande igensättningen sitter alltså inte i gjutröret utan sannolikt uppe vid sätet.

#### **4.4.4 Slutsatser**

Både argoninjektion och roterande stoppare leder till ett minskat undertryck under stopparen. Detta leder i sin tur till att stopparen lyfts och skapar en större öppning mellan stoppare och gjutrörssäte för att bibehålla önskat flöde. Den större öppningen indikerar att förutsättningar för minskad igensättning är uppfyllda då fler inneslutningar bör kunna passera utan att komma i kontakt med stopparens eller gjutrörssätets yta. Utförda driftförsök med argoninjektion genom stopparen och med roterande stoppare har dock inte entydigt kunnat visa på några minskade igensättningstendenser.

Driftförsök med kalibrerad argoninjektion genom stopparen har inte heller påvisat någon signifikant förbättring av igensättningsproblematiken.

En av anledningarna till detta torde vara att för få försök gjorts. För att kunna säkerställa effekten av utförda förändringar krävs längre försöksserier.

#### **4.4.5 Fortsatt arbete**

Flera försök behöver utföras för att undersöka argoninjektionens påverkan på igensättningstendenserna.

Flera försök behövs också för att utröna roterande stopparens effekt på igensättningarna. För att fullständigt utreda rotationens betydelse bör försök där rippling och argoninjektion även utnyttjas för den roterande stopparen utföras för att få en riktig jämförelse med en icke roterande stoppare.

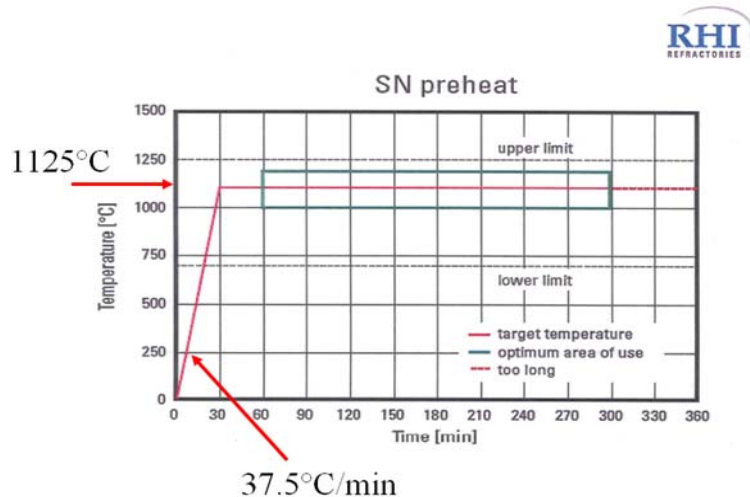
#### **4.4.6 Gjutröret**

Igensättning av gjutröret antas oftast uppstå i tre steg.

- Transport av inneslutningen till gjutrörsväggen
- Vidhäftning på väggen
- Ackumulering av ett nätverk av inneslutningar

#### 4.4.7 Förvärmning av gjutröret hos SMT, Outokumpu Stainless och SSAB EMEA Luleå<sup>XI</sup>

För att reducera den termiska chocken vid mötet med flytande stål är det praxis att gjutrören förväms. Det är då viktigt att de rekommendationer som angivits rörande uppvärmningshastighet och uppnådd temperatur följs så att den glasyr som finns på insidan som skydd för grafiten i gjutröret ska ge avsedd effekt. I Figur 24 visas ett sådant rekommendationsblad. Det kan noteras att det finns en undre och en övre temperaturgräns för optimerad värmning. Dessutom anger diagrammet erforderad uppvärmningshastighet.

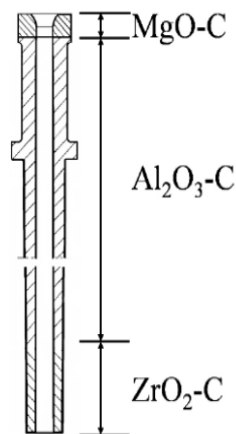


Figur 24: Rekommenderad värminingsprofil från en gjutrörsleverantör.

För att studera förvärmningens effekt på gjutröret har laboratorieförsök och driftsmätningar utförts.

#### Laboratorieförsök

Ett kommersiellt gjutrör består av olika material, se Figur 25.



Figur 25: Sammansättningen hos ett kommersiellt gjutrör.

Försök utfördes för att utröna hur avkolningsförloppen såg ut hos de i gjutröret ingående materialen, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C, ZrO<sub>2</sub>-C och MgO-C.

#### Resultat

Försöken visar en hög grad av avkolning av keramerna vid uppvärmning till respektive 1473 K och 1773 K. Avkolningsgraden ökar också då temperaturen efter uppvärmning hålls kvar konstant vid dessa temperaturer. Om det finns ett syreöverskott vid värmningen så kommer MgO-C-delen att få

<sup>XI</sup> TO23-149, Decarburization during preheating of the Submerged Entry Nozzle, HDa

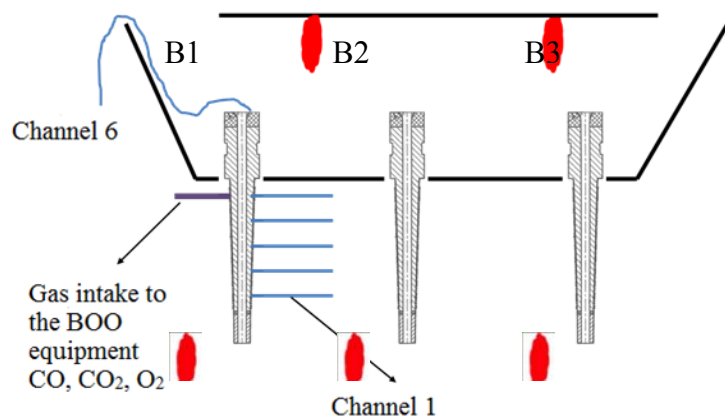
den högsta avkolningen vilket är olyckligt då MgO-C sitter i den del av gjutröret där känsligheten för igensättningar är störst.

#### Slutsatser

Det kan konstateras att det sannolikt uppstår problem med avkolning vid förvärmning av gjutrör. För att utröna hur avkolningen ser ut i praktiken utfördes driftförsök hos de tre målverken, Sandvik Materials Technology, Outokumpu Stainless Avesta och SSAB EMEA Oxelösund.

#### *Driftförsök förvärmning, Sandvik Materials Technology*

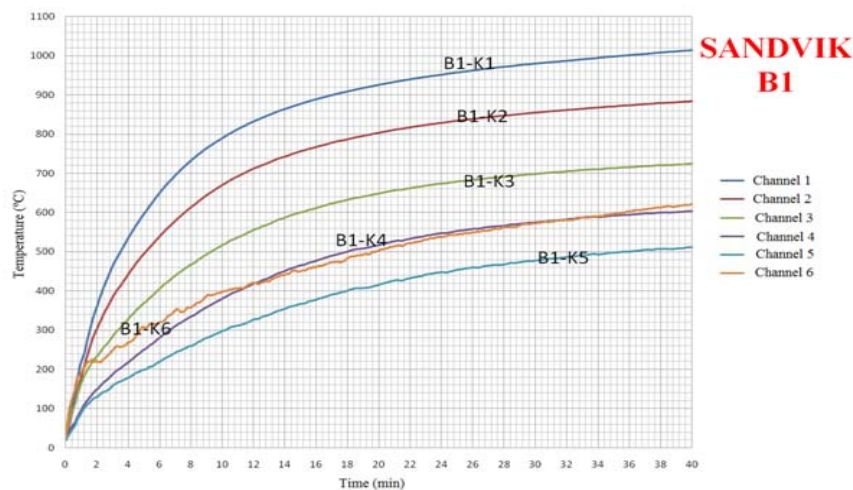
Gjutralån, försedd med lock, och gjutrören förvärmades med propanbrännare. Temperaturfördelningen i gjutröret mättes med termoelement, se Figur 26.



**Figur 26:** Förvärmningsuppställning

#### Resultat

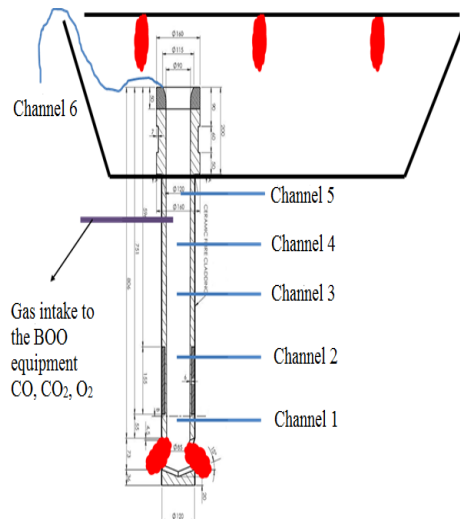
Temperaturprofilen i gjutröret som funktion av förvärmningstiden visas i Figur 27.



**Figur 27:** Temperaturprofil i gjutröret under uppvärmning.

#### *Driftförsök förvärmning, Outokumpu Stainless Avesta*

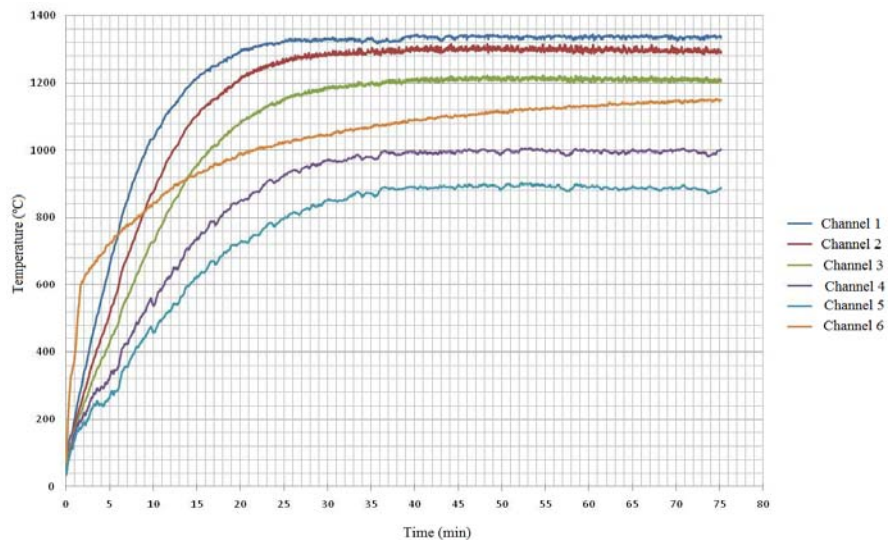
Gjutrören förvärmades i gjutralån med lock av oxy-propanbrännare placerade i locket och i gjutrörets utlopp, se Figur 26.



**Figur 28:** Fövärmningsuppställning

### Resultat

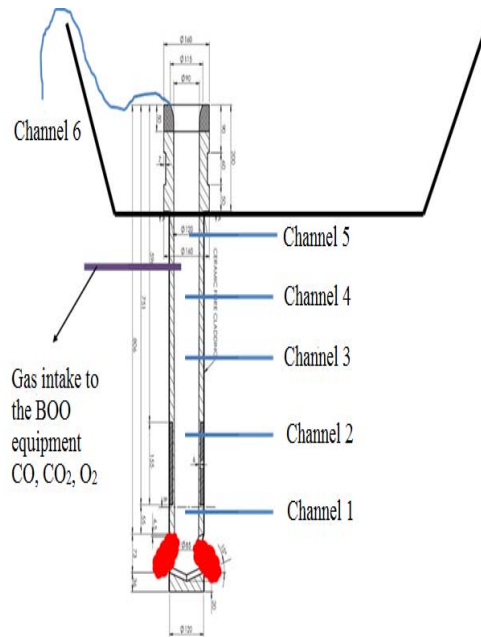
Temperaturprofilen i gjutröret vid värmning visas i Figur 29.



**Figur 29:** Temperaturprofil i gjutröret vid fövärmning

### Driftförsök fövärmning, SSAB EMEA Luleå

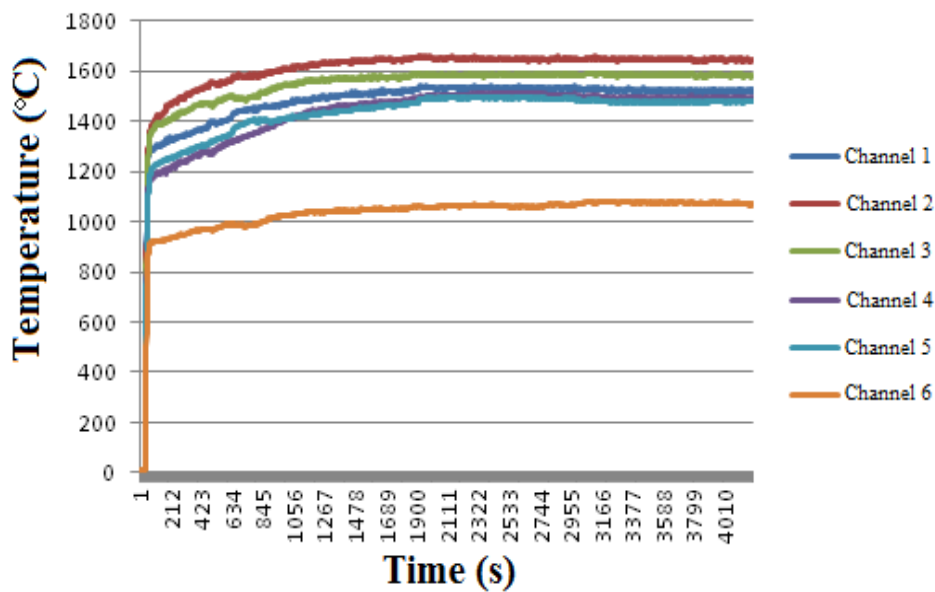
Vid SSAB EMEA Luleå fövärmns gjutrören genom att en brännare placeras under gjutröret som värmer gjutröret nerifrån och upp.



**Figur 30:** Fövärmningsuppställning.

Resultat

Temperaturprofilen i gjutröret vid värmning visas i Figur 31.



**Figur 31:** Temperaturprofil i gjutröret vid fövärmning.

*Slutsatser*

Kartläggningen av fövärmning av gjutrör visar att det finns klara brister hos de undersökta målverken. Rekommenderade värmningstider och sluttemperaturer nås ej vilket leder till oönskad avkolning vid fövärmningen. Ett sätt att minska eller helt förhindra avkolningen vid fövärmning är att belägga gjutrör och stopparspets med ett tätt ytskikt, se kapitel 4.4.10.

#### 4.4.8 Porositetsmätning av gjutrör, SSAB EMEA Luleå<sup>XII</sup>

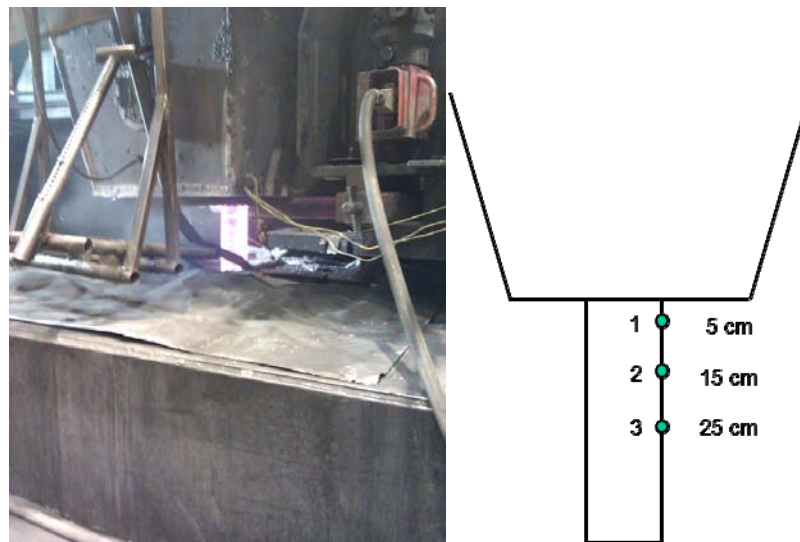
För att undersöka hur gjutrörets porositet påverkas av förvärmning och gjutning togs prover från ett gjutrör före och efter förvärmningen och efter gjutningen. Proverna togs från insidan, mitten och utsidan av gjutröret. Dessa prover skickades till Lunds Tekniska Högskola där analys med hjälp av kvicksilverporosimetri utfördes.

##### Resultat

Porositetsskillnaderna mellan nya, förvärmda och gjutna gjutrör var små och visar inte något tydligt mönster.

#### 4.4.9 Temperaturmätning i gjutröret under gjutning, SSAB EMEA Luleå<sup>XIII</sup>

Temperaturmätningarna utfördes från förvärmning till efter gjutning. Termoelement installerades i gjutröret enligt Figur 32.



Figur 32: Installation av termoelement under gjutning.

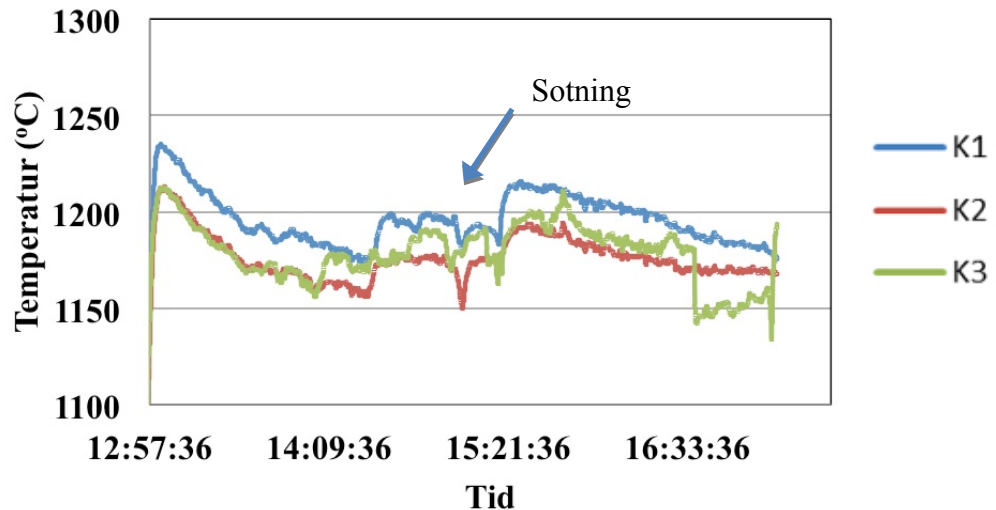
##### Resultat

Temperaturen i gjutröret stiger kraftigt vid gjutstart. Under gjutningen sjunker temperaturen vilket är ett tecken på igensättningar, eftersom igensättningarna på insidan av gjutröret isolerar detta så att värmeflödet genom gjutrörsväggen minskar. Figur 33 visar sambanden medan temperatur och igensättningar.

<sup>XII</sup> TO23-146, Kartläggning Förvärmning SSAB EMEA Luleå, Swerea MEFOS

<sup>XIII</sup> TO23-146 Kartläggning Förvärmning SSAB EMEA Luleå, Swerea MEFOS





Figur 33: Temperatur i gjutröret under gjutningen.

I figuren kan det ses att temperaturen sjunker i gjutröret när igensättningar byggs upp på insidan av röret. Efter sotning (igensättningarna bränns bort) stiger temperaturen igen.

#### 4.4.10 Beläggning av gjutrör hos Outokumpu Stainless Avesta<sup>XIV</sup>

För att minska koloxidationen vid förvärmning har försök med plasmabeläggning (PVD) av gjutrör utförts. Beläggningen har bestått av yttriumoxidstabiliserat zirkoniumoxidpulver (YSZ). Försöken har utförts i laboratorieskala, pilotskala och i drift. Dessutom har försök där YSZ-pulvret blandats med kalciumtitanatpulver utförts.

##### Laboratorieförsök<sup>XV</sup>

Två olika laboratorieförsök utfördes för att utvärdera avkolningsmotståndet och eventuella reaktioner mellan cerium och infodringen vid YSZ-beläggning av keramiskt material från ett gjutrör. Proven var cylindriska bitar urborrade från ett kommersiellt gjutrör, se Figur 34.



Figur 34: Provbit före och efter beläggning med YSZ

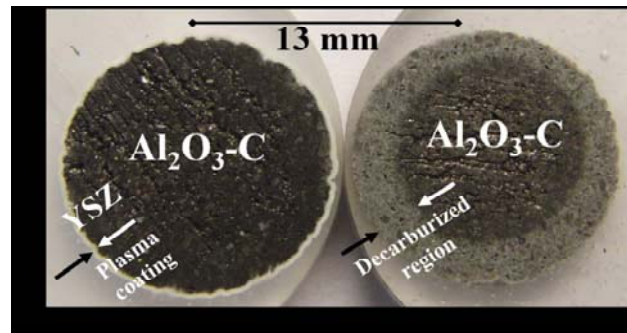
Det första försöket utfördes i en uppvärmningsprocess under kontrollerad atmosfär och med en temperaturprofil definierad utifrån de förvärmningsförsök som utförts hos SMT (se ovan) för att efterlikna industriella förhållanden så långt som möjligt. I det andra försöket roterades de förvärmda proverna i smält ceriumlegerat stål.

<sup>XIV</sup> TO23-148, *Studies on plasma coatings for clogging reduction during continuous casting of steel*, HDa

<sup>XV</sup> TO23-149, *Decarburization during preheating of the Submerged Entry Nozzle*, HDa

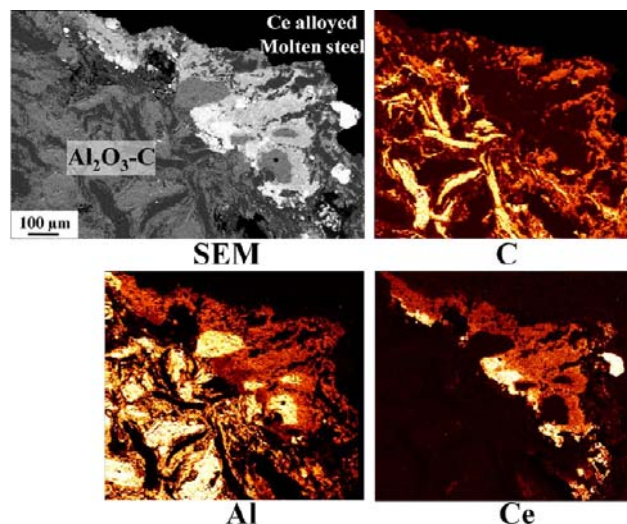
### Resultat

De kontrollerade atmosfärerna bestod av CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> och Ar. CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-värdena hölls på samma nivå som för en propanbrännare vid ett luftbränsleförhållande (AFR) lika med 1,5. Tjocklekarna av de avkolade skikten mättes och undersöktes i ljusoptiskt mikroskop, FEG-SEM och SEM-EDS. De YSZ-belagda provbitarna motstod effektivt koloxidation vid olika beläggningstjocklekar från 160 till 480 µm, i både rökgas och luftatmosfär. Figur 35 visar skillnaden mellan en YSZ-belagd och en obelagd provbit efter försök. Det framgår av figuren hur den obelagda provbiten har en avkolad zon med en tjocklek av ett par millimeter. Den belagda provbiten har däremot motstått avkolning helt.



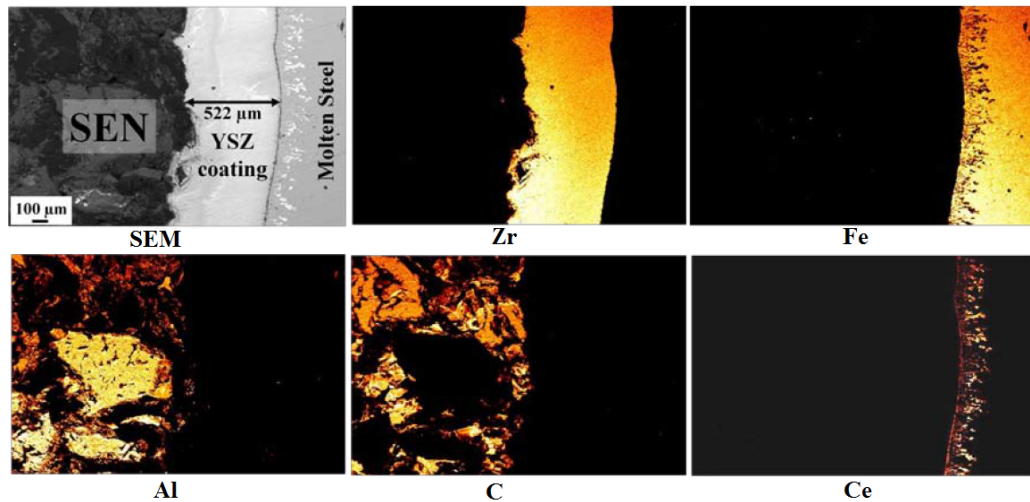
Figur 35: Jämförelse mellan YSZ-belagd och obelagd provbit efter försök

En andra funktion hos beläggningen är att blockera kontakt mellan aluminiumoxid i det keramiska gjutrörs materialet och cerium i stålet och därmed förhindra oönskade reaktioner emellan dem. Figur 36 visar ett tvärsnitt av provbitarna. Där kan tydligt ses att den belagda provbiten är mer eller mindre opåverkad medan den obelagda biten har ett tjockt avkolat område runt hela omkretsen. Analys med hjälp av SEM-EDS visar att den obelagda provbiten har infiltrerats av stål beroende på gjutrörets porositet (18 %) och att cerium har reagerat med aluminiumoxid i gjutrörs materialet.



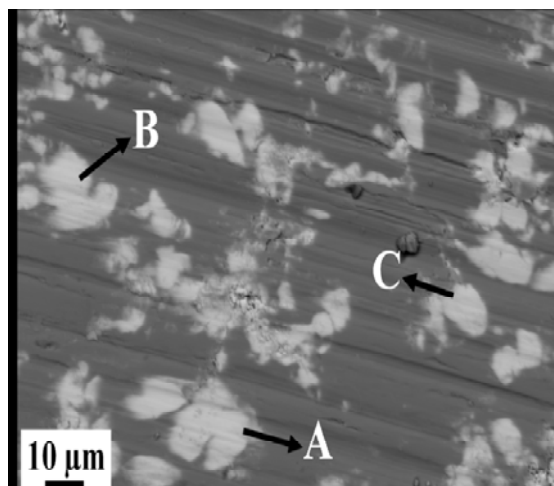
Figur 36: SEM-EDS-analys av obelagt gjutrör, gränsskikt och stål.

Analys av den belagda provbiten visar att beläggningen helt och hållet har skyddat mot interaktion mellan cerium i stålet och aluminiumoxid i provbiten, se Figur 37.



**Figur 37:** SEM-EDS-analys av belagt gjutrör, gränsskikt och stål.

SEM-bilden visar att belägningens ytskikt fortfarande är jämnt efter rotationstestet. För att konfirmera bildningen av ceriumaluminater “in situ” vid gränssytan mellan den obelagda provbiten och det ceriumlegerade stålet undersöktes inneslutningskaraktistiken efter laborieförsöken. Figur 38 visar en SEM-bild av inneslutningar i stålet efter försöken.



**Figur 38:** SEM-bild av inneslutningar i stålet efter laborieförsöken.

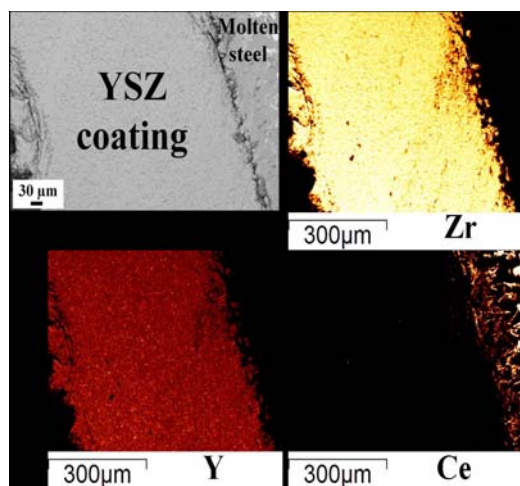
Tre olika inneslutningar (A, B och C) analyserades. Tabell 2 visar sammansättningen hos dessa.

**Tabell 2:** SEM-EDS-analys av A, B och C

	A (mass %)	B (mass %)	C (mass %)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.47	0.33
SiO <sub>2</sub>	0.28	0.51	0.03
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.49	99.03	99.64

Tabellen visar att de tre analyserade inneslutningarna innehåller nästan bara ceriumoxid. Analysen utfördes för ett stort antal inneslutningar och alla hade mer eller mindre lika sammansättning som A, B och C. Eftersom reaktionen mellan cerium- och aluminiumoxid inte äger rum vid lägre temperatur än 1670 °C kan det uteslutas att stålet innehöll ceriumaluminater. Dessutom kan det konstateras att ceriumoxiderna har bildas genom en reaktion mellan gjutrörsmaterialet och det legerade ceriumet.

Enligt termodynamiska beräkningar är dock en reaktion mellan YSZ-materialet i beläggningen och det legerade ceriumet möjlig. För att utvärdera utbredningen av denna reaktionsyta utfördes en SEM-EDS analys mellan YSZ-beläggningen och stålet. Figur 39 visar en SEM-bild och kartläggningen av denna yta.



Figur 39: SEM-EDS-analys av beläggning och stål.

Figuren visar att området där zirkonium och cerium interagerat är omkring 40 µm tjockt. Det ska jämföras med tjockleken hos det påverkade skiktet för den obelagda provbiten som var omkring 400 µm tjockt. Det tunna skiktet med interaktion mellan YSZ-beläggningen och stålet beror på att PVD-tekniken skapar ett mycket tätt skikt med mycket låg porositet vilket hindrar stålet att penetrera materialet.

#### Slutsatser

Det kan konstateras att YSZ-belagda gjutrör kan vara ett alternativ till traditionella gjutrör belagda med glas/kisel-pulver. YSZ-beläggningen penetrerar inte gjutrörsmaterialet vid förvärmning vilket de traditionella beläggningarna gör. Den innehåller inte heller några alkalier som kan reduceras med hjälp av grafit och därmed utgöra en syrekälla på det varma gjutrörets yta. Därutöver kan den skapa en bättre ytjämnhet på insidan av gjutröret som försvårar för befintliga inneslutningar att fastna på ytan. Dessutom kan den förhindra interaktion mellan gjutrörsmaterialet och legerat cerium.

#### *Pilotförsök med YSZ-belagda dysor hos Comdicast AB<sup>XVI</sup>*

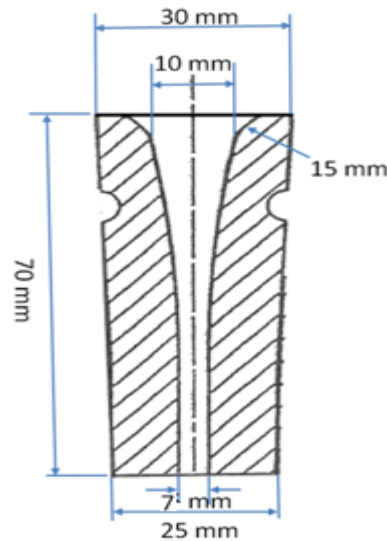
Då de utförda laborieförsöken med YSZ-belagda gjutrör varit mycket lyckade har försök i pilotskala avseende igensättning av dysor med denna beläggning utförts. PVD-belagda dysor med 25-35 g YSZ per dysa och tjockleken 210 µm användes. Försök gjordes med två stycken belagda dysor samt två stycken referensdysor, varav ett referensförsök användes för att bestämma tillsats av mischmetall (innehållande cerium), se Tabell 3.

<sup>XVI</sup> TO23-150, *Studies of clogging phenomena with plasma coated nozzles in pilot plant trials at Comdicast AB*, HDa

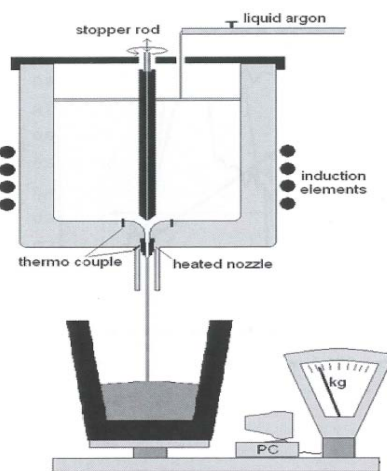
**Tabell 3:** Testade dysor

Prov	Beläggning
JK 1	Ingen beläggning Referens
JK 2	Ingen beläggning Referens
JK 3	Förvärmning av dysan till 300°C. 100 % ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , cirka 25-35 g pulvermix i dysan
JK 4	Förvärmning av dysan till 300°C. 100 % ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , cirka 25-35 g pulvermix i dysan

Schematiska bilder av använda dysor och försöksuppställning kan ses i Figur 40 och Figur 41.



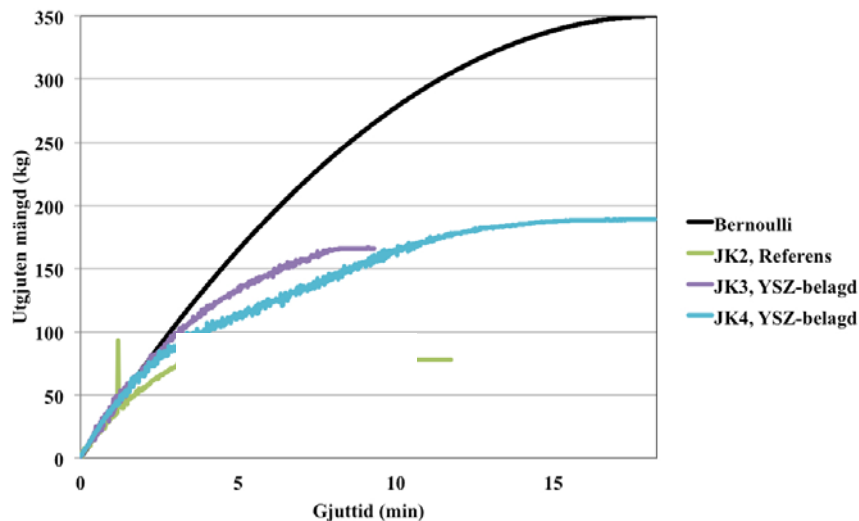
**Figur 40:** Schematisk bild av använd dya.



**Figur 41:** Schematisk bild av försöksuppställningen.

### Resultat

Vid en referensgjutning kunde 45 kg stål gutas ut innan avvikelse från Bernoullis ekvation, vilken beskriver uttömningshastigheten för ett givet utloppshåls diameter, indikerade att igensättning av dysan påbörjats. Då dysan var belagd med YSZ kunde motsvarande 70 till 90 kg stål gutas ut. Dessutom, hade mängden gjutet stålet mindre avvikelser från Bernoulli under hela gjutningen då belagda dysor användes jämfört mot referensdysan.



**Figur 42:** Jämförelse mellan Bernoullis ekvation och använda dysor.

#### Slutsatser

Pilotförsöken visar att YSZ-beläggning medför mindre tendenser till igensättningar i dysan. Detta indikerar i sin tur att så också borde vara fallet i driften.

#### *Pilotförsök med YSZ- och kalciumtitanatbelagda dysor hos Comdicast AB<sup>XVII</sup>*

Försök har även gjorts med dysor där en blandning av YSZ och kalciumtitanat använts. Enligt fasdiagrammet för kalciumtitanat – aluminiumoxid bildas en flytande fas vid aluminium-desoxiderat ståls gjuttemperatur. Detta förhindrar att aluminiumoxidinneslutningar fastnar på gjutrörets yta vid gjutning då de transformeras till flytande kalciumaluminater och därmed förhindras igensättningar. Dysor har belagts med olika blandningar av YSZ och kalciumtitanat enligt Tabell 4.

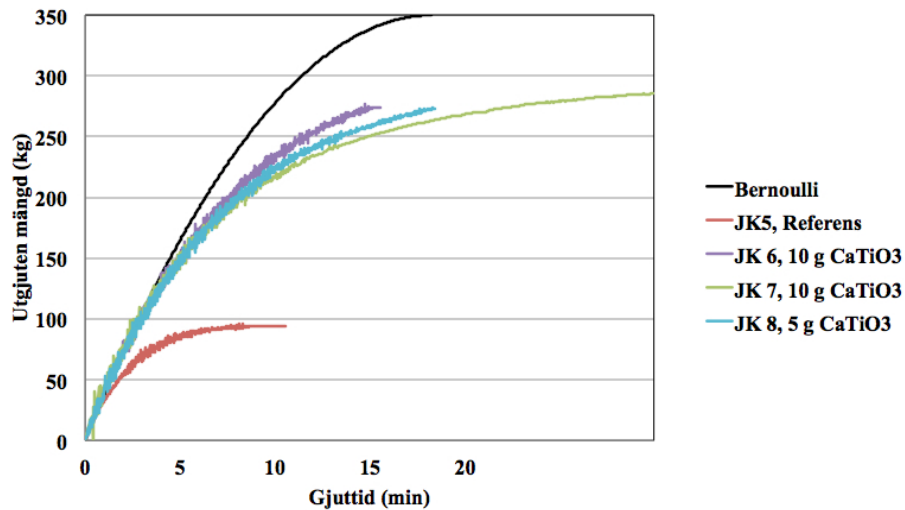
**Tabell 4:** Testade dysor

Prov	Beläggning
JK 5	Ingen beläggning, Referens.
JK 6	Förvärmning av dysan till 300°C. 100 g ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> blandas med 10 g CaTiO <sub>3</sub> .
JK 7	Förvärmning av dysan till 300°C. 100 g ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> blandas med 10 g CaTiO <sub>3</sub> .
JK 8	Förvärmning av dysan till 300°C. 100 g ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> blandas med 5 g CaTiO <sub>3</sub> .

#### Resultat

Figur 43 visar resultatet från försöken. Figuren visar dysorna belagda med en blandning av YSZ och kalciumtitanat kunde gjuta mellan tre och fyra gånger så mycket stål innan de sattes igen jämfört med referensdysan.

<sup>XVII</sup> TO23-150, *Studies of clogging phenomena with plasma coated nozzles in pilot plant trials at Comdicast AB*, HDa



**Figur 43:** Jämförelse mellan Bernoulli och belagda dysor

**Industriförsök med YSZ-belagda gjutrörssäten och stopparspetsar hos Outokumpu Stainless Avesta<sup>XVIII</sup>**

Driftförsök med YSZ-belagda gjutrörssäten och stopparspetsar har utförts. Gjutrörssäte och stopparspets belades med ett 210 µm tjock lager av YSZ, se Figur 44.

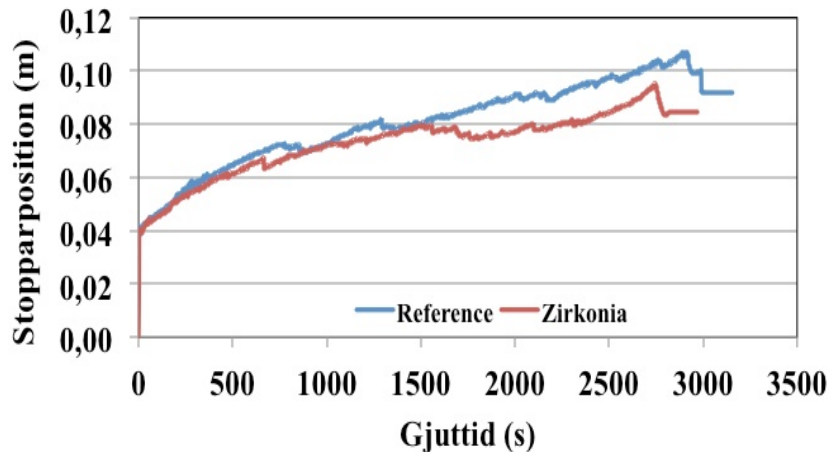


**Figur 44:** Belagt gjutrörssäte och stopparspets

Resultat

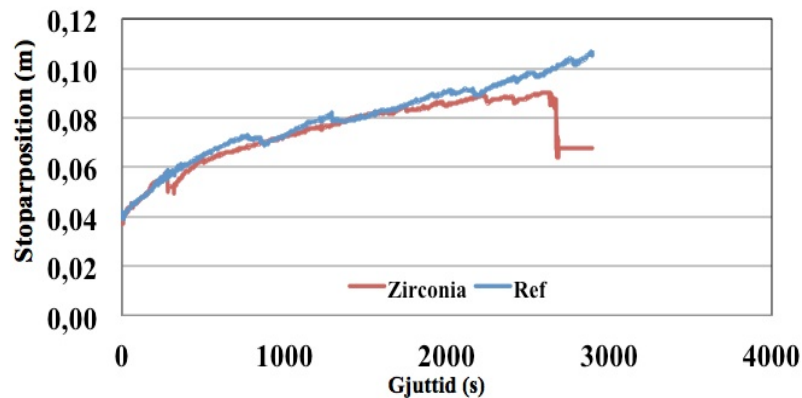
Försök med två belagda gjutrör och stoppare utfördes. I Figur 45 kan skillnaden i stopparposition, under gjutningen, mellan referensförsök och det första försöket med belagt gjutrör ses.

<sup>XVIII</sup> TO23-151, *Study of clogging phenomena with Yttrium stabilized Zirconia coating*, HDa



**Figur 45:** Stopparposition som funktion av gjuttid för belagt gjutrör 1 och referens vid försöken i Avesta.

Figuren visar att stopparen under referensförsöket behöver lyftas mer än vid försök 1 med belagt gjutrör. Detta beror på att vid referensförsöket bildades större igensättningar resulterande i att stopparen lyfts högre för att behålla konstant stålflöde. I Figur 46 visas försök 2 med belagt gjutrör.



**Figur 46:** Stopparposition som funktion av gjuttid för belagt gjutrör 2 och referens vid försöken i Avesta.

Vid det andra driftförsöket med belagt gjutrör kunde inte samma förbättring ses som vid det första försöket. Här är skillnaderna mellan försök och referens så små att inga säkra slutsatser kan dras.

#### Slutsatser

Försök visar att önskad avkolning av gjutrören kan erhållas hos samtliga undersökta verk då en homogen och riktig temperatur ej nås vid förvärmningen. Laboratorie- och pilotförsök visar att en täckande beläggning på gjutrörssäte och stopparspets ger bättre förutsättningar för en igensättningsfri gjutning. Vid de genomförda driftförsöken, två stycken, har inte dessa resultat kunnat entydigt verifieras.

Pilotförsök med aktiv beläggning, med CaO-TiO<sub>3</sub>-tillsats, för att reagera med inneslutningar och bilda en flytande fas vilken ej fastnar, ger lovande resultat. Driftförsök har däremot ej kunnat genomföras med denna typ av beläggning inom projekttiden.

Temperaturmätningar i gjutröret under gjutning visar att igensättningar i själva gjutröret kan detekteras på detta sätt.



### *Fortsatt arbete*

Flera driftförsök krävs för att klargöra effekten av belagda gjutrörssäten och stopparspetsar, och även effekten av CaTiO<sub>3</sub>-tillsats i beläggningsen.

## **5 UTLEVERANSER**

Utleveranser från projektet är:

Kunskap om förvärmningens effekt på gjutrörets porositet och glasyr visar att porositeten ej synes påverkas av förvärmningen. Däremot är glasyrens kvalitet starkt beroende av en korrekt uppvärmningshastighet och sluttemperatur för hela gjutröret. En felaktig förvärmning leder till en ofullständigt täckande glasyr och även till avkolning av gjutrörmaterialet.

Kunskap om tryck och flöde i gjutrör och kring stoppare visar att undertrycket i gjutröret kan minskas genom injektion av argon genom stopparen eller med en roterande stoppare. I båda fallen måste stopparen öppnas för att behålla flödet vilket torde leda till mindre problem med igensättningar runt stoppare och gjutrörssäte. I övrigt behövs mer arbete för att fullständigt klarlägga strömningen i gjutröret.

Försök med ny teknik för argoninjektion har inte kunnat påvisa någon förbättring av igensättningsläget.

Simuleringar och försök i pilotskala har visat att argoninjektion sänker undertrycket i gjutröret vilket leder till att stopparen öppnas (se ovan). Vid driftförsöken har detta däremot inte kunnat påvisas. Driftförsöken var dock för få för att dra några generella slutsatser och fler försök behövs därför.

Konceptet med roterande stoppare har utvecklats. Driftförsök visar att stopparen öppnar sig mera vid rotation vid gjutning av icke igensättningsbenägna stålsorter. Däremot visar försök med igensättningsbenägna stålsorter ingen effekt på gjutbarheten jämfört med det normala förfarandet hos målverket. Det har ännu inte klarlagts hur rotationen hos stopparna påverkar igensättningsbenägenheten.

Laboratorie- och pilotförsök har visat att nya beläggningar leder till färre igensättningar. De driftförsök som genomförts visar både förbättrad och oförändrad gjutbarhet då belagda gjutrör används. Antalet försök är ännu för få för att det ska gå att dra några definitiva slutsatser angående detta.

Arbetet inom desoxidation har gett ny kunskap om hur föroreningsnivåer hos desoxidationsmedel kan ha en avgörande betydelse för vilken inneslutnings som bildas, vilket sedermera påverkar utfallet vid stränggjutning. Vikten av rätt balans mellan desoxidationsmedel för att erhålla flytande inneslutningar vid Ca-behandling har även klarlagts.

När det gäller Ce-legerade stål visar produktionsuppföljningar att förekomsten av Ce-clusters är försvinnande lite i gjutlådan och att det är mer sannolikt att igensättningen byggs upp under gjutningens gång genom reaktioner mellan keramik och stål, alternativt adhesion av enskilda partiklar som därefter agglomereras, än att igensättningarna orsakas av större Ce-clusters som fastnar i passagen mellan gjutrör och stoppare. Vidare har tydliga indikationer erhållits på att en Ti-desoxidation innan Ce-tillsats kan ge bättre förutsättningar för stränggjutning med bättre gjututbyten.

## 6 MÅLUPPFYLLELSE

Det generella målet med projektet var att stödja de deltagande stålföretagen i deras strävan att:

- Öka sekvenslängderna inom stränggjutning
- Öka utbytet av stål

Mätbara mål formulerades för två av de deltagande verken:

- En hel charge av mischmetallegerat stål skall kunna stränggjutas då chargevikten ökar från 100 till 122 ton, Outokumpu Stainless Avesta.
- Sekvensfaktorn ökas till 2 för mischmetallegerade stål, Outokumpu Stainless Avesta.
- Gjututbytet för igensättningsbenägna stålsorter i billetsformat ökas till 93%, Sandvik Materials Technology.

Det generella målet har uppfyllts så till vida att projektet testat ett stort antal metoder med hypotesen att dessa leder till minskade igensättningar.

Hypotesen att en större stopparöppning leder till minskad igensättning har inte kunnat visas vid industriförsöken. Däremot har projektet genom simuleringar, fysikalisk modellering och driftförsök visat att både roterande stoppare och argoninjektion leder till större stopparöppning. Fler försök i industriskala krävs för att kunna avgöra hur detta påverkar igensättningstendenserna.

Hypotesen att en skyddande beläggning på insidan av gjutröret och på stopparpetsen leder till minskade problem med igensättning har inte heller kunnat visas fullt ut. Lovande industriförsök har genomförts men fler försök behövs. Här har också de inledande laboratorie- och pilotförsöken varit framgångsrika. Försöken visar att beläggningarna minskar igensättningsbenägenheten.

Beträffande rekommendationer angående "best praxis" avseende desoxidation har försök genomförda i pilotskala med FeCe istället för mischmetall visat att detta inte har någon betydelse för igensättningstendensen. Resultaten från andra pilotförsök indikerar dock att det med tillsatser av Ti går att reducera igensättningsbenägenheten hos Ce-legerade stål.

När det gäller tillsatsordning av titan, niob, aluminium och kalcium på låglegerade stål har ingen rekommendation redovisats. Målverket SSAB EMEA Luleå har under projektets gång prioriterat utveckling av gjutlådedesign istället för tillsatsordning av de beskrivna elementen. Balansen mellan Ca och Al-halter för att erhålla bra gjututbyten vid målverket SSAB EMEA Oxelösund har fastställts

När det gäller de mätbara målen har de inte kunnat uppfyllas. Som nämnts krävs ytterligare industriförsök med de metoder som utvecklats inom projektet innan dessa eventuellt kan implementeras i driften.

## 7 SLUTSATSER

Det utförda arbetet syftande till att reducera igensättningsproblematiken kan sammanfattas enligt nedan.

### A. Kartläggningar och termodynamiska beräkningar visar att

1. Användning av legeringar med lägre föroreningsnivåer ger förutsättningar för att erhålla ”rätt” inneslutning för att undvika igensättning
2. Bättre balans mellan tillsatt Ca och Al genererar flytande inneslutningar vilket underlättar stränggjutningen.
3. Beräkning av jämvikter innehållande REM är förknippat med stor osäkerhet.

### B. Försök i lab- och pilotskala visar att

1. Skyddande beläggningar av Yttrium-Stabiliserad-Zirkoniumoxid (YSZ) på de keramiska ytorna, som är i kontakt med stålet under de kritiska passagerna under stränggjutningen, ger förutsättningar för bättre gjutbarhet av Ce-legerade stål.
2. Reaktiv beläggning ( $\text{CaTiO}_3$ ) transformerar igensättningsbenägna  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -inneslutningar från fast till flytande form
3. Ar-injektion via stoppare påverkar flödesbilden och ger större spalt mellan stoppare och gjutrörssäte.
4. Ti-desoxidation före REM-tillsats ser ut att påverka gjutbarheten positivt.

### C. Fullskaleförsök visar att

1. Skyddande beläggningar av de keramiska ytor som kommer i kontakt med stålet kan vara en framkomlig väg vid gjutning av REM-legerade stål.
2. Försök med roterande stoppare visar positiva/negativa resultat beroende på stålsort.
3. Resultaten från pilotskaleförsöken med Ar-injektion i kokill har inte kunnat upprepas.
4. Modifieringar av gjutlåda för att premiera avskiljning av inneslutningar påverkar ej igensättningstendensen.

## 8 FÖRSLAG PÅ FORTSATTA FORSKNINGS- OCH IMPLEMENTERINGS-INSATSER

Projektet har ökat förståelsen för hur igensättningar uppkommer och hur dessa kan minskas. För att lösa igensättningsproblemen vid stränggjutning krävs dock fortsatt forskning. Nedan redovisas ett antal identifierade forskningsområden.

### Strömning:

- Tryck-strömningsförhållanden: Genom modellering samt experimentella försök studera effekten av argonspolningens inverkan på tryck och strömningsförhållanden i och kring stoppare, gjutrör, sätet m.m. Detta är mycket viktigt eftersom många av hypoteserna kring arbetet i föregående projekt bygger på att argonspolning och roterande stoppare påverkar tryck och strömning så att stopparen måste öppnas för att få genom samma mängd stål. En hypotes är att risken för igensättningar i sätet minskas genom att spaltens storlek ökas. I detta projekt har många frågor uppstått kring detta vilket medför att en mer noggrann undersökning behöver utföras.
- Simulering av igensättning: Tillverka gjutrör som simulerar ett igensatt gjutrör för fysikalisk modellering. Syftet är att studera flödesförhållandet med igensättningar, alltså hur påverkas flödet i SEN, kring stoppare m.m. om t.ex. en igensättning uppstår i nedre delen av SEN? Hur påverkas stopparkontrollen i jämförelse med ett icke igensatt gjutrör.
- Roterande stoppare: En patenterad metod med mål att reducera igensättningar är utvecklad både i simulator och genom industriella försök. Genom stopparens rotation skapas en hastighets komponent som ger högre motstånd i spalten mellan stoppare och gjutrörets tärning. Med ett större gap mellan stopparen och tärningen påverkas trycket och flödet i gjutröret vilket där hypotesen är att detta minskar igensättningen.

### Stålets interaktion med Keramiken:

- Fortsättning med plasma beläggningar:
  - Zirkonia- och magnesia beläggningar för gjutning av rostfria stål, industriförsök
  - Kalciumtitanat beläggning för aluminiumdesoxiderat stål, industriförsök.
- Modifiering av aluminainneslutningar med kalcium: trådmatning genom stopparstake
- Pilotförsök med plasma beläggningar på zirkoniadysor: öka kalciumtitanathalten i zirkonia blandningar: 15 %, 20, 30 %. Optimering av kalciumtitanat halten i plasma beläggningar. Optimering av partikelstorlek i kalcium titanat –zirkonia blandningar i syfte att få ett kompakt beläggningsskikt.
- Testa andra kolfria plasmabeläggningar.
- Inverkan av SENs förvärmningstemperatur på igensättningsprocessen

### Desoxidation:

- Termodynamisk utvärdering av vanligaste desoxidationsmedel och inneslutningar avseende klusterformering.
- Laboratorie- och/eller pilotförsök för att utvärdera effektiva metoder (som Ca- eller Ti-tillsatser) att öka gjutbarheten av utvalda stålsorter.
- Analys av mekanismer för bildning av inneslutningar och kluster på gjutrörets väggar vid gjutning.

## 9 REFERENSER

- [1] Andoh, M.; Muroi, T.; Ozeki, H.: Alumina Graphite Nozzles for Continuous Casting.
- [2] Taikabutsu Overseas (1995), Vol. 16, No. 4, pp. 37-42.
- [3] Okamoto, K.; Nakamura, T.; Kondo, M.: *Development of Alumina-Graphite Immersion Nozzle for Continuous Casting*. Iron and Steel Engineer Dec. (1982), pp. 47-52.
- [4] Fix, W.; Jacobi, H.; Wünnenberg, K.: *Collision-Controlled Growth of Composites in Casting Nozzles*. Steel Research 64 (1993), No. 1, pp. 71-76.
- [5] Köhler, K.U.; Andrzejewski, P.; Julius, E.; Haubrich, H.: *Steel Flow Velocity Measurement and Flow Pattern Monitoring in the Mould*. (1995) Steelmaking Conference Proceedings, pp. 445-449.
- [6] Bolger, D.: Stopper Rod and Submerged Nozzle Design and Operation in Continuous Casting. (1994) Steelmaking Conference Proceedings, pp. 531-537.
- [7] Hawkins, R.J.; Hassal, G.J.; De Santis, M.; Lodin, B.; Taylor, A.M.K.P.; Gardin, P.; Andrzejewski, P.; Tacke, K.-H.; Bergeles, G.; Rödl, S.: *Improvements of Cast Product Quality by Using Results from Mathematical and Physical Modelling of the Continuous Casting Process*. ECSC Draft Final Report (1998), Contr.-No. 7210.CA/835,429,901,836,332,173,174,702,175
- [8] Robinson, Q.; Hanse, E.; Dumas, P.: *Effect of Sub Entry Nozzle on Longitudinal Face Cracks of Continuously Cast Slabs*. Stahl und Eisen Special, Oktober (1994), pp. 108-111.
- [9] Horbach, U.; Rödl, S.; Abratis, H.; Höfer, F.: *Strömungsuntersuchungen in geregelten Verteilerausgüssen zur Vermeidung von Clogging*. Stahl und Eisen 115 (1995) Nr. 11, pp. 71-76.
- [10] Rackers, K.G.; Thomas, B.G.: *Clogging in Continuous Casting Nozzles*. Steelmaking Conference Proceedings (1995), pp. 723-734.
- [11] Matsui, T.; Ikemoto, T.; Sawano, K.; Sawada, I.: *Effects of Carbon and Silica in Submerged Entry Nozzles on Alumina Buildup*. Taikabutsu Overseas (1997), Vol. 18, No. 1, pp. 3-9.
- [12] Dawson, S.: Tundish Nozzle Blockage During the Continuous Casting of Aluminum-Killed Steel. I&SM April (1990), pp. 33-42.
- [13] Wilson, F.G.; Heesom, M.J.; Nicholson, A.; Hills, A.W.D.: *Effect of Fluid Flow Characteristics on Nozzle Blockage in Aluminum-Killed Steels*. Ironmaking and Steelmaking (1987), Vol. 14, No. 6, pp. 296-309.
- [14] Asano, S.; Ichikawa, K.; Tsikamoto, N.; Iida, E.; Morita, A.; Inoue, J.: *Water Model Simulation on Tundish Sliding Nozzle - Fluid Flow in Submerged Entry Nozzle*. Taikabutsu Overseas (1990), Vol. 11, No. 1, pp. 3-9.
- [15] Onishi, T.; Mitsushima, S.; Koyama, S.; Okushima, S.; Ito, S.; Sugihara, Y.: *Effect of Deoxidation of Steel on Nozzle Blockage in Slide Gate Valve*. Taikabutsu 26 (1974), pp. 128-142.
- [16] Ogibayashi, S.: Mechanism and Countermeasure of Alumina Buildup on Submerged Nozzle in Continuous Casting. Taikabutsu Overseas (1994), Vol. 15, No. 1, pp. 3-14.
- [17] Liisanantti V.; Pirinen J.; Matkala J.; Nevala H.: *Benefits of stopper rod argon injection at the Ruukki Production Raahе Works*. 6th European Continuous Casting Conference, (2008).
- [18] Kato T.; Masashi H.; Muto A.; Heraki S.; Kawamoto M.: *Observation of molten steel flow in submerged entry nozzle*. 6th European Continuous Casting Conference, (2008).
- [19] Nyström R.: *Kartläggning av igensättningar i gjutrörssäte och gjutrör*. MEFOS-rapport MEF07050, (2007).
- [20] Kojola N.; Ekerot S.; Andersson M.; Jönsson P.: *Förstudie av förutsättningar för cloggingforskning i Comdicast AB's försöksutrustning i Fagersta*. KTH-rapport, (2007).
- [21] Rödl S.: New strategies for clogging prevention for improved productivity and steel quality. RFCs, Contract nr. RFSR-CT-2005-00010.

- [22] Moonen W. H. L.: *Blowhole prevention by optimal feeding systems*. RFCS, Contract nr. 7210.CA/603, /185, /839, /222, /903.
- [23] Brabie V.: Studier angående bildningsmekanismer för igensättningar i gjutrör. KK-stiftelsen, Dnr. 2006/0191.
- [24] Ekerot S., Kojola N., Andersson M., Cloggingkontroll. Teknisk rapport TO23-135 (2009) från JK23051.

## **PROJEKTORGANISATION OCH MEDVERKANDE**

### **Forskningskommitté**

JK23052 Igensättningar

### **Projektperiod**

2010-01-01 till 2012-12-31

### **Ordförande**

Olle Sundqvist

AB Sandvik Materials Technology

### **Projektkoordinator**

Jonas Alexis

Swerea MEFOS AB

### **Forskningschef**

Lars-Henrik Österholm

Jernkontoret

### **Industrimedlemmar**

Ole Svein Klevan

Elkem SA, Trondheim, Norge

Håkan Kjellstorp

Erasteel Kloster AB, Söderfors

Patrik Lönnberg

Erasteel Kloster AB, Söderfors

Gabriella Brorson<sup>a</sup>

Outokumpu Stainless AB, Avesta

Björn Jönsson

Outokumpu Stainless AB, Avesta

Suvi Rannantie<sup>a</sup>

Ovako Wire OyAB, Lappvik, Finland

Arashk Memarpour<sup>b</sup>

AB Sandvik Materials Technology

Michail Ternovski<sup>a</sup>

AB Sandvik Materials Technology

Patrik Wikström

SSAB EMEA AB, Luleå

Niklas Kojola

SSAB EMEA AB, Oxelösund

Tomas Sohlgren

SSAB EMEA AB, Oxelösund

### **Adjungerade forskare**

Sven Ekerot

Ekerot Resources AB

Voicu Brabie

Högskolan Dalarna

Arashk Memarpour<sup>a</sup>

Högskolan Dalarna

Jennie Svensson

Högskolan Dalarna

Margareta Andersson<sup>a</sup>

Kungliga Tekniska Högskolan, Tillämpad Processmetallurgi

Pär Jönsson

Kungliga Tekniska Högskolan, Tillämpad Processmetallurgi

Andrey Karasev

Kungliga Tekniska Högskolan, Tillämpad Processmetallurgi

Erik Roos

Kungliga Tekniska Högskolan, Tillämpad Processmetallurgi

Anders Tilliander

Kungliga Tekniska Högskolan, Tillämpad Processmetallurgi

Thomas Jonsson

Swerea MEFOS AB

Ulf Sjöström

Swerea MEFOS AB

<sup>a</sup> I första delen av projektet

<sup>b</sup> Under projektets senare del

### **Styrgrupp**

Projektet drevs som ett samarbetsprojekt mellan Jernkontorets Teknikområde 23, Ljusbågsugnar och skänkmetsallurgi, och Teknikområde 24, Gjutning och stelning. Styrelserna för dessa utsåg en gemensam styrgrupp.

Stefan Gustafsson, ordförande*	Höganäs AB
Bo Rogberg**	AB Sandvik Materials Technology
Ewa S Persson**	Uddeholms AB
Margareta Rönnqvist*	SSAB EMEA AB, Luleå
Olle Sundqvist	AB Sandvik Materials Technology
Lars-Henrik Österholm	Jernkontoret

\* Utsedd av Teknikområde 23 \*\* Utsedd av Teknikområde 24



### PUBLIKATIONER

#### Tekniska rapporter

- D 848 Alexis J., Jonsson T., Brabie V., Svensson J., Memarpour A., Roos E., Tilliander A., Sundqvist O., *Förbättrad processteknik vid stränggjutning av stål speciellt känsliga för igensättningar*. Slutrapport april 2013.
- TO23-144 Jonsson T., *Argoninjektion i stoppare för att minska igensättningsgraden, Outokumpu Avesta*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-145 Jonsson T., *Ny teknik i gjutlåda samt modifierad argoninjektion, driftförsök SSAB EMEA Luleå*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-146 Jonsson T., *Kartläggning förvärmning SSAB EMEA Luleå*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-147 Sjöström U., Nyström R., *Roterande stoppare – ett försök att motverka igensättning under stränggjutning*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-148 Memarpour A., Brabie V., *Studies on plasma coatings for clogging reduction during continuous casting of steel*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-149 Svensson J., Memarpour A., Brabie V., *Decarburization during preheating of the submerged entry nozzle*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-150 Svensson J., Memarpour A., Ekerot S., Brabie V., *Studies of clogging phenomena with plasma coated nozzles in pilot plant trials at Comdicast AB*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-151 Svensson J., Memarpour A., Ekerot S., Brabie V. *Study of clogging phenomena with Yttrium stabilized Zirconia coating*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-152 Yanyan Bi, Roos E., Karasev A., Jönsson P.G., *Three-dimensional evaluation of REM clusters in stainless steel*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-153 Roos E., Yanyan Bi, Karasev A., Jönsson P.G., Jönsson B, *Mapping of the influence of deoxidation on clogging at Outokumpu Stainless Avesta Works*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-154 Roos E., Tilliander A., Karasev A., Jönsson P.G., Ekerot S., *Pilot scale trials to study clogging phenomena in Ce-alloyed stainless steel, Comdicast Fagersta*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).
- TO23-155 Kweitsu E.K., Roos E., Karasev A., *Characterisation of inclusions during the production of stainless steel grade subject to clogging*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).

TO23-156 Ma Xuejiao, Roos E., Kojola N., *Nozzle Clogging during continuous casting of Calcium-treated Aluminium killed steel*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).

TO23-157 Roos E., Yanyan Bi, Karasev A., Jönsson P.G., Memarpour A., *An experimental and thermodynamic study of high Si-containing stainless steel grades at Sandvik Materials Technology*. Teknisk delrapport Jernkontoret (2013).

### **Vetenskapliga artiklar**

A. Memarpour, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Studies of effect of glass/silicon powder coatings on clogging behaviour of submerged entry nozzles when using REM alloyed stainless steels*, *Ironmaking and Steelmaking*, 2011, 38, (3), 229-239.

A. Memarpour, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Post-mortem study of the internal coated SENs (Submerged Entry Nozzle) respecting clogging*, peer-reviewed artikel, METEC InSteelCon® proceeding of the 7th European Continuous Casting Conference (ECCC 2011), Refractory material and tundish lining, Düsseldorf, 27 June- 1 July, 2011.

A. Memarpour, V. Brabie, P.G. Jönsson, *The effect of Zirconium disilicide (ZrSi<sub>2</sub>) additions on the Carbon oxidation behaviour of Alumina/Graphite refractory materials*, *ISIJ International*, Vol. 50, No. 11, pp. 1612–1621, 2010.

A. Memarpour, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Studies on the decarburization of commercial submerged entry nozzles*, *Steel Grips*, 9 (2011) *Plants & Equipment*, 121-127.

A. Memarpour, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Decarburization and clogging behaviour of yttria stabilized zirconia coatings applied to SEN's Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C refractories by plasma PVD*, *Steel Grips*, 10 (2012) *Plants & Equipment*, 353-363.

E. Roos, A. Karasev and P.G. Jönsson, *Effect of Si and Ce contents on the castability of a REM alloyed stainless steel*. Insänd till *Ironmaking and Steelmaking* 2013.

E. Roos, A. Karasev and P.G. Jönsson, *Post-mortem studies of clogging position and composition at pilot-scale trials with REM treated stainless steel*. Under arbete.

E. Roos, A. Karasev and P.G. Jönsson, *An experimental and thermodynamic study of non-metallic inclusions in high Si-containing stainless steels regarding clogging during casting*. Under arbete.

J.K.S. Svensson, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Studies of the decarburization phenomena during heating of Submerged Entry Nozzles (SEN) in continuous casting processes*. Under arbete.

J.K.S. Svensson, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Studies of new coating materials to prevent clogging of the Submerged Entry Nozzle (SEN) during continuous casting of Alumina deoxidised steel*. Under arbete.

J.K.S. Svensson, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Studies of preventing of clogging in the Submerged Entry Nozzle (SEN) with Yttria stabilized Zirconia plasma coating during continuous casting of Cerium deoxidised steel*. Under arbete.

### **Examensarbeten**

Kweitsu E.K., Roos E., Karasev A., *Characterisation of inclusions during the production of stainless steel grade subject to clogging*. Examensarbete KTH, 2011.

Ma Xuejiao, Roos E., Kojola N., *Nozzle Clogging during continuous casting of Calcium-treated Aluminium killed steel*. Examensarbete KTH, 2010.

Takei K., Lindén Bergman F., *Clogging prevention in submerged entry nozzles focusing on CaTiO<sub>3</sub> as a coating material*. Examensarbete KTH, 2012.

### **Avhandlingar**

A. Memarpour: “An Experimental Study of Submerged Entry Nozzles (SEN) Focusing on Decarburization and Clogging”, Doctoral Thesis in Applied Process Metallurgy, KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden 2011.

J.K.S Svensson: Licentiatavhandling baserad på resultat från projektet, KTH hösten 2013 (planeras).

E. Roos: Licentiatavhandling baserad på resultat från projektet, KTH hösten 2013 (planeras).

### ANNAN RESULTAT- OCH KUNSKAPSFÖRMEDLING

#### Seminarier, möten

Jennie Svensson har presenterat Bilaga 1 till TO23-150 vid en doktorandkurs "Betydelsen av inneslutningar vid tillverkning av stålprodukter", på KTH feb 2012.

Jennie Svensson presenterade sin forskning vid HDA:s doktoranddag den 28 maj 2013.

Klara Takei och Felicia Lindén Bergman presenterade resultat från uppvärmning av CaTiO<sub>3</sub>-pulver (TO23-150 Bilaga 2) på Jernkontoret i maj 2012.

Asumadu Tabiri Kwayie presenterade "Investigation of cluster development and distribution in REM treated stainless steel" vid MH2450 Internationellt seminarium i metallurgiska processer på KTH 2011. Innehöll resultat från undersökningar inom projektet.

Fei Huyan och Reddy Tilleti presenterade "Characterization of inclusions in Calcium-treated Aluminium killed steel" vid MH2450 Internationellt seminarium i metallurgiska processer på KTH 2011. Innehöll resultat från undersökningar inom projektet.

Erik Roos, Studies of nozzle clogging mechanisms in industry and pilot scale, University of Science and Technology Beijing, Kina, maj 2012.

Erik Roos, Studies of nozzle clogging mechanisms in both industry and pilot scale, Poster session RAE (Research Assessment Exercise), KTH Materialvetenskap juni 2012.

Olle Sundqvist presenterade projektet vid Stålforskningsprogrammets programkonferens på Jernkontoret, 4-5 september 2012.

Olle Sundqvist presenterade projektet vid Metallurgmötet, KTH, 5 februari 2013.

Halvtidsseminarium på Jernkontoret för forskningskommittén och andra inbjudna, 15 dec 2011.

Slutseminarium på Jernkontoret för forskningskommittén och andra inbjudna, 19 dec 2012.

#### Internationella konferenser

A. Memarpour, V. Brabie, P.G. Jönsson, *Post-mortem study of the internal coated SENs (Submerged Entry Nozzle) respecting clogging*, 7th European Continuous Casting Conference (ECCC 2011), Refractory material and tundish lining, Düsseldorf, 27 juni- 1 juli 2011.

Yanyan Bi, Erik Roos, Andrey Karasev, Pär G. Jönsson, Three dimensional evaluation of REM clusters in stainless steel. The 8th Inter. Conf. on Clean Steel, Budapest, Ungern, 14-16 maj 2012. No f06-02, pp 1-9.

Yanyan Bi, Erik Roos, Andrey Karasev, Pär G. Jönsson, Three dimensional evaluation of inclusions during the production of stainless steel. 9th Inter. Conf. On Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN 12), Beijing, Kina 27-31 maj 2012, No W120, pp 1-11.

## Bilaga 4

### 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 forskningsprogram, Strategiskt stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012 (Stålforskningsprogrammet), 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 naturainsatser, 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 30 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 inom 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.





## 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 • Kungsträdgårdsgatan 10  
Telefon 08 679 17 00 • Fax 08 611 20 89  
E-post [office@jernkontoret.se](mailto:office@jernkontoret.se) • [www.jernkontoret.se](http://www.jernkontoret.se)

